

На правах рукописи



ОСЕТРОВ ДМИТРИЙ ЛЬВОВИЧ

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ
И СПЛАВОВ ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ И НЕОДНОРОДНОМ
НДС С УЧЕТОМ СИЛ ИНЕРЦИИ И ТРЕНИЯ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2019

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

Научный руководитель:

Баженов Валентин Георгиевич,
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Каюмов Рашит Абдулхакович,
доктор физико-математических наук,
профессор, Казанский государственный
архитектурно-строительный университет,
профессор кафедры механики

Вильдеман Валерий Эрвинович,
доктор физико-математических наук,
профессор, Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет, заведующий кафедрой
экспериментальной механики и
конструкционного материаловедения,
директор центра экспериментальной механики

Ведущая организация:

Институт проблем машиностроения РАН
– филиал Федерального государственного
бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
Российской академии наук»,
г. Нижний Новгород

Защита состоится "26" декабря 2019 года в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Н. Новгород, пр. Гагарина, 23, корпус 6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте <https://diss.unn.ru/984>

Автореферат разослан "20" ноября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Горохов Василий Андреевич

Актуальность темы

На сегодняшний день известен широкий набор математических моделей нелинейного деформирования и разрушения упругопластических материалов при квазистатическом и динамическом нагружении. Для применения этих моделей требуются достоверные истинные диаграммы деформирования упругопластических материалов вплоть до разрушения образцов, а также необходимо учитывать изменение вида напряженно-деформированного состояния (НДС). Получить истинные диаграммы деформирования с помощью экспериментальных измерений крайне сложно, так как при испытаниях лабораторные образцы подвергаются неоднородному и неоднородному НДС, а также существенному влиянию краевого эффекта, сил трения и радиальной инерции в экспериментах на растяжение и ударное сжатие. Обычно определение деформационных и прочностных характеристик материала выполняется с использованием экспериментально-аналитических подходов, в которых применяемые аналитические методики основаны на упрощающих гипотезах. Эти методы не позволяют в полной мере учесть при больших деформациях неоднородность и неоднородность НДС в экспериментах на растяжение и ударное сжатие образцов. Таким образом, на сегодняшний день необходимы более эффективные методы определения деформационных и прочностных характеристик материалов для проведения практических расчетов на прочность элементов конструкций с приемлемой точностью.

В связи с этим для определения и исследования деформационных и прочностных свойств материалов актуально развитие экспериментально-расчетного подхода, позволяющего в отличие от экспериментально-аналитических методов без принятия упрощающих гипотез учесть неоднородность и неоднородность НДС. Данный подход основывается на итерационном уточнении характеристик материала, исходя из отличия экспериментальных данных и результатов численного моделирования процессов деформирования испытуемых образцов в эксперименте.

Степень разработанности темы

Анализ моделей деформирования упругопластических материалов, экспериментально-расчетных методов получения деформационных характеристик материала и современных подходов исследования разрушения материалов позволяет сделать следующие выводы.

Для численного моделирования нелинейного поведения материалов требуется достоверные зависимости истинных диаграмм деформирования упругопластических материалов вплоть до разрушения. При получении этих данных в экспериментах на растяжение и ударное сжатие возникают трудности, связанные с возникающей неоднородностью и неоднородностью НДС в образце, влиянием краевых эффектов, сил трения и радиальной инерции. В связи с этим для получения более достоверных данных о поведении материала целесообразно развивать экспериментально-расчетный подход, который позволяет в полной мере учитывать эти факторы.

Выдвинутая гипотеза «единой кривой» при умеренных пластических деформациях (до 15%) имеет экспериментальное подтверждение не для всех материалов. При больших деформациях влияние вида напряженного состояния на определение диаграмм деформирования экспериментально изучено недостаточно.

Закономерности образования и распространения краевых эффектов до настоящего момента недостаточно изучены. При проведении исследований стараются минимизировать их влияние на результаты путем увеличения рабочей части образцов. Динамические характеристики трения в силу сложности методик их определения также мало изучены. В известных приближенных методиках построения диаграмм деформирования с учётом сил трения и радиальной инерции коэффициенты трения предполагаются известными, тогда как способы их определения в экспериментах на ударное сжатие практически отсутствуют. На сегодняшний день верификация достоверности теоретических подходов оценки радиальной инерции при ударном сжатии образцов-таблеток неизвестна.

В последнее время большое внимание уделяется экспериментальному изучению физических и механических свойств материалов в условиях сверхпластичности. В литературе

не описаны общие методики и базовые эксперименты по определению параметров деформационного и скоростного упрочнения материалов в режиме сверхпластичности. Численное моделирование процессов деформирования в режиме сверхпластичности в постановке механики сплошной среды практически не представлено в отечественной литературе.

Для описания процессов разрушения упругопластических материалов с практической точки зрения наиболее предпочтительно использовать модель на основе кинетического уравнения накопления повреждений в сочетании с двух параметрическим критерием прочности типа Писаренко-Лебедева.

Цели и задачи диссертационной работы

Целями диссертационной работы являются развитие экспериментально-расчетных методик и исследования на их основе деформационных и прочностных свойств упругопластических материалов.

Для достижения поставленных целей были определены следующие основные задачи:

1. Исследование образования и распространения краевых эффектов, их влияния на процесс деформирования и образование шейки при растяжении образцов.

2. Исследование влияния вида напряженного состояния на определение истинной диаграммы деформирования упругопластических материалов.

3. Применение экспериментально-расчетного метода для задач определения параметров деформационного и скоростного упрочнения упругопластических материалов в условиях сверхпластичности.

4. Исследование влияния сил трения на динамическое деформирование упруговязкопластических образцов-таблеток, а также определение основных закономерностей их формоизменения в экспериментах на ударное сжатие для металлов и сплавов.

5. Исследование роли радиальной инерции и ее учет при построении динамических диаграмм деформирования для различных металлов и сплавов при скоростях деформаций выше 10^4 1/с в экспериментах на ударное сжатие.

6. Развитие экспериментально-расчетного метода для задач двухпараметрической идентификации: определение коэффициента трения и построение истинной диаграммы деформирования в экспериментах на ударное сжатие образцов-таблеток.

7. Реализация моделей разрушения упругопластических материалов на основе кинетического уравнения накопления повреждений в сочетании с двухпараметрическим критерием прочности типа Писаренко-Лебедева и однопараметрическим критерием прочности Лебедева.

Научная новизна

Определены основные закономерности образования и распространения краевых эффектов, их влияние на процесс деформирования и образование шейки. Предложен и обоснован вычислительными экспериментами параметр подобия процессов неравномерного деформирования образцов при растяжении в виде отношения тангенса угла наклона на истинной диаграмме деформирования к интенсивности напряжений.

Установлено влияние вида напряженного состояния на деформационное упрочнение стали 09Г2С при растяжении и кручении при больших деформациях.

На основе экспериментально-расчетного метода предложена методика определения параметров деформационного и скоростного упрочнения упругопластических материалов в условиях сверхпластичности.

Численно и экспериментально исследовано влияние сил трения на динамическое деформирование упруговязкопластических образцов-таблеток. Установлены основные закономерности их формоизменения для металлов и сплавов. Предложен критерий формоизменения образцов-таблеток.

На основе экспериментально-расчетного подхода проведена верификация и модификация предложенного Дхараном и Хаузером аналитического метода, что позволило вдвое уточнить вклад сил радиальной инерции при построении истинных диаграмм деформирования при ударных нагружениях.

Разработан новый метод двухпараметрической идентификации динамических диаграмм деформирования и коэффициентов трения на контактных поверхностях образцов-таблеток в экспериментах на ударное сжатие, основывающийся на численном моделировании осесимметричной динамической задачи и быстро сходящемся методе последовательных приближений.

Реализованы и апробированы связанные модели разрушения упругопластических материалов на основе кинетического уравнения накопления повреждений в сочетании с двухпараметрическим критерием прочности типа Писаренко-Лебедева и однопараметрическим критерием прочности Лебедева в виде пользовательской модели материала. Полученные результаты применения модели разрушения соответствуют известным экспериментальным фактам.

Теоретическая значимость

Развитие экспериментально-расчетного подхода позволяет существенно расширить возможности экспериментальных методик. Становится возможным идентификация динамических деформационных и прочностных параметров моделей материалов для экспериментов на ударное сжатие образцов-таблеток при неоднородном НДС с учетом влияния краевых эффектов, сил трения и радиальной инерции.

Практическая значимость

Применение численного моделирования и методов идентификации позволяют изучать свойства материалов, процессы деформирования и разрушения образцов с учетом эффектов геометрической и физической нелинейности. Разработанные методики, программное обеспечение и результаты исследований внедрены в расчетную практику ряда организаций (РФЯЦ-ВНИИЭФ, ОКБМ).

Методология и методы диссертационного исследования

В работе использованы методики экспериментально-расчетного подхода идентификации деформационных и прочностных характеристик упругопластических материалов, разработанные в НИИМ ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. основные закономерности образования и распространения краевых эффектов, их влияние на процесс деформирования и образование шейки при растяжении образцов, а также результаты исследований влияния сил трения на динамическое деформирование упруговязкопластических образцов-таблеток в экспериментах на ударное сжатие;
2. результаты исследования влияния вида напряженного состояния на определение истинной диаграммы деформирования стали 09Г2С при растяжении и кручении;
3. применение экспериментально-расчетной методики определения параметров модели поведения упругопластических материалов в режиме сверхпластичности;
4. верификация и модификация предложенного Дхараном и Хаузером аналитического метода исследования роли радиальной инерции в экспериментах на ударное сжатие;
5. новый метод двухпараметрической идентификации динамических диаграмм деформирования и коэффициентов трения на контактных поверхностях образцов-таблеток в экспериментах на ударное сжатие;
6. программная реализация в программном комплексе LS-DYNA связанных моделей разрушения упругопластических материалов на основе кинетического уравнения накопления повреждений в сочетании с двух параметрическим критерием прочности типа Писаренко-Лебедева и однопараметрическим критерием прочности Лебедева, а также численные результаты их применения.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается решением тестовых задач, исследованием сходимости предложенных методов, сопоставлением численных результатов с теоретическими и экспериментальными данными.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

- XX, XXII, XXIII, XXIII, XXIV международный симпозиум “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” (Москва, 2014, 2016, 2017, 2018);
- V международный научный семинар “Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы” (Москва, 2016);
- XI международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (прп) 2016) (Алушта, 2016);
- XX международная конференция “Вычислительная механика и современные прикладные программные системы” (Алушта, 2017);
- VII международная конференция “Деформация и разрушение материалов и наноматериалов” (Москва, 2017);
- XII международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (Алушта, 2018).

Публикации

Основные результаты исследований диссертации опубликованы в 14 публикациях [1-14], из них 13 [1-13] опубликованы в ведущих научных журналах (БАК) и 9 статей [2, 4, 7-13] – в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и/или Web of Science.

Личный вклад

- проведение численных расчетов с помощью программного средства LS-DYNA [1-14];
- анализ результатов экспериментально-расчетных исследований [1-14];
- исследования влияния краевого эффекта, сил трения и радиальной инерции на деформирование упруговязкопластических образцов в экспериментах на растяжение и ударное сжатие [3, 7-9, 12-14];
- исследования влияния вида напряженного состояния на определение истинной диаграммы деформирования стали 09Г2С при растяжении и кручении [4, 5, 10, 11, 14];
- разработка и реализация методики определения параметров деформационного и скоростного упрочнения упругопластических материалов в условиях сверхпластичности [6];
- разработка и реализация нового метода двухпараметрической идентификации коэффициента трения и истинной диаграммы деформирования в экспериментах на ударное сжатие образцов-таблеток [3, 7, 9, 13, 14];
- программная реализация в программном комплексе LS-DYNA связанных моделей разрушения упругопластических материалов на основе кинетического уравнения накопления повреждений в сочетании с двухпараметрическим критерием прочности типа Писаренко-Лебедева и однопараметрическим критерием прочности Лебедева [14].

В совместных работах Баженову В.Г. принадлежит постановка задачи, общее руководство численных исследований и анализ результатов; Осетрову С.Л. принадлежит постановка задачи и анализ результатов; Нагорных Е.В. помощь в исследованиях деформирования образцов при кручении.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Работа содержит 129 листов машинописного текста, 89 рисунков, 194 наименований библиографического списка литературы.

Диссертационная работа выполнена при поддержке

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» в рамках соглашения № 14.578.21.0246 (уникальный идентификатор RFMEFI57817X0246).

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам НИИМ ННГУ им. Н.И. Лобачевского Баженову В.Г., Осетрову С.Л., Нагорных Е.В., Кибец А.И., Барановой М.С. за консультации в проведении численных расчетов, Казакову Д.А., Жегалову Д.В. и Коробову В.Б. за помощь в проведении экспериментов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, отмечена научная новизна.

В первой главе дается обзор современных проблем в идентификации процессов деформирования и предельных характеристик упругопластических материалов в экспериментах на растяжение и ударное сжатие.

Во второй главе приведено описание используемых в диссертационной работе программных средств, а также представлены определяющие соотношения численного моделирования деформирования элементов конструкций в осесимметричной постановке.

Численное решение задач проводилось в динамической постановке с использованием пакетов прикладных программ LS-DYNA (лицензия № 244793) и «Динамика-2».

Программа LS-DYNA предназначена для решения широкого круга нелинейных двумерных и трехмерных задач механики сплошной среды в динамической и квазистатической постановке. В программе реализован метод конечных элементов с явной и неявной схемой интегрирования по времени. LS-DYNA содержит большую библиотеку конечных элементов с упрощенной (одноточечной) и полной схемой интегрирования. Для моделирования поведения материала программа имеет широкий набор моделей материалов, а также возможность их пользовательского программирования. При этом для задач моделирования разрушения элементов конструкций в программе достаточно большое количество реализовано современных моделей разрушения. Для моделирования контактного взаимодействия сред в программе реализовано более 30 высокоэффективных алгоритмов, учитывающих множество особенностей контактного взаимодействия (скольжение, сухое и вязкое трение, пробивание, контакт абсолютно твердых тел с деформируемыми).

Программа «Динамика-2» применяется для решения двумерных динамических и квазистатических задач механики сплошной среды. Для численного решения задач деформирования элементов конструкций в программе использован вариационно-разностный метод, развитие которого осуществляли Баженов В.Г. и его ученики. Этот метод в программе «Динамика-2» реализован Зефирковым С.В., Ломуновым В.К. и Нагорных Е.В.

В третьей главе на основе экспериментально-расчетного подхода проведены исследования деформационных характеристик упругопластических материалов в экспериментах на растяжение.

В основу экспериментально-расчетного метода входит решение обратной задачи определения параметров математической модели с помощью последовательного численного решения ряда прямых задач. Истинные диаграммы деформирования упругопластических материалов $\sigma_i(e_i)$ в экспериментах на растяжение определяются с помощью итерационной процедуры коррективки $\sigma_i^{n+1}(e_i) = \beta^n \sigma_i^n(e_i)$, $n = 0, 1, 2, \dots$, где $\sigma_i^n(e_i)$ – зависимость интенсивности напряжений от параметра Одквиста e_i , $\beta^n = F_3 / F_p^n$ – отношение осевых сил в

эксперименте F_3 и расчете F_p^n . Для начального приближения диаграммы деформирования может использоваться любая диаграмма упрочняющегося материала. Итерационная процедура выполняется до совпадения с заданной точностью экспериментальной и расчетной осевой силы.

Исследования образования и распространения краевых эффектов в экспериментах на растяжение проводились на цилиндрических сплошных стержнях и оболочках с различными толщинами. Численное моделирование задач квазистатического растяжения образцов осуществлялось в динамической постановке. На рисунке 1 приведены используемые при расчетах истинные диаграммы деформирования и соответствующие им значения параметра K , характеризующего отношение тангенса угла наклона на соответствующей истинной диаграмме деформирования к интенсивности истинных напряжений $K = \frac{1}{\sigma_i} \frac{d\sigma_i}{de_i}$. Кривая 1 соответствует

построенной диаграмме деформирования экспериментально-расчетным методом для стали марки 12X18H10T. Кривые 2 - 4 построены для зависимостей $K(e_i) > K_{cr}(e_i)$, $K(e_i) = K_{cr}(e_i)$, $K(e_i) < K_{cr}(e_i)$ соответственно (зависимость $K_{cr}(e_i)$ соответствует построенной диаграмме стали марки 12X18H10T).

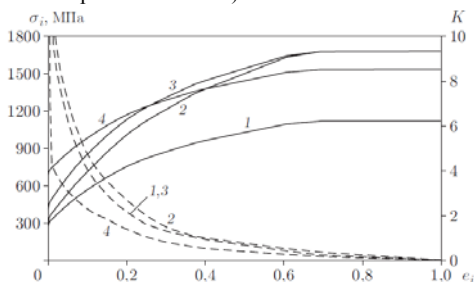


Рисунок 1 – Истинные диаграммы деформирования (сплошные линии) и зависимость $K(e_i)$ (пунктирные линии):

1 – сталь марки 12X18H10T,

2 – $K(e_i) > K_{cr}(e_i)$,

3 – $K(e_i) = K_{cr}(e_i)$,

4 – $K(e_i) < K_{cr}(e_i)$

На рисунке 2 представлены результаты численного моделирования растяжения образцов при различных истинных диаграммах деформирования материала (кривые 1 – 4 соответствуют номерам диаграмм на рисунке 1). Введены обозначения: Δe_i – разница между значением интенсивности логарифмических деформаций в точках на внешней поверхности (либо на оси вращения) и в плоскости симметрии образца, s/d_0 – первоначальное расстояние от границы рабочей части образца до плоскости симметрии образцов, отнесенное к первоначальному диаметру образца.

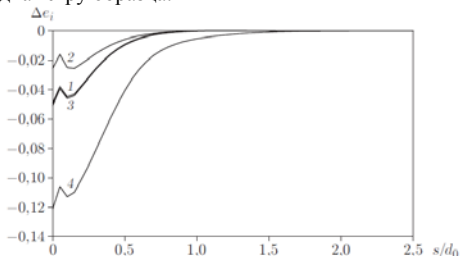


Рисунок 2 – Распределение деформации по длине сплошного цилиндрического стержня при растяжении (начальная длина $5d_0$,

$\Delta L / L_0 = 0,224$):

1 – сталь марки 12X18H10T,

2 – $K(e_i) > K_{cr}(e_i)$,

3 – $K(e_i) = K_{cr}(e_i)$,

4 – $K(e_i) < K_{cr}(e_i)$

Краевой эффект приводит к снижению интенсивности деформаций при приближении к границе рабочей части образцов. Неравномерность распределения деформаций вдоль поверхности образцов приблизительно соответствует конусу, причем максимальные отклонения возникают вблизи границ рабочей части. Зона краевого эффекта на наружной поверхности образцов распространяется на расстояние d_0 , на оси вращения стержней и внутренней поверхности оболочек на расстояние $d_0 / 2$. При дальнейшем растяжении происходит рост угла

наклона конусов, но зона распространения краевого эффекта при этом не увеличивается. При отклонениях более 10% в средней части образцов происходит формирование второго конуса и НДС становится неравномерным по всей длине образца.

Локализация процесса деформирования начинается при достижении интенсивностью деформаций критического значения, определяемого по критерию Консидера (параметр $K = 1$), что соответствует началу падения напряжений на условной диаграмме деформирования. Краевые эффекты в образцах существенно зависят от истинной диаграммы деформирования материала. Если параметр K истинной диаграммы деформирования достаточно большой (выше, чем для диаграмм 1 и 3 рисунка 1), то влияние краевых эффектов незначительно. При разных истинных диаграммах материала, но одинаковом параметре K (кривые 1 и 3 на рисунке 2), распространение краевого эффекта, изменение интенсивности деформаций в месте образования шейки и форма шеек идентично. При уменьшении параметра K скорость развития краевых эффектов и локализации деформаций увеличиваются. В итоге сделан вывод, что параметр K является параметром подобия процессов неравномерного деформирования цилиндрических образцов при растяжении.

В данном разделе представлен экспериментально-расчетный анализ [5,10,11] процессов деформирования сплошных цилиндрических образцов из стали 09Г2С при нагружении кручением и растяжением до разрушения. Истинная диаграмма деформирования при кручении была получена с. н. с. к.ф.-м.н. НИИМ ННГУ Нагорных Е.В на основе программы «Динамика-2», развитой для решения обобщенных осесимметричных задач кручения-растяжения [5,10,11].

Численные решения квазистатических задач растяжения осуществлялись в динамической постановке. На основе проведенных экспериментов на растяжение и кручение образцов в НИИМ ННГУ строились истинные диаграммы деформирования для стали 09Г2С. На рисунке 3 сплошной линией отмечена истинная диаграмма деформирования, построенная из экспериментальных данных по монотонному кручению до разрушения образца, пунктирной – по одноосному растяжению по экспериментально-расчетному методу.

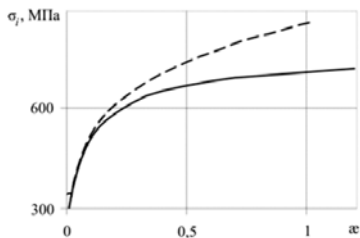


Рисунок 3

Материальные кривые, построенные при этих двух видах нагружения, при величине параметра Одовквиста $0,02 < \alpha < 0,1$ практически совпадают, что согласуется с известными из литературы данными. При величине параметра Одовквиста $\alpha = 0,2$ (момент начала образования шейки при одноосном растяжении) расхождение между кривыми составляет 4.5%, при $\alpha = 1 - 17\%$.

Построенные истинные диаграммы деформирования на основе проведенных экспериментов на растяжение и кручение сплошных образцов для стали 09Г2С практически совпадают до величины параметра Одовквиста 15 % и существенно отличаются при больших деформациях (рисунок 3), что вызвано чувствительностью пластических свойств исследуемого материала к виду напряженного состояния. В результате численного моделирования процессов деформирования образцов из стали 09Г2С при монотонном кинематическом нагружении растяжением и кручением до разрушения получено совпадение с экспериментальными данными по интегральным характеристикам (усилиям и моментам) для образцов с гладкой поверхностью с погрешностью менее 1 %.

Для численного моделирования процессов деформирования в режиме сверхпластичности вводится связь между интенсивностью напряжений и скоростью деформаций при растяжении образцов в виде $\sigma_i = \tilde{\sigma}_i(e_i) \left(\frac{\dot{e}_i}{\dot{e}_i^*} \right)^n$, где $\tilde{\sigma}_i(e_i)$ – истинная диаграмма, полученная при одноосном растяжении; $\dot{e}_i$ – текущая интенсивность скорости деформаций; $\dot{e}_i^*$ – постоянная скорость деформации, при которой получена диаграмма $\tilde{\sigma}_i(e_i)$; n – коэффициент скоростной чувствительности. Степень влияния скоростного упрочнения характеризуется коэффициентом n . Для соблюдения устойчивости пластического деформирования при растяжении коэффициент n должен находиться в пределах $1/3 \leq n \leq 1$. Для ряда материалов экспериментально показано, что коэффициент n изменяется в пределах от 0,3 до 0,7.

На основе эксперимента растяжения цилиндрического стержня из сплава титана BT9 в режиме сверхпластичности при температуре 950 °С и постоянной скорости деформации $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ проводилась корректировка значения коэффициента n пропорционально отклонению значений силы в эксперименте и расчете. Для рассматриваемой задачи растяжения стержня наилучшее согласование с экспериментом получено при значении коэффициента $n = 0,55$. На рисунке 4 представлены результаты численного решения задачи растяжения стержня с плоскостью симметрии и учетом влияния скорости деформаций на свойства материала с коэффициентом $n = 0,55$. Как видно из рисунка, при растяжении не происходит локализации деформаций в виде шейки.



Рисунок 4

На рисунке 5 показана зависимость осевого усилия на торце от относительного удлинения стержня (сплошная линия – результат расчета, штриховая – результат эксперимента). В этом случае экспериментальная и расчетная зависимости осевых усилий от относительного удлинения стержня практически совпадают.

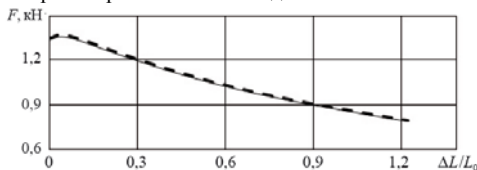


Рисунок 5

На основе экспериментально-расчетного подхода предложена методика определения коэффициента скоростного упрочнения n на основе одного эксперимента растяжения образца с постоянной скоростью деформаций. Для сплава титана BT9 при температуре 950 °С и скорости деформации $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ определено значение коэффициента $n = 0,55$, при котором получено хорошее соответствие с экспериментальным результатом. Этот подход можно применять и при других видах нагружения в режиме сверхпластичности независимо от формы поперечного сечения образцов.

В четвертой главе проведены исследования деформационных характеристик упругопластических материалов в экспериментах на динамическое сжатие и разработан новый метод определения сил трения на контактных поверхностях образцов-таблеток и построения динамических диаграмм деформирования с учетом сил трения.

Проведено численное моделирование процессов деформирования в системе ударник-образец-мерный стержень в осесимметричной постановке. Между контактными границами дисков и образцов-таблеток задавались условия одностороннего контактного взаимодействия с учетом сухого трения по закону Кулона с коэффициентами трения 0; 0,1; 0,2; 0,3. При больших

деформациях из-за искажения конечно-элементной сетки вблизи границ контактной области необходимо применять процедуру коррекции сетки в процессе деформирования, причем многократно.

На рисунке 6 представлены формоизменения и распределения интенсивностей истинных пластических деформаций в образце-таблетке ($L_0 / R_0 = 2$, $R_0 = 10$ мм – начальный радиус образца, L_0 – начальная высота образца) при условных деформациях осадки 50% и коэффициенте трения 0.3 для мало чувствительных к скорости деформаций материалов 09Г2С (а) и вязкопластического свинца при средней скорости деформации $\dot{\varepsilon}_0 = 1000$ 1/с (б).

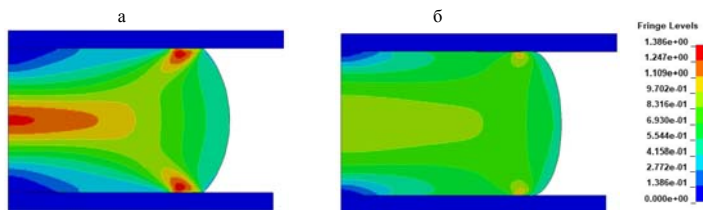


Рисунок 6

При учете трения НДС таблеток неоднородно. Неоднородность существенно возрастает при увеличении сил трения и степеней деформаций. Максимальные пластические деформации и осевые напряжения возникают в области, примыкающей к центру таблетки. По мере деформации эти области расширяются. Для вязкопластических материалов, чувствительных к скорости деформации, например, свинца, с увеличением скорости удара и соответственно скорости деформаций роль трения возрастает из-за существенной неоднородности скоростей деформаций в образце-таблетке.

Формоизменение боковой поверхности образцов главным образом зависит от отношения L_0 / R_0 , величины силы (коэффициента трения) и степени сжатия. Эти формоизменения можно охарактеризовать отношением h / L , где $h = R - (R_n + R_b) / 2$, а $R(z)$ – радиус контура арки деформированного образца (z – ось образца), R_n , R_b , L – минимальные нижний и верхний радиусы контура арки и высота деформированного образца, соответственно.

На рисунке 7 приведена относительная погрешность δ в определении диаграмм деформирования без учета сил трения для 09Г2С (а) и свинца (б, при скорости деформации $\dot{\varepsilon} = \dot{u} / L = 500$ 1/с) от степени деформации ε при коэффициенте трения 0,2 и размерах образца $L_0 / R_0 = 1$, $L_0 / R_0 = 2$ и $L_0 / R_0 = 3$ (кривые 1, 2 и 3 соответственно).

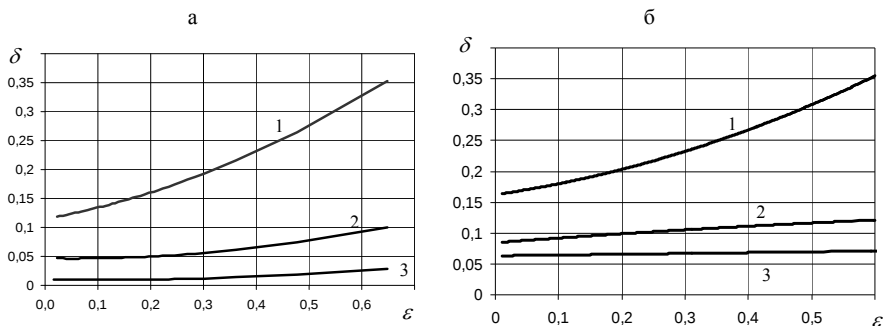


Рисунок 7

Таким образом, не учет формоизменения образца при построении диаграмм деформирования может привести к существенным погрешностям, как это следует из анализа

результатов, представленных на рисунке 7. Погрешность определяется главным образом величиной коэффициента трения и размерами образца. При этом величина погрешности в построении диаграмм деформирования для материалов чувствительных к скорости деформаций выше, чем для мало чувствительных.

Параметр бочкообразования – высота арки мало зависит от диаграмм динамического деформирования упругопластических материалов, так как при деформациях более 1 % они практически не сжимаемы, что и определяет картину пластического течения и формоизменения образцов-таблеток. При использовании закона сухого трения Кулона сила трения прямо пропорциональна нормальному давлению, которое определяется диаграммой деформирования и степенью деформации. Поэтому имеет место однозначное соответствие между высотой арки и коэффициентом трения в процессе осадки образцов-таблеток из различных металлов с одинаковой первоначальной геометрией.

В работе Дхарана и Хаузера теоретически оценивалась радиальная инерция при ударном сжатии образца-таблетки. Радиальное напряжение определялось в виде

$$\sigma_r(t) = \frac{\rho}{4L_{s0}(1-\varepsilon_n(t))} \left[\frac{3V_x^2(t)}{2L_{s0}(1-\varepsilon_n(t))} + \frac{dV_x}{dt} \right] \cdot \left[\frac{R_0^2}{(1-\varepsilon_n(t))} - r^2 \right],$$

где ρ – плотность материала, $\varepsilon_n(t)$ – условная осевая деформация образца.

Дхаран и Хаузер предположили, что радиальное напряжение не зависит от r и равно $\sigma_r(t) = \alpha [\sigma_r(t)]_{\max}$, $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq 1$. В дальнейшем авторы полагают, что $\alpha = 1$ является удовлетворительным приближением. В связи с этим, при испытании на сжатие с постоянной скоростью $V_x = \text{const}$ формула преобразуется к виду

$$\sigma_r(t) = \frac{3}{8} \rho \left(\frac{R_0}{L_{s0}} \right)^2 \frac{V_x^2}{(1-\varepsilon_n(t))^2}.$$

Скорректированное истинное напряжение будет равно $\sigma(t) = \sigma_x(t) - \sigma_r(t)$, ($\sigma_r(t) = \sigma_\theta(t)$). Здесь $\sigma_x(t)$ – усредненное осевое напряжение, полученное из эксперимента, $\sigma_\theta(t)$ – окружное напряжение.

На основе экспериментально-расчетного подхода и экспериментальных данных (сила – перемещение) по ударному сжатию алюминия определена итерационным методом динамическая диаграмма деформирования алюминия с учетом радиальной инерции при неизменных скоростях удара. На рисунке 8 представлены диаграммы деформирования и соответствующие им радиальные напряжения, полученные с помощью экспериментально-расчетного метода и методики Дхарана и Хаузера при значении коэффициента $\alpha = 1$.

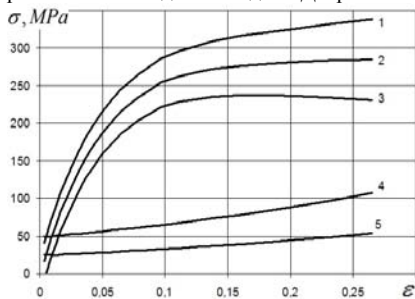


Рисунок 8 – Истинные диаграммы деформирования и соответствующие им радиальные напряжения в алюминиевом образце:
1 – осевое напряжение $\sigma_x(\varepsilon)$ из эксперимента;
2 – истинная диаграмма деформирования, полученная экспериментально-расчетным методом;
3 – истинная диаграмма деформирования, полученная методом Дхарана и Хаузера при коэффициенте $\alpha = 1$;
4 и 5 – радиальные напряжения, соответствующие диаграммам 3 и 2.

Полученная зависимость осевого напряжения $\sigma_x(\varepsilon)$ на рисунке 8 является усредненным значением по поперечному сечению образца. Усредненное значение радиального напряжения можно получить в виде

$$\alpha = \frac{\frac{1}{A} \int_A \sigma_r(t) dA}{\sigma_r(t)_{\max}} = \frac{\frac{2}{R^2} \int_0^R \sigma_r(t) r dr}{\sigma_r(t)_{\max}} = 0,5,$$

где A – площадь поперечного сечения образца. Таким образом, принятие условия $\sigma_r(t) = \sigma_r(t)_{\max}$, что соответствует $\alpha = 1$, приводит к завышению сил радиальной инерции в два раза и существенной погрешности (рисунок 8) в построении истинной диаграммы деформирования. При использовании методики Дхарана и Хаузера с коэффициентом $\alpha = 0,5$ ($\sigma_r(t) = 0,5 \cdot \sigma_r(t)_{\max}$) наблюдается совпадение построенной диаграммы деформирования с диаграммой, полученной экспериментально-расчетным методом. Таким образом, применение модифицированной методики позволяет с высокой точностью строить динамические диаграммы деформирования упругопластических материалов.

Приведенные зависимости радиальных и окружных напряжений вдоль радиуса образца-таблетки с высокой точностью совпадают с численными результатами решения задачи в осесимметричной постановке. С практической точки зрения аналитические зависимости, полученные Дхараном и Хаузером, весьма просты и достаточно точны для оценки степени влияния радиальной инерции в экспериментах на ударное сжатие образцов-таблеток из металлов и сплавов с учетом предложенной модификации.

Предлагаемый экспериментально-расчетный метод определения динамических диаграмм деформирования и сил трения в экспериментах на ударное сжатие образцов-таблеток заключается на следующем итерационном алгоритме. Первоначально диаграммы деформирования строятся по экспериментальной осевой силе при коэффициенте трения равным нулю при однородном напряженно-деформированном состоянии. Затем осуществляется итерационный процесс определения коэффициентов трения с найденной диаграммой деформирования. В процессе итераций корректируются коэффициенты трения на нижней и верхней поверхностях образцов-таблеток посредством линейной интерполяции (экстраполяции) по разности высот арок в расчете и эксперименте до сходимости. В начальном приближении коэффициент трения задается равным 0,15. Далее производится уточнение динамических диаграмм деформирования. Диаграммы деформирования строятся по предложенной ранее процедуре экспериментально-расчетного подхода. При значительных различиях в диаграммах деформирования, построенных без учета и с учетом сил трения, производится уточнение коэффициентов трения и т.д.

На основе предложенного подхода определены коэффициенты трения в экспериментах при однократном ударном сжатии образцов-таблеток из стали 09Г2С ($R_0 = 5$ мм, $L_0/R_0 = 3$) и свинца С1 ($R_0 = 20$ мм, $L_0/R_0 = 1$). На рисунке 9 приведены зависимости коэффициентов сухого трения на нижней и верхней поверхностях от скорости деформации при ударном нагружении образцов-таблеток для стали 09Г2С ($R_0 = 5$ мм, $L_0/R_0 = 3$) и свинца С1 ($R_0 = 20$ мм, $L_0/R_0 = 1$), полученные из экспериментов на газодинамической копровой установке по приведенному выше алгоритму.

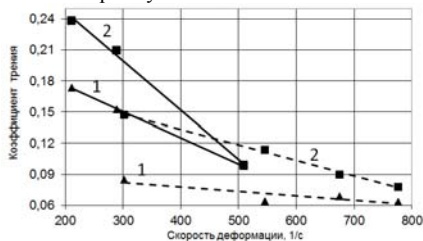


Рисунок 9 – Изменение коэффициентов сухого трения от скорости деформации (на нижней поверхности – кривые 1, на верхней поверхности – кривые 2) для 09Г2С и свинца (пунктирные и сплошные линии соответственно).

Для образцов-таблеток из стали 09Г2С ($R_0 = 5$ мм, $L_0/R_0 = 3$) испытания на пневматическом копре проводились при скоростях удара 10-12 м/с в четыре этапа с ограничителями перемещений: 1) 1,5 мм; 2) 3 мм; 3) 4,5 мм; 4) 6 мм. Поэтапное нагружение

позволяет с большей точностью получить зависимость сил сухого и вязкого трения от скорости нагружения (скоростей деформаций). Эксперименты на ударное сжатие образцов-таблеток проводились без смазки и со смазкой ЦИАТИМ 201, а также с наиболее часто применяемой в экспериментах фторопластовой пленкой. Применение смазки ЦИАТИМ 201 и фторопластовой пленки оказывает практически одинаковое влияние на формоизменение образцов в эксперименте и, следовательно, силы трения. Для оценки возникающих на контактных границах образца-таблетки сил вязкого трения в экспериментах со смазкой применялся приведенный выше алгоритм для определения сил сухого трения. Этот подход позволяет оценить силы сухого и вязкого трения в каждом конкретном эксперименте ударного сжатия и провести их сопоставление через найденные коэффициенты трения. Несмотря на физическое различие механизмов сухого и вязкого трения и не применимость в общем случае модели Кулона для описания закономерностей гидродинамического сопротивления при наличии смазки между контактными поверхностями, рассмотренный выше подход позволяет оценить силы вязкого трения, которые однозначным образом связаны со степенью формоизменения образца. На рисунке 10 приведены зависимости коэффициентов сухого и вязкого трения на нижней и верхней поверхностях от скорости деформации при ударном нагружении образцов-таблеток для стали 09Г2С, полученные из экспериментов на газодинамической копровой установке по приведенному выше алгоритму.

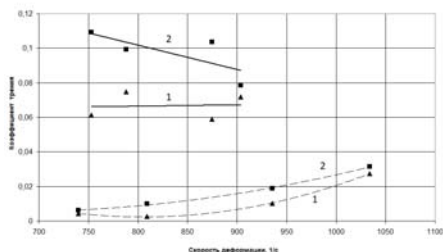


Рисунок 10 – Изменение коэффициентов сухого (сплошные линии) и вязкого (пунктирные линии) трения от скорости деформации (на нижней поверхности - кривые 1, на верхней поверхности - кривые 2) для 09Г2С

С увеличением скорости деформации полученные коэффициенты сухого трения уменьшаются, что соответствует известной физической закономерности. Интересно заметить, что с увеличением скорости удара (скоростей деформаций) наблюдаются противоположные закономерности изменения сил сухого и вязкого трения. С увеличением скоростей деформаций силы сухого трения уменьшаются, а при наличии смазки — увеличиваются, что вполне согласуется с гидродинамической теорией смазки. Очевидно, что существенное уменьшение сил трения за счет смазки имеет место при скоростях деформаций менее 10^3 1/с. Однако, при больших скоростях деформаций и высоких давлениях эффект смазки быстро уменьшается.

В пятой главе приведена реализация и апробация моделей разрушения на основе кинетического уравнения накопления повреждений в сочетании с двухпараметрическим критерием прочности типа Писаренко-Лебедева и однопараметрическим критерием прочности Лебедева.

Предлагаемые модели разрушения основаны на использовании критериев прочности в сочетании с кинетическими моделями накопления повреждений. Данный подход является наиболее предпочтительным при решении прикладных задач, как с точки зрения реализации, так и с точки зрения возможностей экспериментального оснащения материальными функциями и константами. Одним из наиболее предпочтительных вариантов критериев прочности является критерий типа Писаренко-Лебедева $\chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_1 A^{1-\psi_\sigma} = \sigma_p$, где σ_i , σ_1 - интенсивность напряжений и наибольшее главное напряжение, $A < 1$ - параметр неоднородности материала, $\psi_\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_i$ - коэффициент жесткости напряженного состояния, $\chi = \sigma_p / \sigma_c$, где σ_p и σ_c - пределы прочности на растяжение и сжатие соответственно. Первое слагаемое характеризует упругопластические, а второе - хрупкие свойства материала при разрушении.

В качестве кинетического уравнения накопления повреждений наиболее предпочтительной для практического применения является схема линейного суммирования повреждений, которая может быть представлена следующим образом

$$\dot{\omega} = \frac{\dot{\lambda}}{\lambda^* f(\psi_{\sigma}, \mu_{\sigma}, \mu_e, \varphi_{\sigma}, \dots)},$$

где λ - переменная, параметризующая процесс упругопластического деформирования, а λ^* - предельное значение этой переменной, $f(\psi_{\sigma}, \mu_{\sigma}, \mu_e, \varphi_{\sigma}, \dots)$ - безразмерная функция, характеризующее влияние вида НДС на степень поврежденности материала.

В качестве параметра λ будем использовать параметр Одквиста α . В качестве предельного значения α^* будем использовать значения параметра Одквиста при разрушении при растяжении α_p . В качестве функции влияния $f(\psi_{\sigma}, \mu_{\sigma}, \mu_e, \varphi_{\sigma}, \dots)$ будем рассматривать:

• однопараметрическая модель Лебедева $f(\psi_{\sigma}) = B^{(\psi_{\sigma}-1)}$, где B - характеристика чувствительности материала к виду НДС;

• двухпараметрическая модель Писаренко-Лебедева $f(\psi_{\sigma}, \varphi_{\sigma}) = \frac{\alpha_i(\sigma_i^*)}{\alpha_p}$, где α_p -

предельное значение параметра Одквиста при растяжении, $\sigma_i^* = \frac{\sigma_p}{\chi + \frac{(1-\chi)}{3}(2 \cos(\varphi_{\sigma}) + \psi_{\sigma})A^{1-\psi_{\sigma}}}$

- предельное значение интенсивности напряжений, $\alpha_i(\sigma_i^*)$ - обратная функция истинной диаграммы деформирования, т.е. зависимость параметра Одквиста от интенсивности напряжений.

На практике используют как связанные модели накопления повреждений, в которых учитывается влияние параметра поврежденности на характеристики материала или процесса деформирования, так и несвязанные модели, в которых данная взаимосвязь не закладывается. Связанная модель разрушения обычно основывается на учете влияния параметра поврежденности ω на свойства материала: $K = K(1 - \omega^n)$, $G = G(1 - \omega^n)$, $\sigma_i = \sigma_i(\alpha)(1 - \omega^n)$, где K , G - упругие характеристики материала модуль объемного сжатия и модуль сдвига соответственно, $\sigma_i(\alpha)$ - истинная диаграмма деформирования. Параметр n определяется путем экспериментально-расчетных исследований свойств материала до момента разрушения при различных видах НДС.

Программная реализация связанной двухпараметрической модели разрушения Писаренко-Лебедева выполнялась в виде пользовательской модели упругопластического материала с изотропным упрочнением в программных комплексах «Динамика-2» и LS-DYNA. Для однопараметрической модели разрушения Лебедева программная реализация аналогична за исключением вычисления функции влияния.

Численное моделирование процесса накопления повреждений проводилось при квазистатическом растяжении сплошного стержня и цилиндрической оболочки, а также при сжатии между пластинами одного и двух шаров. Полученные результаты накопления повреждений при растяжении сплошного стержня приведены на рисунке 11.

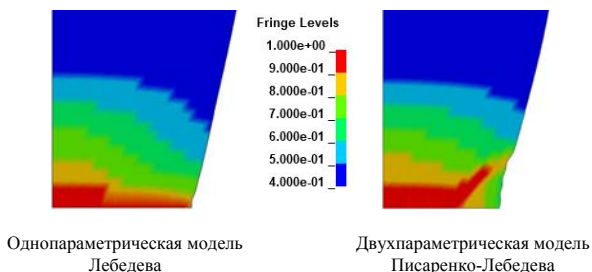


Рисунок 11

При использовании двухпараметрической модели Писаренко-Лебедева процесс зарождения и распространения повреждений качественно хорошо описывает экспериментальные данные при растяжении сплошного стержня. Первоначально разрушение реализуется вблизи его оси отрывом, а в дальнейшем распространяется к свободной поверхности и трансформируется в сдвиговое разрушение. В итоге полученная поверхность разрушения напоминает форму «чашечки», что соответствует известным экспериментальным данным. При этом однопараметрическая модель Лебедева описывает разрушение стержня только отрывом. При растяжении цилиндрической оболочки рассматриваемые обе модели описывают сдвиговое разрушение, что также является экспериментальным фактом.

При сжатии между пластин одного и двух шаров рассматриваемые обе модели качественно хорошо описывают вид разрушения шаров в экспериментах. При деформировании одного шара разрушение развивается из его центра и принимает вид двух симметричных конусов. Для случая двух шаров картина развития повреждений в каждом из них на начальных этапах нагружения аналогична одному шару и практически симметрична, а в дальнейшем несимметрия возрастает и разрушается только один шар.

Таким образом, для описания последовательного разрушения отрывом и сдвигом необходимо использовать двухпараметрические модели на основе критерия прочности типа Писаренко-Лебедева, позволяющие описывать хрупкое и пластическое разрушение. Для описания разрушения только отрывом или сдвигом при простых путях нагружения можно использовать однопараметрические деформационные модели типа Лебедева, которые учитывают влияние вида НДС только через параметр жесткости напряженного состояния. Но при этом нужно использовать различные значения константы B . Очевидно, что константу B в модели Лебедева необходимо подбирать в зависимости от вида разрушения.

В заключении приведены основные выводы диссертационной работы.

Исследованы процессы упругопластического деформирования цилиндрических стержней и оболочек различной толщины при растяжении. Рассмотрено влияние геометрии образцов и диаграмм деформирования на развитие краевых эффектов и процесс формообразования шейки. Исследована применимость критерия Консидера для определения момента потери устойчивости пластического деформирования при растяжении. Предложен и обоснован вычислительными экспериментами параметр подобия процессов неравномерного деформирования образцов при растяжении в виде отношения тангенса угла наклона на истинной диаграмме деформирования к интенсивности напряжений.

Установлено влияние вида напряженного состояния на деформационное упрочнение стали 09Г2С при растяжении и кручении при больших деформациях. Сопоставление диаграмм деформирования стали 09Г2С, полученных при растяжении и кручении образцов, показало существенное различие при деформациях более 20%.

На основе экспериментально-расчетного метода предложена методика построения зависимости между интенсивностью напряжений и скоростью деформаций при растяжении образца в режиме сверхпластичности, основанная на анализе экспериментальных данных и численного моделирования процессов деформирования испытываемых образцов в эксперименте.

Численно и экспериментально исследовано влияние сил трения на динамическое деформирование упруговязкопластических образцов-таблеток. Установлены основные закономерности их формоизменения для металлов и сплавов. Предложен критерий формоизменения образцов-таблеток. Разработан новый метод идентификации коэффициентов сухого трения на контактных поверхностях в зависимости от формоизменения образцов-таблеток, основывающийся на численном моделировании осесимметричной динамической задачи и быстро сходящемся методе последовательных приближений. С высокой степенью достоверности обосновано разделение задачи двухпараметрической идентификации на две задачи однопараметрической параметризации: задачу определения коэффициента трения и задачу построения истинной динамической диаграммы деформирования в данном эксперименте при найденном ранее коэффициенте трения. В итоге итерационным методом строятся динамические диаграммы деформирования с учетом сил трения и радиальной инерции. В известных приближенных методиках построения диаграмм деформирования с учётом сил трения и радиальной инерции коэффициенты трения предполагаются известными, тогда как способы их определения в экспериментах на ударное сжатие практически отсутствуют.

Посредством численного моделирования процесса деформирования исследована степень влияния радиальной инерции на построение динамических диаграмм деформирования для различных металлов и сплавов (сталь 12Х18Н10Т, алюминий) при скоростях деформаций $10^4 - 10^5$ 1/с. На основе экспериментально-расчетного подхода проведена верификация и модификация предложенного Дхараном и Хаузером аналитического метода, что позволило вдвое уточнить вклад сил радиальной инерции при построении истинных диаграмм деформирования при ударных нагружениях.

Реализованы связанные модели разрушения упругопластических материалов на основе кинетического уравнения накопления повреждений в сочетании с двухпараметрическим критерием прочности типа Писаренко-Лебедева и однопараметрическим критерием прочности Лебедева. Применение данных моделей разрушения позволило получить удовлетворительное согласование с экспериментальными данными как по характеру разрушения, так и по НДС при растяжении сплошных и трубчатых образцов из малоуглеродистой стали, а также при сжатии одного и двух шаров между пластинами из высокопрочного материала.

Разработанные методики идентификации в дальнейшем будут использованы для исследований деформационных и прочностных характеристик упругопластических материалов, а также для оснащения материальными константами моделей, описывающих процессы разрушения упругопластических материалов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Баженов В.Г., Баранова М.С., Осетров С.Л., Осетров Д.Л. Метод экспериментально-теоретического исследования деформационных и прочностных характеристик упруговязкопластических материалов методом прямого удара. Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И.Я.Яковлева. Серия: Механика предельного состояния, №3(25), 2015, с.44-50. **(Перечень ВАК)**

2. Bazhenov V.G., Baranova M.S., Nagornykh E.V., Osetrov D.L. Experimental and calculated approach to the study of deformation and strength characteristics of elastoviscoplastic materials by direct impact method. EPJ Web of Conferences 11. Сер. "DYMAT 2015 - 11th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials Under Dynamic Loading" 2015, С. 01061 **(Перечень ВАК, Scopus, Web of Science)**.

3. Баженов В.Г., Баранова М.С., Осетров Д.Л. Влияние трения на усилия ударного сжатия и формоизменения упруговязкопластических образцов-таблеток. Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2016. № 3 (29). С. 85-92. **(Перечень ВАК)**

4. Bazhenov V.G., Osetrov S.L., Osetrov D.L., Artemyeva A.A. Influence of the type of stress-strain state on the true stress-strain curve for the elastoplastic materials. Materials Physics and Mechanics. 2016. Т. 28. № 1-2. С. 53-56 **(Перечень ВАК, Scopus, Web of Science)**.

5. Баженов В.Г., Казаков Д.А., Нагорных Е.В., Осетров Д.Л., Рябов А.А. Численное и экспериментальное исследование упругопластических процессов растяжения-кручения цилиндрических образцов из стали 09Г2С при больших деформациях. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 4-2 (324). С. 76-82. **(Перечень ВАК)**
6. Баженов В.Г., Осетров С.Л., Осетров Д.Л. Численное моделирование растяжения стержня и идентификация параметров деформирования материала в режиме сверхпластичности. Проблемы прочности и пластичности. 2017. Т. 79. № 4. С. 471-483. **(Перечень ВАК)**
7. Баженов В.Г., Баранова М.С., Осетров Д.Л., Рябов А.А. Метод определения сил трения в экспериментах на ударное сжатие и построение динамических диаграмм деформирования металлов и сплавов. Доклады Академии наук. 2018, Т. 481, № 5, С. 490-493 **(Перечень ВАК, Scopus, Web of Science)**.
8. Баженов В.Г., Осетров С.Л., Осетров Д.Л. Анализ закономерностей растяжения упругопластических образцов и образования шейки с учетом краевых эффектов. Прикладная механика и техническая физика. 2018, Т. 59, № 4 (350), С. 133-140 **(Перечень ВАК, Scopus, Web of Science)**.
9. Баженов В.Г., Осетров Д.Л., Рябов А.А. Построение диаграмм деформирования металлов и сплавов при ударном сжатии образцов-таблеток с учетом сил трения. Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2018, Т. 18. № 4, С. 381-389 **(Перечень ВАК, Web of Science)**.
10. Баженов В.Г., Казаков Д.А., Нагорных Е.В., Осетров Д.Л., Рябов А.А. Экспериментальное и теоретическое исследование больших деформаций цилиндрических образцов из стали 09Г2С с концентраторами напряжений при нагружении растяжением-кручением до разрушения. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика, 2018, № 4, С. 69-81 **(Перечень ВАК, Scopus)**.
11. Баженов В.Г., Нагорных Е.В., Осетров Д.Л., Рябов А.А. Численно-экспериментальный анализ процессов растяжения-кручения цилиндрических образцов из стали 09Г2С при больших деформациях до разрушения. Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2018, Т. 160, № 3, С. 495-507 **(Перечень ВАК, Scopus, Web of Science)**.
12. Bazhenov V.G, Osetrov D.L. Construction of deformation diagrams in experiments on impact compression of tablets-specimens with allowance for radial inertia. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1158, 2019, doi:10.1088/1742-6596/1158/2/022021 **(Перечень ВАК, Scopus)**.
13. Bazhenov V. G., Osetrov D. L. Method of identification of dry and viscous friction forces and construction of dynamic deformation diagrams of metals in experiments with impact compression. Lobachevskii Journal of Mathematics, 2019, Vol. 40, No. 3, pp. 278–283 **(Перечень ВАК, Scopus, Web of Science)**.
14. Баженов В.Г., Осетров С.Л., Осетров Д.Л., Идентификация прочностных свойств металлов при больших деформациях. Beau Bassin: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 176 с.

Подписано в печать 24.10.2019

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 693.

Отпечатано в РИУ Нижегородского госуниверситета

им. Н.И. Лобачевского.

603000, Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37.

