

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО»
(НИИМ НИЖЕГОРОДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА)

На правах рукописи



МОДИН ИВАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ
ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ
КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ И ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИЯХ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор
Кочетков Анатолий Васильевич

Нижний Новгород – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
ГЛАВА 1. Обзор литературы по деформированию пористых материалов	12
1.1. Особенности деформирования пористых материалов	12
1.2. Модели исследования пористых материалов.....	22
1.3. Выводы из обзора.....	36
ГЛАВА 2. Исследование деформационных свойств пористого гранулированного слоя.....	38
2.1. Методики исследования, применяемые в диссертационной работе	38
2.2. Экспериментальные исследования пористого гранулированного слоя при статическом сжатии	43
2.3. Экспериментальные исследования пористого гранулированного слоя при динамическом сжатии	46
2.4. Численное моделирование деформирования гранулированного слоя...	50
2.5. Выводы по главе 2	61
ГЛАВА 3. Исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при квазистатическом и динамическом сжатии и растяжении.....	63
3.1. Экспериментальные исследования при статическом сжатии и растяжении металлических сеток.....	66
3.1.1. Результаты испытаний пакетов сеток на сжатие по нормали к слоям ..	66

3.1.2. Результаты испытаний предварительно обжатых по нормали пакетов сеток на растяжение по направлению проволок.....	70
3.2. Экспериментальные исследования ортотропных пакетов сеток при динамическом сжатии и растяжении	76
3.2.1. Результаты испытаний пакетов сеток на сжатие по нормали к слоям ..	77
3.2.2. Результаты испытаний предварительно обжатых по нормали пакетов сеток на растяжение по направлению нитей	80
3.3. Численное моделирование статического деформирования плетеных металлических сеток	83
3.4. Численное моделирование внутреннего взрывного нагружения трехслойной цилиндрической оболочки с рулонированным пакетом плетеных сеток.....	97
3.4.1. Особенности численной реализации.....	101
3.4.2. Численные результаты.....	102
3.5. Выводы по главе 3	107
Заключение	110
Список литературы	113

Введение

Актуальность темы исследования

В настоящее время задачи, описывающие действие защитных преград, снижающих ударно-волновые нагрузки на ответственные элементы конструкции, являются востребованными и актуальными. Большое место среди защитных элементов занимают такие преграды как перфорированные элементы конструкций, слои гранулированных сред, решетки, пакеты плетеных сеток. При интенсивных воздействиях подобные пористые преграды могут испытывать деформации, в том числе необратимые. Как известно, пористые среды и конструкции обнаруживают высокую степень зависимости параметров деформирования от скорости деформации. Использование многослойных пористых преград в виде гранулированных слоев и пакетов плетеных сеток требует знания их деформационных и прочностных свойств, что предполагает экспериментальные исследования и привлечение сложных математических и численных моделей для исследования их деформирования и защитных функций. Актуальным является получение новых экспериментальных данных о свойствах гранулированных слоев и пакетов плетеных металлических сеток, направленных на решение этих задач, а также оснащение экспериментальными данными математических моделей.

Работа посвящена экспериментальным и численным исследованиям деформирования пористых преград, таких как гранулированные слои, состоящие из металлических шариков, и деформируемые пакеты плетеных металлических сеток.

Степень разработанности темы

До последнего времени экспериментальные исследования пористых деформируемых элементов в виде гранулированных сред и многослойных пакетов плетеных металлических сеток исследованы в недостаточной степени и в ограниченных диапазонах нагрузок, не вызывающих конечные

деформации элементов. Известно лишь небольшое количество работ в этой области, выполненных в последнее время. Реальные физические процессы, происходящие в подобных преградах, отличаются высокой степенью сложности и требуют тщательного изучения.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы являются экспериментальные и численные исследования динамических и квазистатических деформационных свойств многослойных защитных элементов конструкций из плетеных металлических сеток и пористых гранулированных слоев в виде шариков. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- исследование экспериментальными методами характеристик статического и динамического деформирования пористых элементов конструкций с целью выявления особенностей их поведения при квазистатическом и динамическом нагружении;
- исследование методами численного моделирования механизмов, определяющих особенности деформирования рассматриваемых пористых элементов конструкций;
- выявление закономерностей деформирования пакетов металлических сеток, как ортотропных элементов конструкций;
- изучение диаграмм деформирования на растяжение вдоль направления проволок в зависимости от предварительного обжатия пакетов по нормали.

Научная новизна

Экспериментально получены характеристики деформирования и разрушения двух видов пористых элементов конструкций: гранулированной среды в виде металлических шариков и многослойных пакетов плетеных металлических сеток в широком диапазоне статических и динамических нагрузок. Выявлены упругопластические свойства деформирования рассмотренных пористых элементов, ортотропные свойства деформирования

пакетов плетеных сеток. В квазистатическом режиме нагружения обнаружена зависимость характеристик растяжения вдоль проволок сетки от степени предварительного обжатия по нормали. Численным моделированием показаны механизмы увеличения растягивающей силы в зависимости от степени обжатия. Получены характеристики пористости пакета сеток в зависимости от степени обжатия.

Теоретическая значимость работы

Получены новые экспериментальные данные по статическому и динамическому упругопластическому деформированию пористых конструктивных элементов в виде ортотропного пакета плетеных металлических сеток и насыпного слоя в виде гранулированного слоя из свинцовых шариков в широком диапазоне изменения нагрузок. Показаны существенные отличия нелинейных динамических и статических диаграмм деформирования. Выявлена зависимость сил растяжения по направлению проволок от интенсивности предварительного обжатия пакета плетеных металлических сеток по нормали к слоям. Методами трехмерного численного моделирования выявлены механизмы увеличения сил растяжения при увеличении степени обжатия.

Практическая значимость работы

Полученные экспериментальные статические и динамические характеристики и зависимости деформирования и прочности многослойных пакетов плетеных металлических сеток и гранулированных металлических шариков могут быть использованы и используются для оснащения математических и численных моделей деформирования многослойных конструкций, содержащих пористые элементы в виде гранулированных слоев и пакетов плетеных сеток. Решена прикладная задача внутреннего взрывного нагружения цилиндрической трехслойной оболочки, одним из слоев которой является проницаемый высокопористый пакет металлических плетеных сеток. Внедрение результатов работы возможно на предприятиях Росатома,

Роскосмоса, авиастроения, судостроения, министерства обороны при проектировании защитных элементов.

Методология и методы диссертационного исследования

Методики экспериментального исследования свойств материалов при квазистатическом и динамическом нагружениях, разработанные в НИИМ ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Методика численного исследования процессов взрывного нагружения деформируемых проницаемых элементов конструкций UPSGOD 2D, интегрированный пакет прочностного анализа ANSYS.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты экспериментальных исследований характеристик статического и динамического деформирования пористых элементов в виде многослойных пакетов плетеных металлических сеток и насыпных слоев из металлических шариков в широком диапазоне нагрузок;
- результаты численных исследований трехмерного статического упругопластического деформирования пористого насыпного слоя из свинцовых шариков при различных упаковках частиц;
- результаты квазистатических экспериментальных исследований зависимостей сил растяжения по направлению проволок от степени предварительного обжатия ортотропных пакетов плетеных металлических сеток по нормали к слоям;
- результаты численных исследований трехмерных процессов статического деформирования ортотропных пакетов металлических плетеных сеток и выявленные механизмы увеличения силы растяжения по направлению проволок от степени предварительного обжатия по нормали к слою.

Достоверность экспериментальных исследований обеспечивается современным экспериментальным испытательным оборудованием для квазистатических и динамических исследований, методиками измерений и

обработки результатов. Достоверность численных исследований подтверждается многочисленными сравнениями с экспериментальными данными автора и других исследователей, использованием лицензионного программного обеспечения (лицензия ANSYS Academic Research, «Customer #623640»).

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на 7 международных, 6 всероссийских и 2 региональных конференциях:

II Международный научный семинар «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы» (МАИ, 2015);

V Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2015);

XIX, XX Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС) (Алушта, 2015, 2017);

XI Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (МАИ, 2016);

XXII, XXIII Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Вятчи, 2016, 2017);

XIII, XIV Всероссийская молодежная научная школа-конференция «Лобачевские чтения» (Казань, 2014, 2015);

Молодежная конференция «Фундаментальные научные основы современных комплексных методов исследований и испытаний материалов, а также элементов конструкций» (ВИАМ, Москва, 2015);

V Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» (ИПРИМ РАН, Москва, 2015);

XI Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Казань, 2015);

V Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные основы баллистического проектирования» (Санкт-Петербург, 2016);

XIX, XX Нижегородская сессия молодых ученых (Арзамас, 2014, 2015).

В целом работа докладывалась на научном семинаре по динамике и прочности НИИМ ННГУ им. Н.И. Лобачевского (Нижний Новгород, октябрь 2017).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 работ [48-64], в том числе 4 из них в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России [48-51].

Личный вклад автора

- Разработка оснастки для проведения квазистатических испытаний металлических плетеных сеток на растяжение и гранулированного слоя из свинцовых шариков на сжатие [48];

- Получение экспериментальных результатов при квазистатическом сжатии и растяжении металлических плетеных сеток при разных уровнях обжатия и количества слоев. Обработка экспериментальных результатов [48, 53];

- Получение экспериментальных результатов динамического сжатия и растяжения многослойных пакетов металлических плетеных сеток и сжатия гранулированного слоя свинцовых шариков [49, 50, 56-62, 64];

- Разработка трехмерных численных моделей и исследование квазистатического растяжения обжатых по нормали ортотропных плетеных

металлических сеток и сжатия гранулированных слоев с различной упаковкой частиц [51, 63, 64];

- Численное решение задачи взрывного нагружения трехслойной цилиндрической оболочки с пакетом плетеных сеток [52, 54, 55];

- Сравнительный анализ экспериментальных и численных результатов квазистатических и динамических исследований [51, 52, 54, 55, 63, 64].

В совместных работах Кочеткову А.В. принадлежит постановка задач, общее руководство исследованиями, участие в анализе и обсуждении результатов; Казакову Д.А., Жегалову Д.В., Горохову А.Н. помощь в проведении квазистатических испытаний и обработке экспериментальных данных; Брагову А.М., Константинову А.Ю. помощь в проведении динамических испытаний и обработке результатов; Леонтьеву Н.В., Савихину А.О. помощь в проведении вычислений в ВК ANSYS; Крылову С.В., Глазовой Е.Г., Турыгиной И.А. помощь в проведении численных расчетов в ВК UPSGOD 2D.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы; содержит 87 рисунков, 2 таблицы, библиографический список из 131 наименования – всего 128 страниц.

Диссертационная работа выполнена при поддержке

Грантов РНФ (№ 15-19-10032, № 17-79-20161), грантов РФФИ (№ 13-08-00219, №16-08-00458, № 15-48-02333 р_поволжье_a), госзадания Минобрнауки РФ 9.7057.2017/БЧ, результаты главы 1 получены при финансировании федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» соглашение № 14.578.21.0246 от 26.09.2017 (уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57817X0246).

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам НИИМ ННГУ Брагову А.М., Казакову Д.А., Константинову А.Ю., Баландину В.В., Горохову А.Н., Втюрину М.Ю. за консультации и помощь в получении экспериментальных данных по деформационным свойствам пакетов плетеных сеток и гранулированных слоев, Крылову С.В., Леонтьеву Н.В., Глазовой Е.Г. за консультации и помощь в проведении численных расчетов.

ГЛАВА 1. Обзор литературы по деформированию пористых материалов

Пористые многослойные преграды являются перспективным демпфирующим элементом, защищающим конструкции от ударных и взрывных воздействий. Примерами защитных преград являются гранулированные слои, перфорированные перегородки, проницаемые экраны в виде препятствий или каскадов препятствий, плетеные сетки, решетки и др. Такие преграды могут отбирать значительную долю энергии импульсных воздействий. Деформирование подобных преград сопровождается нелинейными свойствами и зависимостью процесса деформирования от режима нагружения: статического или динамического. Поэтому исследование деформирования и разрушения пористых материалов в широком диапазоне квазистатических и динамических нагрузок является актуальной задачей, представляющей научный и практический интерес. Исследование пористых преград различных структур основывается как на экспериментальных методах, так и на методах численного моделирования.

1.1. Особенности деформирования пористых материалов

Пористость можно охарактеризовать различными параметрами. В научной литературе наиболее распространены два параметра количественно описывающие пористость материала [1-3]: объемная концентрация пор $\alpha = V_n / V$; (V_n - объем пор, V – объем материала с порами) и коэффициент пористости $m = V_n / (V - V_n)$. Процесс деформирования пористых сред можно подразделить на несколько этапов. Например, деформирование насыпных пористых среды можно разделить на три этапа: переукладка до плотной упаковки без деформации частиц (ликвидация свободной пористости); деформирование до почти полной компоновки (отсутствие пор); деформирование как сплошного материала без пор. При взрывах взрывчатых

веществ (ВВ) длительность волновых процессов не превышает долей секунды, напротив, если нагрузка сохраняется длительное время: часы, сутки, годы, то процесс деформирования частиц продолжается. Однако нарастание объемной деформации на этой стадии процесса во много раз медленнее, чем в моменты времени, соответствующие волновым процессам.

Исследования деформирования и разрушения пористых материалов в диапазоне давлений, необходимых для их компактирования, проводят, как правило, с привлечением квазистатических и динамических (ударно-волновых) методов испытаний. Источником информации об особенностях поведения материалов, их прочностных и деформационных характеристиках при $\dot{\varepsilon} \leq 10^3 \text{с}^{-1}$ являются зависимости изменения величины деформации от приложенного напряжения или σ - ε диаграммы. Такие диаграммы определяют уравнение состояния материалов в области квазистатического нагружения, а интерес к их исследованию связан с возможностью определения энергии, поглощаемой при деформировании пористого материала. При скоростях деформации $\dot{\varepsilon} \geq 10^3 \text{с}^{-1}$ получение σ - ε диаграмм затруднено возможностями ударно-волновых методов. Источником информации об особенностях поведения материалов, их прочностных и деформационных характеристиках в таких экспериментах являются зависимости изменения давления, массовой скорости или скорости свободной поверхности исследуемого материала от времени, а также зависимость изменения скорости ударной волны (УВ) от величины массовой скорости за её фронтом. Полученную совокупность экспериментальных данных используют для построения адиабат ударного сжатия, которые определяют уравнение состояния материалов в области скоростей деформации $\dot{\varepsilon} \geq 10^3 \text{с}^{-1}$.

Для иллюстрации отличительных от сплошных сред особенностей поведения пористых материалов рассмотрим их деформирование в условиях квазистатических и ударно-волновых нагрузок.

На рис. 1.1, для примера, схематично показаны типичные σ - ϵ диаграммы сжатия сплошных и наиболее изученных представителей пористых материалов – пенопластов [4, 5].

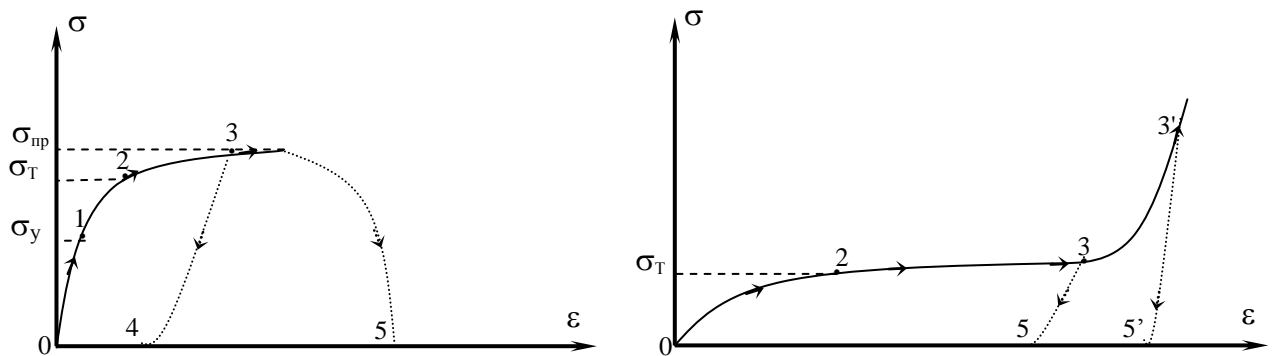


Рис. 1.1. σ - ϵ диаграмма сжатия сплошного (слева) и пористого (справа) материалов.

На участке 0-3 диаграмма деформирования пористого материала имеет вид, качественно совпадающий с диаграммой деформирования сплошного материала. Изгиб σ - ϵ диаграммы в точке 2 соответствует пределу текучести σ_T пористого материала. Отличительной особенностью деформирования пористого материала на участке 0-2 σ - ϵ диаграммы является меньшая величина предела текучести, характеризующего его прочностные характеристики. На участке 2-3 диаграммы при напряжениях, превышающих предел текучести σ_T , имеют место необратимые процессы компактирования пористого материала в результате затекания материала в поры. Участок 2-3, как и у сплошного материала, соответствует слабой зависимости напряжения от деформации, однако, протяженность участка пластического течения 2-3 в пористом материале, связанная с процессом его компактирования,

значительно больше, чем в сплошном материале, и увеличивается по мере роста величины начальной пористости. При дальнейшем росте деформаций на участке 3-3' на σ - ϵ диаграмме пористого материала наблюдается резкое возрастание напряжений, что связано с деформированием уже сплошного материала. Поскольку процесс компактирования пористых материалов необратим и сопровождается существенным изменением плотности материала и, как следствие, скорости распространения звуковых колебаний, то наклон разгрузочных ветвей 3-5 или 3'-5' всегда больше, чем на начальном участке 0-2 диаграммы и увеличивается по мере уменьшения пористости сжатого материала. Кривые, показанные на рис. 1.1, характерны как для статического, так и для динамического деформирования сплошных и пористых материалов. При динамических нагрузках на зависимость напряжение–деформация существенное влияние оказывает скорость деформации. Экспериментальные исследования показывают, что для металлов достижение пластического состояния при внезапном нагружении требует более высоких напряжений, чем при медленном нагружении. Для ряда практически важных материалов (например, высокоуглеродистых сталей) в условиях динамических нагрузок можно пользоваться соотношением $\sigma = \sigma(\epsilon)$, не зависящим явно от скорости деформации, но полученным при динамическом нагружении образца. Это соотношение существенным образом отличается от статического. На рис. 1.2 схематически представлены кривые деформирования материала: 1 - динамическая, 2 – статическая.

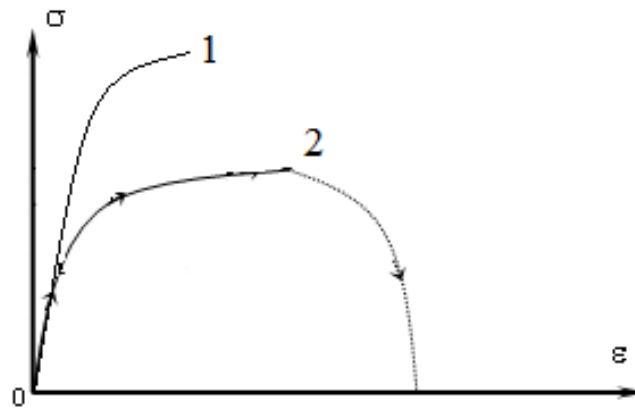


Рис. 1.2. Схематические кривые деформирования.

Поведение рассмотренных представителей пористых материалов — пенопластов при нагрузках ударно-волнового типа в диапазоне давлений, не сильно превышающих давление полной компоновки, имеет дополнительные особенности. Эти особенности схематично проиллюстрированы на рис. 1.3, где представлены ударные адиабаты в p - V плоскости и структура ударной волны (УВ) в p - t координатах.

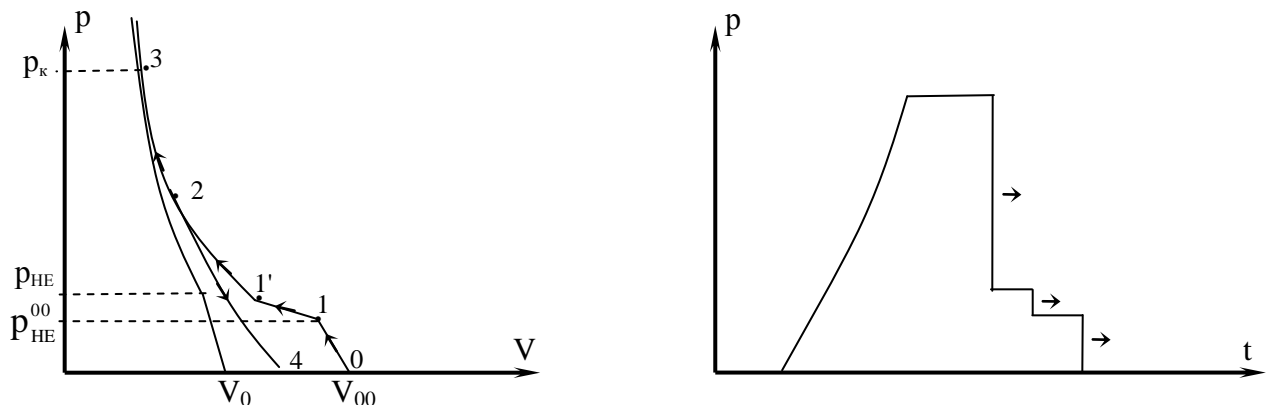


Рис. 1.3. Ударная адиабата (слева) и профиль УВ (справа) в пористом материале, имеющем связи между частицами.

Как показали результаты экспериментальных исследований [6] ниже давления компоновки (P_k) по пенопласту (материал, имеющий каркас) распространяется трехволновая конфигурация УВ, профиль которой

схематично представлен на рис. 1.3. Первая волна, как и у сплошных материалов, является упругой волной сжатия и несет давление, равное пределу упругости Гюгонио (p_{HE}^{00}) пористого материала. Скорость распространения упругой волны близка по величине к скорости продольных звуковых колебаний (c_l) в пористом материале. При разгрузке из этого состояния пористый материал возвращается в исходное состояние, что характерно для процесса упругого деформирования, в том числе, материалов с кристаллической плотностью. Вторая волна сжатия обусловлена ломкой каркаса, перекомпоновкой частиц и изменением их формы, уменьшением размеров пор в материале. Скорость её распространения близка по величине к скорости поперечных колебаний (c_n) в пористом материале. Третья волна в пористом материале является пластической волной. Ударная адиабата такого пористого материала должна иметь вид, показанный на рис. 1.3. Наклон разгрузочной ветви 2-4 в p - V плоскости будет определяться величиной скорости звука при достигнутой в УВ плотности материала и увеличивается по мере роста сжатия до состояния близкого к полной компоновке. Трехволновую конфигурацию УВ, характерную для пенопластов, регистрировали также в образцах из спеченных порошков меди [7] и вольфрама [8].

Поведение пористых материалов, не имеющих жестко связанный каркас, проиллюстрировано на рис. 1.4, где в p - V плоскости представлена ударная адиабата, а в p - t координатах - структура УВ. Следует отметить, что на рис. 1.3 поведение является общепринятым для любых типов пористых материалов независимо от наличия или отсутствия связей между частицами.

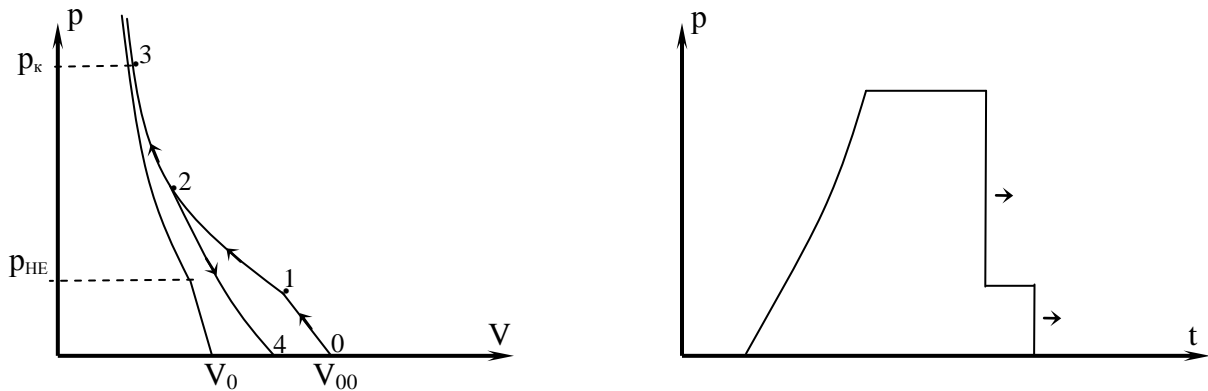


Рис. 1.4. Ударная адиабата (слева) и профиль УВ (справа) в пористом материале, не имеющем связи между частицами.

Если в пористом материале частицы не связаны между собой каркасом, то ниже давления p_k по пористому материалу будет распространяться двухволновая конфигурация УВ, в которой отсутствует упругая волна сжатия. Такую структуру УВ регистрировали, например, в образцах из пористой меди [9], изготовленных путем прессования порошка без его спекания, а также в образцах из прессованного порошка алюминия, вольфрама и железа [10-14].

Таким образом, имеющиеся экспериментальные данные указывают на принципиальные отличия в поведении пористых материалов при нагрузках ударно-волнового типа в зависимости от наличия или отсутствия связей между частицами материала. Несмотря на имеющиеся экспериментальные результаты, полученные при ударно-волновом деформировании некоторых представителей пористых материалов с жестко связанным каркасом и без него, моделирование процессов компактирования пористых сред проводят без учета указанных особенностей. Такой характер поведения пористых сред требует подтверждения для более широкого круга материалов.

Изменение количественных характеристик кривых квазистатического и ударно-волнового сжатия и разгрузки, определяемых такими факторами как размер частиц, прочность и пластичность их материала изучены

недостаточно полно. Из анализа имеющихся экспериментальных данных следует, что наиболее исследованным фактором, оказывающим заметное влияние на деформирование и разрушение материалов, является пористость. Влияние пористости изучено на примере пенопластов [6, 15, 16], порошков алюминия [11, 17], железа [18-20], вольфрама [8, 12, 17, 36], молибдена [21, 22], меди [7, 9] и никеля [22]. Величина коэффициента пористости исследованных в этих работах образцов изменяли в диапазоне от 1,3 до 2,5. При этом исследовали влияние пористости на характеристики ударного сжатия и некоторые механические свойства материалов. В [7-12, 18, 19, 22, 23] исследовали влияние пористости на давление полной компоновки. В [20, 21] исследовали влияние величины пористости на упругие характеристики: изменение продольной и поперечной скоростей звука, коэффициента Пуассона, модулей Юнга, сдвига и объёмного сжатия. Из анализа результатов перечисленных работ можно сказать, что для каждой из изучаемых характеристик наблюдается общая закономерность, которая заключается в монотонном снижении её величины с ростом начальной пористости материала. Имеющиеся в литературе данные о влиянии размеров частиц на деформирование и разрушение пористых сред недостаточны для детального анализа этого вопроса. Отметим, что при проведении таких исследований, наряду с изменением размеров частиц, существенно отличалась пористость образцов [7-12, 18, 19, 20-23]. Из имеющейся совокупности экспериментальных исследований можно выделить единичные работы [14, 24], результаты которых позволяют говорить о некоторых закономерностях поведения пористой среды, связанных с изменением размеров частиц в диапазоне до 0,4 мм. Так, например, увеличение размеров частиц пористого материала приводит к росту скорости распространяющихся в нем УВ [24] и уменьшению прочности материалов, имеющих жестко связанный каркас [14]. Поскольку исследования роли размеров частиц при деформировании пористых сред в этих работах проведены при характерном

размере частиц, составляющем десятки и сотни микрон, возникает вопрос о справедливости выявленных закономерностей для пористых материалов с характерным размером частиц до нескольких миллиметров, которые представляют практический интерес. В работе Огородникова В.А., Жерноклетова М.В., Ерунова С.В. и др. [25] исследован процесс динамического деформирования ударно нагруженных цилиндрических «пористых» образцов свинца, вольфрама и сплава ВНЖ-95, состоящих из частиц размерами 0.1 - 2.5 мм. Интенсивность ударных волн была несколько ниже значений, соответствующих полному компактированию материала. Изучена степень влияния размеров частиц, прочности и пластичности их материала на рассматриваемые процессы. В монографиях Ляхова Г.М. [2, 26] подробно описываются модели динамического деформирования грунтов, как пористых сред и решаются многочисленные задачи распространения волн в грунтах и природных пористых многокомпонентных средах. Рассмотрено взаимодействие волн с преградами. Проведено сопоставление решений, выполненных с учетом и без учета объемной вязкости. Определены основные закономерности волновых процессов в средах с объемной вязкостью. Приводятся результаты экспериментальных исследований взрывных волн и их взаимодействий с преградами. Одновременное измерение напряжений и деформаций позволило установить закономерности деформирования грунтов при взрывах. Подтверждена существенная зависимость волновых процессов от объемной вязкости среды. Подробно рассмотрены модели грунтов и твердых многокомпонентных сред, такие как модель упругой среды, модель линейной вязкоупругой среды, модель линейной вязкопластической среды, модель нелинейной вязкопластической среды. В монографии Фомина В.М. и др. [27] изложены основные аспекты, позволяющие изучать физические процессы возникающие при высокоскоростном взаимодействии тел. В монографии [28] по вопросам высокоскоростных ударных воздействий на твердые тела и конструкции изложены данные теоретических исследований и

результаты уникальных экспериментальных работ по ударному разрушению твердых тел и нахождению их уравнения состояния по известным параметрам ударных волн. Рассмотрены вопросы инженерного приложения высокоскоростного удара с учетом механических и металловедческих характеристик. Ряд работ по исследованию динамических свойств пористых материалов при различных скоростях деформации опубликованы Браговым А.М., Ломуновым А.К. и др. [29-34]. Интересует ученых и вопрос деформирования насыпных пористых слоев. Среди зарубежных работ следует отметить исследования Glam B., Sadd M. H., Shukla A., Britan A., Bender G., Elperin T., Igra O., Levy A. [35-45], посвященных экспериментальным исследованиям гранулированных преград. В этих работах экспериментально не изучался вопрос о влиянии прочности и пластичности материала частиц на процесс компактирования пористого материала. В последнее время интенсивному исследованию подвергаются пористые материалы с регулярно уложенной структурой, одним из видов таких защитных преград являются многослойные преграды, выполненные на основе металлических решеток и плетеных сеток [46]. В монографии Герасимова А.В. и др. [47] представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований нестационарных процессов деформирования в однородных и неоднородных твердых телах, в том числе пористых, анализа напряженно-деформированного состояния, разрушения и фрагментации конструкций и материалов при высокоскоростном соударении.

Однако, как показывает анализ существующего положения в области деформации конструкционных материалов большинство работ посвящено либо только экспериментальным, либо только теоретическим исследованиям, в то время как для решения проблем деформирования материалов и конструкций необходим комплексный экспериментально-теоретический подход, сочетающий экспериментальные исследования, математическое моделирование и численный эксперимент. Поэтому систематическая

разработка методов и схем, позволяющих реализовать подобный подход, является на сегодняшний день востребованной, актуальной и обоснованной.

В последние годы выполнен цикл работ, посвященных исследованию деформируемых проницаемых пакетов металлических плетеных сеток с участием автора диссертации [48-64]. Была выявлена зависимость, что при квазистатическом растяжении пакета сеток в направлении проволок, существенное влияние оказывает их предварительное обжатие по нормали к слоям сетки.

Исходя из проведенного анализа, можно говорить о более сложном, чем у сплошных, поведении пористых материалов при статических и динамических нагрузках. К особенностям поведения пористых материалов следует отнести отличия, наблюдаемые при деформировании материалов с каркасом, образованным за счет связей между частицами, и без него. Количественные характеристики кривых, характеризующих сжатие пористых материалов, должны определяться совокупностью факторов, к которым относятся: величина пористости, размер частиц, прочность и пластичность их материала. Влияние перечисленных факторов на особенности деформирования пористых материалов изучено недостаточно полно. Поэтому в данной работе особое внимание будет уделено выяснению влияния на качественное поведение и количественные характеристики процессов деформирования и разрушения пористых материалов таких факторов как величина пористости, наличие и отсутствие связей между частицами, прочность и пластичность их материала. Пористые материалы и методы исследования особенностей их деформирования и разрушения будут приведены ниже.

1.2. Модели исследования пористых материалов

При исследовании проблем компактирования пористых материалов в научной литературе можно выделить два основных подхода к

моделированию деформирования пористых материалов. Первый подход относится к моделированию процессов деформирования при высокой амплитуде давления, на порядок и более превышающей давление компоновки пористых материалов [65]. Поведение пористых тел при очень высоких давлениях описано впервые Альтшулером Л.В., Зельдовичем Я.Б. и др. [65,66]. В основу модели [65] положена гипотеза о том, что при динамическом сжатии с высокой амплитудой ударной волны (УВ) пористый материал сразу сжимается до сплошного состояния и его сопротивлением деформированию можно пренебречь. Графическая интерпретация модели [65] представлена на рис. 1.5.

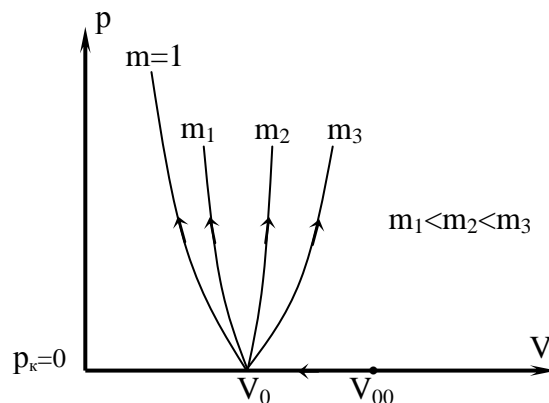


Рис. 1.5. Графическая интерпретация модели [65].

Изменения удельного объема (V), давления (P) и удельной внутренней энергии (E) при переходе через фронт УВ будут связаны со скоростью её распространения (D) и массовой скоростью частиц (U) уравнениями сохранения массы, импульса и энергии соотношениями [1]:

$$V - V_{00} = -V_{00} \frac{U - U_{00}}{D - U_{00}}$$

$$P - P_{00} = \frac{1}{V_{00}} (D - U_{00})(U - U_{00}) \quad (1.1)$$

$$E - E_{00} = -\frac{1}{2}(P + P_{00})(V - V_{00})$$

Законы сохранения (1.1) замыкаются соотношением, учитывающим связь давления с начальным объемом (V_{00}) материала:

$$P = \frac{(h-1)P_x(V) - \frac{2E_x(V)}{V}}{h - \frac{V_{00}}{V}}, \quad h = \frac{2}{\Gamma} + 1 \quad (1.2)$$

где P_x , E_x - холодные компоненты давления и внутренней энергии, Γ - коэффициент Грюнайзена.

Выражение (1.2) позволяет описать семейство ударных адиабат пористых материалов с различным начальным объемом V_{00} (пористостью). При небольшой величине пористости m_1 ударные адиабаты имеют «нормальный» ход, при котором увеличение давления сопровождается уменьшением конечного объема (увеличением плотности) пористого материала. Начиная с некоторой величины пористости m_i ($m_3 > m_2 > m_1$) ход кривых становится «аномальным», что заключается в увеличении конечного объема при возрастании давления. Чем выше начальная пористость материала, тем дальше отстоят ударные адиабаты пористого материала от соответствующей кривой сплошного материала. Такая закономерность поведения пористых материалов выше давления компоновки подтверждена экспериментально [67-72] и связана с разогревом находящегося в порах воздуха (газа).

Второй подход к описанию процесса компактирования пористых материалов ориентирован на моделирование деталей процесса уплотнения. Простейшая механическая теория уплотнения, включающая представление об идеально затвердевающем материале, была предложена Prager W. [73]. Необходимость в развитии такого подхода была связана с появлением

экспериментальных исследований, свидетельствующих о существенном вкладе прочностных характеристик пористых материалов на их сжатие при давлениях соизмеримых с давлением компактирования. Первая модель такого типа была предложена Salvadori M.G., Skalak R., Weidlinger P. [74] и затем развивалась с учетом накопленных экспериментальных данных, меняющих существующие представления об особенностях поведения пористых материалов.

Согласно [74] процесс компактирования пористых материалов происходит при некоторой величине давлений, отличной от нуля, которая соответствует пределу Гюгонио пористого материала. Выше этого предела сжатие пористого материала до сплошного состояния происходит мгновенно без дальнейшего роста напряжений, а после компактирования он ведет себя как жесткое несжимаемое тело. Графическая интерпретация этого подхода приведена на рис. 1.6 [74].

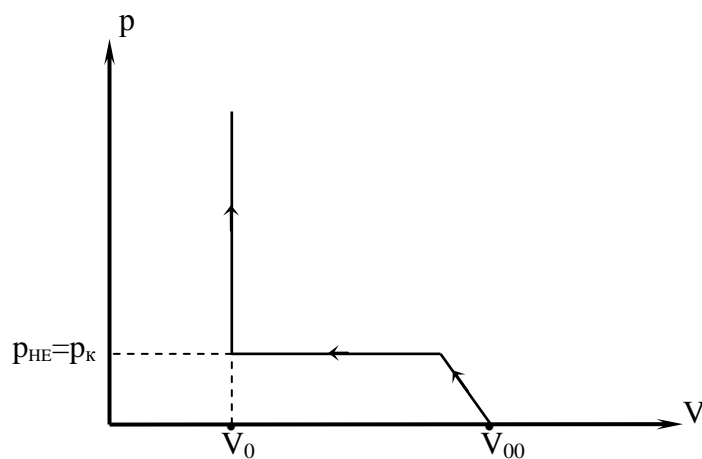


Рис. 1.6. Графическая интерпретация модели [74], описывающей ударное сжатие пористых материалов.

Согласно [74] сжатие пористого материала сопровождается распространением системы упругой и пластической ударной волн. Упругая волна распространяется со скоростью звука в пористом материале, а

следующая за ней волна ударного уплотнения распространяется с дозвуковой скоростью. С ростом амплитуды давления скорость УВ будет возрастать и опережать фронт упругой волны. Законы сохранения массы, импульса и энергии в модели [74] использованы в виде уравнений (1.1). Скорости распространения УВ определяются из соотношений:

$$(D - U_{00})^2 = -V_0^2 \frac{P - P_{00}}{V - V_{00}} \quad (1.3)$$

$$(U - U_{00})^2 = -(P - P_{00})(V - V_{00})$$

Выражения (1.3) дополнены соотношением, определяющим затухание давления в пористом материале в зависимости от расстояния X , пройденного УВ при сообщенном материалу начальном импульсе (I):

$$P = \left(\frac{I^2 V_{00}^2}{V_{00} - V} \right) \frac{1}{X^2} \quad (1.4)$$

Сделанное в [8] допущение о том, что уплотненный при компактировании пористый материал является несжимаемым по сравнению с исходным состоянием, позволяет с достаточной точностью оценить затухание давления при ударном сжатии. Однако оно является неоправданным и при моделировании сложных ударно-волновых процессов, сопровождающихся столкновением УВ и волны разгрузки (ВР), отражением УВ и ВР от границы раздела двух сред с различной акустической жесткостью. Использование такого свойства среды как несжимаемость приводит к появлению существенных ошибок. Fowles G.R., Curran D.R. [75], анализируя результаты [74], показали недостоверность сделанных в работе предпосылок. Подход к моделированию был модифицирован, и Rempel J.R., Schmidt D.N. [76, 77] стали учитывать сжимаемость скомпактированного пористого материала по адиабате соответствующего ему сплошного материала.

Графическая интерпретация этой модели деформирования пористых материалов приведена на рис. 1.7.

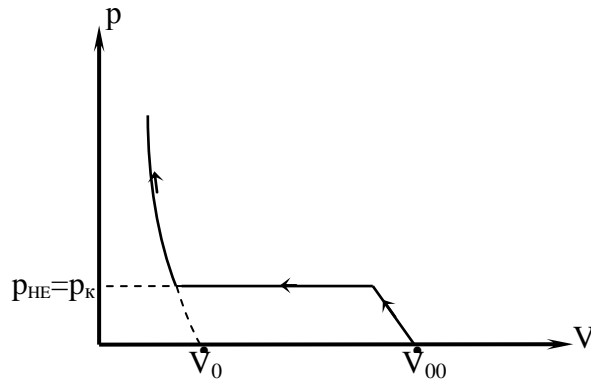


Рис. 1.7. Графическая интерпретация модели [76, 77], описывающей ударное сжатие пористых материалов.

Однако и такой подход к моделированию поведения пористых материалов не являлся универсальным и не мог быть использован для описания процессов компактирования широкого спектра существующих пористых сред. Например, для описания процессов компактирования пористых металлов [18, 19] необходимо было учитывать рост напряжений при закрытии пор. Такой рост напряжений приводил к увеличению давления компоновки, которое заметно превышало амплитуду упругого предела Гюгонио пористого материала. Модель снова была модифицирована Linde R.K., Schmidt D.N. [78] с учетом новых экспериментальных данных, свидетельствующих о необходимости учета эффекта упрочнения пористых материалов в процессе смыкания пор. Графическая интерпретация этого подхода приведена на рис. 1.8.

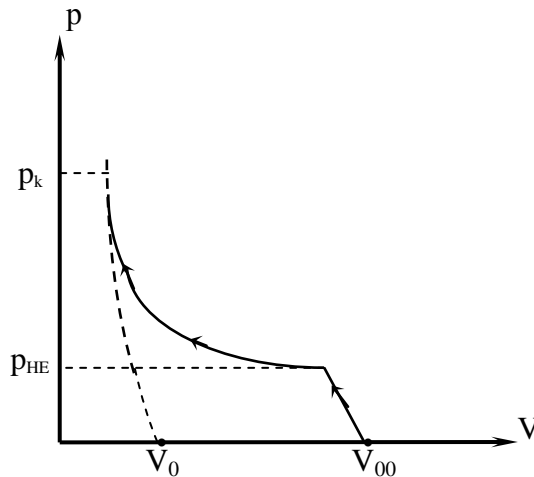


Рис. 1.8. Графическая интерпретация модели [78], описывающей ударное сжатие пористых материалов.

Используемые в современных моделях представления о деформировании и разрушении пористых сред при динамических нагрузках были изложены в 60-е годы XX века и принципиально не изменились к настоящему времени. Согласно существующим представлениям, широко используемым при математическом моделировании поведения пористых материалов, их деформирование при малых нагрузках является упругим, как и для любого типа твердых тел. Пористые среды имеют меньший предел упругости, чем соответствующие сплошные материалы. При напряжениях сжатия выше предела упругости происходит необратимое уплотнение материала. Компактирование пористого материала достигается при напряжениях, превышающих значение его предела упругости. Сжатие изначально пористого материала выше этого состояния при небольших величинах пористости совпадает со сжатием соответствующего сплошного материала. При дальнейшем увеличении величины начальной пористости конечное состояние материала сжатого УВ отличается от состояния, достигнутого при сжатии соответствующего сплошного материала из-за разогрева находящегося в порах воздуха.

Многообразие существующих пористых материалов и различные условия их эксплуатации стимулируют попытки построения универсальных широкодиапазонных моделей их поведения. Современные модели, ориентированные на описание особенностей поведения пористых сред, основаны на использовании в определяющих соотношениях свойств сплошной компоненты, а также использовании уравнений, описывающих механизмы схлопывания пор при компактировании и не учитывают гетерогенность структуры материала, обусловленную фактической формой и размерами частиц. Такие модели содержат несколько свободных параметров, которые подбираются эмпирически для согласования с результатами экспериментов.

Наибольшее распространение для описания поведения пористых сред в настоящее время получила так называемая P - α модель, сформулированная Herrmann W. [1], а также её модификации. Согласно [1] пористая среда описывается шаровым тензором напряжений. Коэффициент пористости является функцией только давления и не зависит от температуры. Общий объем пористой среды изменяется под действием приложенного напряжения в результате схлопывания пор и изменения объема матрицы. При этом изменение пористости с ростом давления описывается соотношением:

$$m = 1 + (m_Y - 1) \left(\frac{P_k - P}{P_k - Y_p} \right)^2 \quad (1.5)$$

где m_Y – значение коэффициента пористости на пределе упругости, P_k – давление полного компактирования, Y_p – предел текучести пористого материала. Для пористого материала используется тот же самый вид термодинамического уравнения состояния, что и для сплошного материала:

$$P = f(V_s/m, E) \quad (1.6)$$

Считается, что поры не дают вклада во внутреннюю энергию, то есть энергия пористого материала равна энергии его матрицы $E=E_s$.

По результатам экспериментов Fowles G.R., Curran D.R. [79], Rempel J.R. и др. [80-82] показано, что для многих полимерных пористых материалов уплотнение завершается при напряжениях, лишь незначительно превышающих предел упругих напряжений. Напротив, для пористых металлов [83-89] указывают на существенное «упрочнение» при уплотнении. В работе [84] для пористого железа было обнаружено, что с увеличением начальной пористости уменьшаются начальный модуль упругости, предел упругих напряжений и напряжение, отвечающее полному компактированию.

Seaman L., Linde R.K. [90] нашли, что кривые уплотнения, полученные на основании волновых измерений, грубо соответствуют кривым, определенным из статических испытаний на сжатие, хотя неточности статических данных были очень значительна. Schmidt D.N., Linde R.K. [86] накопили много данных, свидетельствующих о том, что при динамической разгрузке происходит лишь незначительное (если оно существует вообще) повторное раскрытие пор. Образцы, разгруженные после динамического уплотнения, имели плотность, близкую к той, которая была достигнута при прохождении волны уплотнения. Кроме того, методом сопоставления импедансов они получили точки на динамических кривых разгрузки из не полностью уплотненного состояния, которые показали, что кривые разгрузки почти параллельны соответствующим кривым для сплошного материала. Однако Voade R.R. [91, 92], искусно используя метод волновой реверберации, получил начальные наклоны кривых разгрузки для пористой меди; он заключил, что начальная разгрузка происходит параллельно кривой уплотнения, что означает восстановление объема пор. Это наблюдение не подтверждается данными других авторов. Возможно, однако, что существует

некоторое упругое восстановление пустот при разгрузке из частично уплотненных состояний.

Важное значение при моделировании поведения конструкций из пористых материалов играют численные методы. В работах Капустина С.А., Коротких Ю.Г. и др. [93-96] предложены сложные модели поведения материалов, алгоритмы реализации предложенных моделей и методики численного решения задач расчета конструкций на основе МКЭ с учетом больших деформаций и учетом повреждения материала. Численные исследования упругопластического деформирования гранулированного слоя состоящего из полых металлических сфер (MHS-заполнитель) при интенсивном ударном нагружении выполнены Ruan H.H., Gao Z.Y., Yu T.X., Баженовым В.Г., Кибецом А.И., и др. [97-99]. В работе Герасимова А.В., Кректулева Р.А. [100] предложена физическая и математическая модель, позволяющая конструировать функционально градиентные материалы, в том числе и пористые, исследовать их деформирование и разрушение при интенсивных импульсных нагрузках. Проведены тестовые расчеты по оценке достоверности изложенной модели. В работе Мержиевского Л.А. [101] и ряда других авторов [102-104] приведены результаты расчетов диаграмм динамического деформирования ряда металлов и сплавов. В [101] для расчетов использована модель вязкоупругого тела максвелловского типа, в рамках которой удастся совместить описание процессов необратимого деформирования на микроуровне, мезоуровне и макроуровне.

Абакумов А. И., Заикин С. Н., Мельцас В. Ю. и др. [46] разработали модель деформирования пакета плетеных сеток при динамическом нагружении с учетом упругопластических свойств сетки как пористой среды на одноосное сжатие. Эта модель представляет собой двухкомпонентную двухскоростную среду на основе взаимопроникающих континуумов. Параметры уравнения состояния пакета сетки были взяты из экспериментов

по статическому обжатию пакетов сеток с учетом разгрузок. Расчеты проводились по двум пакетам программ: один для решения газодинамической задачи по схеме С.К. Годунова, второй – для расчета деформаций в лагранжевых переменных по схеме типа Уилкинса [105]. Модель учитывает силовое взаимодействие сетки как пористой упругопластической среды с газом, а также теплообмен между сеткой и горячими продуктами взрыва. Показано хорошее соответствие численных и результатов специально поставленных экспериментов по обжатию пакетов сеток взрывом заряда. В работе Мельцаса В.Ю., Портнягиной Г.Ф., Соловьева В.П. [106] приведены расчеты взаимодействия ударной волны с многослойной преградой из жестких сеток в упрощенной одномерной плоской постановке. Пакет преград предполагался неподвижным. Сетка обладала постоянными свойствами, такими как «живое» сечение в двух направлениях и удельный объем. При расчетах учитывалось сопротивление сетки при обтекании проволочек, объемное содержание и теплообмен. Оценивались проходящие и отраженные волны; решение сравнивалось с решением без пакета сеток. Также приведены результаты двумерных расчетов взрыва шарового заряда в недеформируемом цилиндрическом сосуде с внутренним цилиндрическим пакетом жестких сеток. Расчеты проводились на основе метода Годунова С.К. [107].

Позднее в [108] было предложено новое уравнение, описывающее изменение пористости с ростом давления. Это уравнение позволяет обеспечить лучшее описание экспериментальных данных и имеет вид:

$$m = 1 + (m_y - 1)e^{-a(P-b)} \quad (1.7)$$

где a и b – подгоночные параметры.

В [109] была предложена измененная форма уравнения состояния:

$$P = m^{-1}f(V_s/m, E) \quad (1.8)$$

Уравнение состояния в форме (1.8) учитывает уменьшение эффективной площади поперечного сечения, через которую передается нагрузка в пористом теле.

В [110] в модель была введена кинетика схлопывания пор, учитывающая релаксацию напряжений в процессе компактирования. Уравнение кинетики имеет вид:

$$\dot{m} = M(m) \left[\dot{P} + \frac{P - P_0(m)}{\tau} \right] \quad (1.9)$$

где $M(m)$ – функция, описывающая обратимое изменение объема пор в упругой области, $P_0(m)$ – функция, описывающая равновесное давление при текущей величине пористости, τ – время релаксации напряжений, точка над символом означает производную по времени. Пористость при этом выражается через величины a_0 и b_0 , которые соответствуют среднему размеру имеющихся пор (a_0) и размеру некоторой области (b_0), содержащей несколько таких пор:

$$\left(\frac{a_0}{b_0} \right)^3 = \frac{m}{m-1} \quad (1.10)$$

Для учета времени релаксации напряжений используют выражение:

$$\tau = \left[\rho m^2 (3Ym - 1)^{2/3} \right]^{1/2} \quad (1.11)$$

где ρ – плотность материала матрицы, Y – предел текучести материала матрицы.

Дальнейшая модификация моделей в [111] позволила описывать вклад вязкости η в динамику схлопывания пор:

$$m = \frac{\eta}{a_0 \sqrt{Y\rho}} \quad (1.12)$$

Несмотря на достаточно широкое использование Р- α модели и её модификаций при описании поведения пористых материалов, учитывающих те или иные особенности их компактирования, нельзя говорить о законченности и универсальности используемых определяющих уравнений. Существующие модели, согласно [112], имеют два недостатка.

Первым является использование для описания поведения пористой среды только шаровой составляющей тензора напряжений. Это приводит к тому, что путем гидродинамического описания поведения среды предпринимаются попытки передать особенности проявления прочностных свойств и релаксационных процессов при компактировании, происходящих в пористом материале на макроуровне и микроуровне. Аргументом для использования гидродинамического описания принято считать тот факт, что распределение сил, действующих на контактных границах частиц в элементе объема близко к изотропному. При этом для рассмотрения специально выбирается достаточно большой объем пористого материала, в котором содержится достаточное для выполнения этого условия количество частиц и пор. Вторым недостатком моделей поведения пористых сред является пренебрежение при построении уравнения состояния зависимости, связывающей внутреннюю энергию с величиной пористости [112]. Принято считать, что поры не дают вклада во внутреннюю энергию среды, которая определяется только энергией самой матрицы пористого материала. Этот недостаток приводит к невыполнению второго начала термодинамики. Попытки устранения этого недостатка были предприняты в [112] за счет термодинамического согласования выражения для внутренней энергии путем использования дополнительного слагаемого, учитывающего энергию пор:

$$E = E_s + \int W_s dP, \quad W_s = E_s + PV_s \quad (1.13)$$

где W_s - энтальпия. Однако и эта модель поведения пористых материалов, по мнению самих авторов, не является законченной и требует дальнейшего развития.

К перечисленным недостаткам существующих моделей поведения пористых материалов следует также отнести постулирование процесса упругого деформирования для всех типов пористых материалов, в том числе имеющих насыпную плотность. Упругое деформирование пористых сред может быть характерно только для материалов, имеющих жесткую матрицу, в которой частицы связаны между собой. При отсутствии связей между частицами тезис о наличии упругого деформирования пористых материалов является недостаточно обоснованным.

Таким образом, имеющиеся модели описания поведения пористых сред не лишены ряда недостатков, которые свидетельствуют о необходимости их дальнейшего уточнения и совершенствования. Большое количество пористых материалов мало исследованы экспериментально. Часть моделей требуют оснащение экспериментальными данными. Моделирование поведения пористых материалов при достаточно высоких давлениях, на порядок и более превышающих давление полной компоновки, не представляет особых трудностей. При давлениях соизмеримых с давлением компоновки моделирование поведения пористых сред представляет значительную сложность. Задача о построении модели поведения пористых материалов, учитывающей всю совокупность существующих особенностей деформирования и разрушения материалов с учетом кинетики схлопывания пор, влияния на процесс компактирования прочности и пластичности материала частиц, их формы и размеров, влияния релаксационных процессов остается пока нерешенной. Влияние на ударно-волновое компактирование

такой особенности структуры пористого материала, как наличие или отсутствие связей между частицами вообще не учитывается при построении моделей их деформирования, хотя экспериментальные исследования указывают о её влиянии на поведение пористых материалов. Имеющиеся трудности в создании физически обоснованных моделей поведения пористых материалов могут быть связаны с отсутствием детальных экспериментальных исследований. Существующий пробел указывает на актуальность дальнейшей работы по выявлению роли определяющих факторов на особенности процесса сильного сжатия пористых материалов.

1.3. Выводы из обзора

1. Экспериментальное и теоретическое моделирование процессов деформирования пористых материалов проводят с использованием двух основных подходов. Первый подход относится к описанию процесса компактирования пористых сред сильными УВ, в которых достигается давление, амплитуда которого на порядок и более превосходит давление компоновки пористого материала. В этом случае пренебрегают деталями процесса уплотнения. Второй подход к описанию процесса деформирования пористых материалов ориентирован на моделирование деталей процесса уплотнения при сильном сжатии. При этом описывают свойства сплошной компоненты и механизм уменьшения размеров и схлопывания пор.
2. Задача о построении моделей поведения пористых материалов, учитывающих совокупность существующих особенностей деформирования и разрушения материалов с учетом кинетики схлопывания пор, влияния на процесс деформирования пористого материала, прочности и пластичности материала частиц, их формы и размеров, влияния релаксационных процессов остается пока до конца

нерешенной, в том числе, из-за ограниченности имеющихся экспериментальных данных.

3. Одними из перспективных пористых преград являются искусственные проницаемые преграды типа плетеных сеток и гранулированных слоев. Чаще всего эти преграды рассматриваются как недеформируемые, либо слабдеформируемые (упругие, вязкоупругие) при воздействии невысоких нагрузок. Существуют лишь единичные работы, описывающие поведение таких преград при высокоинтенсивном нагружении, что делает актуальным дальнейшие исследования в этой области.

ГЛАВА 2. Исследование деформационных свойств пористого гранулированного слоя

Ниже приводятся описания экспериментальных методик, используемых для исследования деформационных свойств гранулированных слоев при статическом и динамическом режимах нагружения. Численными методами исследуются особенности деформаций гранулированных слоев, состоящих из свинцовых шариков при различных упаковках.

2.1. Методики исследования, применяемые в диссертационной работе

Методы статических испытаний на сжатие и растяжение черных и цветных металлов и изделий из них для определения характеристик механических свойств при температуре 20 ± 15 °С устанавливает стандарт. Испытания пористых материалов и определение их характеристик проведено в соответствии с ГОСТ 1497-84. Испытания металлической проволоки из которой изготовлена сетка проведено по ГОСТ 10446-80. Статические исследования пористых материалов проведены в лаборатории физико-механических испытаний ННГУ им. Н.И. Лобачевского, на оборудовании фирмы Zwick. Одна из испытательных машин (Zwick/Roell Amsler HA 100) показана на рис. 2.1, ее технические параметры следующие:

- максимальное усилие испытания на растяжение/сжатие – 100 кН;
- высота, включая шланги, макс. – 3252 мм;
- ширина, верхняя траверса – 1040 мм;
- ширина, цоколь – 1030 мм;
- глубина – 750 мм;
- ширина рабочей зоны – 565 мм;
- высота рабочей зоны, без оснащения, макс. – 1870 мм;
- количество колонн – 2;
- жесткость рамы при расстоянии до траверсы 1000 мм – 850 кН/мм;

- вес, с типовым оснащением – 1420 кг;
- покрытие – RAL 7011 и RAL 7038;
- скорость перестановки верхней траверсы – 600 мм/мин;
- частота учета измеряемых значений, в системе – 500 Гц;
- тип защиты корпуса – IP 32;
- измерительная электроника и система силоизмерения соответствует ISO 7500/1.



Рис. 2.1. Испытательная машина Zwick/Roell.

Разрывные (универсальные) испытательные машины и измерительное оборудование соответствуют требованиям ГОСТа, все оборудование является поверенным в надзорных органах.

Динамические испытания на сжатие проведены на экспериментальной установке с разрезным стержнем Гопкинсона [113-116] рис.2.2. Испытания проводились следующим образом. Образец 3, помещался между двумя мерными стержнями 1 (опорный) и 4 (нагружающий). Один из стержней нагружался ударом короткого стержня-ударника 5, движущегося со скоростью V_0 . При этом в стержне 4 формировался прямоугольный импульс сжатия, который нагружал образец. В процессе эксперимента с помощью тензодатчиков 2 регистрировались деформации в сечениях нагружающего и опорного мерного стержней. Данная информация позволяет с помощью формул Кольского [113] рассчитать временную историю изменения длины образца, а также действующую на него при этом силу.

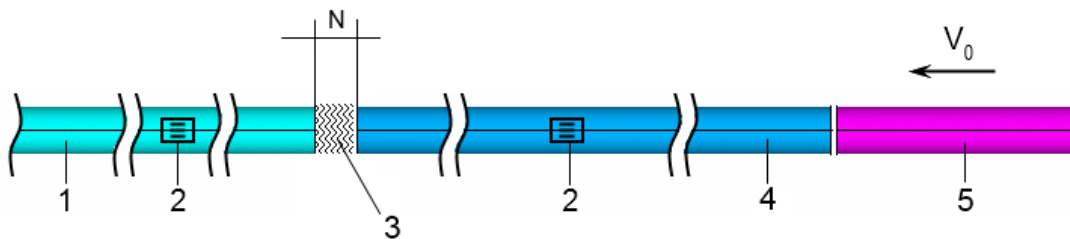


Рис. 2.2. Схема эксперимента на динамическое сжатие

Из одномерной теории распространения упругих волн в полубесконечных стержнях известно, что деформация в волне связаны с массовой скоростью dU/dt соотношениями (1)

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

Откуда смещение $U(t)$ частиц в волне (2)

$$U(t) = C \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt \quad (2)$$

Здесь C – скорость звука в стержне.

На основании последней формулы можно записать перемещения торцов стержней 4 и 1, примыкающих к образцу. Перемещение правого торца $U_1(t)$ складывается из перемещения $U_1^I(t)$, вызванного распространением падающего импульса $\varepsilon^I(t)$, и перемещения $U_1^R(t)$, вызванного распространением отраженного импульса $\varepsilon^R(t)$ (3)

$$U_1(t) = C \int_0^t \varepsilon^I(t) \cdot dt + (-C) \int_0^t \varepsilon^R(t) \cdot dt = C \int_0^t (\varepsilon^I(t) - \varepsilon^R(t)) \cdot dt \quad (3)$$

Перемещение левого торца $U_2(t)$ вызвано распространением прошедшего импульса $\varepsilon^T(t)$ (4)

$$U_2(t) = C \int_0^t \varepsilon^T(t) \cdot dt \quad (4)$$

Изменение длины образца dL в процессе нагружения можно рассчитать следующим образом (5)

$$dL(t) = U_2(t) - U_1(t) \quad (5)$$

Средняя относительная деформация образца длиной L_0 будет равна (6)

$$\varepsilon_s(t) = \frac{U_2(t) - U_1(t)}{L_0} \quad (6)$$

Если выразить ее через импульсы в стержнях (7)

$$\varepsilon_s(t) = \frac{C}{L_0} \int_0^t [\varepsilon^I(t) - \varepsilon^R(t) - \varepsilon^T(t)] \cdot dt \quad (7)$$

Отсюда скорость деформации образца (8)

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{C}{L_0} \cdot (\varepsilon^I(t) - \varepsilon^R(t) - \varepsilon^T(t)) \quad (8)$$

Для нахождения напряжения в образце следует рассмотреть усилия на торцах образца. Усилие на правом торце $P_1(t)$ складывается из сжимающего усилия $P_1^I(t)$, вызванного импульсом $\varepsilon^I(t)$, а усилие на левом торце вызвано импульсом $\varepsilon^T(t)$. Тогда с учетом закона Гука (стержни имеют высокий предел упругости и деформируются упруго) (9)

$$P_1(t) = EA[\varepsilon^I(t) + \varepsilon^R(t)], \quad P_2(t) = EA\varepsilon^T(t) \quad (9)$$

где E и A - соответственно модуль Юнга и площадь поперечного сечения стержней. Средняя сила равна $P = \frac{P_1(t) + P_2(t)}{2}$, отсюда среднее значение напряжения в образце (10)

$$\sigma_s(t) = \frac{P}{A_s} = \frac{EA}{2A_s} [\varepsilon^I(t) + \varepsilon^R(t) + \varepsilon^T(t)] \quad (10)$$

На рис. 2.3 показаны характерные осциллограммы деформаций. Цифрами [1]...[12], отмечены содержательные участки импульсов по которым строились диаграммы напряжения-деформации. Видно, что деформирование образца проходило в несколько циклов связанных с отражением волн от торцов стержней. В процессе эксперимента с помощью тензодатчиков регистрировались деформации в сечениях нагружающего (сверху) и опорного (снизу) мерного стержня. По этой информации рассчитывалась временная история изменения длины образца, а также действующая на него при этом сила.

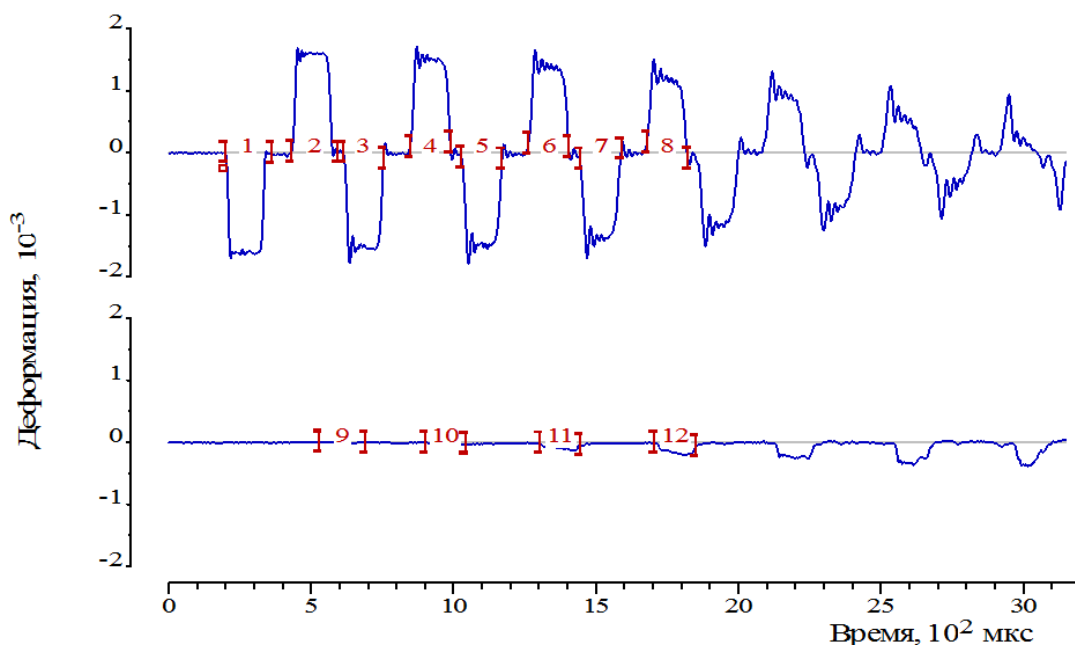


Рис. 2.3. Деформации в сечениях мерных стержней

Для испытания материала в условиях ударного растяжения в плоскости слоев использовался аналог схемы Николаса [117], представляющей из себя модификацию метода Кольского. Схема эксперимента показана на рис. 2.4.

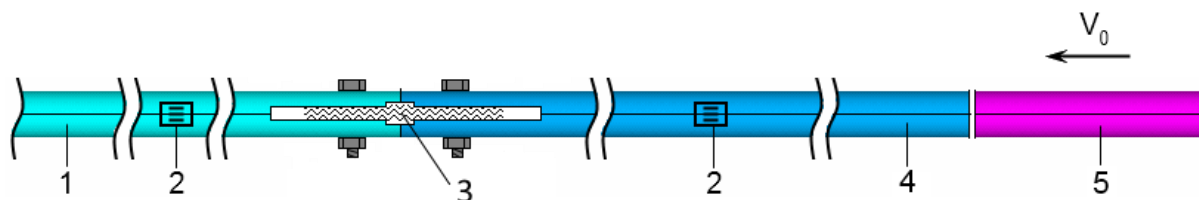


Рис. 2.4. Схема эксперимента на динамическое растяжение

2.2. Экспериментальные исследования пористого гранулированного слоя при статическом сжатии

Статические исследования сжатия насыпного слоя из свинцовых шариков проведены в лаборатории физико-механических испытаний ННГУ им. Н.И. Лобачевского, на сервогидравлической машине Zwick Amsler HA 100. Для испытания была выбрана свинцовая дробь диаметром 2 мм 9 (оружейной дроби № 9) рис. 2.5.



Рис. 2.5. Дробь № 9 (диаметр шарика 2 мм)

Для проведения эксперимента на сжатие, была изготовлена оснастка, состоящая из двух элементов (толстостенный полый цилиндр и сжимающий поршень). Цилиндр высотой 40 мм и внутренним диаметром 40,2 мм, поршень высотой 70 мм и диаметром 40 мм. Схема эксперимента приведена на рис. 2.6.

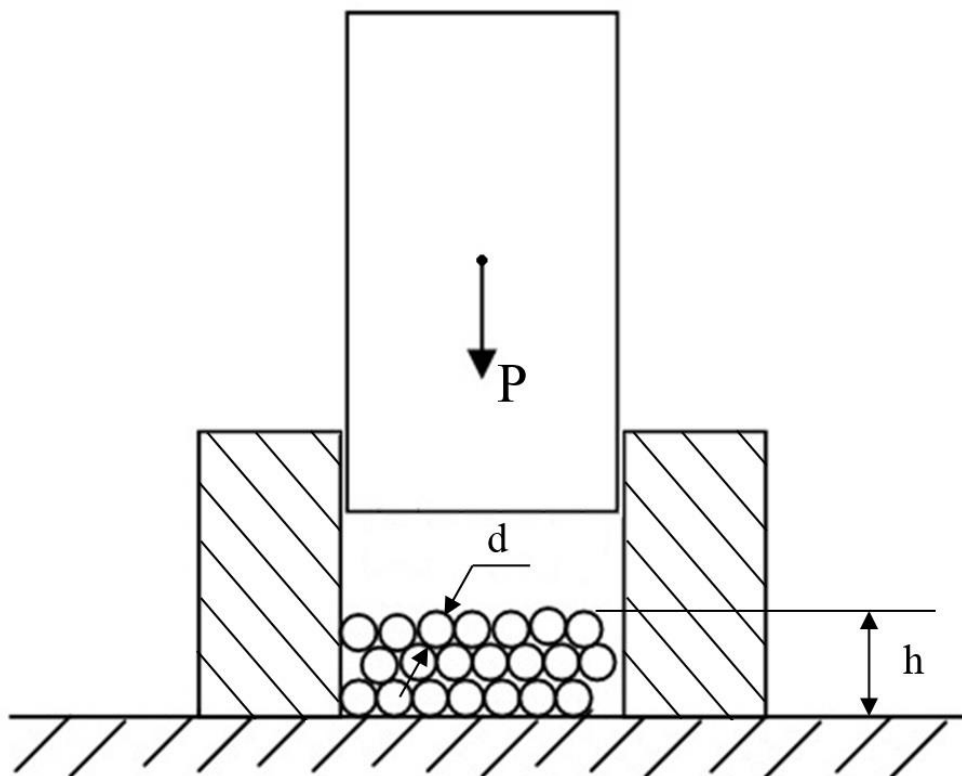


Рис. 2.6. Схема эксперимента. Статика

Свинцовые шарики засыпались в цилиндр и сдавливались стальным высокопрочным поршнем. Толщина слоя h варьировалась от 20 до 35 мм. По толщине слоя укладывалось более 10 шариков. По результатам экспериментов была получена кривая «напряжение-деформация» для слоя, показанная на рис. 2.7. Насыпной слой шариков предполагался однородной пористой сплошной средой. Одноосная деформация слоя ε , определяется отношением перемещения поршня Δh к толщине начального слоя h . Напряжение σ определяется отношением силы P , возникшей в деформируемом материале, которую фиксирует высокоточный датчик силы в машине Amsler HA 100, к площади S сдавливающего цилиндра $S = 12,56$ (см²). Нагружение слоя производилось в несколько этапов с разгрузкой по силе. На рис. 2.7 штриховой линией показана линия разгрузки, близкая к прямой линии. Разгрузочный модуль E_r в проведенных испытаниях изменялся от 1,7 до 2,3 ГПа (модуль упругости свинца $E = 18$ ГПа). После достижения величины напряжения 1,45 МПа наряду с переукладкой частиц в слое развивалось пластическое течение материала шариков.

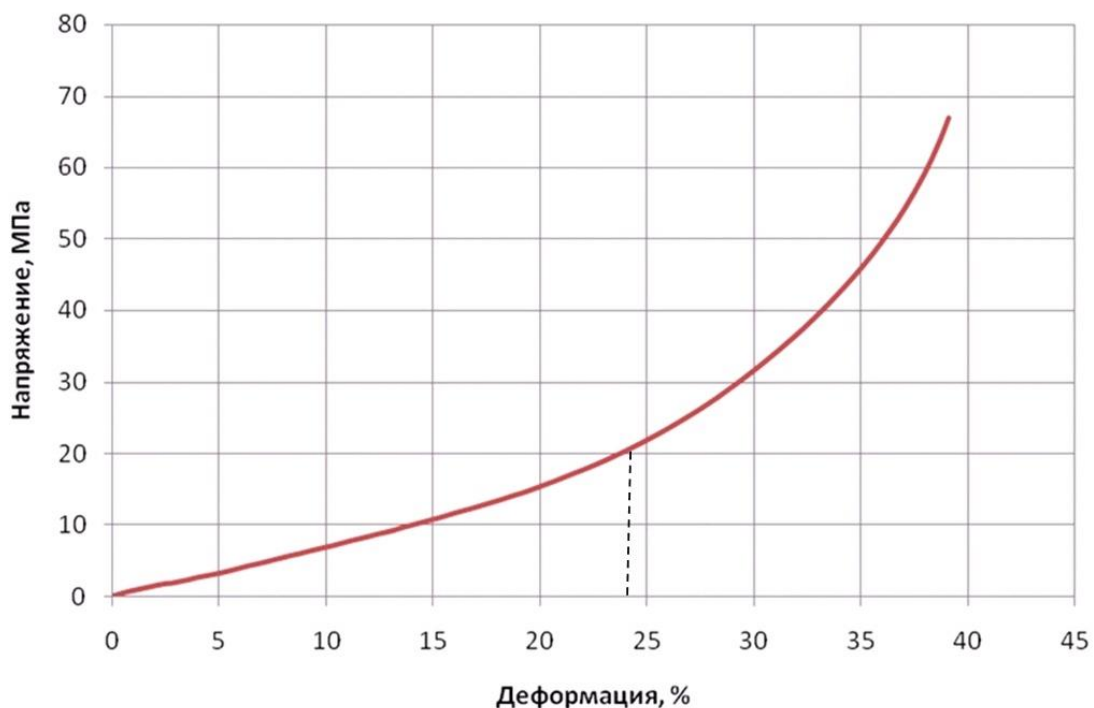


Рис. 2.7. Диаграмма статического сжатия

По результатам статических испытаний видно, что деформирование слоя из свинцовых шариков по мере увеличения нагрузки сжатия носит выраженный нелинейный и необратимый характер, что характерно для пористых сред.

2.3. Экспериментальные исследования пористого гранулированного слоя при динамическом сжатии

Динамические испытания на сжатие свинцовых шариков проводились в лаборатории динамических испытаний ННГУ им. Н.И. Лобачевского на экспериментальной установке с разрезным стержнем Гопкинсона [113-116]. Как и для статических испытаний была выбрана свинцовая дробь диаметром 2 мм (рис. 2.5).

В оснастку (цилиндр) внутренний диаметр которой составлял 20,2 мм засыпались шарики, затем с обеих сторон слой поджимался мерными стержнями диаметром 20 мм. Толщина слоя из свинцовых шариков варьировалась от 10 до 20 мм. Разрезной стержень и поджатый им с обеих сторон гранулированный слой нагружался стержнем ударником диаметром 20 мм, вылетающим из пневматической пушки (рис. 2.8).

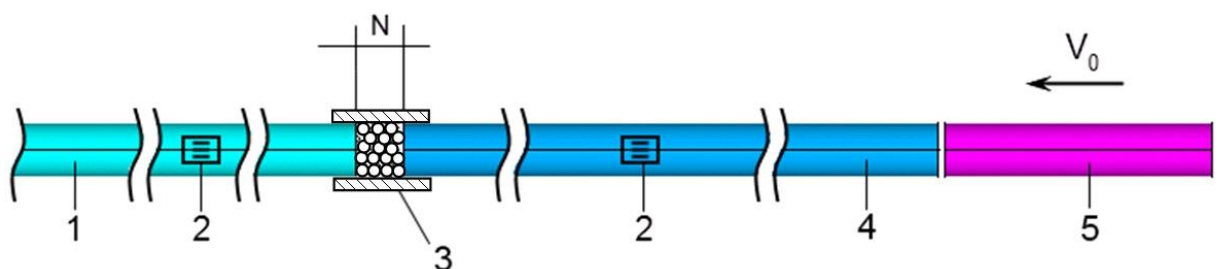


Рис. 2.8. Схема эксперимента. Динамика

Скорость вылета ударника варьировалась от 5 до 17 м/с. На рис. 2.9 показаны деформированные и разрушенные шарики слоя при различных скоростях вылета ударника. Если при напряжении в волнах менее 40-50 МПа

наблюдается пластическое течение материала шариков, то при больших напряжениях происходит массовая фрагментация шариков.

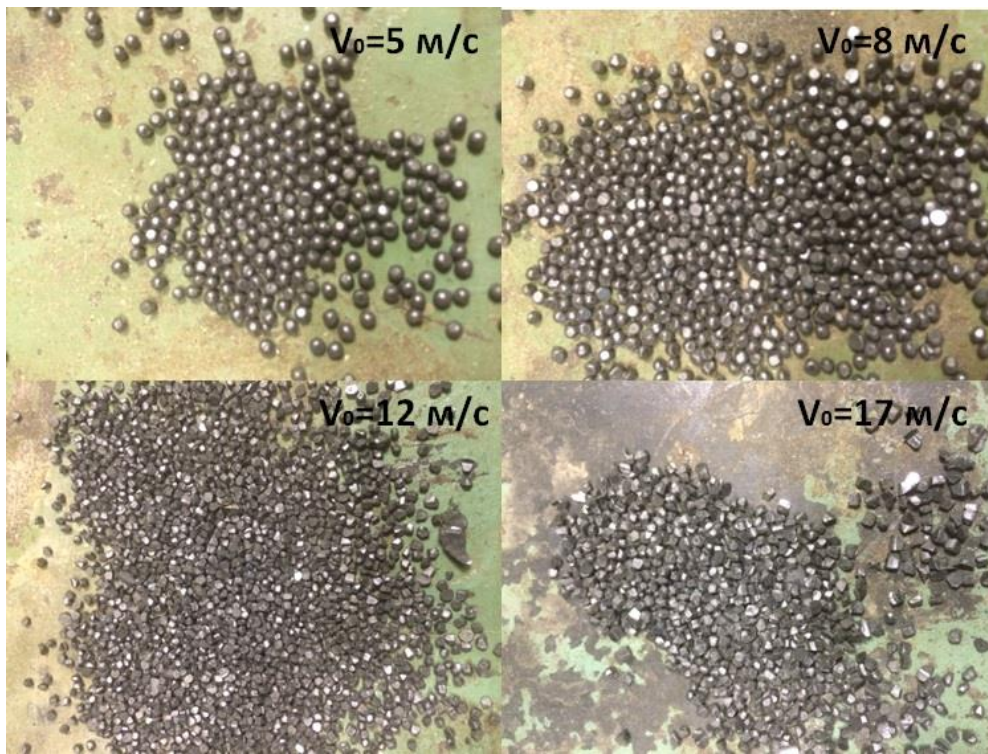


Рис. 2.9. Деформирование образцов при $V_0 = 5, 8, 12, 17 \text{ м/с}$

По результатам эксперимента были построены кривые напряжение-деформация для слоя из свинцовых шариков рис. 2.10 (для экспериментов со скоростью вылета ударника 12 и 17 м/с) и рис. 2.11 (для экспериментов со скоростью вылета ударника 5 и 8 м/с). На рис. 2.11 диаграмма деформирования короче, чем на рис. 2.10. Это связано с тем, что меньшая скорость ударника вызывает менее интенсивное деформирование образца, и, как следствие, итоговая необратимая деформация оказывается меньше.

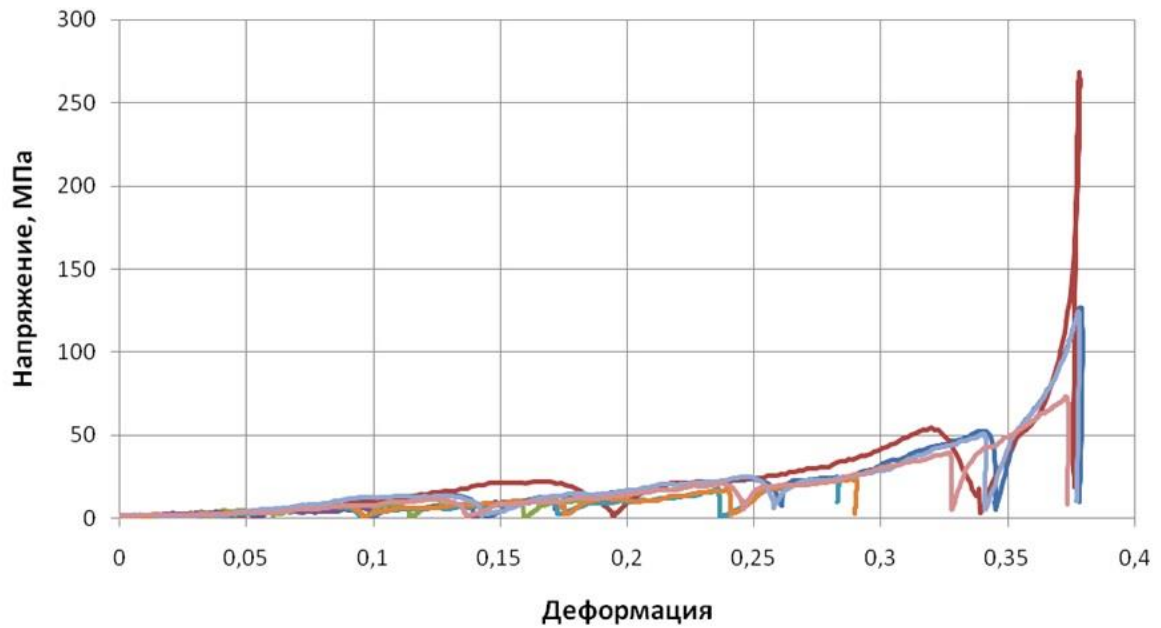


Рис. 2.10. Диаграммы динамического сжатия

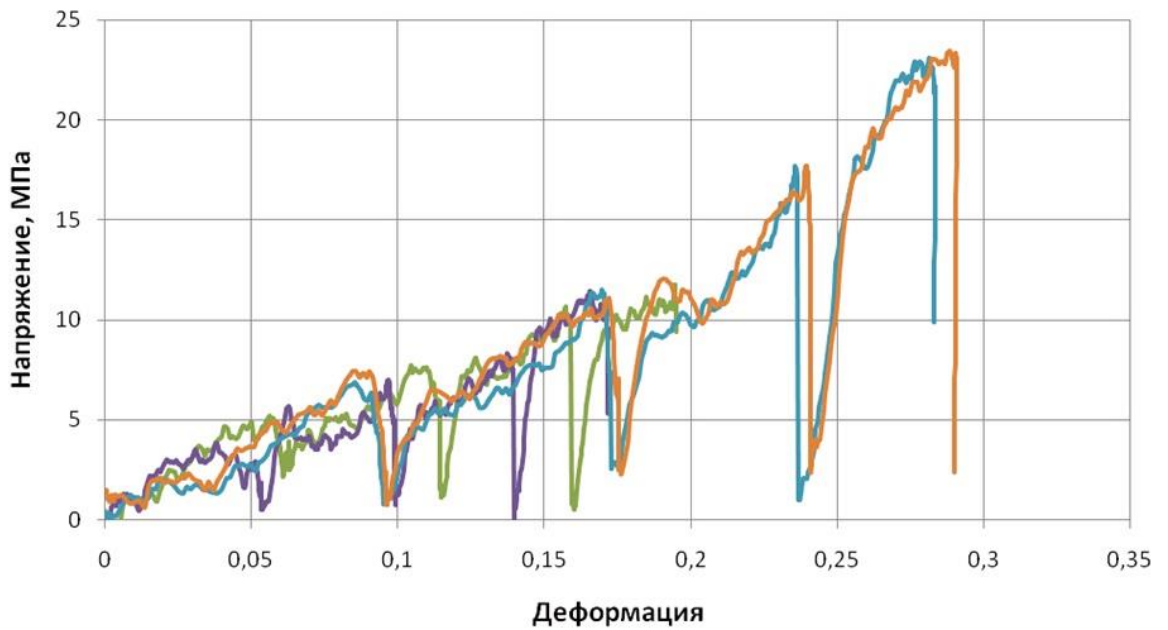


Рис. 2.11. Диаграммы деформирования

Следует отметить, что в силу малого сопротивления образца деформированию на стадиях переупаковки и начального этапа деформирования шариков, большая часть сформированного при ударе бойка по нагружающему стержню импульса сжатия возвращается в первый мерный

стержень. Это приводит к повторному циклическому нагружению образца со всё убывающей амплитудой нагрузки. Так, на рис. 2.10 и 2.11 показано по 4 цикла нагрузки-разгрузки образца в каждом эксперименте.

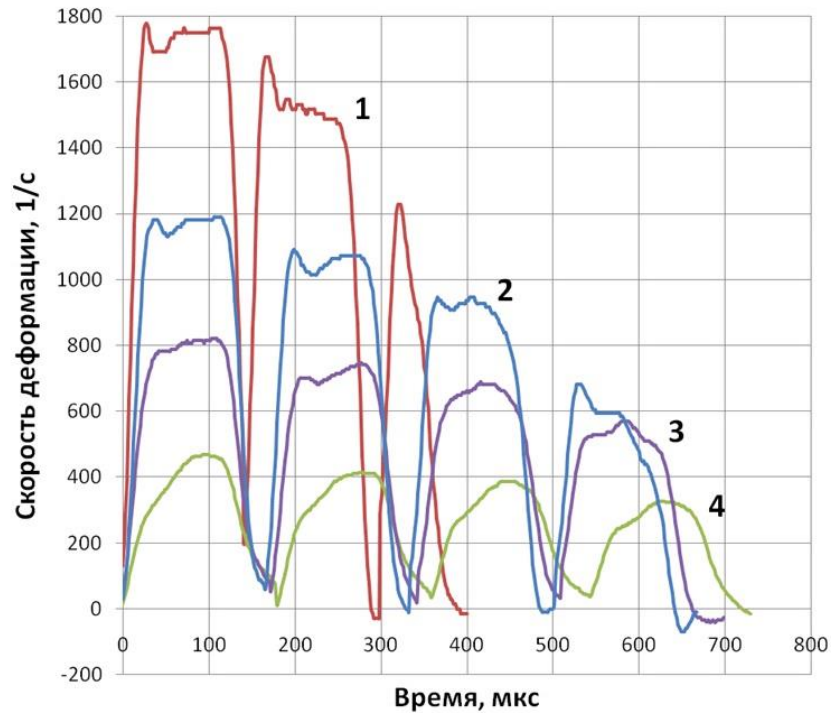


Рис. 2.12. Кривые изменения скоростей деформации образца

На рис. 2.12 приводятся кривые, характеризующие историю изменения скоростей деформации образца в экспериментах с разными скоростями ударника. На графике используются следующие обозначения: 1 – скорость вылета ударника 17 м/с, 2 – скорость вылета ударника 12 м/с, 3 – скорость вылета ударника 8 м/с, 4 – скорость вылета ударника 5 м/с. Видно, что во-первых скорость деформации изменяется в зависимости от скорости вылета ударника, и во вторых скорость деформации в каждом последующем цикле нагружения образца становится немного меньше, что связано с особенностями используемой экспериментальной методики. На рис. 2.13 приведена усредненная кривая деформирования пористого слоя из свинцовых шариков. Штриховыми линиями - показаны линии разгрузки.

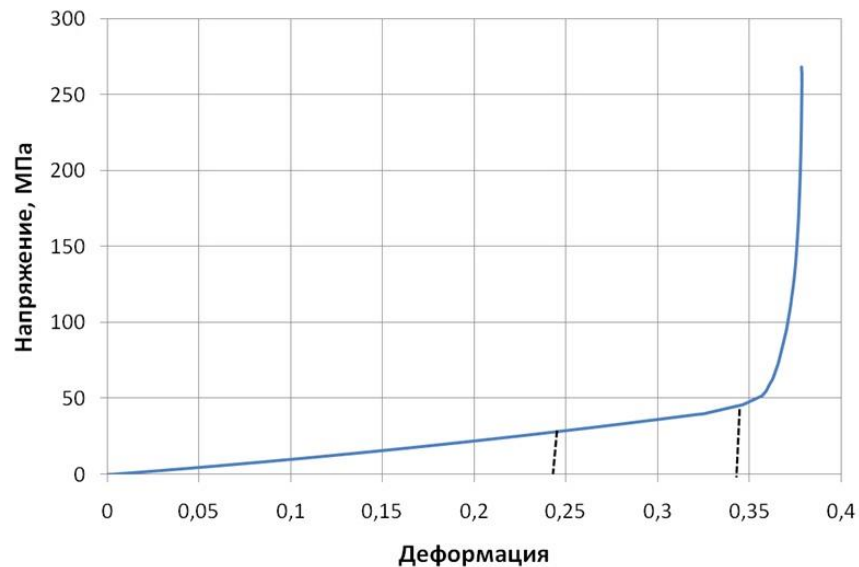


Рис. 2.13. Диаграмма динамического сжатия

По результатам статических и динамических испытаний образцов пористых насыпных слоев из свинцовых шариков на сжатие в диапазоне нагрузок до 300 МПа выявлено существенное отличие динамических диаграмм деформирования от статических. Кривые при всех режимах нагружения носят нелинейный и необратимый характер, при высоких нагрузках происходит не только переукладка частиц, но и сильное пластическое течение материала, а при динамическом нагружении помимо пластического течения происходит массовая фрагментация частиц гранулированного слоя. Полученные результаты могут быть использованы для предсказательного математического моделирования элементов конструкций, содержащих насыпные слои.

2.4. Численное моделирование деформирования гранулированного слоя

Экспериментальные исследования, позволяющие определить характеристики при одноосном нагружении, не выявляют детальную картину пластического деформирования шариков. В целях определения особенностей деформирования слоя при развитом пластическом течении, проводится

математическое моделирование сжатия отдельных симметричных фрагментов слоев. Предполагается, что все шарики одинакового размера и идеальной шаровой формы.

Для численного моделирования деформирования гранулированного слоя была выбрана ячейка симметрии и моделировалось две задачи:

1. Когда центры шариков образуют куб (свободная упаковка), рис. 2.14 слева; в этом случае объемное содержание пор $\alpha_1 = 0,48$; ($\alpha_1 = V_{\text{пор}} / V_{\text{полн}}$, где $V_{\text{пор}}$ - объем пор, $V_{\text{полн}}$ - объем всей ячейки симметрии);

2. С более плотно уложенными шариками, когда центры ближайших шариков образуют правильный тетраэдр (плотная упаковка), рис. 2.14 справа; в этом случае объемное содержание пор $\alpha_1 = 0,26$.

Реальные гранулированные слои, ввиду наличия неидеальной формы, некоторого разброса размеров шариков, способа укладки и т.д. имеют, как правило, другие (промежуточные) значения объемного содержания пор, например в [39] объемное содержание пор составляло $\alpha_1 = 0,39$. Проведенные оценки начального содержания пор в экспериментах по сжатию гранулированного слоя также составляют $\alpha_1 = 0,39-0,40$. Поэтому есть основания полагать, что реальные параметры деформирования будут располагаться между параметрами деформирования выбранными выше вариантами идеальных упаковок.

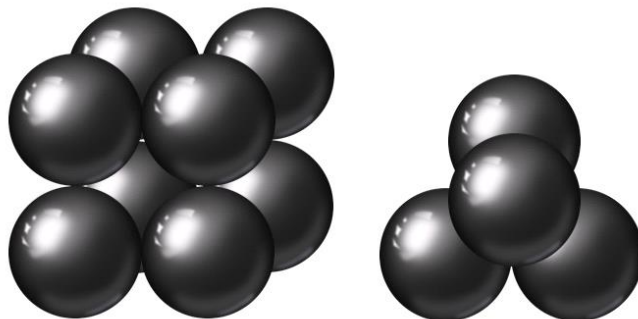


Рис. 2.14.

Численное моделирование процессов деформирования пористого слоя из свинцовых шариков проводилось в вычислительной системе ANSYS v

17.2. Моделирование проводилось методом конечных элементов. Для моделирования деформирования кубической упаковки ввиду симметрии достаточно 1/8 шарика. Численная конечно-элементная модель показана на рис. 2.15, сжатие проводилось абсолютно жесткой плоскостью против направления оси Z . Для построения конечно-элементной модели использовался 20 узловой конечный элемент (КЭ) второго порядка SOLID185 с сокращенным ($2 \times 2 \times 2$) интегрированием. Объемная модель шарика состояла из 2000 КЭ. Для описания поведения материала использовалась мультилинейная модель пластичности с изотропным упрочнением. Нелинейная диаграмма деформирования свинца бралась из [118] с пределом текучести $\sigma_T = 5$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 16$ МПа при деформации ε 50-70% (рис. 2.16). Нагружение производилось перемещением нагружающей плоскости до $d/4 = 0,5$ мм.

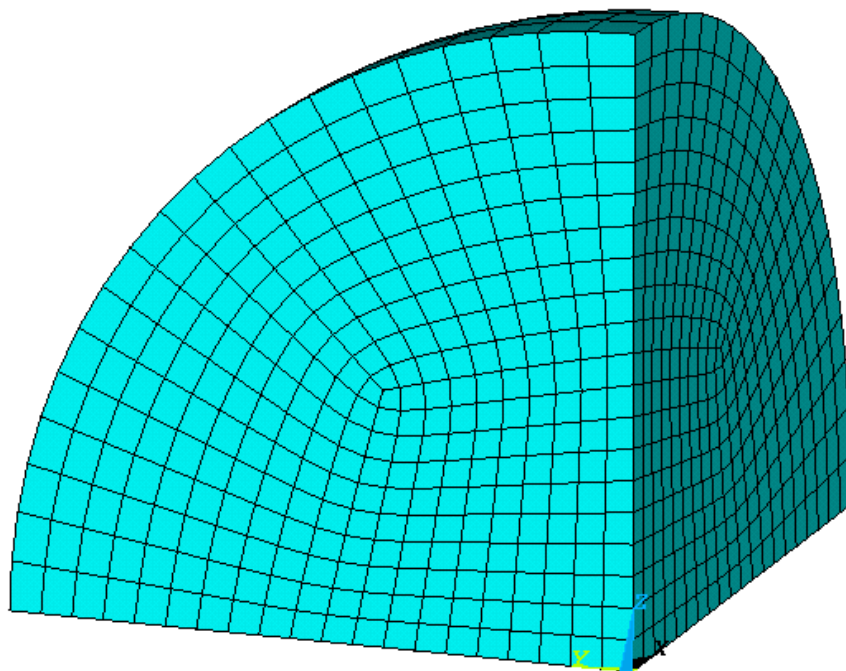


Рис. 2.15.

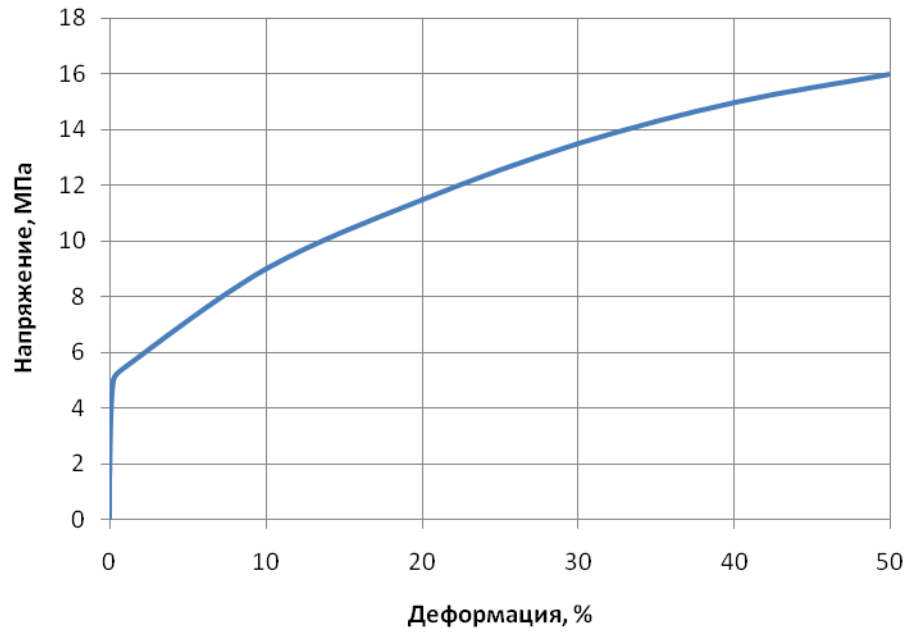
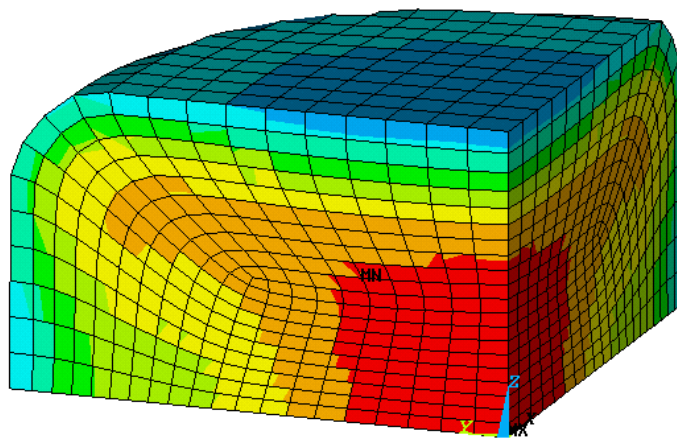


Рис. 2.16. Диаграмма деформирования свинца.

Распределение эквивалентной пластической деформации показано на рис. 2.17, компоненты тензора пластической деформации по оси Y изображено на рис. 2.18, а по оси Z - на рис. 2.19.

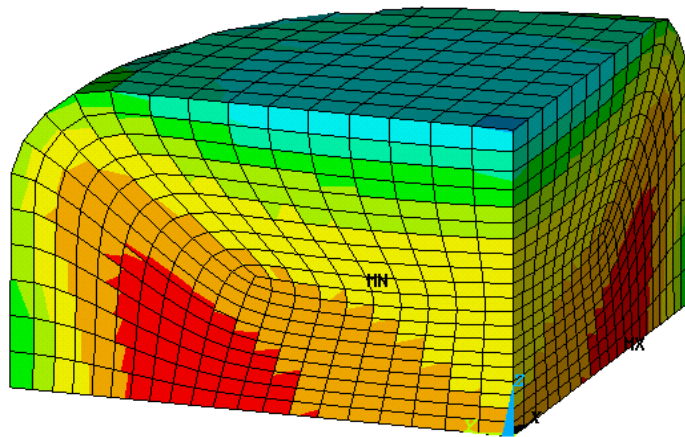


```

ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB =200
TIME=. 8
EPLEQV (NOAVG)
PowerGraphics
EFACET=1
DMX =. 398063
SMN =. 015541
SMX =. 545704
.015541
.074448
.133355
.192262
.251169
.310076
.368983
.42789
.486797
.545704

```

Рис. 2.17

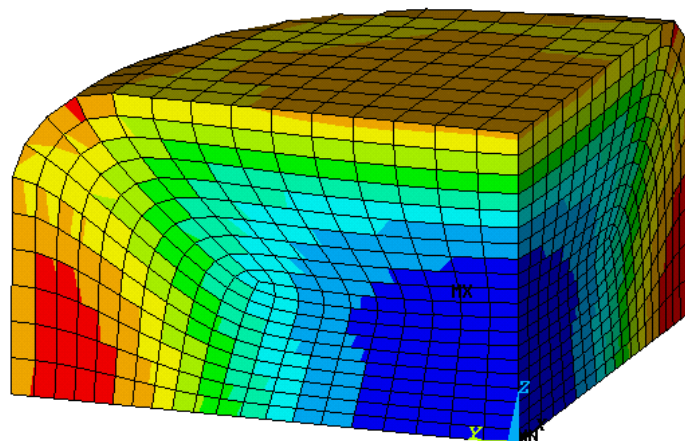


```

ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB =200
TIME=.8
EPPLZ (NOAVG)
RSYS=1
PowerGraphics
EFACET=1
DMX =.398063
SMN =-.024107
SMX =.356444
.024107
.018176
.06046
.102743
.145027
.18731
.229594
.271877
.314161
.356444

```

Рис. 2.18



```

ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB =200
TIME=.8
EPPLZ (NOAVG)
RSYS=1
PowerGraphics
EFACET=1
DMX =.398063
SMN =-.545704
SMX =-.004475
.545704
.485567
.425431
.365294
.305158
.245021
.184885
.124748
.064612
.004475

```

Рис. 2.19

Численно полученная зависимость напряжения от деформации фрагмента пористой гранулированной среды при кубической упаковке приведена на рис. 2.20 (красная кривая – напряжение по оси Z, синяя кривая – напряжение по оси X, напряжение по оси Y совпадает с напряжением по оси X). Параметры усреднены по объему симметричного фрагмента гранулированной среды. Характерный перегиб в окрестности значения деформации $\varepsilon = 45\%$ связан с тем, что практически все поры гранулированной среды заполнены и происходит сжатие материала, из которого изготовлены шарики (свинец). Этот факт иллюстрируется на рис.

2.21, где изображено изменение объемного содержания пор α_1 в зависимости от деформации - синяя кривая.

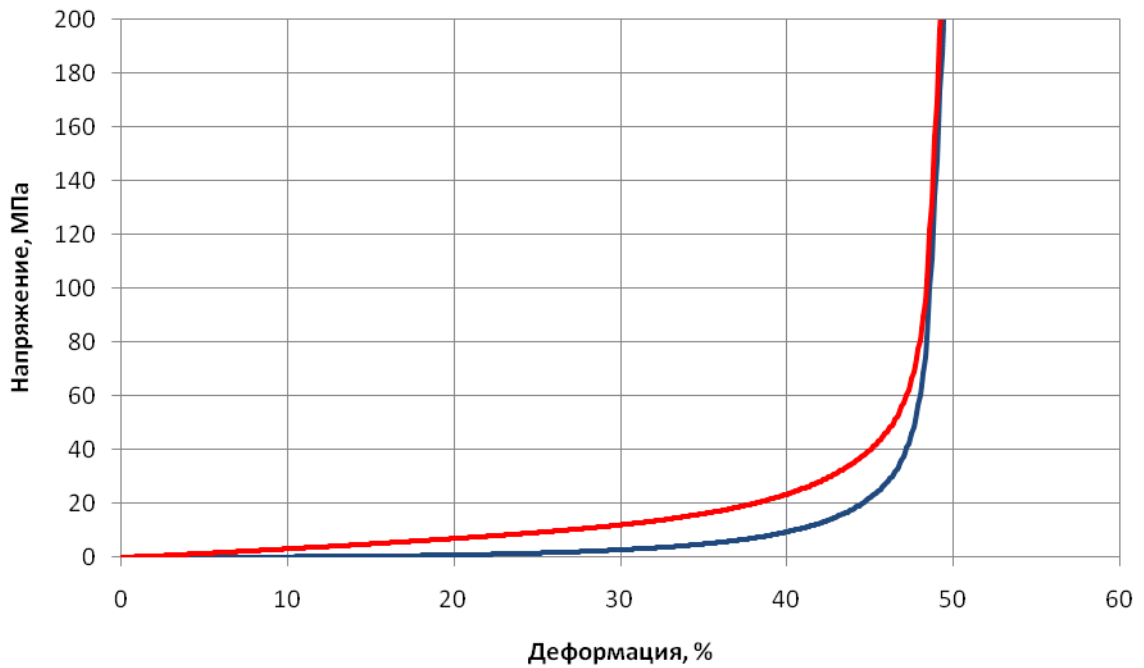


Рис. 2.20

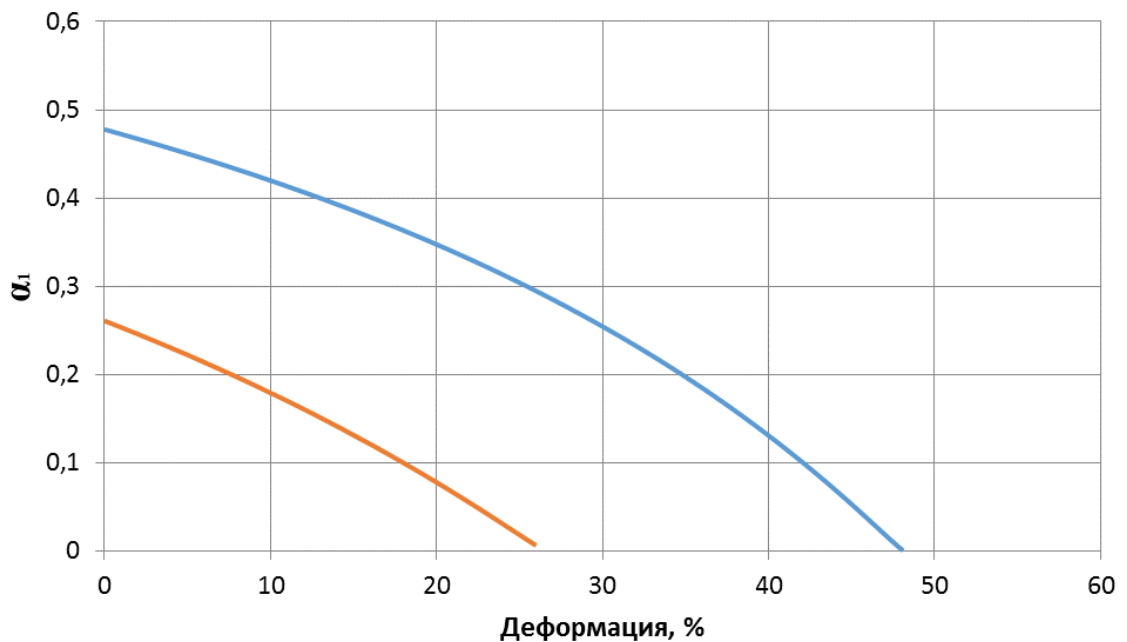


Рис. 2.21

Для численного моделирования плотной упаковки была выбрана следующая ячейка симметрии (рис. 2.22). Сжатие проводилось абсолютно жесткой плоскостью против направления оси Z, до перемещения 0,424 мм,

полная высота модели составляла 1,63 мм, для построения КЭ модели использовался тот же узловой КЭ второго порядка. Модель симметричной ячейки состояла из двух шаровых секторов состоящих из 2000 КЭ всего 4000 КЭ, каждый сектор представляет из себя 1/12 полного шара (сектор с углом 60° в плоскости XY).

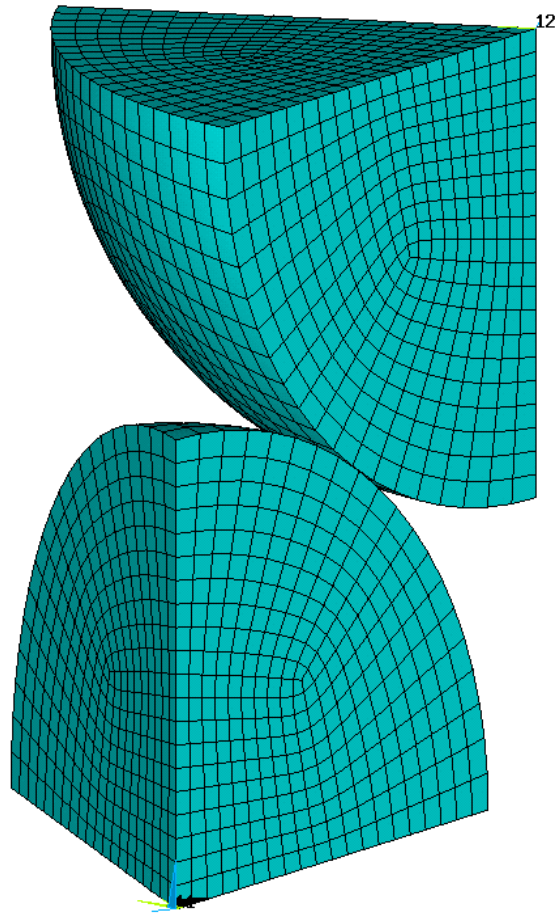


Рис. 2.22

На рис. 2.23 и 2.24 изображено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в МПа и эквивалентных пластических деформаций соответственно. Видно, что в результате пластического течения все криволинейные границы шариков становятся фактически плоскими, объемное содержание пор становится близким к нулю.

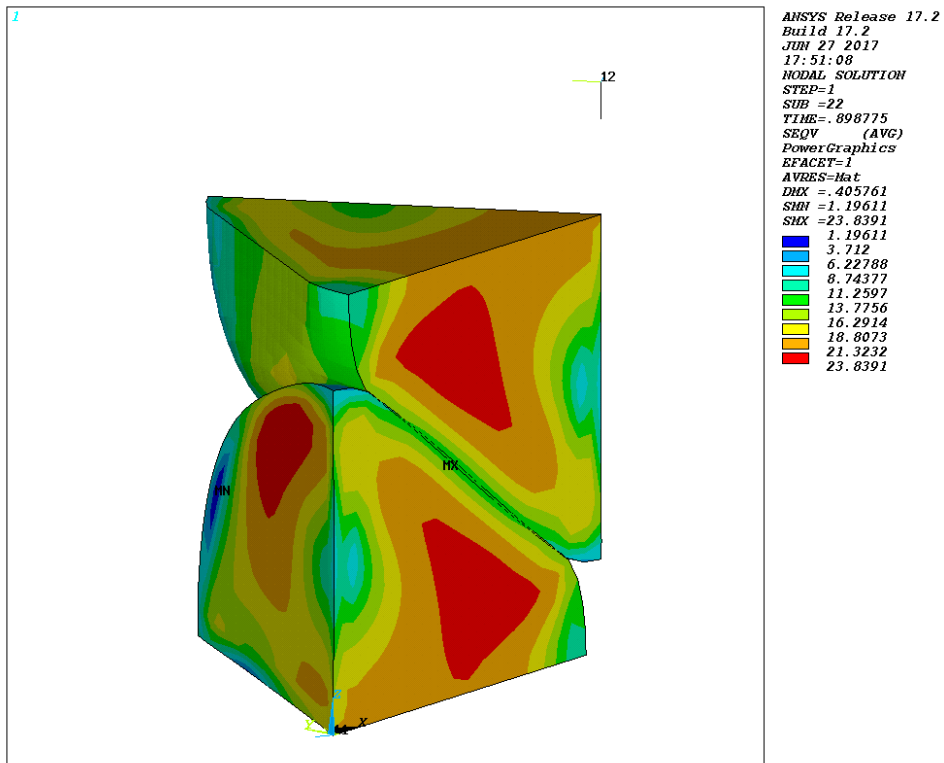


Рис. 2.23

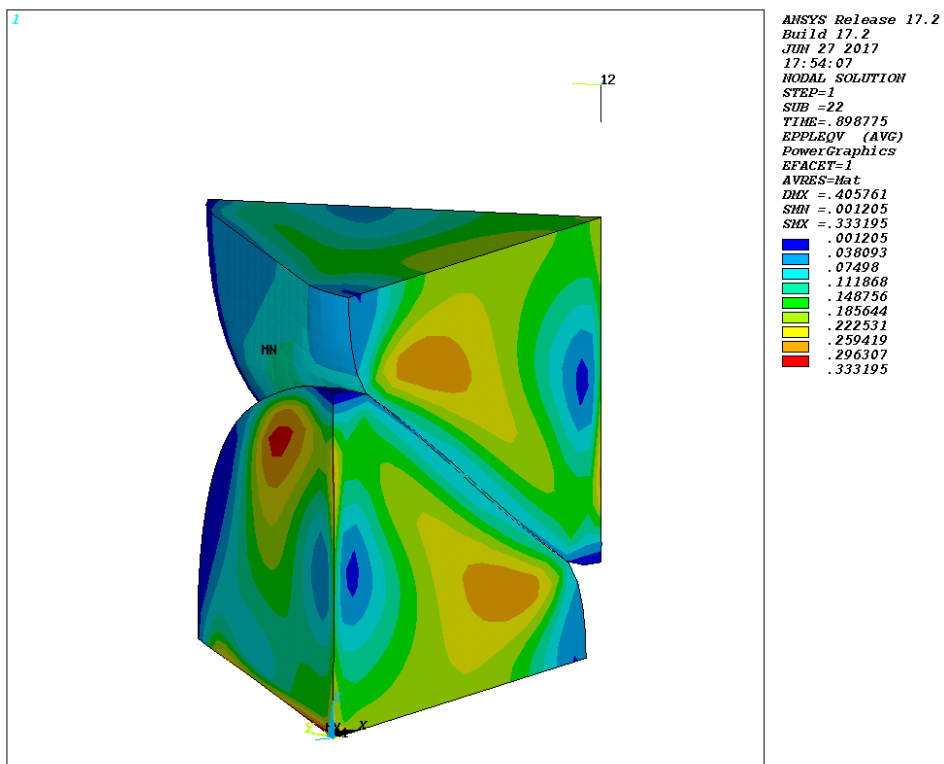


Рис. 2.24

На рис. 2.25 изображены кривые зависимости напряжения от деформации по оси нагружения Z: красная – численная кривая для плотной тетраэдральной упаковки шариков, синяя – численная кривая для кубической упаковки.

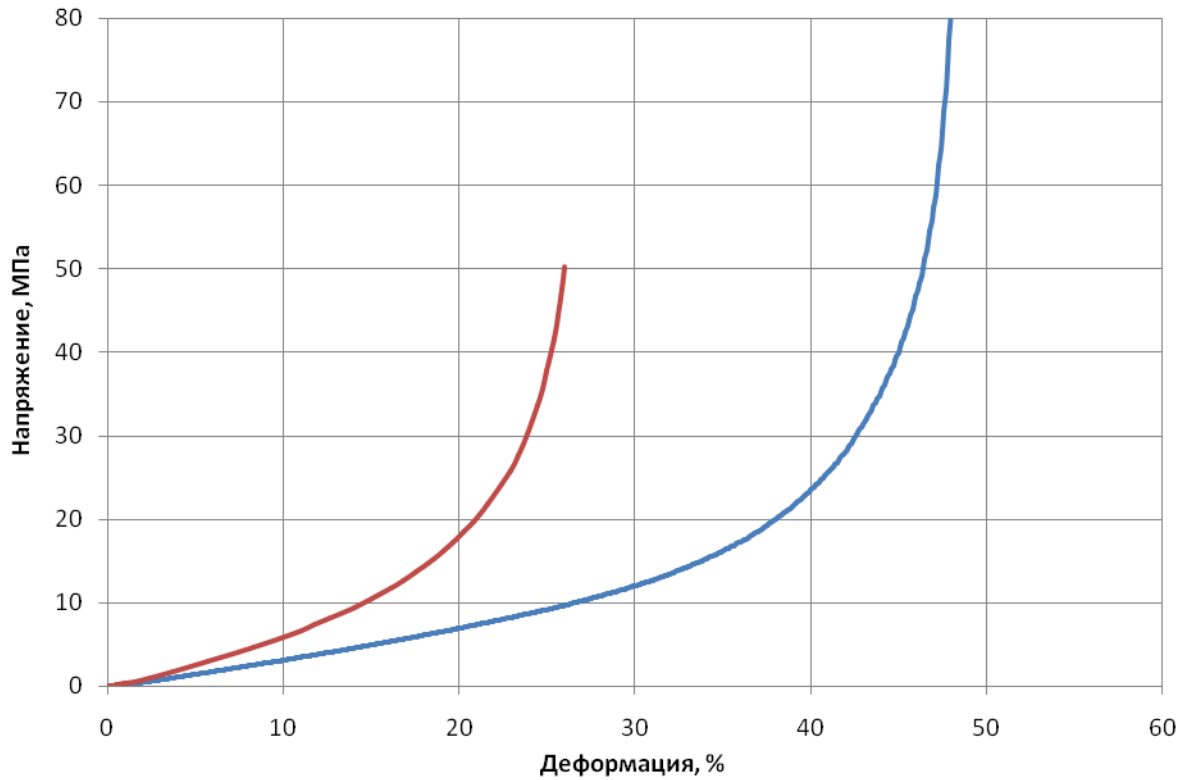


Рис. 2.25

На рис. 2.26 изображена одна из симметричных частей шара с распределением напряжений по оси X, при сжатии тетраэдральной упаковки. Кривые зависимости напряжения от деформации по оси нагружения X показаны на рис. 2.27: красная – численная кривая для плотной тетраэдральной упаковки шариков, синяя – численная кривая для кубической упаковки.

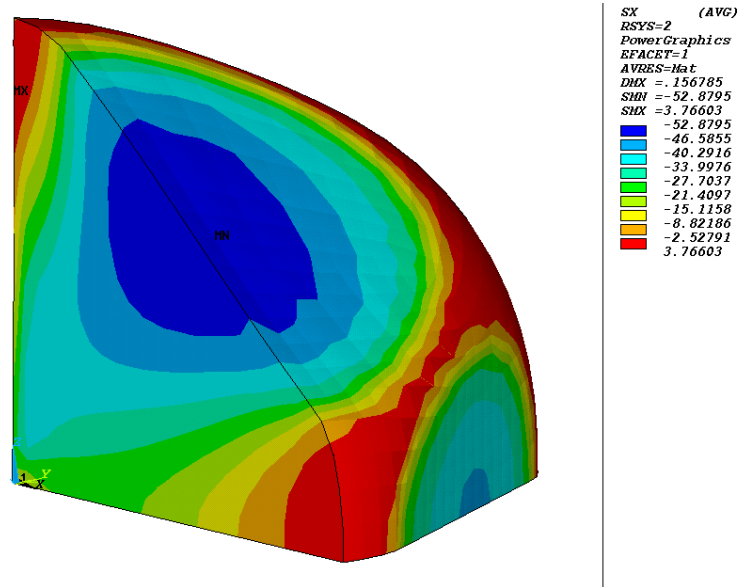


Рис. 2.26

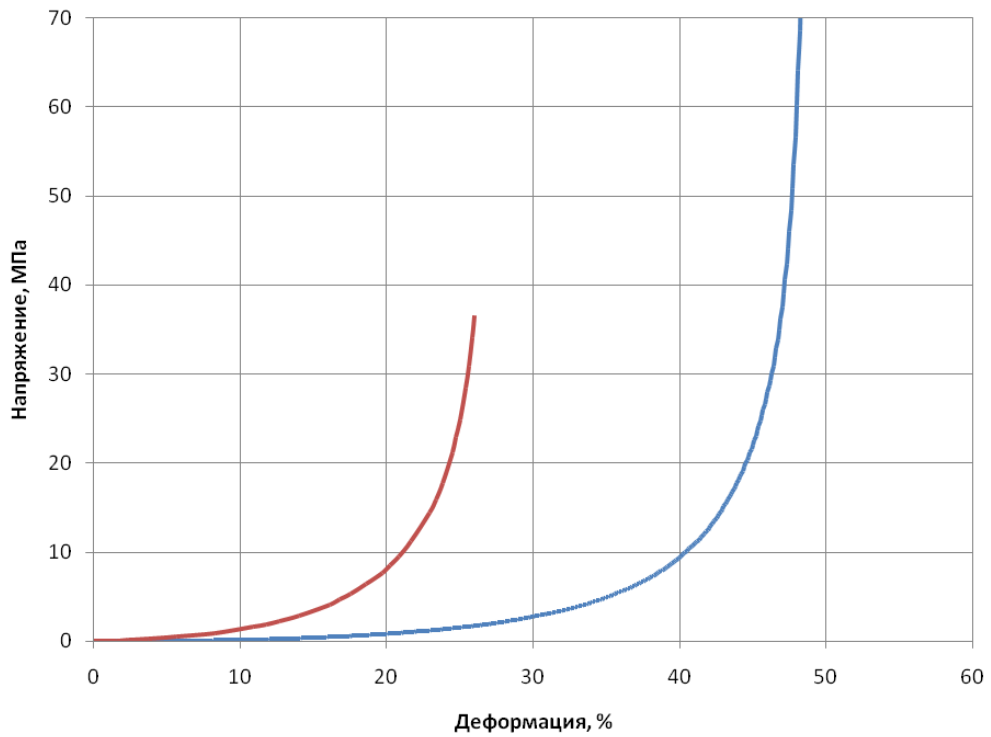


Рис. 2.27

На рис. 2.28 приведено сравнение среднего по области объемного напряжения от объемной деформации. Видно, что зависимость этих величин также нелинейна. Красная кривая - для плотной тетраэдральной упаковки шариков, синяя кривая - для кубической упаковки.

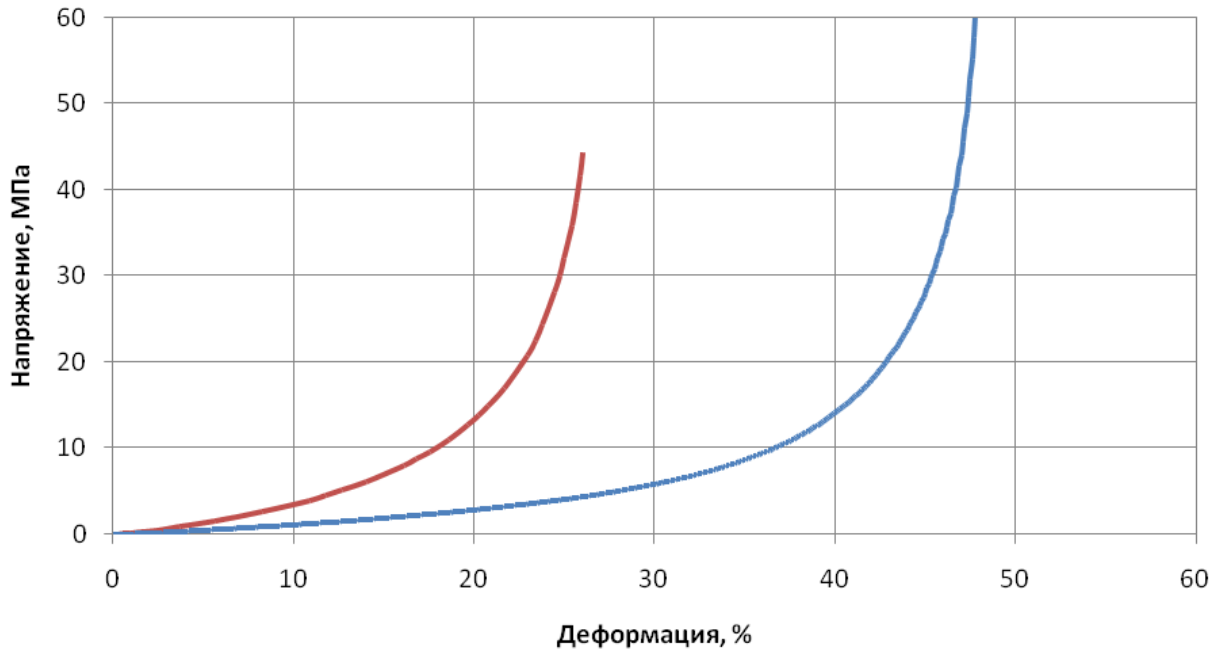


Рис. 2.28

Поведение численных кривых существенно зависит от начальной упаковки шариков, т.е. от значений начального объемного содержания пор среды, характеризуемого параметром α_1 . На рис. 2.21 показано расчетное изменение параметра α_1 в зависимости от величины деформации слоя, красная кривая показывает изменение пористости для тетраэдральной упаковки. Сравнение кривых на рис. 2.25 и рис. 2.21 показывает, что как и для кубической упаковки, зоны резкого возрастания сопротивления пористого слоя связаны с ликвидацией свободной пористости.

На рис. 2.29 изображены сводные кривые зависимости напряжения от деформации по оси нагружения Z: красная – численная кривая для плотной тетраэдральной упаковки шариков, синяя – численная кривая для кубической упаковки, зеленая – кривая полученная экспериментально для гранулированного слоя при статическом испытании. Видно, что экспериментальная кривая располагается между численными кривыми, что подтверждает наше высказанное выше предположение о промежуточном характере расположения кривых деформирования для реальных (неидеальных) упаковок шариков в гранулированном слое.

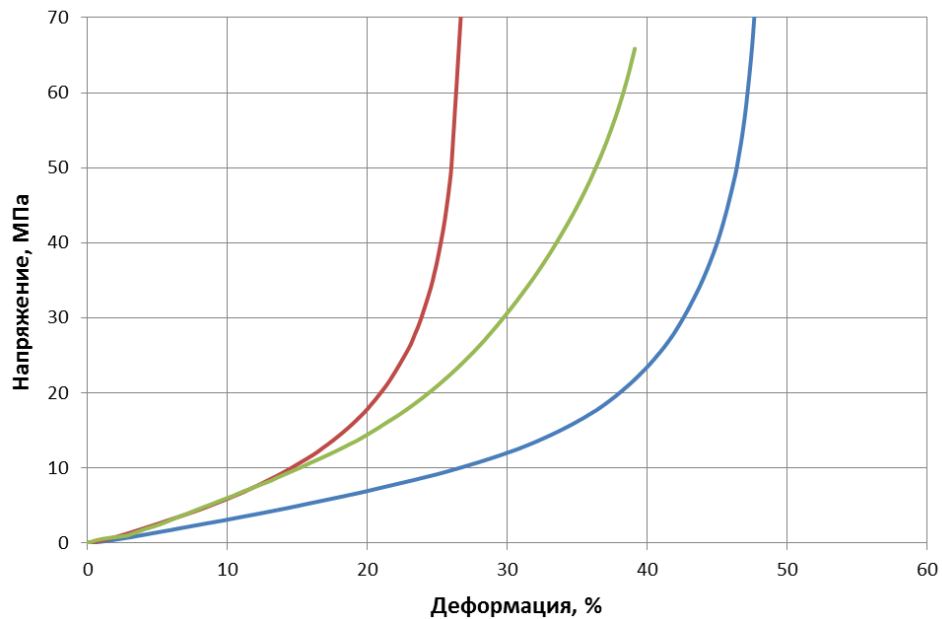


Рис. 2.29

2.5. Выводы по главе 2

1. Экспериментально получены статические и динамические диаграммы деформирования образцов пористых насыпных слоев из свинцовых шариков при сжатии в диапазоне нагрузок до 300 МПа.

2. Выявлены существенные отличия динамической диаграммы деформирования от статической. Кривые при всех режимах нагружения носят нелинейный и необратимый характер. При высоких нагрузках происходит не только переукладка частиц, но и сильное пластическое течение материала, а при динамическом нагружении помимо пластического течения происходит массовая фрагментация частиц гранулированного слоя.

3. Проведено численное моделирование нагружения симметричных фрагментов слоя для двух вариантов регулярной упаковки шариков – тетраэдральной и кубической. В обоих вариантах наблюдается развитое пластическое течение материала, заполняющего поры вплоть до полного компактирования. Численные диаграммы деформирования, как и экспериментальные, являются существенно нелинейными и необратимыми.

Поведение экспериментальной кривой качественно соответствует поведению численных кривых. Эта кривая попадает в диапазон между кривыми деформирования насыпной среды с тетраэдральной и кубической идеальными упаковками шариков. Численное моделирование показало, что зоны резкого возрастания сопротивления пористого слоя связаны с ликвидацией свободной пористости.

ГЛАВА 3. Исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при квазистатическом и динамическом сжатию и растяжению

Пористые преграды в виде проволочных решеток, экранов, сеток, перфорированных перегородок, как и гранулированные слои, также могут оказывать демпфирующее влияние на проходящие сквозь них ударные волны. Например, для защиты корпусов взрывных камер от осколочного повреждения в настоящее время используются противоосколочные металлические сетки тканого плетения, с различным плетением и параметрами соотношения диаметра проволоки к размерам ячеек плетения. Кроме эффективного торможения высокоскоростных осколков такой пакет сетки за счет сильно развитой поверхности может отбирать значительную долю энергии горячих продуктов взрыва (ПВ), нагреваясь на десятки градусов. Это приводит к уменьшению давления во взрывной камере, в том числе и остаточного. В ряде работ [119, 120] даются оценки эффективности подобных многослойных экранов с точки зрения снижения газодинамических параметров проходящих ударных волн. Подобные преграды используются в виде плоских и осесимметричных пакетов (скрученные в рулон для укладки их перед стенками цилиндрических камер). Расположение подобных демпфирующих элементов во взрывной камере помимо противоосколочной защиты приводит к уменьшению пиковых значений давления в камере, а также и к уменьшению остаточного давления. Так как пакет сеток формируется, как правило, путем наложения слоев друг на друга с сохранением направлений проволок, многослойный пакет можно считать высокопористой деформируемой средой, обладающей ортотропными свойствами. Пакеты металлических сеток деформируются при взрывных или ударных нагрузках. Для рационального проектирования подобных демпфирующих элементов необходимо знать их деформационные и

прочностные свойства. В [46] приведены некоторые результаты экспериментальных исследований деформационных характеристик пакетов сеток на статическое сжатие по направлению нормали к слоям сеток. Данные на растяжение и на динамическое растяжение пакетов плетеных металлических сеток в литературе отсутствуют.

Проведены экспериментальные исследования деформирования однослойных (рис. 3.1) и многослойных (рис. 3.2) преград из металлических плетеных сеток.

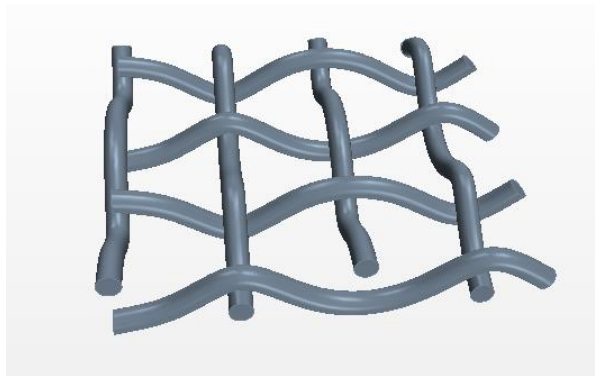


Рис. 3.1. Один слой металлической плетеной сетки

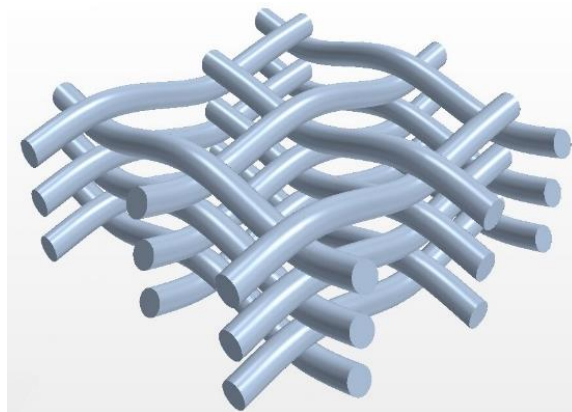


Рис. 3.2. Пакет металлической плетеной сетки

Для экспериментальных исследований использовались регулярные плетеные металлические сетки с размером типовой ячейки $c \times c$, диаметром проволоочки d (рис. 3.3).

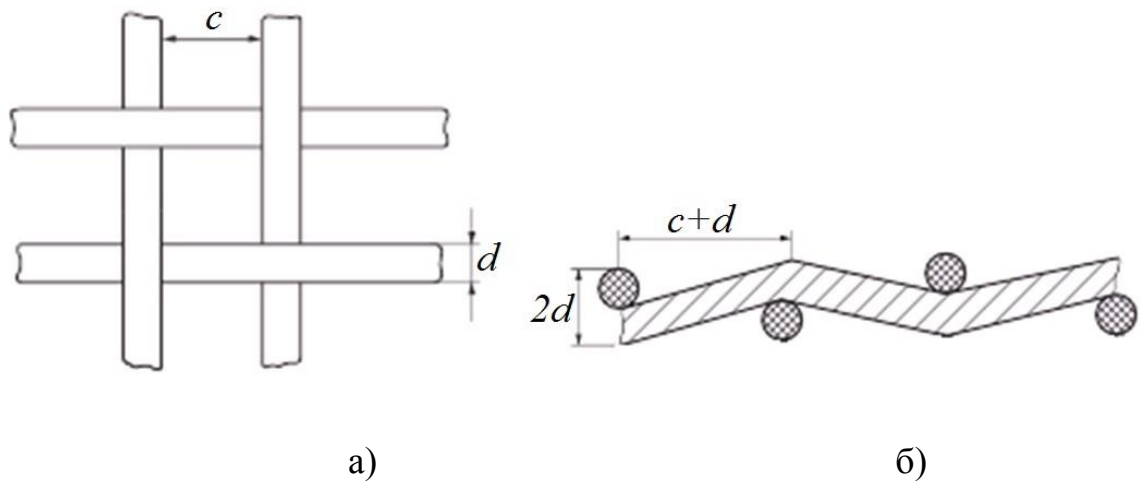


Рис. 3.3. Схема фрагмента пакета сеток: а – элементарная ячейка сетки в ее плоскости, б – сечение слоя сетки ортогональной плоскостью.

Выбраны два размера плетеных сеток изготовленных по ГОСТ 3826-82: $c = 2$ мм, $d = 0.5$ мм и $c = 3.2$ мм, $d = 0.8$ мм (рис. 3.4), у которых коэффициенты проницаемости (отношение площади свободного сечения одного слоя сетки к общей фронтальной площади поперечного сечения) $\beta_1 = 0.64$ - для обоих выбранных размеров, а также объемную концентрацию металла для периодической ячейки $\alpha_1 = 0,16$ и $\alpha_1 = 0,2$ соответственно, рассчитанных по формулам [106]: $\beta_1 = c^2 / (c + d)^2$, $\alpha_1 = (V_{яч} - V_{np}) / V_{яч}$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, где $V_{яч} = (c + d)^2 2d$ - объем элементарной ячейки одного слоя сетки, $V_{np} = \frac{\pi d^2}{2} \sqrt{(c + d)^2 + d^2}$ - объем проволочек в этой ячейке.

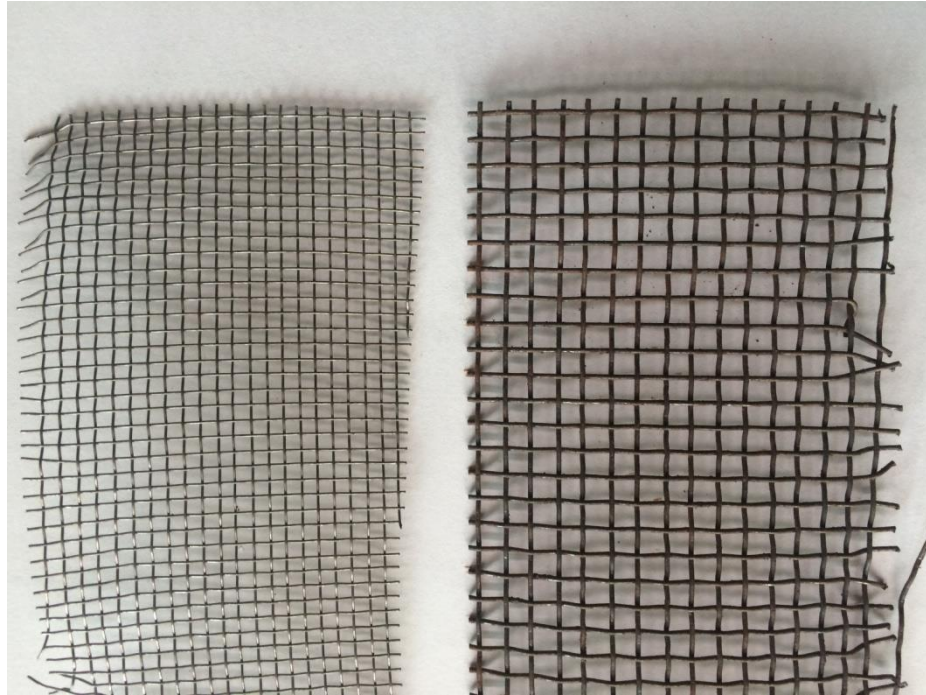


Рис. 3.4. Типы испытываемых сеток

3.1. Экспериментальные исследования при статическом сжатии и растяжении металлических сеток

3.1.1. Результаты испытаний пакетов сеток на сжатие по нормали к слоям

Для испытаний на статическое сжатие была выбрана сетка 2×2 мм и диаметром проволоки 0,5 мм. Образцы для статических испытаний на сжатие состояли из 10 или 20 слоев сетки. Каждый слой сетки представлял собой сплетение взаимно перпендикулярных проволок. Образцы для испытаний на сжатие имели размеры в плане $a \times b = 60 \times 60$ мм, где a и b - ширина и длина образца соответственно (рис 3.5). По ширине и длине образца умещается 23 проволоки. Полная толщина образца составляет $h \approx 7,5$ или 14 мм. Испытания образцов на сжатие проводились на сервогидравлической испытательной машине МИУ - 500К с предельным усилием на сжатие – 500 кН. Машина обладает программным управлением режимами нагружения, обеспечивающим автоматическое построение диаграмм деформирования и

выдачу полученной информации в цифровом виде. Процесс деформирования образца регистрируется с помощью высокоточного датчика 7WA, встроенного в установку и связанного с подвижной траверсой машины, и штатного динамометра с погрешностью измерения 1% от измеряемой величины.

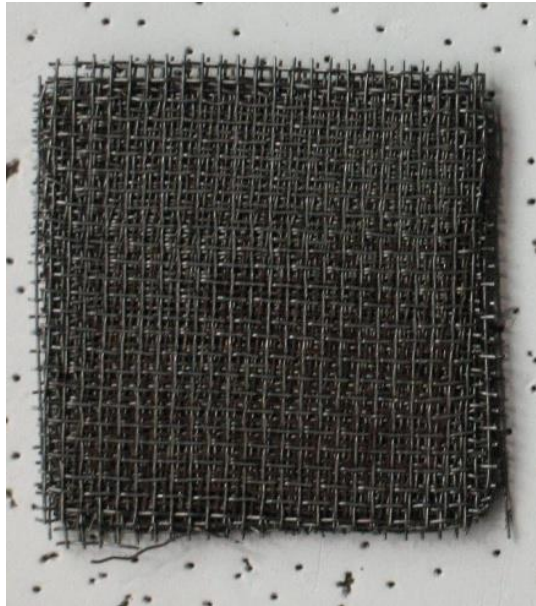


Рис. 3.5.

Максимальное усилие на сжатие пакета сеток по нормали к слоям достигало 400 кН. Наблюдались большие деформации образцов. По результатам экспериментов построены диаграммы деформирования (рис. 3.6.) для истинной (логарифмической) деформации $\varepsilon_{ист} = \ln(l/l_0)$, и технической деформации (деформации Грина) $\varepsilon = l/l_0 - 1$, где l – текущая толщина, l_0 – начальная толщина пакета сеток. Обработанные данные приведены на рис. 3.6, где синяя кривая - соответствует логарифмической деформации, красная кривая - деформации Грина.

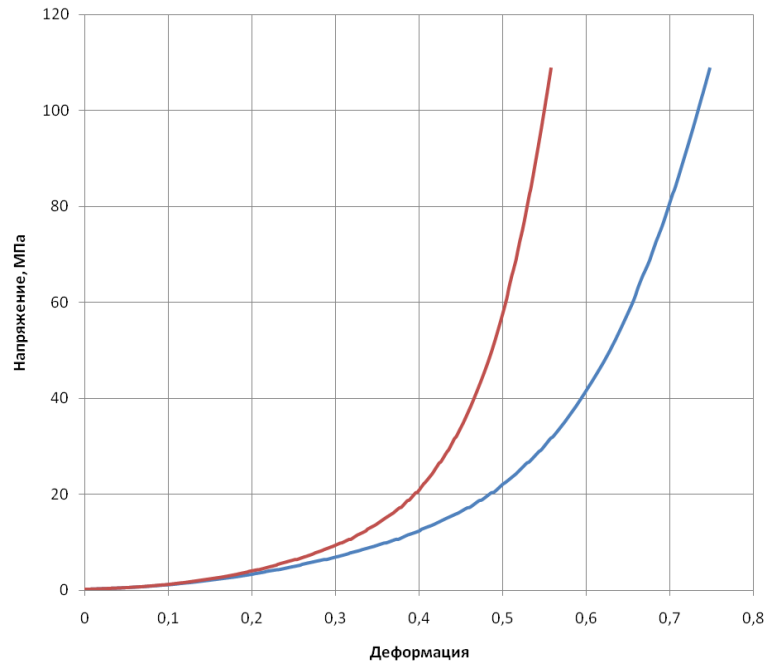


Рис. 3.6.

На рис. 3.7 приведена кривая деформирования пакета сеток для технической деформации, полученная в настоящей работе (синяя кривая) и в статье [106] (красная кривая, пунктир – линии разгрузки). Видно, что полученные в настоящей статье зависимости качественно близки к кривым, приведенным другими авторами.

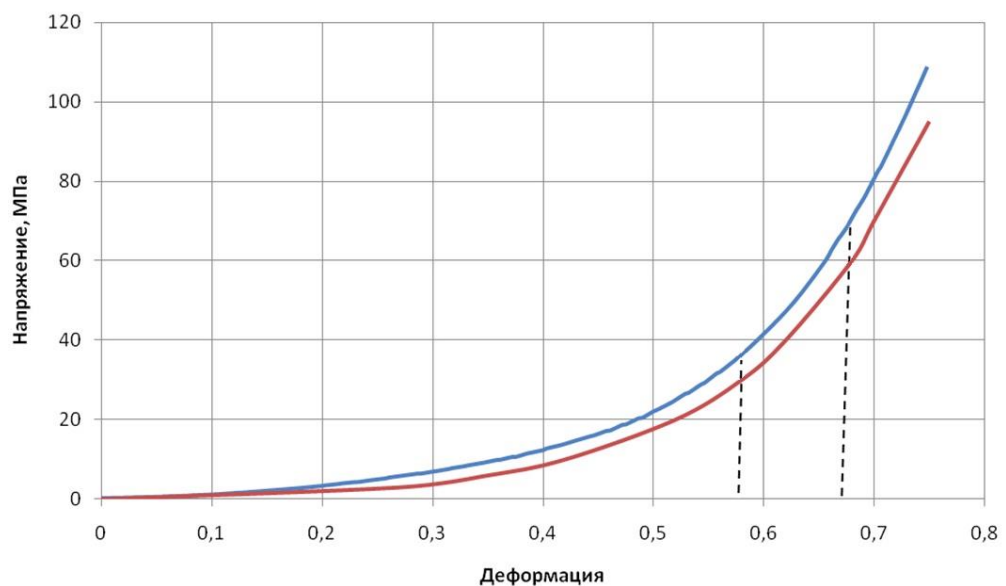


Рис. 3.7 Диаграмма статического сжатия с разгрузкой

В табл. 3.1 приведена толщина пакета, состоящего из 20 слоев уложенных друг на друга сеток $d = 0.5$ мм, в зависимости от силы сжатия.

Табл. 3.1

№, п/п	1	2	3	4	5
Сила сжатия, кН	0	100	200	300	400
Толщина пакета, мм	14	6,1	4,9	4,1	3,5

Для получения характеристик одного слоя с целью дальнейшего сравнения с результатами численных расчетов, проведены эксперименты на статическое сжатие одного слоя металлической плетеной сетки. Слой металлической сетки аналогичный слою в пакете, размеры образца составляли 110×20 мм. По результатам эксперимента были получены данные по силе и перемещению образца (рис. 3.8). Характерный перегиб в окрестности точки перемещения 0,47 мм объясняется переходом от сжатия только узлов плетения сетки, к сжатию всех проволок.

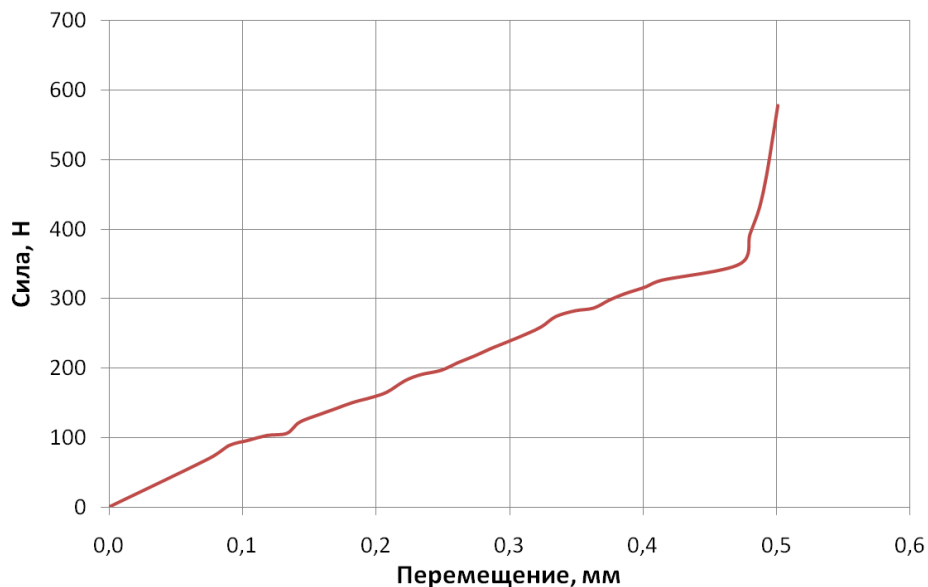


Рис. 3.8.

3.1.2. Результаты испытаний предварительно обжатых по нормали пакетов сеток на растяжение по направлению проволок

Статические испытания на растяжение вдоль одного из направлений проволок сетки проводились на сервогидравлической установке Zwick/Roell Amsler HA 100, оснастка и зажатый в ней образец изображен на рис. 3.9, машина дополнительно оснащена гидравлическими захватами. Управление и регистрация процесса нагружения осуществлялась с помощью программного обеспечения «Test Xpert II».



Рис. 3.9

С целью анализа влияния базы (рабочая часть образца) проведены испытания с длиной базы 2 мм, 5 мм, 7 мм, 10 мм, 14 мм, 20 мм. До размера базы 7 мм обнаружилось заметное отличие в кривых деформирования, при больших размерах базы кривые совпадали. Поэтому дальнейшие экспериментальные исследования были проведены при длине рабочей части образца 14 мм, что соответствовало и условиям проведения динамических испытаний (п. 3.2). Предварительно обжатые образцы до напряжений: 1 – $\sigma_{сж} = 0$ МПа, 2 – $\sigma_{сж} = 5$ МПа, 3 – $\sigma_{сж} = 20$ МПа, 4 – $\sigma_{сж} = 40$ МПа, 5 – $\sigma_{сж} = 80$ МПа,

устанавливались в захваты сервогидравлической машины Amsler HA 100 и растягивались. Результаты испытаний приведены на рис. 3.10. Для одного из образцов при $\sigma_{сж} = 40$ МПа программа испытаний включала поэтапные нагрузки и разгрузки, показанные на рис. 3.11.

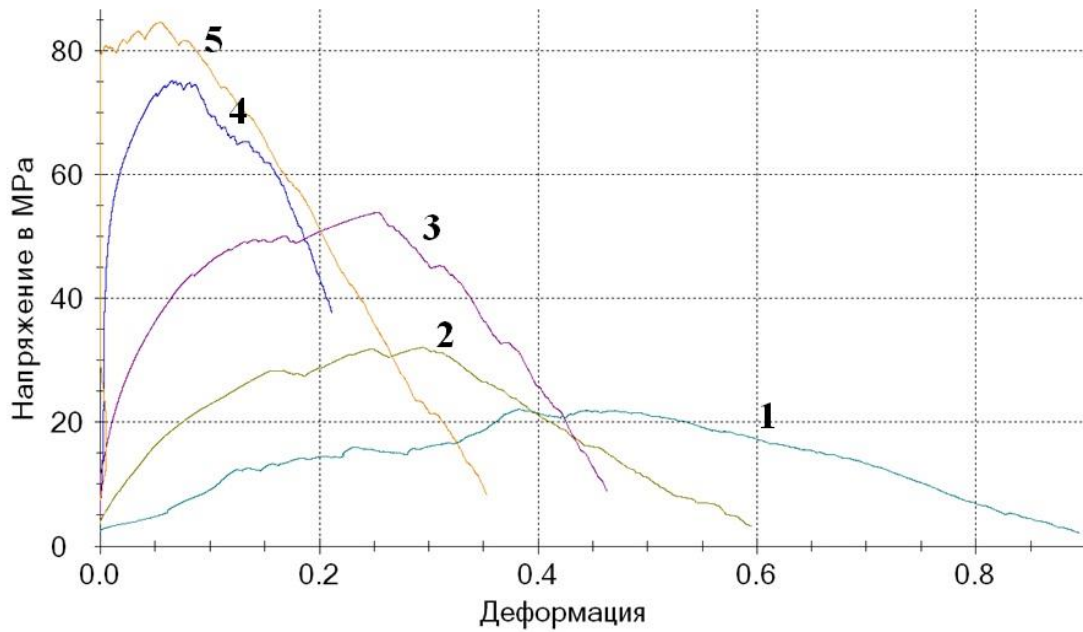


Рис. 3.10. Диаграммы статического растяжения вдоль нитей сетки

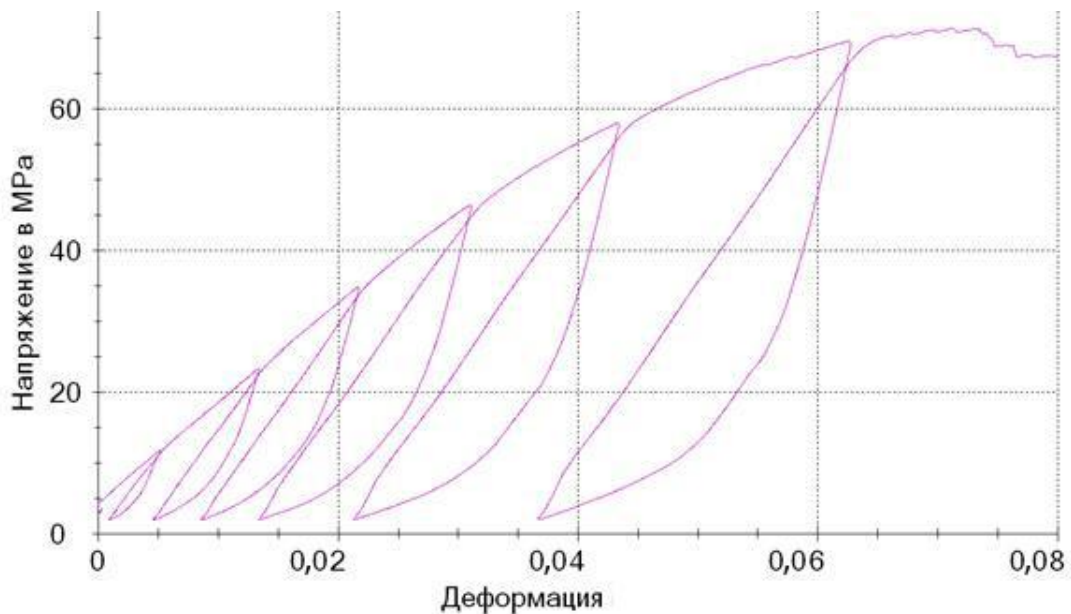


Рис. 3.11. Диаграмма статического растяжения с разгрузками

На рис. 3.11 видна слабая изменяемость модуля упругости, мало зависящего от степени деформации образца. Пакеты сеток, как и в случае испытаний на сжатие по нормали, проявляют при растяжении вдоль проволок нелинейные свойства и испытывают необратимые деформации. Квазистатическое деформирование пакетов сеток при растяжении обнаруживает выраженный нелинейный характер и существенную зависимость диаграмм растяжения от степени предварительного обжатия. По мере увеличения степени предварительного обжатия пакетов сеток по нормали к слоям, происходит увеличение напряжения, необходимого для растяжения образцов по направлению проволок, т.е. происходит своеобразное «упрочнение».

Ниспадающие участки кривых свидетельствуют о разрушении образцов. Максимумы кривых характеризуют предельные значения напряжений и деформаций – характеристики прочности пакетов. В табл. 3.2 приведена зависимость предельных растягивающих напряжений и деформаций от напряжений сжатия (1-я строка) и деформации предварительного сжатия образца по нормали к слоям (2-я строка). На рис. 3.12 изображены зависимости предельных растягивающих напряжений (слева) и деформаций (справа) от напряжений сжатия, на рис. 3.13 зависимость предельных растягивающих напряжений (слева) и деформаций (справа) от деформации предварительного сжатия образца.

Табл. 3.2

- $\sigma_{сж}$, МПа	0	5	20	40	80
- $\epsilon_{сж}$	0	0,25	0,5	0,6	0,7
$\sigma_{пред}$, МПа	23	32	54	75	84
$\epsilon_{пред}$	0,45	0,3	0,2	0,09	0,06

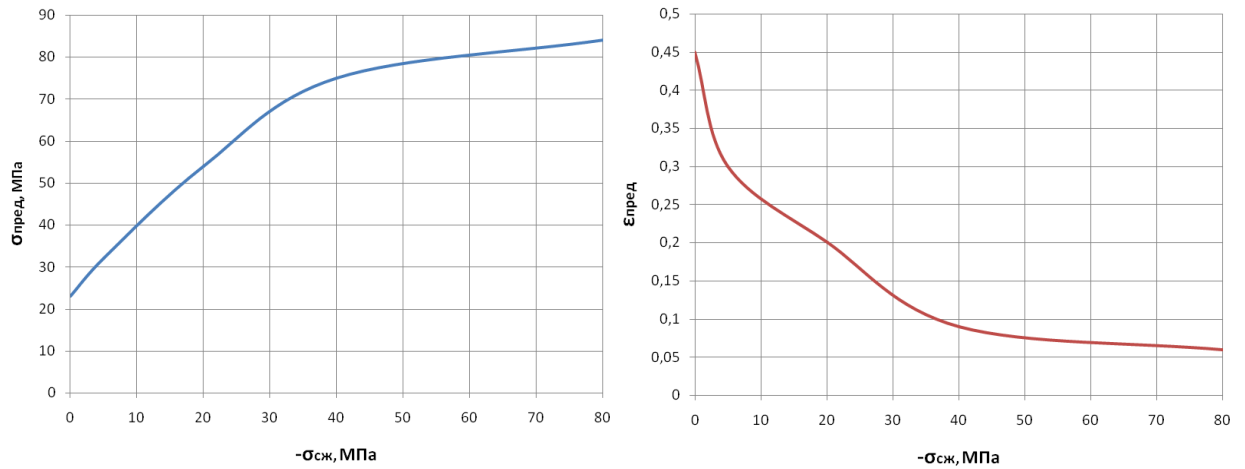


Рис. 3.12.

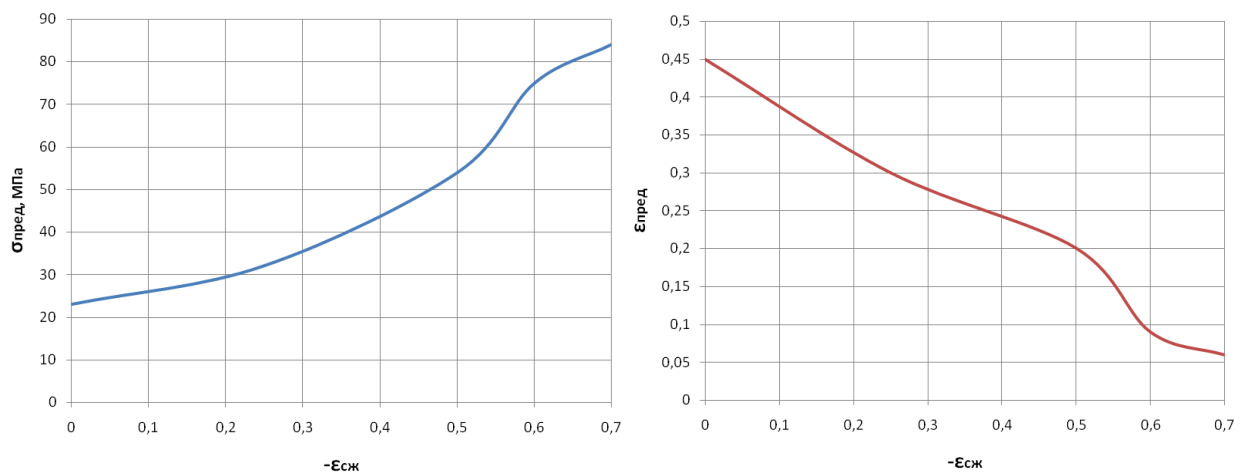


Рис. 3.13

Помимо увеличения предельных напряжений, происходит уменьшение предельных деформаций растяжения при увеличении степени обжатия.

Для изучения эффекта «упрочнения», т.е. увеличения силы на растяжение при возрастании степени предварительного обжатия пакетов сеток, проведены испытания на растяжение одного слоя сетки предварительно обжатой плетеной сетки до толщины $0,3h$. Использовалась аналогичная сетка, выполненная по ГОСТ 3826-82 с аналогичными параметрами плетения. Образец был изготовлен в размере 110×20 мм,

рабочая база образца составляла 14 мм, на растяжение образца вдоль нитей работало 8 проволок. По результатам эксперимента было выявлено, что предварительное обжатие «упрочняет» и один слой металлической сетки, как и при испытании многослойного пакета. Разрушающее перемещение также уменьшается с ростом силы предварительного обжатия. На рис. 3.14 приведены полученные экспериментальные результаты на растяжение вдоль нитей в осях «сила-перемещение». На рис. 3.15 приведены кривые в пересчете на одну из восьми растягиваемых проволок длиной 2,5 мм (для последующего сравнения с численными исследованиями, п.3.3). На графиках отмечены следующие кривые: 1 – сетка без предварительного статического обжатия, 2 – обжатие сетки до $0.5h$, где h – начальная толщина слоя ($h = 1$ мм), 3 – обжатие до $0.3h$.

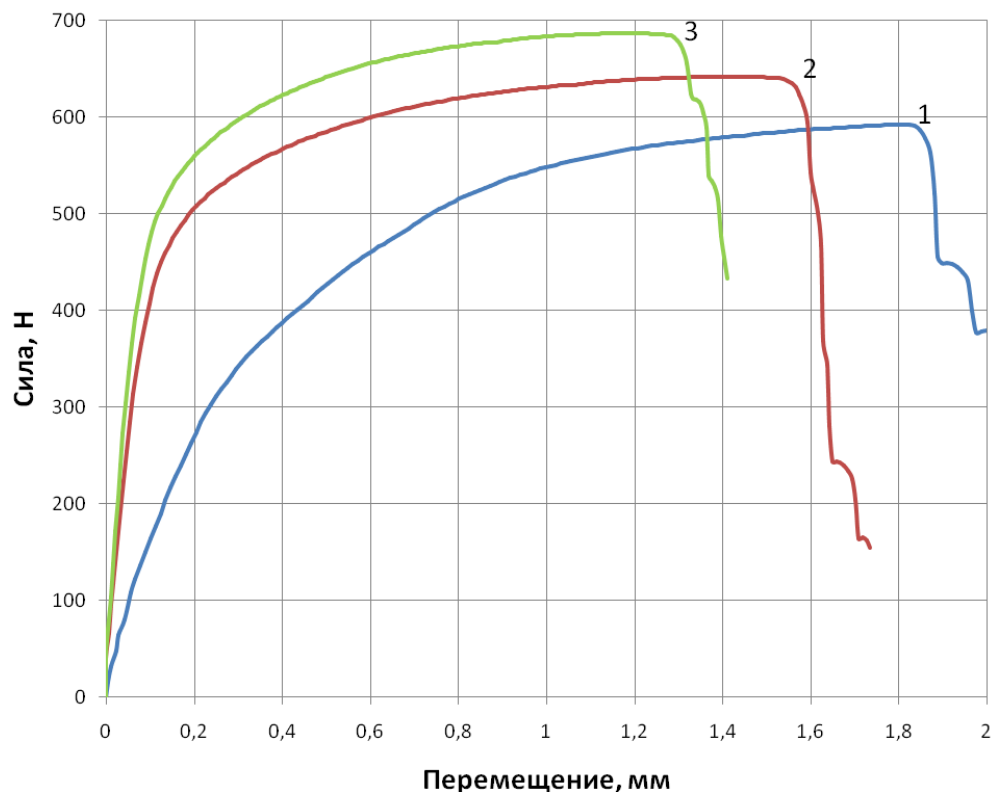


Рис. 3.14.

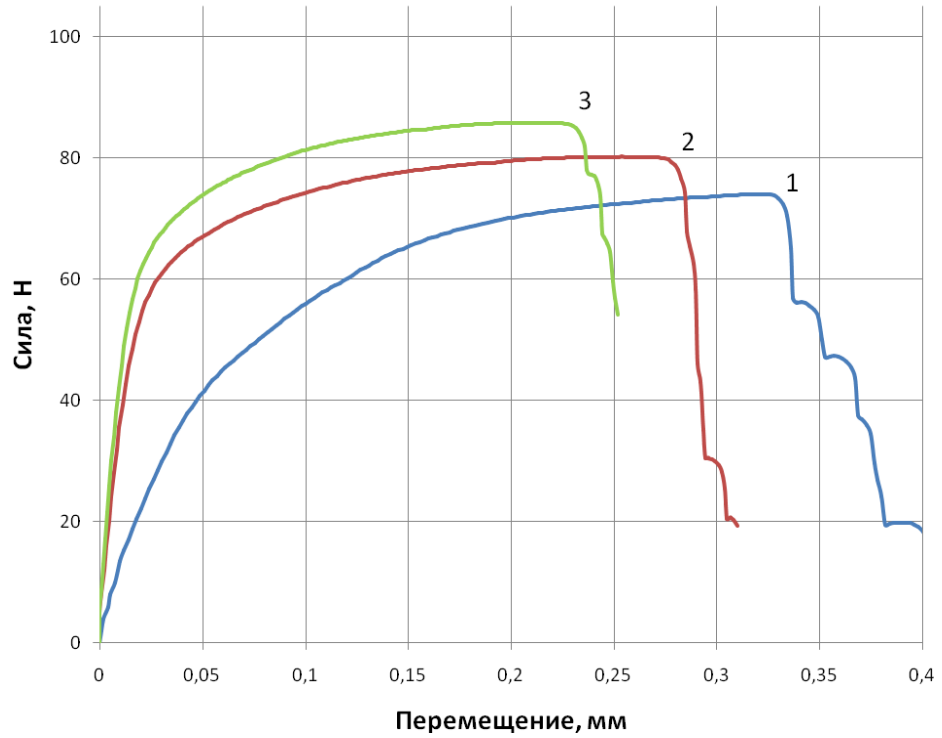


Рис. 3.15.

После предварительного обжатия слоя сетки, был визуально рассмотрен узел плетения под микроскопом (рис. 3.16) для обжатия 0,5h. Видно пятно контакта с обжимаемой плоскостью. Оно одинаково по форме и площади для обеих проволок узла плетения.



Рис. 3.16.

Замерены (рис. 3.17.) параметры проволоки в обжатом состоянии, ее максимальная ширина составила 0,75 мм, толщина - 0,25 мм в узле плетения при начальном диаметре проволоки 0,5 мм.

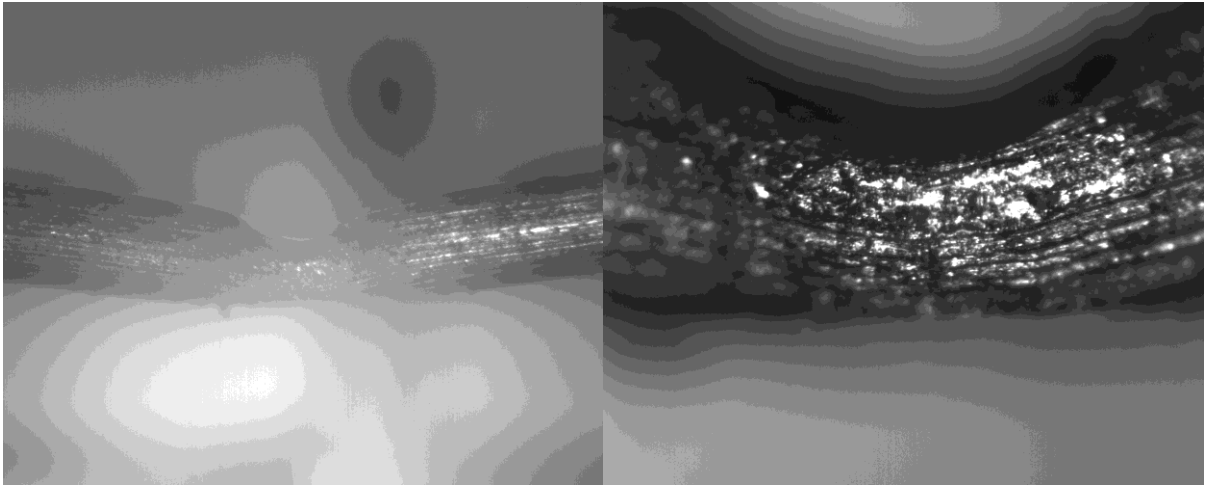


Рис. 3.17.

3.2. Экспериментальные исследования ортотропных пакетов сеток при динамическом сжатии и растяжении

Проведены экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств конструктивно ортотропных пакетов плетеных металлических сеток при динамическом нагружении. Пакет сетки, формируемый послойным наложением сеток с сохранением ориентации проволок, сопротивляется сжатию по нормали к слоям сетки – первая ось ортотропии и растяжению вдоль двух направлений проволок – другие оси ортотропии.

Экспериментальные исследования пакетов плетеных металлических сеток проводились на экспериментальной установке с разрезным стержнем Гопкинсона. Для испытаний на динамическое сжатие была выбрана сетка 2×2 мм с диаметром проволоки 0,5 мм и сетка $3,2 \times 3,2$ мм с диаметром проволоки 0,8 мм, с одинаковым значением коэффициента проницаемости

одного слоя $\beta_1 = 0,46$ и близким по объемному содержанию металла – 0,16 и 0,2 соответственно.

3.2.1. Результаты испытаний пакетов сеток на сжатие по нормали к слоям

Сжатие по нормали к слоям пакетов сеток проведено для двух видов образцов: кругового сечения рис. 3.18 слева, диаметром 20 мм, и квадратного сечения рис. 3.18 справа со стороной 50 мм. Испытывались образцы, состоящие из 10 и 20 слоев сетки, наложенных друг на друга. Направления проволок были одинаковы для всех слоев.

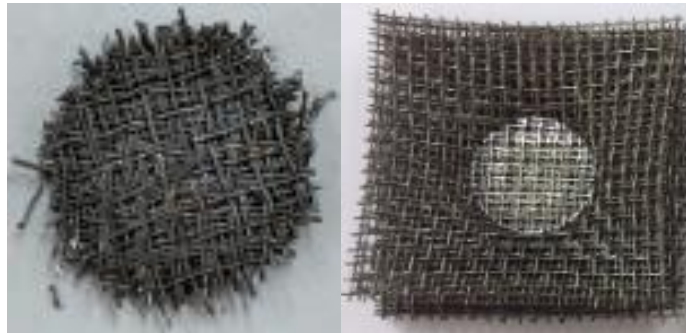


Рис. 3.18. Вид образцов для динамического сжатия

Схемы экспериментов для различного вида образцов показаны на рис. 3.19 и рис. 3.20. В экспериментах использовалась динамическая испытательная установка с высокопрочными стальными стержнями Гопкинсона диаметром 20 мм.

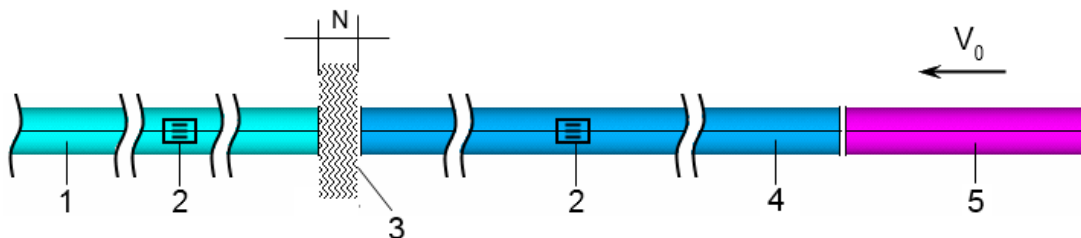


Рис. 3.19. Схема эксперимента с образцом квадратного сечения

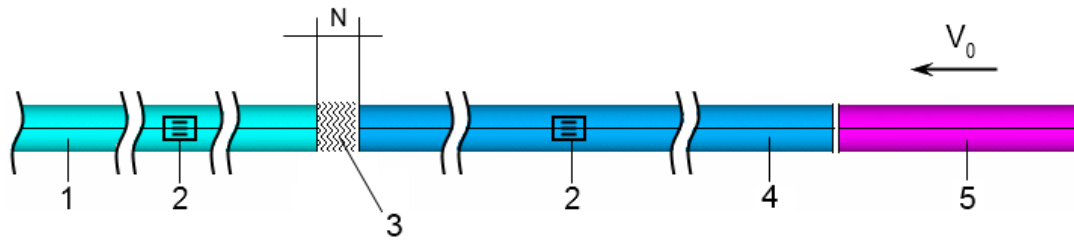


Рис. 3.20. Схема эксперимента с образцом круглого сечения

При динамическом сжатии начальная скорость ударника варьировалась в пределах 12-25 м/с. Деформирование образца проходило в несколько циклов, связанных с распространением волн сжатия и растяжения в стержнях. Скорость деформации в экспериментах изменялась в пределах $1500-3500 \text{ с}^{-1}$. Нагружение проводилось стальным ударником длиной 300 мм. На рис. 3.21 показан образец, зажатый между стержнями экспериментальной установки на динамическое сжатие.

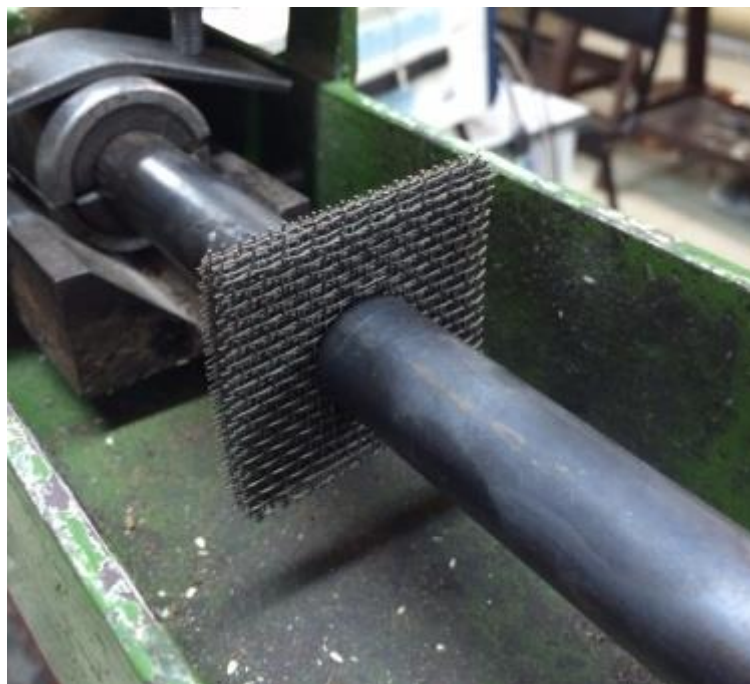


Рис. 3.21. Фотография образца зажатого между мерными стержнями экспериментальной установки

На рис. 3.22 показаны диаграммы деформирования образцов при сжатии по нормали к слоям сеток, включающие участки активного нагружения и

разгрузки: 1 - сетка 2×2 $d = 0,5$ мм образец из 10 слоев, 2 - сетка 2×2 $d = 0,5$ мм образец из 20 слоев, 3 - сетка $3,2 \times 3,2$ $d = 0,8$ мм образец из 10 слоев, 4 - сетка $3,2 \times 3,2$ $d = 0,8$ мм образец из 20 слоев. Здесь и далее в качестве меры деформации принимается техническая деформация. Видно, что деформирование при активном нагружении носит ярко выраженный нелинейный характер, в то время как разгрузочные ветви близки к прямым линиям. Погрешность в проведенных экспериментах не превышала 7-10%. Разгрузочный модуль E_r в проведенных испытаниях изменялся от 19 до 26 ГПа. Кривые деформирования слабо зависят от количества слоев, формы образца и типа рассматриваемых сеток. Полученные при активном нагружении динамические кривые деформирования располагаются значительно выше статической кривой (на рис. 3.22 результаты статических испытаний обозначены красной кривой), что свидетельствует о заметном отличии деформационных характеристик пакетов плетеных сеток в динамическом и статическом режимах нагружения.

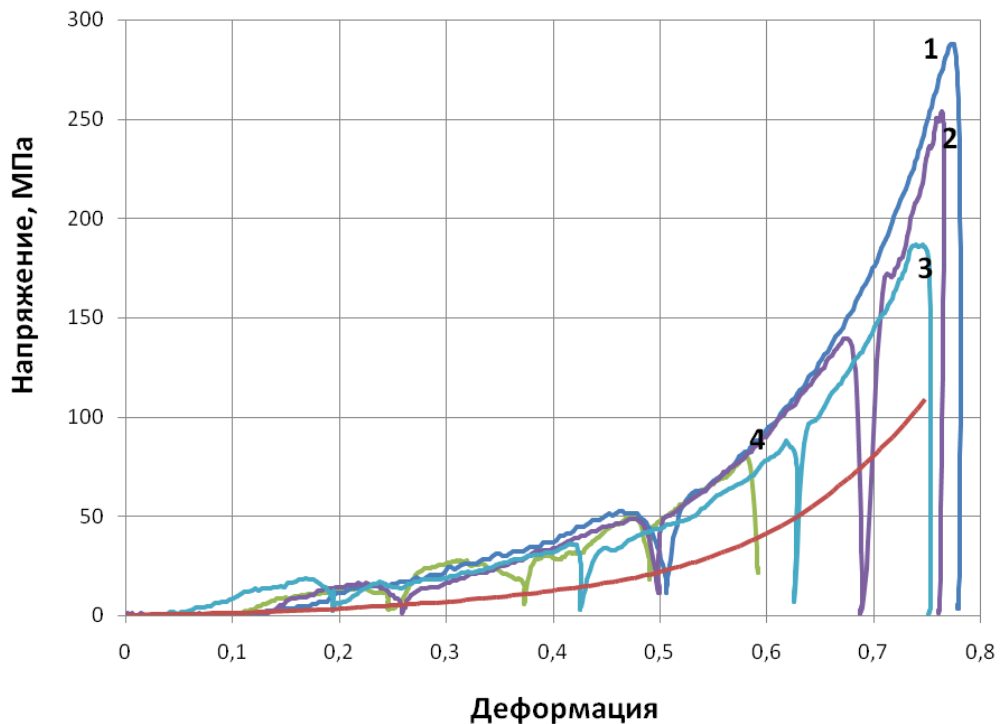


Рис. 3.22. Диаграммы деформирования на сжатие по нормали к слоям сетки

3.2.2. Результаты испытаний предварительно обжатых по нормали пакетов сеток на растяжение по направлению нитей

Для испытания многослойных пакетов плетеных металлических сеток в условиях ударного растяжения по направлению проволок была применена схема эксперимента, изображенная на рис. 3.23.

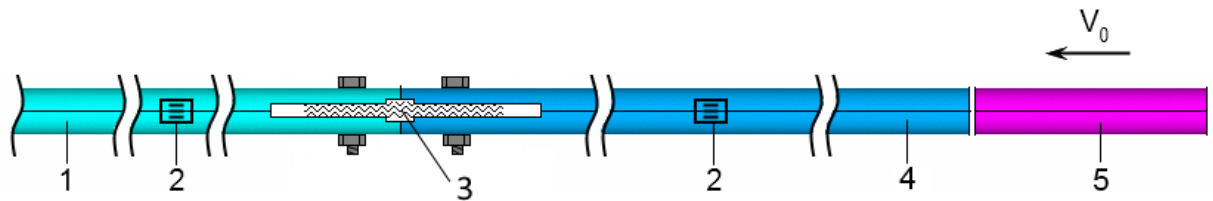


Рис. 3.23. Схема эксперимента на динамическое растяжение

Плоский образец, предварительно обжатый по нормали к слоям сетки, закрепляется в вилках мерных стержней с помощью болтовой стяжки (рис. 3.24).

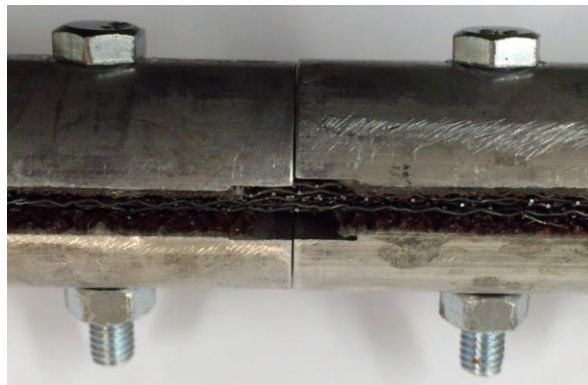


Рис. 3.24. Образец, зажатый в вилках мерных стержней

Торцы стержней при этом стыкуются. Система нагружается ударником, разогнанным в пневматической пушке. Сформировавшийся при этом сжимающий импульс проходит через стык, не деформируя образец. Отражаясь от свободного торца стержня 1, этот импульс меняет знак и превращается в импульс растяжения, который движется в сторону образца и нагружает его. Регистрация деформации в тензодатчиках 2 позволяет рассчитать деформацию образца и силу, которая действовала на образец в

процессе нагружения. Использованная в экспериментах установка состояла из дюралевых мерных стержней (1, 4) диаметром 30 мм.

При экспериментах на динамическое растяжение пакетов в плоскости слоев сетки, вдоль направления проволок (ось ортотропии) испытывался образец, состоящий из 10 слоев сетки $2 \times 2 d = 0.5$ мм, размеры образца 110×20 мм. Одной из целей исследования, как и при квазистатических испытаниях, являлось определение зависимости деформационных характеристик на растяжение от предварительного квазистатического сжатия по нормали к слоям сетки. Толщина образца определялась силой предварительного обжатия по нормали к слоям. Длина рабочей части образца равна 14 мм. На рис. 3.25 приведен начальный вид образца (слева) и образца, разрушенного в процессе ударного растяжения (справа). Проскальзывания отдельных проволок не наблюдалось.

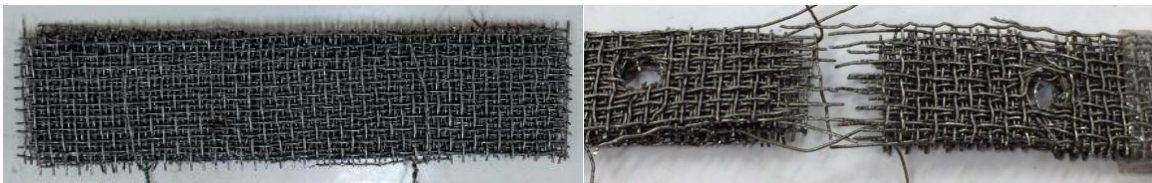


Рис. 3.25. Образец до и после эксперимента

На рис. 3.26 показаны усредненные динамические диаграммы на растяжение с допустимыми интервалами. На рис. 3.27 показаны усредненные и аппроксимированные по нескольким опытам диаграммы на растяжение при различных напряжениях предварительного статического обжатия по нормали $\sigma_{сж}$. Кривая 1 получена при $\sigma_{сж} = 0$ МПа, кривая 2 – при $\sigma_{сж} = 25$ МПа, кривая 3 – при $\sigma_{сж} = 50$ МПа, кривая 4 – при $\sigma_{сж} = 100$ МПа. Результаты проведенного исследования не выявили существенного влияния предварительного обжатия в исследуемом диапазоне, разброс полученных кривых деформирования не превышает разброса кривых деформирования, полученных в одинаковых условиях.

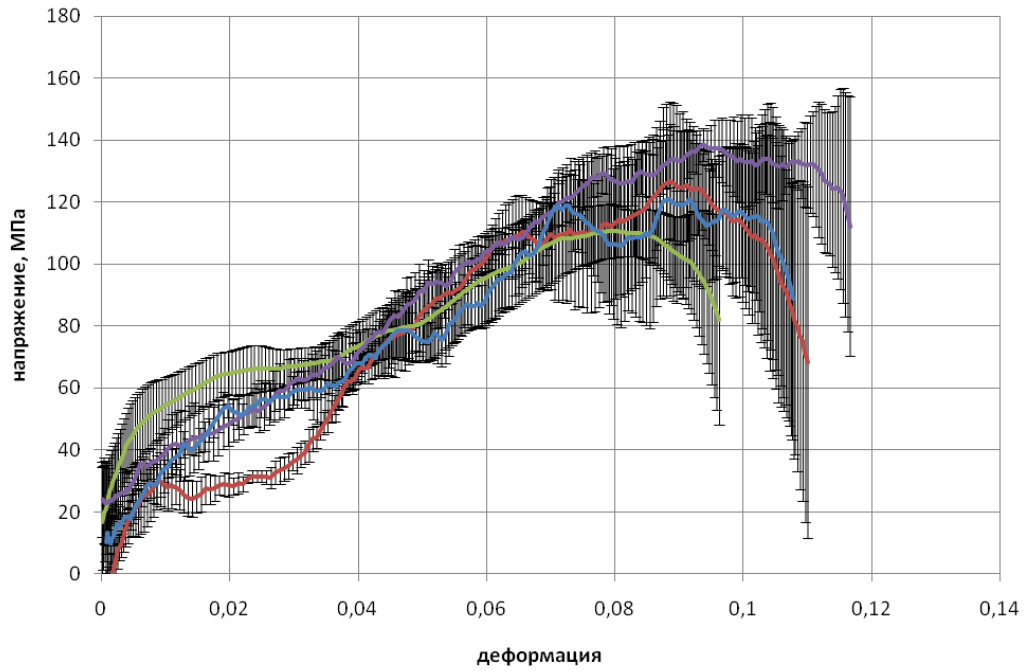


Рис. 3.26. Диаграммы динамического растяжения вдоль нитей сетки с допустимым интервалами

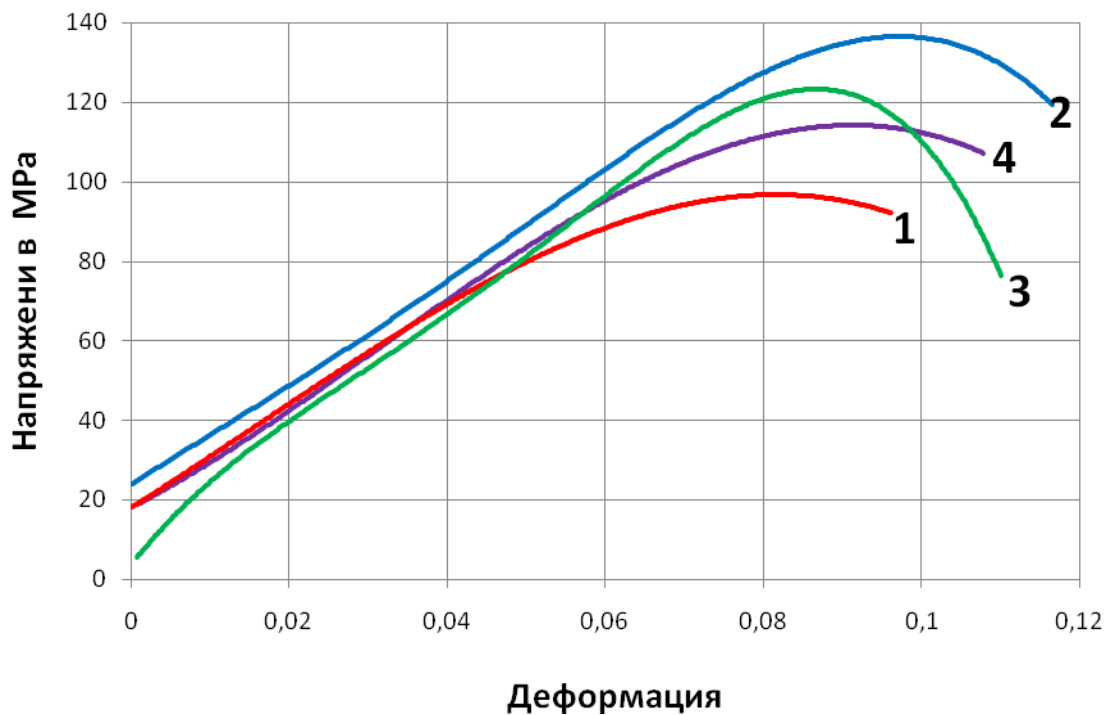


Рис. 3.27. Диаграммы динамического растяжения вдоль нитей сетки

В широком диапазоне деформаций растяжения нагружение происходит с постоянным модулем $E_d = 1,3$ ГПа. При растяжении в динамических испытаниях параметры разгрузок получить не удастся.

3.3. Численное моделирование статического деформирования плетеных металлических сеток

С целью выявления причин, вызывающих экспериментально наблюдаемый эффект «упрочнения» предварительно обжатых сеток при статическом растяжении вдоль проволок, проведено численное моделирование. Моделирование проводилось в вычислительной системе ANSYS v 17.2 методом конечных элементов. Для моделирования была выбрана типовая ячейка плетеной сетки (рис. 3.28). Расчетная область состоит из четырех трехмерных цилиндрических тел (проволок). В силу симметрии берется половина сечения проволок. На торцах проволок также выполняются условия симметрии. В начальный момент времени напряжения и деформации отсутствуют. В данной задаче использовался алгоритм расчета идеального симметричного контакта тел без трения и с трением, когда в каждой контактной области используются две контактные пары. Коэффициент трения принимался равным 0,3. Сжатие проводилось парой абсолютно жестких плоскостей, движущихся в направлении оси Z симметрично навстречу друг другу. Выбран один из вариантов сжатия в проведенных выше экспериментах - до половины начальной толщины слоя (до одного диаметра проволоки d). Весь процесс моделируемого нагружения был разбит на три этапа:

1. Обжатие сетки, перпендикулярно плоскости слоя вдоль оси Z ;
2. Снятие нагрузки с обжатого образца;
3. Растяжение по направлению нитей вдоль оси X в плоскости сетки, движением боковых плоскостей симметрии аналогично обжатию.

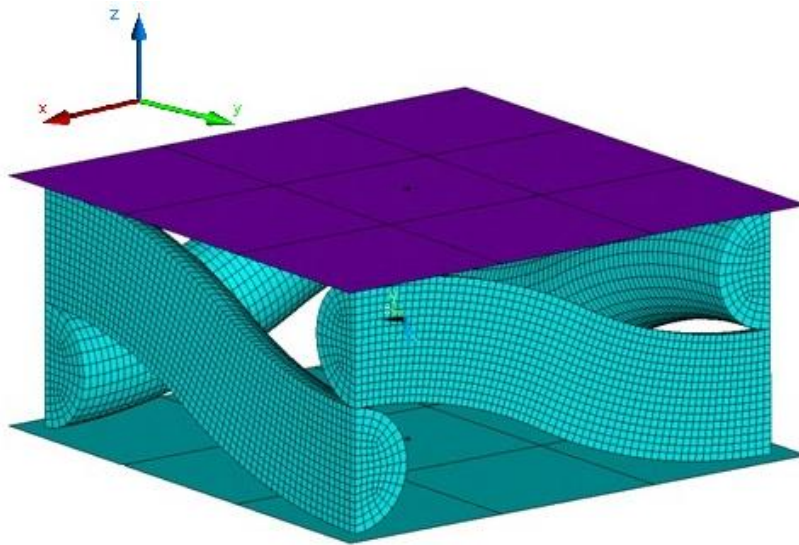


Рис. 3.28. Расчетная модель.

Геометрическая модель проволоки получена вытягиванием полукруглого сечения вдоль оси. Ось проволоки состоит из двух сопряженных дуг окружности. Для построения конечно-элементной модели использовался 20 узловой КЭ второго порядка SOLID185 с сокращенным $(2 \times 2 \times 2)$ интегрированием. Модель каждой из проволок состоит из 6144 КЭ, всего 24576 КЭ. Общее количество неизвестных составило 321660. Для описания поведения материала использовалась мультилинейная модель пластичности с изотропным упрочнением. Для получения достоверных результатов расчетов использовалась полученная автором экспериментально диаграмма деформирования, соответствующая материалу, из которого изготовлена сетка (сталь 3) (рис. 3.29 синяя кривая). Линейный модуль упрочнения при больших деформациях равен 1ГПа.

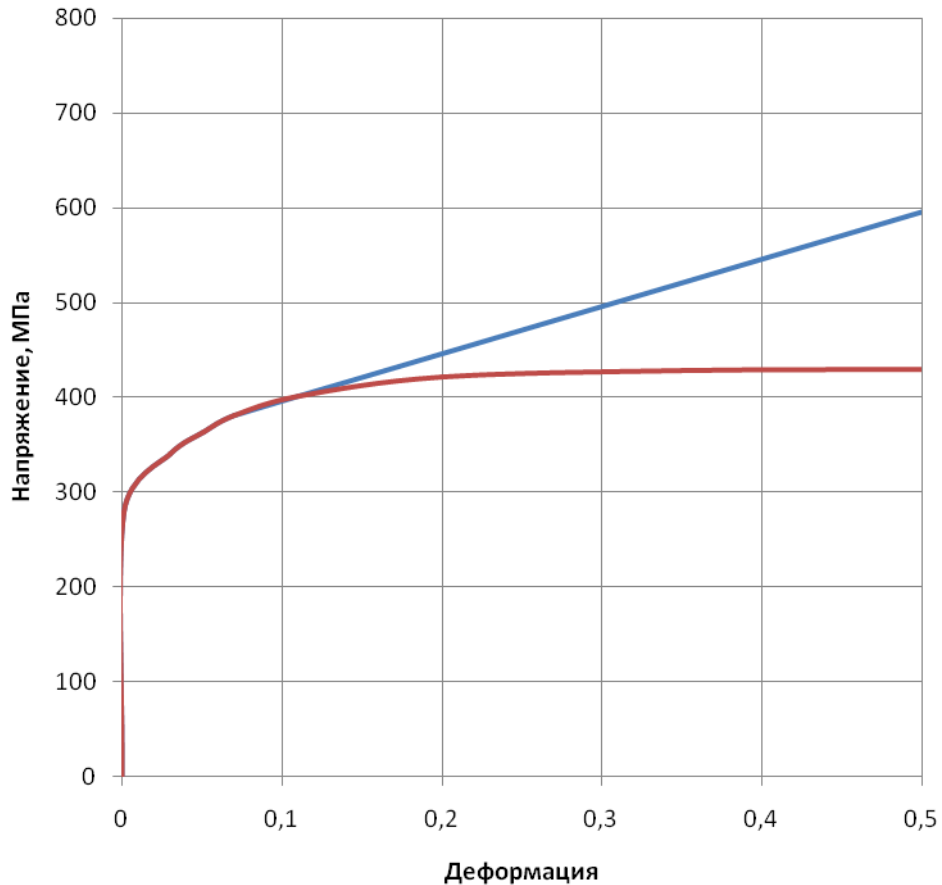


Рис. 3.29. Диаграмма деформирования материала.

Первый этап моделирования (сжатие) был реализован за 200 шагов без изменения величины шага. Это обусловлено необходимостью уменьшить искажения формы конечных элементов при больших деформациях. На втором и третьем этапах нагружения применялась автоматическая коррекция величины шага, что позволило адаптивно увеличить шаг и сократить временные затраты на решение. Второй этап пройден за 25 шагов, третий - за 22 шага. Задача решалась в параллельном режиме на сервере HP ProLiant DL580. Время, затраченное на решение, составило около 8 часов. На рис. 3.30 и 3.31 приведено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу и эквивалентных пластических деформаций после первого этапа. Уровень эквивалентных напряжений во всех проволоках, за исключением небольших локализованных зон, превышает 450 МПа. Наблюдается развитое

пластическое течение во всех проволоках, максимальные значения эквивалентных пластических деформаций достигают 1.3.

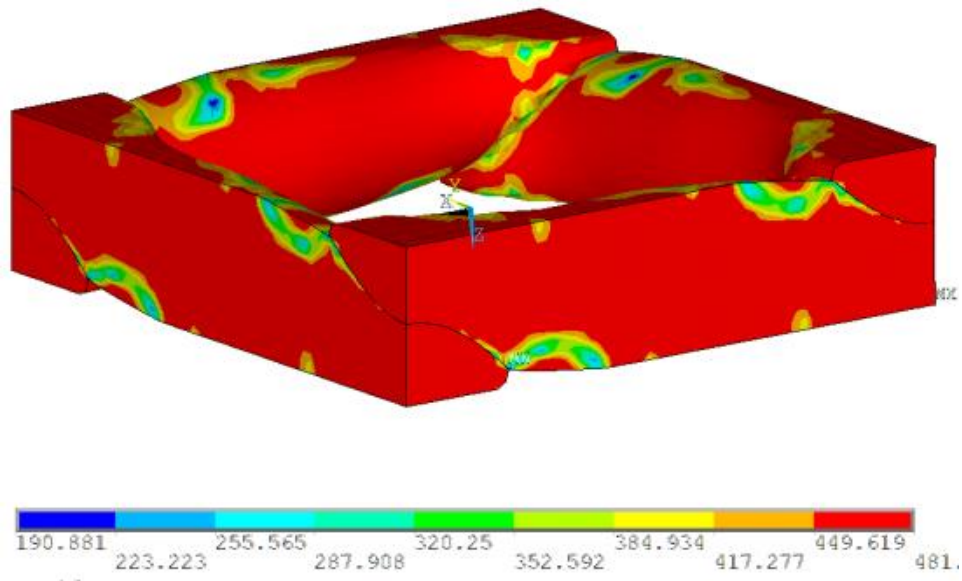


Рис. 3.30. Распределение эквивалентных напряжений после обжатия.

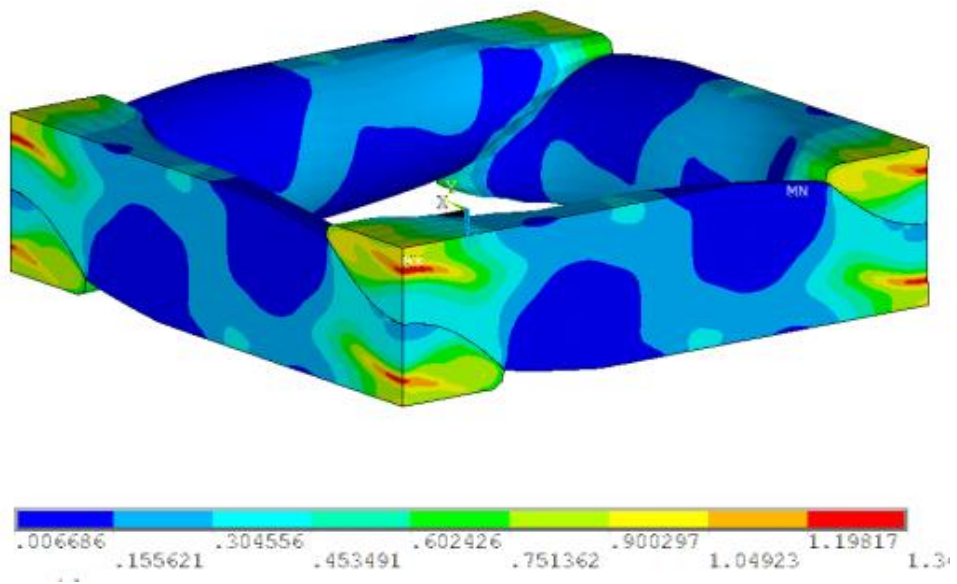


Рис. 3.31. Распределение эквивалентных пластических деформаций.

По результатам расчета была замерена ширина сечения в узле плетения проволок, которая составила 0.77 мм, то есть увеличилась в 1.55 раза, что соответствует экспериментальным данным (рис. 3.17). Наблюдается высокая

неоднородность деформированного состояния, особенно в окрестности сжатого узла плетения. На рис. 3.32 приведены зависимости силы сжатия на расчетную ячейку сетки от перемещения. Зависимость имеет резкий излом, вызванный значительным увеличением площади контакта проволок с обжимающими плоскостями в результате пластического течения материала. Сравнение экспериментальной кривой (красная) и кривой, полученной численным моделированием (синяя), показывает хорошее совпадение результатов, что свидетельствует о достоверности используемых математической и численной моделей. Сравнение результатов моделирования с учетом и без учета трения на контактной поверхности показало незначительное влияние сил трения.

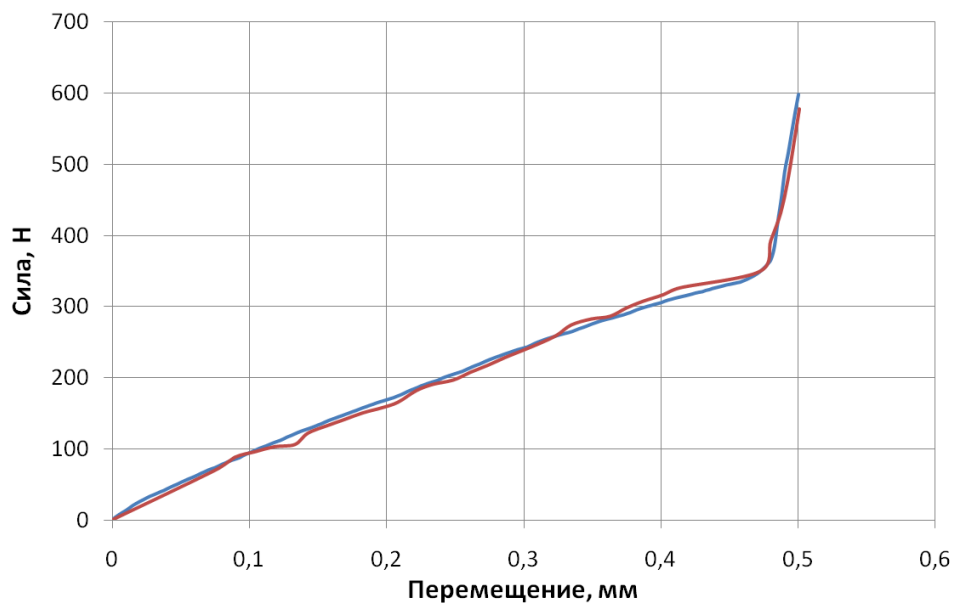


Рис. 3.32. Зависимость силы на расчетную ячейку от перемещения.

На рис. 3.33 приведено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу после второго этапа нагружения (разгрузка после сжатия). Увеличилась неоднородность распределения остаточных напряжений.

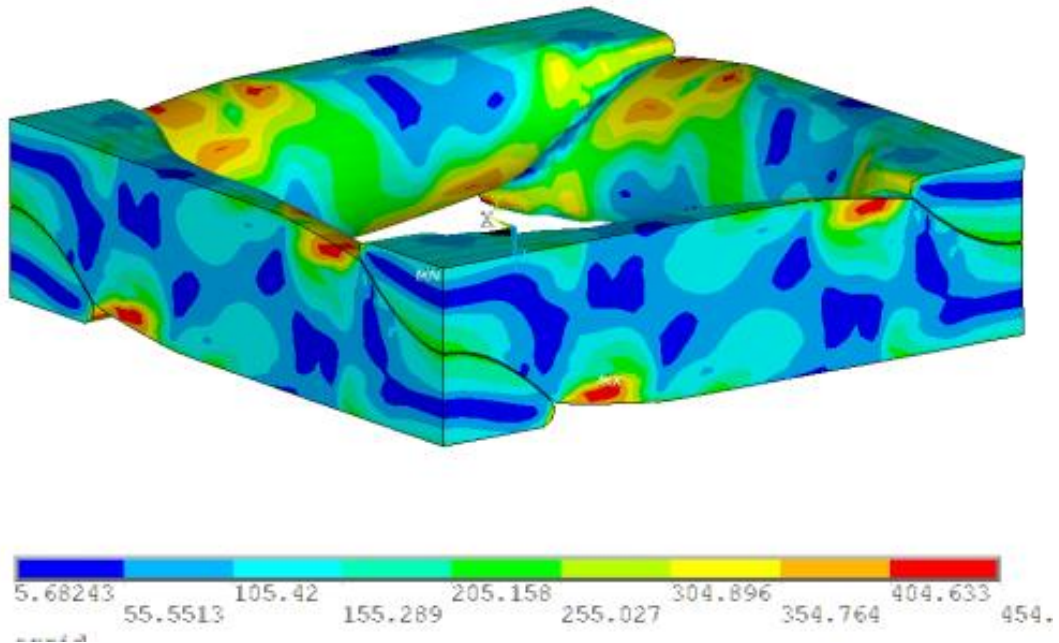


Рис. 3.33. Распределение эквивалентных напряжений после разгрузки.

Численное моделирование третьего этапа на растяжение ячейки симметрии вдоль оси X , проведено с учетом упрочнения материала после сильного обжатия узлов плетения (рис. 3.29 синяя кривая). Уровень пластической деформации в узлах достигал 140 %. Синяя кривая деформирования использовалась не для всей длины проволоки. Средняя часть проволоки фактически не подвергалась обжатию, поэтому здесь использовалась красная кривая деформирования (фактически без упрочнения). Этот участок выделен сиреневым цветом на рис. 3.34, где показана конфигурация расчетной ячейки симметрии до ее деформирования. При растяжении с целью локализации шейки в середине проволоки вводилось линейное возмущение геометрического диаметра в выделенной области, составляющее в центральном сечении 1% от d .

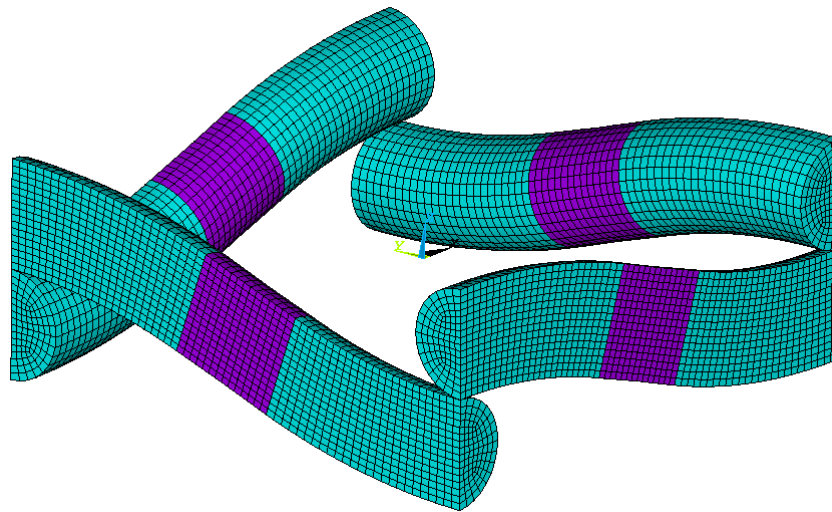


Рис. 3.34.

На рис. 3.35 показано распределение эквивалентных напряжений по Мизесу при растяжении сетки в направлении оси X. Растяжение существенно изменяет распределение эквивалентных напряжений, увеличивая их максимальное значение практически в два раза. Образование шейки снижает уровень напряжений в узле плетения (рис. 3.36) Происходит также перераспределение эквивалентных пластических деформаций особенно после образования шейки (рис. 3.37) На рис. 3.38 приведено распределение осевых напряжений σ_x до процесса образования шейки, также видно, что близкие по значению осевые напряжения распространились практически по всему сечению образца. При дальнейшем растяжении рис. 3.39 в центральной зоне формируется шейка, наблюдается падение напряжений по всему объему растягиваемой проволоки за исключением областей, входящих и примыкающих к узлам плетения. На рис. 3.40 приведено распределение пластической деформаций ϵ_x , также свидетельствующее о локализации пластической деформации в центральных сечениях растягиваемых проволок. Картина деформирования проволоки между узлами качественно соответствует картине, полученной Капустиным С.А. и др. [93] для цилиндрического образца. Как и в экспериментах, при наружном осмотре,

образование шейки и разрушение образца происходит между узлами (рис. 3.41 слева). Таким образом, результаты численного моделирования процесса упругопластического деформирования согласуются с результатами проведенных экспериментов.

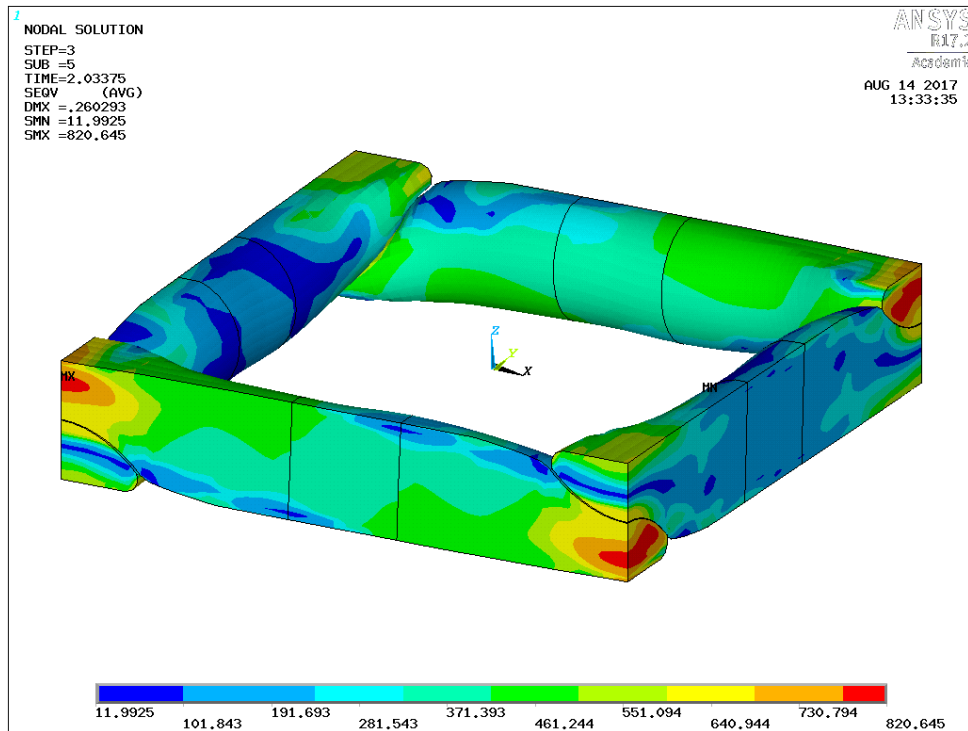


Рис. 3.35.

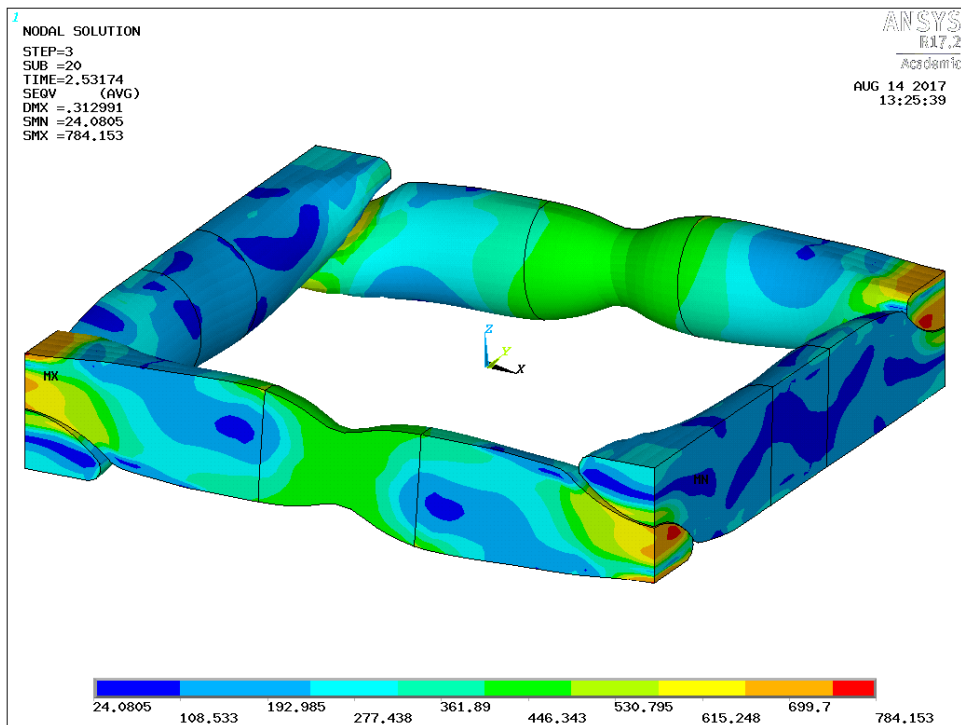


Рис. 3.36. Распределение эквивалентных напряжений после растяжения.

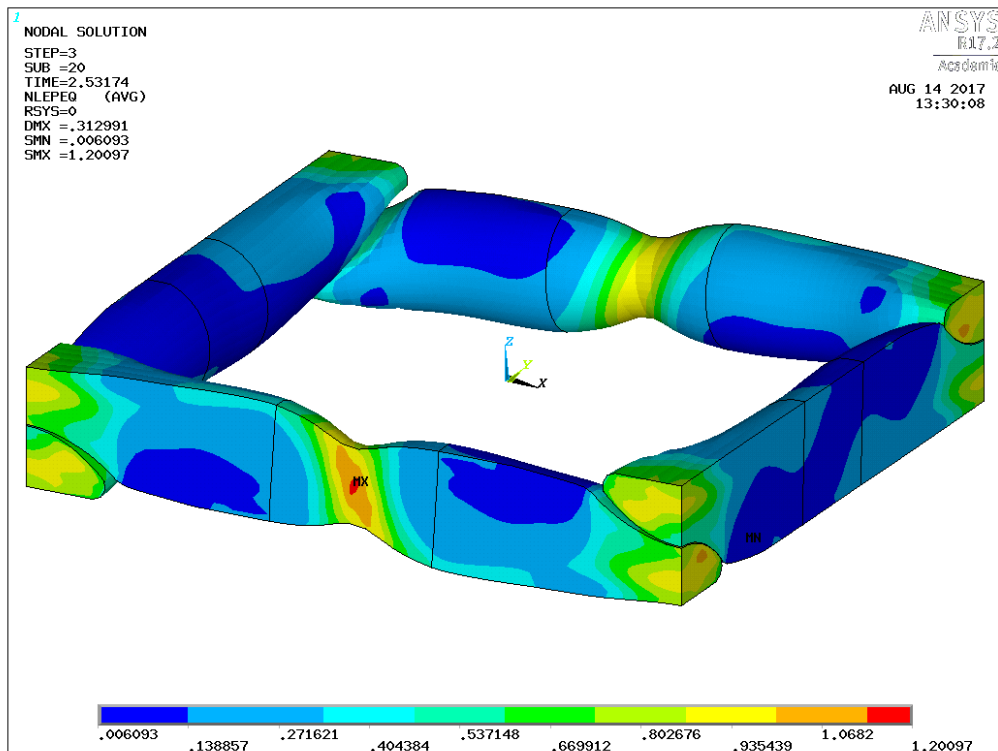
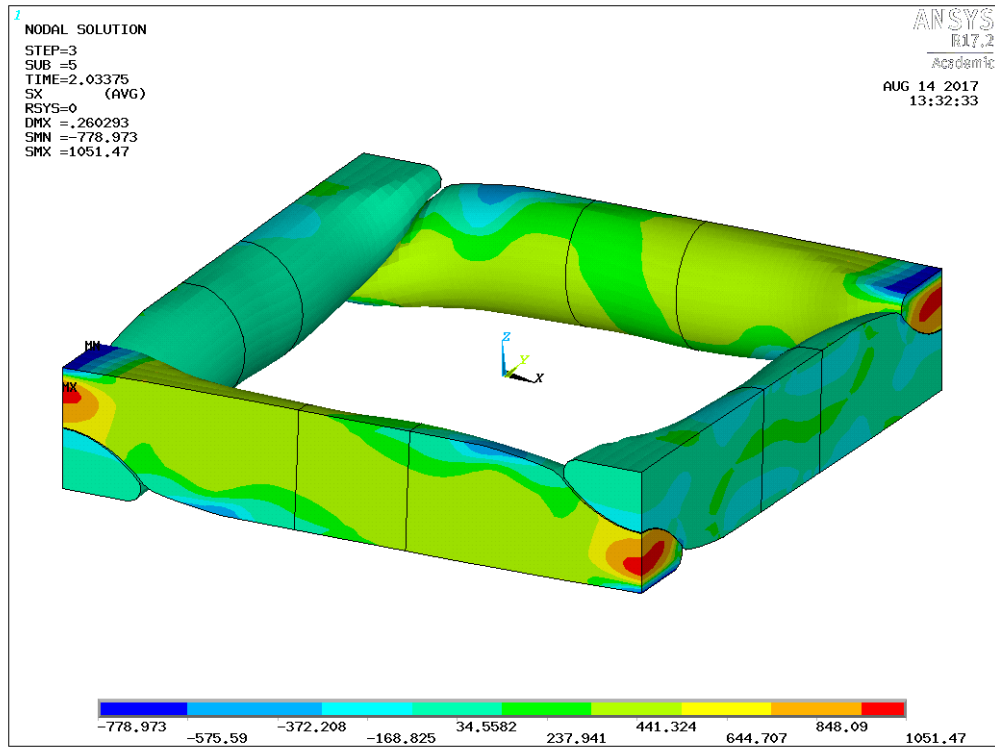
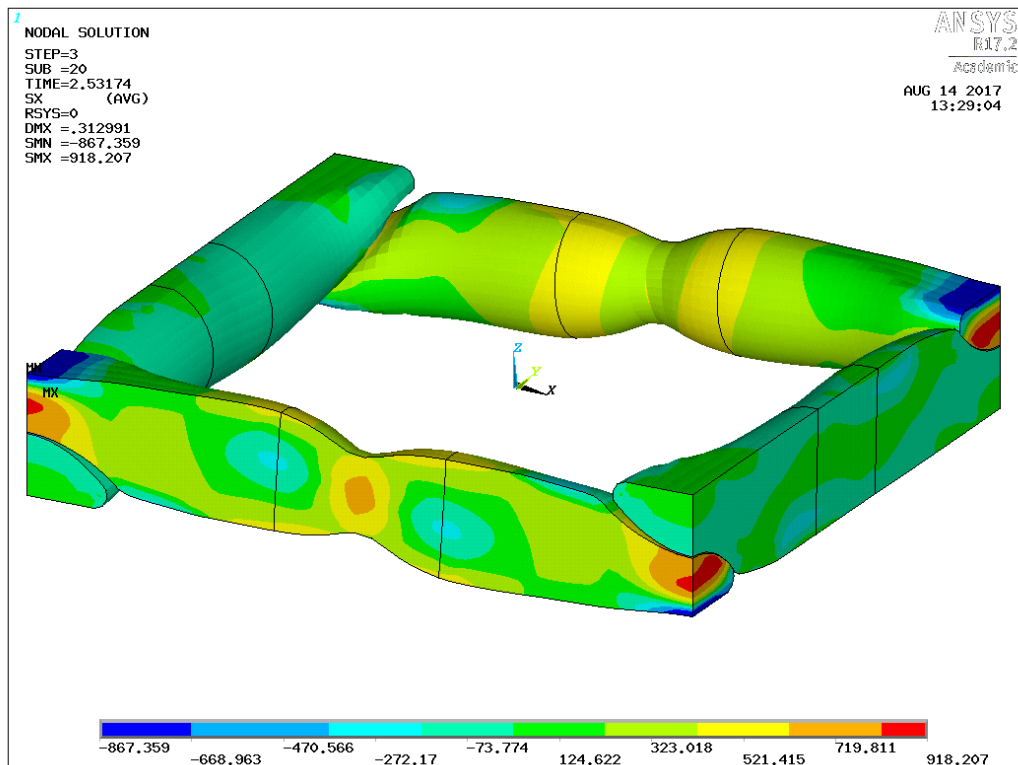


Рис. 3.37. Распределение эквивалентных пластических деформаций после растяжения.

Рис. 3.38. Распределение напряжений σ_x Рис. 3.39. Распределение напряжений σ_x .

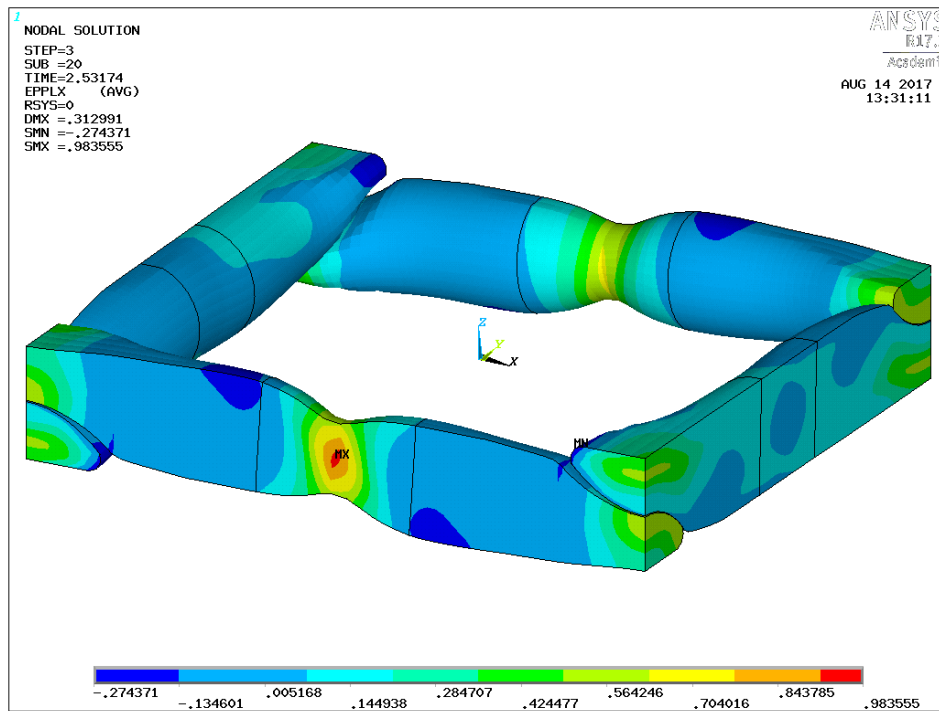


Рис. 3.40. Распределение пластической деформации ϵ_x .



Рис. 3.41. Характер разрыва проволок для предварительно обжатого (слева) и необжатого (справа) состояния.

На рис. 3.42 приведены распределения напряжений σ_x и среднее напряжение σ_0 в одной из проволок, ориентированных вдоль оси X, после второго этапа нагружения. Наблюдается преимущественно сжатое состояние этих проволок. Поэтому для их растяжения требуются дополнительные внешние силы, о чем свидетельствуют расчетные интегральные силы в граничных сечениях растягиваемых проволок. На рис. 3.43 показана сила для обжатого образца, начинающаяся с отрицательного значения, полученного после второго этапа нагружения.

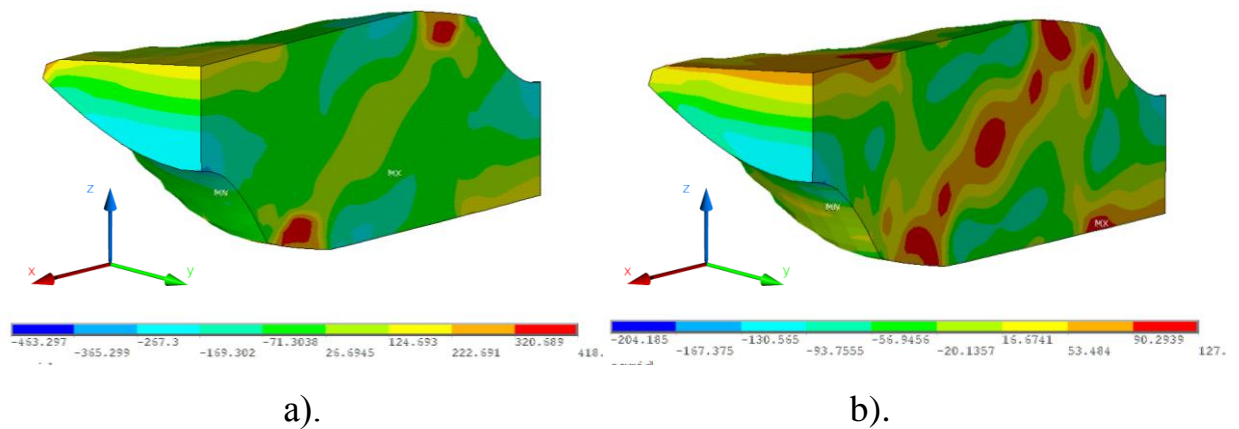


Рис. 3.42. Распределение напряжений в проволоке ориентированной вдоль оси X (а – напряжение σ_x , б – среднее напряжение σ_0)

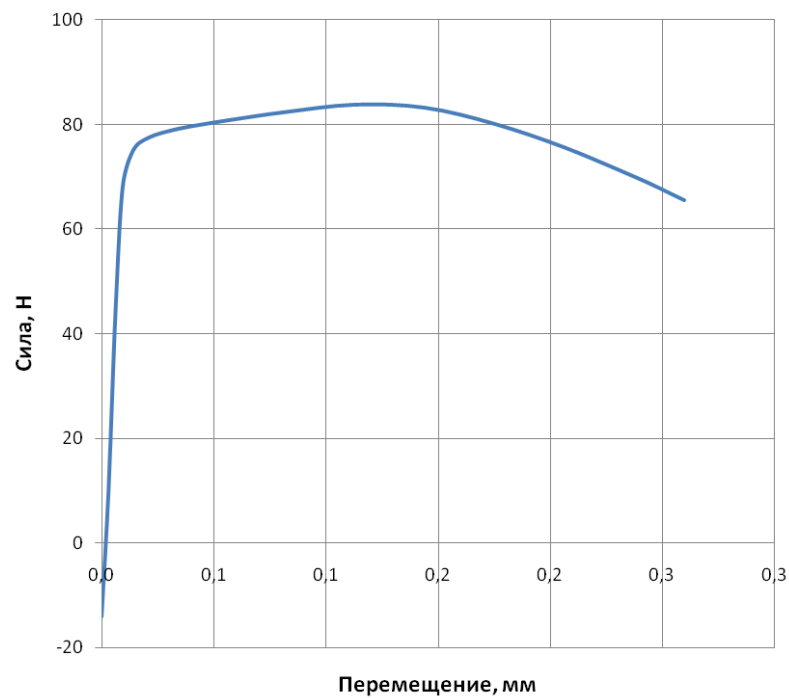


Рис. 3.43.

Кроме моделирования растяжения предварительно обжатого слоя плетеной сетки, были получены результаты расчетов растяжения сетки без обжатия. На рис. 3.44 и рис. 3.45 показаны распределения эквивалентных напряжений по Мизесу и эквивалентных пластических деформаций при растяжении сетки в направлении оси X. По сравнению с предварительно

обжатой сеткой (рис. 3.36 и рис. 3.37) напряженно-деформированное состояние необжатых проволок отличается в значительной мере, особенно это видно на распределении эквивалентных пластических деформаций. Вмятины небольшого размера образуются на растягиваемых проволоках, ориентированных вдоль оси X в месте пересечения проволок, в отличие от предварительно обжатых проволок, у которых шейка начинает развиваться между узлами.

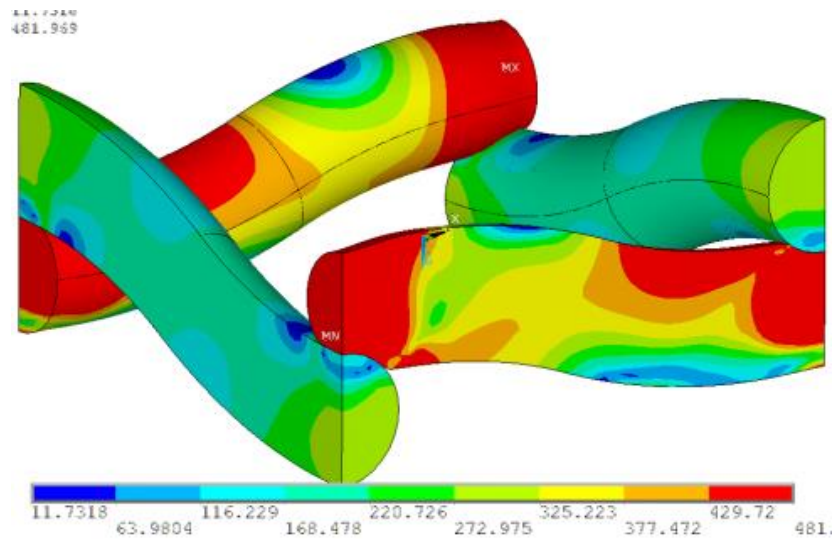


Рис. 3.44. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу

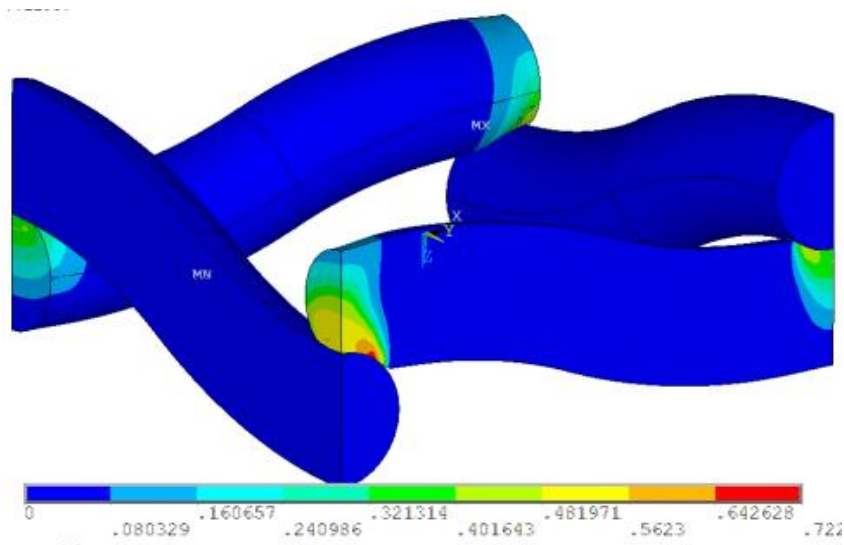


Рис. 3.45. Распределение эквивалентных пластических деформаций

На рис. 3.46 приведены кривые «сила-перемещение» на растяжение в плоскости слоя по одному из направления нитей. Красная и синяя кривые экспериментальные, красная кривая с предварительным обжатием по нормали к слою. Зеленая и сиреневая кривые получены численным моделированием, зеленая кривая получена после предварительного обжатия численной модели.

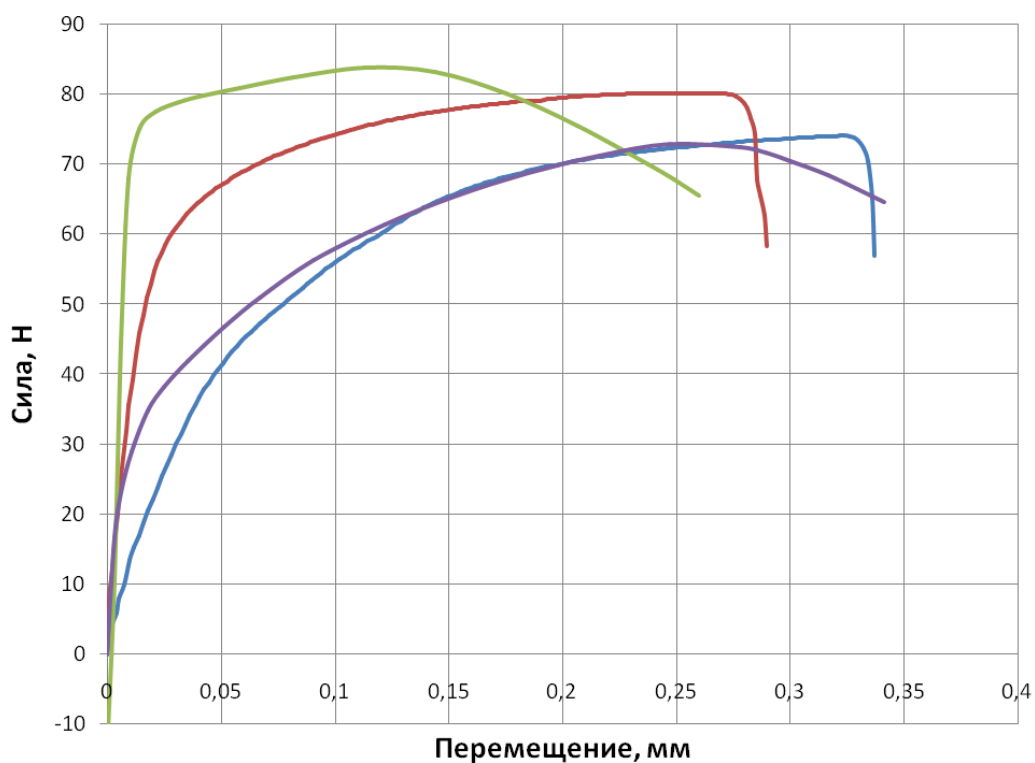


Рис. 3.46

Поведение численных кривых качественно соответствует поведению экспериментальных (рис. 3.46). Наблюдается увеличение силы при растяжении предварительно обжатой сетки. Это увеличение объясняется двумя факторами. Первый фактор связан с упрочнением материала в окрестности узла сетки, вызванного сильным его обжатием и развитым пластическим течением. Второй фактор связан с тем, что в результате обжатия растягиваемые проволоки находятся преимущественно в сжатом состоянии (и всестороннем, и вдоль оси растяжения). Для получения количественного соответствия требуются дополнительные специальные

исследования с применением более адекватной модели поведения материала при сложном нагружении с учетом его поврежденности и изменения его деформационных свойств при больших деформациях.

3.4. Численное моделирование внутреннего взрывного нагружения трехслойной цилиндрической оболочки с рулонированным пакетом плетеных сеток

С целью применения результатов экспериментальных исследований деформационных свойств пакетов металлических сеток, проводится математическое моделирование взрывного нагружения трехслойной цилиндрической оболочки с рулонированным пакетом плетеных сеток, в качестве первого внутреннего слоя. Динамическое поведение пакета сетки с содержащимся поровым газом описывается на основе уравнений динамики двух взаимопроникающих континуумов, каждый из которых имеет свои скорости, напряжения (давления) и температуры. При формулировке уравнений использованы обычные для подобных смесей предположения [121-123]. Размеры «элементарных узлов» в дисперсной смеси значительно больше молекулярно-кинетических масштабов и много меньше расстояний, на которых макроскопические параметры фаз меняются заметно (кроме линий разрыва); эффекты вязкости и теплопроводности существенны лишь в процессах межфазного взаимодействия; отсутствуют процессы межфазного массообмена, дробление частиц; эффекты пульсационного движения фаз пренебрежимо малы; газовая фаза представляет собой идеальный газ; внешние массовые силы отсутствуют; теплообмен с окружающей средой не происходит и т.д. Наряду с этими допущениями предполагаем, что цилиндрический пакет сетки деформируется нелинейно и ортотропно – в направлении, перпендикулярном к слоям сетки упругопластически сжимается, а в направлениях нитей (в том числе в окружном направлении) – растягивается. Сдвиговые напряжения полагаются малыми.

В неподвижной декартовой ($\nu = 0$) или цилиндрической системе координат ($\nu = 1$, Oz – ось вращения) уравнения динамики порового газа в форме законов сохранения массы, импульса и энергии имеют вид:

$$\frac{\partial(\rho_1^0 \alpha_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho_1^0 \beta_r u_1) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_1^0 \beta_z u_1) = -\nu \frac{\rho_1^0 \beta_r u_1}{r}$$

$$\frac{\partial(\rho_1^0 \alpha_1 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\beta_r p_1 + \beta_r \rho_1^0 u_1^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\beta_z \rho_1^0 u_1 v_1) = -\nu \frac{\beta_r \rho_1^0 u_1^2}{r} - n f_r \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_1^0 \alpha_1 v_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\beta_r \rho_1^0 u_1 v_1) + \frac{\partial}{\partial z}(\beta_z p_1 + \beta_z \rho_1^0 v_1^2) = -\nu \frac{\beta_r \rho_1^0 u_1 v_1}{r} - n f_z$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\alpha_1 \rho_1^0 \left(e_1 + \frac{u_1^2 + v_1^2}{2} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\beta_r \left[\rho_1^0 u_1 \left(e_1 + \frac{u_1^2 + v_1^2}{2} \right) + p_1 u_1 \right] \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\beta_z \left[\rho_1^0 v_1 \left(e_1 + \frac{u_1^2 + v_1^2}{2} \right) + p_1 v_1 \right] \right) = -\nu \frac{\beta_r v_1 \left[\rho_1^0 \left(e_1 + \frac{u_1^2 + v_1^2}{2} \right) + p_1 \right]}{r} - n q$$

$$p_1 = (\hat{r} - 1) \rho_1^0 e_1, \quad T_1 = e_1 / c_v (T_1).$$

Здесь и далее нижний индекс 1 относится к газу, 2 – к твердой компоненте, t - время, r, z - координаты, p - давление, ρ^0 - истинная плотность газа, u, v - радиальная и осевая компоненты скорости, e - внутренняя энергия, T - температура, c_v - удельная теплоемкость, \hat{r} - показатель адиабаты, f_r, f_z, q - межфазные силы и тепловой поток, действующие на «элементарный узел» (отмечен на рис. 3.47 штриховой линией) твердой компоненты со стороны порового газа, n - количество таких узлов в единице объема смеси, α_i - объемные концентрации компонент, β_r, β_z - коэффициенты проходных сечений вдоль соответствующих направлений.

Из системы (1) при $\alpha_1 = \beta_r = \beta_z = 1$ и $n=0$ следуют уравнения газовой динамики для однородной среды.

Тогда уравнения динамического деформирования пакета сетки, как скелета двухфазной среды примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho_2 u_2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_2 v_2) &= -v \frac{\rho_2 u_2}{r} \\ \frac{\partial(\rho_2 u_2)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho_2 u_2^2 - \sigma_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_2 u_2 v_2 - \sigma_{rz}) &= \frac{v}{r}(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr} - \rho_2 u_2^2) + n f_r \\ \frac{\partial(\rho_2 v_2)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho_2 u_2 v_2 - S_{rz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_2 v_2^2 - \sigma_{zz}) &= \frac{v}{r}(\sigma_{rz} - \rho_2 u_2 v_2) + n f_z \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{rr}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \varepsilon_{rr}}{\partial r} + v_2 \frac{\partial \varepsilon_{rr}}{\partial z} - \varepsilon_{rz} \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} - \frac{\partial v_2}{\partial r} \right) = \frac{\partial u_2}{\partial r}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial r} + v_2 \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial z} - \varepsilon_{rz} \left(\frac{\partial v_2}{\partial r} - \frac{\partial u_2}{\partial z} \right) = \frac{\partial v_2}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{\theta\theta}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \varepsilon_{\theta\theta}}{\partial r} + v_2 \frac{\partial \varepsilon_{\theta\theta}}{\partial z} = \frac{u_2}{r}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{rz}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \varepsilon_{rz}}{\partial r} + v_2 \frac{\partial \varepsilon_{rz}}{\partial z} - (\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{zz}) \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} - \frac{\partial v_2}{\partial r} \right) / 2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} + \frac{\partial v_2}{\partial r} \right)$$

Здесь $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ - компоненты тензоров напряжений и деформаций ($i, j = r, z, \theta$), ρ_2 - приведенная плотность пакета сетки ($\rho_2 = \alpha_2 \rho_2^0$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$).

Законы связи между компонентами напряжений и деформаций строятся в направлениях осей ортотропии. По нормали к слоям сетки считаем

напряжения зависящими от деформации $\sigma_{rr} = f_n(\varepsilon_{rr}, \sigma_{rr}^*)$, по оси ортотропии

вдоль проволок сетки на плоскости rz $\sigma_{zz} = f_r(\varepsilon_{zz}, \sigma_{zz}^*)$. При $\nu=1$ по

окружному направлению $\sigma_{\theta\theta} = f_{\tau}(\varepsilon_{\theta\theta}, \sigma_{\theta\theta}^*)$. Сдвиговые компоненты тензора напряжений в системе координат, связанной с этими осями полагаем равными нулю. Параметры, отмеченные верхним индексом *, представляют собой максимальные значения, достигнутые частицей при нагружении в соответствующем направлении, они необходимы для описания разгрузки частиц среды, испытывающей необратимые деформации [124].

Здесь для переноса величин, обозначенных звездочкой, используем уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_2 \rho_2^*)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 \rho_2^* u_2)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_2 \rho_2^* v_2)}{\partial z} &= -v \frac{\rho_2 u_2 \rho_2^*}{r} \\ \frac{\partial(\rho_2 \varepsilon_{\tau\tau}^*)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 \varepsilon_{\tau\tau}^* u_2)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_2 \varepsilon_{\tau\tau}^* v_2)}{\partial z} &= -v \frac{\rho_2 u_2 \varepsilon_{\tau\tau}^*}{r} \\ \frac{\partial(\rho_2 \varepsilon_{\theta\theta}^*)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 \varepsilon_{\theta\theta}^* u_2)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_2 \varepsilon_{\theta\theta}^* v_2)}{\partial z} &= -v \frac{\rho_2 u_2 \varepsilon_{\theta\theta}^*}{r} \end{aligned} \quad (3)$$

При взаимодействии твердой и газовой компоненты учитываем в качестве межфазных сил: силы сопротивления частичек твердой фазы при их обтекании поровым газом; силы Стокса вязкого трения. Также учитывается конвективный теплообмен через межфазную поверхность. Выражения для определения сил и теплового потока приведены в [125].

Изменение температуры твердой фазы определяется уравнением

$$\frac{\partial(\rho_2 T_2)}{\partial t} + u_2 \frac{\partial(\rho_2 T_2 u_2)}{\partial r} + v_2 \frac{\partial(\rho_2 T_2 v_2)}{\partial z} = \frac{nq}{c_{p_2}} - v \frac{\rho_2 u_2 T_2}{r} \quad (4)$$

Здесь c_{p_2} - удельная теплоемкость металла сетки.

Поверхности контакта чистого газа с пористым пакетом сеток являются комбинированным разрывом [126]. На нем выполняются условия динамической совместности, следующие из интегральной формы уравнений (1), записанных для подвижной поверхности разрыва. К ним добавляются дополнительные условия, имеющие вид [127, 128]:

$$F^\sigma = p_1^\sigma [\beta_1], \quad p_1^\sigma = \begin{cases} p_1^-, [\beta_1] > 0, M_{12} < 1 \\ p_1^+, [\beta_1] > 0, M_{12} > 1 \end{cases}$$

$$[S_1] = 0, \quad [\beta_1] < 0, \quad M_{12} < 1$$

где S_1 - энтропия газа, $M_{12} = |u_1 - u_2|/c_1$, c_1 - скорость звука, p_1^-, p_1^+ - давление газа слева и справа от разрыва, квадратные скобки означают разность величин на разрыве. На поверхностях контакта пакета сеток с непроницаемыми элементами конструкций выполняются условия непроникания.

3.4.1. Особенности численной реализации

Численное решение уравнений (1) - (4) производится по схеме С.К. Годунова [107, 129]. С целью ее адаптации к уравнениям динамики деформирующихся взаимопроникающих континуумов разработаны алгоритмы расчета задачи распада произвольного разрыва для высокопористой упругопластической среды, а также алгоритмы решения уравнений динамики порового газа в эйлерово-лагранжевых сетках с учетом изменяющихся коэффициентов проходных сечений и объемной концентрации пор.

Для расчета параметров на контактных границах «двухфазная среда-газ» используется алгоритм, основанный на решении задачи о распаде произвольного разрыва в канале со скачком площади поперечного сечения [130]. Возможные виды газодинамического течения при истечении и

втекании в пористую среду подробно описаны и проанализированы в [127, 128]. Алгоритм строится по принципу расщепления процесса на два этапа. На первом этапе определяется движение границы пористой среды с использованием газодинамического давления, полученного на предыдущем шаге расчета, а затем на втором этапе решается задача распада разрыва в движущейся системе координат, связанной с комбинированным разрывом. В результате определяются все необходимые граничные параметры для численного интегрирования уравнений (1) и (2). Алгоритм расчета контакта двухфазной среды с жесткой преградой, с которой граничит пористая среда, реализует условие непротекания ($u_1 = u_2 = 0$). Полное давление на преграду определяется как сумма приведенных давлений порового газа и скелета пористой среды.

3.4.2. Численные результаты

С целью оценки работоспособности математической и численной модели выполнены расчеты одноосного деформирования плоского пакета сетки под действием взрывной нагрузки. Результаты расчетов совпали с результатами, приведенными в [125].

Исследовалось взрывное нагружение цилиндрического пакета плетеных сеток в составе трехслойной оболочки. Общая постановка задачи показана на рис. 3.47 Цилиндрический пакет сеток (3) размещается перед силовыми слоями открытой с торцов цилиндрической оболочки. Ее внешний слой (1) выполнен из базальтопластика, внутренний (2) – из стали. Взрывное нагружение осуществляется шаровым зарядом ТГ 50/50, центр которого размещен на пересечении оси и плоскости симметрии системы. Длина оболочки $L = 60$ см, внешний радиус $R = 16.1$ см, толщина базальтопластикового слоя $h_1 = 1.38$ см, толщина стального слоя $h_2 = 0.2$ см, толщина пакета сетки $h_3 = 2.5$ см. Масса заряда $m_{\text{ВВ}} = 247$ г (радиус заряда $r_{\text{ВВ}} = 3.27$ см). Механические характеристики стали – $E = 2.1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0.3$

(коэффициент Пуассона), $\rho = 7.8 \text{ г/см}^3$, $\sigma_T = 400 \text{ МПа}$; базальтопластика – $E = 3.6 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, $\mu = 0.2$, $\rho = 2 \text{ г/см}^3$. Базальтопластиковый слой, ортотропный по своему конструктивному строению и механическим свойствам, в расчетах предполагается изотропным и упругим, значение E соответствует окружному значению модуля деформации [125].

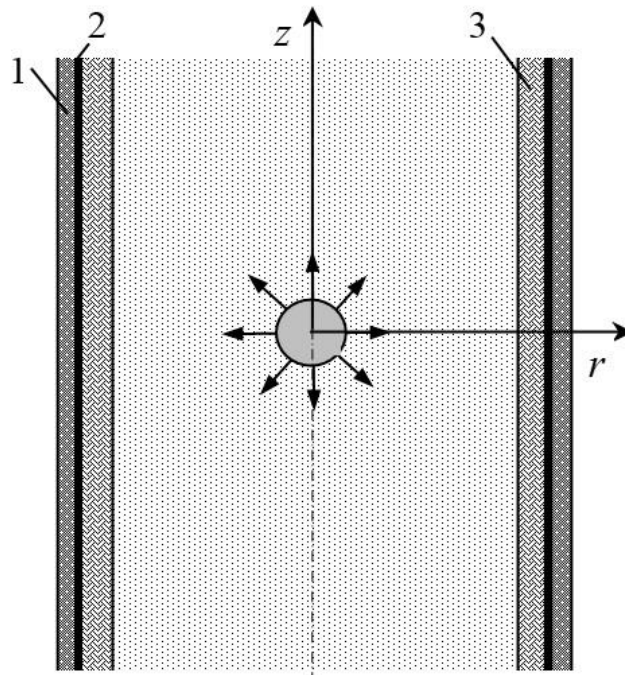


Рис. 3.47.

В силу симметрии рассматривается 1/4 всей области. Пакет сетки начальной плотностью $\rho_{20} = 1,09 \text{ г/см}^3$ вплотную примыкает к силовому корпусу оболочки. Цилиндрический пакет сеток сворачивается из слоёв плетеной сетки с размером стороны квадратной ячейки $l = 0,2 \text{ см}$ и толщиной проволоки $d = 0,05 \text{ см}$. В этом случае структурные параметры газопроницаемого пакета имеют следующие значения: объемное содержание металла $\alpha_{20} = 0,144$, коэффициенты газопроницаемости в направлении, перпендикулярном слоям сетки $\beta_{r_0} = 0,64$, в направлении проволочек $\beta_{z_0} = 0,42$. Закон сжатия сетки принимается в соответствии с динамической

диаграммой сжатия (рис. 3.22), задаваемой в табличной форме с линейным законом разгрузки. Вдоль линий проволок на растяжение предполагается упругая связь между напряжением и деформацией с модулем $1.2 \cdot 10^4$ МПа.

Газодинамическое нагружение оболочки с сеткой осуществляется путем моделирования подрыва указанного заряда, геометрический центр которого и точка инициирования расположены в начале координат расчетной области (рис.3). Процесс детонации заряда рассчитывается при помощи «лучевой модели» [131]. Специального выделения контактной границы между продуктами детонации (ПД) и воздухом в ходе расчетов не проводится. Считается, что смесь данных компонент подчиняется уравнению состояния идеального газа с переменным показателем адиабаты γ , зависящим от ее текущей плотности ρ : $\gamma = 1.25 + 1.45(\rho/\rho_{BB})$, где ρ_{BB} - начальная плотность заряда. За момент отсчета физического времени принимается момент инициации заряда. На верхней и нижней границах области течения смеси ПД-воздух реализуются условия «свободного вытока».

Расчет проводится при помощи программного комплекса «UPSGOD» в связанной постановке [128]. Характерный размер четырехугольных ячеек используемых разностных сеток составляет: от 0.2 до 0.5 см – по воздуху, сетке и силовому корпусу. Развитие волнового процесса внутри оболочки после детонации заряда показано на рис. 3.48. Здесь приведены поля давлений в газе и компоненты $-\sigma_{rr}$ в области сетки в моменты времени $t = 30$ и 60 мкс. Видно отражение головной ударной волны от поверхности сетки и формирование волны сжатия в пакете плетеных сеток. Динамику волны сжатия отражает рис. 3.49, где показаны зависимости радиального напряжения $-\sigma_{rr}$ от времени в трех точках пакета: в начале, середине и на границе со стальным слоем трехслойной оболочки. При отражении волны от стального слоя наблюдается увеличение амплитуды воздействия.

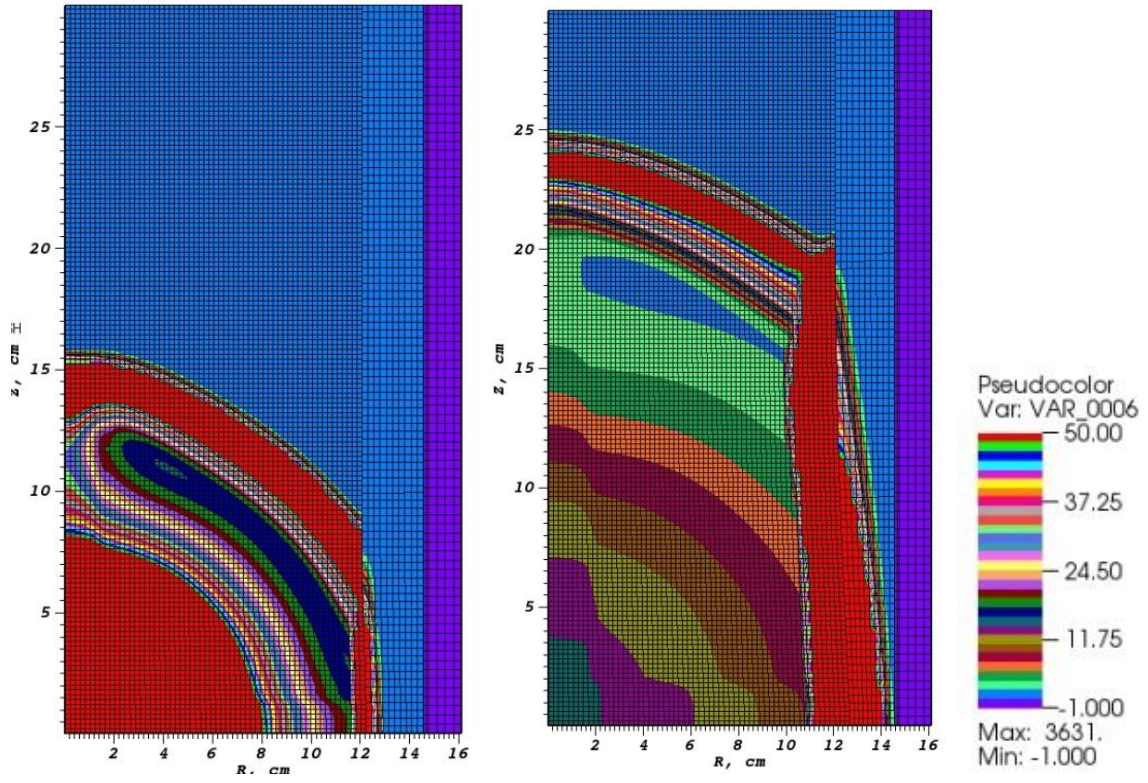


Рис. 3.48.

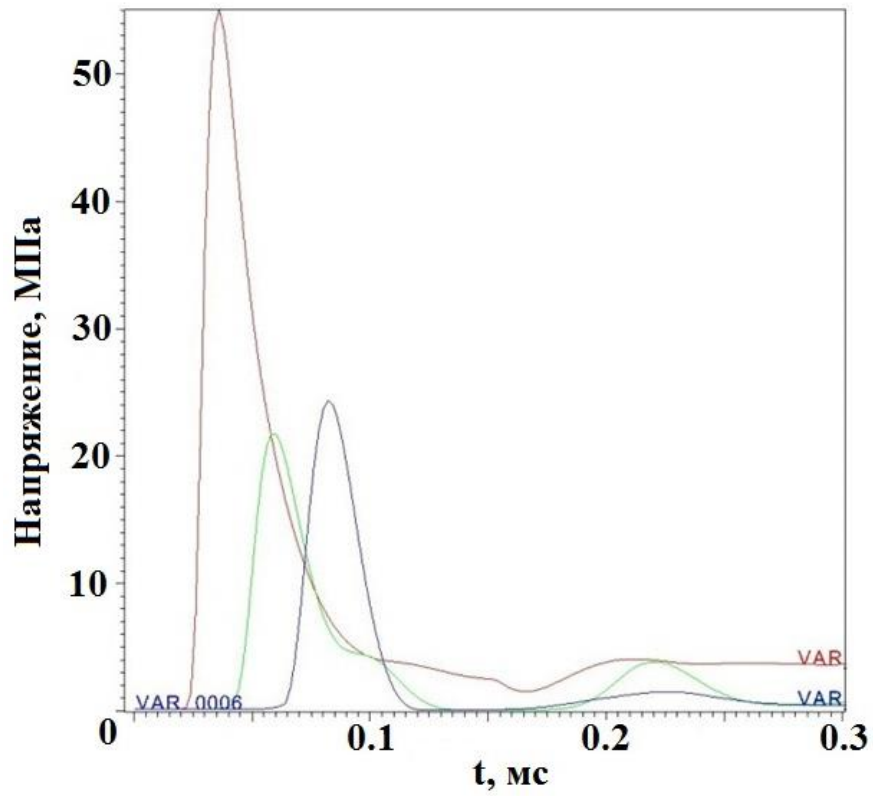


Рис. 3.49.

В эксперименте, результаты которого приведены в [120], регистрировалась окружная деформация внешнего слоя силового базальтопластикового корпуса оболочки в сечении $z = 0$. На рис. 3.50 в сравнении изображены временные расчетные (сплошная красная линия - 2) и опытные (пунктир - 3) развертки окружных деформаций наружного корпуса в данном сечении. Сплошной линией 1 синего цвета показаны результаты расчета взрывного нагружения рассматриваемой составной оболочки в случае отсутствия защитной сетки. Как показали результаты проведенных вычислений, процессы деформирования пакета сетки под действием продуктов взрыва носят колебательный характер, сопровождающийся периодическими отрывами от внутренней стальной оболочки в окрестности плоскости симметрии и следующими за этим новыми соударениями с ней. Частота таких колебаний определяется не только жесткостью пакета силовых наружных оболочек, но и зависит от жесткостных характеристик пакета сетки, в первую очередь, от значения упругого модуля. Наличие сетки снижает максимумы окружных деформаций внешнего силового слоя оболочки на 30%, что соответствует наблюдаемому в экспериментах эффекту.

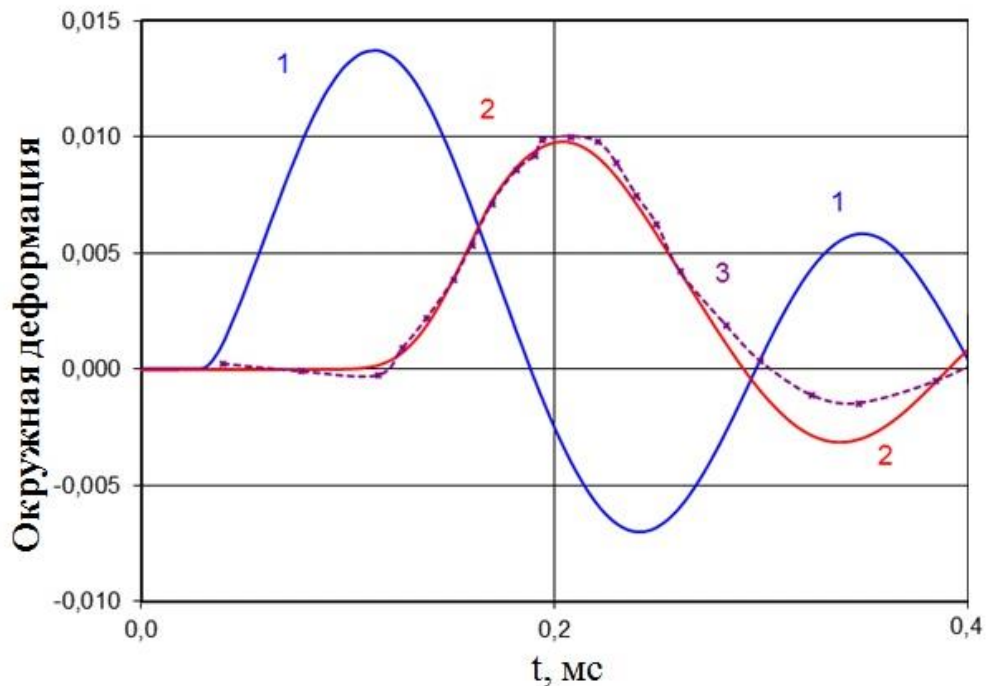


Рис. 3.50.

Таким образом, используемая математическая и численная модель газопроницаемых пакетов плетеных сеток может успешно применяться для анализа их деформирования и для оценки их защитных свойств при взрывных воздействиях.

3.5. Выводы по главе 3

1. В результате экспериментальных исследований были получены кривые деформирования ортотропных пакетов плетеных металлических сеток при испытаниях на сжатие и растяжение, вплоть до разрушения образца. Сжатие регулярно уложенных в образец сеток проводилось по нормали к слоям сеток, а растяжение – в плоскости пакета вдоль линий проволок. Для статических испытаний на растяжение были определены предельные параметры прочности пакетов сеток.

2. По результатам статических и динамических испытаний образцов многослойных пакетов плетеных металлических сеток на сжатие по нормали к слоям выявлено существенное отличие динамических диаграмм

деформирования от статических. Кривые при всех режимах нагружения носят нелинейный и необратимый характер, то есть при сжатии проявляются пластические свойства.

3. Диаграммы деформирования на растяжение вдоль оси ортотропии в плоскости слоев также носят нелинейный и необратимый характер вплоть до разрушения образцов, а также зависят от режима нагружения. При квазистатическом растяжении пакетов сеток вдоль проволок существенное влияние на поведение кривых деформирования оказывает предварительное обжатие пакетов по нормали к слоям сеток, вызывающее увеличение растягивающей силы, влияние предварительного обжатия при динамическом растяжении существенного влияния не выявили.

4. Экспериментально показан эффект увеличения силы растяжения предварительно обжатого одного слоя плетеной сетки как и для многослойного пакета. Математическое моделирование деформирования одного слоя плетеной сетки подтверждает эффект увеличения силы при растяжении вдоль линий проволок после предварительного обжатия слоя по нормали. По результатам математического моделирования выявлены два механизма увеличения растягивающей силы. Первый механизм связан с упрочнением материала в окрестности узла сетки, вызванного сильным его обжатием и развитым пластическим течением. Вторым механизмом связан с тем, что в результате обжатия растягиваемые проволоки находятся преимущественно в сжатом состоянии (и всестороннем, и вдоль оси растяжения).

5. Численное моделирование квазистатического сжатия и растяжения слоев сеток выявило, что учет влияния сил трения на контактных поверхностях не приводит к заметному изменению основных результатов.

6. Результаты экспериментальных исследований использованы при численном моделировании процессов внутреннего взрывного нагружения

цилиндрической трехслойной оболочки, одним из слоев которой является проницаемый высокопористый пакет металлических плетеных сеток. Наличие пакета плетеных сеток снижает максимумы окружных деформаций внешнего силового слоя оболочки на 30%, что соответствует наблюдаемому в экспериментах эффекту.

Заключение

1. Экспериментально получены статические и динамические диаграммы деформирования образцов пористых насыпных слоев из свинцовых шариков при сжатии. Выявлены существенные отличия динамической диаграммы деформирования от статической. Кривые при всех режимах нагружения носят нелинейный и необратимый характер. При высоких нагрузках происходит не только переукладка частиц, но и сильное пластическое течение материала, а при динамическом нагружении помимо пластического течения происходит массовая фрагментация частиц гранулированного слоя.

2. Получены результаты численного моделирования нагружения симметричных фрагментов гранулированного слоя для двух вариантов регулярной упаковки шариков – тетраэдральной и кубической. В обоих вариантах наблюдается развитое пластическое течение материала, заполняющего поры вплоть до полного компактирования. Численные диаграммы деформирования, как и экспериментальные, являются существенно нелинейными и необратимыми.

3. В результате экспериментальных исследований получены кривые деформирования ортотропных пакетов плетеных металлических сеток при испытаниях на сжатие и растяжение, вплоть до разрушения образца. Сжатие регулярно уложенных в образец сеток проводилось по нормали к слоям сеток, а растяжение – в плоскости пакета вдоль линий проволок. Для квазистатических испытаний на растяжение определены предельные параметры прочности пакетов сеток. По результатам квазистатических и динамических испытаний образцов многослойных пакетов плетеных металлических сеток на сжатие по нормали к слоям выявлено существенное отличие динамических диаграмм деформирования от квазистатических. Кривые при всех режимах нагружения носят нелинейный и необратимый характер. Диаграммы деформирования на растяжение вдоль оси ортотропии

в плоскости слоев также носят нелинейный и необратимый характер вплоть до разрушения образцов, и также зависят от режима нагружения. При квазистатическом растяжении пакетов сеток вдоль проволок существенное влияние на поведение кривых деформирования оказывает предварительное обжатие пакетов по нормали к слоям сеток, вызывающее увеличение растягивающей силы. Предварительное обжатие при динамическом растяжении существенного влияния не оказывает.

4. Экспериментально показан эффект увеличения силы растяжения предварительно обжатого одного слоя плетеной сетки, как и для многослойного пакета. Математическое моделирование деформирования одного слоя плетеной сетки подтверждает эффект увеличения силы при растяжении вдоль линий проволок после предварительного обжатия слоя по нормали. По результатам математического моделирования выявлены два механизма увеличения растягивающей силы. Первый механизм связан с упрочнением материала в окрестности узла сетки, вызванного сильным его обжатием и развитым пластическим течением. Второй механизм связан с тем, что в результате обжатия растягиваемые проволоки находятся преимущественно в сжатом состоянии. Учет сил трения на контактных поверхностях не приводит к заметному изменению основных результатов.

5. Результаты экспериментальных исследований использованы при численном моделировании процессов внутреннего взрывного нагружения цилиндрической трехслойной оболочки, одним из слоев которой является проницаемый высокопористый пакет металлических плетеных сеток. Наличие пакета плетеных сеток снижает максимумы окружных деформаций внешнего силового слоя оболочки на 30%, что соответствует наблюдаемому в экспериментах эффекту.

Полученные в диссертации деформационные и прочностные свойства гранулированных слоев и пакетов плетеных сеток являются необходимым элементом для дальнейшего предсказательного численного моделирования

поведения конструкций, содержащих высокопористые проницаемые элементы, при высокоинтенсивных квазистатических и динамических нагрузках. Результаты работы найдут применение при оценке прочности и эффективности защитных преград, взрывных камер и других установок импульсного действия.

Список литературы

1. Hermann W. Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials. J. Appl.Phys. 1969. V.40. № 6.
2. Ляхов Г.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1982. – 288 с.
3. Трунин Р.Ф., Гударенко Л.Ф., Жерноклетов М.В., Симаков Г.В. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2001. 446 с.
4. Тарасов Б.А. Методы построения диаграмм ударного сжатия пенопласта. Механика полимеров. 1973. № 3.
5. Абашкин Б.И., Забиров И.Х., Русин В.Г. Динамическая сжимаемость пенополистерола. Механика полимеров. 1977. №1.
6. Бодренко С.И., Крысанов Ю.А., Новиков С.А. Исследование распространения ударных волн в пенополистироле. ПМТФ. 1979. № 6. с. 140-144.
7. Boade R.R. Compression of porous copper by shock wave. J. Appl. Phys. 1968. V. 39. № 12. p. 5693-5702.
8. Boade R.R. Dynamic compression of porous tungsten. J. Appl. Phys. 1969. V. 40, № 9. p. 3781-3785.
9. Boade R.R. Principal Hugoniot, Second-shock Hugoniot, and release behavior of pressed copper powder. J. Appl. Phys. 1970. V. 41. № 11. p. 4542-4551.

10. Batcher B.M., Carroll M.M., Holt A.C. Shock-wave compaction of porous aluminum. J. Appl. Phys. 1974. V. 45. № 9. p. 3864-3875.
11. Batcher B.M. Dynamic response of partially compacted porous aluminum during unloading. J. Appl. Phys. 1973. V. 44. №10. p. 4576-4582.
12. Dandekar D.P., Lamothe R.M. Behaviour of porous tungsten under shock compression at room temperature. J. Appl. Phys. 1977. V. 48. № 7. p. 2871-2876.
13. Linde R.K., Seaman L., Schmidt D.N. Shock response of porous copper, iron, tungsten and polyurethane. J. Appl. Phys. 1972. V. 43. № 8. p. 3367-3375.
14. Griffiths D.J., Buettner D.J. Effect of void-size distribution on the Hugoniot state at low shock pressures. J. Appl. Phys. 1991. V. 70. № 9. p. 4790-4796.
15. Тарасов Б.А. Методы построения диаграмм ударного сжатия пенопласта. Механика полимеров. 1973. № 3. с. 566-568.
16. Дудолодов И.П., Ракитин В.И., Сутулов Ю.Н. и др. Ударная сжимаемость полистирола с различной начальной плотностью. ПМТФ. 1969. № 4. с.148-151.
17. Баканова А.А., Дудолодов И.П., Сутулов Ю.Н. Ударная сжимаемость пористых вольфрама, меди и алюминия в области низких давлений. ПМТФ. 1974. № 2. с.117-122.
18. Lysne P.S., Halpin W.J. Shock compression of porous iron in the region of incomplete compaction. J. Appl. Phys. 1968. V. 39. № 12. p. 5488-5495.
19. Batcher B.M., Karnes C.H. Dynamic compaction of porous iron. J. Appl. Phys. 1969. V. 40. № 7. p. 2967-2976.
20. Поляков В.В., Головин А.В. Упругие характеристики пористых материалов. ПМТФ. 1993. № 5. с. 32-35.

21. Баланкин С.А., Башлыков С.С., Бубнов А.С. и др. Влияние пористости на модули упругости вольфрама и молибдена. Изв. АН СССР, сер. «Металлы», 1981. № 2. с. 201-204.
22. Трунин Р.Ф., Симаков Г.В. Сжимаемость пористых металлов в ударных волнах. ЖЭТФ. 1989. Т. 96. № 3. с. 1024-1038.
23. Linde R.K., Schmidt D.N. Shock propagation in Nonreactive Porous Solids. J. Appl. Phys. 1966. V. 37. № 8. p. 3259-3271.
24. Дианов М.Д., Златин Н.А., Мочалов С.М. и др. Ударная сжимаемость сухого и водонасыщенного песка. Изд.: «Наука», письма в ЖТФ. 1976. Т. 2, № 12. с. 529-532.
25. Огородников В.А., Жерноклетов М.В., Михайлов С.В., Ерунов С.В., Комиссаров В.В. Влияние прочности, пластичности материала и размеров частиц раздробленной среды на процесс ударно-волнового деформирования. Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41. № 4. с. 124 – 131.
26. Ляхов Г.М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра. 1974. – 191 с.
27. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. 1999. – 600 с.
28. Высокоскоростные ударные явления: Пер. с англ.; под ред. Николаевского В.Н. – М.: Мир. 1973. – 533 с.
29. Брагов А.М., Котов В.Л., Ломунов А.К., Сергеичев И.В. Анализ особенностей измерения динамических характеристик мягких грунтов методом Кольского. Прикладная механика и техническая физика. Новосибирск. 2004. Т. 45. № 4. с. 147-153.

30. Брагов А.М., Горбиков С.П., Ломунов А.К. Исследование динамических свойств керамики, используемой в конструкциях, обеспечивающих удержание расплава активной зоны при аварии на ядерном реакторе. Приволжский научный журнал. Нижний Новгород. 2012. № 2. с. 8-15.
31. Брагов А.М., Ломунов А.К. Исследование динамической сжимаемости глины. Проблемы прочности и пластичности. Нижний Новгород. 2015. Т. 77. № 4. с. 393-402.
32. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К., Филиппов А.Р. Динамическая прочность керамического и силикатного кирпича. Вестник волжского регионального отделения российской академии архитектуры и строительных наук. Нижний Новгород. 2011. № 14. с. 168-174.
33. Брагов А.М., Грушевский Г.М., Ломунов А.К., Сергеичев И.В., Прауд У. Исследование динамической сжимаемости сухого песка в диапазоне амплитуд нагрузок до нескольких гигапаскалей. Проблемы прочности и пластичности. Нижний Новгород. 2006. № 68. с. 221-228.
34. Брагов А.М., Карихалоо Б., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Ломунов А.К. Исследование механических свойств фибробетона с помощью методики Кольского и ее модификаций. Вестник нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Нижний Новгород. 2011. № 4-1. с. 123-129.
35. Glam B., Igra O., Britan A., Ben-Dor G. Dynamics of stress wave propagation in a chain of photoelastic discs impacted by a planar shock wave; Part I, experimental investigation, Shock Waves. August 2007. V. 17. № 1. p. 1-14.
36. Sadd M.H., Shukla A., Mei H., Zhu C. Y. The Effect of Voids and Inclusions on Wave Propagation in Granular Materials. Micromechanics and Inhomogeneity. 1989. p. 367-383.

37. Shukla A., Damania C. Experimental investigation of wave velocity and dynamic contact stresses in an assembly of disks. *Experimental Mechanics*. September 1987. V. 27. № 3. p. 268-281.
38. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J. P. Mechanism of compressive stress formation during weak shock waves impact with granular materials. *Experiments in Fluids*. 1997. V. 22. p. 507-518.
39. Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Shock waves attenuation by granular filters. *International Journal of Multiphase Flow*. 2001. V. 27. № 4. p. 617-634.
40. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J. P. Experimental investigation of the interaction between weak shock waves and granular layers. 1997. V. 22. № 5. p. 432-443.
41. Britan A., Ben-Dor G., Elperin T., Igra O., Jiang J. P. Gas filtration during the impact of weak shock waves on granular layers. *International Journal of Multiphase Flow*. 1997. V. 23. № 3. p. 473-491.
42. Britan A., Ben-Dor G. Shock tube study of the dynamical behavior of granular materials. *International Journal of Multiphase Flow*. 2006. V. 32. № 5. p. 623-642.
43. Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Development of a general approach for predicting the pressure fields of unsteady gas flows through granular media. *Journal of Applied Physics*. 2006. V. 99.
44. Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J. P. Head-on collision of a planar shock wave with a granular layer. In: Schmidt, S.C., Tao, W.C. (Eds.), *Proceedings of the ISCCM Conference, Part. 2, Seattle, WA, USA*. 1997. p. 971-974.
45. Levy A., Ben-Dor G., Sorek S. Numerical investigation of the propagation of shock waves in rigid porous materials: development of the computer code and comparison with experimental result. *J. Fluid Mech*. 1996. V. 324. p. 163–179.

46. Абакумов А. И., Заикин С. Н., Мельцас В. Ю. и др. Численная модель деформирования противоосколочной сетки при взрывном нагружении. Математическое моделирование физических процессов: Тр. ВНИИЭФ. 2006. № 10. с. 16–30.
47. Герасимов А.В. и др. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел. Изд-во Томского ун-та. Томск. 2007. - 572 с.
48. Горохов А.Н., Казаков Д.А., Кочетков А.В., Модин И.А., Романов В.И. Исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при квазистатическом сжатию и растяжении. Проблемы прочности и пластичности. 2014. Т. 76. № 3. с. 251-254.
49. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Модин И.А. Экспериментальное исследование динамических и квазистатических деформационных свойств пакетов плетеных сеток. Проблемы прочности и пластичности. 2016. Т. 78. № 3. с. 241-247.
50. Брагов А.М., Жегалов Д.В., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Модин И.А., Савихин А.О. Экспериментальное исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при динамическом и квазистатическом нагружении. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 3. с. 252–262.
51. Кочетков А.В., Леонтьев Н.В., Модин И.А. Экспериментально-численное исследование деформирования металлических плетеных сеток при квазистатическом нагружении. Проблемы прочности и пластичности. 2017. Т. 79. № 1. с. 104-117.

52. Кочетков А. В., Крылов С. В., Модин И. А., Турыгина И. А. Моделирование деформирования пакетов металлических сеток при импульсном нагружении. II Международный научный семинар «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы», 17-19 февраля 2015 г., Российский научный фонд, Московский авиационный институт. Тезисы докладов. 2015. с. 57-58.

53. Модин И.А. Экспериментальные исследования динамических деформационных и прочностных свойств пакетов плетеных сеток. Материалы докладов XX Нижегородской сессии молодых ученых. Естественные, математические науки. 19-22 мая 2015г., Арзамас. 2015. с.179-184.

54. Кочетков А. В., Крылов С. В., Глазова Е. Г., Модин И. А., Турыгина И. А. Численная модель динамического деформирования газопроницаемой цилиндрической оболочки при внутреннем взрывном нагружении. Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015), 24-31 мая 2015 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2015. с. 287-288.

55. Кочетков А. В., Крылов С. В., Глазова Е. Г., Модин И. А., Турыгина И. А. Нелинейная модель деформирования газопроницаемых преград при взрывном нагружении. XI всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань, 20-24 августа 2015. с. 942-943.

56. Модин И. А. Экспериментальные исследования динамических деформационных свойств пакетов плетеных сеток. Материалы XIV Всероссийской молодежной школы-конференции «Лобачевские чтения -

2015». Труды математического центра имени Н.И. Лобачевского, 22-27 октября, г. Казань, 2015. Т. 52. с. 104-106.

57. Модин И. А. Исследование динамических и квазистатических деформационных свойств пакетов металлических сеток. Материалы V Международной молодежной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», 25-27 ноября 2015 г., Томск, 2015. с. 54-55.

58. Модин И. А. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств пакетов плетеных сеток. Материалы конференции «Фундаментальные научные основы современных комплексных методов исследований и испытаний материалов, а также элементов конструкций», ВИАМ, 30 ноября 2015 г., Москва. 2015. с. 24.

59. Брагов А. М., Константинов А. Ю., Кочетков А. В., Модин И. А. Экспериментальное исследование динамических и статических деформационных свойств пакетов плетеных сеток. Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред», 15-17 декабря 2015г, Москва. ИПРИМ РАН. 2015. с. 49-52.

60. Брагов А. М., Константинов А. Ю., Кочетков А. В., Модин И. А. Исследование динамических и квазистатических деформационных свойств пакетов плетеных сеток. Материалы XXII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А. Г. Горшкова (Вятчи, 15-19 февраля 2016), МАИ, Москва, 2016. Т. 1. с. 54-57.

61. Брагов А. М., Горохов А. Н., Константинов А. Ю., Кочетков А. В., Модин И. А. Исследование деформационных свойств пакетов плетеных сеток.

Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. 25-31 мая 2016 г., Алушта, Крым. – М.: Изд-во МАИ, 2016. с. 307-309.

62. Константинов А. Ю., Кочетков А. В., Модин И. А., Савихин А. О., Турыгина И. А. Экспериментальное исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток в динамических и статических режимах нагружения. Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные основы баллистического проектирования» г. Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф.Устинова, 27 июня - 1 июля. 2016. с. 173-176.

63. Кочетков А. В., Леонтьев Н. В., Модин И. А. Численное исследование упругопластического деформирования металлических плетеных сеток. Материалы XXIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А. Г. Горшкова (Вятчи, 13-17 февраля 2017 г.), МАИ, Москва, 2017. Т. 2. с. 55-58.

64. Кочетков А. В., Леонтьев Н. В., Модин И. А. Численное исследование упругопластического деформирования предварительно обжатых металлических плетеных сеток. Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2017), 24–31 мая 2017 г., Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2017. с. 259-261.

65. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных явлений. Москва. Физматгиз. 1963.

66. Альтшулер Л.В., Крупников К.К., Леденев Б.Н., Жучихин В.И., Бражник М.И. Динамическая сжимаемость и уравнение состояния железа при высоком давлении. ЖЭТФ. 1958. Т. 34. с. 606.

67. Трунин Р.Ф., Симаков Г.В. Ударное сжатие пористых металлов (история и некоторые основные результаты). Труды конференции «III Харитоновские чтения», Саров. 2001.
68. Зельдович Я.Б. Об исследовании уравнения состояния с помощью механических измерений. ЖЭТФ. 1957. Т. 32. № 6. с. 1577-1578.
69. Альтшулер Л.В., Крупников К.К. Динамическая сжимаемость и уравнение состояния железа при высоких давлениях. ЖЭТФ. 1958. Т. 34. № 4. с. 874-885.
70. Крупников К.К., Бражник М.И., Крупникова В.П. Ударное сжатие пористого вольфрама. ЖЭТФ. 1962. Т.42. с. 675-685.
71. Кормер С.Б., Фунтиков А.И. Динамическое сжатие пористых металлов и уравнение состояния в области терапаскальных давлений. ЖЭТФ. 1962. Т. 42. с. 686-702.
72. Трунин Р.Ф., Симаков Г.В., Подурец М.А. Сжатие пористого кварца сильными ударными волнами. Изв. Акад. Наук СССР. Физ. Земли. 1971. № 2. с. 33-39.
73. Prager W. Ideal locking materials. Trons. Soc. Rheology. 1957. № 1. – 169 p.
74. Salvadori M.G., Skalak R., Weidlinger P. Stress waves in dissipative media. New York Acad. Sci., Div. Engr., Ser. II. 1959. № 21.
75. Fowles G.R., Curran D.R. Experimental testing of shock attenuating materials. Air Force Weapons Laboratory Technical Report AFSWC-TDR-62-22. 1962.
76. Rempel J.R. Shock-wave attenuation in elastic-rigid foams. Air Force Weapons Laboratory Report RTD-TDR-63-3056. 1963.
77. Rempel J.R., Schmidt D.N. Shock behavior of some non-reacting porous solids. 4th Symposium on Detonation, Oct. 12-15. 1965.

78. Linde R.K., Schmidt D.N. Attenuation of shock waves in distended materials. Air Force Weapons Laboratory Report AFWL-TR-66-13. 1969.
79. Fowles G.R., Curran D.R. Experimental testing of shock attenuating materials. Air Force Weapons Laboratory Technical Report AFSWC-TDR-62-22. 1962.
80. Rempel J.R. Shock-wave attenuation in elastic-rigid foams. Air Force Weapons Laboratory Technical Report RTD-TDR-63-3056. 1963.
81. Rempel J.R., Schmidt D.N. Shock behavior of some non-reacting porous solids, 4th Symposium (International) on Detonation, White Oak, Md., Oct. 12-15. 1965.
82. Rempel J.R., Schmidt D.N., Erkman J.O., Isbell W.M. Shock attenuation in solid and distended materials. Air Force Weapons Laboratory Technical Report WL-TR-64-119. 1966.
83. Boade R.R. Compression of porous copper by shock waves. J. Appl. Phys., 39-5693. 1968.
84. Butcher B.M., Karnes C.H. Dynamic compaction of porous iron. Sandia Corporation Report SC-RR-67-3040. 1968.
85. Lysne P.C., Peterson G.D. Low stress shock behavior of carbon foam. Sandia Laboratories Report SC-TM-68-775. 1968.
86. Schmidt D.N., Linde R.K. Response of distended copper, iron, and tungsten to shock loading. Air Force Weapons Laboratory Technical Report AFWL-TR-68-33. 1968.
87. Boade R.R. Dynamic compression of porous tungsten. J. Appl. Phys., 40,3781. 1969.
88. Butcher B.M., Karnes C.H. Dynamic compaction of porous iron. J. Appl. Phys., 40,2967. 1967.

89. Eden G., Smith C.P. Elastic-plastic behavior of porous beryllium. Fifth International Symposium on Detonation, Pasadena, California, August 18-21. 1970.
90. Seaman L., Linde R.K. Distended material model development. Experiments and theory for the model. Air Force Weapons Laboratory Technical Report AFWL-TR-68-143. 1969. V. 1.
91. Boade R.R. Principal Hugoniot, second-shock Hugoniot, and release behavior of pressed copper powder. J. Appl. Phys., 41,4542. 1970.
92. Boade R.R. Experimental shock loading properties of porous materials and analytical methods to describe these properties. Sagamore Army Materials Research Conference, Raquette Lake, New York, Sept. 1-4. 1970.
93. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Численное исследование упругопластического деформирования и накопления повреждений в материалах при различных режимах малоцикловых нагружений. Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. 2015. с. 236-238.
94. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б. Численное моделирование процессов деформирования изделий из нержавеющей сталей в условиях терморadiационных воздействий. Проблемы прочности и пластичности. Нижний Новгород. 2005. Т. 67. с. 26-36.
95. Капустин С.А. Численное моделирование процессов деформирования и разрушения оболочечных конструкций при квазистатических термосиловых нагружениях. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Казань. 1993.

96. Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. Издательство Нижегородского университета, Нижний Новгород. 1999. 229 с.
97. Ruan H.H., Gao Z.Y., Yu T.X. Crushing of thin-walled spheres and sphere arrays. *Int. J. Mech. Sci.* 2006. № 48. p. 117–133.
98. Баженов В.Г., Баранова М.С., Павленкова Е.В., Жегалов Д.В. Анализ роли термомеханических эффектов при больших деформациях металлов и сплавов. Проблемы прочности и пластичности. Нижний Новгород. 2011. № 73. с. 104-112.
99. Демарева А.В., Кибец А.И., Кибец Ю.И., Фролова И.А., Шошин Д.В., Шушкина Ю.А. Конечно-элементное решение нелинейных задач деформирования mhs-заполнителя при ударном нагружении. Проблемы прочности и пластичности. 2016. Т. 78 № 1. с. 60-69.
100. Герасимов А.В., Кректулева Р.А. Численное моделирование деформирования и разрушения функционально градиентных пористых материалов при взрывном и ударном нагружении. *Механика композиционных материалов и конструкций.* 1999. Т. 5. № 3. с. 94-106.
101. Мержеевский Л.А., Палецкий А.В. Расчет диаграмм динамического деформирования материалов и сплавов. *Физическая мезомеханика.* 2001. Т. 4. № 3. с. 85-96.
102. Мержеевский Л.А., Тягельский А.В. Моделирование динамического сжатия пористого железа. *ФГВ.* 1994. Т. 30. № 4. с. 124-133.
103. Попов Н.Н., Иванов А.Г., Стрекин В.П. и др. Получение полных диаграмм растяжения сплавов АМг6 и МА18 при скоростях деформации до 10^3 с^{-1} . Проблемы прочности. 1981. № 12. с. 50-54.

104. Мейер Л.В., Кунце Х.Д., Сейферт К. Динамические свойства высокопрочных сталей при растяжении. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. - М.: Металлургия. 1984. с. 61-67.
105. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир. 1967. с. 212-263.
106. Мельцас В.Ю., Портнягина Г.Ф., Соловьев В.П. Численное моделирование прохождения ударных волн через экранирующие решетки. ВАНТ. 1993. Вып. 3. с. 26–31.
107. Под ред. С.К. Годунова. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука. 1976.
108. Boade R.R. Shock waves and Mechanical Properties of Solids. Syracuse University Press. New-York. 1971.
109. Carroll M.M., Holt A.C. J.Appl.Phys. v.43. № 2. 1972.
110. Carroll M.M., Holt A.C. J.Appl.Phys. v.43. № 4. 1972.
111. Dunin S.Z., Surkov V.V. J.Appl.Mech. Techn.Phys. 1976.
112. Подурец М.А. Термодинамическая модель пористого тела. В сб. «Прочность, разрушение и диссипативные потери при интенсивных ударно-волновых нагрузках». Саров. 2009.
113. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. Int.J. of Impact Engineering. 1995. 16(2). pp. 321-330.
114. Bragov A.M., Lomunov A.K., Medvedev A.A. A modified Kolsky method for the investigation of the strain-rate history dependence of mechanical properties of materials. J. Physique. 1991. V. 4. № 1. pp. 471-475.

115. Ledford N., Paul H., Ganzenmüller G, May M., Höfemann M., Otto M., Petrinic N. Investigations on specimen design and mounting for Split Hopkinson Tension Bar (SHTB) experiments. DYMAT. 2015.
116. Sasikumar A., John N., Pushpagiri S., Koithara L. Design and Computational Validation of a Split Hopkinson Pressure Bar for Dynamic Characterization of Materials Under High Strain Rate Tension Loading. International Journal of Engineering Research & Technology. 2015. V. 4. № 06.
117. Nicholas O. Tensile testing of materials at high rates of strain. Exp.Mech. 1981. V. 21. № 5. pp. 177-195.
118. Туманов А.Т. и др. Конструкционные материалы. Издательство «Советская энциклопедия». 1965. Т. 2. с. 186.
119. Кругликов Б.С., Кутушев А.Г. Ослабление ударных волн экранирующими решетками. ФГВ. 1998. Т. 24. № 1. с. 115–118.
120. Абузьяров М.Х., Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Крылов С.В., Романов В.И., Сырунин М.А. Моделирование взаимодействия ударных волн с деформируемыми газопроницаемыми преградами. Проблемы прочности и пластичности. 2010. Т. 72. с. 120-129.
121. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. М.: Наука, 1987.
122. Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Урманчиев С.Ф. Моделирование взаимодействия воздушной ударной волны с пористым экраном. ФГВ. 2000. Т.36. № 4. с. 87–96.
123. Болдырева О.Ю., Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Кутушев А.Г. Численное исследование передачи ударно-волновой нагрузки экранируемой плоской стенке через слой порошкообразной среды и разделяющий их воздушный зазор. ФГВ. 2007. Т. 43. № 1. с. 132–142.

124. Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов. ПММ. 1960. Т. 24. № 6. с. 1057–1072.
125. Глазова Е.Г., Кочетков А.В. Численное моделирование взаимодействия деформируемых газопроницаемых пакетов сеток с ударными волнами. ПМТФ. 2012. № 3. с. 11-19.
126. Киселев С.П., Руев Г.А., Тренев А.П. и др. Ударно - волновые процессы в двухкомпонентных и двухфазных средах. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма. 1992. 261 с.
127. Гринь В.Т., Крайко А.Н., Миллер Л.Г. К распаду произвольного разрыва на перфорированной перегородке. ПМТФ. 1981. № 3. с. 95 - 103.
128. Крайко А.Н., Миллер Л.Г., Ширковский И.А. О течениях газа в пористой среде с поверхностями разрыва пористости. ПМТФ. 1982. № 1. с. 111 - 118.
129. Абузяров М.Х., Баженов В.Г., Котов В.Л., Кочетков А.В., Крылов С.В. Фельдгун В.Р. Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред. ЖВМ и МФ. 2000. Т. 40. № 6. с. 940–953.
130. Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Газодинамика процессов истечения. Новосибирск. «Наука». 1984. 234с.
131. Физика взрыва. Под ред. Орленко Л.П. Т.1. М.: Физматлит. 2002.