# МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)

На правах рукописи

lonof

# ГОНОВ МИХАИЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ

# Деформация и разрушение бетонов и фибробетонов при скоростях деформации от 10<sup>-3</sup> до 10<sup>4</sup> с<sup>-1</sup>

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Константинов Александр Юрьевич

Нижний Новгород - 2022

# Оглавление

Введение	5
Глава 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ	
ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ	11
1.1. Экспериментальные исследования	.11
1.1.1. Методы нагружения при различных скоростях деформации	12
1.1.2. Особенности методов испытаний при высоких скоростях деформации	13
1.1.3. Методы измерения высокоскоростной деформации	16
1.1.4. Динамические свойства и характер разрушения хрупких материалов	17
1.1.4.1. Испытания на одноосное сжатие	.18
1.1.4.2. Испытания на трехосное сжатие	.18
1.1.4.3. Испытания на растяжение	.20
1.1.5. Поведение хрупких материалов при высокой скорости деформации	22
1.1.5.1. Динамическое поведение при одноосном сжатии	.22
1.1.5.2. Динамическое поведение при трехосном сжатии	.23
1.1.5.3. Динамическое поведение при растяжении	.23
1.1.6. Физические факторы, влияющие на динамическое механическое поведение	24
1.3. Выводы по главе 1	.25
Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ФИБРОБЕТОНОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ	
НАГРУЖЕНИИ	27
2.1. Типы фибробетона со стальной фиброй	.31
2.2. Динамические свойства фибробетона с различной объемной долей и формой стально	ой
фибры при различных видах испытаний	.32
2.2.1. Результаты испытаний фибробетонов с использованием вертикального копра	33
2.2.2. Испытания с использованием методики РСГ	34
2.2.3. Другие испытания	36
2.2.4. Промежуточный анализ	38
2.3. Динамическое поведение конструкций из фибробетона с различной объемной долей	И
формой стальной фибры	.39
2.3.1. Фибробетон со стальными волокнами	39
2.3.2. Высокопрочный фибробетон	40
2.3.3. Специальный сверхвысокопрочный фибробетон	40
2.3.4. Комбинированный фибробетон (полифибробетон)	42
2.4. Выводы по главе 2	.43

Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ46
3.1. Метод Кольского46
3.1.1. Основные принципы РСГ 46
3.1.2. Основные зависимости метода Кольского 48
3.2. Модификации метода Кольского51
3.2.1. Модификация метода Кольского для определения прочности при растяжении 51
3.2.2. Модификация метода Кольского для определения прочности при срезе 53
3.2.3. Модификация метода Кольского для исследования хрупких материалов в условиях
ограничения радиальной деформации 54
3.3. Экспериментальные установки метода Кольского и средства регистрации динамических
процессов
3.4. Программа автоматических измерений и обработки экспериментальных данных59
3.5. Выводы по главе 3
Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИИЯ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ
НЕСКОЛЬКИХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ БЕТОНА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ67
4.1. Методика изготовления бетонных образцов
<ol> <li>4.2. Мелкозернистый бетон класса В22,5</li></ol>
4.2.1. Результаты динамических испытаний на одноосное сжатие
4.2.2. Результаты динамических испытаний на растяжение 74
4.2.3. Результаты динамических испытаний на срез 83
4.3. Результаты исследования армированного бетона
4.3.1. Результаты динамических испытаний армированного бетона на одноосное сжатие 86
4.4. Исследование мелкозернистого бетона и фибробетона, армированного полимерной,
стальной и комбинированной фиброй89
4.4.1. Результаты статических испытаний бетона и фибробетонов при сжатии
4.4.2. Результаты динамических испытаний бетона и фибробетонов на одноосное сжатие 92
4.4.3. Результаты динамических испытаний мелкозернистого бетона и фибробетонов на
сжатие в обойме при одноосной деформации102
4.4.4. Результаты динамических испытаний при раскалывании 113
4.4.5. Результаты динамических испытаний при срезе 120
4.5. Выводы по главе 4125
Глава 5. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ И
РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА И ФИБРОБЕТОНА127
5.1. Модели поведения бетонов библиотеки LS-DYNA для решения динамических задач128

5.1.1. Модель №72
5.1.2. Модель №159
5.2. Идентификация моделей поведения бетона130
5.2.1. Идентификации параметров модели №72
5.2.2. Идентификации параметров модели №159
5.3. Экспериментальное исследование, параметрическая идентификация и математическое
моделирование процессов высокоскоростного деформирования бетона142
5.3.1. Описание методик верификационного исследования 142
5.3.2. Результаты натурных испытаний 145
5.3.3. Верификация моделей деформирования и критериев разрушения бетона 150
5.4. Выводы по главе 5160
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ164

## Введение

Актуальность исследования. Параллельно росту техногенности нашей цивилизации растет количество аварийных ситуаций, подвергающих конструкции зданий и сооружений гражданского, промышленного или военного назначения высокоскоростным динамическим воздействиям (в виде ударов и взрывов). Различные хрупкие материалы, такие как бетон и его разновидности (фибробетон, железобетон, специальные виды бетонов), керамические и силикатные материалы, а также некоторые виды горных пород могут подвергаться высокоинтенсивным динамическим нагрузкам. Помимо техногенных катастроф на передний план выходят участившиеся природные катастрофы, связанные с изменением климата на нашей планете. Различные природные бедствия сопровождаются участившимися за последние десятилетия ураганами, торнадо, наводнениями и сильными землетрясениями. Еще одним фактором возникновения динамических нагрузок является террористические акты в виде подрыва различных взрывчатых и горючих веществ. Главная опасность подобных явлений заключается в потере человеческих жизней. Угроза жизни возникает как при утрате несущей способности зданий и сооружений, так и при возникновении множества ранений осколками хрупких материалов, образующимися при динамическом разрушении зданий и сооружений.

Как известно, одна из главных задач науки – это прогнозирование возможных будущих событий с использованием математического моделирования. Для определения несущей способности конструкций или конкретных материалов в отношении будущей нагрузки необходимо экспериментально изучить свойства материала, чтобы впоследствии создать математическую модель, рассчитать и спроектировать конструкцию, способную выдержать различные нагрузки. В связи с этим на начальных этапах проектирования объектов повышенной ответственности, уникальных зданий и сооружений, объектов атомной, энергетической или военной отрасли необходимо учитывать вероятность динамического воздействия, характеризующегося малой продолжительностью и высокой интенсивностью протекающих процессов, для понимания которых необходимо изучение свойств материалов применительно к таким воздействиям. Стремительное развитие вычислительной техники способствовало формированию новых подходов при расчете напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности конструкций с использованием вычислительной механики. При расчете прочностных показателей конструкций на сегодняшний день используются такие программновычислительные комплексы, как ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS, ЛОГОС и др. С помощью трехмерного компьютерного моделирования поведение реальных материалов и конструкций под действием нормальных или экстремальных (аварийных) нагрузок заменяется их математической моделью, для оснащения которой необходимы различные экспериментальные данные, достаточно большое количество параметров и констант.

Тщательное изучение основных динамических физико-механических характеристик

(диаграммы деформирования, модули упругости, предел прочности, предельные характеристики пластичности и т.д.) материала ведет к надежному и рациональному (экономически целесообразному) проектированию объектов повышенной ответственности, работающих в условиях интенсивных импульсных воздействий.

В связи с вышесказанным, исследование физико-механических характеристик таких хрупких конструкционных строительных материалов, как бетон и фибробетон, при высокоскоростном деформировании и разрушении является актуальной научной задачей, имеющей большое прикладное значение.

<u>Степень разработанности темы.</u> Современное состояние дел указывает на ряд нерешенных задач в области изучения динамических свойств строительных материалов, связанных с отсутствием сертифицированных экспериментальных стендов и методик для динамических испытаний с соответствующими программами автоматизации эксперимента и обработки данных. Развитие строительных технологий привело к появлению новых высокопрочных материалов на основе цемента, способных более качественно противостоять аварийным техногенным факторам и природным стихиям. Появление новых материалов и встречающаяся противоречивость результатов исследований подпитывает интерес к данной тематике на мировых форумах и конференциях.

Много ученых, как в нашей стране, так и за рубежом, занимались и занимаются изучением характера поведения различных хрупких материалов (бетонов, керамик, горных пород), непосредственно используемых в строительной отрасли. Значительный вклад в освоение данной области механики внесли Ю.М. Баженов, А.М. Брагов, В.А. Велданов, В.И. Ерофеев, А.К. Ломунов, Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров, Р.Н. Bischoff, A. Brara, E. Cadoni, W. Chen, J.E. Crawford, F. Dai, J.E. Field, M.J. Forrestal, H. Hao, Y. Hao, S. Huang, B.L. Karihaloo, J.R. Klepaczko, Q. Li, L.J. Malvar, L.E. Malvern, H. Meng, S.H. Perry, C.A. Ross, K. Xia, Q.B. Zhang, J. Zhao и многие другие.

**Цель работы** заключается в исследовании особенностей динамического поведения двух мелкозернистых бетонов, фибробетонов, а также экспериментально-теоретическом изучении их динамических свойств при высоких скоростях деформации и определении комплекса различных физико-механических характеристик, формирующих в дальнейшем ключевые параметры математических моделей деформирования и разрушения указанных материалов.

#### Ключевые задачи:

– Аналитический обзор работ отечественных и зарубежных авторов в области исследования динамических свойств бетонов и фибробетонов.

– Адаптация метода Кольского для экспериментального исследования динамических свойств мелкозернистых бетонов, фибробетонов при различных видах НДС.

– Разработка и создание программного комплекса автоматизированной обработки

6

экспериментальных данных.

– Разработка технологии изготовления различных образцов бетонов и фибробетонов для испытаний при различных видах НДС.

– Проведение комплекса экспериментальных исследований физико-механических свойств мелкозернистого бетона и фибробетонов с различными видами фиброволокон при высокоскоростном деформировании и разрушении с использованием модификаций метода Кольского, динамической тензометрии, высокоскоростной фотосъемки; обработка и анализ полученных результатов.

 Проведение идентификации и верификации математических моделей бетона и фибробетона при высокоскоростной деформации и разрушении.

#### Научная новизна:

– Получены опытные данные на основе метода Кольского и его модификаций с использованием имеющихся в НИИМ ННГУ экспериментальных стендов; установлены закономерности высокоскоростного деформирования и разрушения ряда бетонов и фибробетонов при скоростях деформации 3·10<sup>2</sup> – 10<sup>3</sup> с<sup>-1</sup>.

 Разработана специализированная программа обработки экспериментальных данных для получения различных характеристик хрупких материалов.

– На основании проведенного комплекса экспериментов с использованием метода Кольского и его модификаций, высокоскоростной фотосъемки получены закономерности динамической деформации и разрушения ряда бетонов при высокоскоростном нагружении среди которых: мелкозернистый бетон класса B22,5, B25, фибробетоны с полимерной, стальной и комбинированной фиброй, армированный каркасами бетон.

– На основании полученных результатов проведена параметрическая идентификация двух математических моделей MAT\_CONCRETE\_DAMAGE\_REL3 (№72) и MAT\_CSCM (№159) из библиотеки программного комплекса LS-DYNA, использующихся для описания поведения хрупких материалов при высокоскоростном деформировании и разрушении.

 Выполнена верификация идентифицированных моделей на основании сравнения результатов натурных и вычислительных экспериментов.

#### Практическая значимость

Проведены исследования, касающиеся развития системы базовых экспериментов для получения комплекса механических свойств для идентификации моделей деформирования и критериев разрушения бетона и фибробетонов, а также разработки системы верификационных экспериментов для оценки адекватности моделей деформирования и разрушения, Полученный комплекс механических свойств бетона и фибробетона, а также верифицированы модели деформирования и критерии разрушения бетона, могут быть рекомендованы к использованию ведущими конструкторами отечественных исследовательских центров, занимающимися проектированием строительных сооружений атомных станций, опасных технологических производств химической промышленности, гражданских объектов, а также объектов оборонного (РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ, ЦНИИСК, комплекса ОКБМ Африкантов, ИМ. В.А.Кучеренко, ЦНИИПСК им.Мельникова, НИИЖБ им.А.А.Гвоздева, НИИОСП ИМ. Н.М.Герсеванова, ОА ИК АСЭ, ОАО «Атомэнергопроект»), что позволит повысить уровень проектирования сложных экологически подвергающихся опасных систем, высокоэнергетическим импульсным воздействиям.

<u>Методология и методы исследования</u> основаны на применении метода Кольского на основе разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) и ряда его модификаций, реализованных на оригинальных испытательных установках НИИМ ННГУ, с использованием созданной программы обработки экспериментальных данных. Регистрация первичной экспериментальной информации осуществлялась с помощью методов динамической тензометрии, высокоскоростной цифровой видеосъемки с использованием камеры FASTCAM Mini UX100. При проведении идентификации параметров математических моделей и их верификации использовался расчетно-экспериментальный подход, основанный на согласовании результатов натурных испытаний и численных экспериментов. Численные расчеты проводилось с использованием двух математических моделей расчетного комплекса LS-DYNA. (лицензия Customer #244793)

### Положения, выносимые на защиту

1. Реализация метода РСГ и ряда его модификаций с использованием высокоскоростной фотосъемки и системы обработки фотоизображений.

2. Созданный и запатентованный программный комплекс для автоматизированной обработки экспериментальных данных<sup>1</sup>.

3. Экспериментальные данные по физико-механическим свойствам и их зависимостям от скорости деформации или скорости роста напряжений мелкозернистых бетонов, различных фибробетонов и армированного малогабаритными каркасами мелкозернистого бетона.

4. Методики и результаты идентификации математических моделей бетона из библиотеки LS-DYNA MAT\_CONCRETE\_DAMAGE\_REL3 (№72) и MAT\_CSCM (№159).

5. Методики и результаты верификации указанных моделей бетона

# Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается использованием проверенных многими отечественными и зарубежными исследователями методов определения динамических характеристик материалов (метод Кольского), сопровождающихся детальным анализом результатов с использованием высокоскоростной фотосъемки, применением

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020666341

программы обработки экспериментальных результатов и построения динамических диаграмм и сопоставлением полученных данных с экспериментальными данными других исследований, выполненных в нашей стране и за рубежом.

Основные результаты исследования представлены в 5 научных статьях, опубликованных в журналах из перечня ВАК и 12 тезисах, которые докладывались: XIV Международной научнотехнической конференции «Dynamic of Technical Systems» (Ростов-на-Дону, 2018 г.); 17-й научно-технической конференции «Молодежь в науке» (Саров, 2018 г.); XLVII, XLIX Международной летней школе-конференции "Современные проблемы механики (APM2019, APM2021" (Санкт-Петербург, 2019, 2021 гг.); Международной конференции «International Conference on Nonlinear Solid Mechanics (ICoNSoM2019)» (Рим, 2019 г.); XXV, XXVI, XXVII Международных симпозиумах «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова (Кременки, 2019, 2020 и 2021 гг.); Международной научной конференции «Проблемы прочности, динамики и ресурса» (Нижний Новгород, 2019, 2020 гг.); 1-й виртуальной европейской конференции «First Virtual European Conference on Fracture (VECF1)» (2020 г.). Также автор работы является финалистом V Всероссийского форума «Наука будущего – наука молодых» (Москва, 2020 г.).

**Публикации.** Результаты экспериментальных исследований диссертации опубликованы в 21 публикации [17-22, 56, 57, 78, 80, 184-195,], из них 3 [185, 186, 195] опубликованы в ведущих научных журналах (ВАК) и 5 статей [18, 20, 21, 56, 57] в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и/или Web of Science.

# <u>Личный вклад:</u>

 изготовление бетонных, железобетонных и фибробетонных образцов для статических и динамических испытаний [192];

– проведение комплекса динамических экспериментов на сжатие, растяжение, раскалывание и срез [17-22, 56, 57, 80, 180, 181, 184-191, 195];

– обработка полученных данных и построение динамических диаграмм и основных зависимостей [19, 20, 56, 57, 78, 180, 184-187, 189,];

Разработка программного комплекса обработки экспериментальных данных выполнена в коллективе соавторов. Постановка задач и общее руководство исследованиями принадлежит А.Ю. Константинову. В обсуждении результатов исследований активное участие принимали Л.А. Игумнов, А.М. Брагов и А.К. Ломунов. Помощь и содействие при проведении экспериментов оказывали Д.А. Ламзин, Вл. Вас. Баландин, Вл. Вл. Баландин. Помощь при изучении экспериментальных установок и методик проведения экспериментов оказывал А.Р. Филиппов. А.Ю. Константинов оказывал помощь в проведении идентификации и верификации математических моделей. Вл. Вл. Баландин оказал помощь в проведении экспериментов с армированным бетоном на установке РСГ-60. А.В. Басалин оказал помощь при работе с высокоскоростной камерой.

<u>Диссертационная работа выполнена при поддержке</u> различных фондов, ведомств и государственных программ:

- аналитический обзор, приведенный в главе 1, выполнен при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации в рамках Постановления №220 от 09.04.2010 (№14.Y26.31.0031 от 05.02.2018)
- Исследование поведения инновационных фибробетонов в главе 2 выполнено при финансовой поддержке Государственным заданием Минобрнауки России (№0729-2020-0054);
- глава 3 выполнена при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (внутренний номер H-496-99\_2021-2023);
- экспериментальное исследование различных видов бетона и фибробетона, представленное в главе 4 выполнено за счет гранта РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90225;
- численное моделирование, идентификация и верификация, представленные в главе
   5 выполнены при поддержке проекта РНФ № 21-19-00283.

# Глава 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В данной главе рассмотрено краткое введение в историю исследования динамики хрупких строительных материалов, яркими представителями которых являются широко применяемые бетоны, железобетоны и перспективные фибробетоны. В обзор также частично включен анализ способов испытаний при исследовании динамических свойств горных пород, весьма похожих по поведению на бетонные материалы. Рассмотрены способы высокоскоростного нагружения, методы проведения динамических испытаний, методики измерения динамических усилий и деформаций, а также получения диаграмм «напряжение-деформация» при высоких скоростях деформации с описанием полученных динамических свойств. Рассмотрены некоторые критерии динамического разрушения, общие для различных хрупких материалов, а также некоторые перспективы дальнейших исследований.

# 1.1. Экспериментальные исследования

Одной из важных задач механики твердого деформируемого тела является изучение механических свойств хрупких конструкционных материалов (различные бетоны И фибробетоны, керамические и силикатные материалы, горные породы и т.д.) под воздействием динамических нагрузок, при которых повышение скорости нагружения приводит к изменению механических свойств и характера разрушения материалов. Источниками динамических воздействий могут быть сейсмические, ударные и взрывные нагрузки. Понимание характера динамического воздействия на хрупкие материалы играет значительную роль в решении множества инженерных задач: проектирование защитных сооружений, атомных станций, ответственных конструкций, подвергающихся динамическим нагрузкам, или находящихся в сейсмически опасных регионах, а также в регионах, подвергающихся экстремальным климатическим нагрузкам (тайфуны, цунами, наводнения, землетрясения и т.д.).

Знания в области динамики хрупких материалов применяются при анализе техногенных и природных катастроф, при угрозе террористических атак, добыче полезных ископаемых, в гражданском и промышленном строительстве. Однако, руководства и стандарты для динамических испытаний и последующего проектирования в целом отсутствуют. При этом, продвижение в понимании характера поведения хрупких материалов при динамических нагрузках в значительной степени связано с достижениями в развитии и использовании экспериментальных методов. Особый интерес представляют разработки, целью которых является создание надежных и обоснованных методов динамических испытаний и критического анализа механических свойств хрупких материалов в лабораторных условиях.

### 1.1.1. Методы нагружения при различных скоростях деформации

Обзоры различных методов нагружения при испытаниях хрупких конструкционных материалов, таких как бетон, строительный раствор, керамика и др. представлены в [45, 52, 79, 118].

На рисунке 1.1 показана классификация методов нагружения и механических состояний для хрупких материалов в широком диапазоне изменения скоростей деформации [170].



Рисунок 1.1 – Классификация методов нагружения и механических состояний для хрупких материалов при широком диапазоне скоростей деформации

Термин «промежуточная» или «средняя» скорость деформации или "квазидинамическая" обычно используется для описания механических свойств хрупких материалов при скоростях деформации от  $10^{-1}$  до  $10^2$  с<sup>-1</sup>. В этом диапазоне влияние скорости деформации является весьма малым. Скорости деформации  $10^2$ – $10^4$  с<sup>-1</sup> обычно рассматриваются как диапазон высокой скорости деформации, для которой наиболее результативным методом исследования динамических свойств являются копры с падающим грузом и метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ). При высоких скоростях деформации для правильной интерпретации данных эксперимента должно быть учтено влияние сил трения, инерции и

влияние дисперсии волн. Скорость деформации 10<sup>4</sup> с<sup>-1</sup> и выше обычно рассматривается как режим высокоскоростного удара, для исследования которого успешно применяются метод соударения плоских пластин.

Фундаментальная разница между квазистатическими и динамическими испытаниями заключается в том, что при более высоких скоростях деформации влияние сил инерции и дисперсии становится более выраженным. При высоких скоростях деформации происходит переход от номинального изотермического состояния к адиабатическому состоянию.

#### 1.1.2. Особенности методов испытаний при высоких скоростях деформации

Динамические испытания характеризуются значительной кратковременностью измеряемых процессов (десятки-сотни микросекунд), что затрудняет регистрацию процессов и синхронизацию запуска регистрирующей аппаратуры. На измерения оказывают влияние инерционность регистрирующих датчиков, волновые явления в образце и нагружающем устройстве, а также частотная характеристика усиливающей и регистрирующей аппаратуры. Для диаграммы процесса деформирования построения динамической образца необходима регистрация нагрузки и перемещений или деформации. Для измерения нагрузки используют специальные динамометры. Основное требование, предъявляемое к динамометру, заключается в независимости его показаний от скорости деформации образца. Простейшим вариантом динамометра является образец с удлиненной динамометрической частью [196]. Преимущество силоизмерителя с длинным стержневым волноводом очевидно и выражается в отсутствии искажений из-за собственных колебаний силоизмерителя и элементов установки [183]. Для определения напряжений и деформаций образцов при динамическом нагружении необходимы специальные безынерционные приборы. При динамических испытаниях широкое распространение получил электрический способ определения усилий и деформаций, использующий схему: датчик (первичный преобразователь) – усилитель (промежуточный преобразователь) – осциллограф (измерительный прибор). Вследствие невозможности прямого измерения деформации рабочей части образца при его деформировании, как при статических испытаниях, приходится применять косвенные методы измерения деформации.

Одним из самых широко применяемых методов испытаний при высоких скоростях деформации является метод разрезного стержня Гопкинсона или метод Кольского, разработанный Кольским [76]. Историческое прошлое, последние достижения и множество модификаций разрезного стержня Гопкинсона представлены в [31, 46, 52, 118].

Классический РСГ состоит из газовой пушки, нагружающего и опорного стержня, между которыми находится образец, как показано на рисунке 1.2.

13



Рисунок1.2 – Классическая схема разрезного стержня Гопкинсона

Ударник разгоняется газовой пушкой и взаимодействует с торцом нагружающего стержня. В нагружающем стержне при воздействии на него ударника возбуждается одномерная упругая волна сжатия, которая распространяется по стержням со скоростью звука. При достижении образца, эта волна из-за разницы свойств материалов стержня и образца (акустических жесткостей), а также площадей их поперечных сечений расщепляется. Часть волны отражается обратно волной растяжения, а часть проходит через образец во второй опорный стержень волной сжатия. Образец деформируется упругопластически или разрушается, в то время как стержни деформируются упруго. Регистрируя тензодатчиками упругие импульсы деформаций в мерных стержнях по формулам, предложенным Кольским, можно определить напряжения, деформации и скорости деформации в образце как функции времени.

Тензодатчики, как правило, устанавливаются посередине нагружающего и опорного стержней (либо на равных расстояниях от образца). До начала испытаний с использованием РСГ должны быть известны размеры и свойства образца и стержней (длина *L*, диаметр <u>D</u>, площадь поперечного сечения *A*, скорость распространения звука *C*, модуль Юнга или модуль упругости *E*, плотность  $\rho$ ). Нижние индексы "В" и "s" относятся к мерному стержню (bar) и образцу (specimen) соответственно,  $\varepsilon$  - деформации, измеренные тензодатчиками в стержнях, индексы «In», «Re» и «Tr.» соответствуют нагружающему (Incident), отраженному (Reflected) и прошедшему (Transmitted) импульсам, «*u*» обозначает перемещение торцов стержней. Выводы основных зависимостей метода Кольского для определения напряжений, деформаций и скорости деформаций в образце будут рассмотрены в главе 3.

Принципы экспериментальных установок разрезного стержня Гопкинсона при растяжении и кручении подобны основным принципам РСГ, при этом главные отличия заключены в методе образования растягивающего и скручивающего импульса, геометрии образца и в способе закрепления образца между двумя стержнями [11, 46, 198]. Стержень Гопкинсона изначально разрабатывался для изучения свойств пластичных материалов. Тем не менее, при соблюдении некоторых условий он с успехом может применяться и для исследования поведения хрупких материалов.

Динамические процессы деформирования и разрушения бетонов характеризуется очень малой степенью деформаций, при которых происходит разрушение, малыми временами приложения нагрузок, их высокой интенсивностью, неоднородностью полей деформаций и напряжений. Экспериментальные методы для исследования динамического поведения бетонов должны обеспечить способы генерации стабильной воспроизводимой динамической нагрузки, а также должны использоваться точные и достоверные методы регистрации динамических параметров сопротивления деформированию хрупких сред. В отличие от пластичных металлов, хрупкие материалы имеют небольшие деформации разрушения (около 1%), и, следовательно, если загрузка происходит слишком быстро, как при обычном испытании по методу Кольского, образец может начать разрушаться неравномерно (т.е. лицевая сторона образца может быть разрушена, в то время как тыльная сторона остается неповрежденной). Должны быть удовлетворены условия постоянства скорости деформации и равновесия напряжений на торцах образца в течение большей части испытания [49].

Достаточно крутой фронт нагружающей волны, создаваемый при испытаниях в традиционном методе РСГ, должен быть модифицирован в более пологий для улучшения соответствия условию равновесия сил на торцах образца. Подобные модификации нагружения называются методами формирования нагружающего импульса, которые можно разделить на три группы: формирование импульса путем размещения на ударяемом торце нагружающего стержня тонкого пластичного металлического диска (например, медного или алюминиевого) [50]; применение дополнительного стержня, формирующего импульс на ударяемом конце нагружающего стержня [54] или использование ударника специальной формы [178].

Торцевое трение между образцом и нагружающим стержнем в РСГ может привести к неоднородности и многомерности напряженно-деформированного состояния образца. Три вида условий контакта образца со стержнями (смазанные, сухие и склеенные с использованием высокопрочного клея), испытывались для изучения влияния сил трения на образец в работе [35]. Отмечено, что влияние трения при испытаниях может быть минимизировано с использованием соответствующих смазок, но полностью исключить его невозможно. Кроме того, следует иметь в виду, что использование смазочных материалов может влиять на акустические свойства поверхности взаимодействия. Особые сложности возникают при испытаниях при высоких температурах, так как в этом случае с ростом температуры эффективность смазки снижается.

Эффекты трения и инерции можно уменьшить, сведя к минимуму несоответствие площадей между образцом и стержнями ( $Ds\approx0,8D_B$ ) и выбрав соотношение Ls/Ds от 0,5 до 1,0 [58]. Диаметр образца должен быть достаточно большим, чтобы содержать не менее 1000 структурных зерен, но достаточно маленьким, чтобы учитывать равновесие напряжений и минимизировать эффект инерции [126]. Кроме того, как было предложено в [177], диаметр должен быть близок к 50 мм или, по крайней мере, в 10 раз больше среднего размера зерна, с

15

отношением *Ls/Ds*, принимающим значения 1:1 и 0,5:1. для мелких и крупных экземпляров соответственно.

Для оценки эффекта торцевого трения проводилось численное моделирование [72, 65], включая эксперименты с кольцевыми образцами [6]. Данные результаты показали, что трение может быть уменьшено и скорректировано с помощью численного моделирования.

При испытаниях с высокими скоростями деформации на процесс измерения и на получаемые механические свойства может оказывать влияние инерция. Величина инерционного воздействия также зависит от плотности и размеров образца [46]. С целью минимизации влияния сил инерции выявлено оптимальное отношение длины к диаметру образца ( $L_s/D_s = \sqrt{3v}/2$ ), где v -коэффициент Пуассона. В [118] представлены соотношения для вычисления влияния сил инерции на вычисляемые напряжения, включающие в уравнения отношение  $L_s/D_s$  и скорость деформации. При проведении высокоскоростных испытаний с ростом скорости деформации влияние выпужденной радиальной деформации приводит к большому увеличению прочности на сжатие, когда скорость деформации превышает некоторую критическую величину.

В [66] проведено систематическое экспериментальное исследование влияния радиальной инерции и торцевого трения при высокоскоростных ударных испытаниях бетона при динамическом сжатии.

Известны попытки снизить скорость деформации образца при испытаниях с использованием РСГ, путем инерционного прямого нагружения образца, закрепленного на торце очень длинного (40 м) мерного стержня [55], а также при использовании системы РСГ очень большого (100 мм) диаметра [87]. Большие диаметры стержня широко применялись для хрупких материалов, однако в этом случае есть определенные сложности, связанные с разгоном ударника, для которого требуются газовые пушки большого калибра. Также при использовании образцов большого диаметра более значительными становятся влияние дисперсии, сил трения и инерции на получаемые диаграммы деформирования.

#### 1.1.3. Методы измерения высокоскоростной деформации

Измерение высокоскоростной деформации образца представляет сложную техническую проблему. Самым удачным способом регистрации процесса динамического деформирования образца является косвенное измерение деформации путем использования системы РСГ. Эта методика позволяет достоверно измерить развитие линейной (осевой) деформации образца при сжатии и растяжении.

В последние десятилетия активно развивались различные бесконтактные оптические методы наблюдения и регистрации с высоким разрешением процесса деформирования образца: фотоупругость, метод муара, лазерная интерферометрия, каустика, датчики когерентного регистрации процессов разрушения [42]. Обзор оптических методов градиента для высокоскоростной деформации был представлен в [46]. Следует отметить, что для большинства методов требуется много оптических компонентов и сложная подготовка поверхности образца; поэтому они применимы в основном для прозрачных материалов. При исследовании неоднородных материалов, таких как бетоны, цементные композиты и горные породы, неоднородная деформация и локализация деформаций требуют более сложных методов измерения. Целью использования высокоскоростной визуализации точное является количественное измерение данных о деформации образца, а не только для визуализации в качественном смысле. В последние годы начал широко использоваться метод корреляции цифрового изображения (DIC – digital image correlation) для бесконтактной регистрации полей деформации рабочей зоны образца в процессе его высокоскоростного нагружения и деформирования. Метод корреляции цифровых изображений был особенно популярен для хрупких гетерогенных материалов в широком диапазоне длин и временных масштабов [134, 171]. В зависимости от количества регистрирующих камер программа реализована в двухмерном (DIC-2D) и трехмерном (DIC-3D) вариантах.

#### 1.1.4. Динамические свойства и характер разрушения хрупких материалов

Работами большого количества ученых во всем мире было установлено, что механические свойства хрупких материалов чувствительны к скорости нагружения (или скорости деформации), и общепризнано определенное повышение их динамических прочностных свойств.

Зачастую динамические экспериментальные результаты представляются как отношение измеренной динамической прочности (предельное (разрушающее) напряжение) к статической. Это соотношение, обычно называемое коэффициентом динамического упрочнения (КДУ, в английском варианте – DIF – dynamic increase factor) и обычно представляется как функция логарифма скорости нагружения. Под скоростью нагружения обычно понимают либо скорость деформации, либо скорость роста напряжений. Кроме того, из-за характера нагрузки, необходимой для быстрого деформирования, и сложных конфигураций образцов, скорость нагружения или деформации не всегда бывает постоянной. Для создания постоянной скорости деформации используют формирователи импульса (тонкие прокладки), размещаемые на торце нагружающего стержня. Динамические свойства и характер разрушения во многом зависят от метода нагружения и измерения, метода испытаний и влияющих факторов окружающей среды.

Ниже представлено описание различных методов исследования динамических свойств хрупких материалов и краткое изложение полученных результатов.

# 1.1.4.1. Испытания на одноосное сжатие

В [154] экспериментально исследованы характеристики бетона, изготовленного из вторично переработанного мелкого и крупного заполнителя, при сжатии под действием квазистатической нагрузки при высоких скоростях деформации. Выполнены квазистатические испытания со скоростью деформации  $10^{-5}$  с<sup>-1</sup> с использованием сервогидравлической машины с жесткой рамой. Затем проведены ударные испытания в диапазоне от  $10^1$  с<sup>-1</sup> до  $10^2$  с<sup>-1</sup> с использованием РСГ диаметром 74 мм. Результаты показали, что прочность на сжатие и начальный модуль упругости возросли с увеличением скорости деформации. При высоких скоростях деформации прочность на сжатие снижалась с увеличением процентного количества крупного переработанного заполнителя, тогда как коэффициент динамического упрочнения показал обратную тенденцию. Кроме того, динамическая прочность бетона на сжатие с водонасыщенным переработанным заполнителем была ниже, чем у естественно высушенного.

## 1.1.4.2. Испытания на трехосное сжатие

Существует два основных метода испытаний образцов многоосной нагрузкой с использованием ограничивающих условий [31]. Ограничивающее давление достигается за счет гидростатического давления с помощью гидравлической камеры (рис. 1.3*a*). При таком испытании образец с примыкающими концами мерных стержней помещается в камеру высокого давления и подвергается статической боковой нагрузке за счет гидростатического давления с использованием различных сжимающих жидкостей или газов (например, воздуха, воды или масла). Сжимающее давление до 50 МПа может быть создано с помощью воды или масла, либо до 10 МПа с помощью воздуха. Деформация измеряется с помощью тензометров, установленных на образце. Поддерживая постоянное гидростатическое давление, дополнительные осевые нагрузки прикладываются либо к нагружающему поршню, либо к нагружающему стержню.

Устройство трехосного нагружения [28] (рис. 1.36) не позволяет выполнять синхронное многоосное динамическое нагружение образца-куба по всем трем направлениям. Поэтому используется статическое сжатие образца-куба в двух плоскостях с помощью гидродомкратов через промежуточные стержни и динамическое нагружение в направлении третьей оси волной сжатия, возбужденной за счет разгрузки стержня-аккумулятора.



Рисунок 1.3 – Четыре типа конструкций для испытаний на динамическое трехосное сжатие: а) гидростатическая ограничивающая камера; б) трехосносжатый стержень Гопкинсона; в) металлическая обойма с термической посадкой; г) пассивная ограничивающая обойма.

Условия ограничения радиальной деформации образца обычно достигается с помощью металлической обоймы с горячей посадкой или пассивной обоймы [170], как показано на рисунке 1.3*в*, *г*. Ограничение деформации зависит от толщины и типа материала обоймы. На поверхности обоймы устанавливаются тензодатчики для регистрации деформаций образца. Авторы [48] применили металлическую обойму с горячей посадкой для создания контролируемого бокового ограничения цилиндрического образца. При гидростатическом методе ограничения радиальной деформации следует принимать во внимание некоторые специфические и технические факторы: является ли ограничивающее давление во время испытания постоянным или нет; сложность при создании высокого давления; высокая

трудоемкость метода. Для методов пассивного ограничения необходимо также учитывать: отсутствие зазора на границе раздела образца и обоймы; образец должен подвергаться равномерной осевой и радиальной деформации; наличие эффектов трения на границе раздела образца и обоймы. При испытаниях на трехосное сжатие отмечены следующие тенденции: увеличение объемной прочности с увеличением скорости деформации при всех ограничивающих методах; увеличение объемной прочности с увеличением бокового ограничивающего давления; пластический характер деформирования при высокой скорости деформации.

#### 1.1.4.3. Испытания на растяжение

Существует две группы динамических методов испытаний на растяжение: прямое и непрямое (косвенное). При прямом методе бетонный образец с помощью высокопрочной эпоксидной смолы приклеивается к нагружающему устройству и в нем возбуждается растягивающее напряжение, приводящее к разрыву образца [7]. К непрямым методам может быть отнесен Бразильский тест [146, 172], изгиб балки [36] и метод откола в стержнях [42, 75]. В [32] подробно рассмотрены квазистатические методы испытаний и результаты экспериментов, а именно методы прямого растяжения, Бразильского теста, расширения кольцевого образца, трехи четырехточечного изгиба балки.

Среди методов непрямого испытания на растяжение хорошо известные метод Бразильского теста (раскалывание) [120], метод изгиба и метод откола, схематически показанные на рисунке 1.4. Методы непрямых испытаний обеспечивают удобную альтернативу с точки зрения изготовления образцов, экспериментальных настроек и сокращения объема данных для определения предела прочности.



Рисунок 1.4 – Методы испытаний на непрямое растяжение: а) Бразильский тест; б) сплющенный бразильский диск; в) метод изгиба полукруглого образца; г) метод откола в стержнях

В Бразильском тесте (рис. 1.4*a* и *б*) разрушение образца происходит в соответствии с критерием Гриффитса и имеет место двухосное напряженное состояние, влияние которого на

динамическую прочность до конца не исследовано. В качестве прочности на растяжение без какой-либо коррекции принимается пиковое напряжение, зарегистрированное тензодатчиками на мерных стержнях.



Рисунок 1.5 – Традиционный характер разрушения образца при Бразильском тесте

Типичные примеры разрушения образцов хрупких сред после испытания с использованием Бразильского теста схематически показаны на рисунке 1.5 [179]. Ориентация магистральной трещины должна быть параллельна направлению нагружения с последующим разделением образца как минимум на две части. На данной схеме наблюдаются два типа разрушения: разрушение при сжатии в зонах контакта с торцами мерными стержней и зона разрушения при растяжении в центральной части образца. Протяженность двух зон разрушения при сжатии в точках контакта диска, как правило, зависит от скорости деформации.

В работе [174] при испытаниях на средних скоростях деформации был использован метод трехточечного изгиба, в котором определялась прочность на растяжение. При высоких скоростях деформации в [36] применили метод изгиба полукруглого образца с использованием РСГ (рис. 1.46).

Испытания на динамический изгиб ограничены по следующим причинам: измеренный результат характеризует прочность на изгиб, а не на прямое растяжение; трудно достижимы требования равновесия напряжений, особенно при использовании геометрии образца со свободными концами.

Одним из методов определения динамической прочности является методом откола в хрупком стержне. В основе метода откола (рис. 1.4г) лежит контролируемое взаимодействие волн в стержне-образце. Ударник, после воздействия на нагружающий стержень создает в нем волну сжатия, которая, перейдя в длинный призматический образец хрупкого материала, отражается волной растяжения от его свободного конца. Интерференция хвостовой части импульса сжатия и отраженной от свободной торцевой поверхности образца волны растяжения приводит к возникновению в образце растягивающих напряжений, которые в некотором сечении образца достигают разрушающих значений, поскольку прочность на растяжение хрупких материалов ниже, чем их прочность на сжатие [124, 153]. Метод откола имеет ряд ограничений: для обеспечения одномерного напряженного состояния требуется достаточно длинный

однородный образец; имеет место влияние падающей волны сжатия на материал до начала воздействия волны растяжения.

# 1.1.5. Поведение хрупких материалов при высокой скорости деформации

# 1.1.5.1. Динамическое поведение при одноосном сжатии

Поскольку различные типы бетонов и особенно фибробетонов могут иметь совершенно различную склонность к образованию микротрещин, то необходимы дальнейшие экспериментальные исследования механизмов образования трещин на начальной стадии их нагружения и деформирования.

На рисунке 1.6 показан типичный результат истории нагружения хрупкого материала и соответствующие изображения процесса разрушения при скорости деформации 66 с<sup>-1</sup> с использованием метода РСГ [171].



Рисунок 1.6 – а) Определение динамической прочности на сжатие, скорости роста напряжения и скорости деформации образца; б) соответствующие изображения процесса разрушения

Отмечено, что трещины начинают образовываться за счет радиальных растягивающих напряжений к моменту времени 96 мкс и распространяются примерно вдоль осевого направления образца. Образование трещин приводит к падению напряжения, наблюдаемому на графике зависимости напряжения от времени (рисунок 1.6а).

В диапазоне скоростей деформации от 100 до 150 с<sup>-1</sup> отмечается переход от единичного раскалывания к интенсивной фрагментации [39].

Хотя общепризнано, что существует определенное увеличение прочности на одноосное сжатие хрупких материалов при динамическом нагружении, не все исследователи соглашаются относительно скорости деформации, при которой это увеличение прочности становится значительным [170]. Кроме того, необходимо учитывать масштабный эффект при сравнении

динамической прочности с квазистатически нагруженным образцом с различным соотношением размеров [193, 194].

# 1.1.5.2. Динамическое поведение при трехосном сжатии

Механические нагрузки, которым подвергаются хрупкие материалы, как правило, многоосны. Следовательно, разработка и калибровка определяющих моделей для численного моделирования требует экспериментальных данных при различных траекториях напряжения и деформации. Кривые динамического напряжения и деформации при различных ограничивающих давлениях были получены с помощью метода трехволнового анализа в работе [51]. Кривые напряжение-деформация при высокой скорости деформации и ограничивающих давлениях 0,1 и 10 МПа приблизительно соответствуют кривым при ограничивающих давлениях 27 и 55 МПа в квазистатических испытаниях соответственно. Ограничивающее давление при переходе из хрупкого состояния в пластичное составляет примерно 55-85 МПа в квазистатических испытаниях, в то время как это давление относительно ниже при динамическом нагружении и находится в диапазоне от 10 до 35 МПа. Хотя при средних скоростях деформации сообщалось, что на модуль Юнга не влияет скорость деформации, в то время как коэффициент Пуассона, кажется, немного увеличивается с увеличением скорости деформации и ограничивающего давления [82]. При этом доступно малое количество информации при испытаниях с высокими скоростями деформации. Хрупкие материалы очень чувствительны к ограничивающему давлению при квазистатических нагрузках [111].

## 1.1.5.3. Динамическое поведение при растяжении

Бетон со сверхвысокими характеристиками (UHPC) — это недавно появившийся усовершенствованный цементный композит, который обладает превосходной механической прочностью, пластичностью и долговечностью. Высокие механические характеристики UHPC привели к его быстрому внедрению в промышленность. В дополнение к механической прочности, превышающей на порядок прочность обычного бетона, UHPC обладает превосходными улучшенными поглощающими свойствами и пластичностью, что делает его идеальным материалом для сопротивления высокоэнергетическим динамическим нагрузкам, таким как удар и взрыв. В ряде недавних работ [141, 138, 133, 115] исследуется влияние скорости деформации на механическую реакцию UHPC при растяжении. В этих исследованиях сообщается, что динамическое нагружение приводит к увеличению прочности при первом растрескивании, сообщается о пределе прочности при растяжении, модуле упругости, поглощения энергии и других механических свойствах. На рис. показаны зависимости коэффициента динамического увеличения предела прочности при растяжении (DIF<sub>f</sub>) относительно квазистатической прочности UHPC на сжатие  $f_c$ =150 МПа.



Рисунок 1.7 – а) влияние формы стальной фибры и б) ее объемной доли на DIF<sub>ft</sub> В результате отмечено следующее:

- UHPC гораздо более чувствителен к скорости деформации, чем обычные бетоны при высоких скоростях деформации;
- Чувствительность UHPC к скорости деформации не зависит от объемной доли волокна, геометрии волокна, коэффициента волокна или прочности на сжатие;
- DIF для прочности на растяжение при первом растрескивании хорошо описывается существующими соотношениями для DIF для прочности на растяжение обычного бетона.

#### 1.1.6. Физические факторы, влияющие на динамическое механическое поведение

Хорошо известно, что на механическое и физическое поведение хрупких материалов влияют факторы окружающей среды, такие как температура, Водонасыщенность, а также такие факторы, как минералогический состав, размер зерен и анизотропия. В этом разделе используются имеющиеся лабораторные данные для объяснения и обсуждения систематического влияния на динамические свойства хрупких материалов температуры, водонасыщенности, размера и формы образцов, а также микроструктуры.

Существует два подхода к проведению экспериментов с нагретыми или охлажденными образцами. В первом подходе образец сразу устанавливается между торцами мерных стержней в методе Кольского и далее нагревается или охлаждается до требуемой температуры вместе с прилегающими концами мерных стержней. Во втором подходе, образец нагревается или

охлаждается до желаемой температуры вне системы РСГ и только после достижения между температуры устанавливается двух мерных стержней. Послелний способ предпочтительнее, особенно при очень высоких температурах, поскольку градиенты температуры в стержнях влияют на скорость распространения волн, т.е. на модуль упругости, происходит изменение импеданса мерных стержней, что необходимо впоследствии корректировать.

Среди хрупких материалов бетон и фибробетон являются наиболее часто применяемым конструктивным материалом и в течение срока службы иногда подвергается возгоранию и взрыву из-за случайных аварий или терактов. Существует несколько экспериментальных исследований реакций бетонных конструкций, подверженных высокой температуре и высокой скорости деформации одновременно. Имеются некоторые эксперименты с высокой скоростью деформации, которые были выполнены до или после воздействия огня. В работе [30] исследование представлено экспериментальное комбинированного влияния высокой температуры и высокой скорости деформации на обычный бетон, что является предварительной базой для расчета и оценки характеристик железобетонных конструкций при взрывах и пожарах. Авторы представили результаты систематического изучения динамических свойств обычного бетона при повышенной от 20°C до 950°C температуре с использованием специально разработанного микропроцессорного автоматизированного манипулятора в составе РСГ. Бетонные образцы сначала нагревались в специально разработанной промышленной микроволновой печи, а затем быстро устанавливались в систему РСГ. Для сравнительного анализа при повышенных температурах также проводились тесты при квазистатической и низкой скорости деформации. В отличие от предыдущих экспериментальных исследований, результаты испытаний показали, что динамическая прочность и кривая «напряжение-деформация» обычного бетона при высокой температуре по-прежнему испытывают заметное влияние скорости деформации. Кроме того, характер разрушений бетона, подвергнутого динамическим испытаниям при высокой температуре, существенно отличалось от характеристик бетона при температуре окружающей среды. На основании результатов квазистатических и динамических испытаний была установлена новая эмпирическая зависимость коэффициента динамического упрочнения и секущего модуля упругости бетона при повышенной температуре.

# 1.3. Выводы по главе 1

Выполнен анализ работ отечественных и зарубежных авторов для представления современного состояния, как методов динамических испытаний, так и поведения хрупких материалов при динамических нагрузках. Полное понимание динамического поведения зависит от надежных экспериментальных методов, процедур тестирования и эффективного численного

25

моделирования. На основе проделанной аналитической работы можно сделать следующие выводы:

- Для испытаний хрупких материалов при средних (промежуточных) скоростях деформации как правило используются пневмогидравлические, пневматические установки, а также копры с падающим грузом. При высокой скорости деформации широко используется метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона.
- 2. Широкое распространение получила высокоскоростная видеорегистрация процесса деформирования образца. Она позволяет выполнять измерение деформации рабочей зоны образца с достаточно высокой точностью. Методы съемки со сверхвысокой скоростью и разрешением используются для оптической реконструкции процесса деформирования, измерения полей деформации и определения основных параметров материала. Метод корреляции цифрового изображения при испытаниях хрупких материалов представляется многообещающим и заслуживающим изучения в широком диапазоне длин и временных масштабов.
- 3. Динамическую одноосную и трехосную прочность на сжатие, растяжение и сдвиг, а также вязкость разрушения получают путем количественной оценки испытаний, оценки влияющих факторов и характера разрушения. Динамические свойства и характер разрушения меняются в зависимости от скорости нагружения. В частности, отклики заметно изменяются после того, как скорость нагружения превышает критическое значение. Несмотря на то, что учитываются эффекты воздействия факторов окружающей среды (ограничивающее давление, температура и Водонасыщенность) и материала (микроструктура и макроструктура, размер и форма образца), до сих пор не совсем ясно, как внутренние характеристики материала влияют на динамические свойства. Методы динамических испытаний должны быть тщательно изучены и удовлетворять основам теории, таким как распределение динамических напряжений, равновесие напряжений и характер разрушения.

# Глава 2.ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ФИБРОБЕТОНОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В настоящее время в железобетонных конструкциях для восприятия растягивающей нагрузки применяется преимущественно стальная стержневая арматура, однако очень перспективным направлением является использование малогабаритных армирующих волокон различной конфигурации для повышения устойчивости бетонных элементов к растягивающим нагрузкам. В качестве такого дисперсного армирования бетона используются различные типы микро- и макроволокон из различных материалов (стали или полимеры [143]). Фибробетон – это особый класс бетона, в состав которого входят фиброволокна. Включение стальных или неметаллических волокон в тело бетона (фибробетон) увеличивает его прочность на разрыв и пластичность, повышает трещиностойкость.

Первые исследования, посвященные дисперсно-армированному стальной фиброй бетону, были выполнены Российским инженером В.П. Некрасовым в 1907 г., получившим в 1909 г. патент на фибробетонную конструкцию. Однако, первое практическое применение фибробетона в России можно датировать только 1976 годом, при строительстве взлетно-посадочной полосы.

За последнее время были разработаны различные классы фибробетона, отличающиеся материалом фибры. Традиционно волокна классифицируются по виду исходного материала. Обычно используются металлические, стеклянные, синтетические и натуральные волокна. Различают микроволокна (короче 20 мм с эквивалентным диаметром 0,005–0,2 мм) и макроволокна (длиной 20–80 мм с отношением длины к диаметру, равным 40–120). Используются волокна различного поперечного сечения (плоские, круглые, прямоугольные и др.). Физические свойства обычно используемых типов волокон приведены в таблице 2.1.

Высокая прочность на растяжение и сжатие являются основными характеристиками высококачественного фибробетона [2, 25]. Поведение фибробетонов зависит от многих факторов, таких как соотношение длины к диаметру волокна, модуля упругости, доли объемного процента волокна, включенного в композит, ориентации волокон, удобоукладываемости бетона, а также размера крупных заполнителей. Следовательно, чтобы получить максимальную выгоду от использования волокон, все эти факторы необходимо тщательно учитывать при проектировании материала И конструкции фибробетона. Некоторые преимущества использования различных типов фибробетона показаны на рисунке 2.1.

Материал фиброволокна	Диаметр (мм)	Длина (мм)	Удельный вес (г/см <sup>3</sup> )	Предел прочности (МПа)	Модуль упругости (ГПа)	Макс. удлинение (%)
Сталь	0,005-1	10-60	7.85	200-2600	195-210	0.5-5.0
Полиэтилен (ПЭ)	0,025-1		0.96	80-600	1.4-5	12-100
Высокомодульный ПЭ	0,02-0,024	6-12	0.97	2500-3000	80-120	2.5-5
Фенилен-бензобисоксазол после формовки	0,013	6	1.54	5800	180	3.5
Полипропилен	0,01-0,2	5-50	0.90-0.91	310-760	3.5-14.7	6-15
Поливиниловый спирт	0,009-0,76	6-12	1.2-2.5	800-3600	20-80	4-12
Стекло	0,006-0,035	10-50	2.54-2.70	1500-4000	72-80	2.5-4.8
Джут	0,1-0,2		1.02-1.04	250-350	25-32	1.5-1.9
Асбест	0,025	5-40	2.55-3.2	200-1800	164	2-3
Углерод	7-20	3-12	1.2-2	600-4000	200-390	0.4-11

Таблица 2.1. Физические свойства используемых типов фиброволокон [135]



Рисунок 2.1 – Преимущество использования армирующей фибры в бетоне: а) сравнение различных типов бетона при растяжении; б) трещины в вяжущем материале с деформационным упрочнением; в) раскрытие устья трещины в балке с надрезом для различного объема стальных волокон; г) фибробетон, подверженный испытанию на раскалывание [23, 33, 141, 163]

В [2] рассмотрен совместный эффект взаимного влияние заполнителей и волокон в фибробетоне на процесс развития трещин. Как показано на рис. 2.2, процесс от зарождения трещины до разрушения образца можно условно разделить на три зоны: (1) зона роста микротрещин и макротрещин, 2 – зона перекрытия трещин волокнами, 3 – зона отсутствия связей в трещинах.



Рисунок 2.2 – Схематическое описание взаимосвязей между растягивающим напряжением и раскрытием трещин для простого бетона и фибробетоном.

При приложении напряжения начинают расти микротрещины, первоначально на границе между цементным тестом и заполнителями (точка А), и, в конечном счете, микротрещины распространяются в раствор (точка В). Как только достигается пиковое напряжение (точка С), микротрещины распространяются нестабильным образом и происходит их локализация, в результате чего по образцу распространяются макротрещины, что приводит к падению напряжения (точка D). Перекрытие и разветвление трещин являются основным механизмом, ответственным за длинный хвост размягчения (разрыхления) материала (участок D-E), наблюдаемый в экспериментах и связанный с потерей несущей способности. Но так как процесс разрушения в значительной степени зависит от заполнителей и их связи с цементной матрицей, то для высокопрочного бетона и бетона с легким заполнителем он различен. Для этих двух типов бетона заполнители могут стать слабым звеном, и может произойти разрыв заполнителя, что снижает эффект перекрытия и приводит к более хрупкому процессу разрушения. В зависимости от количества волокон, пересекающих трещину, и хорошей связи волокон с цементной матрицей, напряжение после трещины может быть больше, чем нагрузка растрескивания, что приводит к так называемому деформационному упрочнению, при котором возникают множественные трещины. Однако при нормальном содержании фибры (<1 %) бетон проявляет деформационное разупрочнение, при котором повреждение локализуется сразу после возникновения первой трещины.

По сравнению с обычным бетоном, улучшенные свойства высокопрочного фибробетона приводят к повышенным показателям деформации при растяжении, а также к развитию псевдопластической фазы (деформационное упрочнение) до разрушения бетона, что является причиной высокого поглощения энергии (вязкости разрушения) [26]. Энергия разрушения высокопрочного фибробетона также может быть значительно выше (примерно в пять раз), чем у простого фибробетона [26]. Оптимальное содержание волокна в фибробетоне зависит от его класса, а также от типа волокна и соотношения длины к диаметру. Для микроволокон, изготовленных из органического порошка PVA (поливиниловый спирт) и полиэтилена, было обнаружено, что оптимальное их содержание в вяжущем материале с деформационным упрочнением находится в диапазоне 1-2% [85, 112]. В случае стальных волокон этот диапазон в высокопрочном фибробетоне составляет от 1,5 до 2,5% [34, 149, 176]. Различия в оптимальном уровне между исследованиями можно объяснить различным соотношением длины используемых волокон к их диаметру. Для макроволокон из полипропилена (длиной до 70 мм) этот оптимум составляет от 0,5 до 1% [9, 60], в то время как для традиционных фибробетонных плит типичным считается содержание до 0,5% стальных макроволокон [129].

Фибробетон все чаще используется для усиления конструкций, чувствительных к землетрясениям и динамическим воздействиям [38]. Более высокая прочность, пластичность и вязкость разрушения фибробетона снижают риск повреждения конструкции из-за динамической сейсмической нагрузки. Благодаря своим лучшим механическим характеристикам и долговечности, фибробетон также стал популярным материалом для подземных сооружений в сейсмически активных районах [67]. Несколько исследований были сосредоточены на анализе чувствительности реакции конструкции во время сейсмической нагрузки по отношению к изменению механических параметров [114, 122]. Для практического использования фибробетона важно понимать его долговременные характеристики в различных условиях окружающей среды. По сравнению с обычным бетоном, область применения фибробетона менее развита. Следовательно, в последние годы были предприняты значительные исследования, направленные на улучшение понимания применимости фибробетона.

Бетон очень чувствителен к скорости деформации при сжатии [59], растяжении и изгибе [125]. Поскольку в разных скоростных диапазонах зависимости прочностных и деформационных характеристик различны, то квазистатические свойства бетона не могут использоваться для проектирования конструкций, работающих при высоких скоростях нагружения. Следовательно, требуются соответствующие испытания на удар. В последние годы было проведено несколько исследований бетона [132, 137, 121, 116, 94, 74, 71, 64, 40, 29], модифицированного бетона из

фибропласта [152, 4], высокопрочного бетона [8, 41, 84, 103, 117, 131, 162], сверхвысокопрочного бетона [8, 107, 130, 160], геополимерного бетона [102, 101, 11], фибробетона с полимерной фиброй [113, 136, 156, 110] при ударных и взрывных нагрузках.

Улучшение способности поглощать энергию является эффективным средством повышения ударопрочности конструкций. Эта цель может быть достигнута за счет армирования волокном или использования высокопрочных бетонных материалов [13, 53, 89, 90, 61], которые были разработаны в течение последних трех десятилетий. Добавление волокон в бетонную смесь снижает объем выбрасываемой бетонной пыли, мелких, средних и крупных обломков в воздух при динамическом разрушении и, как следствие, снижает уровень травматизма и смертности. Таким образом, фиброармирование является хорошим средством преодоления конкретных недостатков бетона. Стальные волокна более широко используются в строительстве по сравнению с другими типами волокон.

# 2.1. Типы фибробетона со стальной фиброй

На сегодняшний день существует множество типов фибробетона со стальной фиброй, среди которых выделяют пять основных.

1. Фибробетон с прерывистыми дискретными стальными волокнами. Тысячи мелких стальных волокон рассредоточены и беспорядочно распределены в бетоне для улучшения его механических свойств. Как указано в [1] объемная доля волокна, используемого в этом типе фибробетона, должна находиться в пределах 0,5–1,5%, так как превышение этого значения может снизить удобоукладываемость бетонной смеси и вызвать комкование волокон фибры, которое будет чрезвычайно трудно преодолеть при виброуплотнении. Тем не менее, более высокий процент волокна можно использовать с помощью специальных методов добавления волокон и процедур их равномерного распределения.

2. Высокопрочный фибробетон (High-performance fiber-reinforced concrete – HPFRC) обычно имеет прочность на сжатие до 100 МПа. По сравнению с обычным высокопрочным бетоном, являющимся хрупким материалом, пластичность фибробетона может быть увеличена путем добавления коротких случайно распределенных волокон с объемной долей в 2,0% или более. Добавление стальной фибры в высокопрочный бетон не только повышает прочность и пластичность бетона, но и улучшает его сопротивление удару и разрушению.

 Специальный фибробетон – это особый тип высокопрочного бетона, армированного фиброй с высокой прочностью (150–400 МПа) и большой объемной долей фибры (5–10%).
 Матрица специального фибробетона чрезвычайно пластична из-за высокого содержания стальной фибры. Данная особенность позволяет эффективно использовать фибровую арматуру без образования больших трещин в условиях эксплуатации.

4. Сверхвысокопрочный фибробетон (Ultra-high performance fiber-reinforced concrete – UHP-FRC) – это новый класс материалов, сочетающих в себе очень прочную и плотную вяжущую цементную основу с высоким содержанием волокна. Данный материал обладает высокой прочностью на сжатие (порядка 200 МПа) и относительно большой прочностью на растяжение (порядка 10 МПа), наряду с характеристиками деформационного упрочнения при растяжении, что гарантирует малое раскрытие трещин и обеспечивает улучшенные свойства пластичности по сравнению с обычным бетоном. При этом волокна обеспечивают пластичность как при растяжении, так и при сжатии. Добавление достаточно большого количества волокон (более 1,5% от объема) приводит к деформационному упрочнению при растяжении [119]. Кроме того, сверхвысокопрочный фибробетон может значительно улучшить ударопрочность панелей и стен при сохранении стандартной толщины и внешнего вида [127].

5. Комбинированный фибробетон – определяется как бетон с комбинациями различных типов волокон. Два или более типа волокон различной формы и размера, полученных из разных материалов, комбинируются, чтобы дать материалу возможность достичь полезных характеристик относительно каждого типа волокна.

# 2.2. Динамические свойства фибробетона с различной объемной долей и формой стальной фибры при различных видах испытаний

Фибробетон в зависимости от объемного содержания волокон можно разделить на три группы. Низкое объемное содержание волокна (менее 1%) обычно используется для предотвращения усадочных трещин с минимальным увеличением прочности. Среднее объемное содержание волокна (1-2%) применимо в качестве дополнения к основному армированию и для обеспечения хорошей обрабатываемости для монолитных или сборных фибробетонных конструкций. Высокое объемное содержание волокна (более 2%) может существенно улучшить такие механические свойства, как вязкость разрушения, повышенная пластичность и деформационное упрочнение. Добавление стальной фибры значительно снижает хрупкость бетона и преодолевает некоторые из его недостатков. В [165, 157] были проведены исследований механических свойств фибробетона со стальными волокнами при статических и динамических нагрузках. Установлено, что прочностные свойства бетона при растяжении и изгибе могут быть увеличены путем случайного распределения стальных волокон в бетонной смеси.

Сегодня доступны несколько форм стального волокна (прямые, одинарные с крючками, гофрированные с крючками, скрученные, со сплющенными концами).

В последние десятилетия значительные усилия были сосредоточены на исследовании характеристик фибробетона при нагрузках с высокой скоростью деформации [81, 123, 145].

Наиболее информативный и успешно применяемый метод испытаний на высокоскоростной удар – это испытания по методу Кольского. [59].

# 2.2.1. Результаты испытаний фибробетонов с использованием вертикального копра

В исследовании [69] реализована экспериментальная программа по изучению характеристик железобетона и плит из фибробетона при повторяющихся ударах с большой массой (300 кгс) и низкой скоростью удара (менее 8 м/с). В этом исследовании в фибробетоне использовались стальные волокна с крючковидными концами с объемными долями 0,5%, 1% и 1,5%. Стальные волокна с загнутыми концами снизили ширину раскрытия трещин, а также степень разрушения и увеличили жесткость и энергоемкость плиты.

В [159] проведены копровые испытания с падающим грузом на образцах фибробетона, армированных семью типами волокон. Были рассмотрены пять коммерчески доступных типов волокон с различными формами и свойствами материалов, а именно синтетические, волнистые, холоднокатаные, сплющенные и крючковидные волокна. Кроме того, были предложены и протестированы два новых типа спиральных волокон, называемых спиралью I и спиралью II, с целью минимизации эффекта отслаивания фиброволокон от основной бетонной матрицы при динамической нагрузке. Результаты показали, что с точки зрения стойкости к ударным нагрузкам, предела прочности на сжатие и способности поглощать энергию, фибробетон со спиралевидными стальными волокнами ведет себя лучше, чем другие шесть типов волокон. Такое поведение связано со спиральные волокна имели трехмерную анкерную связь с бетонной матрицей.

В [108] был проведен анализ реакции простого бетона и фибробетона на ударную нагрузку. В этом исследовании использовались стальные волокна с крючковидным концом с объемными долями 0,5% и 1% и полипропиленовые волокна с объемными долями 0,2%, 0,3% и 0,5%. Экспериментальный и численный анализ показал, что стальные волокна могут повысить ударопрочность в большей степени, чем полипропиленовые волокна, из-за их большей длины, более высокой прочности на разрыв и лучшей способности к сцеплению с цементным камнем. Кроме того, прочность на растяжение, сжатие и поглощение энергии могут быть увеличены за счет увеличения объемной доли стальной фибры.

В [172] исследовано поведение фибробетона при разрушении балок динамической нагрузкой с помощью сервогидравлической машины и копра с падающим грузом. Использовались стальные волокна с крючковидными концами с объемной долей 0,8%. Было

33

обнаружено, что энергия разрушения и предел прочности увеличиваются с увеличением скорости нагружения.

В другом исследовании [158] проводилось изучение динамических свойств фибробетона, как при квазистатических, так и при динамических испытаниях на растяжение. Были испытаны обычные волокна с крючковидными концами и новые спиралевидные волокна. Два вида волокон продемонстрировали одинаковую прочность на сжатие и растяжение как при статических, так и при динамических нагрузках. Тем не менее, с точки зрения пластичности, прочности, образования трещин и чувствительности к скорости деформации, фибробетон co спиралевидными волокнами работал лучше, чем фибробетон с крючковидными волокнами на концах, из-за трехмерной скрученной формы спиралевидных волокон и их лучшего сцепления с бетонной основой. В другом исследовании [128] проверялась эффективность железобетонных образцов с комбинированным армированием: стальные волокна с крючковидными концами (0.5%) и полипропиленовые волокна (0,1%) с использованием копровой установки с падающим грузом. Исследование показало, что добавление 0,1% полипропиленовых волокон улучшает сопротивление сталефибробетона ударной нагрузке из-за большой деформационной способности полипропиленовых волокон.

#### 2.2.2. Испытания с использованием методики РСГ

Ряд исследователей провели высокоскоростные ударные испытания на одноосное динамическое сжатие с помощью методики РСГ для получения свойств фибробетона на сжатие при высоких скоростях деформации [89, 145]. Мерные стержни и испытуемые образцы имели увеличенный до 75 мм диаметр. В [89] испытания фибробетона были выполнены при скоростях деформации от 20 до 100 с<sup>-1</sup>. В бетонных образцах было использовано примерно 0,6% стальных волокон с крючковидными концами. По результатам экспериментов не наблюдалось существенного увеличения прочности фибробетона на одноосное сжатие, тогда как его пиковая деформативность была выше, чем у простого бетона. Этот эффект может быть связан с утратой сцепления между бетоном и стальными волокнами при скоростях деформации более 50 с<sup>-1</sup>. Эта информация согласуется с результатами, представленными в [**Ошибка! Источник ссылки не н** айден., 86], которые показывают, что армирование волокном неэффективно при сопротивлении высокоскоростным ударным нагрузкам из-за нарушения сцепления фибры с бетонной основой.

Ряд исследований в этой области проводились относительно прочности на сжатие, растяжение при раскалывании, вязкости при изгибе. В [127] изучались механические свойства высокопрочного фибробетона. Стальные волокна с крючковидными концами добавлялись в объемных долях 0,5%, 1,0%, 1,5% и 2,0%. С увеличением объемной доли волокон в фибробетоне улучшались прочность на сжатие и, прочность на растяжение при раскалывании. В этом

исследовании стальные волокна с крючковидными концами с различными объемными долями также использовались для исследования влияния объемной доли на механические свойства фибробетона. На основании полученных результатов прочность бетона на сжатие увеличилась на 4–19%, прочность на растяжение при раскалывании – на 11–54%, а прочность на изгиб – на 3–81% по сравнению с контрольным материалом.

В [148] испытаны образцы бетона и фибробетона с добавлением 0%, 3% и 6% ультракоротких стальных волокон для проведения испытаний на сжатие с использованием РСГ при скоростях деформации до 100 с<sup>-1</sup>. Фибробетон показал чувствительность к скорости деформации, и за счет высокой объемной доли стальных волокон была достигнута высокая прочность. Кроме того, в экспериментальном исследовании было продемонстрировано поведение простого бетона и армированного волокном высокопрочного бетона с прочностью от 80 МПа до 90 МПа при высокоскоростном сжатии. Методика РСГ использовалось для определения поведения бетона при скоростях деформации от 40 с<sup>-1</sup> до 300 с<sup>-1</sup> [147]. В этом исследовании использовались четыре типа бетона, а именно: высокопрочный бетон, высокопрочный фибробетон с 0,5% стальных волокон, высокопрочный фибробетон с 0,5% полиэтиленовых волокон и комбинированный высокопрочный бетон с 0,5% стальных и 0,5% полиэтиленовых волокон. Прочность на сжатие, предельная деформация, модуль упругости и вязкость бетона увеличивались при увеличении скорости деформации.

Эффект ограничения роста трещин волокнами в фибробетоне заметен при высоких скоростях деформации, что указывает на то, что стальные волокна более эффективно выдерживают динамические сжимающие нагрузки, чем статические сжимающие нагрузки. В [63] рекомендовано изготавливать фибробетон с 0,5–1,5% объемной долей волокон при использовании стандартного оборудования и процедур перемешивания компонентов. Поэтому дополнительно были изучены динамические свойства фибробетона со спиралевидными волокнами при различных объемных долях волокна в более широком диапазоне скоростей деформации. С использованием системы РСГ и гидравлической машины Baldwin были проведены испытания на квазистатическое сжатие и раскалывание, а также испытания на динамическое сжатие. Учитывались различные объемные доли волокон, в частности 0% (обычный бетон), 0,5%, 1,0% и 1,5%; длина спиралевидных волокон диаметром 0,5 мм составляла от 10 мм до 40 мм. За счет увеличения объемной доли спиралевидных волокон фибробетона при статических нагрузках увеличиваются пластичность материала, прочность на сжатие и растяжение (раскалывание), способность поглощения энергии. Кроме того, количество и размеры трещин были эффективно снижены за счет увеличения объемной доли волокон. Также увеличена способность фибробетона к поглощению энергии при высоких скоростях деформации. Модуль Юнга и КДУ, прочность материала на сжатие продемонстрировали возрастающую

чувствительность к скорости деформации с увеличением объемной доли волокна. Кроме того, на основе результатов испытаний были получены эмпирические соотношения КДУ относительно модуля Юнга и динамической прочности на сжатие для моделирования КДУ фибробетона со спиралевидными волокнами при высоких скоростях нагружения.

В работе [167] изучалось влияние гибридного армирования стальными волокнами длиной 6 мм и 13 мм на пластичность, характеристики при статическом сжатии и изгибе, а также характеристики при динамическом сжатии. Для оценки динамических характеристик на сжатие при трех скоростях нагружения применялся метод РСГ. Результаты испытаний показали, что лучшие статические и динамические свойства продемонстрировал высокопрочный бетон с 1,5% длинными армирующими волокнами и 0,5% с короткими армирующими волокнами. Статическая прочность на сжатие и изгиб высокопрочного бетона с долей армирования в 2% длинными волокнами, однако было обнаружено, что динамические свойства на сжатие оказались сопоставимы.

## 2.2.3. Другие испытания

В [73] проведены комплексные исследования высокопрочного фибробетона при повторноударном (проникание) и взрывном воздействиях. Были изготовлены цилиндрические мишени диаметром и длиной по 300 мм из высокопрочного бетона с различным содержанием стальной и базальтовой фибры, а также с различным содержанием крупного и мелкого заполнителя. В цикле экспериментов на проникание использовались стандартные пули калибра 14,5-мм. Пули попадали в мишени перпендикулярно. Реализовано последовательное двукратное проникание пули в мишень. Оценена поврежденность исследуемых мишеней после каждого испытания. Результаты показали, что сопротивление высокопрочного бетона к повторному проникновению значительно улучшается за счет гибридного армирования стальными и базальтовыми волокнами. Глубина повторного проникания в высокопрочный бетон с базальтовыми волокнами и крупнозернистым заполнителем уменьшается, а повреждения с данным заполнителем увеличиваются.

Второй цикл экспериментов включал исследования прочности и поврежденности изготовленных мишеней при воздействии взрыва внутри образца на разной глубине от поверхности. В центре каждой мишени было заранее просверлено цилиндрическое отверстие диаметром 38 мм и длиной 150 мм. В отверстие закладывалось цилиндрическое тротиловое взрывчатое вещество диаметром 37 мм. Для анализа влияния глубины заложения на поведение бетона, подвергнутого взрывным работам, выбраны два типа глубины заложения тротилового взрывчатого вещества (150 мм и 50 мм). Определено, что глубина заряда BB оказывает большое влияние на характеристики поражения бетонных целей. Лицевые стороны бетонных мишеней с

36
глубиной закладки тротила 150 мм были полностью разрушены, и от каждой мишени осталась только половина. А при глубине закладки тротила 50 мм были обнаружены только относительно правильные воронки на лицевой стороне бетонных мишеней. Измерялись скорости ультразвуковых волн различных целей до и после проникновения. Из результатов видно следующее: взрывостойкость бетонной матрицы без армирования слабая; количество взрывчатого вещества и глубина размещения тротила являются двумя важными факторами, которые имеют очевидное влияние на повреждение бетонной мишени; чем глубже заложена тротиловая взрывчатка, тем сильнее повреждается бетон; взрывостойкость бетона тесно связана с составом и структурой материала мишени. Бетон высокой взрывостойкости обладает не только высокой прочностью на сжатие, но и отличной прочностью на растяжение и сдвиг.

Статья [99] исследует нарушение связи цементного камня с фиброволокнами в сверхпрочном фибробетоне. Уклон сделан на экспериментальные характеристики при различных скоростях, чтобы лучше понять динамические характеристики при растяжении сверхпрочного фибробетона. Основываясь на понимании того, что образование трещин чувствительно к скорости деформации, гипотетически предполагается, что образование трещин с микроразрывами и повреждением цементной связи с фиброволокнами главным образом объясняется чувствительностью к скорости деформации. Экспериментальное исследование рассматривает четыре типа высокопрочных стальных волокон таких как: прямые из гладкой латуни диаметром 0,2 мм и 0,38 мм, с полукрючками на концах диаметром 0,38 мм и скрученные спиральные волокна с эквивалентным диаметром 0,3 мм. Результаты испытаний показывают, что волокна с полукрючками демонстрируют самую высокую чувствительность к скорости нагружения по сравнению со всеми волокнами, используемыми в этом исследовании.

В [68] проведено экспериментальное исследование сталефибробетона, имеющего в своем составе три типа волокон различной конфигурации (два прямых с крюками на концах с разным пределом прочности на растяжение и один гофрированный). Были применены три различных содержания волокон. Эксперименты показали, что для всех выбранных содержаний волокон были получены увеличенные характеристики пластичности и более высокие достигнутые уровни напряжения после начала разрушения.

В другом исследовании [15] рассматривались три типа полимерных волокон и прямые стальные волокна с плоским концом. Авторы обнаружили, что выдергивание из бетонной матрицы стальной фибры являлось основной причиной разрушения, как при статических, так и при низкоскоростных ударных нагрузках. Отмечена повышенная трещиностойкость и способность к поглощению энергии. Эти исследования показали, что при сохранении сцепления волокон может быть достигнута высокоэффективная способность стальных волокон укреплять

бетонную матрицу. Поэтому было рекомендовано использовать высокопрочное волокно, которое демонстрирует надежное сцепление с цементной основой.

Были исследованы пять типов стальной фибры, а именно MZ, CZ, DZ, KH и YL с различной геометрией [93]. Волокна MZ, CZ, DZ, KH представляют собой волокна, вырезанные из листовой стали, в которых CZ и DZ прямые, MZ крючковатые, а KH зазубренные. YL представляет собой волокно из стальных поковок с пределом прочности на разрыв более 700 H/мм<sup>2</sup>. Объемные доли волокон составляли 4%, 6%, 8% и 10%. Результаты показали, что с увеличением объемной доли волокон различные механические свойства фибробетона значительно улучшаются. Так предельная прочность на сжатие и прочность на изгиб фибробетона увеличились на 61% и 74%, соответственно, по сравнению с исходным бетонным материалом без армирования. Стальные волокна обеспечивают прочность фибробетона из-за их высокого модуля упругости и высокой прочности. Наличие армирующих волокон снижает образование трещин и повышает пластичность фибробетона.

В работах [95, 168] исследовалось влияние совместного использования двух типов волокон (1,5% полиэтиленовых и 0,5% стальных волокон). Было проведено экспериментальное исследование статических и квазистатических свойств материала в диапазоне скоростей деформации от  $2x10^{-6}$  с<sup>-1</sup> до 0,2 с<sup>-1</sup>. Результаты показали, что сочетание двух типов волокон в фибробетоне значительно улучшают прочность на разрыв, характеристики упрочнения при растяжении и способность поглощения энергии. Кроме того, прочность на растяжение возросла с увеличением скорости деформации.

#### 2.2.4. Промежуточный анализ

Рядом исследователей [16, 89, 148, 155] изучалось поведение фибробетона с помощью маятниковых копров, копров с падающим грузом и метода РСГ. Их результаты показали, что при динамической нагрузке при увеличении скорости деформации увеличиваются прочность на растяжение, сжатие и изгиб, однако, снижается ударная вязкость. На эти свойства также влияет процентное содержание волокна и свойства волокна (длина, форма, тип волокна). За счет увеличения объемной доли стальных волокон в фибробетоне увеличились прочность на растяжение и сжатие, поглощение энергии, вязкость разрушения, чувствительность к скорости деформации и ударопрочность.

Что касается формы стальных волокон, спиралевидные волокна и волокна с крючковидными концами показали лучшие характеристики при ударной нагрузке: они уменьшили ширину раскрытия трещин и увеличили жесткость и энергоемкость фибробетона. Фибробетон со спиралевидными волокнами из-за большей площади поверхности скрученных волокон, которая усиливает связь с бетонной матрицей, является наилучшим выбором для

обеспечения ударопрочности, предельной прочности на сжатие, пластичности, сопротивляемости росту трещин и способности поглощать энергию по сравнению с другими типами стальных волокон.

# 2.3. Динамическое поведение конструкций из фибробетона с различной объемной долей и формой стальной фибры

#### 2.3.1. Фибробетон со стальными волокнами

В работе [109] с помощью копра с падающим грузом была исследована ударная прочность плит из фибробетона с армированием различными волокнами. Исследуемыми параметрами были тип и объемная доля волокон. Используемые типы волокон представляли собой прямые полиолефиновые волокна и волокна из порошка PVA (поливиниловый спирт), а также стальные волокна с загнутыми концами. Объемная доля каждого типа волокон варьировалась как 0,5%, 1% и 2%. Все плиты были квадратными, размером 1 м и толщиной 50 мм. Всего было отлито и испытано по три плиты с каждым материалом волокон и указанными объемными содержаниями волокон в каждой плите. Все плиты подверглись воздействию ударником массой 43 кг с полусферическим оголовком, сброшенным с высоты 4 м. Среди испытанных типов волокон бетонные плиты со стальными волокнами с крючками на концах обладают хорошими характеристиками: при объемной доле фибры 0,5%, 1% и 2% плиты из сталефибробетона имели примерно на 40%, 100% и 136% более высокие значения энергии разрушения соответственно на 19%, 53% и 80% выше значения энергии разрушения, соответственно, по сравнению с плитами из фибробетона на основе ПВА.

В другом исследовании [47] были исследованы сборные железобетонные плиты в реальном масштабе (0,3x1,5x6 м) с содержанием стальной фибры в объеме 0–1%, нагружаемые взрывом 25 кг тротила, чтобы изучить влияние объема волокон на стойкость бетона к взрывной нагрузке. Было отмечено, что за счет добавления стальных волокон характер разрушения фибробетона изменился с хрупкого на вязкий, количество осколков уменьшилось, но их средний размер увеличился. Из-за большей массы обломков они разлетались на меньшие расстояния.

Значительный эффект использования стальной фибры отмечен в работах [44, 104, 166], в которых исследовалось воздействие взрывной волны на различные бетонные и фибробетонные конструкции. В [44] представлена новая трехмерная численная модель для изучения динамического отклика и режима разрушения фибробетона при ударной и взрывной нагрузке. Обнаружено, что КДУ при растяжении и сжатии фибробетона и простого бетона были почти одинаковыми. Кроме того, за счет увеличения объемной доли стальных волокон с 1% до 3%,

диаметр и глубина, как воронки, так и скола могут быть уменьшены в три-пять раз. После изучения 108 образцов из простого бетона и балок из фибробетона с размером 100х100х500 мм со смешанным соотношением волокон в [104] обнаружено, что фибробетон с высокой объемной долей длинных волокон демонстрирует лучшие характеристики при ударной нагрузке. Восемь железобетонных панелей размером 600х600х100 мм были испытаны [166] для исследования поведения железобетонных панелей и панелей из фибробетона при различных объемных долях, а именно 0,5%, 1,0% и 1,5%, стальных фибр с крючковидными концами при воздействии взрывчатых веществ (ВВ). В проведенном эксперименте рассматривался заряд взрывчатого вещества массой 1 кг, размещенного на расстоянии 0,6 м. Результаты показали, что наилучшие характеристики при взрывной нагрузке были достигнуты у фибробетона с объемной долей волокна 1,5%.

Рассматривая стальные волокна различной геометрии, включая лопаточные, гофрированные и волокна с крючками были проведены многократные копровые испытания с падающим грузом с ударником весом 4,54 кг, с высотой падения 457 мм. Обнаружено, что ударная вязкость и поглощение энергии фибробетоном увеличиваются при объеме волокна в 1%; фибробетон оказался более чувствителен к скорости нагружения, чем простой бетон. Кроме того, высокая скоростная чувствительность наблюдалась у фибробетона с высоким содержанием волокна. Также количество ударов до появления первой трещины может быть увеличено за счет увеличения объемной доли волокна и влияния формы волокон. Исследования показали, что изогнутые и гофрированные волокна лучше сопротивляются ударным нагрузкам, чем гладкие.

В [96] были исследованы фибробетонные балки, сделанные из бетона нормальной и высокой прочности, включающие короткие и длинные стальные волокна с крючковидными концами. Авторы выполнили квазистатические и ударные испытания. По сравнению с результатами статических нагрузок, несущая способность балок увеличилась. При динамической нагрузке некоторые режимы разрушения бетонных балок изменились с изгиба на сдвиг. При динамической нагрузке длинные волокна были менее эффективны, чем короткие с точки зрения длины волокон. Также отмечалось, что у фибробетона поглощение энергии при ударе было примерно в 20–100 раз больше, чем у обычного бетона.

#### 2.3.2. Высокопрочный фибробетон

#### 2.3.3. Специальный сверхвысокопрочный фибробетон

Специальный сверхвысокопрочный фибробетон (СВПФБ) был разработан в Дании в 1986 году [10]. Он имеет высокую прочность цементного камня на сжатие за счет низкого водоцементного отношения, исключения крупных заполнителей и использования микрокремнезема в качестве мелкого заполнителя. А за счет использования большого объема

стальных волокон (5–10%) он имеет повышенные сопротивление растяжению, ударную вязкость и пластичность.

Известны работы по исследованию прочности и стойкости к взрывным нагрузкам полноразмерных конструкций (плит, колонн) из СВПФБ [83, 100, 140, 150, 151]. В [83] протестировано пять плит, в том числе четыре плиты СВПФБ и одна контрольная плита, чтобы определить их реакцию в условиях взрывной нагрузки. В этом исследовании рассматривались стальные волокна с объемной долей 2%. Для испытаний использовались заряды взрывчатого вещества с массой тротилового эквивалента от 1 до 14 кг на масштабных дистанциях от 0,41 м/кг<sup>1/3</sup> до 3,05 м/кг<sup>1/3</sup>. Результаты показали эффективность плит СВПФБ относительно взрывных нагрузок.

В [100] было исследовано поведение плит из сверхвысокопрочного фибробетона при близких взрывах. Всего в лаборатории взрывных и ударных воздействий Шеффилдского университета было проведено 19 взрывных испытаний. В предыдущем исследовании использовалось различное процентное содержание стальной фибры. Результаты показали, что увеличение объема волокна также увеличивает взрывостойкость плиты.

Энергия разрушения СВПФБ при высоких скоростях деформации (5–92 с<sup>-1</sup>) была исследована в [140]. Обнаружено, что образцы с 1–1,5% волокон демонстрируют чрезвычайно высокую энергию разрушения (28–71 кДж/м<sup>2</sup>). Кроме того, влияние типа волокна, объемной доли, смешения волокон и формы образца на сопротивление разрушению при статической и высокоскоростной деформации существенно различается. Гладкие волокна демонстрируют более высокую прочность на излом и более высокую энергию, чем скрученные волокна. При высоких скоростях деформации образцы с большим объемным содержанием волокна не давали высокой прочности и энергии разрушения. Кроме того, СВПФБ с двумя смешанными типами волокон дает более высокую прочность на излом и энергию, чем СВПФБ с моноволокном.

В [150] изучена оптимизация прочности и пластичности сверхвысокопрочного фибробетона (СВПФБ) при прямой растягивающей нагрузке. В этом исследовании рассматривался сверхвысокопрочный бетон (СВПБ) с прочностью на сжатие 200 МПа, а также высокопрочные гладкие и деформированные стальные фиброволокна (с объемными долями 1, 1,5, 2 и 2,5%). Это исследование показало, что сверхвысокопрочный фибробетон может быть спроектирован для обеспечения высокой прочности на растяжение (до 15 МПа) и пластичности (0,6%) с низкой объемной долей волокна (примерно 2%) за счет увеличения плотности и прочности цементной основы, а также прочности волокна и улученной механической связи за счет деформации волокна.

В другом исследовании [151] проанализировано поведение СВПФБ при одноосном растяжении при различных скоростях деформации в диапазоне от 10<sup>-4</sup> с<sup>-1</sup> до 10<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup>. В этом

исследовании использовались три типа стальных волокон (прямые, с крючковидными концами, спиральные) с объемными долями 1,5%, 2%, 2,5% и 3%. Результаты показали отсутствие чувствительности к скорости деформации в отношении модуля упругости для всех трех типов серийных образцов, в то время как наблюдалась зависимость скорости деформации от напряжения растрескивания, прочности на растяжение, деформации разупрочнения и энергопоглощения.

В другом исследовании [164] протестировали 10 больших балок СВПФБ с двумя разными коэффициентами усиления и типами стальных волокон (гладкие и спиральные стальные волокна). Результаты показали, что добавление стальных волокон значительно улучшает несущую способность, жесткость после растрескивания и реакцию на растрескивание, но снижает пластичность. Исследователи определили, что при добавлении 2% стальной фибры по объему несущая способность увеличилась на 27–54%, а пластичность снизилась на 13–73%.

#### 2.3.4. Комбинированный фибробетон (полифибробетон)

Комбинирование стальных волокон с другими типами волокон также привело к значительному повышению взрывостойкости конструкций. Цементный композит – это материал, который демонстрирует стойкость к царапинам и скалыванию, способность поглощать энергию, пластичность, прочность, стойкость к множественным ударам и чувствительность к скорости деформации. Исследования цементного композита и гибридного волокна, включая удельное объемное соотношение высокомодульных стальных волокон и относительно низкомодульных полиэтиленовых волокон, были проведены для достижения баланса между деформационной способностью и пределом прочности, требуемым для ударопрочных и взрывостойких конструкций [95].

Комбинированный фибробетон (КФ) имеет характеристики, превосходящие характеристики простого фибробетона. Например, 0,5% стальной фибры с 1,5% полиэтиленовой фибры уменьшили скалывание и зоны повреждения [95]. В [168] проведено исследование для изучения режима разрушения и повреждения фибробетонных панелей из комбинированного волокна по сравнению с обычным железобетоном и фибробетоном. Определено, что панели КФ продемонстрировали снижение повреждений и улучшение ударопрочности при множественных ударах, а также улучшение способности поглощать энергию и свойства пластичности по сравнению с железобетонными и фибробетонными панелями [168]. Кроме того, стальные волокна в сочетании с полипропиленовыми волокнами в бетоне, улучшили ударопрочность по сравнению с монофибробетоном [128].

В [31] изучили четыре типа защитных преград, с различным видом фибры, включая два типа синтетической фибры, нейлоновой фибры и углеродной фибры, каждый с 1,5% объема

волокна; комбинация стальной и синтетической фибры с содержанием волокна 3,8% и 5%; и традиционный армированный бетон нормальной плотности, используемый в качестве контрольного образца. Результаты показали, что фибробетон ограничивает степень повреждения больше, чем обычный бетон. Кроме того, нейлоновый фибробетон с содержанием волокна в 1,5% продемонстрировал значительное улучшение характеристик по сравнению с типичным железобетонном. Однако смесь стали и синтетического волокна с содержанием 3,8% и 5% продемонстрировала почти такие же улучшения. Взрывные испытания фибробетонных плит, проведенные в, показали, что размер и скорость частиц, созданных при воздействии взрывной нагрузки, были значительно уменьшены за счет добавления стальных и полипропиленовых волокон [31].

## 2.4. Выводы по главе 2

Фибробетон имеет заметно более высокую ударопрочность по сравнению с обычным бетоном. Практически все рассмотренные исследования показывают, что использование стальной фибры в бетонной смеси положительно влияет на характеристики ударопрочности. При использовании стальных волокон размер кратера и объем обломков уменьшаются. Кроме того, снижается количество осколков, выбрасываемых в окружающее пространство. Поведение бетона при добавлении фибры изменяется от хрупкого до пластичного, максимальные и остаточные смещения уменьшаются, улучшается устойчивость к повреждениям. Кроме того, с точки зрения предотвращения образования трещин и поглощения энергии стальные волокна проявляют себя лучше других типов волокон.

Объемная доля стальной фибры играет доминирующую роль в фибробетоне. За счет увеличения объемной доли стальных волокон повышается сопротивление взрыву, сопротивление проникновению, прочность на сжатие, ударная вязкость, устойчивость к разрушению и скоростная чувствительность. Напротив, глубина и размер кратера, скалывание, объем обломков снижается. Более того, специальный фибробетон с 6% объемной долей стальных волокон в четыре раза прочнее, чем обычный фибробетон, с точки зрения прочности на изгиб и рассеивания большего количества энергии. В ряде работ отмечено, что взрывостойкость фибробетонных конструкций увеличивается при смешивании стальной фибры с полипропиленовой. Панели из такого комбинированного фибробетона продемонстрировали меньшую поврежденность, повышение ударопрочности, способность поглощения энергии и повышение пластичности, чем панели из сталефибробетона и железобетона. Кроме того, сопротивление панелей СВПФБ при воздействии взрывной нагрузки в ближней зоне может быть еще значительно увеличено с помощью обычной стальной арматуры. Что касается формы стальных волокон, то стальные волокна с крючковидными концами демонстрируют лучшее сцепление и показатели взрывостойкости в бетонной смеси, чем другие типы волокон (гофрированные, прямые и т.д.). Кроме того, длинные волокна с высокой объемной долей проявили лучшие рабочие характеристики при ударной нагрузке. Однако все вышеупомянутые исследования показали, что измеренная ударопрочность и механические свойства сталефибробетона увеличиваются с увеличением объемной доли стального волокна, которая сильно зависит от скорости деформации.

Хотя армирование волокном является наиболее эффективным средством повышения стойкости бетона к ударам и другим динамическим нагрузкам, значительное количество проблем остается нерешенным. Во-первых, представленные в литературе данные были получены в результате различных испытаний на удар, различных методов крепления образцов и методов получения высоких скоростей деформации. Все эти параметры существенно влияют на результат. Например, копры с падающим грузом разной массы и высоты падения могут давать разные результаты. Тяжелые ударники имитируют длинные импульсы, тогда как большая высота падения моделирует короткие импульсы. Очевидно, следует использовать копровую установку, которая имитирует ожидаемые в реальной жизни импульсы динамической нагрузки.

Во-вторых, одной из областей, требующих подробного изучения, является поведение фибробетона при высоких скоростях деформации. Некоторые исследования показали, что прочностные характеристики фибробетона улучшаются при сильной динамической нагрузке, в то время как другие исследования показали, что увеличение пластичности и ударной вязкости, которое обычно наблюдается при статической нагрузке, отсутствует при высоких скоростях деформации [89]. Например, прочность фибробетона на сжатие увеличивается до тех пор, пока не будет достигнута скорость деформации 50 с<sup>-1</sup>. После этого не наблюдается значительного увеличения прочности на одноосное сжатие из-за нарушения сцепления между цементным камнем и стальной фиброй. Таким образом, вопрос реакции фибробетона на ударные нагрузки остается открытым. Следовательно, в этой области необходимы дальнейшие исследования.

Как видно из рассмотренных источников, образцы, использованные в исследованиях, имеют разные размеры и геометрию. Структурные изменения могут повлиять на результаты. Таким образом, необходимо организованное исследование для тщательного изучения и анализа образцов, близких друг к другу по поведению. Учитывая эти факторы, можно сделать вывод, что систематическое и всестороннее экспериментальное исследование в сочетании с подробным численным анализом необходимо для определения поведения фибробетона с точки зрения объемной доли и формы стальных волокон с учетом реальных структур, и эквивалентных ситуаций.

В данной главе был представлен обзор экспериментальных исследований влияния формы стального волокна и его объемной доли в фибробетоне при динамической нагрузке. Поведение

фибробетона было исследовано по двум направлениям: с точки зрения свойств материала и с точки зрения реакции конструкций. Существующие исследования в большинстве случаев показали, что увеличение объемной доли стальных волокон в фибробетоне увеличивают его ударопрочность и пластические свойства. Идеальной формой стальной фибры является спиралевидная и фибра с крючковидными концами, поскольку они лучше сцепляются с бетонной смесью. Однако исследования фибробетона при взрывной и ударной нагрузке ограничены как численно, так и экспериментально, а фундаментальное поведение данного материала при взрывной нагрузке еще недостаточно изучено из-за отсутствия доступных руководств по проектированию. Еще одна основная причина непонимания – наличие множества переменных, и поэтому одни только эксперименты не могут привести к эффективным методам проектирования. К тому же высокая стоимость экспериментальных испытаний мешает дальнейшему прогрессу в этом направлении. Таким образом, необходимо глубокое понимание поведения конструкции и точное моделирование динамических процессов при высокой скорости деформации.

# Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

#### 3.1. Метод Кольского

Динамические свойства хрупких материалов важны в различных областях военной, промышленной и гражданской деятельности. Из-за переходного характера нагрузки динамические испытания хрупких материалов сильно отличаются от испытаний пластичных материалов, к тому же они более сложные, чем их статические аналоги. Динамические испытания обычно проводятся по методике Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ). Методика Кольского является достаточно надежным методом измерения динамических свойств хрупких материалов при высоких скоростях деформации. Данный метод был предложен Г.Кольским в 1949 году [76, 77] для оценки динамической реакции различных металлов под воздействием высоких нагрузок или скоростей деформации. Вскоре после этого различные исследователи начали использовать различные модификации метода Кольского чтобы испытывать хрупкие материалы, такие как бетоны, керамика и горные породы [37]. Было выполнено несколько комплексных обзоров, касающихся динамического поведения хрупких материалов, таких как раствор, керамика, бетон и горные породы [139, 144, 173, 175], рассмотрены динамические экспериментальные методы [45, 118] для получения свойств хрупких материалов при различных типах напряженно-деформированного состояния.

Значительный прогресс был достигнут в отношении количественной оценки различных динамических свойств камнеподобных материалов, благодаря достижениям в экспериментальных методах РСГ. Данная глава призвана описать и критически оценить подробные процедуры и технические принципы для динамических испытаний хрупких материалов с использованием стержней Гопкинсона, а также кратко рассмотреть историю возникновения данной методики.

#### 3.1.1. Основные принципы РСГ

Принципиальная схема установки РСГ для испытаний материалов при сжатии состоит из трех стержней (рис. 3.1): ударяющего стержня (ударника) I, нагружающего стержня 2 и опорного стержня 5, между которыми устанавливается короткий испытываемый образец 4 в виде таблетки. После воздействия ударника в нагружающем стержне возбуждается одномерная упругая волна сжатия  $\varepsilon^{I}(t)$ , распространяющаяся со скоростью C. При достижении образца, волна расщепляется из-за разницы акустических жесткостей  $\rho C$  материалов образца и стержня, а также разницы их площадей поперечных сечений. Часть волны отражается обратно волной растяжения  $\varepsilon^{R}(t)$ , а

другая часть волны проходит через образец в опорный стержень волной сжатия  $\varepsilon^{T}(t)$ . Образец претерпевает упругопластическую деформацию, стержни деформируются упруго. Формы импульсов и амплитуды  $\varepsilon^{T}(t)$  и  $\varepsilon^{R}(t)$  определяются соотношением акустических жесткостей материалов образца и стержней, а также реакцией материала образца на приложенную нагрузку. Схема распространения волн в системе РСГ представлена на рисунке 3.1 в виде диаграммы *x*~*t*. Регистрируя тензодатчиками упругие импульсы деформации в мерных стержнях, по формулам, предложенным Г. Кольским, можно определить напряжения, деформации и скорости деформации в образце как функции времени [76].



Рисунок 3.1 – Базовая схема РСГ при сжатии: 1 – ударник, 2 – нагружающий стержень, 3, 6 – тензодатчики, 4 – образец, 5 – опорный стержень, 7 – демпфер [182]

В методе Кольского заложен ряд принципов и предпосылок:

1. Длительность нагружающего импульса должна быть значительно больше времени прохождения волны по длине образца. Это приводит к многократному отражению волн от торцов образца и в образце устанавливается одноосное напряженное состояние с равномерным распределением деформаций и напряжений по его длине. В результате испытание может рассматриваться как квазистатическое, несмотря на высокие скорости деформации образца.

2. Предел упругости материала мерных стержней должен быть существенно выше предела текучести материала образца.

3. При распространении волн в мерных стержнях отсутствует их дисперсия.

4. Равномерное распределение напряжений и деформации в пределах поперечного сечения стержня; отсутствие поперечных колебаний частиц стержня.

#### 3.1.2. Основные зависимости метода Кольского

Методика Кольского позволяет испытывать материалы различной физической природы в диапазоне скоростей деформации от 10<sup>2</sup> до 10<sup>4</sup> с<sup>-1</sup>. К преимуществам РСГ относятся:

- простота реализации;
- корректность теоретического обоснования процессов, происходящих в системе мерных стержней и образца между ними;
- точное определение деформаций образца, за счет косвенности измерений и малой инерционности тензорезисторов, регистрирующих импульсы деформации в стержнях;
- исключение изгиба образца из-за его малой длины.

Существенным достоинством метода Кольского является возможность зарегистрировать историю изменения скорости деформации в процессе деформирования образца.

Из теории одномерного распространения упругих волн в полубесконечных стержнях известно, что деформация в волне связывается с массовой скоростью *dU/dt* простым соотношением [182]:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{C} \cdot \frac{dU}{dt}$$
(3.1)

откуда смещение частиц в волне U(t):

$$U(t) = C \int_{0}^{t} \varepsilon(t) \cdot dt$$
(3.2)

Схема нагружения образца импульсами сжатия в системе РСГ представлена на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Схема нагружения образца [182]

На основании формулы 3.2 можно написать перемещения торцов стержней 1 и 2, между которых находится образец. Перемещение торца, расположенного слева,  $U_1(t)$  складывается из перемещения  $U_1^{I}(t)$ , вызванного распространением падающего импульса  $\varepsilon^{I}(t)$ , и перемещения  $U_1^{R}(t)$ , вызванного распространением отраженного импульса  $\varepsilon^{R}(t)$ :

$$U_1(t) = C \int_0^t \varepsilon^I(t) \cdot dt + (-C) \int_0^t \varepsilon^R(t) \cdot dt = C \int_0^t \left( \varepsilon^I(t) - \varepsilon^R(t) \right) \cdot dt$$
(3.3)

Перемещение правого торца  $U_2(t)$ , вызванного распространением прошедшего импульса  $\varepsilon^T(t)$ , будет равно:

$$U_2(t) = C \int_0^t \varepsilon^T(t) \cdot dt$$
(3.4)

Среднюю относительную деформацию образца длиной L0 определяют как:

$$\mathcal{E}_{s}(t) = \frac{U_{1}(t) - U_{2}(t)}{L_{0}}$$
(3.5)

а при выражении ее через импульсы в стержнях:

$$\varepsilon_{s}(t) = \frac{C}{L_{0}} \int_{0}^{t} \left( \varepsilon^{I}(t) - \varepsilon^{R}(t) - \varepsilon^{T}(t) \right) dt$$
(3.6)

Следовательно, скорость деформации образца равна:

$$\dot{\varepsilon}_{s}(t) = \frac{C}{L_{0}} \cdot \left( \varepsilon^{T}(t) - \varepsilon^{R}(t) - \varepsilon^{T}(t) \right)$$
(3.7)

Чтобы найти напряжения в образце необходимо рассмотреть усилия на граничащих со стержнями торцах образца. Усилие на левом граничащем торце  $P_1(t)$  складывается из усилия сжатия  $P_1^I(t)$ , вызванного падающим импульсом  $\varepsilon^I(t)$ , и усилия  $P_1^R(t)$ , вызванного отраженным импульсом  $\varepsilon^R(t)$ , а усилие на правом граничащем торце  $P_2(t)$  вызвано прошедшим через образец импульсом  $\varepsilon^T(t)$ . Учитывая закона Гука (при высоком пределе упругости происходит упругая деформация стержней), получим:

$$P_{1}(t) = EA\left(\varepsilon^{T}(t) + \varepsilon^{R}(t)\right);$$

$$P_{2}(t) = EA\varepsilon^{T}(t)$$
(3.8)

где *Е* и *А* – модуль Юнга и площадь поперечного сечения стержней. Тогда среднее усилие будет равно:

$$P = \frac{P_1(t) + P_2(t)}{2}$$
(3.9)

откуда среднее значение напряжений в образце равно:

$$\sigma_{s}(t) = \frac{P}{A_{s}^{0}} = \frac{EA}{2A_{s}^{0}} \Big( \varepsilon^{I}(t) + \varepsilon^{R}(t) + \varepsilon^{T}(t) \Big), \qquad (3.10)$$

здесь  $A_s^0$  – первоначальна площадь сечения образца. Как отмечалось ранее, силы равны на торцах образца. Это связано с тем, что при малой длине образца и большой длительности падающего импульса напряженное состояние образца почти однородно. Следовательно,

$$\varepsilon^{I}(t) + \varepsilon^{R}(t) = \varepsilon^{T}(t) \tag{3.11}$$

Подставив это выражение в (3.6), (3.7) и (3.10), мы получаем простые выражения для определения напряжений, деформаций и скоростей деформаций в образце, наиболее часто использующиеся на практике:

$$\sigma_{s}(t) = \frac{EA}{A_{s}^{0}} \cdot \varepsilon^{T}(t);$$

$$\varepsilon_{s}(t) = -\frac{2C}{L_{0}} \int_{0}^{t} \varepsilon^{R}(t) \cdot dt;$$

$$\dot{\varepsilon}_{s}(t) = -\frac{2C}{L_{0}} \cdot \varepsilon^{R}(t).$$
(3.12)

Переписав равенство (3.11) в виде  $\varepsilon^{R}(t) = \varepsilon^{T}(t) - \varepsilon^{I}(t)$  и подставив в (3.12), получим второй набор формул для определения напряжения и деформации в образце.

Из найденных зависимостей  $\sigma_s(t)$ ,  $\varepsilon_s(t)$  и  $\dot{\varepsilon}_s(t)$  исключается параметр времени для построения диаграмм деформирования  $\sigma_s \sim \varepsilon_s$  образца с известной зависимостью  $\dot{\varepsilon}_s \sim \varepsilon_s$ . Данная зависимость применяется с целью контроля изменения скорости деформаций в процессе деформирования. Также она используется для оценки влияния изменения скорости деформаций на полученную диаграмму деформирования если нагружение происходит за счет импульса сложной формы.

При наличии значительных деформаций, чтобы построить истинные диаграммы деформирования, значения напряжений и деформаций корректируются: вместо начальной площади поперечного сечения образца  $A_s^0$  подставляют ее текущие значения, определяемые из условия несжимаемости образца (равенство объема образца до и после деформации):

$$A_s(t) = \frac{A_s^0}{1 \pm \varepsilon_s(t)} \tag{3.13}$$

Отметим: отрицательный знак берется при сжатии, а положительный – при растяжении. Следовательно, найдем истинное напряжение по формуле:

$$\sigma_s^u(t) = \sigma_s(t) \cdot \left(1 \pm \varepsilon_s(t)\right) \tag{3.14}$$

Для определения деформаций применяется понятие суммарной относительной или истинной (логарифмической) деформации [197]:

$$\varepsilon_{s}^{u}(t) = \ln(1 \pm \varepsilon_{s}(t)) \tag{3.15}$$

Таким образом, по формулам (3.13) подсчитываются технические значения деформаций и напряжений в образце. Далее в соответствии с формулами (3.16) и (3.17) найденные величины корректируются для построения истинной диаграммы.

Следует отметить, что при малых степенях деформации (менее 0.15), что характерно для хрупких материалов, истинные и технические величины деформаций практически одинаковы, поэтому такая коррекция не применяется.

## 3.2. Модификации метода Кольского

Для реализации поставленных задач исследования хрупких материалов применены оригинальные методики, расширившие возможности традиционного метода Кольского. К данным методикам относятся модификации метода Кольского при растяжении, сдвиге и ограничении радиальной деформации, описанные в данном разделе.

#### 3.2.1. Модификация метода Кольского для определения прочности при растяжении

Для определения динамических прочностных и деформационных характеристик хрупких материалов при динамическом растяжении в работе применялись два экспериментальных метода. Первый из них реализуется за счет модифицированной установки метода Кольского на прямое растяжение, а второй метод является косвенным (непрямым) методом исследования хрупких сред при растяжении – так называемый метод раскалывания при сжатии или «Бразильский тест» [120].

Экспериментальная установка на прямое растяжение (рисунок 3.3) [182] отличается от традиционной установки по методу Кольского на сжатие тем, что трубчатый ударник разгоняется в стволе посредством газовой пушки в направлении, противоположном по отношению к образцу, после чего ударяет по наковальне, которая закреплена на конце нагружающего мерного стержня, тем самым возбуждая в нем упругую волну растяжения. Образец в свою очередь приклеивается либо непосредственно к мерным стержням, либо к специальным резьбовым насадкам, которые вкручиваются в резьбовые гнезда на торцах мерных стержней. Обработка экспериментальных данных в этом варианте проводится с помощью основных зависимостей метода РСГ (например, с использованием формул 3.12). Установка на прямое растяжение реализована с комплектом РСГ диаметром 20 мм, изготовленным из стали или из алюминиевого сплава Д16Т.



Рисунок 3.3- Схема экспериментальной установки на прямое растяжение

Эксперименты на раскалывание проводились с помощью традиционной установки по методу Кольского при сжатии с небольшой модификацией. Отличие заключается в том, что испытываемый цилиндрический образец устанавливается между торцами мерных стержней в повернутом на 90<sup>0</sup> положении и при нагружении сжимающим импульсом раскалывается по диаметральной плоскости на две половинки [120]. Схема испытания и формула для определения растягивающих напряжений показаны на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Схема испытания на раскалывание

где, Р – приложенная нагрузка;

- Е модуль упругости материала опорного стержня;
- *Еt* − прошедший импульс деформации в опорном стержне;
- *А*<sub>ст</sub> площадь поперечного сечения опорного стержня;

*L*, *D* – длина и диаметр образца соответственно.

Метод раскалывания применим для определения прочности на растяжение хрупких материалов при упругом поведение материалов и состояние равновесия образца, а также его при условии, что разрушение происходит по диаметральной плоскости.

## 3.2.2. Модификация метода Кольского для определения прочности при срезе

Для анализа поведения хрупких материалов в случае проникающих воздействий немаловажную роль играет их прочность на срез. В связи с этим ниже показана модификация метода Кольского для определения динамической прочности хрупких сред на срез [24]. В данной модификации бетонный образец располагается в жесткой обойме, разрезанной под углом α к оси образца (рисунок 3.5). Для исключения сжатия образца, его длина чуть меньше длины разрезной обоймы, размещающейся между торцами мерных стержней.



Рисунок 3.5 – Модификация метода Кольского для определения прочности бетона на срез

Импульс, зарегистрированный в опорном мерном стержне  $\varepsilon^{T}(t)$ , позволяет построить временную зависимость срезающего напряжения в образце через усилие, действующее на обойму:

$$P(t) = EA\varepsilon^{T}(t) \tag{3.18}$$

где Е и А – модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорного стержня соответственно.

Данное усилие раскладывается на две составляющие: касательную, параллельную плоскости среза  $P_{\tau}(t)$  и нормальную – перпендикулярную плоскости среза  $P_{n}(t)$ . Тогда:

$$P_{\tau}(t) = P \cdot \cos \alpha$$

$$P_{n}(t) = P \cdot \sin \alpha$$
(3.19)

Срезающее напряжение в образце вычисляется при отношении  $P_{\tau}(t)$  к эллиптической площади сечения образца в плоскости среза  $A_{s}$ .

$$A_s = \frac{\pi R^2}{\sin \alpha} \tag{3.20}$$

где *R* – внутренний радиус обоймы.

Следовательно, учитывая (3.18) – (3.20)

$$\tau(t) = \frac{P_{\tau}(t)}{A_{s}} = \frac{EA\cos\alpha\sin\alpha}{\pi R^{2}} \cdot \varepsilon^{T}(t)$$
(3.21)

С помощью формулы (3.21) строится зависимость срезающего напряжения в образце, как функция времени по импульсу деформации в опорном стержне.

Перемещение образца на плоскости среза определяется при рассмотрении перемещения торцов мерных стержней. Перемещение левого торца  $U_1(t)$  суммируется перемещением  $U_1^I(t)$ , вызванного нагружающим импульсом  $\varepsilon^{I}(t)$ , и перемещением  $U_1^R(t)$ , вызванного отраженным импульсом  $\varepsilon^{R}(t)$ :

$$U_1(t) = C \int_0^t \left( \varepsilon^I(t) - \varepsilon^R(t) \right) \cdot dt$$
(3.22)

Перемещение правого торца  $U_2(t)$  вызванное прошедшим импульса  $\varepsilon^{T}(t)$  определяется:

$$U_{2}(t) = C \int_{0}^{t} \varepsilon^{T}(t) \cdot dt$$
(3.23)

Горизонтальное перемещение точек разрезной обоймы:

$$\Delta \ell(t) = U_1(t) - U_2(t) = C \int_0^t \left( \varepsilon^T(t) - \varepsilon^R(t) - \varepsilon^T(t) \right) dt$$
(3.24)

Предполагается, что жесткость обоймы значительно больше жесткости самого образца. Тогда пренебрегая деформацией обоймы, перемещение точек образца на плоскости среза равно:

$$\Delta \ell_{\tau}(t) = \frac{\Delta \ell(t)}{\cos \alpha} = \frac{C}{\cos \alpha} \int_{0}^{t} \left( \varepsilon^{T}(t) - \varepsilon^{R}(t) - \varepsilon^{T}(t) \right) dt$$
(3.25)

и относительное перемещение этих точек выражается формулой:

$$\varepsilon_{\tau}(t) = \frac{\Delta \ell_{\tau}(t)}{\ell_0} = \frac{Ctg\alpha}{2R} \int_0^t \left( \varepsilon^T(t) - \varepsilon^R(t) - \varepsilon^T(t) \right) dt$$
(3.26)

где  $\Delta \ell_0$  – удвоенная большая полуось эллиптического сечения образца в плоскости среза.

Данная методика позволяет определять зависимость срезающего напряжения от времени либо перемещение точек образца. Для достоверного нахождения перемещений импульсы деформаций мерных стержней строго согласуются во времени. Для этого тензодатчики наклеиваются на мерные стержни на равноудаленном расстоянии от образца для обеспечения одновременной регистрации как отраженного в нагружающем, так и прошедшего в опорном стержне импульса.

# 3.2.3. Модификация метода Кольского для исследования хрупких материалов в условиях ограничения радиальной деформации

Для определения свойств хрупких материалов при сложнонапряженном состоянии применена модификация метода Кольского для испытаний при сжатии в условиях пассивного ограничения радиальной деформации [182], в которой испытываемый образец располагается в жесткой обойме, ограничивающей его радиальную деформацию (рис. 3.6). Используя классическую установку по методу Кольского на сжатие с помощью цилиндрического ударника в нагружающем стержне создается осевой сжимающий импульс, который, достигнув образца, нагружает его волной сжатия. Поскольку радиальную деформацию образца ограничивает жесткая обойма, в образце возникает осесимметричное объемное напряженное состояние, при котором деформированное состояние образца считается одномерным.



3.6 - Схема ограничивающей обоймы

Главные компоненты тензоров напряжений и деформаций в образце имеют вид:

$$\sigma_1 = \sigma_x; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r; \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_x; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_r = 0, \quad (3.27)$$

где  $\sigma_x$  и  $\varepsilon_x$  – продольное напряжение и деформация,  $\sigma_r$  – радиальное напряжение.

Осевые компоненты напряжений  $\sigma_x(t)$ , деформаций  $\varepsilon_x(t)$  и скоростей деформаций  $\dot{\varepsilon}_x(t)$  в образце определяются по традиционным формулам метода Кольского (3.12).

Радиальная компонента тензора напряжений вычисляется из решения задачи Ляме об упругом деформировании толстостенного цилиндра под действием внутреннего давления [182]. Взаимосвязь между внутренним давлением *P<sub>i</sub>* и окружной деформацией обоймы *E*<sub>0</sub> имеет вид :

$$P_{i}(t) = \frac{1}{2R_{2}^{2}} \left[ E \left( R_{1}^{2} - R_{2}^{2} \right) \varepsilon_{\theta}(t) \right]$$
(3.29)

где *E* - модуль Юнга материала обоймы; *R*<sub>1</sub> и *R*<sub>2</sub> - наружный и внутренний радиусы обоймы соответственно.

Радиальным напряжением  $\sigma_r$  является внутреннее давление  $P_i$  за счет которого обойма претерпевает малые упругие деформации. Следовательно, радиальную компоненту напряжений  $\sigma_r(t)$  в образце можно определить по сигналам тензодатчиков  $\varepsilon_{\theta}(t)$  (на наружной поверхности обоймы):

$$\sigma_{r}(t) = \frac{1}{2R_{2}^{2}} \left[ E \left( R_{1}^{2} - R_{2}^{2} \right) \varepsilon_{\theta}(t) \right]$$
(3.30)

Из полученных зависимостей  $\sigma_x(t)$ ,  $\varepsilon_x(t)$ ,  $\varepsilon_x(t)$  и  $\sigma_r(t)$  после их синхронизации исключается время как параметр для построения диаграммы одноосного деформирования образца  $\sigma_x(\varepsilon_x)$  и истории изменения скорости деформации  $\varepsilon_x(\varepsilon_x)$ .

Совокупные компоненты напряжений в образце  $\sigma_x(t)$  и  $\sigma_r(t)$  позволяют вычислять широкий спектр свойств исследуемого материала.

Сопротивление сдвигу (максимальные касательные напряжения, расположенные на плоскостях, под углом 45° к оси Х), равно:

$$\tau(t) = \frac{\sigma_x(t) - \sigma_r(t)}{2}$$
(3.31)

Давление P(t) в образце (определяемое через главные напряжения) равно:

$$P(t) = \frac{\sigma_x(t) + 2\sigma_r(t)}{3}$$
(3.32)

Объемная деформация:

$$\theta_{V}(t) = \varepsilon_{x}(t). \tag{3.33}$$

Интенсивность напряжений:

$$\sigma_i(t) = \sigma_x(t) - \sigma_r(t) . \tag{3.34}$$

Интенсивность деформаций:

$$\varepsilon_i(t) = \frac{\varepsilon_x(t)}{(1+\nu)} \approx \frac{2}{3} \varepsilon_x(t).$$
(3.35)

После синхронизации строятся кривые объемной сжимаемости  $P \sim \theta_V$  и сопротивления сдвигу  $\tau \sim P$ .

Данная модификация позволяет вычислить широкий спектр свойств материала: сопротивление сдвигу  $\tau(t)$ , давление P(t) в образце, объемную деформацию  $\theta_V(t)$ , интенсивность напряжения  $\sigma_i(t)$  и интенсивность деформации  $\varepsilon_i(t)$ . Таким образом, помимо диаграмм одноосного сжатия в условиях ограничения радиальной деформации можно получить кривые объемной сжимаемости  $P \sim \theta_V$  и зависимость сопротивления сдвигу от давления  $\tau \sim P$ .

# 3.3.Экспериментальные установки метода Кольского и средства регистрации динамических процессов

Для исследования динамических свойств хрупких материалов вышеуказанные методики были реализованы в НИИМ ННГУ. Использовались газовые пушки (рисунок 3.7) калибра 20 и 57 мм, входящие в состав установок РСГ-20-1 (сжатие), РСГ-20-2 (сжатие), РСГ-20-3 (прямое растяжение) и РСГ-60 (сжатие). Параметры экспериментальных установок приведены в таблице

3.1. Все установки состоят из газовых пушек (с пневматической системой управления), комплектов мерных стержней сплошного или полого (трубчатого) сечения, а также измерительной и регистрирующей аппаратуры. Экспериментальные установки размещены на станинах с возможностью юстировки в вертикальной и горизонтальной плоскости для обеспечения полной соосности газовой пушки с мерными стержнями и образцом.



а) б) в) Рисунок 3.7 – Внешний вид экспериментальных установок: а) РСГ-20-1; б) РСГ-20-2 (слева), РСГ-20-3 (справа), в) РСГ-60

К измерительно-регистрирующей аппаратуре, применяемой при испытаниях по методу Кольского, относятся приборы для измерения скорости ударника, регистрации упругих волн деформации в мерных стержнях и система запуска–синхронизации регистрирующей аппаратуры. Схема экспериментальной установки с регистрирующей аппаратурой для испытаний при сжатии п

п р

	Таблиц	a 3.1.	Па	рамет	ры	газовых	п١	лшек
--	--------	--------	----	-------	----	---------	----	------

и Н в	Іаименование пушки	Калибр пушки, мм	Объем КВД, л	Длина ствола, м	Тип затвора	Давление, МПа	Скорости метания, м/с
	РСГ-20-1	20	3	1,0	Золотник-ударник	5	5-150
д	РСГ-20-2	20	2	1,0	Электромагнитный	5	5-150
e	РСГ-20-3	20	2	1,0	клапан	5	5-150
H	РСГ-60	57	18	1,0	Золотник-ударник	5	5-50

H

a



Рисунок 3.8 - Схема установки для испытаний при сжатии по методу Кольского

Нагружение образца осуществляется соударением разгоняемого в стволе газовой пушки цилиндрического ударника с нагружающим мерным стержнем. Скорость ударника задает амплитуду возбуждаемого импульса ( $\sigma = \frac{\rho C V_y}{m}$ , где m – коэффициент, зависящий от соотношения акустических жесткостей  $\rho C$  материалов мерного стержня и ударника и соотношения их площадей поперечных сечений [182]), а длина ударника (от 50 до 400 мм) определяет его длительность. Для получения различных скоростей деформаций образцов регулируется скорость разгона ударника за счет изменения давления в камере газовой пушки. Скорость ударника измеряется на конце ствола газовой пушки с помощью двухканального светового измерителя скорости. Измеритель скорости представляет собой две пары светодиодов и фотодиодов с фокусирующими линзами, сигналы с которых подаются на триггерные ячейки в интегральной микросхеме. Далее сигналы передаются на осциллограф, работающий в режиме измерения временного интервала. Летящий ударник поочередно пересекает световые пучки и вызывает срабатывание триггеров. Скорость ударника вычисляется по времени преодоления заданной базы измерения – расстоянию между парами светодиод-фотодиод. Погрешность измерения скорости составляет не более 3%, что установлено экспериментальной проверкой.

Определение различных механических характеристик материала по формулам метода Кольского (3.13) производится на основании зарегистрированных упругих импульсов деформации в нагружающем и опорном стержнях, которые измеряются короткобазными фольговыми тензорезисторами. Для компенсации изгибных колебаний мерных стержней и повышения амплитуды полезного сигнала на боковой поверхности обоих мерных стержней наклеиваются по четыре последовательно соединенные тензорезистора. При регистрации динамических составляющих деформаций в стержне для питания тензорезисторов выбрана потенциометрическая схема, позволяющая запитать нескольких измерительных каналов от

одного источника питания. Обе группы тензорезисторов питаются постоянным током от одного стандартного стабилизированного источника питания. Регистрации сигналов с измерителя скорости производится с помощью осциллографа DS05014A, а сигналов с тензодатчиков – с помощью осциллографа DSOX4024A. Запуск измерительной системы осуществляется от измерителя скорости ударника. В памяти осциллографа DSOX4024A фиксируется большое количество импульсов, из которых после опыта вырезается необходимый диапазон для последующей обработки по формулам метода Кольского.

Для перехода от величин электрического сигнала к величинам деформаций в мерных стержнях измерительные каналы калибруются перед каждой серией испытаний для вычисления тарировочных коэффициентов  $K^{Y}$ . Для этого к измерительному тензорезистору подключается калибровочное сопротивление, что вызывает скачок линии на экране осциллографа на величину *a*. По известной величине *a* отклонения луча на экране осциллографа при изменении сопротивления тензорезисторов *R* на известную величину  $\Delta R$  во время калибровки, вычисляется тарировочный коэффициент  $K^{Y}$ :

$$K^{Y} = \frac{\Delta R}{R K a}$$
(3.36)

где К – коэффициент тензочувствительности используемого тензорезистора.

С использованием полученной при калибровке измерительного канала величине  $K^Y$  в каждом измерительном канале производится вычисление амплитуды зарегистрированного импульса деформации  $\varepsilon(t)$  в мерных стержнях по измерениям электрических сигналов u(t) с тензорезисторов:  $\varepsilon(t) = K^Y u(t)$ .

# 3.4.Программа автоматических измерений и обработки экспериментальных данных

После проведения каждого эксперимента полученная информация в виде импульсов деформаций с мерных стержней вместе с набором сопутствующей информации, необходимой для идентификации и обработки результатов, записывается в локальную базу данных, организованную в НИИ механики ННГУ на базе программы Microsoft Office Access. Перед началом серии экспериментов нового исследуемого материала в программе Access этому материалу присваивается свой цифровой идентификатор (код материала), а каждому типу эксперимента присваивается буквенный код (сжатие – с, растяжение – t, сдвиг – s). Проведенные испытания с присвоенным кодом записываются в локальную базу данных (БД).

Для автоматизации измерений и обработки экспериментальных данных на языке программирования Python была разработана (коллективом соавторов под руководством доктора

физ.-мат наук А.Ю. Константинова) программа построения диаграмм деформирования материалов по данным экспериментов на разрезном стержне Гопкинсона (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020666341). Программа предназначена для обработки экспериментальных данных и совместной работе с базой данных программы Microsoft Office Access (Access – реляционная система управления базами данных) и необходима для считывания, отображения и обработки информации из базы данных с целью получения диаграмм деформирования (рисунок 3.9). Далее описаны основные этапы работы с программой.

🗈 Построение диаграмм - метод Кольского										
Файл										
🐹 🔃 🔮										
База данных Осц	иллограмма	Данные	Импульсы	Диаграмма	Сводная диаграмма					
Файл базы данных 🤃 /Гонов М.Е/База данных/Срез, раскалывание/Экспериментальные Данные Для Отладки. accdb 🚺 Материал Бетон B22.5 (мелкозернистый) - 637 🔹										
Тип эксперимента	Сдвиг - s					•				
Номер образца	21					•				

Рисунок 3.9 - Стартовое окно программы.

При выборе файла базы данных Access программа считывает данные таблицы файла, а именно: код материала; дату эксперимента; тип испытания; температуру; давление; скорость ударника; код материала; номер образца; код образца; диаметр образца; длину образца; параметры ударника и мерных стержней; данные осциллограммы; зарегистрированные импульсы.

Функциональное меню программы содержит разделы для работы с базой данных, осциллограммой, импульсами, диаграммой выбранного эксперимента, а также разделом сводных диаграмм однотипных экспериментов.

Затем производится обработка результатов серии экспериментов. После выбора материала и типа эксперимента появляются номера образцов, соответствующие данной серии испытаний.

Верхняя панель раздела «База данных» содержит инструментальное меню (рисунок 3.10).

Инструмент «SaveToDat» формате .dat для работы в других, имеющихся в лаборатории программ обработки экспериментальных данных. Инструмент «Update OBDCContent» 🚺 предназначен для обновления базы данных в процессе проведения новых испытаний, поскольку считывание данных из таблицы Acces происходит однократно при открытии базы данных.

🗈 Построение диаграмм - метод Кольского									
Файл									
<b>X</b> 🚺 🔮									
База данных	Осциллограмма	Данные	Импульсы	Диаграмма	Сводная диаграмма				
Файл базы данных ):/Гонов М.Е/База данных/Срез, раскалывание/ЭкспериментальныеДанныеДляОтладки.accdb 🚺 Материал Бетон B22.5 (мелкозернистый) - 637 🔹									
Номер образца	21					•			

Рисунок 3.10 – Инструментальное меню раздела «База данных»

Инструмент «Считать данные» загружает данные выбранного эксперимента в соответствии с типом эксперимента и номером образца.

После считывания базы данных Access, в разделе «Осциллограмма» появляется осциллограмма проведенного эксперимента, состоящая из нескольких лучей, в зависимости от количества используемых каналов осциллографа. В правой части программы для удобства работы можно отключить или включить отображение отдельных каналов (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Диалоговое окно раздела «Осциллограмма»

Верхняя инструментальная панель раздела «Осциллограмма» содержит кнопочное меню, состоящее из нескольких групп, разделенных вертикальной чертой.

Первая группа инструментов отвечает за визуальную работу с программой. К этой группе относится инструмент «Полный вид» , отображающий всю осциллограмму; инструмент «Zoom» , увеличивающий отдельные фрагменты осциллограммы; инструмент «Pan» , осуществляющий перемещение осциллограммы; инструмент «Interval» , позволяющий выделять интервалы для работы с отдельным участком осциллограммы.

Вторая группа инструментов предназначена для редактирования осциллограммы. К этой группе относится инструмент «Вырезать» , позволяющий обрезать ранее выделенный интервал осциллограммы (с помощью инструмента «Interval» ). При выборе этой функции появляется диалоговое окно, в котором можно задать длину вырезаемого интервала в мкс, что, к примеру, позволяет всегда вырезать интервалы одинаковой длины. Инструмент «Установка нуля» гореназначен для редактирования луча или нескольких лучей (каналов) относительно нулевой линии на заданном интервале (исходя из среднего значения) с помощью инструмента «Interval» . Инструмент «Сглаживание» горенего значения) с помощью инструмента «Interval» . Инструмент «Сглаживание» горенего (Moving average smoothing), зависит от указанного количества интервальных точек, по которым будет происходить сглаживание. Второй алгоритм сглаживания основан на частотной фильтрации с использованием преобразований Фурье. Инструмент «ReduceData» горемалься данные осциллограммы. Например, на

имеющемся интервале осциллограммы находится 8125 точек, которые можно сократить, кратно 10, после чего останется только 812 точек. Визуально осциллограмма практически не меняется, однако объем хранящихся данных существенно сокращается.

Третья группа инструментов связана с ручным редактированием данных. Инструмент «PlotCurve» *м* предназначен для ручного удаления выбросов, колебаний и скачков осциллограммы. Инструмент «PolyFit» *м* аппроксимирует полиномом данные на заданном интервале в соответствии с заданной степенью (например, ^3). Инструмент «ApplyCurve» *«* сохраняет изменения после ручного редактирования. Инструмент «DeleteLine» *удаляет* нежелательные изменения после ручного редактирования. Инструмент «CompressCurve» *«* работает совместно с инструментом «PlotCurve», приближая (подтягивая) осциллограмму на отдельном участке к заданной линии. Также данная функция работает совместно с инструментом

«Interval»

Последняя, четвертая группа инструментов предназначена для загрузки данных из других источников, помимо базы данных Acces, а также для сохранения полученных изменений. Инструмент «OpenOsc» []] позволяет загрузить данные осциллограммы, сохраненные в различных форматах. Данная функция полезна, например, в том случае, когда полученные экспериментальные данные не загрузились в базу данных, однако сохранились в осциллографе и могут быть скопированы на USB накопитель. Инструмент «Save» []] сохраняет изменения осциллограммы в базе данных Acces. Инструмент «GetRay» []] сохраняет изменения луча одного из каналов из другого эксперимента (при проведении экспериментов в одинаковых условиях), например, в случае обрыва датчика на одном из стержней и потере данных.

Раздел «Данные» (рисунок 3.12) содержит справочную информацию, считываемую из базы данных Access: начальные и конечные размеры образца, параметры стержней, ударника и эксперимента. Раздел «Данные» полезен в случае, когда, например, необходимо подкорректировать расстояния до тензодатчиков, чтобы более точно синхронизировать импульсы во времени (см. далее описание раздела «Импульсы»).

Райл								
База данны	х Осциллограмма	Данные	Импульсы	Диаграмма	Сводная диаграмм	а		
Образец			Стержень 1			Стержень 2	2	
LO, MM 10	.17		L, мм	1000.00		L, MM	1000.00	
D, MM 18	.37		Ld, MM	500.0000		Ld, MM	250.0000	
L, MM 0.0	00		с, м/с	5050		с, м/с	5050	
			Е, МПа	71000		Е, МПа	71000	
			D, мм	20.00		D, мм	20.00	
			k	0.038600		k	0.038200	
			материал	B95		материал	B95	
/дарник			Эксперим	ент				 
L, MM	200.0000		Код мате	риала	637			
D, мм	20.0000		Тип эксп	еримента	c			
V, м/с	13.44		Номер э	ксперимента	21			
Р, атм	1.50		Темпера	тура	20.00			
материал	Дюраль		Примеч	ание	None			

Рисунок 3.12 - Диалоговое окно раздела «Данные»

Раздел «Импульсы» (рисунок 3.13) содержит аналогичный инструментарий, рассмотренный выше в разделе «Осциллограмма», за исключением нескольких дополнений.



Рисунок 3.13 – Диалоговое окно раздела «Импульсы»

Инструмент «SyncPulses» 🕅 предназначен для синхронизации импульсов, таким образом, чтобы сумма падающего и отраженного импульса как можно точнее совпадала с прошедшим импульсом. Данный инструмент создан с целью улучшения выполнения основной предпосылки метода Кольского о равенстве сил на торцах мерных стержней. Инструмент

«ReadPulses» предназначен для получения импульсов непосредственно с осциллограммы, а не из базы данных по умолчанию. Данная функция необходима, например, для более точной обработки данных. Инструмент «GetPulse» предназначен для загрузки импульса из другого эксперимента (при проведении экспериментов в одинаковых условиях), например, в случае обрыва датчика на одном из стержней и потере данных. Инструмент «repairPulse» восстанавливает отсутствующий импульс по двум существующим, исходя из условий равенства сил на торцах мерных стержней. Инструмент «dispersion» позволяет проводить синхронизацию импульсов с учетом дисперсии волн.

В разделе «Диаграмма» отображается полученная на основании импульсов диаграмма отдельного эксперимента.

Последний раздел «Сводная диаграмма» предназначен для сравнения диаграмм однотипных испытаний. На сводной диаграмме можно выбрать номера экспериментов, а также задать осям диаграммы различные значения: t – время; е – деформация; s – напряжение; de – скорость деформации (рисунок 3.14). После выбора заданных параметров осям X, Y1 и Y2 необходимо использовать инструмент «UpdateOBDCContet» Для обновления сводной диаграммы.



Рисунок 3.14 - Диалоговое окно раздела «Сводная диаграмма»

корректирует наклон кривых под заданную величину. Инструмент «Ecor» **[**√] Инструмент «CheckAll» выделяет все диаграммы. Инструмент «CheckNone» "X. отключает все выделенные диаграммы. Инструмент «XLSexport» экспортирует данные выделенных экспериментов в Microsoft Excel. Инструмент «CreateReport» формирует отчет в формате протоколов испытаний (PDF). Инструмент «Statistic» Statistic проводит статистическую обработку по выбранным экспериментам, результатом которой является осредненная диаграмма. Инструмент «Sync» Sync позволяет редактировать импульсы выбранного эксперимента. После активации функции «Sync» открывается диалоговое окно, с импульсами данного эксперимента (рисунок 3.15), в котором можно поочередно редактировать прошедший, падающий или отраженный импульс используя следующие комбинации клавиш: стрелки влево или вправо (←, →) перемещают отдельно выбранный импульс по горизонтали; стрелки вверх, вниз (↑, ↓) перемещает отдельно выбранный импульс по вертикали; Ctrl+→, Ctrl+→ перемещает все импульсы влево или вправо; клавиша ТАВ – переключает импульсы в соответствии с обозначением (Т – прошедший импульс зеленого цвета, І – падающий импульс синего цвета, R – отраженный импульс оранжевого цвета, черная пунктирная линия – сумма падающего и отраженного импульсов).

Таким образом, после проведения эксперимента, данные с осциллографа поступают в программу автоматических измерений и обработки экспериментальных данных, благодаря которой можно быстро обработать полученные осциллограммы, синхронизировать импульсы деформаций мерных стержней, построить диаграммы деформирования материалов и сохранить

полученную информацию в файл Microsoft Office Access, формирую тем самым базу экспериментальных данных различных материалов.



Рисунок 3.15 – Синхронизация импульсов выбранного эксперимента

# 3.5. Выводы по главе 3

1. Изучены и освоены установки и методы для динамических испытаний с помощью РСГ в НИИМ ННГУ.

2. Реализованы два экспериментальных метода определения прочностных характеристик хрупких материалов при динамическом растяжении за счет модифицированной установки метода Кольского на прямое растяжение, а также с помощью косвенного (непрямого) метода раскалывания или «Бразильского теста».

3. Развиты модификации метода Кольского для определения механических характеристик хрупких материалов при срезе и для определения свойств хрупких материалов в сложнонапряженном состоянии в условии пассивного ограничения радиальной деформации.

4. В коллективе соавторов разработана, запатентована и применена на практике программа построения диаграмм деформирования материалов по данным экспериментов на разрезном стержне Гопкинсона на языке программирования Python. Данная программа позволяет обрабатывать полученные осциллограммы, синхронизировать импульсы деформаций мерных стержней, строить диаграммы деформирования материалов и формировать базу экспериментальных данных.

# Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИИЯ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ БЕТОНА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В данной главе приведены результаты экспериментальных исследований процессов деформирования и разрушения нескольких типов мелкозернистого бетона, среди которых мелкозернистый бетон класса B22,5, B25, фибробетон с полимерной, стальной и комбинированной фиброй, армированный железобетон. Исследования механических свойств вышеуказанных материалов были выполнены при статических (~ $10^{-6}$  c<sup>-1</sup>) и высоких (~ $4\cdot10^2 - 2\cdot10^3$  c<sup>-1</sup>) скоростях деформации. В результате экспериментального исследования построены диаграммы деформирования при различных скоростных режимах динамического воздействия. Получены характеристики прочности и деформации роста напряжений. Рассмотрено влияние скорости деформации и скорости роста напряжений, а также наличия упрочняющих компонентов в составе бетона (различных видов фибры) на свойства испытанных материалов.

## 4.1. Методика изготовления бетонных образцов

Для экспериментальных исследований по методу Кольского, как при сжатии, так и при растяжении необходимы цилиндрические образцы круглого сечения. Испытываемый образец устанавливается между торцами двух длинных соосно расположенных мерных стержней. Для передачи ударного импульса от нагружающего стержня в образец и далее в опорный стержень необходимо обеспечить плотное прилегание испытуемого образца к торцам мерных стержней. В связи с этим, метод Кольского предъявляет к образцам ряд высоких требований, таких как: однородность материала, минимальная шероховатость торцевых поверхностей образца. Обязательно должна быть обеспечена параллельность торцов образца и их перпендикулярность оси цилиндра, чтобы не возникал эксцентриситет, вызывающий изгиб образца. Оптимальное соотношение диаметра образца к его длине должно лежать в диапазоне от 1 до 2 для снижения эффектов инерции и трения. Для снижения масштабного эффекта при использовании мерных стержней диаметром от 20 до 60 мм желательно испытывать мелкозернистый бетон с фракциями наполнителя от 1 до 3 мм.

Для изготовления бетонных образцов состав бетонной смеси подбирался в соответствии с ГОСТ 27006-86. Далее заливались бетонные заготовки, которые после набора прочности нарезались на пластины с помощью камнерезного станка Cedima CTS-57-G, а из пластин с помощью настольно-сверлильным станком HC-12M и алмазных коронок высверливались образцы необходимых размеров. Для изготовления образцов диаметром 57 мм использовалась буровая установка Hilti DD130.

## 4.2. Мелкозернистый бетон класса В22,5

В данном разделе приведены результаты испытаний мелкозернистого бетона класса B22,5 полученного методом полусухого вибропрессования на ООО «ЗКПД-70». Состав мелкозернистого бетона представлен в таблице 4.1.

N⁰	Материал	Расход на 1 м <sup>3</sup> (кг)
1	Цемент марка 500D	430
2	Песок крупный (модуль 3 мм)	1435
3	Песок мелкий (модуль 1,6 мм)	355
4	Пластифицирующая добавка Murasan BWA 16	1,6
5	Вода	120

Таблица 4.1. Состав мелкозернистого бетона класса В22,5

## 4.2.1. Результаты динамических испытаний на одноосное сжатие

Высокоскоростные испытания в условиях одномерного напряженного состояния сжатия производились на экспериментальной установке РСГ-20-2, на образцах диаметром 20 мм и длиной 10 мм. Мерные стержни, как нагружающий, так и опорный, изготовлены из дюралюминиевого сплава Д16Т. . Амплитуда нагружающей волны варьировалась за счет изменения скорости ударника. Режимы нагружения были подобраны таким образом, чтобы наблюдался постепенный рост скорости деформаций.

С целью минимизации влияния на исследуемые свойства сил инерции и трения размеры образцов выбирались из соотношения длины образца к диаметру пределах 0,3 – 1,0, а обработка торцов мерных стержней перед началом каждого эксперимента проводилась смазкой «Литол».

Проведенный цикл динамических испытаний мелкозернистого бетона состоял из 35 экспериментов.

Бетон испытывался при семи различных скоростных режимах по пять выстрелов на каждый режим. Скорости деформации находились в пределах от  $4 \cdot 10^2$  до  $2 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup>. Параметры испытаний приведены в таблице 4.2. Три режима из семи (5-7) проведены с использованием медных формирователей импульса. Использование медных формирователей позволило более качественно выполнить основную предпосылку метода Кольского об однородности НДС в образце. При испытаниях по режимам 1-4 использовался ударник длиной 200 мм из сплава Д16Т, а при режимах 5-7 использовался стальной ударник длиной 117 мм.

	Кол	Пара нагру	метры /жения	Параме	етры обра	зца		Ре	езультаты эк	спериме	нта	Унерго- емкость, МДж/м <sup>3</sup> 47         2.70           58         2.51           90         2.30           55         2.38           17         2.47           76         3.61           70         3.51           17         3.79           71         3.70					
Режим	экспери- мента и номер	Давл. в КВД, атм.	Скорость удар. м/с	D, мм	S <sub>п.с.</sub> , мм <sup>2</sup>	L, мм	Макс. напряже- ния, МПа	Пред. деф., %	Скорость деформации, 1/с	Время жизни, мкс	КДУ	Энерго- емкость, МДж/м <sup>3</sup>					
	c637-19	1,5	14,13	18,41	266,19	10,07	78,14	0,89	665,74	25,00	3,47	2.70					
1	c637-20	1,5	13,67	18,37	265,04	10,16	80,49	0,80	666,23	17,50	3,58	2.51					
	c637-21	1,5	13,44	18,37	265,04	10,17	65,24	0,83	676,59	21,25	2,90	2.30					
	c637-22	1,5	13,62	18,46	267,64	10,17	79,86	0,79	676,59	21,25	3,55	2.38					
	c637-23	1,5	14,2	18,47	267,93	10,16	71,28	0,83	748,59	20,00	3,17	2.47					
	c637-01	2	18,02	18,35	264,46	10,21	84,55	0,93	1019,51	16,25	3,76	3.61					
2	c637-02	2	18,33	18,45	267,35	10,22	83,21	0,98	1032,09	17,50	3,70	3.51					
	c637-03	2	18,62	18,45	267,35	10,00	93,81	1,08	974,41	17,50	4,17	3.79					
	c637-04	2	18,68	18,41	266,19	10,02	83,54	1,10	1084,05	17,50	3,71	3.70					
	c637-05	2	18,09	18,39	265,62	10,06	100,56	1,12	1003,36	17,50	4,47	4.02					
	c637-06	3	25,86	18,01	254,75	10,08	98,75	1,46	1717,47	17,50	4,39	5.06					
	c637-07	3	25,77	18,49	268,51	10,11	100,64	1,29	1560,29	17,50	4,47	5.15					
3	c637-08	3	26,45	18,49	268,51	10,18	105,76	1,50	1698,34	17,50	4,70	5.62					
	c637-09	3	26,2	18,45	267,35	10,15	99,50	1,32	1764,55	18,75	4,42	5.16					
	c637-10	3	25,75	18,43	266,77	10,18	105,75	1,47	1704,93	18,75	4,70	5.57					
	c637-11	4	31,05	18,35	264,46	10,24	108,61	1,65	1870,60	15,00	4,83	6.03					
	c637-12	4	30,72	18,51	269,09	10,24	108,94	1,44	2019,84	13,75	4,84	5.51					
4	c637-13	4	31,11	18,42	266,48	10,24	103,71	1,46	1900,78	13,75	4,61	5.97					
	c637-14	4	30,73	18,63	272,59	10,23	108,00	1,80	1931,89	16,25	4,80	5.47					
	c637-15	4	31,45	18,3	263,02	10,21	108,20	1,59	1944,06	13,75	4,81	6.29					
	c637-24	2	18,4	18,33	263,89	10,26	66,96	1,21	403,13	50,00	2,98	2.34					
5	c637-25	2	19,09	18,38	265,33	10,24	60,98	1,81	604,31	52,50	2,71	2.97					
5	c637-26	2	18,46	18,51	269,09	10,25	59,65	1,72	572,70	52,50	2,65	2.83					
	c637-27	2	18,55	18,34	264,17	10,26	64,62	1,53	501,15	47,50	2,87	2.94					
	c637-28	2	18,6	18,38	265,33	10,26	64,45	1,51	487,37	51,25	2,86	2.77					
	c637-30	5	35,25	18,27	262,16	10,22	71,92	1,51	860,89	30,00	3,20	6.51					
6	c637-31	5	35,65	18,22	260,73	10,21	72,07	1,30	800,43	28,75	3,20	6.43					
0	c637-32	5	35,76	18,27	262,16	10,22	72,76	1,24	714,93	26,25	3,23	6.35					
	c637-33	5	35,63	18,37	265,04	10,22	69,39	1,62	937,20	32,50	3,08	6.64					
	c637-34	5	35,63	18,45	267,35	10,19	64,27	1,32	776,42	28,75	2,86	5.78					
	c637-46	20	60,98	18,4	265,91	10,36	90,10	1,68	1109,74	28,75	4,00	8.07					
	c637-47	20	60,27	18,34	264,17	10,41	85,94	1,33	961,21	21,25	3,82	7.97					
7	c637-48	20	60,73	18,2	260,16	10,36	79,81	1,63	1258,44	25,00	3,55	8.46					
	c637-49	20	59,77	18,31	263,31	10,33	77,84	1,63	1215,06	27,50	3,46	7.42					
	c637-50	20	61,15	18,25	261,59	10,49	72,97	1,69	1245,61	26,25	3,24	7.19					

Таблица 4.2. Параметры испытаний мелкозернистого бетона класса В22,5

Представленный в данной и всех последующих таблицах параметр «Время жизни» определялся по диаграммам  $\sigma(t)$ , как время достижения напряжениями максимума, после которого начинается интенсивное разрушение образца.

На рисунке 4.1 представлены результаты проверки выполнения условий однородности напряжений в образце. Видно, что в случае применения формирователя импульса предположение о равенстве сил на торцах выполняется более качественно.



Рисунок 4.1 – Импульсы в мерных стержнях: (а) без применения формирователя импульса при скорости деформации 1100 с<sup>-1</sup> и (б) с применением формирователя импульса при скорости деформации 1250 с<sup>-1</sup>

Обработка первичных экспериментальных данных всего цикла испытаний при разных типах НДС осуществлялась с помощью авторской программы (см. раздел 3.4). Зарегистрированные в мерных стержнях импульсы деформации синхронизировались во времени; используя формулы по методу Кольского для каждого эксперимента строились зависимости напряжения от времени  $\sigma(t)$ , деформации от времени  $\varepsilon(t)$  и скорости деформации от времени  $\dot{\varepsilon}$ (*t*). Полученные зависимости синхронизировались во времени для каждого скоростного режима. После исключения параметра времени строилась диаграмма динамического деформирования  $\sigma(\varepsilon)$ с отображением по дополнительной вертикальной оси истории изменений скорости деформаций έ(ε) для каждого эксперимента. Далее для однотипных режимов нагружения строились осредненные диаграммы зависимости напряжений от деформаций  $\sigma(\varepsilon)$  и скорости деформаций от деформаций  $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$ , а также зависимости напряжений от времени  $\sigma(t)$  и скорости деформаций от времени *є*(*t*). Ниже представлены диаграммы испытаний бетонных образцов для каждого отдельного режима, на которых сплошными линиями показаны зависимости напряжения от времени  $\sigma(t)$  или напряжения от деформации  $\sigma(\varepsilon)$ , вертикальная ось слева – напряжение; пунктирными линиями показана зависимость скорости деформации от времени  $\dot{\varepsilon}(t)$  или скорости деформации от деформации  $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$ , вертикальная ось справа – скорость деформации.

При режиме №1 (рисунок 4.2) средняя скорость ударника равна 14 м/с. Средняя динамическая прочность на сжатие составила 75 МПа, при средних скоростях деформации около 700 с<sup>-1</sup>. Следует отметить, что все испытанные образцы были разрушены в первом цикле, о чем свидетельствует рост скорости деформации после уменьшения напряжений (после максимума) на диаграмме σ-ε. Визуальный осмотр подтвердил разрушение образцов.

В качестве примера получаемых диаграмм деформирования на рис. 4.2 показаны диаграммы при скорости удара 14 м/с. Видно, что присутствует некоторый разброс данных.

Результаты статистической обработки диаграмм этой группы испытаний представлены на рис. 4.3.





Рисунок 4.2 – Динамические диаграммы деформирования при режиме №1



При всех остальных режимах нагружения диаграммы деформирования подобны. В зависимости от скорости удара изменяются значения пределов прочности и величина деформации (см. табл.4.2). С целью экономии места данные диаграммы не приводятся.

Анализ полученных диаграмм показал, что начальные участки всех полученных диаграмм имеют линейный характер, спадающие ветви диаграмм деформирования и осмотр образцов свидетельствуют о том, что образцы в процессе эксперимента разрушились, что подтверждают фотографии образцов, показанных на рисунке 4.4.



Режим №1

Режим №2





Режим №3





Режим №7

Режим №5

Режим №6



Рисунок 4.5 – Осредненные диаграммы динамического деформирования при сжатии

На рисунке 4.5 приведены осредненные диаграммы деформирования с хронологией изменения скорости деформации. На вышеуказанных диаграммах в осях напряжениедеформация σ(ε) на начальном участке нагружения рост напряжения и деформаций происходит по закону, близкому к линейному, а при дальнейшей деформации, при достижении предельных значений напряжений, бетон интенсивно разрушается, что сопровождается снижением напряжений и ростом деформаций. Видно, что в случае применения медного формирователя импульса и без него влияние скорости деформации на начальный участок диаграмм почти отсутствует при всех режимах нагружения. Величина максимальных напряжений определяется амплитудами нагружающих импульсов, то есть бетонные образцы в процессе нагружения могут выдержать напряжения существенно большие его структурной прочности. Это связано с наличием двух противоборствующих процессов: скорости нарастания продольных сжимающих нагрузок, определяемых амплитудами нагружающих волн, и скоростями образования и слияния микротрещин при поперечных расширениях образцов связанных с эффектом Пуассона.

Для каждой из полученных диаграмм были выделены характерные точки с максимально достигнутыми напряжениями ( $\sigma_{max}$ ), после которых начинались разрушения образцов. Для этих точек определены соответствующие величины предельных деформаций ( $\varepsilon_{max}$ ) и времени до начала разрушения ( $\tau_{max}$ ). Скорости деформаций ( $\dot{\varepsilon}$ ) были приняты максимальными до начала разрушения образцов, поскольку они меняются в процессе их деформирования.

Указанные результаты занесены в таблицу 4.2 и представлены на рис. 4.6 в виде их зависимостей от скорости деформации, причем отдельно для испытаний без формирователя импульсов и с формирователем.


Рисунок 4.6 – Влияние формы нагружающего импульса и скорости деформации на механические свойства мелкозернистого бетона B22,5 при динамическом сжатии

Полученные зависимости демонстрируют то, что с ростом скорости деформации максимальные напряжения увеличиваются, также растут и соответствующих им предельные деформации (по линейному закону), а время до начала разрушения снижается по степенному закону. Видно, что применение формирователей импульсов снизило диапазон скоростей деформации и полученных напряжений, и повысило уровень предельных деформаций, а процесс нагружения образца растянулся во времени, как и само разрушение образца.

Динамическую прочность бетона характеризуют коэффициентом динамического упрочнения (КДУ), полученного отношением максимального достигнутого в опыте динамического напряжения к статической прочности бетона при сжатии (22,5 МПа). Зависимость КДУ от скорости деформации приведена на рисунке 4.7. Показатель КДУ в полученном диапазоне скоростей деформации ~ 4·10<sup>2</sup> – 2·10<sup>3</sup> с<sup>-1</sup> изменяется от 1 до 5.



Рисунок 4.7 – Зависимость КДУ от скорости деформации

#### 4.2.2. Результаты динамических испытаний на растяжение

Исследования динамических свойств бетона при растяжении проводились с помощью двух модификаций по методу Кольского, описанных в разделе 3.2.1 (метод прямого растяжения и метод раскалывания). Испытания на прямое растяжение проводились на экспериментальной установке РСГ-20-3, в которой применялись мерные стержни из дюралюминиевого сплава Д16Т диаметром 20 мм. Испытания на раскалывание проводились на экспериментальной установке РСГ-20-2, в которой использовались сплошной (нагружающий) дюралюминиевый мерный стержень диаметром 20 мм и полая опорная трубка с заглушкой на конце в качестве мерного элемента. Вариация амплитуды нагружающей волны производилось путем изменения скорости цилиндрического ударника диаметром 20 мм из дюралюминиевого сплава Д16Т.

Бетонные образцы для испытаний на прямое растяжение изготавливались диаметром 20 мм и длиной 10 мм, после чего приклеивались с помощью эпоксидного клея с добавлением вольфрамовой пудры (для повышения прочности клеевого шва) к сменным резьбовым насадкам, которые вкручивались в резьбовые гнезда мерных стержней. Бетонные образцы для испытаний на раскалывание изготавливались диаметром 20 мм и длиной 14 мм.

Процесс испытания на растяжение и раскалывание регистрировался с использованием высокоскоростной камеры FASTCAM Mini UX100 со светодиодной системой подсветки поля обзора для последующего анализа времени и характера разрушения образцов (рисунок 4.8). Для качественного обнаружения начальных трещин и измерения деформации образцов заранее окрашивались в белый цвет с последующим нанесением точечного слоя черной краски (спекл).



Рисунок 4.8 – Высокоскоростная камера FASTCAM Mini UX100

При испытаниях на прямое растяжение было реализовано два скоростных режима. Во всех испытаниях использовался ударник из сплава Д16Т длиной 200 мм. Данные экспериментов и некоторые параметры, определенные по их результатам приведены в таблице 4.3.

			Парам	метры об	бразца			Результат	ы экспе	римента		
Режим	Код экспери мента и	Скор. удар- ника	D,	S <sub>π.c.</sub> ,	L, мм	Макс. напряже-	Пред. деф.,	Скорость деформаци	Врем нач разруг м	ия до нала пения, кс	КДУ	Энергия разрушения,
	номер	м/с	IVI IVI	MIM		ние, МПа	%	и, 1/с	Диаг- рамма	Фото- съемка	энта ля, КДУ раз то- мка ,5 5.97 . 6.13 . 6.13 . 5 4.98 . 5 5.80 . 5 5.78 5 3.97 . 3.66 . 5 4.78 . 2.86 5 3.78	МДж/м <sup>3</sup>
	t637-01	7,11	18,64	272,7	10,51	13,43	1,31	539,07	43	37,5	5.97	0.054
	t637-02	7,87	18,51	268,9	10,52	13,79	1,10	567,69	34,5	-	6.13	0.108
1	t637-03	7,64	18,65	273,0	10,35	11,20	0,89	525,76	35	37,5	4.98	0.088
	t637-04	6,38	18,69	274,2	10,41	13,04	0,831	380,64	34	37,5	5.80	0.052
	t637-05	5,94	18,7	274,5	10,39	13,01	1,00	373,56	39	37,5	5.78	0.058
	t637-06	10,85	18,28	262,3	10,37	8,94	0,92	723,52	25,5	25	3.97	0.093
	t637-07	11,23	18,53	269,5	9,96	8,24	1,11	844,88	26,5	-	3.66	0.100
2	t637-08	11,39	18,47	267,7	10,35	10,75	0,95	750,21	21	25	4.78	0.080
	t637-09	10,54	18,2	260,0	10,42	6,44	0,66	545,00	24	-	2.86	0.110
	t637-10	10,95	18,09	256,8	9,63	8,49	0,93	727,69	29,5	25	3.78	0.079

Таблица 4.3. Параметры экспериментов на прямое растяжение

КДУ бетона при растяжении рассчитывался как отношение максимального динамического напряжения к статической прочности бетона при растяжении (2,25 МПа). Энергия разрушения определялась как площадь (под кривой σ(ε)) от точки максимального напряжения (начало

разрушения) до конца зарегистрированной диаграммы. Данная характеристика необходимая для последующей идентификации модели разрушения бетона.

Когда волна растягивающих напряжений распространялась по образцу, в нем происходил разрыв, что подтверждает характер разрушения образца на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 – Характер разрушения образца при прямом растяжении

Далее, как и по результатам испытаний на сжатие, представлены зависимости напряжений от деформаций  $\sigma(\varepsilon)$  и скорости деформаций от деформаций  $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$  бетонных образцов на прямое растяжение по модифицированному методу Кольского для обоих режимов испытаний. На всех рисунках сплошными линиями показаны диаграммы «напряжение-деформация», а пунктирными линиями того же цвета – диаграммы «скорость деформации-деформация» (соответствующая ось расположена справа). Для каждого реализованного режима испытаний полученные кривые  $\sigma(\varepsilon)$  и  $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$  усреднялись по оси времени. При оценке прочности бетона на растяжение засчитывались только те испытания, в которых разрушение происходило по телу образца (а не по клеевому шву), что отслеживалось и контролировалось с помощью высокоскоростной фотосъемки и состоянию сборки образца после опыта.

По зависимостям растягивающих напряжений от времени определялись максимальные напряжения  $\sigma_{t,max}$  и время до начала разрушения  $\tau_{t,max}$ , (при максимальном напряжении), а по диаграммам  $\sigma$ - $\epsilon$  – энергия разрушения.

Для примера на рис. 4.10 и 4.11 показаны полученные диаграммы при первом режиме нагружения. Для второго режима нагружения полученный набор диаграмм аналогичен и здесь не приводится.



Рисунок 4.10 – Диаграммы  $\sigma(t)$  и  $\dot{\varepsilon}(t)$ ,  $\sigma(\varepsilon)$  и  $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$ , полученные при динамическом растяжении при режиме №1



Рисунок 4.11 Средние диаграммы σ(ε) и έ(ε) с доверительными интервалами для режима №1 На рисунке 4.12 показаны осредненные диаграммы испытаний бетона при растяжении для обоих режимов нагружения.



Рисунок 4.12 – Осредненные диаграммы  $\sigma(t)$  и  $\dot{\epsilon}(t)$ ,  $\sigma(\epsilon)$  и  $\dot{\epsilon}(\epsilon)$  при режимах №1 и №2

Для каждой из полученных диаграмм были выделены характерные точки с максимально достигнутыми напряжениями ( $\sigma_{t,max}$ ), после которых начинались разрушения образцов. Для этих точек определены соответствующие величины предельных деформаций ( $\varepsilon_{t,max}$ ) и времени до начала разрушения ( $\tau_{t,max}$ ). Скорости деформаций ( $\dot{\varepsilon}$ ) были приняты максимальными до начала разрушения образцов, поскольку они меняются в процессе их деформирования.

Указанные результаты занесены в таблицу 4.3 и представлены на рис. 4.13 в виде их зависимостей от скорости деформации.

По результатам испытаний на прямое растяжение наблюдается отрицательная чувствительность к скорости деформации, когда при более высокой скорости деформации динамическая прочность снижается.

В таблице 4.3 представлены также данные по коэффициенту динамического упрочнения (КДУ) бетона, данный параметр представлен на рисунке 4.14.



Рисунок 4.13 – Влияние скорости деформации на механические свойства мелкозернистого бетона В22,5 при растяжении



Рисунок 4.14 – Зависимость КДУ бетона при растяжении от скорости деформации при растяжении

Зависимость энергии разрушения бетона при растяжении от скорости деформации (представленная в таблице 4.3) показана на рисунке 4.15. Наблюдается увеличение энергии разрушения с ростом скорости деформации.



Рисунок 4.15 – Зависимость энергии разрушения бетона при растяжении от скорости

деформации



Рисунок 4.16 – Хронология высокоскоростной фотосъемки эксперимента №03



Рисунок 4.17 – Хронология высокоскоростной фотосъемки эксперимента №10

На рисунке 4.16 показана хронология высокоскоростной фотосъемки эксперимента №03 первого скоростного режима. На рисунке 4.17 показана хронология высокоскоростной фотосъемки эксперимента №10 второго скоростного режима. Из кадров полученного видеоряда вырезалась узкая центральная зона вдоль оси образца, на которой хорошо видно появление и развитие поперечной трещины.

Анализ скоростной фотосъёмки показал, что время до начала разрушения образцов, определенное по диаграммам деформирования и представленное в таблице 4.3, и время разрушения, определенное по результатам скоростной съемки, практически совпадают.

Помимо испытаний на прямое растяжение были проведены испытания и определены прочностные характеристики бетона при раскалывании (Бразильский тест). Для нагружения образцов использовалась установка, реализующая метод Кольского при сжатии (см. раздел 3.2.1), однако образец располагался между торцами мерных стержней в повернутом на 90<sup>0</sup> состоянии и раскалывался по диаметральной плоскости.

Для определения предельного растягивающего напряжения при раскалывании реализованы два скоростных режима. Во всех испытаниях использовался ударник из сплава Д16Т длиной 200 мм. Данные экспериментов и некоторые параметры, определенные по их результатам приведены в таблице 4.4.

КИМ	TC		Пара	метры обр	оазца		Результаты эн	сперимента	
MM	Код	Скор.				Marca	Скорость	Время жи	изни, мкс
Режі	мента и номер	удар- ника м/с	D, мм	S <sub>п.с.</sub> , мм <sup>2</sup>	L, мм	макс. напряже- ние, МПа	роста напряж., ГПа/с	Диаграмма	Фото- съемка
	r637-11	7,88	18,62	272,1	14,48	7,61	431	25	-
	r637-12	6,49	18,57	270,7	14,41	7,60	394	30	30
1	r637-13	6,76	18,62	272,1	14,34	7,50	265	35	35
	r637-14	7,74	18,64	272,7	14,21	8,14	506	29	30
	r637-15	7,89	18,61	271,8	14,21	7,74	458	28	30
	r637-16	16,46	18,59	271,2	14,18	8,48	532	25	25
	r637-17	16,96	18,59	271,2	14,16	4,60	367	23	25
2	r637-18	16,33	18,61	271,8	14,11	5,01	352	24	25
-	r637-19	16,65	18,63	272,4	14	4,33	352	22	25
	r637-20	16,49	18,62	272,1	13,88	4,53	329	20	20
	r637-21	16,6	18,64	272,7	13,92	5,72	475	18	20

Таблица 4.4. Параметры экспериментов при раскалывании

Поскольку в испытаниях на раскалывание разрыв образца по диаметральной плоскости происходит, начиная с центральной области и постепенно распространяясь к краям образца, примыкающим к торцам мерных стержней, и в зоне контакта присутствует зона со сложным напряженным состоянием (рис. 1.5), определить величину исходного размера разрываемой площадки не представляется возможным, в качестве результатов представлены зависимости развиваемого растягивающего напряжения от времени, а в качестве источника построения скоростных зависимостей принимается не скорость деформации, а скорость роста напряжений.

В первом режиме было выполнено пять экспериментов (r637-11 – r637-15); средняя скорость ударника составила 7 м/с, среднее максимальное раскалывающее напряжение 8 МПа, среднее время до начала разрушения 30 мкс. Построенные диаграммы σ(*t*) усреднялись по оси времени, был выполнен статистический анализ полученных результатов: при доверительной вероятности 0.95 были определены отклонения и доверительные интервалы средней диаграммы.

Для примера на рис. 4.18 и 4.19 показаны полученные диаграммы при первом режиме нагружения. Для второго режима нагружения полученный набор диаграмм аналогичен и здесь не приводится. Все испытанные образцы раскололись по диаметральной плоскости на две половины.





Рисунок 4.18 – Диаграммы раскалывания бетона при режиме №1

Рисунок 4.19 – Средняя диаграмма  $\sigma(t)$  с доверительными интервалами для режима №1

На рисунке 4.20 показаны характер разрушения образцов. На рисунке 4.21 показаны осредненные диаграммы испытаний бетона при раскалывании для режимов №1 и №2.



Рисунок 4.20 – Характер разрушения образцов



Рисунок 4.21 – Осредненные диаграммы зависимости напряжения от времени экспериментальных режимов №1 и №2 при раскалывании.

Отметим, что, в отличие от результатов испытаний на сжатие, при испытаниях на прямое растяжение и раскалывание получен обратный эффект: наблюдается снижение динамической прочности при более высокой скорости нагружения.

На рисунке 4.22 показана хронология высокоскоростной фотосъемки эксперимента №14 первого скоростного режима. Из полученных при регистрации кадров вырезалась представляющая интерес центральная полоса, где зарождалась и развивалась трещина. Прилегающие к образцу торцы мерных стержней видны на кадрах слева и справа. Нагружающий стержень расположен справа. Сжимающее усилие прикладывается к цилиндрическому образцу вдоль его диаметральной плоскости (рис. 3.4) и именно в этой плоскости вдоль оси нагружения сжатием происходит зарождение и развитие трещины, которая видна на рис. 4.22.



Рисунок 4.22 – Хронология высокоскоростной фотосъемки эксперимента №14, режим 1 Анализ скоростной фотосъёмки показал, что разрушение образца происходило раньше достижения максимальных напряжений на диаграммах, показанных выше (рис. 4.18, 4.19). Отметим, что на диаграммах присутствуют два пика напряжения. Использование скоростной

фотосъемки показало, что первый пик напряжения на диаграммах  $\sigma(t)$  соответствует образованию первой трещины.

#### 4.2.3. Результаты динамических испытаний на срез

Испытаниях на срез проводились на экспериментальной установке РСГ-20-2, в которой использовались дюралюминиевые мерные стержни диаметром 20 мм сплошного (нагружающий) и полого (опорный) сечения, как и при раскалывании. Схема испытания показана на рис. 3.5. Изменение амплитуды нагружающей волны производилось путем изменения скорости цилиндрического ударника диаметром 20 мм из дюралюминиевого сплава Д16Т. Длина ударника во всех опытах составляла 200 мм.

Бетонные образцы для испытаний на срез были изготовлены диаметром 15 мм и длиной 25 мм (рисунок 4.23). Обработка экспериментальных данных (как и при других экспериментах) осуществлялась с помощью специализированной компьютерной программы. Все испытания сопровождались высокоскоростной кинорегистрацией процесса деформирования с помощью камеры FASTCAM Mini UX100.

Испытания на срез проводились по методике, описанной в разделе 3.2.2, и состояли из трех скоростных режимов. В таблице 4.5 представлены режимы проведенных испытаний и некоторые параметры, определенные по их результатам.

M	Код	Пај	раметры нагрух	кения	Параметры	образца	Результаты эксперимента		
Режи	экспери- мента и номер	Давл. КВД, атм.	Скорость ударника, м/с	D, мм	Sэллипса, мм <sup>2</sup>	L, мм	Максимальное напряжение, МПа	Время жизни, мкс	
	s637-02	1	10,92	14,45	202,60	25,11	5,85	25	
	s637-03	1	10,63	14,48	203,45	25	4,45	21	
1	s637-04	1	10,84	14,46	202,88	25,07	5,01	24	
	s637-05	1	10,91	14,48	203,45	25,04	4,37	24	
	s637-21	1	10,67	14,51	204,29	25,08	4,99	21	
	s637-06	1,2	14,02	14,47	203,17	25,2	4,82	21	
	s637-09	1,2	14,18	14,47	203,17	25,06	4,42	19	
2	s637-10	1,2	13,48	14,44	202,32	25,05	4,28	23	
	s637-11	1,2	13,54	14,49	203,73	25,02	5,84	21	
	s637-12	1,2	13,88	14,51	204,29	25,09	5,07	20	
	s637-13	0,8	7,88	14,46	202,88	25,1	4,95	22	
	s637-14	0,8	8,25	14,47	203,17	24,87	5,82	26	
3	s637-16	0,8	8,62	14,51	204,29	25	6,20	36	
	s637-17	0,8	9,33	14,47	203,17	25,02	5,40	25	
	s637-19	0,8	8,52	14,48	203,45	25,12	5,35	30	

Таблица 4.5. Параметры испытаний и полученные результаты при динамическом срезе

Поскольку определение деформации сдвига в данном типе испытаний затруднительно, в качестве полученных результатов приводятся диаграммы напряжений сдвига от времени  $\tau(t)$ .



Рисунок 4.23 – Разрезные обоймы и образцы для испытаний на срез бетона класса 22,5

В первом режиме нагружения было выполнено пять экспериментов. Средняя скорость ударника составила 11 м/с, среднее максимальное срезающее напряжение 5 МПа, среднее время до разрушения образца 23 мкс.





Рисунок 4.24 – Диаграммы испытаний бетона на срез при скоростном режиме №1



В качестве примера на рис. 4.24 показаны временные диаграммы проведенных испытаний. Видно, что разброс данных небольшой. Полученные диаграммы  $\tau(t)$  усреднялись по оси времени; был выполнен статистический анализ полученных результатов: при доверительной вероятности 0.95 были определены отклонения и доверительные интервалы средней диаграммы (рисунок 4.25).

Для остальных режимов нагружения полученный набор диаграмм аналогичен и здесь не приводится.

На рисунке 4.26 показана фотография разрушенного образца, все испытанные образцы разрушились по плоскости среза на две половинки. На рисунке 4.27 показаны осредненные диаграммы испытаний бетона при испытаниях на срез.



Рисунок 4.26 – Фотография разрушенного образца,



Рисунок 4.27 – Осредненные диаграммы зависимости напряжения от времени режимов №1, №2 и №3 при испытаниях на срез

# 4.3. Результаты исследования армированного бетона

В данном разделе приведены результаты испытаний армированного мелкозернистого бетона класса B22,5, изготовленного методом заливки бетона в формы, в которые заранее устанавливались сеточные каркасы (рисунок 4.28).

Армирующая мелкоячеистая сетка изготовлена из проволоки светлой О/Н по ГОСТу 3282-74 из стали марки 1ПС, размер ячейки 10х10 мм, толщина проволоки 1,4 мм. Состав мелкозернистого бетона представлен в таблице 4.6.

No	Маториод	Расход на
JN≌	Материал	1 м <sup>3</sup> (кг)
1	Цемент (марка D500)	480
2	Щебень (модуль 1-3 мм)	1250
3	Песок	390
4	Суперпластификатор	2,4
5	Вода	205

Таблица 4.6. Состав мелкозернистого бетона класса В22,5



Рисунок 4.28 – Армирующий сеточный каркас и залитая бетонная заготовка

После выдерживания изготовленных армированных балок до достижения нормативной прочности, из нее были изготовлены образцы. С помощью буровой установки Hilti DD130 из балки высверливались керны диаметром ~54 мм, которые затем нарезались на отдельные армированные образцы толщиной ~30 мм с помощью камнерезного станка Cedima CTS-57-G.

#### 4.3.1. Результаты динамических испытаний армированного бетона на одноосное сжатие

Высокоскоростные испытания в условиях одномерного напряженного состояния при сжатии производились на экспериментальной установке РСГ-60, на образцах диаметром 53 мм и длиной 30 мм. Мерные стержни, как нагружающий, так и опорный, а также цилиндрический ударник изготовлены из дюралюминиевого сплава Д16Т. Длина ударника во всех опытах была 300 мм. Амплитуда нагружающей волны и, соответственно, величина реализованной скорости деформации варьировалась за счет изменения скорости ударника. Режимы нагружения были подобраны таким образом, чтобы наблюдался постепенный рост скорости деформаций.

Для сведения к минимуму влияния инерционных сил и сил трения были учтены основные рекомендации, а именно: соотношение длины образца к диаметру должно быть в пределах 0,3 – 1,0; для снижения влияния сил трения при радиальной раздаче образца обработка торцов мерных стержней перед началом каждого эксперимента проводилась смазкой «Литол».

Армированный бетон испытывался при четырех различных скоростных режимах по 2-4 выстрела на каждый режим. Скорости деформации находились в пределах от 30 до 600 с<sup>-1</sup>. Параметры испытаний приведены в таблице 4.7.

Далее, как и по результатам испытаний на сжатие бетона класса 22.5 представлен набор зависимостей изменения напряжения и скорости деформации для каждого режима в виде усредненных зависимостей с доверительным интервалом.

Начальные участки полученных диаграмм деформирования имеют линейный характер, а спадающие ветви диаграмм и осмотр образцов свидетельствуют о том, что образцы в процессе эксперимента разрушились, что подтверждают фотографии разрушенных образцов на рисунке 4.29.

1/	Код	Параметры нагружения		Пара	метры обр	оазца	Результаты эксперимента					
Режим	экспери- мента и номер	Давл. КВД атм.	Скорость удар. м/с	D, мм	<b>S</b> <sub>п.с.</sub> , мм <sup>2</sup>	L, мм	Макс. напряже- ния, МПа	Пред. деф., %	Скорость деформации, 1/с	Время жизни, мкс	КДУ	
1	c669-01	0,5	7,14	53,7	2265	29,75	52,01	0,6	36,4	99	2,1	
1	c669-02	0,5	4,3	53,7	2265	29,2	23,00	0,5	43,5	108	0,9	
2	c669-03	1	14,5	53,4	2240	30,4	98,57	1,9	165,1	98	3,9	
	c669-04	1	15,5	53,4	2240	30,16	99,94	2,0	176,7	100	4,0	
	c669-05	2,5	19	52,73	2184	30,69	124,15	2,5	219,1	108	5,0	
3	c669-06	2,5	20,4	53,5	2248	30,3	105,41	2,5	319,5	65	4,2	
5	c669-07	2,5	22,2	53,4	2240	30,13	113,10	3,1	313,9	90	4,5	
	c669-08	2,5	22,7	53,5	2248	31	103,06	2,7	329,0	82	4,1	
	c669-09	3	26,5	53,2	2223	30,85	124,52	3,4	390,9	92	5,0	
4	c669-10	3	28,4	53,8	2273	30,9	101,73	4,5	579,5	90	4,1	
-	c669-11	3	29	53,4	2240	31	100,54	3,5	595,1	78	4,0	
	c669-12	3	25,5	54,2	2307	30,3	120,60	3,1	374,5	80	4,8	

Таблица4.7. Параметры испытаний армированного бетона при динамическом сжатии



Образец №3

Образец №5

Образец №7

Образец №12

На рисунке 4.30 приведены осредненные диаграммы деформирования армированного бетона с хронологией изменения скорости деформации.

На вышеуказанных диаграммах в осях напряжение–деформация  $\sigma(\varepsilon)$  на начальном участке нагружения можно выделить участок, где рост напряжения и деформаций происходит по закону, близкому к линейному, а при дальнейшей деформации, при достижении предельных значений напряжений, бетон интенсивно разрушается (в режимах 2,3,4), что сопровождается снижением напряжений и ростом деформаций. Для каждой из полученных диаграмм были выделены характерные точки с максимально достигнутыми напряжениями ( $\sigma_{max}$ ), после которых начинались разрушения образцов. Для этих точек определены соответствующие величины

предельных деформаций ( $\varepsilon_{max}$ ) и времени до начала разрушения ( $\tau_{max}$ ). Скорости деформаций ( $\dot{\varepsilon}$ ) были приняты максимальными до начала разрушения образцов, поскольку они меняются в процессе деформирования. На рисунке 4.31 представлены скоростные зависимости основных характеристик армированного бетона









Полученные зависимости демонстрируют то, что с ростом скорости деформации максимальные напряжения увеличиваются, также растут и соответствующие им предельные деформации (по линейному закону), а время до начала разрушения снижается по степенному закону.



Рисунок 4.32 – Зависимость КДУ от скорости деформации

Зависимость КДУ от скорости деформации приведена на рисунке 4.32. Показатель КДУ в полученном диапазоне скоростей деформации ~ 40–500 с<sup>-1</sup> изменяется в зависимости от скорости деформации от 2,9 до 5.

# 4.4. Исследование мелкозернистого бетона и фибробетона, армированного полимерной, стальной и комбинированной фиброй

Было изготовлено три вида фибробетонов, отличающихся материалом армирующей фибры. В данном разделе описываются результаты экспериментальных исследований динамических свойств трех видов фибробетона: фибробетона с полимерной фиброй (полифибробетон – ПФБ) с объемной долей полипропиленового волокна 1,5%; фибробетона со стальной фиброй (сталефибробетон – СФБ) с объемной долей стального волокна 1,5%; фибробетон – КФБ) с объемной полипропиленового (0,75%) и стального (0,75%) волокна. Для сравнительного анализа влияния армирующей фибры на механические свойства исследуемых материалов приведены результаты динамических испытаний исходной мелкозернистой бетонной матрицы (МЗБ).

Полипропиленовая фибра «Poliarm» (рис. 4.33а), – структурное синтетическое макроволокно длиной 25 мм, представляющее собой отдельные жесткие волокна синусоидальноволнистой формы из ориентированного первичного полипропилена, обработанные специальным составом, улучшающим адгезию с бетонным раствором.



90

Рисунок 4.33 – Полипропиленовая фибра «Poliarm» (а) и стальная фибра «БМЗ» (б)

Технические характеристики полипропиленовой фибры представлены в таблице 4.8. Таблица 4.8. Технические характеристики полипропиленовой фибры Poliarm

№	Характеристика	Показатель
1	Длина	От 25 до 55 мм
2	Материал	Первичный полипропилен 100%
3	Удельный вес	0,91 кг/м <sup>3</sup>
4	Модуль Юнга	3500 Н/мм
5	Прочность на разрыв	360-560 H/мм <sup>2</sup>
6	Температура размягчения	156°C
7	Цвет	Прозрачно-белый
8	Химическая устойчивость	К кислотам, щелочам и растворителям

Стальную фибру БМЗ (рис.4.336) изготавливают из высокоуглеродистой стальной проволоки по ГОСТ 9389 с временным сопротивлением разрыву не менее 1000 МПа. Для изготовления сталефибробетона применялась фибра волнового профиля длиной 15 мм, диаметром 0,3 мм (рисунок 4.336).

Динамические испытания образцов фибробетона с различным типом фибры проводились на установке РСГ-20-2. Программой исследования были предусмотрены испытания на одноосное сжатие, сжатие в обойме (режим одноосной деформации), раскалывание (рис. 3.4) и срез (рис. 3.5).

Состав испытанных фибробетонов представлен в таблице 4.9.

		Расход на 1 м <sup>3</sup> (кг)								
№	Материал	Без фибры	С поли- мерной фиброй	Со стальной фиброй	С комбини- рованной фиброй					
1	Цемент (марка D500)	480	480	480	480					
2	Щебень (модуль 1-3 мм)	1250	1000	1000	1000					
3	Песок средней крупности	390	600	600	600					
4	Суперпластификатор	2,4	3,0	3,0	3,0					
5	Вода	205	200	200	200					
6	Полипропиленовая фибра «Poliarm» 25 мм	-	14,0	-	7,0					
7	Стальная волнистая фибра БМЗ 15 мм	-	-	120	60					

# Таблица 4.9. Состав фибробетонов

#### 4.4.1. Результаты статических испытаний бетона и фибробетонов при сжатии

Статические испытания на одноосное сжатие состояли из 3-4 экспериментов для каждого материала. Цилиндрические образцы для статических испытаний длиной и диаметром 20 мм высверливались из бетонных заготовок. Испытания проводились на испытательной установке Z100 Zwick-Roell<sup>1</sup> до стадии разрушения образца при постоянной скорости деформации  $3 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>. Полученные для каждого материала диаграммы деформирования усреднялись. Результаты испытаний в виде усредненных диаграмм показаны на рисунке 4.34 и сведены в таблицу 4.10.

Результаты статических испытаний показали, что неармированный мелкозернистый бетон МЗБ обладает наименьшей прочностью и наименьшим модулем упругости при сжатии, а наибольшей прочностью и наибольшим модулем упругости обладает фибробетон СФБ со стальной фиброй.

N⁰	Материал	Максимальные напряжения, МПа	Предельная деформация, %
1	МЗБ - Мелкозернистый бетон	28,65	0,7
2	ПФБ - Полимерный фибробетон	36,28	0,5
3	КФБ - Комбинированный фибробетон	45,15	0,6
4	СФБ - Стальной фибробетон	52,25	0,6

Таблица 4.10. Результаты статических испытаний

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Статические испытания мелкозернистого бетона и фибробетона проводились совместно с сотрудниками лаборатории статических испытаний НИИМ ННГУ (зав. лабораторией Д.А. Казаков).



Рисунок 4.34 – Результаты статических испытаний при сжатии

#### 4.4.2. Результаты динамических испытаний бетона и фибробетонов на одноосное сжатие

Высокоскоростные испытания в условиях одномерного напряженного состояния при сжатии производились на экспериментальной установке РСГ-20-1, на образцах диаметром 20 мм и длиной 10 мм. Мерные стержни, как нагружающий, так и опорный, а также цилиндрический ударник были изготовлены из дюралюминиевого сплава Д16Т. Длина ударника во всех опытах составляла 250 мм. Режимы нагружения были подобраны таким образом, чтобы наблюдался постепенный рост нагрузки и скорости деформации.

Соотношение длины образца к диаметру выбиралось в пределах 0,5 – 1,0; обработка торцов мерных стержней перед началом каждого эксперимента смазкой «Литол» для снижения влияния сил трения при радиальной раздаче образца. Во всех испытаниях проводилась кинорегистрация процесса деформирования образца с использованием высокоскоростной камеры FASTCAM Mini UX100.

#### 4.4.2.1. Результаты испытаний мелкозернистого бетона МЗБ

Проведенный цикл динамических испытаний мелкозернистого бетона состоял из 4 скоростных режимов. Параметры испытаний приведены в таблице 4.11.

4M	10	Параметры нагружения		Параметры образца			Результаты эксперимента					
Режим	Код экспери мента	Давл. КВД, атм.	Скорость удар. м/с	D, мм	S <sub>п.с.</sub> , мм <sup>2</sup>	L, мм	Макс. напряже- ния, МПа	Пред. деф., %	Скорость деформ., 1/с	Время жи Диаг- рамма	зни, мкс Фото- съемк а	КДУ
	c679-01	0,5	11,2	18,35	264,46	10,30	29,99	1,6	196,0	106,2	не раз.	1,0
	c679-02	0,5	9,8	18,45	267,35	10,40	29,37	1,1	113,0	128,0	не раз.	1,0
1	c679-03	0,5	10,1	18,45	267,35	10,40	33,44	1,2	143,3	107,6	не раз.	1,2
	c679-04	0,5	9,0	18,7	274,65	10,65	35,85	0,7	115,5	109,4	не раз.	1,2
	c679-05	0,5	12,0	18,6	271,72	10,50	35,03	1,4	166,7	111,6	не раз.	1,2
	c679-06	0,75	16,6	18,65	273,18	10,70	51,60	1,3	111,3	153,3	-	1,8
2	c679-07	0,75	16,5	18,55	270,26	10,65	50,03	1,5	182,9	112,9	-	1,7
	c679-08	0,75	16,1	18,5	268,80	10,80	45,10	2,2	278,7	110,1	-	1,6

Таблица 4.11. Параметры испытаний МЗБ при динамическом сжатии

	c679-09	0,75	15,7	18,3	263,02	10,60	46,10	1,9	196,4	124,8	-	1,6
	c679-10	0,75	14,3	18,45	267,35	10,40	41,23	1,6	200,7	105,6	не раз.	1,4
	c679-11	0,75	16,0	18,5	268,80	10,65	44,38	1,8	222,5	108,8	109	1,5
	c679-12	0,75	14,0	18,4	265,91	10,20	45,77	1,5	152,6	126,4	125	1,6
	c679-13	1,5	20,3	18,3	263,02	10,15	51,19	2,0	324,5	104,5	90	1,8
	c679-14	1,5	21,3	18,45	267,35	10,75	55,11	1,2	202,8	87,2	90	1,9
3	c679-15	1,5	20,2	18,4	265,91	10,70	53,92	1,7	246,7	97,7	-	1,9
	c679-16	1,5	21,1	18,78	277,00	10,81	64,78	1,1	196,4	114,8	-	2,2
	c679-17	1,5	21,5	18,75	276,12	10,50	57,71	1,5	307,9	86,0	80	2,0
	c679-19	3	27,9	18,31	263,31	10,75	66,90	1,9	778,8	40,0	40	2,3
4	c679-20	3	29,9	18,76	276,41	10,65	75,82	1,5	731,2	34,8	40	2,6
4	c679-21	3	30,0	18,23	261,01	10,64	61,93	2,1	961,8	43,5	40	2,1
	c679-22	3	29,4	18,78	277,00	10,51	71,08	1,7	817,8	36,2	40	2,5

На рисунке 4.35 представлены результаты проверки выполнения условий однородности напряжений в образце. Видно, что импульс на нагружаемом торце образца (сумма падающего и отраженного импульсов) хорошо совпадает с импульсом (прошедшим) на другом торце образца, что свидетельствует об однородности НДС образца в течение всего испытания.

В качестве примера аналогичные рисунки проверки выполнения условий однородности напряжений в образце по импульсам в мерных стержнях приведены далее для всех циклов испытаний других материалов в соответствующих разделах.



Рисунок 4.35 – Диаграмма импульсов эксперимента с679-19

На рис. 4.36 в качестве примера представлены диаграммы деформирования бетона при режиме №4 при близких скоростях удара, средняя скорость ударника составила 29 м/с, средняя динамическая прочность на сжатие порядка 69 МПа, при средних скоростях деформации около 820 с<sup>-1</sup>. На рисунке 4.37 приведены осредненные диаграммы деформирования с хронологией изменения скорости деформации. Для остальных режимов нагружения полученный набор диаграмм аналогичен и здесь не приводится.



Рисунок 4.36 – Динамические диаграммы  $\sigma(t)$  и  $\dot{\varepsilon}(t)$ ,  $\sigma(\varepsilon)$  и  $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$ , режим №4

На вышеуказанных диаграммах в осях напряжение–деформация ( $\sigma \sim \varepsilon$ ) на начальном участке нагружения рост напряжения и деформаций происходит по закону, близкому к линейному, но при дальнейшей деформации линейность нарушается, а при достижении предельных значений напряжений, бетон интенсивно разрушается (в режимах 2,3,4), что сопровождается снижением напряжений и ростом деформаций. Влияние изменения скорости деформации на диаграмму деформирования и прочностные характеристики материала приведены на рисунке 4.38.







Рисунок 4.38 – Влияние скорости деформации на механические свойства мелкозернистого бетона

при динамическом сжатии





Зависимость КДУ от скорости деформации приведена на рисунке 4.39. КДУ изменялся в динамическом диапазоне в зависимости от скорости деформации от 1,5 до 3.

# 4.4.2.2. Результаты испытаний полифибробетона ПФБ

Проведенный цикл динамических испытаний полифибробетона состоял из 3 скоростных режимов и в сумме из 17 испытательных выстрелов. Скорости деформации находились в пределах от 200 до 900 с<sup>-1</sup>. Параметры испытаний приведены в таблице 4.12.

_	V.a	Пар нагр	Параметры нагружения		метры обј	разца	Результаты эксперимента					
Режим	код экспери мента	Давл. КВД, атм.	Скорость удар. м/с	D, мм	S <sub>п.с.</sub> , мм <sup>2</sup>	L, мм	Макс. напряже- ния, МПа	Пред. деф., %	Скорость деформ., 1/с	Время ж Диаг- рамма	изни, мкс Фото- съемка	кду
	c680-01	1	16,23	18,77	276,71	10,98	54,21	1,6	218,8	105	Не разр.	1,5
	c680-02	1	16,67	18,67	273,77	10,97	51,86	1,7	240,3	101	Не разр.	1,4
1	c680-03	1	16,37	18,74	275,82	10,89	49,71	1,8	223,7	110	110	1,4
	c680-04	1	16,46	18,59	271,42	10,85	47,34	1,8	215,4	108	Не разр.	1,3
	c680-05	1	17,44	18,76	276,41	10,94	55,41	1,9	215,4	112	110	1,5
	c680-06	2	23,59	18,75	276,12	10,84	55,29	1,7	279,5	88	94	1,5
	c680-07	2	24,24	18,68	274,06	10,97	57,05	1,8	303,7	96	100	1,6
2	c680-08	2	24,38	18,6	271,72	10,78	55,60	1,4	266,0	84	90	1,5
2	c680-09	2	23,2	18,68	274,06	10,97	58,31	1,8	263,5	88	90	1,6
	c680-10	2	23,89	18,66	273,47	10,95	59,25	1,3	227,0	81	90	1,6
	c680-11	2	23,42	18,67	273,77	11,08	54,79	1,5	227,7	91	80	1,5
	c680-12	4	34,04	18,76	276,41	10,82	83,08	1,5	667,1	40	40	2,3
	c680-13	4	33,87	18,57	270,84	10,98	68,18	1,8	894,7	40	40	1,9
2	c680-14	4	32,91	18,71	274,94	10,99	70,83	1,6	649,8	43	50	2,0
5	c680-15	4	31,02	18,58	271,13	10,52	72,15	2,0	831,3	43	50	2,0
	c680-16	4	34,35	18,75	276,12	10,75	74,76	1,7	810,7	37	40	2,1
	c680-17	4	33,71	18,7	274,65	10,64	78,09	1,5	784,5	34	30	2,2

Таблица 4.12. Параметры испытаний ПФБ при динамическом сжатии

На рисунке 4.41 приведены осредненные диаграммы деформирования с хронологией изменения скорости деформации.



Рисунок 4.40 – Диаграмма импульсов эксперимента с680-04



Рисунок 4.41 – Осредненные диаграммы  $\sigma(t)$  и  $\dot{\epsilon}(t)$ ,  $\sigma(\epsilon)$  и  $\dot{\epsilon}(\epsilon)$  при сжатии для всех режимов



Рисунок 4.42 – Влияние скорости деформации на механические свойства ПФБ при динамическом сжатии

На вышеуказанных диаграммах в осях напряжение–деформация (σ~ε) на начальном участке нагружения рост напряжения и деформаций происходит по закону, близкому к линейному, а при дальнейшей деформации, при достижении предельных значений напряжений, бетон интенсивно разрушается, что сопровождается снижением напряжений и ростом деформаций. На рисунке 4.42 представлены скоростные зависимости основных прочностных, деформационных и временных

характеристик. Зависимость КДУ от скорости деформации приведена на рисунке 4.43. Из рисунка видно, что значения КДУ в полученном диапазоне скоростей деформации 200-900 с<sup>-1</sup> изменяется от 1,5 до 2,2.



Рисунок 4.43 – Зависимость КДУ от скорости деформации

# 4.4.2.3. Результаты испытаний сталефибробетона СФБ при сжатии

Проведенный цикл динамических испытаний сталефибробетона состоял из 3 скоростных режимов. Скорости деформации находились в пределах от 180 до 720 с<sup>-1</sup>. Параметры испытаний приведены в таблице 4.13.

		Пара нагру	Параметры нагружения		Параметры образца			Результаты эксперимента					
	Код						Макс.	Пред.	Скорость	Время жи	зни, мкс		
ММ	экспери мента	Давл. КВЛ.	Скорость	D,	S <sub>п.с.</sub> ,	L,	напряже-	деф.,	деформ.,	Лиаг-	Фото-	клу	
Реж		атм.	удар. м/с	ММ	MM <sup>2</sup>	ММ	ния, МПа	%	1/c	рамма	съемка		
	c681-01	1	16,71	18,46	267,64	10,86	58,1	1,4	187,1	110,0	Не раз.	1,0	
	c681-02	1	15,53	18,45	267,35	10,81	52,0	1,3	190,9	105,2	100,0	0,9	
1	c681-03	1	15,54	18,54	269,97	10,97	57,6	1,2	179,9	114,0	Не раз.	1,0	
	c681-04	1	15,89	18,65	273,18	10,84	59,9	1,3	181,7	105,6	Не раз.	1,0	
	c681-05	1	16,85	18,67	273,77	10,68	62,9	1,2	181,4	109,6	Не раз.	1,0	
	c681-06	2	23,06	18,57	270,84	10,83	85,2	1,9	251,1	109,2	100,0	1,4	
2	c681-07	2	24,43	18,46	267,64	10,99	82,3	1,9	268,3	113,2	112,5	1,4	
2	c681-08	2	23,73	18,47	267,93	10,87	79,7	1,8	228,1	116,4	112,5	1,3	
	c681-09	2	24,19	18,71	274,94	10,9	91,9	1,8	272,1	118,0	112,5	1,5	
	c681-10	4	36,25	18,49	268,51	10,95	98,3	1,7	723,4	41,8	40,0	1,6	
	c681-11	4	32,55	18,65	273,18	10,88	98,0	1,6	655,1	42,0	40,0	1,6	
3	c681-12	4	35,42	18,61	272,01	11,06	94,6	1,4	704,6	40,0	40,0	1,6	
	c681-13	4	32,95	18,48	268,22	11,04	92,7	1,5	687,7	40,2	40,0	1,5	
	c681-14	4	34,43	18,59	271,42	11,03	101,8	1,4	661,1	39,2	40,0	1,7	

Таблица 4.13. Параметры испытаний СФБ при динамическом сжатии

На рисунке 4.45 приведены осредненные диаграммы деформирования сталефибробетона СФБ с хронологией изменения скорости деформации. Следует отметить, что при всех реализованных режимах нагружения образцы СФБ были разрушены в первом цикле нагружения.



Рисунок 4.44 – Диаграмма импульсов эксперимента с681-04



Рисунок 4.45 – Осредненные диаграммы  $\sigma(t)$  и  $\dot{\varepsilon}(t)$ ,  $\sigma(\varepsilon)$  и  $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$  при сжатии для всех режимов

Как и для других марок бетона и фиробетона на представленных диаграммах в осях напряжение–деформация  $\sigma(\varepsilon)$  на начальном участке нагружения рост напряжения и деформаций происходит по закону, близкому к линейному, а при дальнейшей деформации с ростом амплитуды нагрузки линейность нарушается, при достижении предельных значений напряжений, бетон интенсивно разрушается, что сопровождается снижением напряжений и ростом деформаций.

Результаты исследования влияния скорости деформации на прочностные и деформативные характеристики материала приведены ниже на рисунке 4.46.



Рисунок 4.46 – Влияние скорости деформации на механические СФБ при динамическом сжатии



Зависимость КДУ от скорости деформации приведена на рисунке 4.47.

Рисунок 4.47 – Зависимость КДУ от скорости деформации

## 4.4.2.4. Результаты испытаний комбинированного фибробетона КФБ

Проведенный цикл динамических испытаний комбинированного фибробетона состоял из 3 скоростных режимов. Ударник для всех испытаний был использован из сплава Д16Т длиной 250 мм. Скорости деформации находились в пределах от 140 до 740 с<sup>-1</sup>. Условия проведения испытаний и полученные физико-механические свойства КФБ приведены в таблице 4.14.

Режим	Код экспери- мента и номер	Параметры нагружения		Параметры образца			Результаты эксперимента					
		Давл. в КВД, атм.	Скорость удар. м/с	D, мм	S <sub>п.с.</sub> , мм <sup>2</sup>	L, мм	Макс. напряже- ния, МПа	Пред. деф., %	Скорость дефор- мации, 1/с	Время ж Диаг- рамма	кизни, мкс Фото- съемка	КДУ
	c682-01	1	15,24	18,63	272,6	11,18	55,8	0,9	142,6	103,6	100,0	1,1
	c682-02	1	15,78	18,52	269,4	11,09	51,1	1,2	145,5	104,0	100,0	1,0
1	c682-03	1	17,45	18,72	275,2	11,21	61,4	0,9	147,4	100,8	-	1,2
	c682-04	1	15,77	18,57	270,8	11,17	50,4	1,0	146,1	95,2	-	1,0
	c682-05	1	16,34	18,53	269,7	11,16	46,9	1,4	201,4	98,4	-	0,9
	c682-06	2	23,83	18,65	273,2	11,17	65,9	1,2	220,1	76,8	75,0	1,3
2	c682-07	2	24,27	18,73	275,5	11,23	70,8	1,5	225,8	95,2	87,5	1,4
2	c682-08	2	23,19	18,75	276,1	11,16	73,6	1,4	191,4	98,8	100,0	1,4
	c682-09	2	23,38	18,53	269,7	11,26	63,0	1,2	216,8	84,0	75,0	1,2
	c682-10	4	34,56	18,74	275,8	11,31	97,6	1,5	654,4	44,2	50,0	1,9
	c682-11	4	32,18	18,51	269,1	11,18	86,0	1,5	712,4	43,4	50,0	1,7
3	c682-12	4	34,73	18,52	269,4	11,31	91,5	1,6	725,1	43,8	50,0	1,8
	c682-13	4	32,43	18,59	271,4	11,34	89,8	1,5	694,5	44,4	50,0	1,7
	c682-14	4	34,35	18,53	269,7	11,35	85,2	1,5	744,4	43,0	50,0	1,6

Таблина 4.14	Параметры	и испытаний	КФБ при	линамическом	сжатии
I would would would be	1.0000000000000000000000000000000000000				•



Рисунок 4.48 – Диаграмма импульсов эксперимента с682-02

На рисунке 4.49 приведены осредненные диаграммы деформирования с хронологией изменения скорости деформации.

Осмотр образцов после испытаний и совместный анализ импульсов деформаций в мерных стержнях, а также диаграмм деформирования вкупе со скоростными зависимостями, позволил достоверно установить, что разрушение образцов КФБ при сжатии произошло в первом цикле нагрузки.



Рисунок 4.49 – Осредненные диаграммы σ(t) и έ(t), σ(ε) и έ(ε) при сжатии для всех режимов
Хорошо видно, что, как и для других видов бетона, на начальном участке нагружения рост
напряжения и деформаций происходит по закону, близкому к линейному, а при дальнейшей
деформации, при достижении предельных значений напряжений, бетон интенсивно разрушается,
что сопровождается снижением напряжений и ростом деформаций и скоростей деформаций.

Для каждой из полученных диаграмм были выделены характерные точки с максимально достигнутыми напряжениями ( $\sigma_{max}$ ), после которых начинались разрушения образцов. Для этих точек определены соответствующие величины предельных деформаций ( $\varepsilon_{max}$ ) и времени до начала разрушения ( $\tau_{max}$ ). Поскольку скорости деформаций ( $\dot{\varepsilon}$ ) в процессе деформирования меняются, то были приняты максимальными до начала разрушения образцов.



Рисунок 4.50 – Влияние скорости деформации на механические свойства комбинированного фибробетона при динамическом сжатии

Полученные зависимости демонстрируют то, что с ростом скорости деформации максимальные напряжения увеличиваются, также растут и соответствующие им предельные деформации (по линейному закону), а время до начала разрушения снижается по степенному закону. Результаты определения влияния изменения скорости деформации на прочностные и деформационные характеристики материала приведены на рисунке 4.50.

Зависимость КДУ комбинированного фибробетона от скорости деформации приведена на рисунке 4.51. Значение КДУ в полученном диапазоне скоростей деформации 140-740 с<sup>-1</sup> изменяется от 1 до 1,8.



Рисунок 4.51 – Зависимость КДУ от скорости деформации

# 4.4.3. Результаты динамических испытаний мелкозернистого бетона и фибробетонов на сжатие в обойме при одноосной деформации

Обычно определение динамических свойств материалов производят с использованием одномерных режимов экспериментов: либо одномерное напряженное состояния, либо одномерная деформация. Эксперименты в условиях сложного напряженного состояния очень сложны в реализации, измерениях и трактовке полученной экспериментальной информации. По этой причине имеются лишь отдельные исследования динамических свойств материалов при сложном напряженном состоянии.

Поскольку прочность хрупких материалов зависит OT вила напряженнодеформированного состояния, то для определения параметров численного моделирования разносопротивляющихся материалов необходимы данные при сложнонапряженных состояниях, с целью получения которых по модифицированной методике Кольского (см. раздел 3.2.3) были проведены испытания в металлической обойме, ограничивающей радиальную деформацию бетонных и фибробетонных образцов. Образцы диаметром 21 мм и длиной 11 мм для испытаний в обойме высверливались из заготовок бетона и фибробетонов. Поскольку прочность бетона и фибробетона при испытаниях в обойме значительно выше прочности при испытаниях без обоймы, то экспериментальные исследования проводились на установке РСГ-20-1 с мерными стержнями и ударником диаметром 20 мм, изготовленными из высокопрочной стали,. Обойма с внутренним диаметром 21 мм, длиной 14 мм и наружным диаметром 30 мм изготовлена из сплава Д16Т для более качественной регистрации импульсов деформации. После испытаний аккуратно извлеченные из обойм образцы либо рассыпались на фрагменты, либо сохраняли свою видимую целостность, но имели отдельные поверхностные повреждения.

При испытаниях кроме обычного набора импульсов в мерных стержнях ( $\varepsilon^{I}(t)$ ,  $\varepsilon^{R}(t)$  и  $\varepsilon^{T}(t)$ ) дополнительно регистрировался импульс окружной деформации обоймы  $\varepsilon^{\theta}(t)$ , и в процессе синхронизации добивались условия, чтобы максимумы импульса с обоймы и импульса  $\varepsilon^{T}(t)$  с опорного стержня совпадали во времени.

Ниже представлены зависимости давления от объемной деформации и интенсивности продольных напряжений от интенсивности деформаций; радиальные напряжения, давление, сопротивление сдвигу рассчитывались по формулам раздела 3.2.3. Поскольку в экспериментах с ограничивающей обоймой радиальной деформацией пренебрегают, то объемная деформация образцов будет практически равна осевой (3.33).

По результатам серии испытаний каждого материала построены зависимости давления P от объемной деформации  $\theta_V$ , продольных напряжений  $\sigma_x$  от продольных деформаций  $\varepsilon_x$ . На этих графиках сплошными линиями показаны зависимости давления от объемной деформации  $P(\theta_V)$  и продольных напряжений от продольных деформаций  $\sigma_x(\varepsilon_x)$  (левая вертикальная ось – давление и

продольные напряжения), а пунктирными линиями – зависимости скорости деформации от объемной деформации  $\dot{\mathcal{E}}_x(\theta_V)$  и скорости деформации от продольной деформации  $\dot{\mathcal{E}}_x(\mathcal{E}_x)$  (правая вертикальная ось – скорость продольной деформации). Также определены максимальные продольные и радиальные напряжения и максимальные давления, построены зависимости радиальных напряжений и радиальной деформации от времени, давления и объемной деформации от времени, давленыя ниже.

#### 4.4.3.1. Результаты испытаний мелкозернистого бетона МЗБ

Проведенный цикл динамических испытаний мелкозернистого бетона состоял из 3 скоростных режимов по три опыта в каждом режиме. Для нагружения системы РСГ во всех испытаниях применялись стальные ударники длиной 200 мм. Параметры испытаний приведены в таблице 4.15.

Режим	Код экспери- мента и номер	Параметры нагружения		Параметры образца			Результаты эксперимента					
		Давл. в КВД, атм.	Скорость удар. м/с	D, мм	<b>S</b> <sub>п.с.</sub> , мм <sup>2</sup>	L, мм	Макс. прод. напряже- ния, МПа	Макс. рад. напряжение МПа	Макс. давление, МПа	Макс. интенс. напр, МПа	Скорость деформации, 1/с	
1	j679-01	2	17,99	21,29	355,99	11,19	222,8	37,6	99,3	185,3	953	
	j679-02	2	16,83	21,17	351,99	11,14	232,0	54,2	113,5	177,9	998	
	j679-03	2	16,9	21,1	349,67	11,4	190,6	48,1	95,6	142,5	957	
2	j679-04	3	20,1	21,27	355,33	11,61	309,4	26,0	119,6	284,7	1577	
	j679-05	3	19,53	21,26	354,99	11,67	258,0	54,4	122,2	203,8	1178	
	j679-06	3	20,24	21,23	353,99	11,76	249,8	51,4	117,5	198,4	923	
3	j679-07	5	25	21,28	355,66	11,36	301,2	88,2	159,2	213,1	1471	
	j679-08	5	25	21,23	353,99	11,22	283,8	75,2	144,8	208,6	1508	
	j679-09	5	26,45	21,28	355,66	11,33	304,3	99,5	167,7	204,8	1375	

Таблица4.15. Параметры испытаний МЗБ при сжатии в обойме



Рисунок 4.52 – Диаграмма импульсов эксперимента ј679-05

Далее на рис. 4.53 в качестве примера показан набор параметрических зависимостей  $\sigma_x(t)$  и  $\dot{\varepsilon}_x(t)$ , а также динамических диаграмм  $\sigma_x(\varepsilon_x)$  и  $\dot{\varepsilon}_x(\varepsilon_x)$ , полученных на основании сигналов с тензодатчиков на мерных стержнях при режиме №3. А на рис. 4.54 показаны соответствующие усредненные диаграммы для трех реализованных скоростных режимов.



Рисунок 4.53 – Динамические диаграммы  $\sigma_x(t)$  и  $\dot{\varepsilon}_x(t)$ ,  $\sigma_x(\varepsilon_x)$  и  $\dot{\varepsilon}_x(\varepsilon_x)$ , режим №3



Рисунок 4.54 – Осредненные диаграммы  $\sigma_x(t)$  и  $\dot{\varepsilon}_x(t)$ ,  $\sigma_x(\varepsilon_x)$  и  $\dot{\varepsilon}_x(\varepsilon_x)$ , режимы №1, 2, 3

Следует отметить, что диаграммы  $\sigma_x(\varepsilon_x)$  имеют два участка: на первом участке диаграмма линейна, а на втором наклон сильно изменяется (уменьшается). В зависимости от скорости деформации переход от первого участка ко второму происходит при напряжениях от ~50 до ~100 МПа. Причина этого может быть в следующем. Образец перед испытанием помещается в обойму, ограничивающую его радиальную раздачу при осевом сжатии и обеспечивающую состояние одноосной деформации. Но поскольку боковая поверхность бетонного образца не является идеально гладкой и ее диаметр должен быть немного меньше диаметра внутренней поверхности обоймы, имеется очень небольшой трудно контролируемый зазор между этими поверхностями. Поэтому при нагружении образца импульсом сжатия его осевое деформирование в начальный момент происходит без участия обоймы, в условии одноосного напряжения. После достижения некоторой степени осевого сжатия образца и соответствующего увеличения его диаметра, зазор оказывается полностью выбранным и напряженное состояние образца преобразуется в объемное, а деформация в одноосную. Обойма начинает оказывать ограничивающее влияние на процесс деформирования и напряжения начинают расти. Если бы

обоймы не было, то после достижения предела прочности бетона при сжатии, образец начал бы интенсивно разрушаться, а напряжение уменьшаться. Доказательством этого может случить рисунок 4.55, на котором показаны вместе диаграммы сжатия бетонного образца в условии одноосной деформации (образец в обойме) и одноосного напряженного состояния (образец без обоймы).







Рисунок 4.56 – Осредненные диаграммы МЗБ при одноосной деформации, режимы №1, 2, 3

При каждом режиме нагружения полученные в экспериментах кривые повторных опытов осреднялись по оси времени. Далее на рис. 4.56 для каждого режима приведены указанные выше осредненные кривые в осях  $P(\theta_V)$ ,  $\tau(P)$ ,  $\sigma_i(t)$  и  $\sigma_i(\varepsilon_i)$ .

По полученным диаграммам в каждом опыте были определены максимальные значения продольного напряжения, радиального напряжения, максимальная величина интенсивности напряжений и максимальная величина давления, которые занесены в таблицу 4.15 и показаны на рис.4.57.



Рисунок 4.57 – Максимальные значения механических характеристик при разных режимах нагружения МЗБ при сжатии в обойме

#### 4.4.3.2. Результаты испытаний полифибробетона ПФБ

Проведенный цикл динамических испытаний полифибробетона включал 3 скоростных режима. Для нагружения системы РСГ во всех испытаниях применялись стальные ударники длиной 200 мм. Параметры испытаний приведены в таблице 4.16.

Полученные при каждом скоростном режиме диаграммы деформирования  $\sigma_x(t)$ ,  $\dot{\varepsilon}_x(t)$ ,  $\sigma_x(\varepsilon_x)$  и  $\dot{\varepsilon}_x(\varepsilon_x)$  усреднялись по оси времени. Результирующие усредненные диаграммы показаны на рис. 4.59.

Режим	Код экспери- мента и номер	Параметры нагружения		Параметры образца			Результаты эксперимента				
		Давл. в КВД, атм.	Скорость удар. м/с	D, мм	S <sub>п.с.</sub> , мм <sup>2</sup>	L, мм	Макс. прод. напряже- ния, МПа	Макс. рад. напряжение МПа	Макс. давление, МПа	Макс. интенс. напр, МПа	Скорость деформации, 1/с
1	j680-01	2,0	16,8	21,3	356,7	11,7	247,0	42,0	110,4	205,0	993,4
	j680-02	2,0	18,0	21,3	354,7	11,0	255,5	63,6	127,3	192,3	1136,2
	j680-03	2,0	17,9	21,3	357,0	10,8	235,4	47,1	109,9	188,3	936,4
	j680-04	2,0	16,8	21,2	352,0	10,8	201,1	37,9	92,3	163,3	934,5
	j680-05	3,0	19,5	21,3	355,7	11,3	268,2	53,4	125,0	214,8	1071,5
2	j680-06	3,0	20,0	21,3	355,0	11,3	265,4	48,5	120,6	217,2	1214,6
	j680-07	3,0	20,0	21,3	354,7	11,3	268,0	62,9	131,1	205,7	941,3
3	j680-08	5,0	25,8	21,2	353,7	10,8	294,7	73,5	147,0	221,7	1552,4
	j680-09	5,0	25,8	21,4	359,7	11,2	332,9	93,5	173,3	239,4	1245,1
	j680-10	5,0	25,1	21,3	356,3	11,1	295,5	88,1	157,2	207,5	1500,6

Таблица4.16. Параметры испытаний ПФБ при сжатии в обойме



Рисунок 4.58 – Диаграмма импульсов эксперимента ј680-07



Рисунок 4.59 – Осредненные диаграммы  $\sigma_x(t)$  и  $\dot{\varepsilon}_x(t)$ ,  $\sigma_x(\varepsilon_x)$  и  $\dot{\varepsilon}_x(\varepsilon_x)$ , режимы №1, 2 и 3 Как и для образцов МЗБ, на основании сигналов с тензодатчиков на ограничивающей обойме (рис. 4.61) был определен набор основных характеристик (см. раздел 3.2.3) для каждого режима и приведены осредненные кривые в осях  $P(\theta_V)$ ,  $\tau(P)$ ,  $\sigma_i(t)$  и  $\sigma_i(\varepsilon_i)$ .



Рисунок 4.60 – Максимальные значения механических характеристик при разных режимах нагружения ПФБ при сжатии в обойме

По полученным диаграммам в каждом опыте были определены максимальные значения продольного напряжения, радиального напряжения, максимальная величина интенсивности

ПФБ. Сжатие в обойме ПФБ. Сжатие в обойме 1600 160 120 140 1400 ≚ 100 Касательное напряжение, МПа 120 1200 80 Давление, МПа 100 1000 Реж.1 :ж.2 80 800 60 еж.3 Реж.1 60 600 Реж.1 Реж.2 40 Реж.2 Реж.3 40 400 Pex 3 20 CKO 20 200 0 0 0 0 0,02 0,04 0,06 0,08 0 50 100 150 Объемная деформация Давление, МПа ПФБ. Сжатие в обойме ПФБ. Сжатие в обойме 250 250 1500 Интенсивность напряжений, МПа š Интевсивность напряжений, МПа 200 BURH. 200 1200 Jiedo 150 900 еж.1 150 еж.2 **HDO, IOLIGHOM** Реж.1 еж.3 Реж.2 100 600 100 Реж.1 Реж.3 Реж.2 Ckopoctb Реж.3 50 50 300 0 0 0 0 0.03 0,05 200 0.01 0.020.04 0 50 100 150 Давление, МПа Интенсивность деформаций

напряжений и максимальная величина давления, которые занесены в таблицу 4.16 и показаны на рис.4.60.

Рисунок 4.61 – Осредненные диаграммы ПФБ при сжатии в обойме, режимы №1, 2, 3

# 4.4.3.3. Результаты испытаний сталефибробетона СФБ

Проведенный цикл динамических испытаний сталефибробетона состоял из 3 скоростных режимов. Параметры испытаний приведены в таблице 4.17.



Рисунок 4.62 – Диаграмма импульсов эксперимента ј681-01
I		Пара нагр	аметры ужения	Параметры образца			Результаты эксперимента				
Режим	Код экспери- мента и номер	Давл. в КВД, атм.	Скорость удар. м/с	D, мм	S <sub>п.с.</sub> , мм <sup>2</sup>	L, мм	Макс. прод. напряже- ния, МПа	Макс. рад. напряжение МПа	Макс. давление, МПа	Макс. интенс. напр, МПа	Скорость деформации, 1/с
	j681-01	2,0	16,1	21,2	352,3	11,4	234,9	37,4	102,5	199,1	725,3
1	j681-02	2,0	16,1	21,3	357,7	11,5	223,6	25,0	91,2	198,6	800,6
	j681-03	2,0	16,0	21,3	356,7	11,5	237,4	53,2	114,6	184,3	917,8
	j681-04	3,0	19,5	21,2	353,0	11,4	299,8	49,9	133,2	250,2	1143,1
	j681-05	3,0	20,4	21,2	354,0	11,5	323,1	89,1	167,0	234,5	1359,1
2	j681-06	3,0	19,8	21,2	354,3	11,4	284,2	59,6	134,3	224,8	1115,1
	j681-07	3,0	19,8	21,1	350,0	11,5	313,8	59,4	144,1	254,5	1263,1
	j681-08	3,0	20,5	21,3	356,0	11,6	312,9	66,1	148,3	246,9	1268,0
	j681-09	5,0	25,8	21,3	354,7	11,5	377,4	94,8	188,9	282,7	1674,6
3	j681-10	5,0	26,5	21,3	356,7	11,5	337,7	84,4	168,8	253,4	1311,9
	j681-11	5,0	26,5	21,3	355,0	11,4	337,7	84,4	168,8	253,4	1311,9

Таблица 4.17. Параметры испытаний СФБ при сжатии в обойме

Результаты проверки выполнения основной предпосылки (рис. 4.62) показали, что данное условие хорошо выполняется.

Усредненные диаграммы для всех режимов нагружения показаны на рис. 4.63.



Рисунок 4.63 – Осредненные диаграммы  $\sigma_x(t)$  и  $\dot{\varepsilon}_x(t)$ ,  $\sigma_x(\varepsilon_x)$  и  $\dot{\varepsilon}_x(\varepsilon_x)$ , режимы №1,2 и 3

Как и для образцов других видов бетона, на основании сигналов с тензодатчиков на ограничивающей обойме был определен набор характеристик сдвиговой прочности (см. раздел 3.2.3). Далее на рис. 4.64 для каждого режима приведены указанные выше осредненные кривые в осях  $P(\theta_V)$ ,  $\tau(P)$ ,  $\sigma_i(t)$  и  $\sigma_i(\varepsilon_i)$ .

Как и для других видов бетона, по полученным диаграммам в каждом опыте были определены максимальные значения продольного напряжения, радиального напряжения, максимальная величина интенсивности напряжений и максимальная величина давления, которые занесены в таблицу 4.17 и показаны на рис. 4.65.



Рисунок 4.64 – Осредненные диаграммы СФБ при сжатии в обойме при режимах №1, 2, 3



Рисунок 4.65 – Максимальные значения механических характеристик при разных режимах нагружения СФБ при сжатии в обойме

110

# 4.4.3.4. Результаты испытаний комбинированного фибробетона КФБ

Проведенный цикл динамических испытаний комбинированного фибробетона включал 3 скоростных режима. Параметры испытаний и полученные результаты приведены в таблице 4.18.

		Пара нагр	аметры ужения	Параметры образца			Результаты эксперимента					
Режи	код экспери- мента и номер	Давл. в КВД, атм.	Скорость удар. м/с	D, мм	S <sub>п.с.</sub> , мм <sup>2</sup>	L, мм	Макс. прод. напряже- ния, МПа	Макс. рад. напряжение МПа	Макс. давление, МПа	Макс. интенс. напр, МПа	Скорость деформации, 1/с	
	j682-01	2	16,3	21,1	350,3	10,6	205,8	31,8	89,8	174,0	770	
1	j682-02	2	16,8	21,2	352,3	11,7	226,2	40,4	102,3	185,9	730	
	j682-03	2	16,8	21,2	352,3	11,5	215,7	30,7	92,3	185,0	836	
	j682-04	3	20,2	21,3	356,7	11,6	279,0	50,6	126,6	228,6	970	
2	j682-05	3	20,2	21,3	354,7	11,7	262,5	57,0	125,5	205,5	1077	
	j682-06	3	20,0	21,3	357,0	11,7	260,8	56,8	124,8	204,1	902	
	j682-07	5	25,8	21,2	352,7	11,5	324,6	83,7	163,8	241,6	1456	
3	j682-08	5	25,7	21,2	351,7	11,7	315,6	83,7	160,9	232,3	1330	
	j682-09	5	25,8	21,3	356,0	11,5	336,7	76,2	162,9	260,9	1386	

Таблица 4.18. Параметры испытаний КФБ при сжатии в обойме

Как и для всех проведенных экспериментов проверка основной предпосылки метода РСГ (рис. 4.66) хорошо выполняется.



Рисунок 4.66 – Диаграмма импульсов эксперимента ј682-01

Полученные при каждом скоростном режиме диаграммы деформирования  $\sigma_x(t)$ ,  $\dot{\varepsilon}_x(t)$ ,  $\sigma_x(\varepsilon_x)$  и  $\dot{\varepsilon}_x(\varepsilon_x)$  усреднялись по оси времени. Результирующие усредненные диаграммы показаны на рис. 4.67.

Как и для образцов МЗБ, на основании сигналов с тензодатчиков на ограничивающей обойме был определен набор характеристик сдвиговой прочности (см. раздел 3.2.3). Далее на рис. 4.68



для каждого режима приведены указанные выше осредненные кривые в осях  $P(\theta_V)$ ,  $\tau(P)$ ,  $\sigma_i(t)$  и  $\sigma_i(\varepsilon_i)$ .

Рисунок 4.67 – Осредненные диаграммы  $\sigma_x(t)$  и  $\dot{\varepsilon}_x(t)$ ,  $\sigma_x(\varepsilon_x)$  и  $\dot{\varepsilon}_x(\varepsilon_x)$ , режимы №1, 2, 3



Рисунок 4.68 – Осредненные диаграммы КФБ при сжатии в обойме, режимы №1, 2, 3 Как и для других видов бетона, по полученным диаграммам в каждом опыте были определены максимальные значения продольного напряжения, радиального напряжения, максимальная величина интенсивности напряжений и максимальная величина давления, которые занесены в таблицу 4.18. Параметры испытаний КФБ при сжатии в обойме и показаны на рис.4.69.



Рисунок 4.69 – Максимальные значения механических характеристик при разных режимах нагружения КФБ при сжатии в обойме

Из представленных данных испытаний фибробетонов можно отметить, что на диаграммах  $\sigma_x$ - $\varepsilon_x$  P- $\varepsilon_x$ ,  $\sigma_i$ - $\varepsilon_i$  имеются 2 участка. Первый участок от нуля до некоторых значений прочностных показателей линеен. Далее за ним следует нелинейный участок. Можно предположить, что поведение фибробетонов при испытаниях в обойме носит упругопластический характер. Значение напряжений, при которых происходит изменения хода диаграмм можно рассматривать как значения пределов текучести. Эти значения можно использовать с успехом в моделях поведения фибробетонов при динамических воздействиях.

#### 4.4.4. Результаты динамических испытаний при раскалывании

Исследование динамических свойств фибробетона при растяжении проводились с помощью модификации метода Кольского, описанной в разделе 3.2.1 (метод раскалывания). Испытания на раскалывание проводились на экспериментальной установке РСГ-20-2, в которой использовались дюралюминиевые мерные стержни: диаметром 20 мм сплошного (нагружающий) и полого (опорный) сечения. Во всех опытах использовался ударник из сплава Д16Т диаметром 20 мм и длиной 200 мм. Бетонные и фибробетонные образцы для испытаний на раскалывание диаметром 20 мм и длиной 16 мм высверливались из бетонных заготовок с помощью настольного сверлильного станка. Испытываемые образцы располагались между торцов мерных стержней, в процессе нагружения они раскалывались по диаметральной плоскости.

Кроме измерения импульсов деформаций в стержне и трубке с помощью тензодатчиков во всех испытаниях проводилась кинорегистрация процесса деформирования образца с

использованием высокоскоростной камеры FASTCAM Mini UX100. Для достоверного обнаружения появления трещин и деформации, образцы заранее окрашивались в белый цвет с нанесением точечного рисунка черной краской (спекл).

Для определения предельного растягивающего напряжения при раскалывании для мелкозернистого бетона (МЗБ) реализованы два скоростных режима, состоящих из 6 экспериментов. Ниже приведены данные экспериментов, некоторые параметры, определенные по их результатам и соответствующие им динамические диаграммы.

			Пар	аметры обр	азца	-	Результаты эк	сперимента	
MI	Код экспери-	Скорость				Макс.	Скорость	Время ж	изни, мкс
Реж		ударника, м/с	D, мм Sn.c., мм <sup>2</sup>	L, мм 16,74	напряжени я, МПа	роста напряж., ГПа/с	Диаг- рамма	Фото- съемка	
	r679-01	9,9	18,62	272,2	16,74	7,48	0,857	43	40
1	r679-02	8,66	18,75	276,0	16,67	5,92	1,15	45	40
	r679-04	8,82	18,78	276,9	16,86	7,58	1,12	46	45
	r679-05	16,56	18,8	277,5	16,58	10,56	1,261	34	30
2	r679-06	16,48	18,77	276,6	16,62	9,93	0,941	32	30
	r679-07	16,46	18,72	275,1	16,96	9,49	0,878	39	30

Таблица 4.19. Параметры экспериментов при раскалывании МЗБ







Рисунок 4.71 – Осредненные диаграммы зависимости напряжения от времени МЗБ при динамическом раскалывании

Как уже указывалось ранее, в Бразильском тесте определить величину исходного размера разрываемой площадки не представляется возможным, поэтому в качестве результатов представлены зависимости развиваемого растягивающего напряжения от времени, а в качестве

источника построения скоростных зависимостей принимается не скорость деформации, а скорость роста напряжений.

В качестве примера на рис. 4.72 для обоих режимов нагружения показаны полученные диаграммы  $\sigma(t)$ , которые затем усреднялись (рис. 4.71). По результатам испытаний на раскалывание других видов фибробетона диаграммы отдельных опытов не приводятся, а даются только усредненные диаграммы для всех реализованных режимов нагружения.



Рисунок 4.72 – Диаграммы раскалывания МЗБ при режиме №1 и №2

По результатам испытаний при раскалывании определялись максимальные растягивающие напряжения ( $\sigma_{t \max}$ ) и время до начала разрушения при различных скоростях роста напряжений ( $\dot{\sigma}_t$ ). Эти параметры приведены в табл. 4.19 и показаны на рис. 4.73. На диаграммах наблюдается низкая чувствительность напряжений к их скорости роста.



Рисунок 4.73 – Зависимость механических характеристик МЗБ от изменения скорости роста напряжений при динамическом раскалывании

Для определения предельного растягивающего напряжения при раскалывании для полифибробетона (ПФБ) реализованы два скоростных режима, состоящих из 6 экспериментов. Ниже приведены данные экспериментов, некоторые параметры, определенные по их результатам и соответствующие им динамические диаграммы.

	№, код	Пара	метры нагруж	ения	Пар	аметры обр	оазца	Результаты эксперимента			
M	экспери-	Длина	Материал	Скорость	D, мм	Sп.с.,	L, мм	Макс.	Скорость	Время жиз	зни, мкс
ежь	мента	дарника	ударника	удар. м/с		MM <sup>2</sup>		напряжени	роста	Диаг-	Фото-
Р		ММ						я, МПа	напряж.,	рамма	съемка
									Гпа/с		
1	r680-01	200	Дюраль	9,17	21,15	351,1	11,48	9,16	0,793	36	35
	r680-02	200	Дюраль	7,8	18,73	275,4	16,56	9,27	1,23	38	35
	r680-05	200	Дюраль	9,46	18,69	274,2	16,62	8,7	0,956	37	35
2	r680-06	200	Дюраль	16,99	18,61	271,9	16,49	9,81	1,094	32	30
	r680-07	200	Дюраль	16,99	18,78	276,9	16,52	10,53	1,09	32	30
	r680-08	200	Дюраль	15,12	18,77	276,6	16,6	8,79	0,98	34	30

Таблица 4.20. Параметры экспериментов при раскалывании ПФБ

На рис. 4.75 показаны осредненные диаграммы ПФБ при раскалывании при двух режимах по скорости нагружения.









По результатам испытаний при раскалывании определялись максимальные растягивающие напряжения ( $\sigma_{t \max}$ ) и время до начала разрушения при различных скоростях роста напряжений ( $\dot{\sigma}_t$ ).Эти параметры приведены в табл. 4.20 и показаны на рис. 4.76. Отметим,





Рисунок 4.76 – Зависимость механических характеристик ПФБ от изменения скорости роста напряжений при динамическом раскалывании

Для определения предельного растягивающего напряжения при раскалывании для сталефибробетона (СФБ) реализованы два скоростных режима, состоящих из 3 экспериментов в каждом режиме. Во всех экспериментах использовался ударник из сплава Д16Т длиной 200 мм. В таблице 4.21 приведены данные проведенных экспериментов и некоторые параметры, определенные по их результатам.

			Пар	аметры обр	азца	Результаты эксперимента				
МИ	Код экспери-	<sup>I-</sup> Скорость удар. м/с					Скорость	Время ж	изни, мкс	
Реж	номер		D, мм	Sп.с., MM <sup>2</sup>	L, мм	Макс. напряжения, МПа	роста напряж., ГПа/с	Диаг- рамма	Фото- съемка	
	r681-01	7,38	18,53	269,5	16,48	9,39	0,977	36	-	
1	r681-02	8,89	18,5	268,7	16,48	9,61	0,913	35,4	35	
	r681-03	10,03	18,65	273,0	16,63	10,06	1,01	33,2	-	
	r681-04	15,91	18,8	277,5	16,6	11,04	1,095	34	30	
2	r681-05	13,61	18,7	274,5	16,45	11,03	1,18	33	30	
	r681-06	17,59	18,74	275,7	16,59	11,08	1,174	33	30	

Таблица 4.21. Параметры экспериментов при раскалывании СФБ





Рисунок4.78 – Осредненная диаграмма зависимости напряжения от времени СФБ при динамическом раскалывании

На рис. 4.78 показаны осредненные диаграммы СФБ при раскалывании при двух режимах по скорости нагружения.

По результатам испытаний при раскалывании определялись максимальные растягивающие напряжения ( $\sigma_{t \max}$ ) и время до начала разрушения при различных скоростях роста напряжений ( $\dot{\sigma}_t$ ). Результаты показаны на рис. 4.79. Отметим, что при увеличении скорости роста напряжений происходит рост максимальных растягивающих напряжений и снижение времени до начала разрушений.



Рисунок 4.79 – Зависимость механических характеристик СФБ от изменения скорости роста напряжений при динамическом раскалывании

118

Для определения предельного растягивающего напряжения при раскалывании для комбинированного фибробетона (КФБ) реализованы два скоростных режима, состоящих из 3 экспериментов в каждом режиме. Во всех экспериментах использовался ударник из сплава Д16Т длиной 200 мм. В таблице 4.22 приведены данные экспериментов и некоторые параметры, определенные по их результатам.

		Скорость удар. м/с	Пара	аметры обр	азца	Результаты эксперимента				
WИ:	Код экспери-					Maria	0	Время жизни, мкс		
Рея	номер		D, мм	Sп.с., мм <sup>2</sup>	L, мм	макс. напряжения, МПа	Скорость роста напряж., ГПа/с	Диаг- рамма	Фото- съемка	
	r682-01	12,83	18,62	272,2	16,74	11,36	0,945	40	40	
1	r682-03	9,87	18,71	274,8	16,8	11,06	0,811	42,4	40	
	r682-04	6,12	18,75	276,0	16,73	9,25	0,98	38,2	-	
	r682-05	15,24	18,7	274,5	16,66	10,84	1,257	27	25	
2	r682-06	16,33	18,71	274,8	16,64	11,99	1,16	33,6	30	
	r682-07	14,42	18,69	274,2	16,73	12,06	1,1	33,2	30	

Таблица 4.22. Параметры экспериментов при раскалывании КФБ

На рис. 4.81 показаны осредненные диаграммы КФБ при раскалывании при двух режимах по скорости нагружения.

По результатам испытаний при раскалывании определялись максимальные растягивающие напряжения ( $\sigma_{t \max}$ ) и время до начала разрушения при различных скоростях роста напряжений ( $\dot{\sigma}_t$ ). Результаты показаны на рис. 4.82. Отметим, что при увеличении скорости роста напряжений происходит рост максимальных растягивающих напряжений и снижение времени до начала разрушений.







Рисунок 4.81 – Осредненная диаграмма зависимости напряжения от времени КФБ при динамическом раскалывании

Таким образом, для всех типов фибробетонов при раскалывании наблюдается увеличение прочности от скорости роста напряжений. Для разных фибробетонов эти зависимости различны. Наиболее сильное влияние отмечается для СФБ, а наименьшее для МЗБ.



Рисунок 4.82 – Зависимость механических характеристик КФБ от изменения скорости роста напряжений при динамическом раскалывании

# 4.4.5. Результаты динамических испытаний при срезе

Все испытания на срез проводились на экспериментальной установке РСГ-20-2, в которой использовались дюралюминиевые мерные стержни диаметром 20 мм сплошного (нагружающий) и полого (опорный) сечения. Изменение амплитуды нагружающей волны производилось путем изменения скорости цилиндрического ударника диаметром 20 мм, выполненного из сплава Д16Т.

Бетонные и фибробетонные образцы для испытаний на срез диаметром 14 мм, длиной 24 мм высверливались из бетонных заготовок с помощью настольного сверлильного станка. Обработка экспериментальных данных (как и при других экспериментах) осуществлялась с помощью специализированной программы.

Во всех испытаниях проводилась кинорегистрация процесса деформирования образца с использованием высокоскоростной камеры FASTCAM Mini UX100 для последующего анализа времени разрушения образцов.

Поскольку определение деформации сдвига в данном типе испытаний затруднительно, в качестве полученных результатов приводятся диаграммы напряжений сдвига от времени  $\tau(t)$ .

Испытания мелкозернистого бетона на срез проводились по методике, описанной в разделе 3.2.2, и состояли из трех скоростных режимов (9 экспериментов). В таблице 4.23 представлены параметры проведенных испытаний, некоторые результаты и соответствующие динамические диаграммы.

М	Код	Параметры нагружения		Пар	аметры обра	азца	Результаты эксперимента		
Режи	экспери- мента и номер	Давл. в КВД, атм.	Скорость удара, м/с	D, мм	Sэллипс а., мм <sup>2</sup>	L, мм	Максимальное напряжение, МПа	Время жизни, мкс	
	s679-02	0,5	9,07	14,62	207,4	24,33	6,38	62	
1	s679-03	0,5	10,28	14,57	206,0	24,67	7,41	79	
	s679-04	0,5	8,18	14,57	206,0	24,52	9,17	81	
	s679-05	0,8	14,2	14,51	204,3	24,39	14,89	64	
2	s679-06	0,8	11,17	14,54	205,1	24,59	15,73	94	
	s679-07	0,8	14,15	14,64	208,0	24,36	16,62	79	
	s679-08	1	13,65	14,59	206,5	24,42	16,5	75	
3	s679-09	1	14,56	14,56	205,7	24,5	17,92	88	
	s679-10	1	17,22	14,54	205,1	24,29	19,89	73	

Таблица 4.23. Параметры испытаний и полученные результаты МЗБ при динамическом срезе



Рисунок4.83 – Диаграмма импульсов эксперимента s679-05

Рисунок 4.84 – Осредненные диаграммы т(*t*) для образцов МЗБ

На рис. 4.85 в качестве примера приведены диаграммы  $\tau(t)$ , полученные при трех режимах по скорости нагружения. Для других видов фибробетона аналогичные диаграммы не приводятся.

Далее эти диаграммы т(*t*) усреднялись по оси времени. Осредненные диаграммы бетона МЗБ при срезе показаны на рис.4.84.

Испытания полифибробетона (ПФБ) на срез состояли из трех скоростных режимов (10 экспериментов). В таблице 4.24 представлены параметры проведенных испытаний, некоторые результаты и соответствующие динамические диаграммы.



Рисунок 4.85 – Диаграммы испытаний МЗБ на срез при трех скоростных режимах

Таблица 4.24. Па	раметры испытаний	и полученные	результаты ПФ	ÞБ при динамиче	ском срезе
		5	1 2	1 7 7	1

М	Код	Параметры нагружения		Пар	аметры обр	азца	Результаты эксперимента		
Режи	мента и номер	Давл. в КВД, атм.	Скорость удара, м/с	D, мм	Sэллипс а., мм <sup>2</sup>	L, мм	Максимальное напряжение, МПа	Время жизни, мкс	
	s680-01	0,5	9,4	14,69	209,4	24,91	11,62	76	
1	s680-02	0,5	10,87	14,65	208,3	24,21	10,86	67	
-	s680-03	0,5	11,11	14,61	207,1	24,76	18,34	72	
	s680-04	0,5	11,26	14,63	207,7	24,52	19,29	89	
	s680-05	0,8	13,38	14,67	208,8	24,43	23,8	66	
2	s680-06	0,8	15,07	14,6	206,8	24,7	24,69	67	
	s680-07	0,8	12,89	14,63	207,7	24,71	19,44	71	
	s680-08	1	14,87	14,41	201,5	24,75	29,47	74	
3	s680-09	1	15,03	14,6	206,8	24,76	23,89	66	
	s680-10	1	14,14	14,64	208,0	24,69	33,98	64	





Рисунок4.86 – Диаграмма импульсов эксперимента s680-03

Рисунок4.87 – Осредненные диаграммы τ(*t*) для образцов ΠΦБ

Полученные при каждом режиме нагружения диаграммы т(*t*) усреднялись по оси времени. Осредненные диаграммы полифибробетона ПФБ при срезе показаны на рис.4.87.

Испытания сталефибробетона (СФБ) на срез состояли из трех скоростных режимов (10 экспериментов). В таблице 4.25 представлены параметры проведенных испытаний, некоторые результаты и соответствующие динамические диаграммы.

М	Код	Параметры нагружения		Пар	аметры обр	Результаты эксперимента		
Режи	экспери- мента и номер	Давл. в КВД, атм.	Скорость удара, м/с	D, мм	Sэллипс а., мм <sup>2</sup>	L, мм	Максимальное напряжение, МПа	Время жизни, мкс
	s681-01	0,5	11	14,12	193,5	24,67	22,41	86
1	s681-02	0,5	9,51	14,16	194,6	24,66	21,44	84
	s681-03	0,5	12,64	14,6	206,8	24,77	19,91	74
	s681-04	0,8	14,22	14,55	205,4	24,71	24,84	77
2	s681-05	0,8	14,29	14,5	204,0	24,58	22,81	90
	s681-06	0,8	14,26	14,71	210,0	24,84	29,22	100
	s681-07	1	19,53	14,48	203,4	24,52	38,72	60
3	s681-08	1	16,22	14,63	207,7	24,57	27,11	69
	s681-09	1	17,79	14,72	210,2	24,94	33,77	72
	s681-10	1	18,83	14,66	208,5	24,75	32,11	58

Таблица 4.25. Параметры испытаний и полученные результаты СФБ при динамическом срезе





Рисунок4.88 – Диаграмма импульсов эксперимента s681-01

Рисунок4.89 – Осредненные диаграммы τ(*t*) для образцов СФБ

Полученные при каждом режиме нагружения диаграммы т(*t*) усреднялись по оси времени. Осредненные диаграммы сталефибробетона СФБ при срезе показаны на рис.4.89.

Испытания комбинированного фибробетона (КФБ) на срез состояли из трех скоростных режимов (10 экспериментов). В таблице 4.26 представлены параметры проведенных испытаний, некоторые результаты и соответствующие динамические диаграммы. Полученные при каждом режиме нагружения диаграммы  $\tau(t)$  усреднялись по оси времени. Осредненные диаграммы комбинированного фибробетона КФБ при срезе показаны на рис.4.91.

Таблица 4.26. Параметры испытаний и полученные результаты КФБ при динамическом срезе

	Режи м	Код экспери-	Параметры нагружения	Параметры образца	Результаты эксперимента
--	-----------	-----------------	-------------------------	-------------------	-------------------------

	мента и номер	Давл. в КВД, атм.	Скорость удара, м/с	D, мм	Sэллипс a., мм <sup>2</sup>	L, мм	Максимальное напряжение, МПа	Время жизни, мкс
	s682-01	0,5	9,84	14,43	202,0	24,42	22,16	83
1	s682-02	0,5	11,69	14,47	203,2	24,58	27,45	82
-	s682-03	0,5	11,57	14,49	203,7	24,52	25,46	66
	s682-04	0,5	11,38	14,52	204,6	24,6	27,63	62
	s682-05	0,8	15,22	14,48	203,4	24,88	35,07	90
2	s682-06	0,8	12,96	14,47	203,2	24,61	30,17	70
	s682-07	0,8	14,54	14,4	201,2	24,46	33,48	94
	s682-08	1	16,95	14,59	206,5	24,52	36,12	68
3	s682-09	1	15,99	14,57	206,0	24,6	36,02	55
	s682-10	1	16,53	14,47	203,2	24,58	36,69	71





Рисунок4.90 – Диаграмма импульсов эксперимента s682-01

Рисунок4.91 – Осредненные диаграммы τ(*t*) для образцов КФБ

# 4.5. Выводы по главе 4

1. По программе экспериментальных исследований было изготовлено более 450 бетонных образцов и проведено более 400 динамических испытаний, среди которых 184 испытания на одноосное сжатие, 61 испытание на динамический срез, 53 испытания при динамическом раскалывании, 12 испытаний на прямое растяжение и 75 испытаний на сжатие в обойме. Часть результатов испытаний не вошла в статистику по причине обрыва тензодатчиков и других технических неполадок.

2. Разработана технология фибробетонов, изготовлены образцы, реализован и отработан классический метод Кольского для испытаний хрупких материалов на одноосное сжатие, а также различные модификации метода для испытаний на растяжение, раскалывание, срез и сжатие в условиях ограничения радиальной деформации (сжатие в обойме). При испытаниях по методике Кольского достигнуто однородное напряженно-деформированное состояние образцов.

3. Проведены испытания на одноосное сжатие, растяжение, раскалывание и срез для мелкозернистого бетона класса B22,5. Получены диаграммы динамического деформирования при различных высокоскоростных воздействиях, по результатам которых определены характеристики прочности и деформативности, временные и энергетические характеристики, определены их зависимости от скорости деформации и проанализировано их влияние. При испытаниях на сжатие отмечена положительная зависимость роста напряжений с увеличением скорости деформации и отрицательная зависимость при испытаниях на растяжение: с увеличением скорости деформации динамическая прочность материала снижалась.

4. Проведены динамические испытания на одноосное сжатие аналога армированного бетона. Введение армирующей сетки при скоростях деформации от 200 до 400 с<sup>-1</sup> повысило динамическую прочность материала в среднем на 45%.

5. Проведены испытания на одноосное сжатие, многоосное сжатие в обойме, раскалывание и срез для мелкозернистого бетона класса B25, полифибробетона, сталефибробетона, а также комбинированного фибробетона со стальной и полимерной фиброй. Для всех исследуемых материалов отмечена положительная зависимость прочности от скорости деформации, как при испытаниях на сжатие, так и при испытаниях на растяжение: с увеличением скорости деформации динамическая прочность материалов возрастала.

6. Введение упрочняющей фибры в исходный бетон повысило динамическую прочность материала при всех видах НДС. Наивысшую прочность при динамическом одноосном сжатии и сжатии в обойме показал фибробетон со стальной фиброй, а самую высокую прочность при динамическом растяжении (раскалывании) и срезе показал фибробетон с комбинированной фиброй. Преимуществом фибробетона с полимерной фиброй является наилучшая удобоукладываемость бетонной смеси, и как следствие наименьшее количество пустот по сравнению со сталефибробетоном. Возможно именно этот фактор позволил превзойти характеристики прочности комбинированного фибробетона при растяжении и срезе по отношению к сталефибробетону, за счет меньшего количества пустот в материале. Также это может быть связано с большей деформационной способностью полипропиленовых волокон. Сравнительный анализ прочностных характеристик четырех материалов приведен в таблице

4.27. В последнем столбце показан прирост прочности разных типов фибробетона относительно мелкозернистого бетона.

	_	Макс. н	апряжения	ı, МПа	_	Срелний	
№	Вид материала	Реж.№1	Реж.№2 Реж.№3		Средняя прочность, МПа	прирост прочности, %	
			Одно	осное сжат	гие		
1	МЗБ	46	57	69	57	0	
2	ПФБ	52	57	75	61	7	
3	КФБ	53	68	90	70	18	
4	СФБ	58	85	97	80	28	
			Сжат	гие в обойм	ie		
5	МЗБ	215	272	296	261	0	
6	ПФБ	235	267	308	270	3	
7	КФБ	216	267	326	270	3	
8	СФБ	232	307	351	297	12	
		-	Растяжение	е при раска	лывании		
9	МЗБ	7	10	-	9	0	
10	ПФБ	9	10	-	10	11	
11	КФБ	11	12	-	12	26	
12	СФБ	10	11	-	11	19	
			Cp	рез (сдвиг)			
13	МЗБ	8	16	18	14	0	
14	ПФБ	15	23	29	22	37	
15	КФБ	26	33	36	32	56	
16	СФБ	21	26	33	27	48	

# Глава 5. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА И ФИБРОБЕТОНА

Для достоверного численного моделирования поведения различных конструкций из бетона и фибробетонов в условиях высокоскоростного импульсного нагружения необходимы модели деформирования и критерии разрушения, адекватно описывающие его поведение в широком диапазоне скоростей и температур при простых и сложных режимах нагружения при различных типах напряженно-деформированного состояния (одноосное напряженное состояние при сжатии и растяжении, одноосная деформация при сжатии, сдвиг, комбинированное состояние и т.д.). Кроме того, важен учет влажности бетона и температуры, при которой происходит его эксплуатация.

Для оснащения модели деформирования и критериев разрушения бетона и фибробетона необходимыми параметрами (идентификация) необходим широкомасштабный комплекс исследований динамического деформирования образцов бетона при различных режимах нагружения. В результате таких экспериментов получают диаграммы деформирования  $\sigma(\varepsilon)$ , определяют предельные прочностные и деформационные характеристики бетона и фибробетона с учетом типов испытаний (сжатие, растяжение, сдвиг, сложное напряжение) при различных скоростях деформаций, скоростях роста напряжений, а также производится оценка энергоемкости и трещиностойкости. В результате анализа полученных данных получают зависимости указанных параметров от скорости деформации или скорости роста напряжений. На основании полученных параметров механических свойств бетона и фибробетона производится идентификация той или иной математической модели деформирования, а также определяются параметры критериев разрушения.

Полученные (идентифицированные) математические модели и критерии разрушения бетона и фибробетонов затем верифицируются, т.е. проводится оценка их адекватности, причем в условиях (тип НДС, температура, влажность), отличающихся от тех в которых были получены механические свойства для идентификации моделей.

Таким образом, для получения адекватных моделей деформирования и критериев разрушения бетона и фибробетона должна быть реализована система базовых экспериментов, представленная в главе 4, по результатам которой проводится идентификация той или иной модели бетона и фибробетона, а также система верификационных экспериментов, по результатам которых производится оценка адекватности идентифицированной модели и критериев разрушения.

# 5.1. Модели поведения бетонов библиотеки LS-DYNA для решения динамических задач

Явное и неявное нелинейное моделирование методом конечных элементов (FEA) предлагает быстрое, надежное и экономически эффективное решение для исследования поведения бетонных и железобетонных конструкций в различных условиях по нагрузке, скоростям деформаций и т.д. в отличие от трудоемких и дорогостоящих полномасштабных испытаний. Тем не менее, при использовании FEA подхода необходимы точные модели материалов для описания их реального поведения в различных условиях нагружения. Для сценариев действия импульсных высокоинтенсивных нагрузок, таких как взрыв и удар, FEA-моделирование строительных конструкций представляет собой серьезную проблему.

Разработка математических моделей поведения бетонов ведется достаточно давно [27, 62, 70, 98, 88], но из-за сложного нелинейного поведения, простая, но точная модель поведения все еще не сформулирована. Несколько сложных моделей бетонных материалов успешно использовались для динамического анализа бетонных конструкций подвергающихся интенсивным ударным и взрывным нагрузкам с использованием программ LS-DYNA и AUTODYN, [142, 161]. Количество необходимых входных параметров в этих моделях колеблется от 32 до 78.

В настоящее время библиотека материалов ПК LS-DYNA содержит порядка 250 моделей материалов различной физической природы [91], из которых 31 предлагается использовать для описания поведения геоматериалов, бетонов или горных пород. В работе из этого списка для описания поведения бетона были выбраны две наиболее подходящие модели, обладающие возможностью генерации части или полного набора параметров, а именно: МАТ CONCRETE DAMAGE REL3 (№72) и МАТ CSCM (№159).

# 5.1.1. Модель №72

Для моделирования поведения бетона с учетом разрушения и влияния скорости деформации <u>№</u>72 Damage) И eë служит модель (Concrete улучшенная версия MAT\_CONCRETE\_DAMAGE\_REL3 [91, 97]. Это трех-инвариантная модель, в которой используются три поверхности разрушения. Изначально она основана на модели Pseudo-Tensor. Наиболее значительным улучшением для пользователя является возможность генерации параметров модели, основываясь исключительно на значении прочности бетона при одноосном сжатии (при одноосном напряжении). Коэффициент масштабирования прочности задается кривой для всего диапазона изменения скоростей деформаций. Скорости деформации при растяжении определяются отрицательными значениями. Результаты численного моделирования можно улучшить, используя пользовательские входные параметры, которые управляют процессами деградации свойств при сжатии и растяжении, влиянием скорости деформации и кинетикой накопления повреждений.

#### 5.1.2. Модель №159

Модель №159 (CSCM) [105, 106] использует гладкую поверхность течения «колпачкового» типа (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Общий вид поверхности течения в двух измерениях

Учет скорости деформации осуществляется с использованием модели вязкопластичности.

Поверхность течения формулируется в терминах трех инвариантов тензора напряжений:  $J_1$  – первый инвариант тензора напряжений,  $J'_2$  – второй инвариант девиатора тензора напряжений,  $J'_3$  – третий инвариант тензора напряжений. Указанные инварианты определяются в терминах компонент девиатора тензора напряжений  $S_{ij}$  и давления *P*.

На каждом расчетном шаге алгоритм вязкопластичности производит интерполяцию между упругим пробным напряжением (trial stress)  $\sigma_{ij}^{T}$  и невязким напряжением (без учета скорости деформации)  $\sigma_{ij}^{P}$  для расчета вязкопластического напряжения  $\sigma_{ij}^{VP}$  по следующей формуле:

$$\sigma_{ij}^{\rm vp} = (1-\gamma)\sigma_{ij}^{\rm T} + \gamma\sigma_{ij}^{\rm p}$$

где

$$\gamma = \frac{\Delta t/\eta}{1 + \Delta t/\eta}$$

Результат интерполяции зависит от эффективного коэффициента текучести  $\eta$  и временного шага  $\Delta t$ . Эффективный коэффициент текучести рассчитывается на основании величин параметров, введенных пользователем:

Для растягивающего давления:  $\eta = \eta_s + \left(\frac{-J_1}{\sqrt{3J'_2}}\right)^{\text{PWRT}} [\eta_t - \eta_s]$ Для сжимающего давления :  $\eta = \eta_s + \left(\frac{J_1}{\sqrt{3J'_2}}\right)^{\text{PWRC}} [\eta_s - \eta_s]$ 

пя сжимающего давления : 
$$\eta = \eta_s + \left(\frac{\eta_1}{\sqrt{3J'_2}}\right)$$
  $[\eta_c - \eta_s]$   
 $\eta_s = \text{SRATE} \times \eta_t$   
 $\eta_t = \frac{\text{ETA0T}}{\dot{\epsilon}^{\text{NT}}}$   
 $\eta_c = \frac{\text{ETA0C}}{\dot{\epsilon}^{\text{NC}}}$ 

Входные параметры ЕТАОТ и NT используются для описания скоростного влияния при одноосно растяжении, ЕТАОХ и NC – при одноосном сжатии, SRATE – для описания эффекта при сдвиге. *ċ* – эффективная скорость деформации.

Вязкопластическая модель позволяет описать скоростной эффект при высоких скоростях деформации (свыше 100 с<sup>-1</sup>). Для ограничения роста напряжения, вызванных скоростным упрочнением пользователь может ввести параметры OVERT (максимальное напряжение при растяжении) и OVERC (максимальное напряжение при сжатии). При наличии этих ограничений расчет эффективного коэффициента текучести производится по следующим образом:

$$\eta = \frac{m}{E\dot{\varepsilon}}$$
, если  $E\dot{\varepsilon}\eta > OVER$ 

где m = OVERT в случае растягивающего давления и m = OVERC, в случае сжимающего.

Пользователю также доступна возможность учета влияния скорости деформации на рост энергии разрушения через параметр REPOW по следующей формуле:

$$G_{f}^{rate} = G_{f} \left(1 + \frac{E \dot{\epsilon} \eta}{f'}\right)^{REPOW}$$

здесь  $G_f^{rate}$  энергия разрушения с учетом влияния скорости деформации, f' – напряжение течения до применения скоростного эффекта (рассчитывается в рамках модели). Выражение в скобках больше либо равно единице, и приблизительно равно отношению динамической прочности к статической.

# 5.2. Идентификация моделей поведения бетона

Наиболее значимым для моделирования процесса динамического деформирования и разрушения образцов является влияние скорости деформации на прочностные характеристики, а также существенное отличие свойств бетона при растяжении и сжатии. Именно данные эффекты

и исследовались экспериментально, а затем использовались для оснащения математических моделей необходимыми параметрами.

### 5.2.1. Идентификации параметров модели №72

На рисунках 5.2-5.5 показаны экспериментальные скоростные зависимости предельных напряжений при сжатии (рисунки 5.2 и 5.3) и растяжении (рисунки 5.4 и 5.5) для исследованного мелкозернистого бетона класса В22.5. В левой части рисунков 5.2 и 5.4 данные приводятся в линейной по скорости деформации шкале, в правой – в логарифмической.



Рисунок 5.2 – Экспериментальные данные – зависимость максимального напряжения при сжатии от скорости деформации при сжатии.

Слева – линейная шкала скорости деформации, справа – логарифмическая



Рисунок 5.3 – Аппроксимация зависимости предельного напряжения при сжатии от скорости деформации

На рисунке 5.3 показаны различные варианты аппроксимации скоростной зависимости прочности при сжатии бетона класса B22.5. Можно отметить, что в динамическом диапазоне скоростей деформаций эта зависимость близка к линейной (красная линия), однако, если

принимать в расчет и статические данные, то наилучшую аппроксимацию данных в широком диапазоне изменения скорости деформации дает степенная функция вида:

$$\sigma_{\rm c}(\dot{\varepsilon}) = f_{\rm c} \cdot (1 + k \cdot \dot{\varepsilon}^n)$$

где *f<sub>c</sub>* – статическая прочность при сжатии (22.5 МПа), *k* и *n* – параметры аппроксимации.

Аналогично, для аппроксимации скоростной зависимости прочности материала при растяжении (рис. 5.4), подходит зависимость:

$$\sigma_t(\dot{\varepsilon}) = f_t \cdot (1 + k \cdot \dot{\varepsilon}^n)$$

где  $f_t$  – статическая прочность при растяжении (2.25 МПа), k и n – параметры аппроксимации.

Значения параметров аппроксимирующих функций приводятся в таблице 5.1.



Рисунок 5.4 – Экспериментальные данные – зависимость максимального напряжения при растяжении от скорости деформации при растяжении.

Слева – линейная шкала скорости деформации, справа – логарифмическая



Рисунок 5.5 – Аппроксимация зависимости предельного напряжения при растяжении от

скорости деформации

Полученные экспериментально скоростные зависимости прочности передаются в модель в виде зависимости КДУ от скорости деформации. Как и предельные напряжения, КДУ аппроксимировался степенной функцией:

КДУ
$$(\dot{\varepsilon}) = 1 + k \cdot \dot{\varepsilon}^n$$

Таблица 5.1. Параметры аппроксимации скоростных зависимостей прочности бетона класса B22.5

	k	п
Сжатие	0.125	0.446
Растяжение	0.65	0.28

Параметры аппроксимаций скоростных зависимостей КДУ совпадают с параметрами аппроксимаций соответствующих предельных напряжений (см. табл. 5.1). Сравнение данных с аппроксимирующими функциями показано на рисунке 5.6.

В модели МАТ\_72 скоростная зависимость КДУ задается табличной функцией. Отрицательные скорости деформации соответствуют растяжению. Значение КДУ при  $\dot{\varepsilon}=0$  должно быть равно 1. Для получения такой функции на интервале скоростей деформаций от -5000 с<sup>-1</sup> до 5000 с<sup>-1</sup> равномерно выбиралось 20 точек. Значения КДУ в соответствующих точках рассчитывались с использованием аппроксимирующих зависимостей экспериментальных данных. Полученные данные приводится в таблице 5.2 и представлены графически на рисунке 5.7.







Рисунок 5.7 – Дискретная (табличная) зависимость КДУ от скорости деформации

Для того чтобы параметры материала MAT\_72 генерировались автоматически, в карте MAT\_CONCRETE\_DAMAGE\_REL3 необходимо указать значения следующих параметров: *mid* – идентификатор модели материала (должен быть задан уникальный номер) *г*<sub>о</sub> – плотность материала,

*ft* – статическая прочность материала при растяжении

*a*<sub>0</sub> – статическая прочность материала при сжатии (должно быть задано отрицательное число)

*rsize* – коэффициент пересчета длины из дюймов в требуемую систему единиц. Если используются метры, то должно быть задано значение 39.37.

*ucf* – коэффициент пересчета напряжений из PSI в пользовательскую систему единиц. Если при моделировании используются МПа, то должна быть задана величина 145.

*lcrate* – идентификатор кривой, определяющей скоростную зависимость КДУ.

Таблица 5.2. Табличная зависимость КДУ	7 от скорости деформации
--	--------------------------

Скорость	КДУ
деформации, 1/с	
-5000	7,93
-4444	7,70
-3889	7,46
-3333	7,19
-2778	6,88
-2222	6,53
-1667	6,10
-1111	5,56
-556	4,76
-0,001	1,10
0	1
0,001	1,01
556	3,10
1111	3,86
1667	4,43
2222	4,90
2778	5,30
3333	5,67
3889	6,00
4444	6,31
5000	6,59

Для проведения анализа работы модели для случая простого нагружения элементарный объем, поведение которого описывается моделью MAT\_72, сжимается с заданной скоростью в направлении одной из координатных осей. При этом регистрируется соответствующая компонента напряжения (рисунок 5.8). Максимальное значение напряжения принимается за предельную характеристику разрушения. Сравнение полученных таким образом данных вычислительных экспериментов с данными натурных испытаний приводится на рисунке 5.9.





Рисунок 5.9 – Сравнение решения задач на элементарном объеме с экспериментальными данными

# 5.2.2. Идентификации параметров модели №159

Существует два режима использования модели №159: автоматическая генерация параметров модели для бетона, заданного статической прочностью при сжатии (f<sub>c</sub>) и ручной ввод параметров модели. В первом случае невозможно проводить коррекцию части параметров модели для уточнения поведения конкретного материала. Во втором случае необходимо задать значения 37 материальных констант. В работе [105] описаны алгоритмы расчета параметров, которые используются по умолчанию. В основе указанных алгоритмов лежит интерполяция значения соответствующих материальных параметров по данным, полученным для бетонов с различной статической прочностью при сжатии. Аппроксимация функций производится квадратичной зависимостью:

$$p = A \cdot (f_c)^2 + B \cdot (f_c) + C$$

Для определения модуля Юнга бетона используется зависимость:

$$E = E_C \cdot \left(\frac{f_c}{10}\right)^{1/3}$$

136

где  $f_c$  – статическая прочность при сжатии (22.5 МПа),

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_c}$$
 MПa

Считается, что коэффициент Пуассона v не зависит от  $f_c$  и равен 0.15.

Модуль всестороннего сжатия К и модуль сдвига G рассчитываются по формулам:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad \qquad K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

Значения упругих модулей для бетона с прочностью  $f_c = 22.5$  МПа приводятся в таблице 5.3.

Таблица 5.3. Модули упругости бетона В22.5

E	23.947	ГПа
K	11.4	ГПа
G	10.4	ГПа
V	0.15	

Порядок действий следующий.

1. Для определения статической прочности при растяжении используется аппроксимация таблицы 5.4. В таблице 5.4 приводятся значения прочности при растяжении (ft) для бетонов с различной статической прочностью при сжатии ( $f_c$ ), а также даны параметры аппроксимации (A, B и C).

Таблица 5.4. Определение статической прочности при растяжении

$f_c$	$f_t$		
20	1.6	A	-0.00029
28	2.2	В	0.088
38	2.9	С	-0.04186
48	3.5		
58	4.1		

На рисунке 5.10 показаны точки, соответствующие таблице 5.4. Сплошной линией показана аппроксимирующая кривая. Для бетона B22.5 значение параметра  $f_t$  оказалось равным 1.79.



Рисунок 5.10 - К определению параметра ft

2. Для определения параметров  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $\theta$ , определяющих поверхность трехосного сжатия (TXC, Triaxial Compression Surface), аппроксимировались таблицы 5.5. Графически аппроксимация табличных данных представлена на рисунках 5.11 и 5.12.

fc	α			λ			β			θ		
20	12.8	A	-0.003	10.5	A	0.0	0.01929	A	0.0	0.266	A	1.9e-05
28	14.2	B	0.32	10.5	B	0.0	0.01929	B	0.0	0.29	B	0.0018
38	15.4	C	7.6	10.5	С	10.5	0.01929	С	0.0193	0.323	С	0.223
48	15.9			10.5			0.01929			0.35		
58	15.9			10.5			0.01929			0.395		

Таблица 5.5. Определение параметров поверхности ТХС

Значения параметров  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $\theta$  для бетона B22.5 приводятся в таблице 5.6.





Рисунок 5.11 – К определению параметра α

Рисунок 5.12 – К определению параметра в

Таблица<br/>5.6. Значения параметров  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $\theta$  для бетона В<br/>22.5

α	λ	β	θ
13.3	10.5	0.01929	0.27

3. Для определения параметров  $\alpha_I$ ,  $\lambda_I$ ,  $\beta_I$ ,  $\theta_I$ , определяющих поверхность кручения (TOR, Torsion Surface), аппроксимировались таблицы 5.7. Графически аппроксимация табличных данных представлена на рисунках 5.13 и 5.14.

fc	<b>A</b> 1			λ1			$\beta_1$			$\theta_1$		
20	0.747	A	0.0	0.17	A	0.0	0.0783	A	-2.3e-05	0.001372	A	-4.8e-07
28	0.747	B	0.0	0.17	B	0.0	0.0725	B	5.1e-4	0.001204	B	5.4e-06
38	0.747	С	0.747	0.17	С	0.17	0.0614	C	0.077	0.0009247	С	0.0014
48	0.747			0.17			0.05			0.0006382		
58	0.747			0.17			0.0276			0.0001147		

Таблица 5.7. Определение параметров поверхности TOR





Рисунок 5.13 – К определению параметра  $\beta_1$ 

Рисунок 5.14 – К определению параметра  $\theta_1$ 

Значения параметров  $\alpha_1$ ,  $\lambda_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\theta_1$  для бетона B22.5 приводятся в таблице 5.8.

Таблица 5.8. Значения параметров  $\alpha_1$ ,  $\lambda_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\theta_1$  для бетона B22.5

$\alpha_1$	$\lambda_1$	$\beta_1$	$\theta_1$
0.747	0.17	0.0766	0.0013

4. Для определения параметров  $\alpha_2$ ,  $\lambda_2$ ,  $\beta_2$ ,  $\theta_2$ , определяющих поверхность трехосного расширения (TRE, Triaxial Expansion), аппроксимировались таблицы 5.9. Графически аппроксимация табличных данных представлена на рисунках 5.15 и 5.16.

Таблица 5.9. Определение параметров поверхности ТХЕ

fc	<b>0</b> 2			$\lambda_2$			$\beta_2$			$\theta_2$		
20	0.66	A	0.0	0.16	A	0.0	0.07829	A	-2.3e-05	0.0016	A	-5.8e-07
28	0.66	B	0.0	0.16	B	0.0	0.07252	B	5e-4	0.00145	B	6.2e-06
38	0.66	<i>C</i>	0.66	0.16	C	0.16	0.06135	<i>C</i>	0.0769	0.0011	С	0.00173
48	0.66			0.16			0.05004			7.7e-4		
58	0.66			0.16			0.02757			1.3e-4		





Рисунок 5.15 – К определению параметра  $\beta_2$ 

Рисунок 5.16 – К определению параметра  $\theta_2$ 

Значения параметров  $\alpha_2$ ,  $\lambda_2$ ,  $\beta_2$ ,  $\theta_2$  для бетона B22.5 приводятся в таблице 5.10.

138

Таблица 5.10	. Значения параметр	ов $\alpha_2$ , $\lambda_2$ , $\beta_2$ ,	, $\theta_2$ для бетона В22.5
--------------	---------------------	---	-------------------------------

$\alpha_2$	$\lambda_2$	$\beta_2$	$\theta_2$
0.66	0.16	0.077	0.0016

5. Для определения параметров *R* и *X*<sub>0</sub>, определяющих форму и положение поверхности «колпачкового» типа, аппроксимировались таблицы 5.11. Графически аппроксимация табличных данных представлена на рисунке 5.17.

Таблица 5.11. Определение параметров, определяющих форму и положение поверхности «колпачкового» типа

fc	R			$x_0$		
20	5	A	0.0	87	A	0.0077
28	5	B	0.0	90	B	0.0064
38	5	С	5.0	95	С	83.77
48	5			102		
58	5			110		

Значения параметров R и  $x_0$  для бетона B22.5 приводятся в таблице 5.12.

Таблица 5.12. Значения параметров *R* и *x*<sub>0</sub> для бетона B22.5

R	<i>x</i> <sub>0</sub>
5	87.8

6. Максимальное изменение пластического объема *W* задает диапазон объемной деформации, в котором кривая «давление-объемная деформация» является нелинейной. Как правило, эта величина приблизительно равна пористости бетона. По умолчанию в модели *W*=0,05, что соответствует пористости 5 %.

7. Значения параметров  $D_1$  и  $D_2$ , определяющих упрочнение на кривой «давлениеобъемная деформация», считаются независящими от статической прочности бетона и приводятся в таблице 5.13.

Таблица 5.13. Значения параметров D1 и D2 для бетона В22.5

$D_1$	$D_2$
2.5e-4	3.49e-7

8. Учет влияния скорости деформации на предельные напряжения материала.

Для учета влияния скорости деформации на предельные напряжения бетона в модели предусмотрено 6 параметров:

- *η*<sub>0</sub>*с* и *ηс* –для сжатия
- $\eta_0 t$  и  $\eta t$  –для растяжения
- *η*<sub>0</sub>*s* и *ηs* –для сдвига

Динамическое предельное напряжение рассчитывается по формулам:

$$f_c^{dyn} = f_c + E \cdot \dot{\varepsilon} \cdot \frac{\eta 0c}{\dot{\varepsilon}^{\eta c}}$$
$$f_t^{dyn} = f_t + E \cdot \dot{\varepsilon} \cdot \frac{\eta 0t}{\dot{\varepsilon}^{\eta t}}$$
$$f_c^{dyn} = f_s + E \cdot \dot{\varepsilon} \cdot \frac{\eta 0s}{\dot{\varepsilon}^{\eta s}}$$

где эффективная скорость деформации *ċ* определяется выражением:

$$\dot{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}} \Big[ \left( \dot{\varepsilon}_{\chi} - \dot{\varepsilon}_{y} \right)^{2} + (\dot{\varepsilon}_{\chi} - \dot{\varepsilon}_{z})^{2} + \left( \dot{\varepsilon}_{z} - \dot{\varepsilon}_{y} \right)^{2} + \dot{\varepsilon}_{\chi}^{2} + \dot{\varepsilon}_{\chi}^{2} + \dot{\varepsilon}_{z}^{2} \Big]$$

Для определения указанных параметров аппроксимировались полученные экспериментально скоростные зависимости предельных напряжений (рисунки 5.17 и 5.18).





Рисунок 5.18 – Аппроксимация скоростной зависимости предельного напряжения растяжения

зависимости предельного напряжения сжатия

Значения параметров приводятся в таблице 5.14.

Таблица 5.14. Параметры, определяющие влияние скорости деформации на предельные напряжения.

η0c	ηс	η0t	ηt
2.6e-3	0.55	4.4e-4	0.72

9. В рассматриваемой модели заложена возможность учета влияния скорости деформации на энергию разрушения материала (отдельно при сжатии, растяжении и сдвиге). Эти зависимости определяются формулами:

$$G_{fc}^{dyn} = G_{fc} \cdot \left(1 + \frac{E \cdot \dot{\varepsilon}}{f_c} \cdot \frac{\eta 0 c}{\dot{\varepsilon}^{\eta c}}\right)^{repow}$$
$$G_{ft}^{dyn} = G_{ft} \cdot \left(1 + \frac{E \cdot \dot{\varepsilon}}{f_t} \cdot \frac{\eta 0 t}{\dot{\varepsilon}^{\eta t}}\right)^{repow}$$

Для определения значений параметров *Gfc*, *Gft* и *repow* для каждого испытания определялась энергия разрушения. Эта энергия соответствует площади под диаграммой деформирования образца за точкой максимального напряжения (инициирование разрушения), как показано на рисунке 5.19.



Рисунок 5.19 – Определение энергии разрушения

Результаты аппроксимации скоростных зависимостей энергии разрушения при сжатии и растяжении представлены на рисунках 5.20 и 5.21.



 $\begin{array}{c} 0.10 \\ 0.08 \\ 0.06 \\ 0.04 \\ 0.02 \\ 0.0 \\ 0.0 \\ 0.0 \\ 0.2 \\ 0.4 \\ 0.6 \\ 0.6 \\ 0.8 \\ 1.0 \\ 0.8 \\ 1.0 \end{array}$ 

Рисунок 5.20 – Аппроксимация скоростной зависимости энергии разрушения при сжатии

Рисунок 5.21 – Аппроксимация скоростной зависимости энергии разрушения при растяжении

Таким образом, определен полный набор параметров для описания динамического деформирования и разрушения бетона класса B22.5 в рамках модели MAT\_159.

Для проведения сравнительного анализа, кроме того, использовалась модель 159, в которой все параметры, включая скоростные зависимости, заимствовались из библиотеки LS-DYNA).

На рисунке 5.22 показано сравнение временной зависимости напряжений при сжатии элементарного объема с постоянной скоростью. Данные, полученные с использованием различных моделей, показаны линиями с маркерами. Пунктирные линии отвечают экспериментальным кривым. Можно отметить, что запредельное поведение бетона качественно наилучшим образом описывается моделью 159, в которой некоторые параметры были заданы вручную. По-видимому, это связано с тем, что в данном случае явным образом задавалась скоростная зависимость энергии разрушения материала. Модель, автоматически сгенерированная по величине статической прочности материала (линия с квадратными маркерами), предсказывает существенно меньшую величину максимального напряжения.



Рисунок 5.22 – Сравнение напряжений в элементарном объеме: эксперимент и прогнозирование по разным моделям

# 5.3. Экспериментальное исследование, параметрическая идентификация и математическое моделирование процессов высокоскоростного деформирования бетона

#### 5.3.1. Описание методик верификационного исследования

Для проверки адекватности определяющих соотношений и критериев разрушения в реальных условиях работы элементов и деталей конструкций необходима разработка специальных схем испытаний. Обычно в большинстве известных работ для идентификации математических моделей, как правило, используются данные «простых» экспериментов, в которых реализуется однородное и одноосное напряженное состояние и имеет место постоянная скорость деформации. Реальные элементы обладают сложной геометрией. Кроме того, пространственное распределение и история изменения действующих на них нагрузок могут быть крайне сложными. Это приводит к тому, что элемент конструкции работает в условиях сложного напряженного состояния, параметры которого меняются во времени.

Бетон и фибробетон являются хрупкими разносопротивляющимися средами. Для проверки адекватности математических моделей и критериев прочности должны быть разработаны специальные тестовые эксперименты.

Одним из таких экспериментов является модификация метода Кольского, реализующая динамическое внедрение (индентирование) жестких тел различной формы в образцы из исследуемого материала. Схема эксперимента показана на рисунке 5.23.



Рисунок 5.23 – Схема эксперимента на динамическое индентирование в системе РСГ

На рисунке цифрами обозначены: 1 – ударник, 2 – нагружающий мерный стержень, 3 – тензорезисторы, 4 – индентор, 5 – образец из исследуемого материала, 6 – опорный мерный стержень.

Суть эксперимента состоит в следующем: образец и сменный индентор требуемой формы помещаются в систему разрезного стержня Гопкинсона между нагружающим и опорным мерными стержнями. В нагружающем мерном стержне после воздействия коротким цилиндрическим ударником возбуждается упругий импульс сжимающей нагрузки, который распространяется по мерному стержню и достигает индентора. В результате индентор с большой скоростью (порядка 10 м/с) «внедряется» в образец. С помощью тензорезисторов на мерных стержнях производится традиционная регистрация упругих импульсов деформации: падающего  $\varepsilon^{I}(t)$ , отраженного  $\varepsilon^{R}(t)$  и прошедшего  $\varepsilon^{T}(t)$  (см. раздел 3.1.2).

Следует отметить, что отраженный от образца импульс  $\varepsilon^{R}(t)$  имеет амплитуду порядка 90% от амплитуды падающего импульса  $\varepsilon^{I}(t)$ , поэтому образец подвергается в процессе испытания большому количеству циклов нагружения с постепенно убывающей амплитудой [182].

Для визуальной идентификации процесса разрушения образца производится видеофиксация процесса внедрения с помощью высокоскоростной камеры (см. раздел 4.2.2).

Простота этой схемы позволяет без особых упрощений перенести её на виртуальную модель (рисунок 5.24). Моделирование производится в осесимметричной постановке. Части расчетной схемы полностью повторяют части натурной экспериментальной установки. Для

имитирования нагружения может использоваться, как удар летящего со скоростью, зарегистрированной в эксперименте, ударник, так и приложение к торцу мерного стержня импульса давления P(t), рассчитанного по сигналу с тензорезисторов нагружающего стержня в соответствующем натурном испытании. Верификация может проводиться путем сравнения сигналов тензодатчиков на опорном мерном стержне, полученных в натурном и вычислительном экспериментах.



Рисунок 5.24 – Схема моделирования эксперимента на высокоскоростное индентирование Следует отметить, что при испытаниях бетона, несмотря на осесимметричную форму образца и элементов экспериментальной установки, форма разрушения может не быть осесимметричной, поэтому цифровой двойник испытания строится в трехмерной постановке.



Рисунок 5.25 – Верификационные испытания в условиях объемного напряженного состояния

Вторая экспериментальная схема, используемая в работе для верификации моделей поведения и критериев разрушения бетона, показана на рисунке 5.25. Суть схемы заключается в том, что образец, имеющий размеры больше, чем диаметр мерных стержней устанавливается в систему РСГ и нагружается, как в традиционном методе. При этом средняя часть образца деформируется в стесненных условиях, поскольку окружающий её массив материала препятствует свободной раздаче в радиальном направлении. В данном эксперименте деформированное состояние близко к одномерному, а напряженное состояние – к объемному. Моделирование данного эксперимента производится в трехмерной постановке. В экспериментах также производится высокоскоростная видеофиксация процесса деформирования образца. Сравнению подвергаются импульсы с мерных стержней, а также вид образца в процессе и после испытаний.
#### 5.3.2. Результаты натурных испытаний

Испытаниям подвергались образцы мелкозернистого бетона класса B22.5. В процессе нагружения проводилась высокоскоростная съемка. В таблице 5.15 приводятся параметры проведенных экспериментов. Указаны: номер эксперимента, давление в камере высокого давления газовой пушки, скорость ударника, форма индентора (для экспериментов на высокоскоростное внедрение), диаметр образца (для образцов в форме таблеток), длина (толщина) образца и примечание к эксперименту. Все испытания проводились с использованием дюралюминиевых мерных стержней диаметром 20 мм и длиной 1 м. Механические характеристики стержней следующие: плотность 2600 кг/м<sup>3</sup>, E = 74000 МПа, коэффициент Пуассона = 0.33. Нагружение системы РСГ проводилось дюралюминиевым ударником диаметром 20 мм и длиной 300 мм.

№ опыта	Давление КВД, атм	Скорость ударника, м/с	Индентор	Диаметр образца, мм	Длина образца, мм	Примечание
1	1	9,17	клин	18,25	10,2	
2	0,5	6,29	КЛИН	18,25	10,2	
3	0,5	4,65	КЛИН	18,37	9,87	
4	0,5	5,07	КЛИН	18,6	10,75	
5	1	9,24	КЛИН	18,6	10,1	
9	1	8,85	полусфера	18,7	10,7	
10	1	8,86	полусфера	18,6	10,5	
11	1	9,32	полусфера	18,6	10,8	
12	1	9,22	-		10,7	пластина 46х40, сжатие между торцами стержней
13	1	8,86	-		10,6	пластина 40.5х48, сжатие между торцами стержней
14	0,5	4,6	клин		10,6	пластина 40.3х47.5
15	0,5	6,54	клин		10,6	пластина 40.1х47.5
16	1	9,11	клин		10,6	пластина 40.4х46.5
17	1	9,44	клин		10,6	пластина 36.9х47.7

Таблица 5.15. Параметры экспериментов по внедрению инденторов и сжатию пластины

Рисунок 5.26 иллюстрирует импульсы нагрузок (деформация в нагружающем мерном стержне) в экспериментах на динамическое внедрение клина при использовании образцов в виде таблеток диаметром ~18 мм и длиной ~10 мм. Можно выделить две группы экспериментов с амплитудами нагрузки, отличающимися в два раза.



Рисунок 5.26 – Импульсы нагрузок в экспериментах на внедрение клина (образцы в виде таблеток Ø18 мм, *l*=10 мм)

На рисунках 5.27, 5.28 показаны импульсы деформации в опорном мерном стержне (прошедшие импульсы деформации) для экспериментов, сгруппированных по режимам нагружения. Рисунок 5.29 иллюстрирует вид образцов после испытания. Можно отметить, что при меньшей амплитуде нагрузки образец раскалывается на две части, в то время как при больших нагрузках число фрагментов после разрушения увеличивается.



Рисунок 5.27 – Прошедший импульс деформации. Внедрение клина, режим 1



Рисунок 5.28 – Прошедший импульс деформации. Внедрение клина, режим 2





Рисунок 5.29 – Вид образцов после испытания внедрением клина. Слева: режим нагружения 1, справа: режим нагружения 2

Рисунок 5.39 иллюстрирует характерные этапы разрушения образца при внедрении клина при двух режимах нагружения. Перемещение клина происходит справа-налево. Бетонный образец расположен в кадре слева. Образование трещины начинается в месте контакта образца с клином. При меньшей нагрузке образуется одиночная магистральная трещина, приводящая к разделению образца на две части. При большей нагрузке образец разделяется сетью трещин на несколько осколков.

Рисунок 5.30 иллюстрирует сигналы с опорного стержня в экспериментах на динамическое внедрение полусферы в образцы из бетона B22.5 в виде таблеток. Все эксперименты проводились в близких условиях. Рисунок 5.31 иллюстрирует вид образцов после испытаний. Видно, что разрушение образцов в случае сферического ударника более обширное, чем в предыдущих случаях. Образцы разрушаются на большее число мелких фрагментов. Рисунок 5.43 иллюстрирует характерные этапы разрушения образца при внедрении полусферы.



Рисунок 5.30 – Прошедший импульс деформации. Внедрение полусферы, таблетки



Рисунок 5.31 – Вид образцов после испытания. Внедрение полусферы, таблетки

Далее представлены результаты сжатия пластины из бетона B22.5 между торцами мерных стержней (рисунок 5.32).



Рисунок 5.32 – Эксперимент на ударное сжатие пластины из бетона B22.5 между торцами мерных стержней

Было проведено два эксперимента в одинаковых условиях. Рисунок 5.33 иллюстрирует сигналы с опорного стержня в экспериментах на ударное сжатие пластины из бетона B22.5 между мерными стержнями. Рисунок 5.34 иллюстрирует вид образцов после испытаний. Рисунок 5.52 иллюстрирует характерные этапы разрушения образца при сжатии пластины между торцами мерных стержней. Вид образца после испытания и фото хронология процесса разрушения позволяют сделать вывод о том, что разрушение образца происходит за счет инерционных силы, приводящих к прогибу частей пластины, выступающих за пределы мерных стержней.



Рисунок 5.33 – Прошедший импульс деформации. Сжатие пластины между торцами мерных стержней



Рисунок 5.34 – Вид образца №12 после испытания. Сжатие пластины между торцами мерных стержней

Из представленного рисунка видно, что под торцами стержней имеется целая часть образца.

Дополнительно были проведены эксперименты №14-17 (см. таблицу 5.15), в которых внедрение клина проводилось в пластину 44х40х10 мм из исследуемого материала. Испытания проводились в двух режимах, амплитуда нагрузки в которых отличалась примерно в два раза. Рисунок 5.35 иллюстрирует сигналы с опорного стержня в экспериментах на ударное внедрение клина в пластины из бетона В22.5. Пунктирные линии отвечают экспериментам с большей амплитудой нагрузки. Рисунок 5.36 иллюстрирует вид образцов после испытаний. В левой части показан образец после нагружения с меньшей амплитудой, в правой – с большей. Рисунок 5.46 иллюстрирует характерные этапы разрушения образца. Можно отметить, что разрушение происходит как от воздействия клина, так и от действия инерционных сил.



Рисунок 5.35 – Прошедший импульс деформации. Динамическое внедрение клина в пластины



Рисунок 5.36 – Вид образцов №14 и №17 после испытания. Ударное внедрение клина в пластины

### 5.3.3. Верификация моделей деформирования и критериев разрушения бетона

Постановка задачи моделирования динамического индентирования клина в образцы в виде таблеток совпадает с экспериментальной схемой. Рассматриваются два мерных стержня, поведение которых моделируется линейно упругой моделью ( $\rho$ =2600 кг/м<sup>3</sup>, *E*=74000 МПа,  $\nu$ =0.33), индентов, моделируемый недеформируемым абсолютно жестким телом (масса = 132 г.) и образец в виде таблетки диаметром 18 и длиной 10 мм. Поведение материала образца описывается идентифицированными ранее математическими моделями. Фрагмент геометрической модели в области образца показан на рисунке 5.37. Цифрами обозначены: *1* – опорный мерный стержень, *2* – образец из исследуемого материала, *3* – клин, *4* – нагружающий мерный стержень.



Рисунок 5.37 – Геометрическая постановка задачи

В силу наличия симметрии рассматривалась четверть геометрической части модели с наложением соответствующих граничных условий на плоскостях симметрии. В качестве нагрузки к торцу (дальнему от образца) нагружающего мерного стержня прикладывался импульс давления, рассчитанный по падающему импульсу деформации  $\varepsilon^{I}(t)$  в натурном эксперименте:

$$P(t) = -E \cdot \varepsilon^{I}(t)$$

где E – модуль упругости мерного стержня,  $\varepsilon^{I}(t)$  – падающий импульс деформации (сжимающий, имеет знак минус).

Моделировалось два режима нагружения, отличающихся амплитудами нагрузки. Соответствующие падающие импульсы, зарегистрированные в натурных испытаниях, аппроксимировались кусочно-линейными функциями (черный пунктир на рисунке 5.38).



Рисунок 5.38 – Аппроксимации экспериментальных импульсов для расчета нагрузок

Коэффициент трения между бетоном и стальными частями принимался равным 0.7, коэффициент трения между стальными деталями – 0.3.

Процесс разрушения образца в ходе динамического внедрения клина при использовании моделей MAT\_72 (слева) и MAT\_159 (справа) показан на рисунке 5.39. В качестве критерия удаления элемента из расчетной модели использовалась максимальная главная деформация. Критериальная величина принималась равной 0.5.

На рисунках 5.40 и 5.41 сравниваются импульсы деформации в опорном мерном стержне, зарегистрированные в натурном испытании (цветные линии) и полученные при численном моделировании (черные линии) с использованием идентифицированных моделей для описания поведения материала образца. Видно, что предсказания силы сопротивления с использованием модели 159 оказались ближе к действительности. Особенно это заметно по поведению материала на участке разрушения (ветвь кривой за максимальным напряжением).



Рисунок 5.39 – Процесс разрушения образца при динамическом внедрении клина.



Режим нагружения 2



Рисунок 5.40 – Сравнение импульсов деформации в опорном мерном стержне. Режим нагружения 1

Рисунок 5.41 – Сравнение импульсов деформации в опорном мерном стержне. Режим нагружения 2

Далее приводятся результаты моделирования динамического внедрения индентора со сферической головной частью. На рисунке 5.42 показана аппроксимация падающих импульсов деформации для расчета нагрузок.



Рисунок 5.42 – Аппроксимации экспериментальных импульсов для расчета нагрузок

Сравнение процессов внедрения при использовании различных моделей дано на рисунке 5.43. Слева показаны результаты, полученные при использовании модели 72 для описания деформирования и разрушения материала образца, справа – при использовании модели 159. Сравнение импульсов деформации в опорном мерном стержне, зарегистрированных в натурных испытаниях (цветные линии) и полученных при численном моделировании (черные линии) для динамического внедрения сферы приводится на рисунке 5.44.



Рисунок 5.43 – Процесс разрушения образца при динамическом внедрении полусферы.



Рисунок 5.44 – Сравнение импульсов деформации в опорном мерном стержне, зарегистрированных в натурных испытаниях (цветные линии) и полученных при численном моделировании (черные линии) при внедрении сферы

В случае внедрения клина в пластины из исследованного бетона рассматривалось два режима нагружения, отличающихся амплитудами нагрузки. Иллюстрация аппроксимации падающих импульсов для расчета давления на торец мерного стержня приводится на рисунке 5.45.



Рисунок 5.45 – Аппроксимации экспериментальных импульсов для расчета нагрузок

Сравнение процессов разрушения образцов при динамическом внедрении клина в пластину при использовании различных моделей дано на рисунке 5.46. Слева показаны результаты, полученные с использованием модели 72, справа – модели 159. Внизу показана кинограмма процесса внедрения. Можно отметить, что к действительности ближе картина в случае использования модели 159 для моделирования поведения образца-пластины. Прогиб пластины происходит в сторону от нагружающего стержня.



# Рисунок 5.46 – Процесс разрушения образца при динамическом внедрении клина в пластину. Слева – модель 72, справа – модель 159

Рисунок 5.47 иллюстрирует вид образцов после первого цикла нагружения. Образец слева соответствует модели 72, справа – модели 159. На рисунке 5.48 показано распределение параметра поврежденности в объеме образца при использовании модели 159. Значение 1 соответствует полностью разрушенному материалу. Слева представлен вид со стороны опорного стержня, справа – вид со стороны нагружающего стержня.



Рисунок 5.47 – Вид образцов после первого цикла нагружения. Слева – при использовании модели 72, справа – модели 159



Рисунок 5.48 – Распределение параметра поврежденности в объеме образца. Модель 159. Слева – вид со стороны опорного стержня, справа – вид со стороны нагружающего стержня

Рисунки 5.49 и 5.50 иллюстрируют сравнение импульсов деформации в опорном мерном стержне, зарегистрированных в натурных испытаниях (цветные линии) и полученных при численном моделировании (черные линии) при динамическом внедрении клина в пластину для рассмотренных режимов нагружения. Результаты предсказания достаточно близки к данным натурных испытаний.



Рисунок 5.49 – Сравнение импульсов деформации в опорном мерном стержне при внедрении клина в пластину. Режим 1



Рисунок 5.50 – Сравнение импульсов деформации в опорном мерном стержне при внедрении клина в пластину. Режим 2

Аппроксимация импульсов нагрузки для задачи сжатия пластины между мерными стержнями представлена на рисунке 5.51.



Рисунок 5.51 – Аппроксимации экспериментальных импульсов для расчета нагрузок

На рисунке 5.52 приводится сравнение деформирования пластины в процессе нагружения. Слева – результаты моделирования при использовании MAT\_72, справа – MAT\_159. Внизу показана кинограмма процесса деформирования пластины.



Рисунок 5.52 – Процесс разрушения образца при сжатии пластины между мерными стержнями.

Качественно, на реальный результат более похожи данные, полученные с применением модели 159, поскольку, как и в натурном испытании, прогиб пластины происходит в направлении от нагружающего (синего) мерного стержня. Вид образцов-пластин после первого цикла нагружения показан на рисунке 5.53.



Рисунок 5.53 – Вид образцов после первого цикла нагружения.



Рисунок 5.54 – Распределения поврежденности в объеме образца после первого цикла нагружения. Модель 159. Слева – вид со стороны опорного стержня, справа – вид со стороны нагружающего стержня

Достигнутые максимальные главные деформации в случае материала 159 оказались недостаточными для удаления элементов. На рисунке 5.54 показаны поля параметра поврежденности в объеме образца-пластины. Значение 1 отвечает полностью разрушенному материалу. Качественно, вид разрушения очень похож на результат реального эксперимента (рисунок 5.34). В результате нагружения образец разделяется на 5 крупных частей. Центральная часть оказывается практически неповрежденной.

Рисунок 5.55 иллюстрирует сравнение импульсов деформации в опорном мерном стержне, зарегистрированных в натурных испытаниях (цветные линии) и полученных при численном моделировании (черные линии) при сжатии пластины между мерными стержнями. Моделирование с применением модели 159 наиболее качественно и количественно повторяет данные натурного испытания.



Рисунок 5.55 – Сравнение импульсов деформации в опорном мерном стержне, зарегистрированных в натурных испытаниях (цветные линии) и полученных при численном моделировании (черные линии) при сжатии пластины между мерными стержнями

Таким образом, верифицированные модели качественно и количественно с приемлемой для практических нужд точностью позволяют предсказывать результаты модельных натурных испытаний. Наилучший результат дает модель №159.

#### 5.4. Выводы по главе 5

1. Рассмотрены различные модели поведения бетона из библиотеки LS-DYNA, такие как модель №16, 72, 96, 111, 145, 159, 272, учитывающие наиболее значимые для задач динамического деформирования эффекты характерные для бетонов, а именно влияние скорости деформации, различное поведение при растяжении и сжатии, поврежденность и разрушение.

2. На основе проведенного цикла экспериментов на образцах бетона с помощью полученных параметров проведена идентификация и определены параметры и константы для моделей MAT\_CONCRETE\_DAMAGE\_REL3 (№72) и MAT\_CSCM (№159), учитывающих влияние скорости деформации на прочностные характеристики, а также существенное отличие свойств бетона при растяжении и сжатии.

3. .Для верификации моделей динамического деформирования и разрушения разносопротивляющихся сред (бетон и фибробетон) успешно применены оригинальные натурные эксперименты, в которых используются техника мерных стержней и высокоскоростная видеорегистрация.

4. В качестве специальных верификационных экспериментов использован эксперимент на динамическое внедрение в бетонный образец инденторов различной формы (полусфера и клин), а также эксперимент на деформирование образца сжатием в стесненных условиях. Реализованы также аналогичные виртуальные эксперименты, в которых поведение бетонного образца моделируется той или иной идентифицированной моделью (№72 и №159). Оценка адекватности модели произведена путем сравнения результатов натурных и виртуальных экспериментов: импульсов с мерных стержней, а также внешнего вида после нагружения (конфигурация и развитие поврежденности в процессе нагружения). В результате проведенной верификации определено, что верифицированные модели качественно и количественно с приемлемой для практических нужд точностью позволяют предсказывать результаты модельных натурных испытаний. Наилучший результат дает модель №159.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенного теоретико-экспериментального исследования можно сделать следующие выводы и заключения:

1. Анализ работ отечественных и зарубежных авторов, касающихся исследования динамического поведения бетонов и фибробетонов, показал, что на динамическое поведение фибробетонов оказывает сильное влияние материал, форма и объемная доля армирующего волокна.

2. Для обработки экспериментальной информации разработана на языке программирования Python и зарегистрирована в РосРИДе программа ускоренного построения диаграмм деформирования материалов по данным экспериментов на разрезном стержне Гопкинсона с последующим формированием локальной базы данных.

3. Для проведения динамических экспериментов при различных видах НДС изготовлено и испытано более 400 образцов мелкозернистого бетона класса B22.5 и B25 и фибробетона с полимерной, стальной и комбинированной фиброй. Получены диаграммы деформирования материалов при сжатии в условии одноосного напряженного состояния и одноосной деформации, при растяжении, раскалывании и срезе.

4. По результатам проведенных испытаний испытанных бетонов и фибробетонов определены характеристики прочности и деформативности, временные и энергетические характеристики, результаты хорошо согласуются с данными аналогичных исследований других авторов.

5. Результаты экспериментальных исследований подтвердили, что добавление в бетон армирующего фибрового волокна, как стального, так и полимерного, а также его армирование мелкоячеистыми сетками является наиболее эффективным средством повышения стойкости бетона к динамическим воздействиям. Максимальную прочность при динамическом одноосном сжатии и сжатии в обойме показал фибробетон со стальной фиброй, а самую высокую прочность при динамическом растяжении (раскалывании) и срезе показал фибробетон с комбинированной фиброй, что предположительно связано с более качественной удобоукладываемостью бетонной смеси с полипропиленовой фиброй, снижающей фактор образования пустот в материале и с большой деформирующей способностью полипропиленовых волокон.

6. Результаты проведенного экспериментального исследования позволили выполнить параметрическую идентификацию двух входящих в программный комплекс LS-DYNA математических моделей и критериев разрушения (№72 и №159), учитывающих влияние скорости деформации на прочностные характеристики, а также существенное отличие свойств бетона при растяжении и сжатии.

7. В качестве специальных экспериментов для верификации идентифицированных моделей использован численный и натурный эксперимент на динамическое внедрение в образец инденторов различной формы (полусфера и клин), а также эксперимент на деформирование образца сжатием в стесненных условиях. В результате проведенной верификации определено, что верифицированные модели качественно и количественно с приемлемой для практических нужд точностью позволяют предсказывать результаты модельных натурных испытаний. Наилучший результат дает модель №159.

8. Полученный комплекс механических свойств бетона и фибробетона, а также

верифицированные модели деформирования и критерии разрушения бетона, могут быть рекомендованы к использованию ведущими конструкторами отечественных исследовательских центров, занимающимися проектированием строительных сооружений атомных станций, опасных технологических производств химической промышленности, гражданских объектов, а также объектов оборонного комплекса, подвергающихся высокоэнергетическим импульсным воздействиям.

Перспективы дальнейшей разработки темы могут быть связаны с исследованием влияния на динамические свойства бетонных материалов различных видов армирующего фибрового волокна и влияния переменных внешних факторов (температуры, влажности и т.д.), а также с созданием и последующим исследованием суперфибробетонов с объемной долей фибрового волокна более 1,5%.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. ACI Committee Report 544.3R-08. Guide for specifying, proportioning and production of fibre reinforced concrete. American Concrete Institute; 2008.
- 2. Afroughsabet V., Biolzi L., Ozbakkaloglu T. High-performance fiber-reinforced concrete: A review // J. Mater. Sci., 2016, 51, 6517-6551.
- 3. Albertini C., Montagnani M. Testing techniques based on the split Hopkinson bar. Proceedings of Conference on mechanical properties of materials at high rates of strain; Oxford, UK, 1974.
- 4. Almusallam T., Al-Salloum Y., Alsayed S., Iqbal R., Abbas H. Effect of CFRP strengthening on the response of RC slabs to hard projectile impact // Nucl Eng Des, 2015, 286, 211–226.
- 5. Al-Salloum Y.A., Almusallam T., Ibrahim S.M., Abbas H., Alsayed S. Rate dependent behavior and modeling of concrete based on SHPB experiments // Cement & Concrete Composites, 2015, 55, 34–44.
- 6. Alves M., Karagiozova D., Micheli G.B., Calle M.A.G. Limiting the influence of friction on the split Hopkinson pressure bar tests by using a ring specimen // Int J Impact Eng, 2012, 49, 130–141.
- Asprone D., Cadoni E., Prota A., Manfredi G. Dynamic behavior of a Mediterranean natural stone under tensile loading // Int J Rock Mech Min, 2009, 46(3), 514–520.
- 8. Astarlioglu S., Krauthammer T. Response of normal-strength and ultra-highperformance fiber-reinforced concrete columns to idealized blast loads // Eng Struct, 2014, 61, 1–12.
- 9. Babafemi A.J., Boshoff W.P. Tensile creep of macro-synthetic fibre reinforced concrete (MSFRC) under uni-axial tensile loading // Cem. Concr. Compos., 2015, 55, 62–69.
- 10. Bache H.H. Compact reinforced composite basic principles; 1987.
- 11. Bayandin, Y.V., Bilalov, D.A., Uvarov, S.V. Verification of wide-range constitutive relations for elasticviscoplastic materials using Taylor-Hopkinson test. Computational Continuum Mechanics, 2021, 13(4), pp. 449–458
- 12. Bashar I.I., Alengaram U.J., Jumaat M.Z., Islam A., Santhi H., Sharmin A. Engineering properties and fracture behaviour of high volume palm oil fuel ash based fibre reinforced geopolymer concrete // Constr Build Mater, 2016, 111, 286–297.
- 13. Bhargava P., Sharma U.K., Kaushik S.K. Compressive stress-strain behavior of small scale steel fibre reinforced high strength concrete cylinders // J Adv Concr Technol, 2006, 4, 109–121.
- 14. Bindiganavile V., Banthia N. Polymer and steel fiber-reinforced cementitious composites under impact loading–Part 1: Bond-slip response // ACI Mater J, 2001, 98(1), 10-16.
- 15. Bindiganavile V., Banthia N. Polymer and steel fiber-reinforced cementitious composites under impact loading–Part 2: Flexural toughness // ACI Mater J, 2001, 98(1), 17-24.
- 16. Bindiganavile V., Banthia N., Aarup B. Impact response of an ultra-high strength cement composite. In: Annual conference of the Canadian society for civil engineering; Montreal, Canada, 2002.
- Bragov A.M., Gonov M.E., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K. Response of fine-grained fiber-reinforced concretes under dynamic compression // XLIX International Summer School – Conference «Advanced Problems in Mechanics» APM2021 St. Petersburg, 2021, p. 37.
- Bragov A.M., Gonov M.E., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Modin I.A. Response of fine-grained fiberreinforced concretes under dynamic compression // Materials Physics and Mechanics, 2021, 47(6) 962-967. (Scopus)
- Bragov A.M., Gonov M.E., Lomunov A.K. Experimental study of the dynamic properties of concrete under compressive load // Тезисы доклада. International Conference on Nonlinear Solid Mechanics ICoNSoM2019 Roma, Italy, 2019, p.71.
- 20. Bragov A.M., Gonov M.E., Lomunov A.K., Balandin VI.VI. Experimental study of the dynamic properties of concrete under compressive load // Chapter 23 In: B.E.Abali and I.Giorgio (eds.), Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics, Advanced Structured Materials, 2020, vol 130, p.403-412 (Scopus)
- 21. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Gonov M.E. Determination of the mechanical properties of concrete using the split Hopkinson pressure bar method // Procedia Structural Integrity 28 (2020) 2174–2180 (WebofSci Scopus)
- 22. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Gonov M.E. Determination of the mechanical properties of concrete using the split Hopkinson pressure bar method // Тезисы доклада. 1-я виртуальная европейская конференция «First Virtual European Conference on Fracture (VECF1)», Funchal, Madeira, Portugal, 28 июня-3 июля 2020.

- 23. Bragov A.M., Petrov Y.V., Karihaloo B.L., Konstantinov A.Y., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Smirnov I.V. Dynamic strengths and toughness of an ultra high performance fibre reinforced concrete // Eng. Fract. Mech., 2013, 110, 477–488.
- 24. Bragov A., Karihaloo B., Konstantinov A., Kruszka L., Lamzin D., Lomunov A., Petrov Yu. High-speed deformation and destruction of concrete and brick // 7th International Conference "Progress in Mechanics and Materials in Design", Albufeira, Portugal,11-15 June 2017, Proceedings Paper p.381-392.
- 25. Brühwiler E., Denarié E. Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete // Struct. Eng. Int., 2013, 23, 450–457.
- 26. Buttignol T.E.T., Sousa J., Bittencourt T.N. Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC): A review of material properties and design procedures // Rev. IBRACON Estrut. Mater., 2017, 10, 957–971.
- 27. Buyukozturk O., Shareef S.S. Constitutive modeling of concrete in finite element analysis // Comput. Struct., 1985, 21(3), 581-610.
- 28. Cadoni E., Albertini C. Modified Hopkinson bar technologies applied to the high strain rate rock tests // Advances in rock dynamics and applications. 2011, CRC Press, USA, pp 79–104.
- 29. Carta G., Stochino F. Theoretical models to predict the flexural failure of reinforced concrete beams under blast loads // Eng Struct, 2013, 49, 306–315.
- 30. Chen L., Fang Q., Jiang X., Ruan Z., Hong J. Combined effects of high temperature and high strain rate on normal weight concrete // International Journal of Impact Engineering, 2015, 86, 40-56.
- 31. Chen W.W., Song B. Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications. 2011 Springer. Coughlin A, Musselman E, Schokker A, Linzell D. Behavior of portable fiber reinforced concrete vehicle barriers subject to blasts from contact charges // Int J Impact Eng, 2010, 37, 521 529.
- 32. Coviello A., Lagioia R., Nova R. On the measurement of the tensile strength of soft rocks // Rock Mech Rock Eng, 2005, 38(4), 251–273.
- 33. Curosu I., Liebscher M., Alsous G., Muja E., Li H., Drechsler A., Frenzel R., Synytska A., Mechtcherine V. Tailoring the crack-bridging behavior of strain-hardening cement-based composites (SHCC) by chemical surface modification of poly (vinyl alcohol) (PVA) fibers // Cem. Concr. Compos., 2020, 114, 103722.
- 34. Dahake A., Charkha K. Effect of steel fibers on the strength of concrete // J. Eng. Sci. Manag. Educ., 2016, 9, 45–51.
- 35. Dai F., Huang S., Xia K., Tan Z. Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using split Hopkinson pressure bar // Rock Mech Rock Eng, 2010, 43(6), 657–666.
- 36. Dai F., Xia K., Luo S.N. Semicircular bend testing with split Hopkinson pressure bar for measuring dynamic tensile strength of brittle solids // Rev Sci Instrum, 2008, 79(12), 123903–123906.
- 37. Dai F., Xia K., Tang L. Rate dependence of the flexural tensile strength of Laurentian granite // Int J Rock Mech Min, 2010, 47(3), 469–475.
- 38. Del Vecchio C., Di Ludovico M., Balsamo A., Prota, A. Seismic retrofit of real beam-column joints using fiber-reinforced cement composites // J. Struct. Eng., 2018, 144, 04018026.
- 39. Doan M.-L., Gary G. Rock pulverization at high strain rate near the San Andreas fault // Nat Geosci, 2009, 2(10), 709–712.
- 40. Dragos J., Wu C. Interaction between direct shear and flexural responses for blast loaded one-way reinforced concrete slabs using a finite element model // Eng Struct, 2014, 72, 193–202.
- 41. Ellis B., DiPaolo B., McDowell D., Zhou M. Experimental investigation and multiscale modeling of ultrahigh-performance concrete panels subject to blast loading // Int J Impact Eng, 2014, 69, 95-103.
- 42. Erofeev V.I., Zaznobin V.A., Samokhvalov R.V. Determination of Mechanical Stresses in Solids by an Acoustic Method. Acoustical Physics. 2007, 53(5), 546-552.
- 43. Erzar B., Forquin P. An experimental method to determine the tensile strength of concrete at high rates of strain // Exp Mech, 2010, 50(7), 941–955.
- 44. Fang Q., Zhang J. Three-dimensional modelling of steel fiber reinforced concrete material under intense dynamic loading // Constr Build Mater, 2013, 44, 118–132.
- 45. Field J.E., Walley S.M., Proud W.G., Goldrein H.T., Siviour C.R. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies // Int J Impact Eng, 2004, 30(7), 725–775.
- 46. Field J.E., Walley S.M., Proud W.G., Goldrein H.T., Siviour C.R. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies // Int J Impact Eng, 2004, 30(7), 725–775.
- 47. Foglar M., Kovar M. Conclusions from experimental testing of blast resistance of FRC and RC bridge decks // Int J Impact Eng, 2013, 59, 18–28.
- 48. Forquin P., Gary G., Gatuingt F. A testing technique for concrete under confinement at high rates of strain // Int J Impact Eng, 2008, 35(6), 425–446.

- 49. Foster J.T. Comments on the validity of test conditions for Kolsky bar testing of elastic-brittle materials // Exp Mech, 2012, 52(9), 1559–1563.
- 50. Frew D., Forrestal M., Chen W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar // Exp Mech., 2002, 42(1), 93–106.
- 51. Frew D.J., Akers S.A., Chen W., Green M.L. Development of a dynamic triaxial Kolsky bar // Meas Sci Technol, 2010, 21(10), 105704.
- 52. Gama B.A., Lopatnikov S.L., Gillespie J.W. Hopkinson bar experimental technique: a critical review // Appl Mech Rev., 2004, 57(4), 23–250.
- 53. Garfield T., Richins W.D., Larson T.K., Pantelides C.P., Blakeley J.E. Performance of RC and FRC wall panels reinforced with mild steel and GFRP composites in blast events// Procedia Eng, 2011, 10, 3534–3539.
- 54. Gerlach R., Sathianathan S.K., Siviour C., Petrinic N. A novel method for pulse shaping of split Hopkinson tensile bar signals // Int J Impact Eng, 2011, 38(12), 976–980.
- 55. Gilat A., Matrka T.A. A new compression intermediate strain rate testing apparatus // In: Proulx T. The Society for Experimental Mechanics series, dynamic behavior of materials. 2011. Springer, pp 425–429.
- 56. Gonov M.E., Bragov A.M., Konstantinov A.Y., Lomunov A.K., Filippov A.R. (2022) Features of High-Speed Deformation and Fracture of Fine-Grained Concrete Under Tensile Stress // Chapter 5. In: Altenbach H., Eremeyev V.A., Galybin A., Vasiliev A. (eds) Advanced Structured Materials, Advanced Materials Modelling for Mechanical, Medical and Biological Applications, vol 155. 2022 pp.193-211 (Scopus)
- 57. Gonov M., Bragov A., Konstantinov A., Lomunov A., Filippov A. Features of high-speed deformation and fracture of fine-grained concrete under tensile stress // Advanced Materials Modelling for Mechanical, Medical and Biological Applications, 2021, pp 193-211 (Scopus).
- 58. Gray G.T. Classic split Hopkinson pressure bar testing. ASM handbook, mechanical testing and evaluation. 2000 ASM International, Materials Park OH 8:462–476
- 59. Grote D., Park S., Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. Experimental characterization // Int J Impact Eng, 2001, 25, 869–886.
- 60. Guerini V., Conforti A., Plizzari G., Kawashima S. Influence of steel and macro-synthetic fibers on concrete properties // Fibers, 2018, 6, 47.
- 61. Ha J.-H., Yi N.-H., Choi J.-K., Kim J.-H.J. Experimental study on hybrid CFRP-PU strengthening effect on RC panels under blast loading // Compos Struct, 2011, 93, 2070–2082.
- 62. Han D., Chen W. Constitutive modeling in analysis of concrete structures // J. Eng. Mech., 1987, 113(4), 577-593.
- 63. Hao Y., Hao H. Dynamic compressive behaviour of spiral steel fibre reinforced concrete in split Hopkinson pressure bar tests // Constr Build Mater, 2013, 48, 521–532.
- 64. Hao Y., Hao H. Influence of the concrete DIF model on the numerical predictions of RC wall responses to blast loadings // Eng Struct, 2014, 73, 24–38.
- 65. Hao Y., Hao H. Numerical investigation of the dynamic compressive behaviour of rock materials at high strain rate // Rock Mech Rock Eng, 2013, 46(2), 373–388.
- 66. Hao Y., Hao H., Jiang G.P., Zhou Y. Experimental confirmation of some factors influencing dynamic concrete compressive strengths in high-speed impact tests // Cement and Concrete Research, 2013, 63–70.
- 67. Hashash Y.M., Hook J.J., Schmidt B., John I., Yao C. Seismic design and analysis of underground structures // Tunn. Undergr. Space Technol., 2001, 16, 247–293.
- 68. Holschemacher K., Mueller T., Ribakov Y. Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete // Mater Des, 2010, 31, 2604–2615.
- 69. Hrynyk T.D., Vecchio F.J. Behavior of steel fiber-reinforced concrete slabs under impact load // ACI Struct J, 2014, 111(5), 1213-1223.
- 70. Hu H., Schnobrich W. Constitutive modeling of concrete by using nonassociated plasticity // J. Mater. Civ. Eng., 1989, 1(4), 199-216.
- 71. Huynh L., Foster S., Valipour H., Randall R. High strength and reactive powder concrete columns subjected to impact: experimental investigation // Constr Build Mater, 2015, 78, 153–171.
- 72. Iwamoto T., Yokoyama T. Effects of radial inertia and end friction in specimen geometry in split Hopkinson pressure bar tests: a computational study // Mech Mater, 2012, 51, 97–109.
- 73. Jianzhong Lai, Xujia Guo, Yaoyong Zhu Repeated penetration and different depth explosion of ultra-high performance concrete // International Journal of Impact Engineering, 2015, 84, 1-12. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.05.006
- 74. Jones J., Wu C., Oehlers D., Whittaker A., Sun W., Marks S., et al. Finite difference analysis of simply supported RC slabs for blast loadings // Eng Struct, 2009, 31, 2825–2832.

- 75. Klepaczko J.R., Brara A. An experimental method for dynamic tensile testing of concrete by spalling // Int J Impact Eng, 2001, 25(4), 387–409.
- 76. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading // Proc Phys Soc B, 1949, 62(11), 676.
- 77. Kolsky H. Stress waves in solids. Oxford, UK: Clarendon Press.
- 78. Konstantinov A.Yu., Basalin A.V., Gonov M.E., Filippov A.R. Numerical analysis of influence of length of the working part of specimen on dynamic diagrams of constructional materials obtained by the Kolsky method // XIV International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems" (DTS-2018), MATEC Web of Conferences 226(5):03023, 2018, p. 2174-2180 (Scopus)
- 79. Kuhn H., Medlin D. High strain rate testing. ASM handbook, mechanical testing and evaluation. 2000 ASM International, Materials Park OH 8:427–559.
- Lamzin D., Bragov A., Lomunov A., Konstantinov A., Gonov M. Features of dynamic testing of brittle media // Тезисы доклада. XLVII International Summer School – ConferenceAdvanced Problems in Mechanics APM2019 St. Petersburg, 2019 p. 62.
- 81. Leppänen J.R. Concrete structures subjected to fragment impacts: PhD Thesis, Chalmers University of Technology; Göteborg, Sweden, 2004.
- 82. Li H.B., Zhao J., Li T.J. Triaxial compression tests on a granite at different strain rates and confining pressures // Int J Rock Mech Min., 1999, 36(8), 1057–1063.
- 83. Li J., Wu C., Hao H. An experimental and numerical study of reinforced ultrahigh performance concrete slabs under blast loads // Mater Des, 2015, 82, 64–76.
- 84. Li J., Wu C., Hao H., Su Y. Investigation of ultra-high performance concrete under static and blast loads // Int J Protect Struct, 2015, 6, 217–35.
- 85. Li V.C., Horikoshi T., Ogawa A., Torigoe S., Saito T. Micromechanics-based durability study of polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite // Mater. J., 2004, 101, 242–248.
- Li V.C., Yang E.-H., Li M. Field demonstration of durable link slabs for jointless bridge decks based on strain-hardening cementitious composites–Phase 3: Shrinkage control. Michigan Department of Transportation; Research Report RC-1506, 2008.
- 87. Li X.B., Lok T.S., Zhao J. Dynamic characteristics of granite subjected to intermediate loading rate // Rock Mech Rock Eng, 2005, 38(1), 21–39.
- 88. Liu Y. Huang F., Ma A. Numerical simulations of oblique penetration into reinforced concrete targets // Comput. Math. Appl., 2011, 61(8), 2168-2171.
- Lok T., Zhao P. Impact response of steel fiber-reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar // J Mater Civ Eng, 2004, 16, 54–59.
- 90. Lok T., Zhao P., Lu G. Using the split Hopkinson pressure bar to investigate the dynamic behaviour of SFRC // Mag Concr Res, 2003, 55, 183–191.
- 91. LS-DYNA Keyword User's Manual Vol.2 // LS-DYNA R11, 10/18/18 (r:10580)
- 92. Lu Y.B., Li Q.M. About the dynamic uniaxial tensile strength of concrete-like materials // Int J Impact Eng, 2011, 38(4), 171–180.
- 93. Luo X., Sun W., Chan S. Steel fiber reinforced high-performance concrete: a study on the mechanical properties and resistance against impact // Mater Struct, 2001, 34, 144–149.
- 94. Ma G., Hao H., Zhou Y. Assessment of structure damage to blasting induced ground motions // Eng Struct, 2000, 22, 1378–1389.
- 95. Maalej M., Quek S.T., Zhang J. Behavior of hybrid-fiber engineered cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact // J Mater Civ Eng, 2005, 17, 143–152.
- 96. Magnusson J., Hallgren M., Ansell A. Air-blast-loaded, high-strength concrete beams. Part I: Experimental investigation // Mag Concr Res, 2010, 62, 127–36.
- 97. Malvar L.J., Crawford J.E., Morrill K.B., K&C Concrete Material Model Release III Automated Generation of Material Model Input, K&C Technical Report TR-99-24-B1, 18 August.
- Malvar L.J., Crawford J.E., Wesevich, J.W. and Simons, D. A plasticity concrete material model for DYNA3D // Int. J. Impact Eng., 1997, 19(9), 847-873.
- 99. Man Xu, Bryan Hallinan, Kay Wille (2016) Effect of loading rates on c of high strength steel fibers embedded in ultra-high performance concrete (UHPC) // Cement and Concrete Composites, 2016, 70, 98–109. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.03.014
- 100. Mao L., Barnett S.J., Tyas A., Warren J., Schleyer G., Zaini S. Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading // Constr Build Mater, 2015, 93, 822-830.

- 101. Maranan G., Manalo A., Benmokrane B., Karunasena W., Mendis P. Behavior of concentrically loaded geopolymer-concrete circular columns reinforced longitudinally and transversely with GFRP bars // Eng Struct, 2016, 117, 422–436.
- 102. Maranan G., Manalo A., Benmokrane B., Karunasena W., Mendis P. Evaluation of the flexural strength and serviceability of geopolymer concrete beams reinforced with glass-fibre-reinforced polymer (GFRP) bars // Eng Struct, 2015, 101, 529–541.
- 103. Millon O., Riedel W., Thoma K., Fehling E., Nöldgen M. Fiber-reinforced ultrahigh performance concrete under tensile loads. In: 9th International conference on the mechanical behaviour of materials under dynamic loading. DYMAT; 2009. p. 671–677.
- 104. Mohammadi Y., Carkon-Azad R., Singh S., Kaushik S. Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibres of mixed aspect ratio // Constr Build Mater, 2009, 23, 183–9.
- 105. Murray Y.D.Users Manual for LS-DYNA Concrete Material M.159. Report No.FHWA-HRT-05-062, 2007.
- 106. Murray Y.D., Abu-Odeh A., Bligh R., Evaluation of Concrete Material Model 159, Report No. FHWA-HRT-05-063, Federal Highway Administration, 2007.
- 107. Ngo T., Mendis P., Krauthammer T. Behavior of ultrahigh-strength prestressed concrete panels subjected to blast loading // J Struct Eng, 2007, 133, 1582–1590.
- 108. Nia A.A., Hedayatian M., Nili M., Sabet V.A. An experimental and numerical study on how steel and polypropylene fibers affect the impact resistance in fiber-reinforced concrete // Impact Eng, 2012, 46, 62–73.
- 109. Ong K., Basheerkhan M., Paramasivam P. Resistance of fibre concrete slabs to low velocity projectile impact // Cement Concr Compos, 1999, 21, 391–401.
- 110. Pantelides C.P., Garfield T., Richins W., Larson T., Blakeley J. Reinforced concrete and fiber reinforced concrete panels subjected to blast detonations and postblast static tests // Eng Struct, 2014, 76, 24–33.
- 111. Paterson M.S., Wong T.-F. Experimental rock deformation: The brittle field, 2nd edn. 2005, Springer-Verlag, Berlin
- 112. Paul S.C., van Zijl G.P. Mechanically induced cracking behaviour in fine and coarse sand strain hardening cement based composites (SHCC) at different load levels // J. Adv. Concr. Technol. 2013, 11, 301–311.
- 113. Pichandi S., Rana S., Oliveira D., Fangueiro R. Fibrous and composite materials for blast protection of structural elements—A state-of-the-art review // J Reinf Plast Compos, 2013, 32, 1477–1500.
- 114. Porco F., Ruggieri S., Uva G. Seismic assessment of irregular existing building: Appraisal of the influence of compressive strength variation by means of nonlinear conventional and multimodal static analysis // Ing. Sismica, 2018, 35, 64–86.
- 115. Pyo S., Wille K., El-Tawil S., Namman A.E. Strain rate dependent properties of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under tension // *Cement and Concrete Composites* 56 (2015) 15–24.
- 116. Qasrawi Y., Heffernan P.J., Fam A. Dynamic behaviour of concrete filled FRP tubes subjected to impact loading // Eng Struct, 2015, 100, 212–225.
- 117. Ramadoss P. Studies on high performance steel fiber reinforced concrete under static and impact loads; India, 2014.
- 118. Ramesh K.T. High rates and impact experiments // In: Sharpe W.N. Springer handbook of experimental solid mechanics. Springer, US, 2004, pp 929–960.
- 119. Redaelli D., Muttoni A. Tensile behaviour of reinforced ultra-high performance fiber reinforced concrete elements. In: Fib Symposium, Dubrovnik, 2007. p. 267–74.
- 120. Rodriguez T., Navarro C. and Sanchez-Galvez V. Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials // Journal de Physique IV, 1994, pp.101-106.
- 121. Roller C., Mayrhofer C., Riedel W., Thoma K. Residual load capacity of exposed and hardened concrete columns under explosion loads // Eng Struct, 2013, 55, 66–72.
- 122. Ruggieri S., Perrone D., Leone M., Uva G., Aiello M.A. A prioritization RVS methodology for the seismic risk assessment of RC school buildings // Int. J. Disaster Risk Reduct., 2020, 51, 101807.
- 123. Schenker A., Anteby I., Gal E., Kivity Y., Nizri E., Sadot O., et al. Full-scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads // Int J Impact Eng, 2008, 35, 184–198.
- 124. Schuler H., Mayrhofer C., Thoma K. Spall experiments for the measurement of the tensile strength and fracture energy of concrete at high strain rates // Int J Impact Eng, 2006, 32(10), 1635–1650.
- 125. Sharma A., Oz'bolt J. Influence of high loading rates on behavior of reinforced concrete beams with different aspect ratios A numerical study // Eng Struct, 2014, 79, 297–308.
- 126. Siviour C.R., Grantham S.G. High resolution optical measurements of specimen deformation in the split Hopkinson pressure bar // Imag Sci J., 2009, 57(6), 333–343.
- 127. Song P., Hwang S. Mechanical properties of high-strength steel fiberreinforced concrete // Constr Build Mater, 2004, 18, 669–73.

- 128. Song P., Wu J., Hwang S., Sheu B. Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel– polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete // Constr Build Mater, 2005, 19, 1–9.
- 129. Sorelli L.G., Meda A., Plizzari G.A. Steel fiber concrete slabs on ground: A structural matter // Aci Struct. J., 2006, 103, 551.
- 130. Sovják R., Vavrčiník T., Máca P., Zatloukal J., Konvalinka P., Song Y. Experimental investigation of ultrahigh performance fiber reinforced concrete slabs subjected to deformable projectile impact // Procedia Eng, 2013, 65, 120–125.
- 131. Stoller M.E., Zezulova E. The field testing of high performance fiber reinforced concrete slabs under the TNT load explosion together with the analytical solution and the numerical modelling of those tests results. In: International Conference on Military Technologies (ICMT). IEEE; Brno, Czech Republic, 2015. p.1–8.
- 132. Stolz A., Fischer K., Roller C., Hauser S. Dynamic bearing capacity of ductile concrete plates under blast loading // Int J Impact Eng, 2014, 69, 25–38.
- 133. Su Y., Li J., Wu C., Wu P., Li Z.X. Effects of steel fibres on dynamic strength of UHPC // Construction and Building Materials 114 (2016) 708–718.
- 134. Sutton M.A., Orteu J-J., Schreier H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications // Springer, 2009, New York.
- 135. Suvash C.P., Gideon P.A., Branko S. Effect of Fibers on Durability of Concrete: A Practical Review // Materials, 2020, 13(20), 4562 doi.org/10.3390/ma13204562
- 136. Tanapornraweekit G., Haritos N., Mendis P. Behavior of FRP-RC slabs under multiple independent air blasts // J Perform Constr Facil, 2010, 25, 433–440.
- 137. Thiagarajan G., Kadambi A.V., Robert S., Johnson C.F. Experimental and finite element analysis of doubly reinforced concrete slabs subjected to blast loads // Int J Impact Eng, 2015, 75, 162-173.
- 138. Thomas R.J., Sorensen A. D. Review of Strain Rate Effects for UHPC in Tension // Construction and Building Materials, 153 (2017) 846–856. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.168
- 139. Toutlemonde F., Gary G. Dynamic behavior of concrete. Experimental aspects. In: Mazars J, Millard A. Dynamic behavior of concrete and seismic engineering. 2009 ISTE Ltd, London, pp 1–54.
- 140. Tran N.T., Tran T.K., Jeon J.K., Park J.K., Kim D.J. Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates // Cem Concr Res, 2016, 79, 169-174.
- 141. Tran N.T., Tran T.K., Kim D.J. High rate response of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension // Cem. Concr. Res., 2015, 69, 72–87.
- 142. Tu Z., Lu Y. Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations // Int. J. Impact Eng., 2009, 36(1), 132-146.
- 143. Uvarov S., Chudinov, V. Dynamic and quasistatic interlaminar shear strength of carbon fiber laminate under bi-axial loading conditions. Procedia Structural Integrity, 2021, 33(C), ctp. 465–468/
- 144. Walley S.M. Historical review of high strain rate and shock properties of ceramics relevant to their application in armour // Adv. Appl. Ceram. 2010, 109(8), 446–466.
- 145. Wang F., Wan Y.K.M., Chong O.Y.K., Lim C.H., Lim E.T.M. Reinforced concrete slab subjected to close-in explosion. In: Proc of the 7th LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg; 2008.
- 146. Wang Q.Z., Li W., Xie H.P. Dynamic split tensile test of flattened Brazilian disc of rock with SHPB setup // Mech Mater, 2009, 41(3), 252–260.
- 147. Wang S., Zhang M.-H., Quek S.T. Mechanical behavior of fiber-reinforced highstrength concrete subjected to high strain-rate compressive loading // Constr Build Mater, 2012, 31, 1–11.
- 148. Wang Z.-L., Liu Y.-S., Shen R. Stress-strain relationship of steel fiber-reinforced concrete under dynamic compression // Constr Build Mater, 2008, 22, 811–819.
- 149. Wille K., Kim D.J., Naaman A.E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents // Mater. Struct., 2011, 44, 583–598.
- 150. Wille K., Kim D.J., Naaman A.E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents // Mater Struct, 2011, 44, 583–98.
- 151. Wille K., Xu M., El-Tawil S., Naaman A. Dynamic impact factors of strain hardening UHP-FRC under direct tensile loading at low strain rates // Mater Struct, 2016, 49, 1351–1365.
- 152. Wu C., Oehlers D.J., Rebentrost M., Leach J., Whittaker A.S. Blast testing of ultrahigh performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs // Eng Struct, 2009, 31, 2060–2069.
- 153. Wu H., Zhang Q., Huang F., Jin Q. Experimental and numerical investigation on the dynamic tensile strength of concrete // Int J Impact Eng, 2005, 32(1–4), 605–617.
- 154. Xiao J., Li L., Shen L., Poon C.S. Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading // Cement and Concrete Research, 2015, 71, 46–55.

- 155. Xu K., Lu Y. Numerical simulation study of spallation in reinforced concrete plates subjected to blast loading // Comput Struct, 2006, 84, 431–438.
- 156. Xu T., Zhao G., Zhu W., Chen C., Yuan L. Mesoscale modeling of spallation failure in fiber-reinforced concrete slab due to impact loading // Int J Geomech, 2015, B4015001.
- 157. Xu T., Zhu W., Zhao G., Lin Y. Dynamic spallation in fiber reinforced concrete under impact loading. In: "Recent advances in material, analysis, monitoring, and evaluation in foundation and bridge engineering", ASCE; 2014. p. 17–24.
- 158. Xu Z., Hao H., Li H. Dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres // Mater Des, 2012, 42, 72–88.
- 159. Xu Z., Hao H., Li H. Experimental study of dynamic compressive properties of fibre reinforced concrete material with different fibres // Mater Des, 2012, 33, 42–55.
- 160. Yi N.-H., Kim J.-H.J., Han T.-S., Cho Y.-G., Lee J.H. Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete // Constr Build Mater, 2012, 28, 694–707.
- 161. Yonten K., Manzari M.T., Marzougui D., Eskandarian A. An assessment of constitutive models of concrete in the crashworthiness simulation of roadside safety structures //Int. J. of Crashworthiness,2005,10(1),5-19.
- 162. Yoo D.-Y., Banthia N., Kim S.-W., Yoon Y.-S.. Response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams with continuous steel reinforcement subjected to low-velocity impact loading // Compos Struct, 2015, 126, 233–245.
- 163. Yoo D.-Y., Shin H.-O., Yang J.-M., Yoon Y.-S. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers // Compos. Part B Eng., 2014, 58, 122–133.
- 164. Yoo D.-Y., Yoon Y.-S. Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers // Eng Struct, 2015, 102, 409–423.
- 165. Yoon Y., Lee J., Jang I., Hwang D. Improved impact resistance of layered steel fiber reinforced concrte beam. In: Proceedings of the thirteenth East Asia-Pacific conference on structural engineering and construction (EASEC-13); Sapporo, Japan, 2013. p. B-5-1.
- 166. Yusof M.A., Norazman N., Ariffin A., Mohd Zain F., Risby R., Ng C. Normal strength steel fiber reinforced concrete subjected to explosive loading // Int J Sustain Constr Eng Technol, 2011, 1, 127–36.
- 167. Zemei Wu, Caijun Shi, Wen He, Dehui Wang Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements // Cement and Concrete Composites, 2017, 79, 148–157. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.010
- 168. Zhang J., Maalej M., Quek S.T. Performance of hybrid-fiber ECC blast/shelter panels subjected to drop weight impact // J Mater Civ Eng, 2007, 19, 855–863.
- 169. Zhang M., Wu H.J., Li Q.M., Huang F.L. Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests. Part I: experiments // Int J Impact Eng, 2009, 36(12), 1327–1334.
- 170. Zhang Q.B., Zhao J. A Review of Dynamic Experimental Techniques and Mechanical Behaviour of Rock Materials // Rock Mech Rock Eng., 2014, 47, 1411–1478.
- 171. Zhang Q.B., Zhao J. Determination of mechanical properties and full-field strain measurements of rock material under dynamic loads // Int J Rock Mech Min, 2013, 60, 423–439.
- 172. Zhang X., Elazim A.A., Ruiz G., Yu R. Fracture behaviour of steel fibre-reinforced concrete at a wide range of loading rates // Int J Impact Eng, 2014, 71, 89–96.
- 173. Zhao J. An overview of some recent progress in rock dynamics research // In: Zhou YX, Zhao J Advances in rock dynamics and applications. 2011 CRC Press, USA, pp 5–33.
- 174. Zhao J., Li H.B. Experimental determination of dynamic tensile properties of a granite // Int J Rock Mech Min, 2000, 37(5), 861–866.
- 175. Zhao J., Zhou Y.X., Hefny A.M., Cai J.G., Chen S.G., Li H.B., Liu J.F., Jain M. Rock dynamics research related to cavern development for ammunition storage // 1999, Tunn Undergr Sp Tech 14(4):513–526.
- 176. Zheng Y., Wu X., He G., Shang Q., Xu J., Sun Y. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete by vibratory mixing technology // Adv. Civ. Eng., 2018, Article ID 9025715.
- 177. Zhou Y.X., Xia K., Li X.B., Li H.B., Ma G.W., Zhao J., Zhou Z.L., Dai F. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials // Int J Rock Mech Min, 2012, 49, 105–112.
- 178. Zhou Z.L., Li X.B., Liu A.H., Zou Y. Stress uniformity of split Hopkinson pressure bar under half-sine wave loads // Int J Rock Mech Min., 2011, 48(4), 697–701.
- 179. Zhou Z.L., Zou Y., Li X.B., Jiang Y.H. Stress evolution and failure process of Brazilian disc under impact // J Cent South Univ, 2013, 20(1), 172–177.

- 180. Басалин А.В., Брагов А.М., Гонов М.Е., Константинов А.Ю., Ломунов А.К. Деформирование и разрушение бетона при динамических нагрузках // Материалы XXV международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. Москва, 18-22 марта 2019, т.1, с. 39-40.
- 181. Брагов А.М., Гонов М.Е., Ламзин Д.А., Ломунов А.К. Экспериментальное исследование динамического поведения мелкозернистых фибробетонов // В сборнике: Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. Сборник трудов 11-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского. Институт прикладной механики Российской академии наук; Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления Российской академии наук, Москва, 2021. С. 23-28.
- 182. Брагов А.М., Игумнов Л.А., Константинов А.Ю., Ломунов А.К. Высокоскоростная деформация материалов различной физической природы. Н.Новгород, 2020. 299 с.
- 183. Гольдсмит В. Физическое исследование высокоскоростного деформирования металлов // Физика быстропротекающих процессов. -М.: Мир, 1971. Т. 2. С. 69-100.
- 184. Гонов М.Е. Деформация и разрушение бетонных материалов при скоростях деформации в пределах от 10-3 до 104 с-1 // 5-й Всероссийский форум «Наука будущего наука молодых», Москва, 2020 г.
- 185. Гонов М.Е. Комплексное исследование свойств мелкозернистого бетона при динамическом растяжении и срезе // Проблемы прочности и пластичности, том 82 №4, 2020 с. 442-457 (ВАК).
- 186. Гонов М.Е. Механические свойства фибробетонов при динамическом сжатии // Проблемы прочности и пластичности, том 84 №1, 2022 с. 131-146 (ВАК).
- 187. Гонов М.Е., Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К. Анализ высокоскоростного разрушения мелкозернистого бетона при динамическом растяжении // Материалы XXVII международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. 2021 с.80-83.
- 188. Гонов М.Е., Брагов А.М., Ламзин Д.А. Некоторые методические аспекты определения прочности хрупких сред // Материалы XXVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. 2020 с. 73-74.
- 189. Гонов М.Е., Брагов А.М., Константинов А.А., Филиппов А.Р. Система базовых экспериментов при динамических испытаниях бетона на основе метода Кольского // Материалы XXVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. 2020, с. 86-87.
- 190. Гонов М.Е., Константинов А.Ю. Влияние условий нагружения мерного стержня на диаграммы деформирования бетона // Тезисы доклада. Международной научной конференции «Проблемы прочности, динамики и ресурса, Нижний Новгород, 2019, с. 11.
- 191. Гонов М.Е., Ламзин Д.А., Константинов А.Ю. Экспериментальное исследование динамического разрушения фибробетона//Материалы XXVI симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова.2020 с.88-89.
- 192. Гонов М.Е., Южина Т.Н. Методика изготовления образцов бетона для динамических испытаний // Сборник тезисов докладов 17 научно-технической конференции "Молодежь в науке". Саров, 15-19 октября 2018, с. 326-333.
- 193. Ерофеев В.И., Герасимов С. И., Солдатов И. Н. Волновые процессы в сплошных средах. РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2012. 258 с.
- 194. Ерофеев В.И., Шешенин С.Ф. Нелинейно-упругие стационарные волны в твердом пористом материале. Нелинейный мир. 2007.т.5. №1-2. с. 9-14.
- 195. Ламзин Д.А., Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Новиков В.В., Гонов М.Е. Методические аспекты динамических испытаний хрупких материалов на сжатие // Приволжский научный журнал. 2019. №4 (52). с. 65-78 (ВАК).
- 196. Петушков В.Г. О выборе образца для высокоскоростных испытаний на растяжение // Пробл. прочности. 1970. № 4. С. 97-99.
- 197. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник. М.: Металлургия, 1976. С. 488.
- 198. Пушков В.А. Изучение динамических диаграмм растяжения конструкционных материалов по методу составного стержня гопкинсона. Актуальные вопросы и перспективы развития науки, техники и технологии. материалы Международной научно-практической конференции. ЧУДПО «Научно-исследовательский и образовательный центр». Казань, 2020. С. 43-53.