

На правах рукописи



**КРЕТОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЁТА ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МАТРИЦ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЗАГРУЖЕНИИ**

**2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук**

**Пенза – 2022**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент  
**Мурашкин Василий Геннадьевич**

Официальные оппоненты – **Федорова Наталия Витальевна**  
советник РААСН, доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский  
государственный строительный университет», заведующий  
кафедрой «Архитектурно-строительное проектирование»  
(г. Москва)

– **Галяутдинов Заур Рашидович**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-  
строительный университет», заведующий кафедрой  
«Железобетонные и каменные конструкции» (г. Томск)

Ведущая организация – **АО «Научно-исследовательский центр «Строительство»**  
(г. Москва)

Защита состоится 6 октября 2022 года в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.356.01, созданного на базе Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/24-2-356-01/117-1905-kretov-dmitriy-aleksandrovich>.

Автореферат разослан 6 августа 2022 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Снежкина  
Ольга Викторовна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Бетонные и железобетонные сооружения применяются в качестве технологической оснастки для метода гидровзрывной штамповки металлических изделий. Технологическая оснастка – матрица, при взрывном воздействии на заготовку, задаёт форму будущему изделию. Чаще всего железобетонные матрицы выполняются кольцевой формы и имеют обечайки из металла.

Использование железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки является перспективным направлением, так как они имеют ряд преимуществ перед матрицами из других материалов: низкая стоимость изготовления и низкая трудоёмкость при достаточной прочности, что позволяет получить экономический эффект; повышение качества штампуемых изделий; отказ от услуг специализированных металлургических, литейных и металлообрабатывающих заводов благодаря возможности изготовления матриц непосредственно на месте последующей штамповки.

Однако, при импульсных воздействиях в железобетонных матрицах образуются трещины в бетонном слое, а впоследствии – разрушения, что при повторных нагружениях приводит к невозможности дальнейшей эксплуатации.

Расчёты кольцевых матриц осуществляются с применением методов предельных состояний и носят эмпирический характер. Для железобетонных кольцевых матриц предельным состоянием является достижение предела прочности бетона на сжатие или достижение предельных деформаций, при которых последующая штамповка невозможна из-за превышения технологических допусков. Поэтому для увеличения срока службы матриц рассматриваются мероприятия по повышению физико-механических свойств бетона и усовершенствованию конструктивного решения данных сооружений.

Внесение конструктивных изменений требует построения новых математических моделей. Следовательно, усовершенствование методов расчётов железобетонных матриц является актуальной задачей.

### **Степень разработанности темы исследования**

Методом гидровзрывной штамповки, в том числе с использованием железобетонных матриц, занимались Анучин М.А., Баженов В.Г., Борисевич В.К., Зорик В.Я., Калашников В.В., Пихтовников Р.В., Степанов В.Г., Шавров И.А., Ghizdavu V., Marin N., Mynors D.J., Zhang B. и др.

Вопросам, связанным со свойствами бетона и арматуры при динамических воздействиях, посвящены работы таких авторов как Баженов Ю.М., Белов Н.Н., Гвоздев А.А., Забегаев А.В., Колчунов В.И., Копаница Д.Г., Кумпяк О.Г., Попов Г.И., Попов Н.Н., Расторгуев Б.С.,

Родевич В.В., Тамразян А.Г., Югов Н.Т. и др., а также за рубежом – Davenne L., Donze F.V., Stevens D., Tao Z., Zhou M. и др.

Способы получения бетона с повышенными физико-механическими характеристиками за счёт твердения смеси под давлением описаны в работах таких авторов как Кришан А.Л., Кузнецов К.С., Матвеев В.Г., Мурашкин Г.В., Сахаров А.А., Снегирёва А.И. и др.

Вопросам расчёта прочности и деформативности железобетонных матриц уделено мало внимания. Известны только общие принципы воздействия импульсных нагрузок на железобетонные матрицы.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационного исследования является совершенствование метода расчёта прочности и деформативности при импульсном нагружении предложенной конструкции железобетонной матрицы, изготовленной с применением бетона, твердеющего под давлением.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

– проанализировать исследования железобетонных конструкций и сооружений при кратковременных динамических нагрузках;

– разработать новые конструктивные решения железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой;

– разработать методики расчёта прочности и деформативности железобетонной кольцевой матрицы, изготовленной с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой при импульсных нагрузках;

– выполнить численный анализ напряжённо-деформированного состояния железобетонных кольцевых матриц, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой при импульсном нагружении;

– разработать методики изготовления железобетонных кольцевых матриц, выполняемых с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой;

– выполнить экспериментальные исследования железобетонных кольцевых матриц, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой при импульсном нагружении;

– обработать, проанализировать экспериментальные результаты и сопоставить с данными численного анализа.

### **Научная новизна исследования**

Предложены методики расчёта железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой при импульсном нагружении.

Разработана методика экспериментальных исследований и получены данные о напряжённо-деформированном состоянии железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой и компенсационным слоем при импульсных нагрузках.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Изучено напряжённо-деформированное состояние железобетонных матриц при импульсных нагрузениях. Разработаны методы расчёта железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки при импульсных нагрузениях.

Разработаны конструктивные решения железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой, а также разработаны технологии их изготовления. Подтверждена возможность изготовления железобетонных матриц с применением бетона, твердеющего под давлением, без использования прессового оборудования, за счёт силового элемента, встроенного в конструкцию.

Доказана возможность более широкого применения конструкций, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением.

### **Методология и методы диссертационного исследования**

Методология диссертационного исследования основана на проанализированных теоретических и экспериментальных опубликованных исследованиях отечественных и зарубежных авторов, относящихся к расчётам железобетонных конструкций при воздействии динамических нагрузений, при использовании известных положений и общепринятых позиций для расчёта железобетонных конструкций на импульсные нагрузки, а также на экспериментальных данных о работе железобетонных конструкций при импульсных нагрузках.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- методики расчёта по предельным состояниям первой и второй группы железобетонных кольцевых матриц, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой, воспринимающих кратковременные динамические нагрузки;
- рекомендации по проектированию конструкций железобетонных кольцевых матриц с оптимальными размерами за счёт рационального использования материалов;
- конструктивные решения железобетонных кольцевых матриц, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой и упорными кольцами;
- рекомендации по проведению экспериментальных исследований и способу определения деформаций в момент взрывного нагружения матриц с помощью измерительной аппаратуры, работающих на принципах тензометрии;

– результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния железобетонных кольцевых матриц, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой, воспринимающих кратковременные динамические нагрузки.

**Степень достоверности** результатов подтверждается использованием основных положений строительной механики и основных теорий расчёта железобетонных конструкций; применением стандартных методов испытаний; применением современных методов исследования прочностных и деформативных свойств используемых материалов; использованием сертифицированной и аттестованной измерительной аппаратуры; достаточным количеством проведённых экспериментов; обработкой результатов экспериментальных данных.

#### **Внедрение результатов исследования**

Результаты экспериментальных и теоретических исследований были приняты к использованию:

– в научной работе студентов и при чтении спецкурсов на кафедре «Железобетонные конструкции» Академии строительства и архитектуры Самарского государственного технического университета;

– при расчёте, проектировании и изготовлении железобетонных матриц в АО «РКЦ «Прогресс» и в ООО «Самара-Авиагаз».

**Объектом исследования** являются железобетонные сооружения, представляющие собой кольцевые матрицы для гидровзрывной штамповки, воспринимающие динамические воздействия.

#### **Апробация работы**

Результаты диссертационного исследования представлены на XIV Международной научно-технической конференции «Материалы и технологии XXI века» (г. Пенза, Россия, 2016 г.); XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering (Rostov-on-Don, Russia, 2018); 76-й научно-технической конференции с международным участием «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре» (г. Самара, Россия, 2019 г.); 78-й Всероссийской научно-технической конференции «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре» (г. Самара, 2021 г.); International Conference on Civil, Architectural and Environmental Sciences and Technologies (Samara, Russia, 2021); XXX Russian-Polish-Slovak Seminar Theoretical Foundation of Civil Engineering (Moscow, Samara, Russia, 2021).

#### **Публикации**

Основные результаты и выводы диссертационного исследования изложены в пяти научных публикациях, в том числе в трех работах в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной

степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, в двух работах в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных.

В результате решения задач в рамках диссертационного исследования автором получены два патента на изобретение, один патент на полезную модель, а также одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Структура и объем работы**

Диссертация изложена на 227 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 125 наименований (в том числе 19 зарубежных источников), четырех приложений (на 76 страницах), содержит 43 рисунка и 3 таблицы.

Выражаю **благодарность** первому научному руководителю члену-корреспонденту РААСН, доктору технических наук, профессору Мурашкину Геннадию Васильевичу за ценные советы и рекомендации при планировании и выполнении исследования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены научная новизна исследования, теоретическая и практическая значимость работы, данные о методологической основе, об апробации результатов, а также о структуре и объёме диссертационного исследования.

**Первая глава** посвящена анализу состояния вопроса и постановке задач исследования. В этом разделе рассмотрены научные публикации по теме исследования и рассмотрены существующие конструктивные решения железобетонных матриц.

В настоящее время широко применяется метод изготовления крупногабаритных изделий из листового металла за счёт энергии взрыва. После проведения множества экспериментов выбор был сделан в пользу бризантных взрывчатых веществ. Эффективной передающей средой является вода, так как её применение экономически выгодно, и она является несжимаемой, что позволяет без потерь передавать энергию взрыва на заготовку. В водной среде продукты взрыва бризантных взрывчатых веществ растворяются и не разлетаются, а давление ударной волны в десятки раз больше по сравнению с воздушным взрывом. Работа с бризантными взрывчатыми веществами практически безопасна для обслуживающего персонала, так как, при достаточно большом слое воды над заготовкой, отражение ударной волны из воды в воздух практически не происходит из-за большой разницы в акустическом сопротивлении сред.

Матрицы для штамповки большого количества деталей, а также для штамповки заготовок значительной толщины обычно изготавливают из стали, цинка или чугуна. Для крупногабаритных деталей металлические матрицы тяжелы и дороги. Также для мелкосерийного и опытного

производства оснастка должна быть дешёвая и легко изготавливаться. В этом случае матрицы выполняются из железобетона.

Железобетонные матрицы кольцевой формы применимы в таких операциях, как развальцовка труб и раздача сосудов.

Качество штампуемых изделий будет зависеть от состояния внутренней поверхности матрицы. Одним из вариантов создания гладкой формообразующей поверхности у железобетонных матриц является использование обрешетки из металла. При взрыве в бетоне возникают сжимающие радиальные напряжения. Отражённые ударные волны создают растягивающие радиальные усилия в бетоне. Но усиление бетона металлом предотвращает разрушение бетона, так как в этом случае от металлического обрешетки отражаются волны сжатия, и растягивающие радиальные напряжения в бетоне не возникают. Кроме того, металлические обечайки выполняют роль опалубки в момент заливки бетона.

Также вопрос качества штамповки решается тем, что заготовки штампуются не за один цикл нагружения, а постепенно – за несколько переходов. В этом случае при расчете матрицы необходимо обращать основное внимание не на прочностные свойства, а контролировать величину перемещения за одну штамповку.

Методика точного расчета железобетонных конструкций при действии импульсных нагрузок, по Белову Н.Н., основана на составлении уравнения движения конструкции, в которой учтены фактический закон изменения действующей нагрузки во времени, инерционные силы и прочностные характеристики материалов.

Исходя из вышесказанного, наиболее предпочтительна для применения конструкция многослойной кольцевой матрицы, состоящей из внутреннего металлического кольца, бетонного слоя и наружного металлического кольца. В такой конструкции внутреннему кольцу необходимо задать допустимые радиальные перемещения. В бетоне и наружном кольце будут проявляться упругие деформации, так как бетон не успевает за короткий период перестроить внутреннюю структуру и проявить пластические деформации, а наружное кольцо более удалено от эпицентра взрыва, поэтому напряжения в нем не достигают пластического деформирования.

Нужно отметить, что в бетоне при взрывном нагружении происходит появление радиальных трещин, но при этом допускается дальнейшая эксплуатация матриц. Для матриц разрушение может происходить вследствие текучести обечайек, арматуры или по бетону. Отсюда способы увеличения выносливости матриц – увеличение сечений обечайек, диаметра арматуры или улучшение физико-механических свойств бетонного сектора.

В работах Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И. применялись матрицы, изготовленные с применением бетона, твердеющего под давлением. Это позволило улучшить физико-механические характеристики бетона, создать начальные напряжения в элементах матрицы.



Было отмечено достижение равнопрочности элементов конструкции, а разрушение происходило в области контакта внутреннего металлического кольца с бетоном из-за выкрашивания бетона. Однако, при изготовлении матриц давление на твердеющую бетонную смесь создавалось стационарными прессами, что не всегда возможно при изготовлении крупногабаритных матриц.

Также в первой главе рассмотрен вопрос улучшения физико-механических свойств материалов при действии импульсных нагрузок. Так, в зависимости от скорости деформирования, для бетона коэффициент динамического упрочнения составляет 1,5...2, для арматуры А400 и конструкционной стали – около 1,3. Отмечена важность однородности состава бетона при импульсных загрузках.

**Во второй главе** представлены разработанные автором конструктивные решения железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки, изготавливаемых с применением бетона, твердеющего под давлением. Конструктивные схемы матриц представлены на рисунке 1. По результатам разработок получены два патента на изобретения и один патент на полезную модель.

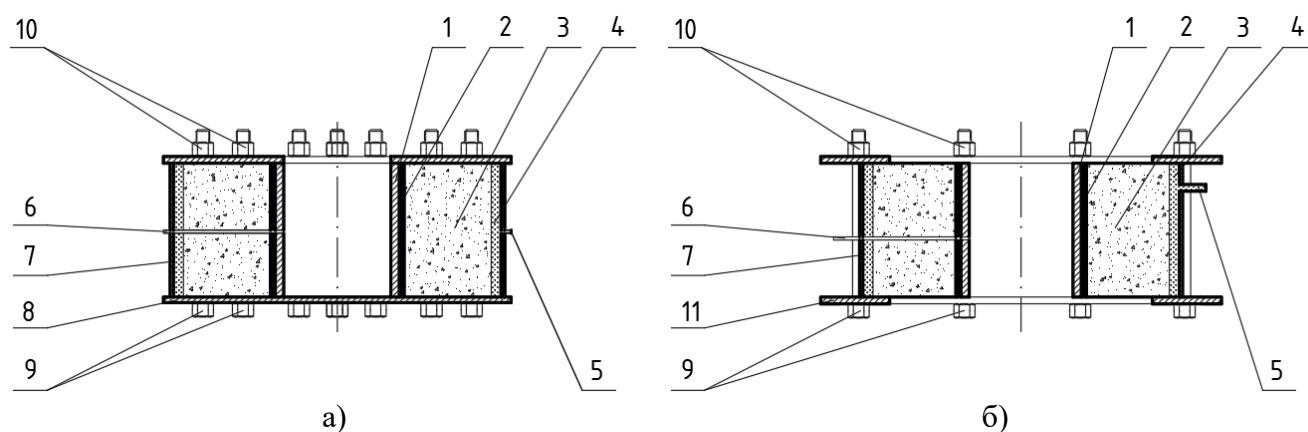


Рисунок 1 – Конструктивные схемы бетонных матриц:

а) со сплошными крышками; б) с упорными кольцами

Матрицы представляют собой толстостенный цилиндр с внутренней формообразующей поверхностью 1, выполняемой из металла. Компенсационный слой 2 выполняется из резины на стыке формообразующей поверхности 1 и бетонного сектора 3. Внутри конструкции матрицы расположена гидравлическая камера 4, которая создаёт давление на твердеющую бетонную смесь, создаёт начальные напряжения в элементах и регулирует напряжённо-деформированное состояние при эксплуатации матрицы. Давление в камере создаётся путём накачивания жидкости через патрубок 5. В конструкции матрицы предусматривается вакуумная трубка 6 для откачивания воздуха между заготовкой и матрицей для качественной штамповки изделий. Под цифрой 7 обозначена наружная металлическая обечайка. Матрица, представленная на рисунке 1 (а), сверху и снизу ограничивается сплошными металлическими крышками 8, которые

стягиваются болтами 9 и гайками 10. На рисунке 1 (б) бетонный силовой корпус сверху и снизу ограничивается лишь частично с помощью упорных колец 11.

Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено три образца матриц: со сплошными крышками – 1 шт. (рисунок 2 (а)), и с упорными кольцами – 2 шт. (рисунок 2 (б)). Внутренняя формообразующая полость выполнена в виде цилиндра. Матрицы имеют следующие размеры: внешний диаметр 426 мм, внутренний диаметр 170 мм, высота матрицы без учёта крышек и крепёжных элементов составляет 200 мм. В качестве бетона применялся мелкозернистый песчаный бетон, твердеющий под давлением. Для приготовления бетонной смеси использовались: портландцемент М400 (500 кг на 1 м<sup>3</sup>), песок с модулем крупности 2,5 и водопотребностью 7 % (1250 кг на 1 м<sup>3</sup>), вода (305 л на 1 м<sup>3</sup>). Все образцы были армированы кольцевой арматурой класса А400 диаметром стержней 16 мм. Армирование состоит из трёх колец, расположенных на разной высоте. Схема армирования представлена на рисунке 2 (в).

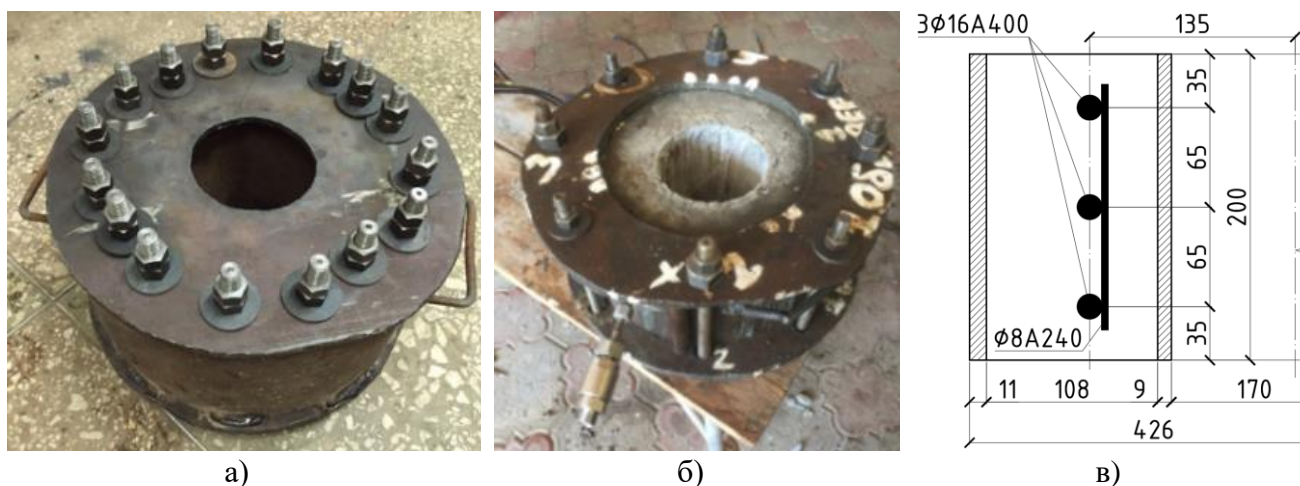


Рисунок 2 – Опытные образцы железобетонных матриц:

а) со сплошными крышками; б) с упорными кольцами; в) схема армирования

Из той же бетонной смеси изготавливались контрольные образцы, твердеющие при естественных условиях, и образцы, твердеющие под давлением, – цилиндры диаметром 75 мм и высотой 140 мм. По результатам испытаний контрольных образцов определена прочность бетона, твердевшего в естественных условиях, значение которой соответствует классу бетона В22,5. Твердение смеси под давлением позволило повысить значение прочности до значений, соответствующих классу бетона В30. Кроме этого при твердении под давлением удаляется свободная вода, активируются химические процессы и уменьшается количество пор. Для подтверждения повышения характеристик бетона в самих матрицах производилось определение прочности бетона с помощью измерителя ОНИКС-2.5. Данные совпали с результатами испытаний контрольных образцов.

При изготовлении опытных образцов матриц гидравлическая камера создавала давление на бетон, равное 2 МПа. Давление выдерживалось 7 часов. Такие же условия твердения использовались при изготовлении контрольных образцов-цилиндров. На образцы матриц с упорными кольцами устанавливались дополнительные технологические диски и крышки на время твердения бетонной смеси под давлением, после чего они демонтировались.

При изготовлении на элементы матрицы устанавливаются тензорезисторы типа ВЕ120-20АА-Х-4см для последующей фиксации значений деформаций в момент взрывных нагрузений. Тензорезисторы были установлены на металлические внутренние и наружные обечайки и кольцевую арматуру. На бетон тензорезисторы не устанавливались из-за раннего растрескивания бетонного сектора. Схема размещения тензорезисторов представлена на рисунке 3. Для фиксирования показаний во время нагружений была выбрана тензостанция «Zetlab ZET 017-T8» с быстродействием 50 кГц на канал. На данной скорости измерительный комплекс может производить одновременную запись до 8 каналов, что позволяет увидеть целостную картину деформаций в матрице, в отличие от аналогичных испытаний, проведённых Мурашкиным Г.В. и Снегирёвой А.И., когда показания получали лишь с одного или двух тензорезисторов.

Взрывные нагружения производились в воде. В качестве взрывчатого вещества использовались отрезки детонирующих шнуров ДШЭ-12. Шнур устанавливался вертикально по оси матрицы. Схема крепления заряда в виде отрезка ДШЭ-12 представлена на рисунке 4.

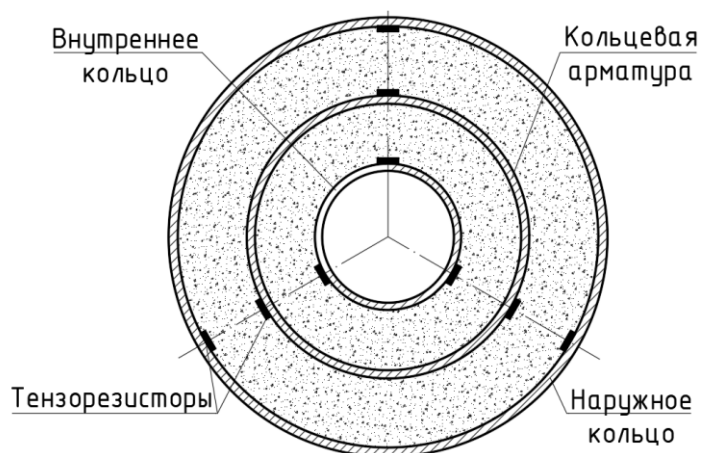


Рисунок 3 – Схема размещения тензорезисторов

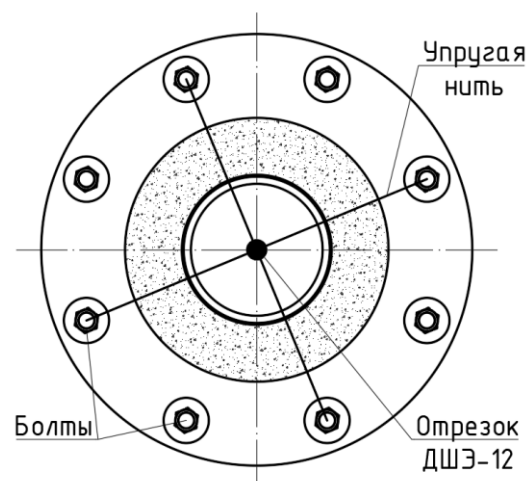


Рисунок 4 – Схема крепления заряда ДШЭ-12

При первом нагружении каждого образца использовался один отрезок ДШЭ-12 длиной 200 мм. Давление ударной волны составило 77 МПа. На этом заряде производилась проверка работоспособности регистрирующей аппаратуры, правильности подключения и целостности

коммутационных тензометрических кабелей. При втором нагружении использовалось два отрезка ДШЭ-12, при третьем – три и при четвёртом – четыре отрезка одновременно. Таким образом, каждый образец нагружался четыре раза с увеличением массы взрывчатого вещества при каждом последующем нагружении. Максимальное значение давления ударной волны составило 125 МПа.

**В третьей главе** предложены методики расчёта по прочности и деформативности кольцевых железобетонных матриц при действии динамических нагрузок.

При разработке методик расчёта приняты следующие предпосылки:

- ударная волна рассматривается как цилиндрическая и действует одновременно по всей поверхности рабочего контура и оказывает на него давление:

$$P_1(t) = 2 \cdot P_m \cdot e^{-\frac{t}{\xi}}, \quad (1)$$

где  $P_1(t)$  – давление на формообразующее стальное кольцо;

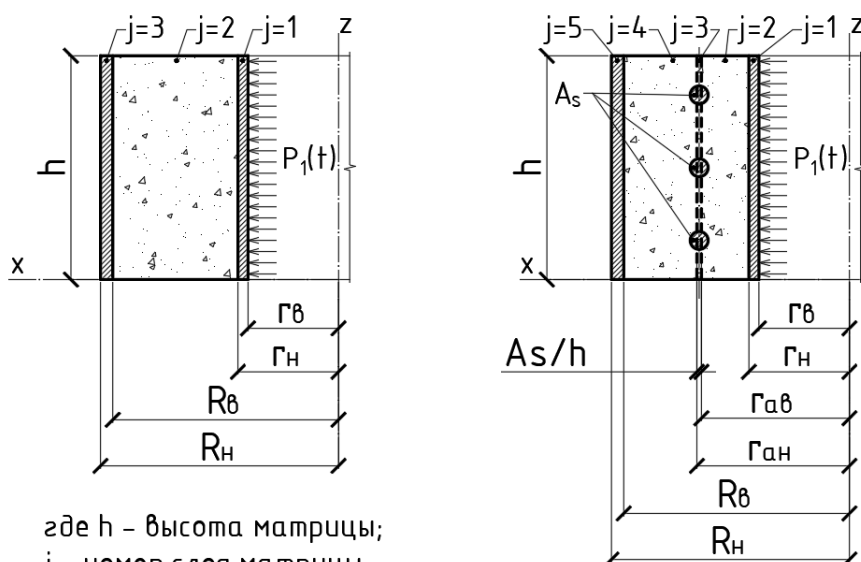
$t$  – время, прошедшее с момента взрыва;

$P_m$  – максимальное давление падающей ударной волны;

$\xi$  – экспоненциальная постоянная затухания давления в падающей ударной волне;

- влияние свободной поверхности на действие ударной волны не учитывается;
- из-за раннего образования трещин бетон перестаёт воспринимать тангенциальные растягивающие напряжения и передаёт давление на наружное кольцо;
- бетон на сжатие работает упруго;
- динамическое упрочнение материалов (изменение предела текучести у металлов и предела прочности у бетона) из-за высокой скорости деформирования учитывается коэффициентами динамического упрочнения.

Предложен расчёт прочности и деформативности бетонных и железобетонных матриц при импульсном нагружении, основанный на алгоритмах метода конечных интегральных преобразований, подробно описанных в работах Сеницкого Ю.Э. и Шляхина Д.А. В данном методе рассматривается равновесие элемента многослойного цилиндра. Расчётные схемы матриц представлены на рисунке 5. Наружный радиус матрицы  $R_n$  принимается равным единице для составления уравнений в безразмерной форме. В расчётной модели площадь арматуры  $A_s$  рассматривается эквивалентным слоем, толщина которого равна  $A_s / h$ .



где  $h$  – высота матрицы;  
 $j$  – номер слоя матрицы;  
 $r_b$  – внутренний радиус внутреннего металлического кольца;  
 $r_n$  – наружный радиус внутреннего металлического кольца;  
 $r_{ав}$  – внутренний радиус кольцевой арматуры;  
 $r_{ан}$  – наружный радиус кольцевой арматуры;  
 $R_b$  – внутренний радиус наружного металлического кольца;  
 $R_n$  – наружный радиус наружного металлического кольца;  
 $A_s$  – площадь кольцевой арматуры;  
 $P_1(t)$  – взрывная нагрузка.

Рисунок 5 – Расчётные схемы матриц:

без армирования (слева) и с кольцевой арматурой (справа)

Начально-краевая задача в безразмерной форме:

$$\frac{\partial^2 u^{(j)}(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u^{(j)}(r,t)}{\partial r} - \frac{u^{(j)}(r,t)}{r^2} - \Phi^{(j)} \cdot \frac{\partial^2 u^{(j)}(r,t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где  $u^{(j)}(r,t)$  – радиальное перемещение  $j$ -го слоя матрицы;

$\Phi^{(j)}$  – числовой коэффициент.

Граничные условия начально-краевой задачи (2) при  $r \in [r_b, 1]$  для матрицы без армирования:

$$\text{при } r = r_b \quad \frac{\partial u^{(1)}(r_b, t)}{\partial r} + \nu^{(1)} \cdot \frac{u^{(1)}(r_b, t)}{r_b} = P_1(t), \quad (3)$$

$$\text{при } r = r_n \quad u_{|-r}^{(1)}(r_n, t) = u_{|+r}^{(2)}(r_n, t), \quad (4)$$

$$\frac{E^{(1)}}{1-(\nu^{(1)})^2} \cdot \left( \frac{\partial u^{(1)}(r_u, t)}{\partial r} + \nu^{(1)} \cdot \frac{u^{(1)}(r_u, t)}{r_u} \right) = \frac{E^{(2)}}{1-(\nu^{(2)})^2} \cdot \left( \frac{\partial u^{(2)}(r_u, t)}{\partial r} + \nu^{(2)} \cdot \frac{u^{(2)}(r_u, t)}{r_u} \right), \quad (5)$$

$$\text{при } r = R_g \quad u_{|r}^{(2)}(R_g, t) = u_{|r}^{(3)}(R_g, t), \quad (6)$$

$$\frac{E^{(2)}}{1-(\nu^{(2)})^2} \cdot \left( \frac{\partial u^{(2)}(R_g, t)}{\partial r} + \nu^{(2)} \cdot \frac{u^{(2)}(R_g, t)}{R_g} \right) = \frac{E^{(3)}}{1-(\nu^{(3)})^2} \cdot \left( \frac{\partial u^{(3)}(R_g, t)}{\partial r} + \nu^{(3)} \cdot \frac{u^{(3)}(R_g, t)}{R_g} \right), \quad (7)$$

$$\text{при } r = 1 \quad \frac{\partial u^{(3)}(1, t)}{\partial r} + \nu^{(3)} \cdot u^{(3)}(1, t) = 0, \quad (8)$$

$$\text{при } t = 0 \quad u^{(j)}(r, 0) = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial u^{(j)}(r, 0)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad (10)$$

где  $P_1(t) = \frac{P_{*1}(t)}{E^{(1)}} \cdot [1 - (\nu^{(1)})^2]$  – безразмерная динамическая нагрузка;

$E^{(j)}$  – модуль упругости  $j$ -го слоя матрицы;

$\nu^{(j)}$  – коэффициент Пуассона  $j$ -го слоя матрицы.

Определены собственные значения и собственные функции. Численный расчёт производился с помощью программы Mathcad. Был использован метод разделения переменных:

$$\left. \begin{aligned} u(r, t) &= \sum_{i=1}^{\infty} \frac{G(\lambda_i, t) \cdot K(\lambda_i, r)}{\|K\|^2} \\ \|K\|^2 &= \int_{r_b}^1 K(\lambda_i, r)^2 \cdot r \cdot dr \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где  $G(\lambda_i, t)$  – трансформанты нагрузки;

$K(\lambda_i, r)$  – функции ядра преобразований;

$\|K\|$  – абсолютное значение функций ядра преобразования;

$\lambda_i$  – собственное значение, образующее счётное множество при  $i = 1 \dots \infty$ .

Сформирована типовая однородная краевая задача относительно компонент ядра преобразований и получена система уравнений, подставляя в которую собственные значения  $\lambda_i$ , производился расчёт и записывались значения перемещений и напряжений.

Формулы для нахождения напряжений в элементах матрицы в общем виде:

$$\sigma_r(r, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{G(\lambda_i, t) \cdot \sigma_r(\lambda_i, r)}{\|K\|^2} \quad \text{и} \quad \sigma_\theta(r, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{G(\lambda_i, t) \cdot \sigma_\theta(\lambda_i, r)}{\|K\|^2}, \quad (12)$$

где  $\sigma_r(r, t)$  – радиальные напряжения;

$\sigma_\theta(r, t)$  – тангенциальные (окружные) напряжения.

Для определения напряжений внутреннего кольца по формулам (12) необходимо задать значения  $r \in [r_g; r_n]$ ; для определения напряжений в кольцевой арматуре (при наличии)  $r \in [r_{ag}; r_{an}]$ ; для наружного кольца –  $r \in [R_g; 1]$ ; для бетона –  $r \in [r_n; R_g]$  или, при наличии арматуры,  $r \in [r_n; r_{ag}] \cup [r_{an}; R_g]$ . Для заданных значений переменной  $r$  разработанная в Mathcad программа расчёта выполняет вычисление коэффициентов уравнений. Программа расчёта также учитывает изменение размеров матрицы и производит пересчёт собственных значений  $\lambda_i$ .

Методика учитывает появление трещин в бетоне при повторных нагружениях. В таком случае, при расчёте рассматривается предельное состояние отдельного бетонного сектора, разделённого соседними трещинами, при этом бетон не воспринимает тангенциальных растягивающих напряжений (вследствие образования трещин).

При наличии армирования в матрице граничные условия начально-краевой задачи (2) дополняются и расчёт производится по похожему алгоритму, как для матриц без армирования.

Приведённая методика расчёта позволяет производить анализ напряжённо-деформированного состояния матрицы, определять перемещения и напряжения в элементах.

Для применения расчёта матриц по предельным состояниям предложен метод расчёта, основанный на работах Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И., который также позволяет учитывать работу компенсационного слоя. Используя указанные выше предпосылки и расчётную схему четырёхслойной кольцевой бетонной матрицы, представленную на рисунке 6, были составлены и решены уравнения движения элементов матрицы, которые объединены общим радиальным перемещением  $u(t)$ .

Уравнение движения внутреннего металлического кольца ( $j = 1$ ):

$$\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} \cdot \delta^{(1)} \cdot \rho^{(1)} + \rho^{(0)} \cdot C^{(0)} \cdot \frac{\partial u(t)}{\partial t} + u(t) \cdot \frac{\delta^{(1)} \cdot E^{(1)}}{r_g^2} = P_1(t) - P_2(t), \quad (13)$$

где  $\delta^{(j)}$  – толщина  $j$ -го слоя матрицы;

$\rho^{(j)}$  – плотность  $j$ -го слоя матрицы;

$C^{(0)}$  – скорость распространения звука в воде.

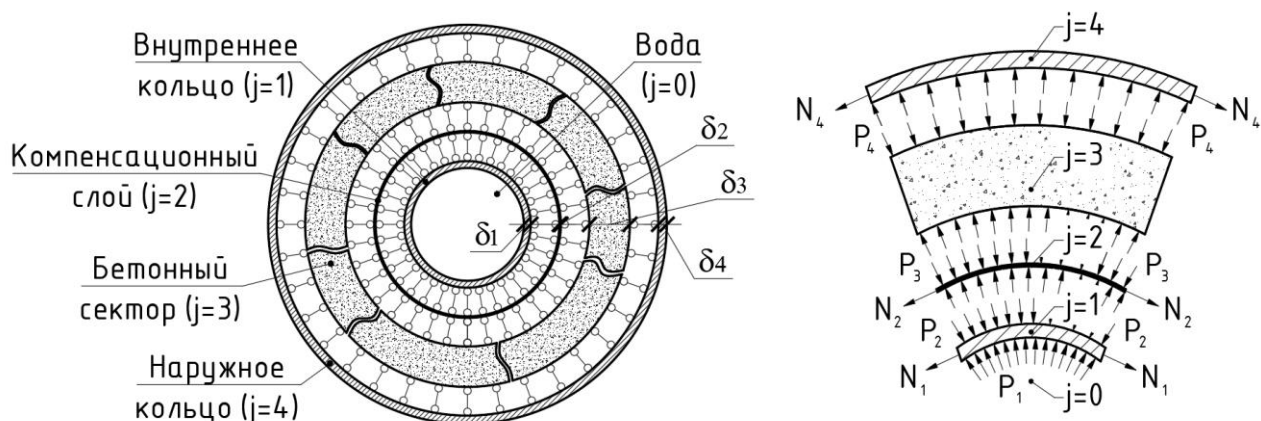


Рисунок 6 – Расчётная схема железобетонной кольцевой матрицы с компенсационным слоем

Уравнение движения компенсационного слоя ( $j = 2$ ):

$$\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} \cdot \delta^{(2)} \cdot \rho^{(2)} + u(t) \cdot \frac{\delta^{(2)} \cdot E^{(2)}}{r_h^2} = P_2(t) - P_3(t) \cdot \frac{r_h}{r_g} \quad (14)$$

Уравнение движения бетонного силового корпуса ( $j = 3$ ):

$$\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} \cdot \delta^{(3)} \cdot \rho^{(3)} = P_3(t) \cdot \frac{r_h}{r_g} - P_4(t) \cdot \frac{R_g}{r_g} \quad (15)$$

Уравнение движения наружного металлического кольца ( $j = 4$ ):

$$\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} \cdot \delta^{(4)} \cdot \rho^{(4)} + u(t) \cdot \frac{\delta^{(4)} \cdot E^{(4)}}{R_g^2} = P_4(t) \quad (16)$$

Нахождение радиального перемещения кольцевой железобетонной матрицы  $u(t)$  по данной методике сводится к решению общего уравнения движения всей матрицы – неоднородного линейного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами, которое получаем путём подстановки уравнений (13), (14), (16) в уравнение (15):

$$\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} + p_k \cdot \frac{\partial u(t)}{\partial t} + q_k \cdot u(t) = T_k \cdot e^{-\frac{t}{\xi}}, \quad (17)$$

где  $p_k$ ,  $q_k$ ,  $T_k$  – числовые коэффициенты неоднородного дифференциального уравнения.

Решение уравнения (17) было записано в виде:

$$u(t) = A \cdot e^{\alpha t} \cdot \left( B \cdot \sin(\beta \cdot t + \phi) + e^{-\left(\frac{1}{\xi} + \alpha\right)t} \right), \quad (18)$$



где  $A, \alpha, B, \beta$  – числовые коэффициенты;

$\phi$  – вспомогательный аргумент.

Необходимо отметить, что при эксплуатации матриц должно выполняться условие:

$$u(t) \leq u_{ult}, \quad (19)$$

где  $u_{ult}$  – предельно допустимое значение перемещений матрицы, определяемое технологическими допусками штампуемых деталей.

Используя закон пропорциональности деформаций и напряжений для упругих материалов, были определены тангенциальные напряжения в металлических обечайках с помощью выражения:

$$\sigma_{\theta}^{(j)}(t) = \varepsilon^{(j)}(t) \cdot E^{(j)}, \quad (20)$$

где  $\varepsilon^{(j)}(t) = \frac{u(t)}{r}$  – относительные деформации.

Для нахождения радиальных напряжений в бетоне была найдена вторая производная  $u(t)$  из выражения (18) и подставлена в уравнение движения бетонного корпуса (15):

$$\sigma_r^{(3)}(t) = \frac{r_6}{r_n} \cdot \left( P_2(t) - \frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} \cdot \delta^{(2)} \cdot \rho^{(2)} - u(t) \cdot \frac{\delta^{(2)} \cdot E^{(2)}}{r_n^2} \right). \quad (21)$$

Также в третьей главе представлен алгоритм учёта кольцевой арматуры, при её наличии в бетонном слое. Учёт работы арматурных стержней не меняет общей структуры дифференциального уравнения движения матрицы и осуществляется с помощью уточнения числового коэффициента  $q_k$  из уравнения (17). Также представлен алгоритм расчёта по трещиностойкости. В данном случае учитывалось растяжение бетона в тангенциальном направлении  $N_3(t)$ :

$$N_3(t) = u(t) \cdot \frac{\delta^{(3)} \cdot E^{(3)}}{r_6^2}. \quad (22)$$

В конце главы приведены предложения по проектированию матриц с компенсационным слоем в зависимости от частоты колебаний.

**В четвёртой главе** представлены результаты экспериментальных исследований и их сравнительный анализ с теоретическими данными. Были выполнены численные расчёты для

различных математических моделей кольцевых матриц. Результаты численных расчётов по предлагаемым методикам сравнивались с экспериментальными данными, полученными ранее Мурашкиным Г.В. и Снегирёвой А.И., а также с результатами собственных экспериментов.

Каждый образец матрицы способен воспринимать многократные взрывные нагрузки, что позволяет выполнять серию испытаний. При испытаниях трёх образцов в общем итоге, суммируя все нагрузки, с помощью тензостанции было получено более 10 млн отсчётов. Снятие показаний с каждого элемента матрицы осуществлялось одновременно через несколько независимых каналов.

Для внутреннего кольца матрицы наибольшие значения напряжений были зарегистрированы в тангенциальном направлении при загрузке четырьмя отрезками ДШЭ-12. График изменения напряжений во времени представлен на рисунке 7.

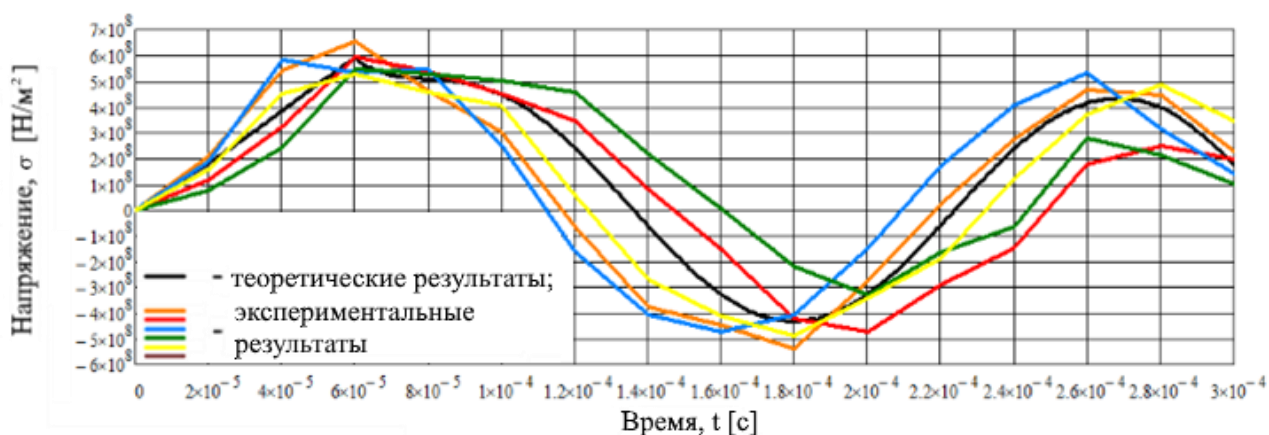
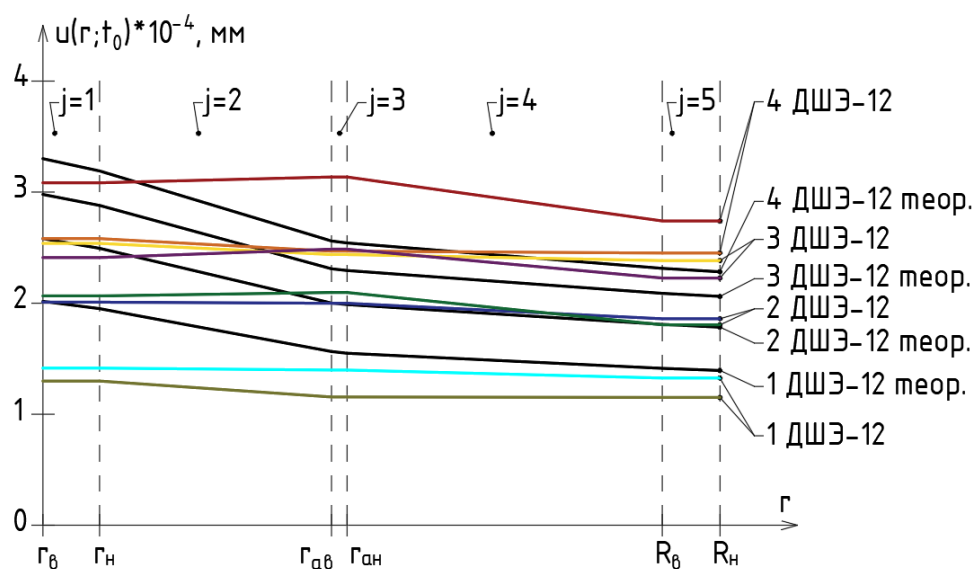


Рисунок 7 – График изменения напряжений во внутреннем металлическом кольце матрицы при действии заряда из четырёх отрезков ДШЭ-12

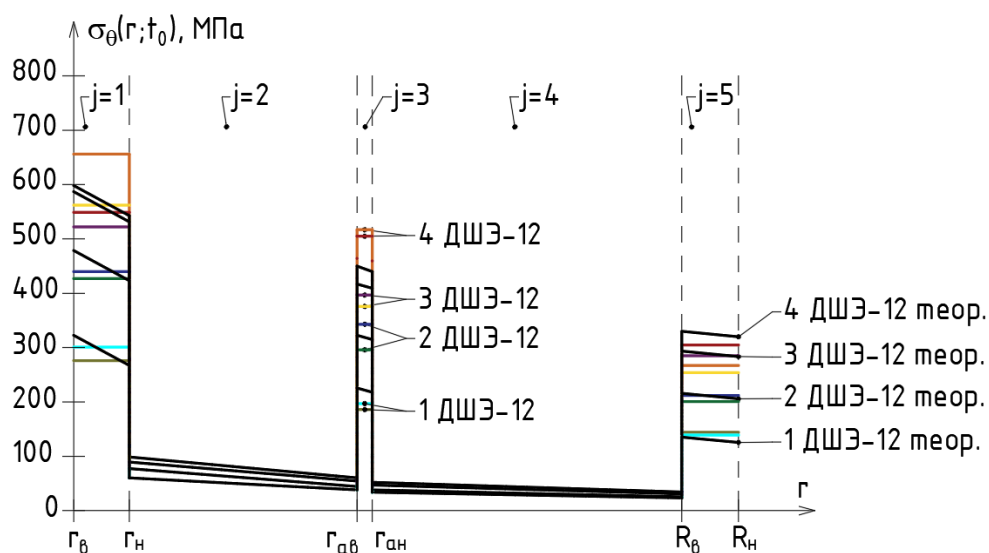
Эпюры деформаций и эпюры тангенциальных напряжений, построенные по теоретическим и экспериментальным данным при действии различных зарядов, представлены на рисунке 8.

Отклонения экспериментальных данных от теоретических данных, полученных по методике, основанной на работах Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И., составили до 14,5 %; по методике, основанной на конечных интегральных преобразованиях, – до 16,8 %.

Появление трещин в бетоне отмечалось на первой ступени нагружения, но матрицы при этом не теряли своих эксплуатационных свойств. Напряжения в бетоне превышали нормативное сопротивление, но разрушения не наблюдалось. Это объясняется тем, что бетон находился в металлической обойме – благоприятном состоянии. Поэтому за разрушение бетона принималось достижение бетоном предельных значений напряжений, равных кубиковой прочности бетона класса В30 с учётом коэффициента динамического упрочнения до 2,43...2,57.



а)



б)

Рисунок 8 – Эпюры, построенные по теоретическим и экспериментальным данным, при действии различных зарядов:

а) эпюры перемещений; б) эпюры тангенциальных напряжений

Напряжения в кольцевой арматуре превышали статический предел текучести. Полученные значения коэффициента динамического упрочнения арматуры составили до 1,06...1,14. Напряжения во внутреннем металлическом кольце превысили значения нормативных показателей прочности при заряде в два отрезка ДШЭ-12. Так же, как и в случае с бетоном, разрушение не происходило. Коэффициент динамического упрочнения для стали С255 был принят до 1,61...1,82.

Анализ экспериментальных графиков и эпюр показал корректность выбранных расчётных моделей: характер графиков деформаций и напряжений в элементах матрицы, полученных из экспериментальных исследований, соответствует теоретическим предпосылкам.

Таким образом, предложенные методы применимы к расчёту матриц при действии взрывной нагрузки. Кроме того, полученные в результате исследования конструктивные решения и методики расчёта возможно адаптировать и использовать при проектировании зданий и сооружений цилиндрической формы, рассчитываемых на импульсное воздействие изнутри. Примерами таких объектов являются защитные оболочки АЭС, здания и сооружения с взрывоопасными производствами, хранилища взрывоопасных веществ и другие.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Итоги выполненного исследования**

1. Проанализированы исследования железобетонных конструкций и сооружений, в том числе железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки металлов, при кратковременных динамических нагрузках. Определена проблема недостаточной выносливости железобетонных матриц при многократных импульсных нагрузках и определены способы решения указанной проблемы.

2. Разработаны конструктивные решения железобетонной кольцевой матрицы, изготавливаемой с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой, компенсационным слоем. Получены патенты.

3. Разработаны методики расчёта прочности и деформативности железобетонной кольцевой матрицы для гидровзрывной штамповки, изготовленной с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой при импульсных нагрузках на основе метода предельных состояний и метода конечных интегральных преобразований. На алгоритм расчёта получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

4. Произведён численный анализ напряжённо-деформированного состояния железобетонных кольцевых матриц по предложенным методикам.

5. Разработана методика изготовления железобетонной кольцевой матрицы, с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой и компенсационным слоем. Методика изготовления и рекомендации по проектированию могут быть использованы для изготовления матриц, в том числе и крупногабаритных, для применения в практических целях.

6. Проведены экспериментальные исследования железобетонных кольцевых матриц. Опытные образцы матриц нагружались зарядами взрывчатых веществ с фиксацией деформаций с помощью измерительного комплекса «Zetlab». Характер трещинообразования в бетонном слое

соответствовал расчётной схеме, положенной в основу теоретического расчёта по методикам, разработанным автором.

7. Выполненные экспериментальные исследования подтвердили возможность эксплуатации разработанных конструктивных решений кольцевой железобетонной матрицы для гидровзрывной штамповки.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы**

При выполнении экспериментальных и теоретических исследований был принят ряд допущений. В связи с этим, а также опираясь на выводы, сделанные в ходе работы, можно определить следующие рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы:

1. Исследовать влияние на напряженно-деформированное состояние материала гидравлической камеры.
2. Выполнить матрицы для гидровзрывной штамповки с использованием напрягающих бетонов и гидравлической камерой, для создания начальных напряжений на этапе эксплуатации, и изучить их работу при импульсных нагружениях.

### **Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных изданиях**

*Публикации в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:*

1. Снегирева, А. И. Расчет усовершенствованной железобетонной матрицы при импульсном нагружении / А. И. Снегирёва, Д. А. Кретов // Градостроительство и архитектура. – 2017. – Т. 7. – № 4(29). – С. 20-24. – DOI 10.17673/Vestnik.2017.04.4. (ИФ РИНЦ – 0,104; 0,63/0,50).
2. К вопросу определения долговечности железобетонных матриц для взрывной штамповки методами тензометрии / Г. В. Мурашкин, А. И. Снегирёва, Д. А. Кретов, Ю. В. Жильцов // Градостроительство и архитектура. – 2018. – Т. 8. – № 4(33). – С. 4-9. – DOI 10.17673/Vestnik.2018.04.1. (ИФ РИНЦ – 0,104; 0,75/0,38).
3. Кретов, Д. А. Методика расчета кольцевых железобетонных матриц на импульсные нагрузки / Д. А. Кретов, В. Г. Мурашкин, А. И. Снегирева // Эксперт: теория и практика. – 2021. – № 1(10). – С. 14-18. – DOI 10.51608/26867818\_2021\_1\_14. (Двухлетний ИФ РИНЦ – 0,935; 0,58/0,23).

*В научных изданиях, индексируемых в международных базах данных:*

4. Murashkin, G. High-strength Reinforced Concrete Matrices, Hardening Under Pressure / G. Murashkin, A. Snegireva, D. Kretov // MATEC Web of Conferences, Rostov-on-Don, 17-21 September 2018. – Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2018. – P. 02009. – DOI 10.1051/mateconf/201819602009.

5. Kretov, D. Reinforced concrete matrices under impulse loads / D. Kretov // XXX Russian-Polish-Slovak Seminar Theoretical Foundation of Civil Engineering (RSP 2021) : Selected Papers, Moscow, 13-18 September 2021. – Moscow: Springer-Verlag GmbH, 2022. – P. 123-131. DOI: 10.1007/978-3-030-86001-1\_15.

*Патенты на изобретения и полезные модели, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:*

6. Патент на полезную модель № 168925 U1 Российская Федерация, МПК В21D 26/06. Взрывная камера : № 2016103420 : заявл. 02.02.2016 : опубл. 28.02.2017 / С. М. Анпилов, В. Г. Мурашкин, Г. В. Мурашкин [и др.].

7. Патент № 2619545 С1 Российская Федерация, МПК В21D 26/08. Взрывная камера : № 2015153950 : заявл. 15.12.2015 : опубл. 16.05.2017 / С. М. Анпилов, Г. В. Мурашкин, В. Г. Мурашкин [и др.].

8. Патент № 2743176 С1 Российская Федерация, МПК В21D 26/08. Взрывная камера для гидровзрывной штамповки и способ изготовления взрывной камеры для гидровзрывной штамповки : № 2020118465 : заявл. 26.05.2020 : опубл. 15.02.2021 / С. М. Анпилов, Д. А. Кретов, Г. В. Мурашкин [и др.].

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021662804 Российская Федерация. Программа расчёта прочности и деформативности железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки : № 2021660958 : заявл. 06.07.2021 : опубл. 05.08.2021 / Д. А. Кретов, В. Г. Мурашкин ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Кретофф».

Кретов Дмитрий Александрович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЁТА ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МАТРИЦ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЗАГРУЖЕНИИ

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 15.07.2022. Объем 1,4 п.л.  
Тираж 100 экз. Заказ № 295.  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
Отдел типографии и оперативной печати  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244