

На правах рукописи



ГОНОВ МИХАИЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ БЕТОНОВ И ФИБРОБЕТОНОВ
ПРИ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ ОТ 10^{-3} ДО 10^4 с $^{-1}$**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Константинов Александр Юрьевич

Официальные оппоненты: **Пушков Виктор Алексеевич,**
доктор технических наук, профессор кафедры
теоретической и экспериментальной механики
Саровского физико-технического института -
филиал федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования "Национальный
исследовательский ядерный университет "МИФИ"
Уваров Сергей Витальевич,
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник Лаборатории
физических основ прочности Института механики
сплошных сред Уральского отделения Российской
академии наук

Ведущая организация: Институт проблем машиностроения РАН –
филиал ФГБНУ "Федеральный исследовательский
центр Институт прикладной физики Российской
академии наук"

Защита состоится "23" июня 2022 года в 15:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.166.09 при Нижегородском государственном
университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Н.Новгород,
пр. Гагарина, 23, корпус 6, ауд.119.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на
сайте <https://diss.unn.ru/1237>

Автореферат разослан "12" мая 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Горохов Василий Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 подвергаются высокоинтенсивным динамическим нагрузкам. Помимо техногенных катастроф на передний план выходят участвовавшие природные катастрофы, связанные с изменением климата на нашей планете. Различные природные бедствия выражаются участвовавшими за последние десятилетия ураганами, торнадо, наводнениями и сильными землетрясениями. Еще одним фактором возникновения динамических нагрузок является террористическая угроза современной цивилизации 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 их динамическом разрушении.

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 в вычислительной механике. При расчете прочностных показателей конструкций на сегодняшний день используются такие программно-вычислительные 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, множество параметров и констант.

Глубокая изученность основных физико-механических характеристик (диаграммы деформирования, модули упругости, предел прочности и т.д.) материала ведет к надежному и рациональному проектированию объектов повышенной ответственности, подверженных интенсивным динамическим воздействиям.

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

прикладное значение.

Степень разработанности темы. Современная состояние дел указывает на ряд нерешенных задач в области изучения динамических свойств материалов, связанных с отсутствием сертифицированных экспериментальных стендов и методик для динамических испытаний с сопутствующими программами обработки данных.

Развитие технологий привело к появлению супер и сверх 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 изучением характера динамического 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, А.И. Садырин, P.H. 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 хрупких конструкционных материалов (мелкозернистых бетонов, фибробетонов), а также экспериментально-теоретическом изучении их динамических свойств при высоких скоростях деформации и определении различных характеристик, формирующих в дальнейшем ключевые параметры математических моделей указанных материалов.

Ключевые задачи:

- Разработка технологии изготовления различных образцов бетонов и фибробетонов для испытаний при различных видах НДС.
- 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 экспериментальных данных.
- 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:

- Разработаны новые модификации метода Кольского на основании имеющихся в НИИМ ННГУ экспериментальных стендов для определения физико-механических свойств при высокоскоростном деформировании и разрушении.

– Разработана новая программа обработки экспериментальных данных для получения различных характеристик хрупких материалов, которая существенно повышает уровень качества получаемой экспериментальной информации.

– На основании проведенного комплекса экспериментов с использованием метода Кольского и разработанных модификаций с применением для визуализации процессов нагружения образцов высокоскоростной фотосъемки получены закономерности динамической деформации и разрушения ряда различных типов бетона при высокоскоростном нагружении среди которых: мелкозернистый бетон класса В22,5, В25, фибробетон с полимерной, стальной и комбинированной фиброй, армированный железобетон.

– 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.

Теоретическая значимость заключается в наработке аналитических и экспериментальных данных поведения различных видов бетона и фибробетона при динамическом высокоскоростном нагружении.

Практическая значимость

Проведены разработки системы базовых экспериментов для получения комплекса механических свойств для идентификации моделей деформирования и критериев разрушения бетона, а также разработки системы верификационных экспериментов для оценки адекватности моделей деформирования и разрушения, 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 (РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ, ОКБМ Африкантов, ЦНИИСК, им. В.А.Кучеренко, ЦНИИПСК им.Мельникова, НИИЖБ им.А.А.Гвоздева, НИИОСП им. Н.М.Герсевича, ОА ИК АСЭ, ОАО «Атомэнергoproject»), что позволит повысить уровень проектирования сложных экологически опасных систем, подвергающихся высокоэнергетическим импульсным воздействиям.

Методология и методы исследования основаны на применении метода Кольского на основе разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) и ряда его модификаций, реализованных на оригинальных испытательных установках в НИИМ ННГУ, с использованием оригинальной программы обработки экспериментальных данных и визуализацией процессов высокоскоростного деформирования с помощью высокоскоростной съемки. Регистрация первичной экспериментальной информации осуществлялась с помощью методов динамической тензометрии. При проведении идентификации параметров математических моделей использовался расчетно-экспериментальный подход, основанный на согласовании результатов натурных испытаний и численных экспериментов. Численные

расчеты проводилось с использованием моделей комплекса LS-DYNA, в основу которого положен метод конечных элементов (лицензия Customer #244793).

Положения, выносимые на защиту

1. Реализация метода РСГ и ряда модификаций с использованием высокоскоростной фотосъемки и системы обработки фотоизображений.
2. Созданный и зарегистрированный в коллективе соавторов программный комплекс для автоматизированной обработки экспериментальных данных¹.
3. Экспериментальные данные зависимостей от скорости деформации или скорости роста напряжений динамических свойств мелкозернистых бетонов, различных фибробетонов и железобетона.
4. Методики и результаты идентификации определяющих соотношений и верификации математических моделей библиотеки LS-DYNA MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 (№72) и MAT_CSCM (№159).

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности экспериментальных результатов обеспечивается использованием проверенных многими отечественными и зарубежными исследователями методов определения динамических характеристик материалов, сопровождающихся анализом хронологии высокоскоростной фотосъемки, применением программы обработки и построения динамических диаграмм (снижающей человеческий фактор) и сопоставлением полученных данных с экспериментальными данными исследований других авторов.

Основные результаты исследования представлены в 5 научных статьях, опубликованных в журналах из перечня ВАК и 12 тезисах, которые докладывались: XIV Международной научно-технической 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 22 публикациях [1-22], из них 3 [1, 2, 3] опубликованы в ведущих научных журналах (ВАК) и 5 статей [4-8] в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и/или Web of Science.

Личный вклад:

– разработка технологии и изготовление бетонных, железобетонных и фибробетонных образцов для статических и динамических испытаний [10];

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020666341

- проведение комплекса динамических экспериментов на сжатие, растяжение, раскалывание и срез [1-8, 11-22];
- обработка полученных данных и построение динамических диаграмм и основных зависимостей [2-4, 7-9, 11, 13, 15, 19, 20];
- идентификация и верификация двух математических моделей из программного комплекса LS-DYNA.

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. Помощь в проведении идентификации и верификации математических моделей оказывал А.Ю. Константинов. 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.

Диссертационная работа выполнена при поддержке 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 Н-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.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованной литературы из 198 наименования, 172 страниц текста, 170 рисунков и 44 таблиц.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. А.Ю. Константинову, а также всем сотрудникам лаборатории динамических испытаний материалов НИИМ ННГУ за ценные советы и помощь в проведении экспериментов.

Содержание работы

Во введении приводится обоснование актуальности темы исследования, научной новизны и практической значимости, сформулирована цель исследования и основные задачи.

Первая глава представляет собой обзор теоретических и экспериментальных исследований ведущими отечественными и зарубежными авторами, среди которых Ю.М. Баженов, А.М. Брагов, В.А. Велданов, А.К. Ломунов, Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров, А.И. Садырин, P.H. 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. В данной главе рассмотрено краткое введение в историю исследования динамики хрупких материалов, методы нагружения и динамических испытаний, методы измерения динамических процессов и деформаций, методы получения и построения диаграмм напряжения и деформации при высоких скоростях деформации с описанием динамических и механических свойств. Рассмотрены некоторые существенные структурные особенности и условия испытаний и параметры динамического разрушения. Установлено, что для испытаний при средних (промежуточных) скоростях деформации как правило используются пневмогидравлические, пневматические установки, а также копры с падающим грузом, а при высокой скорости деформации широко используется метод Кольского с использованием РСГ.

материалов при широком диапазоне скоростей деформации

Известно, что динамические свойства, характер деформирования и разрушения меняются в зависимости от скорости нагружения. В частности, отклики заметно изменяются после того, как скорость нагружения превышает некоторое критическое значение. На основании проделанного анализа известных литературных источников сформированы основные направления экспериментальных исследований, а также выбран метод Кольского в качестве основного метода динамических испытаний (рисунок 1), как наиболее обоснованный с точки зрения влияния на получаемые механические свойства в условиях динамического нагружения.

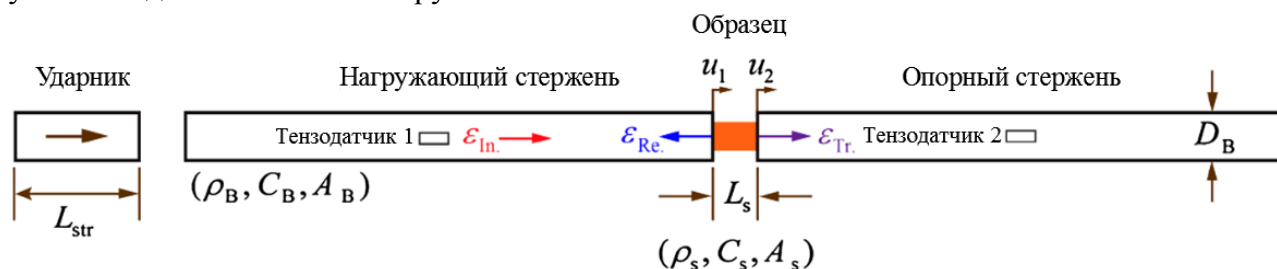


Рисунок 1. Классическая схема разрезного стержня Гопкинсона

Вторая глава рассматривает поведение инновационных фибробетонов при динамическом нагружении. В данной главе представлен обзор экспериментальных исследований влияния формы стального волокна и его объемной доли в фибробетоне при динамической нагрузке по двум категориям. Существующие исследования в большинстве случаев показали, что увеличение объемной доли стальных волокон в фибробетоне увеличивают его ударопрочность и механические свойства. Кроме того, 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 изучено еще недостаточно. К тому же высокая стоимость экспериментальных испытаний, отсутствие серийно выпускаемых

установок и методик построения динамических диаграмм деформирования мешает дальнейшему прогрессу в этом направлении.

Третья глава посвящена развитию установок и методик для динамических испытаний материалов с помощью РСГ в НИИМ ННГУ.

Приведена краткая история, основные принципы и основные зависимости метода Кольского. Рассмотрена модификация метода Кольского на прямое растяжение (рисунок 2).

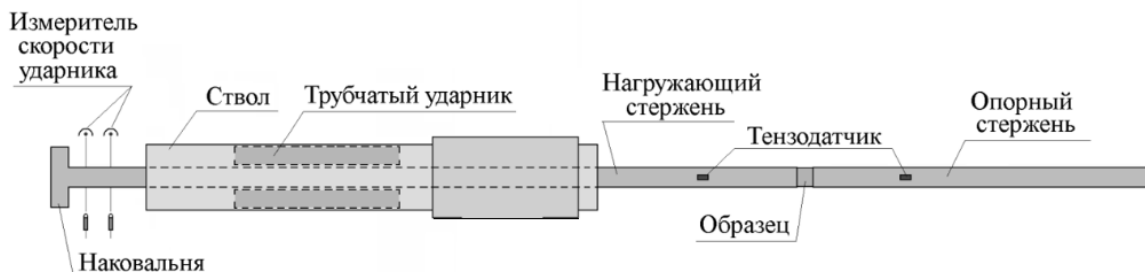


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки на прямое растяжение

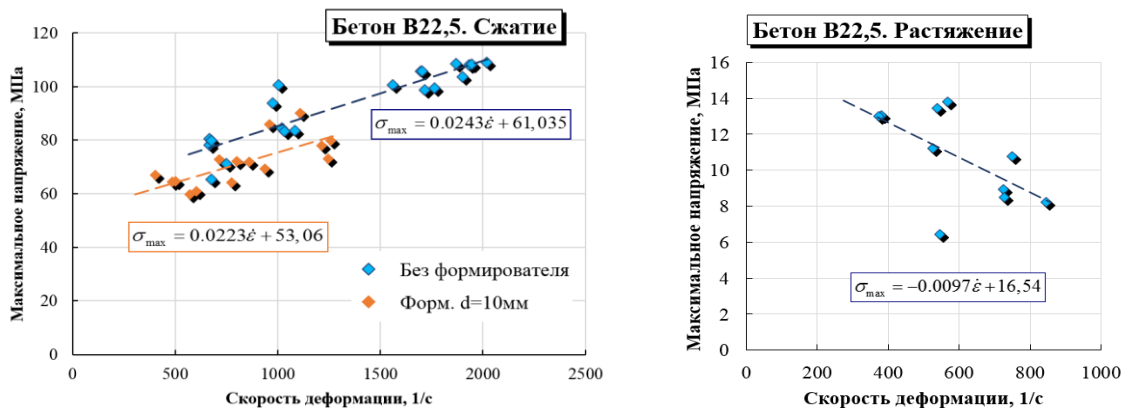
В работе использовались схемы динамических испытаний на раскалывание, сдвиг и сжатие в условиях ограничения радиальной деформации.

В главе также рассмотрена авторская программа ускоренного построения диаграмм деформирования материалов по данным экспериментов на разрезном стержне Гопкинсона на языке программирования Python, позволяющая обрабатывать полученные осциллограммы, проводить синхронизацию импульсов, строить диаграммы деформирования материалов и формировать базу экспериментальных данных.

Четвертая глава демонстрирует итоги экспериментальных исследований, в процессе которых изготовлено более 450 бетонных образцов и проведено более 400 динамических испытаний, среди них 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.

В разделе 4.1 описана методика изготовления бетонных образцов.

В пункте 4.2 для мелкозернистого бетона класса В22,5 приведены зависимости прочностных свойств от скорости деформации при сжатии и растяжении, а также диаграммы динамического деформирования при срезе и раскалывании (рисунок 3).



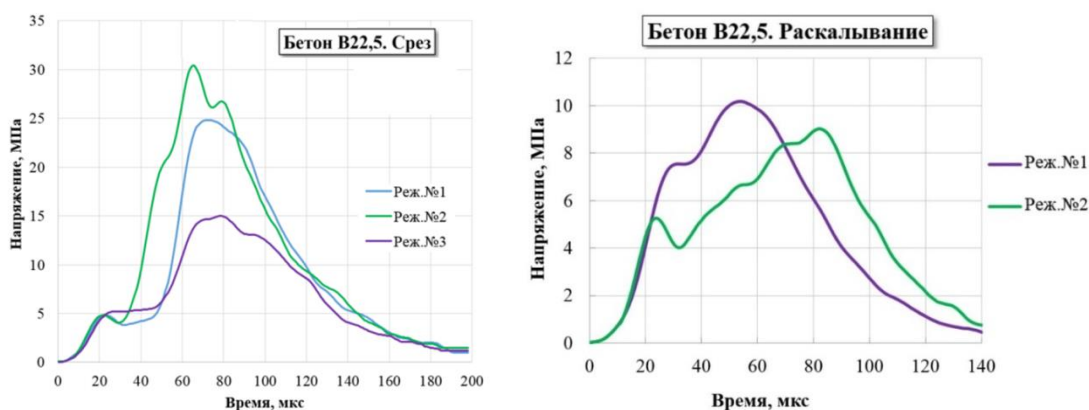


Рисунок 3. Динамические диаграммы мелкозернистого бетона В22,5

Анализ полученных диаграмм при испытаниях на сжатие 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. Полученные зависимости при сжатии 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. Показатель коэффициента динамического упрочнения (КДУ) в полученном диапазоне скоростей деформации $\sim 4 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ изменяется от 1 до 5. 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. При испытаниях на растяжение наблюдалось увеличение энергии разрушения с ростом скорости деформации. При испытаниях на срез отмечена положительная зависимость роста напряжений с течением времени и отрицательная зависимость при испытаниях на раскалывание: с увеличением скорости роста напряжений максимальное напряжение снижалось.

В разделе 4.3 представлены результаты испытаний армированного бетона в виде динамических диаграмм, некоторые из них представлены на рисунке 4. Высокоскоростные испытания в условиях одномерного напряженного состояния при сжатии производились на экспериментальной установке РСГ-60, на образцах диаметром 53 мм и длиной 30 мм. Введение армирующей сетки с ячейкой 10x10 мм при скоростях деформации от 200 до 400 с^{-1} повысило динамическую прочность материала в среднем на 45%. Полученные зависимости демонстрируют то, что с ростом скорости деформации максимальные разрушающие напряжения увеличиваются, также растут и соответствующие им предельные деформации (по линейному закону), а время до начала разрушения снижается по степенному закону. Показатель КДУ в полученном диапазоне скоростей деформации $\sim 40 - 500 \text{ с}^{-1}$ изменяется в зависимости от скорости деформации от 2,9 до 5.

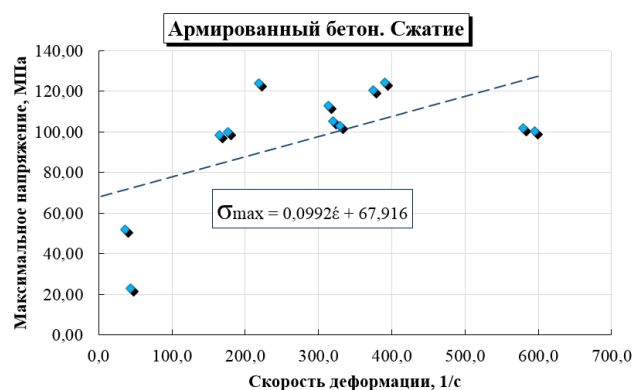
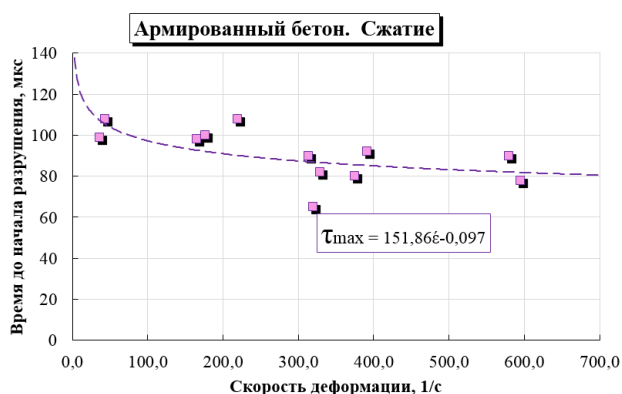


Рисунок 4. Динамические диаграммы армированного бетона

В разделе 4.4 приведены динамические диаграммы на одноосное сжатие, многоосное сжатие в обойме, раскалывание и срез для мелкозернистого бетона класса В25 (МЗБ), полифибробетона (ПФБ), сталефибробетона (СФБ), а также комбинированного фибробетона со стальной и полимерной фиброй (КФБ) (рисунки 5-8).

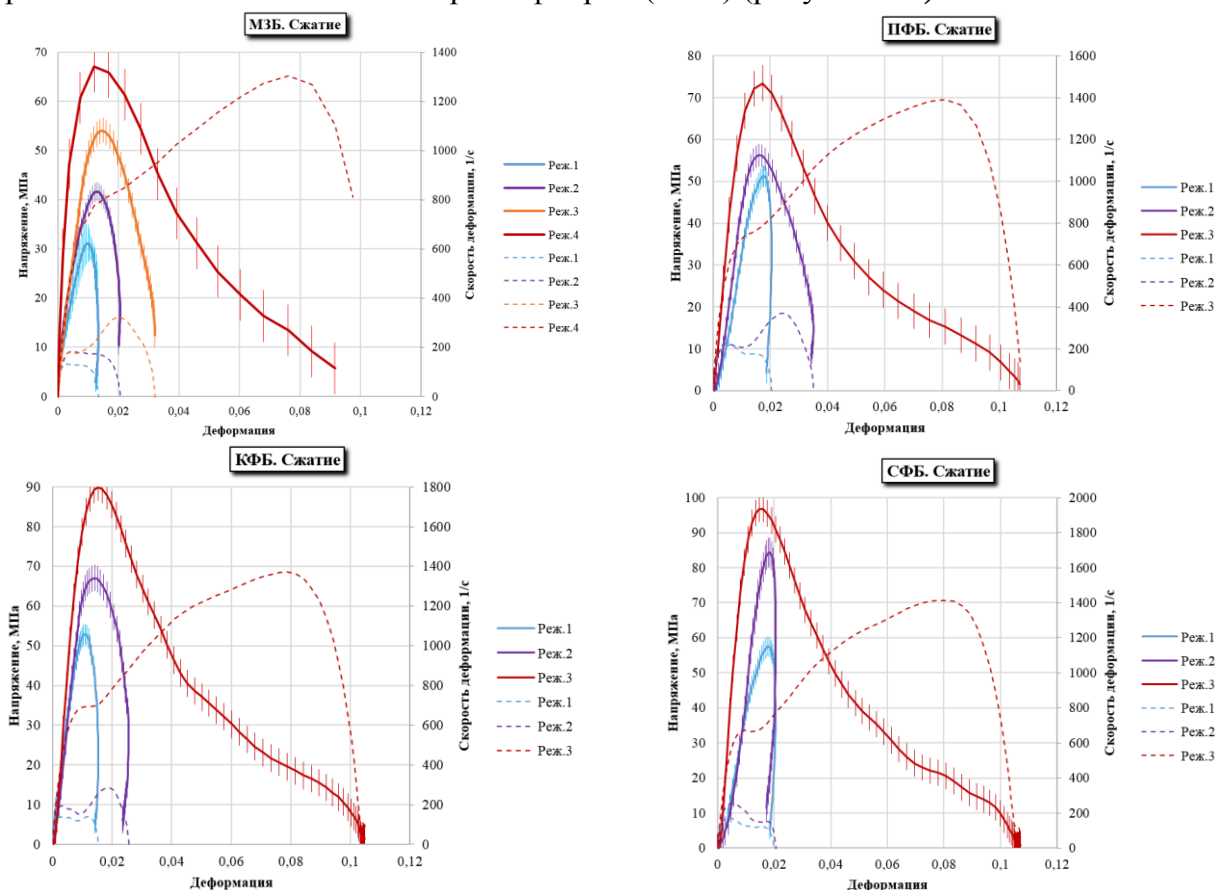


Рисунок 5. – Результаты динамических испытаний при одноосном сжатии

По результатам испытаний на сжатие в осях напряжение–деформация можно сделать вывод о том, что 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, что сопровождается снижением напряжений и ростом деформаций. Для испытанных марок фибробетонов в полученном диапазоне скоростей деформации КДУ изменялся следующим образом:

- для МЗБ в диапазоне скоростей $100\text{--}1000\text{ с}^{-1}$ КДУ изменялся от 1,5 до 3;

- для ПФБ в диапазоне скоростей 200-900 с^{-1} КДУ изменялся от 1,5 до 2,2;
- для СФБ в диапазоне скоростей 200-800 с^{-1} КДУ изменялся от 1,0 до 1,7;
- для КФБ в диапазоне скоростей 140-800 с^{-1} КДУ изменялся от 1,0 до 1,9.

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 ($\epsilon_{\max}$) и времени до начала разрушения ($\tau_{\max}$). Поскольку скорости деформаций ($\dot{\epsilon}$) в процессе деформирования меняются, то они были приняты максимальными до начала разрушения образцов.

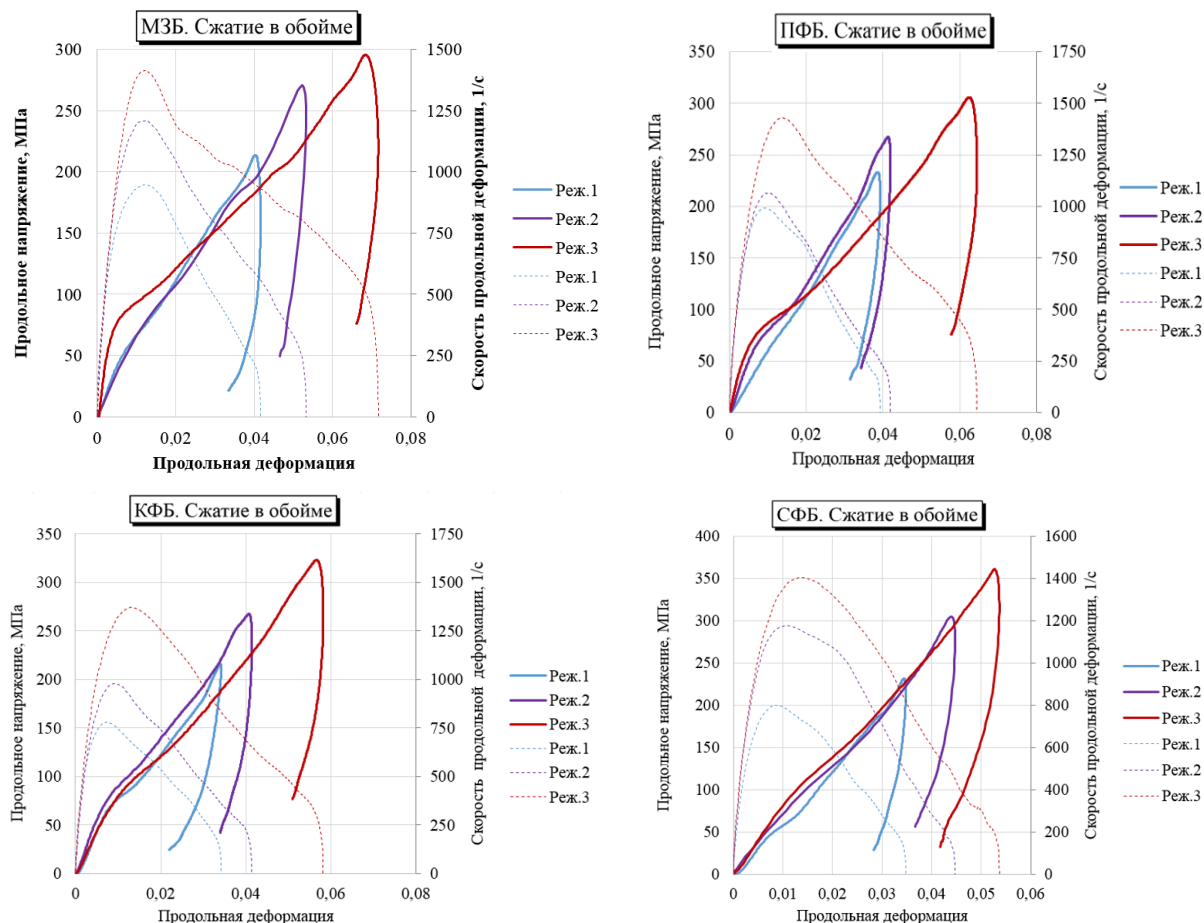


Рисунок 6. Результаты динамических испытаний при сжатии в обойме

По результатам испытаний на динамическое сжатие в обойме для каждого материала построены зависимости давления P от объемной деформации θ_v , а также продольных напряжений σ_x от продольных деформаций ϵ_x . Определены максимальные продольные и радиальные напряжения и максимальные давления, построены зависимости радиальных напряжений и радиальной деформации от времени, давления и объемной деформации от времени, касательных напряжений от давления. Следует отметить, что диаграммы $\sigma_x(\epsilon_x)$ 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 и 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.

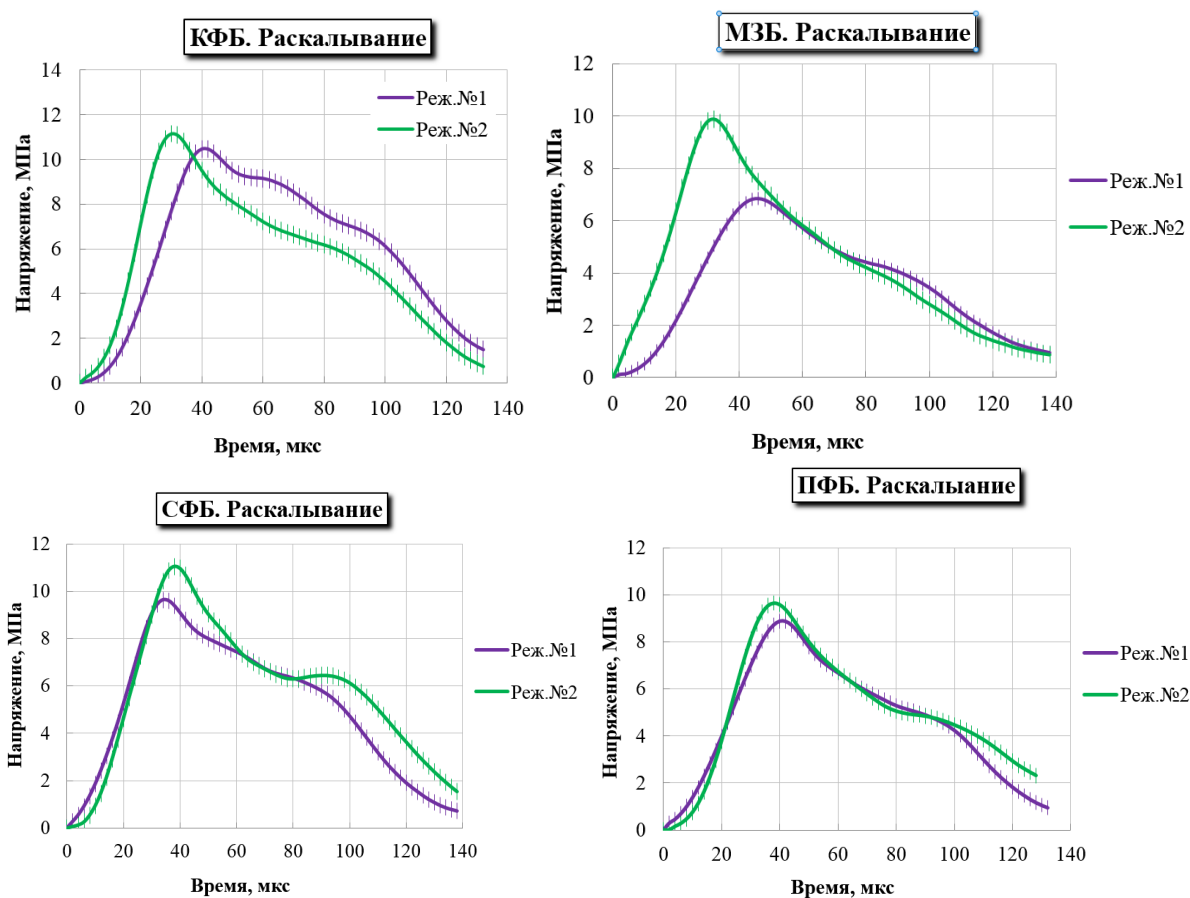


Рисунок 7. Результаты динамических испытаний при раскалывании

По результатам испытаний при раскалывании определялись максимальные растягивающие напряжения ($\sigma_{t \max}$) и время до начала разрушения при различных скоростях роста напряжений ($\dot{\sigma}_t$). При увеличении скорости роста напряжений происходит рост максимальных растягивающих напряжений и снижение времени до начала разрушений. Таким образом, для всех типов фибробетонов при раскалывании наблюдается увеличение прочности от скорости роста напряжений. Для разных фибробетонов эти зависимости различны.

Поскольку определение деформации сдвига в данном типе испытаний затруднительно, то в качестве полученных результатов приводятся диаграммы напряжений сдвига от времени $\tau(t)$. Для всех исследованных материалов отмечена положительная

зависимость, как при испытаниях на сжатие, так и при испытаниях на растяжение: с увеличением скорости деформации динамическая прочность материалов возрастала. Введение упрочняющей фибры в исходный бетон повысило динамическую прочность материала при всех видах НДС.

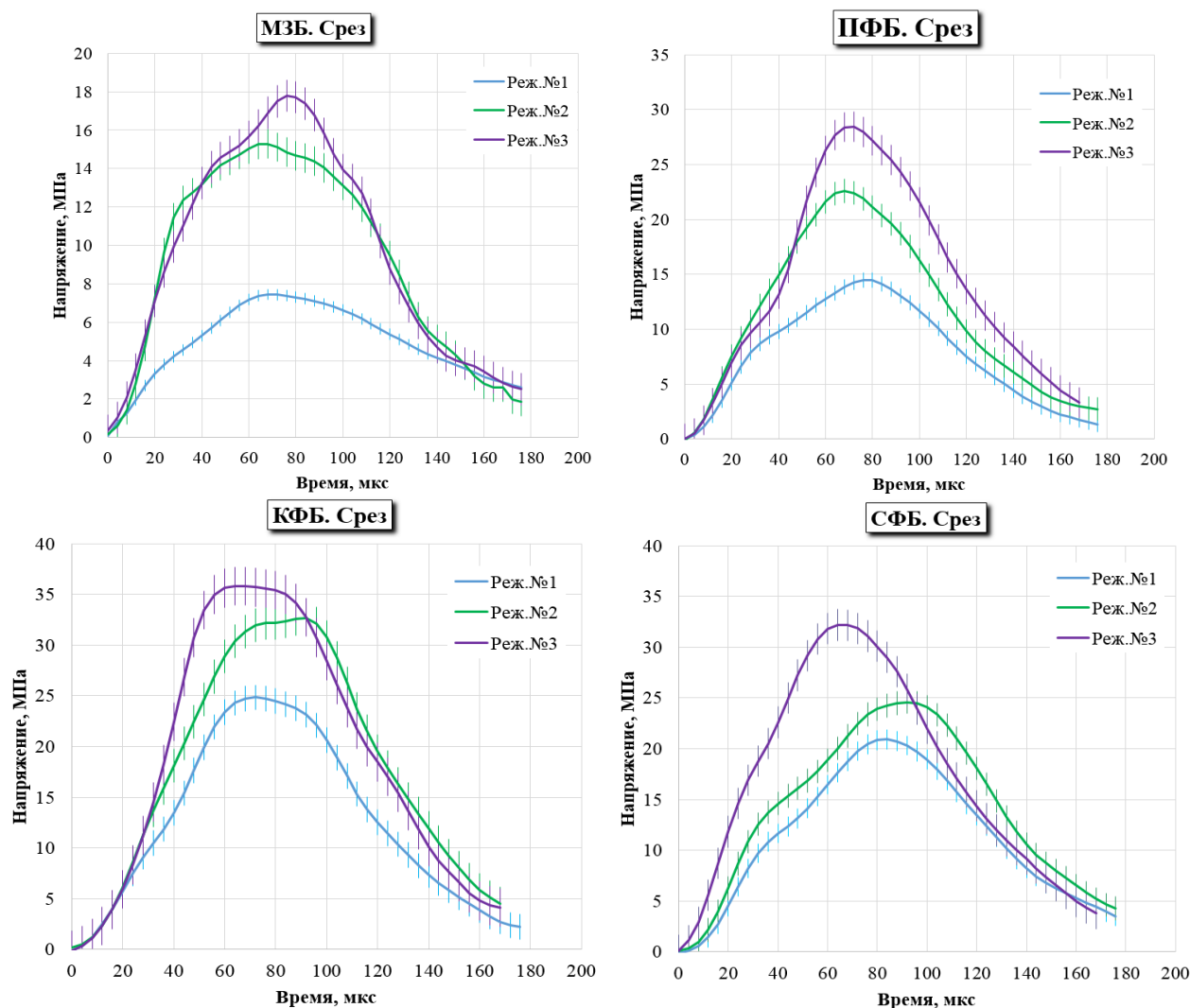


Рисунок 8. Результаты динамических испытаний при срезе

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, а также большой деформирующей способностью полипропиленовых волокон. Сравнительный анализ прочностных характеристик четырех материалов приведен в таблице 1.

Таблица 1. Анализ прочностных характеристик

№	Вид материала	Макс. напряжения, МПа			Средняя прочность, МПа	Средний прирост прочности, %
		Реж.№1	Реж.№2	Реж.№3		
Одноосное сжатие						
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
Сжатие в обойме						
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 при раскалывании						
9	МЗБ	7	10	-	9	0
10	ПФБ	9	10	-	10	11
11	КФБ	11	12	-	12	26
12	СФБ	10	11	-	11	19
Срез (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

В пятой главе для достоверного численного моделирования поведения различных конструкций из бетона в условиях высокоскоростного импульсного нагружения рассмотрены модели деформирования №72 и №159 из библиотеки материалов ПК LS-DYNA и критерии разрушения бетона, адекватно описывающие его поведение при простых и сложных режимах нагружения при различных типах напряженно-деформированного состояния. Для оснащения модели деформирования и критериев разрушения на основании полученных параметров механических свойств бетона проведена идентификация необходимых параметров, после чего полученные (идентифицированные) модели бетона были верифицированы, т.е. проведена оценка их адекватности на основании проведенных верификационных экспериментов. Для проверки адекватности математических моделей и критериев прочности проведены специальные тестовые эксперименты, причем типы НДС этих экспериментов и диапазоны варьируемых параметров (по скорости деформации) отличались от условий, экспериментов, на основании которых были идентифицированы модели. Одним из таких экспериментов является модификация метода Кольского, реализующая динамическое внедрение (индентирование) жестких тел различной формы в образцы из исследуемого материала. Верификация проводилась путем сравнения сигналов тензодатчиков на опорном мерном стержне, полученных в натурном и вычислительном экспериментах. Для визуальной идентификации процесса разрушения образца производится видеофиксация процесса внедрения с помощью высокоскоростной камеры.

Процесс разрушения образца в ходе динамического внедрения клина при использовании моделей MAT_72 (слева) и MAT_159 (справа) и натурном эксперименте показан на рисунке 9.

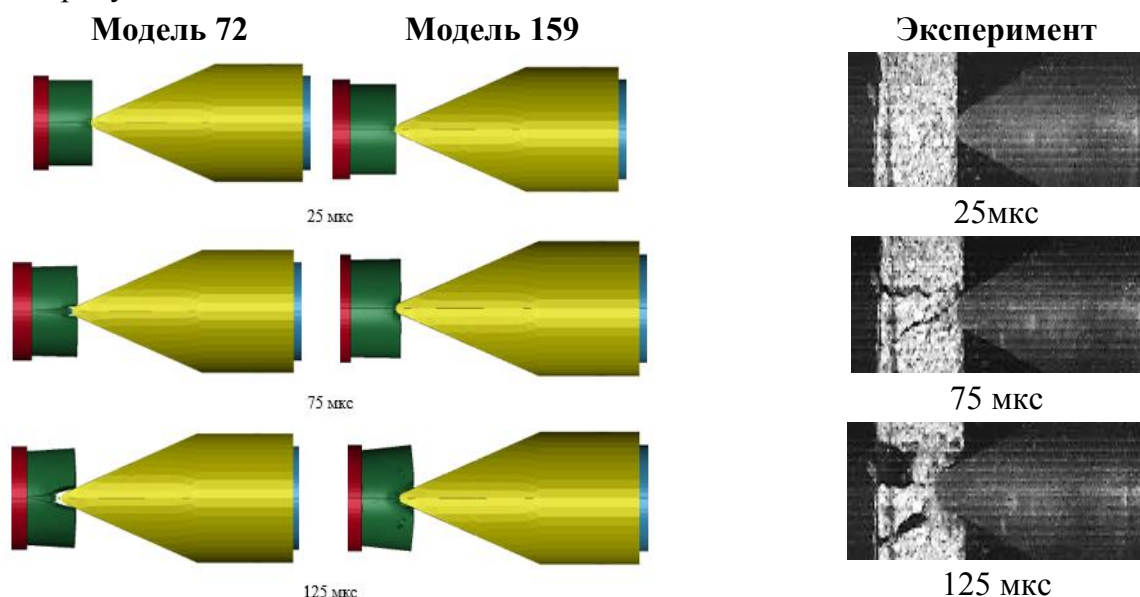


Рисунок 9. – Процесс разрушения образца при динамическом внедрении клина.

На рисунке 10 показано сравнение импульсов деформации в опорном мерном стержне, зарегистрированных в натурном испытании и полученных при численном моделировании 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).

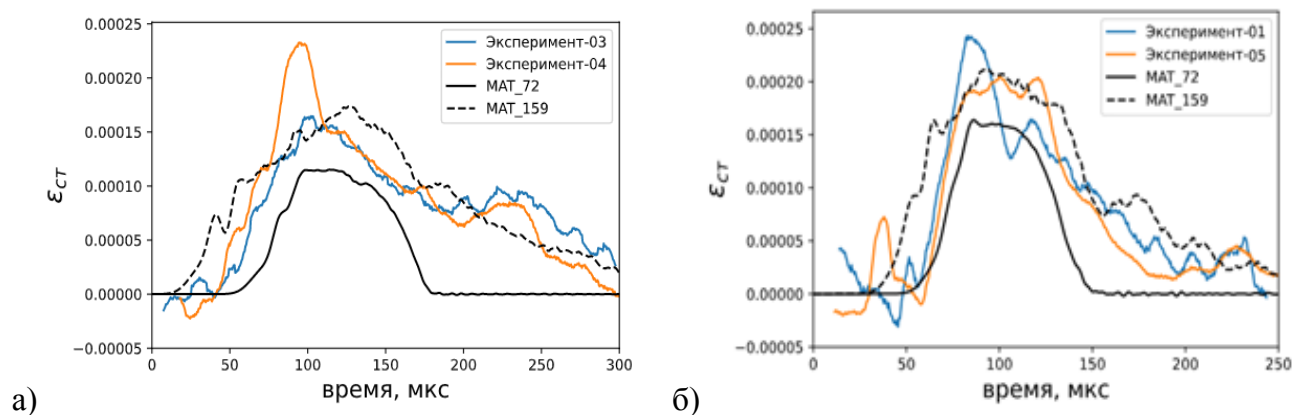


Рисунок 10 – Сравнение импульсов деформации в опорном мерном стержне:

а) – режим нагружения 1, б) –режим нагружения 2

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

По итогам проведенного теоретически-экспериментального исследования сделаны следующие **выводы и заключения**:

1. Проанализированы работы отечественных и зарубежных авторов для оценки современного состояния как методов динамических испытаний, так и динамического поведения хрупких материалов. На основании анализа установлено: поведения хрупких

материалов и их свойства зависят от надежных экспериментальных методов, процедур тестирования, эффективного численного моделирования, вида напряженно-деформированного состояния, состава и вида материала, величины воздействия внешних факторов; при высокоинтенсивных деформациях широко используется метод РСГ и его модификации.

2. Проанализированы динамические свойства различных современных фибробетонов, и в частности проанализировано влияние формы и объемной доли стального волокна в фибробетоне при динамической нагрузке. Поведение фибробетона при высоких скоростях деформации имеет значительное количество нерешенных задач, однако явно установлено, что добавление армирующего фибрового волокна является наиболее эффективным средством повышения стойкости бетона к ударам и другим динамическим воздействиям

3. Изучены и освоены установки в лаборатории №1 НИИМ ННГУ и методики динамических испытаний с помощью метода Кольского и его модификаций (прямое растяжение, срез, раскалывание, испытания на сжатие в обойме).

4. Разработана, запатентована и применена авторская программа построения диаграмм деформирования материалов по данным экспериментов на разрезном стержне Гопкинсона на языке программирования Python. Применение данной программы значительно ускорило обработку экспериментальных данных и построение диаграмм деформирования материалов с последующим формированием базы экспериментальных данных.

5. По результатам комплексного экспериментально-теоретического подхода проведено более 400 динамических испытаний шести видов бетонных материалов: мелкозернистого бетона класса В22,5, полученного методом полусухого вибропрессования, армированного мелкозернистого бетона, мелкозернистого бетона класса В25, фибробетона с полимерной, стальной и комбинированной фиброй. В результате проведенных экспериментов получены диаграммы динамического деформирования при различных высокоскоростных воздействиях, по результатам которых определены характеристики прочности и деформативности, временные и энергетические характеристики, результаты согласуются с данными аналогичных исследований.

6. 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 полипропиленовой фибры, снижающей фактор образования пустот в материале и с большой деформативностью полипропиленовых волокон. 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.

7. Результаты проведенного экспериментального исследования позволили получить динамические характеристики различных видов бетона для составления математических моделей и расчетов напряженно-деформированного состояния. Полученные характеристики могут быть использованы в прикладных научных

исследованиях для оценок прочности конструкций, подвергающихся динамическим воздействиям в различных программно-вычислительных комплексах.

8. Выполнена параметрическая идентификация и математическое моделирование процессов высокоскоростного деформирования бетона. Полученные экспериментальные данные использованы для идентификации математических моделей и критериев разрушения, входящих в программный комплекс LS-DYNA. В качестве специальных верификационных экспериментов использован эксперимент на динамическое внедрение в образец инденторов различной формы (конус, полусфера и клин) и эксперимент на деформирование образца сжатием в стесненных условиях. Реализованы 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 внешний вид (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.

9. Проведенные изыскания, касающиеся проработки системы базовых экспериментов для получения комплекса механических свойств для идентификации моделей деформирования и критериев разрушения бетона, а также разработки системы верификационных экспериментов для оценки адекватности моделей деформирования и разрушения. 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 (РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ, ОКБМ Африкантов, ЦНИИСК, им. В.А.Кучеренко, ЦНИИПСК им.Мельникова, НИИЖБ им.А.А.Гвоздева, НИИОСП им. Н.М.Герсевича, ОА ИК АСЭ, ОАО «Атомэнергопроект»), что позволит повысить уровень проектирования сложных экологически опасных систем, 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%.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ и в базы Web of Science и

Scopus:

1. 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).
2. **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).
3. **Гонов М.Е.** Механические свойства фибробетонов при динамическом сжатии // Проблемы прочности и пластичности, том 84 №1, 2022 с. 131-148 (ВАК).
4. Bragov A.M., **Gonov M.E.**, Lomunov A.K., Balandin V.I. 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)
5. 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 (Web of Sci - Scopus)
6. Bragov A.M., **Gonov M.E.**, Lamzin D.A., Lomunov A.K., Modin I.A. Response of fine-grained fiber-reinforced concretes under dynamic compression // Materials Physics and Mechanics, 2021, 47(6) 962-967. (Scopus)
7. **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).
8. **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)

Материалы докладов на научных конференциях и другие научные публикации:

9. 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)
10. **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.
11. 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.
12. Lamzin D., Bragov A., Lomunov A., Konstantinov A., **Gonov M.** Features of dynamic testing of brittle media // Тезисы доклада. XLVII International Summer School – Conference Advanced Problems in Mechanics APM2019 St. Petersburg, 2019 p. 62.
13. 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.
14. **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.
 15. **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.
 16. **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.
 17. **Гонов М.Е.**, Ламзин Д.А., Константинов А.Ю. Экспериментальное исследование динамического разрушения фибробетона // Материалы XXVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. 2020 с. 88-89.
 18. 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.
 19. **Гонов М.Е.** Деформация и разрушение бетонных материалов при скоростях деформации в пределах от 10^{-3} до 10^4 с^{-1} // 5-й Всероссийский форум «Наука будущего – наука молодых», Москва, 2020 г.
 20. **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.
 21. 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.
 22. 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.

Подписано в печать 21.04.2022 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1. Заказ № 695. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета в отделе дизайна и цифровой печати

РИУ ННГУ им. Н.И.Лобачевского

603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37