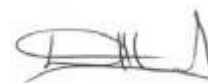


*На правах рукописи*



ЖЕГАЛОВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПРОЦЕССОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ**

Специальность 01.02.06 -

Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2011

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте механики Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского»

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор физико-математических наук, профессор  
**Баженов Валентин Георгиевич**

Научный консультант: кандидат технических наук  
**Казаков Дмитрий Александрович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Рузанов Александр Иванович**  
доктор физико-математических наук  
**Ломунов Андрей Кириллович**

Ведущая организация: **Тверской государственный технический университет**

Защита состоится " 28 " апреля 2011 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Н. Новгород, пр. Гагарина, 23, корпус 6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета.

Автореферат разослан " 26 " марта 2011 г.

Ученый секретарь  
Совета Д 212.166.09  
доктор физико-математических наук,  
профессор



Л. А. Игумнов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Проектирование и прочностной расчет современных деталей и элементов конструкций определяется экстремальными значениями их рабочих параметров в условиях сложного напряженного состояния. Общей тенденцией является повышение надежности и долговечности конструкций. В связи с этим важными задачами являются выявление основных закономерностей процессов деформирования, а также достоверная оценка истории деформирования материала. Кроме этого для прочностных расчетов деталей и элементов конструкций требуются достоверные данные о поведении материала при больших упругопластических деформациях (диаграмма деформирования, предельные деформационные и прочностные характеристики и т.д.). Получение этих характеристик только экспериментальным путем затруднено, так как современные инструментальные средства не позволяют оценить неодноосность и неоднородность напряженно-деформированного состояния (НДС) в лабораторных образцах, влияние краевых эффектов и т.п. В этой связи целесообразно для анализа деформирования и предельных состояний совместно осуществлять физическое и теоретическое исследование. Такой подход предполагает проведение совместного анализа эксперимента и компьютерного моделирования процессов деформирования и разрушения лабораторных образцов или элементов конструкций, и если требуется итерационного уточнения диаграммы деформирования, предельных деформационных и прочностных характеристик материала.

Учитывая вышесказанное, актуальными являются экспериментально-теоретические исследования поведения материалов при больших формоизменениях, развитие экспериментальных методов и методов компьютерного моделирования процессов деформирования и разрушения лабораторных образцов или элементов конструкций и их экспериментальное обоснование.

**Цели диссертационной работы** формулируются следующим образом:

1. Развитие и обоснование экспериментально-расчетного подхода, основанного на сочетании экспериментального и численного исследования процессов деформирования и разрушения лабораторных образцов и элементов конструкций при больших деформациях;
2. Разработка экспериментальной методики, использующей технологию цифровой фотографии, для оценки распределения полей деформаций на поверхности лабораторных образцов и элементов конструкций и построения диаграмм деформирования;
3. Модификация экспериментально-расчетного метода для получения диаграмм деформирования и прочностных характеристик упругопластических материалов на основе результатов эксперимента и численного моделирования процессов кинетического индентирования шара в образец – пластину (проба Бринелля);
4. Модификация экспериментально-расчетного метода для исследования

деформирования и разрушения цилиндрических образцов при комбинированных нагрузениях кручением-растяжением до разрушения (пропорциональное нагружение, последовательное нагружение растяжением и кручением, кручением и растяжением);

5. Исследование процессов упругопластического деформирования, предельных состояний и разрушения элементов конструкций при различных видах нагружения.

#### **Научная новизна:**

В диссертации представлен комплексный подход к решению задач упругопластического деформирования материалов при больших деформациях, включающий в себя экспериментальные исследования и численное моделирование;

Разработана экспериментальная методика, использующая технологии цифровой фотографии и измерительных систем National Instruments, для оценки изменения полей деформаций на примере лабораторных образцов с различной формой рабочей части в процессе их нагружения;

Проведено развитие экспериментально-расчетной методики получения диаграмм деформирования и прочностных характеристик упругопластических материалов, основанной на идентификации результатов эксперимента с помощью численного моделирования процессов деформирования. Представлена апробация методики при кинетическом индентировании шара в образец – пластину (проба Бринелля);

Выполнены экспериментальные и численные исследования процессов деформирования сплошных цилиндрических образцов из стали 12X18H10T при комбинированных монотонных нагрузениях кручением-растяжением до разрушения (последовательное нагружение растяжением и кручением, кручением и растяжением). Дана оценка различия в характере и параметрах разрушения при монотонном и сложном нагружении;

Проведено исследование параметров модели пластичности, определяющих влияние изотропной и кинематической частей упрочнения на параметры НДС при сложном нагружении и больших деформациях;

Исследованы процессы упругопластического деформирования, предельные состояния и разрушение элементов конструкций при различных видах нагружения.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивалась выбранной методикой проведения экспериментов, предварительной тарировкой измерительных устройств и подтверждается решением тестовых задач и сопоставлением результатов расчетов с теоретическими и экспериментальными данными.

#### **Практическая ценность.**

Разработанные и реализованные методы и алгоритмы позволяют существенно расширить класс решаемых задач при исследовании процессов упругопластического

деформирования, предельных состояний и разрушения конструкций. Разработанные методики и результаты исследований внедрены в расчетную практику РФЯЦ-ВНИИЭФ.

**Диссертационная работа выполнена при поддержке.**

Грантов Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (гранты НШ-3367.2008.8, НШ-4807.2010.8), грантов РФФИ (05-01-00837-а, 05-01-08055-офи\_п, 08-01-00500-а, 09-08-97034-р\_поволжье\_а).

**На защиту выносятся:**

1. Создание экспериментального комплекса на базе технологии цифровой фотографии и современной программной и измерительной системы National Instruments, позволяющего проводить измерения полей деформации в рабочей части лабораторных образцов и элементов конструкций при квазистатических нагружениях и больших деформациях;

2. Модификация экспериментально-расчетного метода получения истинных диаграмм деформирования и прочностных характеристик упругопластических материалов при кинетическом индентировании;

3. Экспериментальное и численное исследование процессов деформирования упругопластических тел вращения при простых и сложных нагружениях растяжением и кручением;

4. Экспериментальные результаты и численное исследование процессов упругопластического деформирования и разрушения лабораторных образцов с различной геометрией рабочей части.

**Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и симпозиумах: II Научной конференции по механике и прочности конструкций, посвященной 80-летию академика Е. А. Негина (г. Саров, 10-12 января 2001 г.), всероссийской научной конференции по волновой динамике машин и конструкций, посвященной памяти профессора А.И. Весницкого (г. Н. Новгород, 1-5 июня 2004 г.), II международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (DFMN 2007) (г. Москва, 8–11 октября 2007 г.).

**Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1-12], 7 из которых статьи из перечня журналов, рекомендуемых ВАК РФ.

**Личный вклад соискателя**

Основные результаты диссертации получены лично Жегаловым Д. В. путем проведения экспериментальных исследований, численного моделирования процессов кинетического индентирования. Баженову В. Г. принадлежит постановка задач и общее руководство исследованиями. Казаков Д. А. и Крамарев Л. Н. осуществляли руководство

экспериментальными исследованиями. Павлѐнкова Е.В. осуществляла численное моделирование упругопластических процессов растяжения – кручения осесимметричных тел при больших деформациях.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Основной печатный текст составляет 112 страниц, 60 рисунка, 18 страниц - список цитируемой литературы (246 наименований).

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы и сформулированы основные направления исследований.

**В первой главе** проведен анализ современного состояния проблемы поведения упругопластических материалов при больших формоизменениях, представлен обзор экспериментальных методов получения параметров уравнений состояния, методов численного моделирования задач упругопластического деформирования элементов конструкций, обосновывается актуальность и формулируются основные цели и задачи диссертационной работы.

Широко распространенные тензометрические методы измерения позволяют осуществить исследование объекта измерения лишь в отдельных точках. Многопозиционные системы измерения с применением тензорезисторов или розеток при сложной конфигурации испытуемой детали или при неясном распределении напряжений позволяет только приближенно определить топографию напряжений, так как плотность размещения тензометров ограничена. Поэтому целесообразно использовать визуальные методы, измеряющие деформацию непрерывно по всему исследуемому полю зрения для определения распределения деформаций и обеспечения в первую очередь возможности локализовать критические места. Для решения этой задачи в настоящее время широко используются оптико-геометрические методы: метод реперных точек, метод сеток, поляризационно-оптические (методы фотоупругости и фотопластичности, метод оптически чувствительных покрытий), оптико-интерференционные (метод муаровых полос, методы голографической интерферометрии и спекл-интерферометрии). Вышеперечисленные оптические методы измерения перемещений имеют общие недостатки: сложность проведения эксперимента, использование комплекса сложной аппаратуры, ограниченность реализации метода в условиях производства и эксплуатации. Возможность применения этих оптических методов также ограничена, в основном они применимы в тех случаях, когда необходимо предварительно выявить критические места с тем, чтобы провести дополнительные исследования методами, позволяющими получить количественные выводы. В настоящее время цифровая фотография и системы машинного зрения

используются в основном лишь для контроля геометрических размеров и качества выпускаемых промышленностью продуктов и материалов. Выпускающиеся видеоэкстензометры, позволяют регистрировать на поверхности образцов перемещения специально нанесенных оптических меток, что не позволяет в полном объеме контролировать формоизменение образцов и конструкций в процессе деформирования.

Испытания на твердость относятся к методам неразрушающего контроля механических свойств упругопластических материалов. Определение взаимосвязей между диаграммой деформирования при одноосном растяжении образцов и кривой твердости является актуальной задачей экспериментального исследования. Методики исследования свойств материала на основе данных кинетического индентирования рассматриваются в работах В.П. Алехина, М.Б. Бакирова, С.И. Булычева, В.И. Дегтярева, А.Ю. Ишлинского, М.М. Маклина, М.П. Марковца, В.М. Матюнина, Н.А. Francis, K.L. Jonson, F.M. Haggag, R. Hill, T. Ishibashi, D.M. Marsh, D. Tabor и др. Несмотря на все разнообразие существующих подходов к определению механических свойств, исходя из кинетической диаграммы вдавливания и деформирования лабораторных образцов, проблема построения истинных диаграмм деформирования конструкционных упругопластических материалов с заданной точностью не может считаться решенной. В последнее время появились работы посвященные получению истинных диаграмм деформирования на основе применения методов идентификации. В работах М.Б. Бакирова, В.В. Потапова, А. Hasanov, Z. Seyidmamedov предложены итерационные методы построения диаграмм на основе сопоставления полученных экспериментально и численно зависимостей нагружающих усилий от глубины внедрения при испытаниях на кинетическое индентирование. Указанные подходы позволяют строить диаграммы с приемлемой точностью для малых деформаций. Использование этих методов при больших деформациях неэффективно, так как приводит к большим временным затратам на численное решение прямой задачи, медленной сходимости алгоритма. Способ получения деформационных и прочностных характеристик при больших деформациях на основе применения компьютерного моделирования и методов идентификации разработан в работах В.Г. Баженова и его учеников.

Исследованию закономерностей сложного нагружения материалов на плоских многозвенных траекториях нагружения посвящены работы А. М. Жукова, В. С. Ленского и И. Д. Машкова, Б. Будянского, Л. С. Андреева, И. М. Коровина, Дао-Зуй-Бика, Р. А. Васина, В. Г. Зубчанинова, В. П. Дегтярева, А. А. Лебедева, С. Ц. Чу, Д. Д. Василякиса, И. Охаши. Среди экспериментов по плоским криволинейным, пространственным многозвенным ломаным и винтовым траекториям напряжения следует выделить работы Г. А. Доцинского, и работы В. Г. Зубчанинова и его учеников В. В. Гараникова, Н. Л. Охлопкова и др. Растяжение с кручением - наиболее часто применяющийся на практике вид испытаний на

сложное нагружение, используемый для изучения особенностей механического поведения материалов при больших степенях деформаций. Кручение стандартных тонкостенных трубчатых образцов при больших деформациях будет приводить к потере устойчивости, поэтому представляет интерес анализ процесса растяжения с кручением сплошного цилиндрического образца. Поведение образца при двухкомпонентном нагружении осевой силой и крутящим моментом рассмотрено в работах Ф. У. Еникеева, Л.М. Зубова и Д.Н. Шейдакова, В.К. Бердина и Р.М. Кашаева, Э. И. Григолюка и В.В. Кабанова. Широкий спектр вопросов комбинированного нагружения представлен в работах Б.Д. Аннина.

К настоящему времени разработан широкий набор математических моделей нелинейного поведения упругопластических материалов при простых и сложных нагружениях, однако экспериментально проверены модели, область применимости которых ограничена классом малых упругопластических деформаций и траекторий нагружения малой и средней кривизны. Это работы Б. Д. Аннина, В. С. Бондаря, В. Г. Зубчанинова, С. А. Капустина, Ю. Г. Коротких, J. L. Chaboche. В условиях сложного напряженно-деформированного состояния (НДС) оснащение этих моделей материальными функциями и константами (истинные диаграммы деформирования, вид НДС, параметры разрушения) путем прямых измерений имеющимися инструментальными средствами становится затруднительным даже при малых деформациях. При деформациях, предшествующих разрушению, в лабораторных образцах и элементах конструкций возникает неустойчивость пластического деформирования, приводящая к образованию "шейки" и, как следствие, неоднородному НДС. По работе Дегтярева известно, что наибольшие однородные деформации возникают при кручении в поверхностном слое сплошных цилиндрических образцов. Неоднородность НДС по толщине толстостенных образцов затрудняет обработку экспериментальных данных при определении НДС. Известные подходы к решению данной проблемы – метод Людвига и метод "условной тонкостенной трубки" Р. А. Васина и А. А. Ильюшина – налагают ограничения на форму образцов и предполагают однородность НДС по их длине, что не позволяет оценить НДС в момент разрушения. Для идентификации деформационных и прочностных характеристик материалов при больших упругопластических деформациях в условиях сложного напряженного состояния (кручения–растяжения) целесообразно применение методов математического моделирования процессов деформирования лабораторных образцов или элементов конструкций.

**Во второй главе** представлена экспериментальная методика, использующая технологии цифровой фотографии для оценки изменения полей деформаций в исследуемой области лабораторных образцов или элементов конструкций. Развитие новых технологий в области цифровой фототехники позволило на базе цифровой фотокамеры, совмещенной с персональным компьютером разработать регистрирующую систему для оценки



деформационных характеристик в лабораторном образце или элементе конструкции в процессе их деформирования. Современные цифровые фотокамеры обеспечивают достаточную точность при измерении перемещений контролируемых точек на поверхности лабораторного образца в процессе его деформирования. Увеличение цифровой фотографии позволяет измерять положение искомой точки с точностью до 1 пикселя. Точность измерения равна удвоенной разрешающей способности матрицы цифрового фотоаппарата и для матрицы в 21 Мрх составляет 0,04%, что приближается к точности тензометрирования. Нанесение на поверхность объекта реперных точек, линий, сеток позволяет отслеживать изменение их положения в результате деформирования образца в процессе эксперимента. Информация, содержащаяся в каждой снимке, при синхронизации с нагрузкой позволяет оценить напряженно-деформированное состояние в рабочей части лабораторного образца вплоть до момента разрушения.

Экспериментальный комплекс включает в себя: испытательную машину (УМЭ-10Т, ЦДТЕ-30, ZWICK-Z030, МИУ-500), оборудованную соответствующими датчиками измерения нагрузки и деформации; фотокамеру цифровую Canon EOS 5D Mark II с объективами EF 24-105 f/4L IS USM и EF 75-300 f/4-5,6 III USM; комплект студийного освещения Rekam Light Kit (3 лампы постоянного света); персональный компьютер с пакетом прикладных программ для обработки фотоизображений производства компании National Instruments (Vision Assistant, Vision Builder for Automated Inspection и LabVIEW 8.5). Каждый полученный кадр (фотоснимок) синхронизируется с нагрузкой, действующей в образце в момент регистрации.

Программное обеспечение позволяет производить дистанционную съемку, управлять работой фотокамеры, получать и обрабатывать необходимую экспериментальную информацию в цифровом и графическом виде непосредственно в ходе эксперимента. Система проведения испытаний National Instruments основана на концепции виртуальных приборов. Для обработки графической информации в среде Vision Builder AI была написана программа. В соответствии с заданными геометрическими параметрами образца и пределами контрастности края изображения, в автоматическом режиме находится рабочая зона образца в пределах кадра и точно определяются его размеры и положение нанесенной сетки.

Проведения эксперимента по регистрации перемещений точек на поверхности лабораторного образца состоит из следующих этапов:

- Измерение начальных геометрических размеров образца и по необходимости нанесение сеток или рисок на рабочей части образца;
- Установка образца в захваты, настройка измерительного оборудования испытательной машины, настройка на дисплее фотоаппарата изображения наилучшего качества (настройка освещения, фона и расстояния до образца);

- Первый кадр, нагрузка равна нулю, испытательная машина не запущена;
- Передача первого кадра в персональный компьютер, оценка качества изображения, после того, как был получен первый кадр достаточного качества, установка фотоаппарата и внешние условия (освещение, расстояние, фон и т.д.) фиксируются и не изменяются до окончания эксперимента. Первый кадр является тарировочным, по нему определяются масштабные коэффициенты;
- Запуск нагружающего устройства испытательной машины, регистрация нагрузки, перемещений и деформаций встроенными средствами испытательной машины и параллельная фоторегистрация процесса деформирования, синхронизация снимков с действующей нагрузкой осуществляется по времени;
- Далее производится оцифровка измерительной (рабочей) части образца или замеры отдельных геометрических размеров (при необходимости в графическом редакторе файлы цифровых фотографий обрабатываются для достижения наилучшего качества). Возможна разнообразная обработка полученных результатов в зависимости от целей исследования.

Для апробации предложенной методики был осуществлен ряд экспериментов.

**Эксперимент по одноосному растяжению цилиндрической оболочки** был проведен на образцах из стали марки 12Х18Н10Т на испытательной машине УМЭ-10ТМ. Один торец стержня был жестко закреплен, другой двигался с постоянной скоростью. Образец имел следующие начальные размеры: наружный диаметр 23,5 мм; внутренний диаметр 21,0мм; длина рабочей части образца 58 мм. Перед проведением эксперимента на рабочей части образца методом царапанья наносились риски через 5,0 мм на расстояниях: 10, 20, 30, 40 мм, которые являются исходными базами для измерений. При построении «истинной» диаграммы деформирования использовались следующие допущения: напряжения по толщине стенки образца однородны; рабочая (измерительная) часть образца до начала образования макротрещины сохраняет цилиндрическую форму, а изменение толщины стенки равномерно на указанной длине; в процессе деформирования выполняется условие сохранения постоянства объема материала в рабочей части образца.

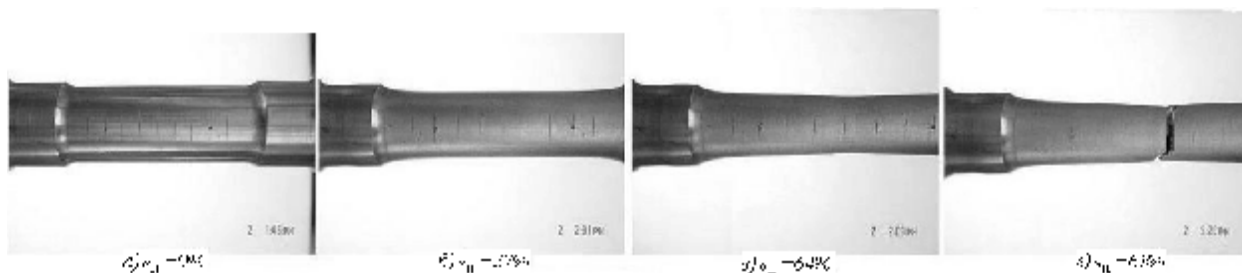


Рис. 1. Деформирование образца в процессе испытания

На рис. 1 можно видеть, что рабочая часть трубчатого образца в процессе деформирования (растяжения) сохраняет цилиндрическую форму практически до

образования макротрещины, шейка визуально различима на предпоследней фотографии и это состояние непосредственно предшествует образованию видимой макротрещины.

Диаграммы деформирования полученные традиционным способом и фоторегистацией представлены на рис. 2, 3. С учетом измерения фактической площади поперечного сечения, зависимость  $P \sim \Delta L$  приводилась к истинным напряжениям и логарифмическим деформациям.

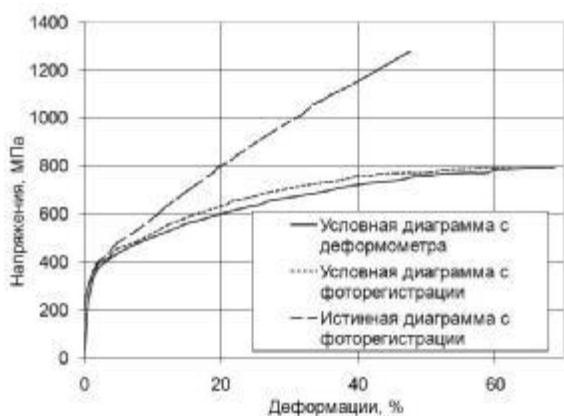


Рис. 2. Диаграммы деформирования для базы 40 мм

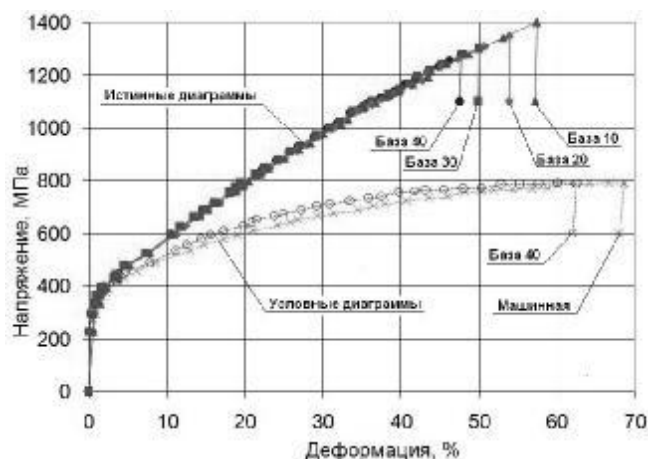


Рис. 3. Диаграммы деформирования для различных баз измерений

Расхождение в 10% по остаточной деформации при регистрации процесса деформирования до разрушения разными способами объясняется косвенным методом измерения деформации с помощью деформометра (по перемещению захватов). На рис. 3 (верхняя серия кривых) можно видеть, что независимо от выбранной базы измерения, все кривые имеют минимальный разброс, но остаточные деформации (деформации до разрушения) отличаются, увеличиваясь при уменьшении базы измерения. Необходимо отметить, что при оценке величины площади под диаграммами деформирования разница в значениях при базе измерения 10 мм (кривая, отмеченная ромбиками) и базе 40 мм (кривая отмеченная треугольниками) составляет почти 25%, то есть существенно зависит от выбираемой базы измерения.

Для расчета на прочность элементов конструкций, работающих в условиях сложного напряженного состояния, необходимо иметь диаграмму деформирования, т. е. зависимость между интенсивностями напряжений и деформаций. В случае одноосного растяжения сплошного образца сложности при построении истинной диаграммы деформирования возникают с момента начала образования шейки, когда напряженное состояние в наименьшем сечении образца становится неоднородным. **Эксперимент на одноосное растяжение цилиндрического стержня** из стали 12Х18Н10Т проводился на испытательной машине УМЭ-10ТМ. Один торец стержня был жестко закреплен, другой двигался с постоянной скоростью. Образец имел следующие начальные размеры: диаметр 11,43 мм; длина рабочей части образца 60 мм. Перед проведением эксперимента на рабочей части

образца методом царапания наносились риски на расстояниях 30, 20, 10 мм, которые являются исходными базами для измерений.

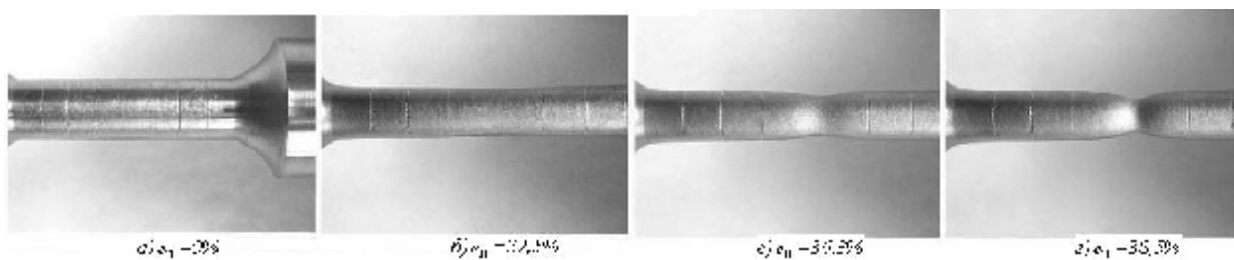


Рис. 4. Деформирование образца в процессе испытания

На основании экспериментальных исследований Н. Н. Давиденков и Н. И. Спиридонова, а затем Бриджмен установили, что в наименьшем сечении шейки истинные деформации в радиальном и тангенциальном направлениях равны и постоянны по всему поперечному сечению. Откуда согласно теории пластичности следует, что при развитии шейки в ее наименьшем сечении должно также иметь место равенство главных радиальных и тангенциальных напряжений, тогда:

$$\sigma_i = \frac{\sigma_m}{1 + \frac{a}{4R}}, \quad \sigma_m = \frac{F}{\pi a^2}; \quad e = \ln \frac{1}{1 - \psi}; \quad \psi = \frac{A_0 - A}{A_0},$$

где,  $\sigma_i$  - интенсивности напряжений;  $a$  - радиус наименьшего поперечного сечения в шейке;  $R$  - радиус кривизны контура шейки в точке наименьшего поперечного сечения;  $\sigma_m$  - среднее нормальное напряжение в шейке образца;  $F$  - сила действующая в образце;  $e$  - истинная деформация;  $\psi$  - относительное сужение поперечного сечения;  $A_0$  - площадь сечения образца до деформации;  $A$  - действительная площадь поперечного сечения.

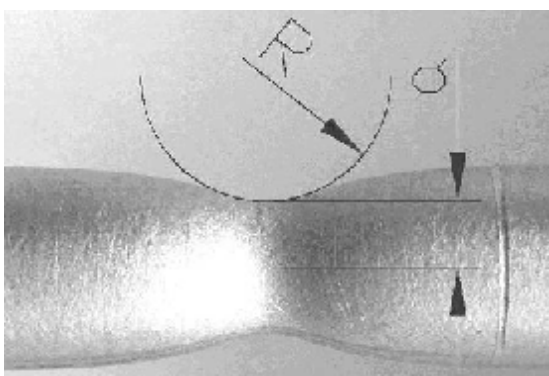


Рис. 5. Геометрия образца в области шейки

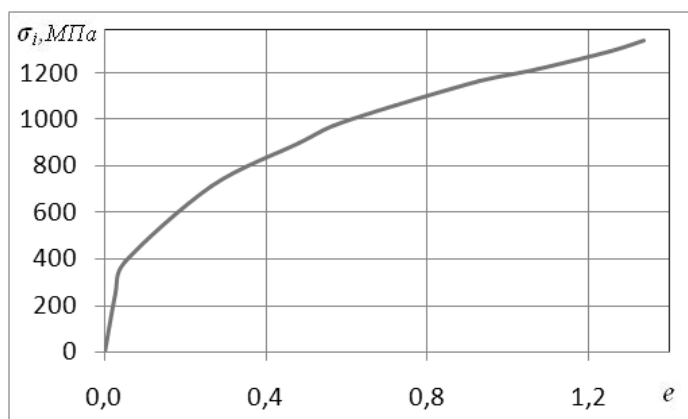


Рис. 6. Диаграмма деформирования

Предложенная измерительная система позволяет получать информацию о текущих значениях минимального диаметра шейки и радиуса кривизны ее контура в точках наименьшего поперечного сечения в процессе испытания, вплоть до момента разрушения образца (рис. 5), а также позволяет определять изменения коэффициента поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

В случае **кручения цилиндрических образцов** представленная методика позволяет контролировать перемещение точек на границах и поверхности рабочей части образца и получать изменения геометрических размеров рабочей части по двум координатам одновременно, существенно расширяя возможности оценки напряженно-деформированного состояния изучаемого объекта в области больших деформаций. Испытания проводились на цилиндрических образцах из стали 12Х18Н10Т при кручении на испытательной машине КМ-50. Один торец стержня был жестко закреплен, другой вращался с постоянной скоростью. Образец имел следующие начальные размеры: диаметр 10,0мм; длина рабочей части образца 101,5мм. Перед проведением эксперимента на рабочей части образца методом царапанья были нанесены 10 кольцевых рисок через 10мм и продольные риски с шагом 5мм, которые являются исходными базами для измерений. При измерении угла закручивания были приняты следующие допущения: оптическая ось фотокамеры совмещалась с геометрическим центром рабочей части образца; для устранения влияния оптических aberrаций по краям снимка угол поворота замерялся на ближайшей ячейке сетки; полагая деформацию поверхности рабочей части однородной и равномерной, угол закручивания пересчитывался для всего образца. При сравнении угла закручивания, полученного обычным способом и полученного с фоторегистрации, разброс значений не превышает 5% (рис 8).

Крутящий момент регистрировался испытательной машиной.

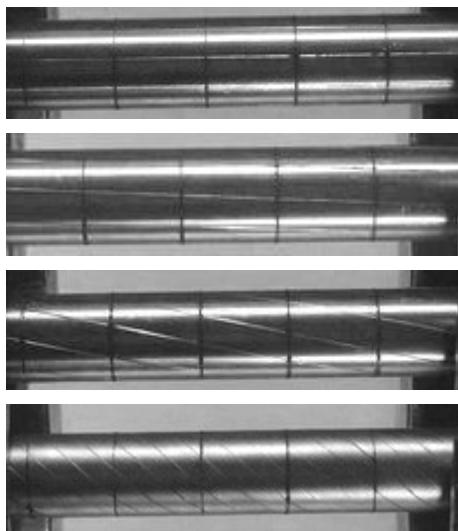


Рис. 7. Процесс деформирования

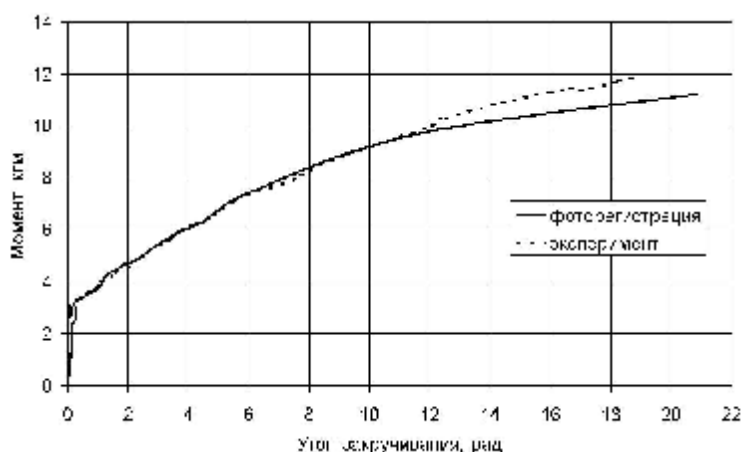


Рис. 8. Первичные диаграммы кручения

С использованием предложенной методики была проведена экспериментальная оценка изменения длины сплошного цилиндрического образца при монотонном кручении - **эффект Пойтинга** и при кручении со ступенчатым режимом нагружения с разгрузками на каждой ступени и замером полной длины образца. Испытания проводились стали 12Х18Н10Т на модернизированной испытательной машине ЦДТЕ-30 с замером крутящего момента и угла закручивания. Образцы в захватах испытательной машине устанавливались

гарантированным зазором относительно верхнего захвата. Измерение полной длины образца проводилось с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм. Удлинение образца для относительной деформации  $R\theta/2L_0=0,5$  ( $R$ -радиус рабочей части образца,  $\theta$ -угол закручивания,  $L_0$ -начальная длина) составило порядка 1-2%

Предлагаемая регистрирующая система, позволяет при проведении различных видов экспериментов контролировать перемещение точек на границах и поверхности рабочей части образца и получать изменения геометрических размеров рабочей части по двум координатам одновременно, существенно расширяя возможности оценки напряженно-деформированного состояния изучаемого объекта в области больших деформаций. Возможна разнообразная обработка полученных результатов (построение истинной диаграммы деформирования, поскольку регистрируется фактический диаметр образца в процессе нагружения и в момент образования шейки, вплоть до разрушения; изучение формоизменения и потери устойчивости при различных нагружениях; изучения краевых эффектов, местных пластических деформаций и т.д.). С использованием данной системы проводились эксперименты на сжатие, трехточечный изгиб балки с надрезом, кручение цилиндрической оболочки с сердечником и без.

**В третьей главе** описывается экспериментально-расчетная методика получения диаграмм деформирования и прочностных характеристик упругопластических материалов, основанная на идентификации результатов эксперимента с помощью численного моделирования процессов деформирования лабораторных образцов. Предлагается развитие и апробация методики для построения диаграмм деформирования при кинетическом индентировании.

Идея экспериментально-расчетной методики предложена В. Г. Баженовым и описана в Патенте на изобретение №2324162. В общем случае для определения механических констант и определения диаграммы деформирования материала формируется целевая функция, описывающая различия эксперимента и численного расчета. Входными экспериментальными данными для построения диаграмм деформирования является зависимость нагружающей силы от глубины внедрения при индентировании. В этом случае за параметр сравнения можно взять осевую силу в зависимости от перемещения индентора. Численное решение задачи в первом приближении производится с использованием диаграммы деформирования, полученной на основе приближенных аналитических зависимостей (методика Тейбора-Джонсона), или из литературы. Построение диаграммы деформирования основано на коррекции зависимости интенсивность напряжений  $\sigma_i$  — интенсивность пластических деформаций  $\alpha$  (параметра Одквиста). Для этого в процессе численного решения задачи анализируется отношение значений осевых усилий, полученных в эксперименте ( $F_{\text{э}}$ ) и в расчете ( $F_p$ ) при одинаковых смещениях:  $\beta = F_{\text{э}}/F_p$ . Итерационная

процедура корректировки диаграммы осуществляется по формуле  $\sigma_i^*(\varepsilon) = \beta \sigma_i(\varepsilon)$  до совпадения экспериментальных и расчетных результатов с заданной точностью. Сходимость предложенной методики показана на ряде примеров. Скорость сходимости (или число итераций) зависит от вида образцов, материала и вида нагружения. Следует отметить, что методика позволяет получать независимо от размеров и формы образцов истинные диаграммы деформирования вплоть до разрушения образцов.

Численное моделирование осуществлялось с использованием ППП «Динамика-2». В качестве уравнений состояния для описания упругопластических свойств материалов применялась теория течения с нелинейным изотропным и кинематическим упрочнением. Для процессов активного нагружения близких к пропорциональным достаточно учитывать лишь нелинейное изотропное упрочнение. В этом случае необходимо задать истинную диаграмму деформирования материала определяемую экспериментально. Численное моделирование задач осуществлялось в осесимметричной постановке. Для описания деформирования тел вращения в рамках гипотез механики сплошной среды использовался вариационно-разностный подход предложенный В. Г. Баженовым и реализованный для двумерных задач С. В. Зефиром и С. Л. Осетровым и др. в пакете прикладных программ (ППП) «Динамика-2». Эксперименты проводились на испытательных машинах ЦДТЕ-30, УРС-20/6000, УМЭ-10ТМ, МИУ-500.

Проверка достоверности предложенного экспериментально-расчетного метода реализована на примере эксперимента на **растяжение и последующее индентирование на одном образце**. Было проведено испытание на растяжение на круглом сплошном образце с замером деформации на рабочей части и получением диаграммы в цифровом виде. Из головок образца изготовлены диски для испытаний на индентирование. Материал образца АМГ-6, диаметр рабочей части образца 12 мм, диаметр диска 45 мм, толщина диска 13,2 мм. Шар-индентор из высокопрочной шарикоподшипниковой стали ШХ15 диаметром 5мм. В расчетах использована истинная диаграмма, полученная по данным из испытания на растяжение. Испытания проводились на модернизированной испытательной машине УМЭ-10Т, измерялась величина нагрузки, действующей на индентор и глубина внедрения его в исследуемый материал. Результаты численного эксперимента, сравнивались с данными натурального эксперимента (рис. 9). На рис. 10 приведены образцы до испытания на сжатие (диски) и образец на растяжение, из которого после испытания изготавливаются такие диски, один диск уже испытан. Отличие расчетной величины нагрузки, действующей на индентор от экспериментального значения составило менее 3%. Таким образом при отсутствии ошибок в программном обеспечении и адекватных свойствах конструкционного материала, получаемых из испытаний по методике «двойного» эксперимента, обеспечивается требуемая точность результатов в исследовании процессов упруго-

пластического деформирования при больших деформациях.

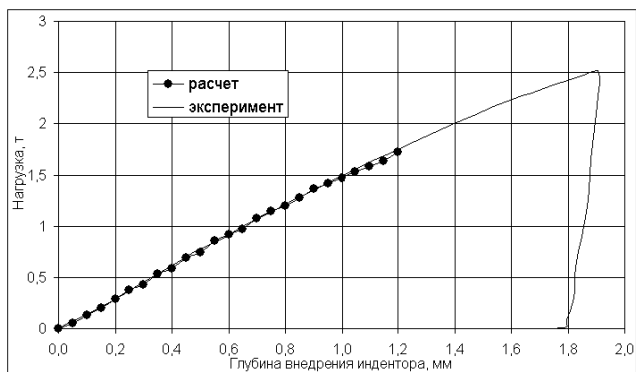


Рис.9 Диаграммы индентирования

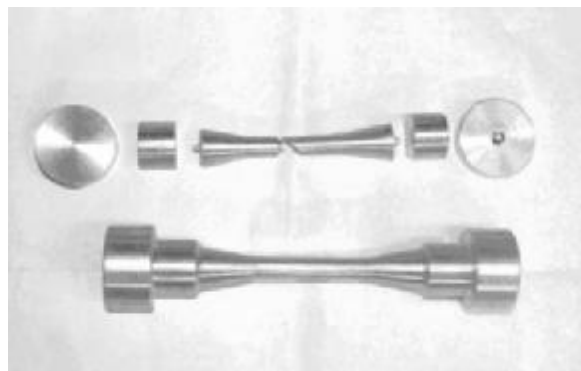


Рис.10 Образцы

При внедрении индентора важно знать фактическую глубину погружения относительно поверхности образца. Использование для этого деформометра, регистрирующего перемещение траверсы испытательной машины, недопустимо, т. к. деформативность системы «образец - нагружающее устройство» велика, по сравнению с деформациями при индентировании, особенно при малых диаметрах индентора. Установка существующих деформометров с тензопреобразователями на пуансон и образец затруднена различием их диаметров и также не учитывает деформативность системы. Для более точного измерения глубины индентирования был разработан деформометр, измеряющий глубину индентирования непосредственно от поверхности образца. Для этого индентор в форме шара помещался между образцом и дном стакана, который с помощью пуансона внутри стакана вдавливался в образец. На стакан надевался цилиндр, торец которого касался поверхности образца (рис. 11). Деформометр с тензометрическими преобразователями закреплялся на поверхности стакана и цилиндра (рис. 12). Относительное смещение цилиндра и стакана фиксировалось деформометром. Таким образом измерялась глубина погружения индентора непосредственно от поверхности образца.

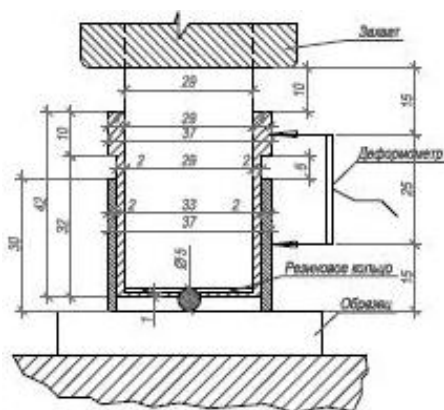


Рис.11. Схема деформометра

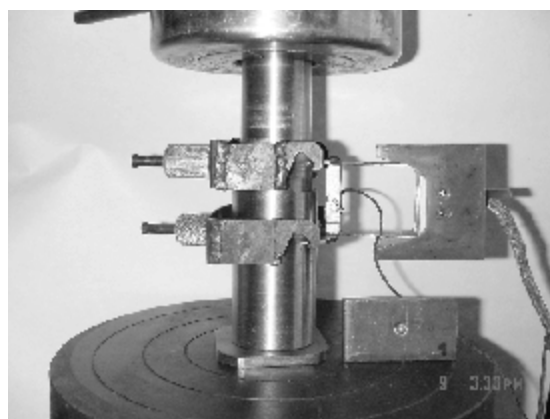


Рис.12. Фото деформометра

На программном комплексе «Динамика 2» были проведены расчеты контактной задачи индентирования стального шара диаметром 5 мм в медную пластину толщиной 5мм. В процессе расчета в исходные данные задачи вводилась пластическая часть истинной



диаграммы деформирования материала полученная из литературы. Результаты расчеты представлялись в виде диаграммы индентирования в осях «глубина внедрения – вдавливающая сила», которая сравнивалась с экспериментальной диаграммой. Испытания проводились на испытательной машине УРС 20/6000, глубина внедрения в процессе испытания регистрировалась тензометрическим преобразователем (деформометром), вдавливающая сила регистрировалась динамометром испытательной машины. По анализу расчетной диаграммы индентирования производилась корреляция диаграммы деформирования материала, которая задавалась в файл исходных данных для последующего расчета. В результате последовательных итераций была найдена диаграмма деформирования материала, которая соответствовала данному материалу. Подобным образом была получена пластическая часть истинной диаграммы деформирования материала для АК-4, Д-16 и 12Х18Н10Т. Расчетные диаграммы индентирования хорошо совпадают с экспериментальными, а полученные диаграммы деформирования хорошо совпадают с диаграммами деформирования, полученными экспериментально (при испытаниях на одноосное растяжение), и имеющимися в литературе.

С целью **определения оптимального размера образцов** на программном комплексе «Динамика 2» были проведены расчеты контактной задачи индентирования стального шара диаметром 5 мм и 10 мм в медную пластину толщиной 5 мм и 7,5 мм. Расчет выполнялся с одинаковыми исходными физико-механическими характеристиками материала, менялась только геометрия образцов (расстояние от точки индентирования до края образца). По результатам расчетов установлено, что минимальное расстояние от точки индентирования до края образца в зависимости от диаметра индентора и толщины образца составляет: при толщине образца 5 мм и диаметре индентора 10 мм - 2,5 диаметра индентора; при толщине образца 5 мм и диаметре индентора 5 мм – 4,0 диаметра индентора; при толщине пластины 7,5 мм и диаметре индентора 5 мм – 4,0 диаметра индентора. Полученные результаты совпадают с нормативными требованиям ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю» - 2,5 диаметра отпечатка.

С целью **исследования распределений напряжений** под индентором был применен разрезной образец, сжимаемый в специальном устройстве (рис. 13), плоскости соприкосновения образцов друг с другом и с опорной поверхностью шлифовались. После испытания проводился замер зон пластичности в месте контакта по матовому оттенку на шлифованной поверхности, характерному для остаточной деформации (рис. 14). Результаты испытаний сравнивались с данными численного эксперимента по расположению границы пластической зоны (рис. 15). Сравнение распределения интенсивностей напряжений, деформаций и микротвердостей (рис. 16) позволяет судить о достоверности полученных результатов в численном эксперименте.



Рис. 13. Фото эксперимента

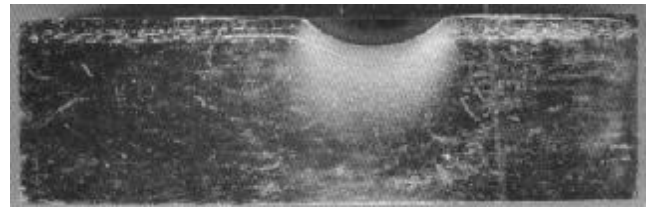


Рис. 14. Распределение зон пластичности

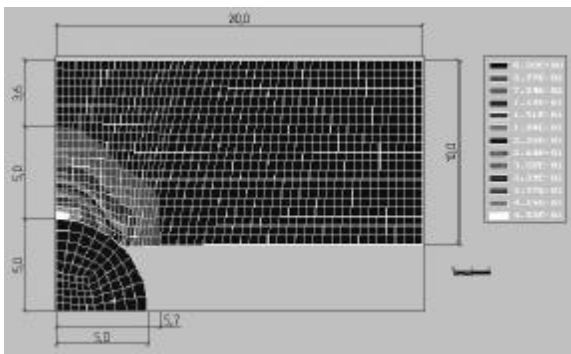


Рис. 15. Интенсивность деформаций (расчет)

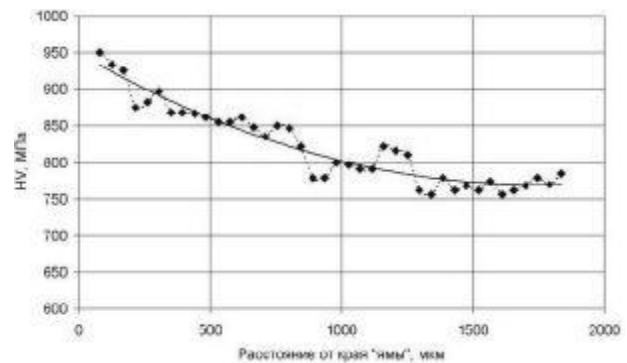


Рис. 16. Изменение твердости металла по глубине в месте контакта

Экспериментально-теоретическим путем исследовался процесс **внедрения индентора в форме шара в отверстие с натягом**. Продавливание шара осуществлялось с помощью пуансона диаметром 11 мм.

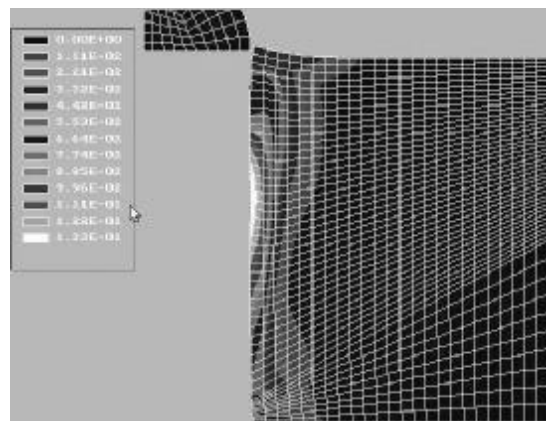


Рис. 17. Распределение интенсивностей деформаций в отверстии

Использовался шар индентор из стали ШХ15, диаметр индентора 14,3 мм, а диаметр отверстия в заготовке из стали 12Х18Н10Т 14 мм. Продавливание индентора в форме шара осуществлялось с некоторым натягом через предварительно обработанное отверстие (процесс дорнования) с целью калибровки, упрочнения и уменьшения шероховатости поверхности отверстия. Дорнованием получают отверстия 1-2 класса точности с шероховатостью поверхностей стенок, соответствующей 9-10-му классам чистоты. Результаты численного расчета позволяют определить участки выброса материала в месте входа и выхода индентора из заготовки, а также определить размеры участка калибровки

и равномерного упрочнения (рис. 17).

Предложенная модификация экспериментально-расчетного метода с достаточной степенью точности, описывает процессы деформирования при кинематическом индентировании шара в образец – пластину (проба Бринелля). Она позволяет получать истинные диаграммы деформирования и прочностные характеристики материалов при больших деформациях и неоднородном НДС испытываемых образцов. Так же она позволяет моделировать и описывать процесс продавливание индентора в форме шара с некоторым натягом через предварительно обработанное отверстие с целью калибрования, упрочнения и уменьшения шероховатости поверхности отверстия.

**В четвертой главе** предложено развитие и обоснование экспериментально-расчетного метода построения диаграмм деформирования, в случае пропорционального и непропорционального кинематического нагружения кручением и (или) растяжением до разрушения при больших формоизменениях. Проведено исследование параметров модели, определяющих влияние изотропной и кинематической частей упрочнения на параметры НДС при нагружении по двузвенной траектории деформирования после точки излома. На основе проведенных экспериментов и расчетов оценены различия в характере и параметрах разрушения при монотонном и сложном нагружении. На основе разработанных методик проведены исследования процесса деформирования, локализации деформаций и разрушения образцов из сталей 12X18H10T, 08X18H10T при комбинированных нагружениях кручением-растяжением до разрушения: пропорциональное нагружение, последовательное нагружение растяжением и кручением, последовательное нагружение кручением и растяжением.

**Численное моделирование** процессов деформирования осуществлялось с использованием ППП «Динамика-2». Определяющая система уравнений решается методом конечного элемента в сочетании с явной схемой интегрирования во времени типа «крест». Численное моделирование задач осуществлялось в осесимметричной постановке. Для описания деформирования тел вращения в рамках гипотез механики сплошной среды использовался вариационно-разностный подход. В работе реализована модель пластичности с комбинированным изотропным и кинематическим упрочнением. В качестве определяющих соотношений используется модификация математической модели теории пластичности, Д. А. Казакова, С.К. Капустина, Ю.Г. Коротких. Развитие и обоснование применимости модели для случая больших упругопластических деформаций осуществлено В. Г. Баженовым Е. В. Павленковой.

Эффекты циклического деформирования и термического нагружения в настоящей работе не учитываются. Сопоставление результатов численного моделирования и экспериментальных данных подтверждает достоверность и работоспособность методик. Проводилось два варианта расчетов – с изотропным упрочнением и с комбинированным

изотропным и кинематическим упрочнением. При проведении расчетов полагалось, что изотропная часть упрочнения не зависит от направления вектора догрузки. При численном моделировании процессов деформирования образцов при монотонных нагружениях кручением или растяжением расчеты с изотропным и с комбинированным упрочнением совпадают. При моделировании процессов сложного нагружения модель пластичности с комбинированным упрочнением лучше, чем модель с изотропным упрочнением, описывает процесс деформирования после точки излома траектории.

По специально разработанной методике из базовых экспериментов получены **материальные параметры эволюционных уравнений термопластичности** при монотонном упругопластическом деформировании для конструкционной стали 08X18H10T. Базовые эксперименты — испытания по построению диаграмм квазистатического монотонного растяжения–сжатия образцов 08X18H10T, проводились на одном образце при температуре 20°C при «жестком» пошаговом деформировании (растяжении–сжатии) рабочей части образца на универсальной испытательной машине МИУ-500.1К. Испытуемый образец растягивался до деформации = 0,03. Пошаговое сжатие образцов производилось при значениях деформации: 0,001; 0,004; 0,007; 0,01; 0,013; 0,016; 0,019; 0,022; 0,025. Допуск на остаточную деформацию  $\Delta$  при определении обратных пределов текучести составлял 0,1%. Затем несколько раз осуществлялось растяжение образца до деформации 10% и повторялось циклическое растяжение-сжатие. Таким образом была построена диаграмма деформирования до значений пластической деформации =33%, определено геометрическое место обратных пределов текучести с заданным допуском на остаточную деформации. По этим экспериментальным кривым были определены значения материальных параметров термопластичности: эффект Баушингера, радиус поверхности текучести, смещение центра поверхности текучести при одноосном растяжении (рис. 18).

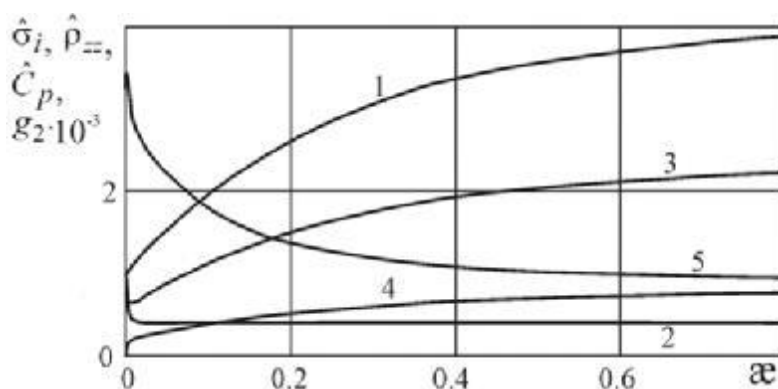


Рис. 18. Материальные функции модели пластичности

#### **Монотонное пропорциональное нагружение кручением и растяжением.**

Испытания проводились на машине ЦДТЕ-30 с замером крутящего момента, угла закручивания, осевой силы и продольной деформации на регистрирующей системе NI. Крутящий момент передается образцу через захватное устройство, вращающееся с

постоянной скоростью, осевая растягивающая сила передается образцу посредством гидравлического привода с подачей масла насосом высокого давления. Темп нагружения задавали таким образом, чтобы вклад инерционных сил был пренебрежимо мал. На рис. 23, а-в сплошными линиями приведены расчетные зависимости безразмерных обобщенной силы, осевой силы и крутящего момента от условной интенсивности деформаций на поверхности рабочей части образца. Результаты расчетов по двум моделям теории течения: с учетом комбинированного изотропного и кинематического упрочнения и только изотропного упрочнения практически совпадают. На рис. 23, б-г представлены экспериментальные осевая сила, крутящий момент (треугольники, квадраты) и соответствующее им изменение параметра  $q = \frac{R_1 \theta}{\sqrt{3}u_z}$ . Наблюдаемые в эксперименте

особенности процессов деформирования образцов хорошо согласуются с проведенными теоретическими исследованиями после установления режима пропорционального нагружения до момента потери устойчивости пластического деформирования с образованием шейки.

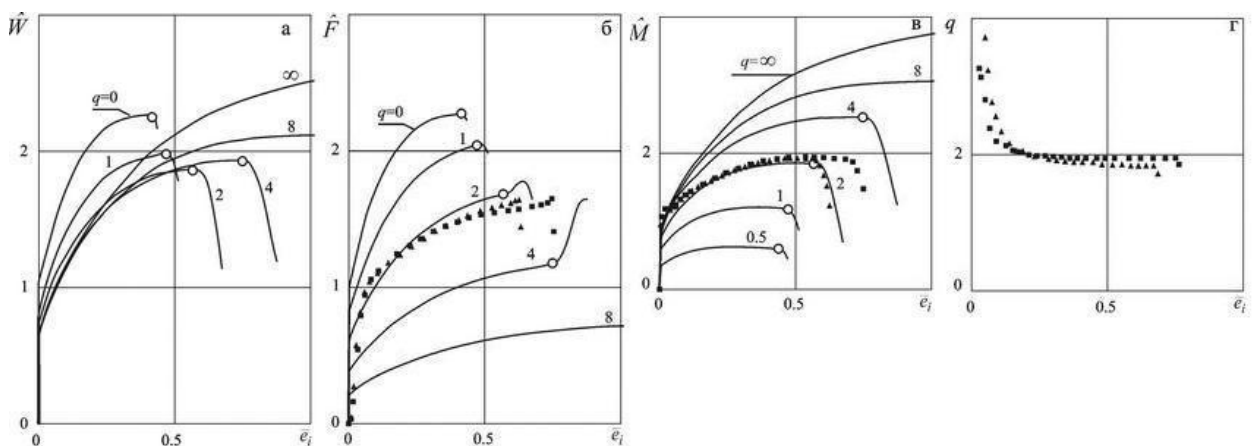


Рис. 19. Обобщенная работа осевой силы и крутящего момента (а), осевая сила (б) и крутящий момент (в) при различных значениях параметра  $q$ , изменение параметра  $q$  в эксперименте (г)

Процессы деформирования до момента потери устойчивости близки к лучевым, а закритическое поведение характеризуется траекториями малой кривизны. При комбинированном нагружении до момента потери устойчивости во всем объеме образца вид напряженного состояния медленно изменяется в сторону растяжения, так как образец утончается. Изменение вида напряженного состояния в шейке в сторону сдвига после момента потери устойчивости происходит наиболее интенсивно при одноосном растяжении. До момента падения осевой силы во всем объеме образца происходит процесс активного нагружения. В месте образования шейки активный процесс продолжается до разрушения. В экспериментах шейка образуется в средней части образца, ее положение зависит от многих

случайных факторов. В расчетах начальный радиус образца вблизи плоскости симметрии составлял  $0.999R_l$ , что приводило к образованию шейки на плоскости симметрии. Численные и экспериментальные результаты хорошо согласуются по форме и размерам шейки.

**Нагружение кручением и растяжением по двухзвенным ломаным траекториям деформирования.** Проводились квазистатические испытания сплошных цилиндрических образцов кручением и растяжением (первоначально образцы нагружались кручением до угла закручивания 1, 1.5, 2 оборота, затем растяжением до разрушения). Затем были проведены квазистатические испытания сплошных цилиндрических образцов растяжением и кручением (образцы растягивались до относительной осевой деформации  $\bar{e}_{zz} \approx 0.2$  и  $\bar{e}_{zz} \approx 0.48$ , затем нагружались кручением до разрушения).

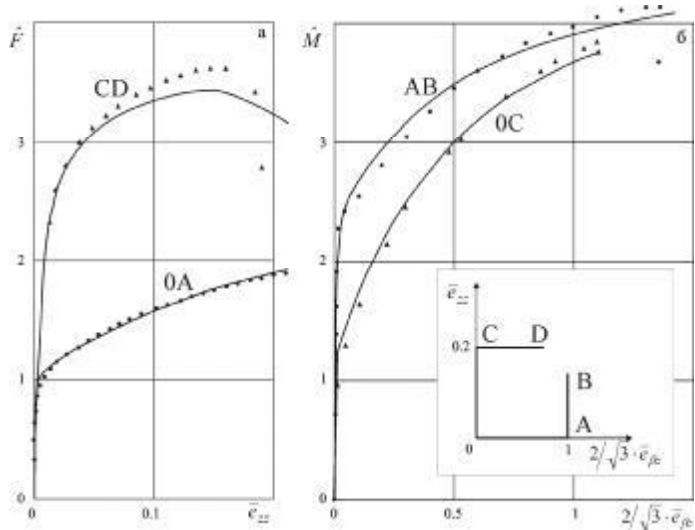


Рис. 20. Сравнение численного расчета с экспериментальными данными при последовательном нагружении кручением-растяжением по осевой силе (а) и моменту (б)



Рис. 21 Остаточные формы сплошных осесимметричных образцов при монотонном нагружении: 1 – эксперимент на кручение, 2 – эксперимент на растяжение, 3 – эксперимент на комбинированное нагружение

На рис. 20 показано: кручение до  $\left(2/\sqrt{3}\right)\bar{e}_{\beta z} \approx 1$ , затем растяжение до разрушения (траектория деформирования 0AB) и растяжение до  $\bar{e}_{zz} \approx 0.2$ , затем кручение до разрушения (0CD). На этом же рисунке приведены зависимости осевой силы от условной осевой деформации и крутящего момента от условной сдвиговой деформации на поверхности рабочей части образца. Треугольниками отмечены результаты испытаний по программе деформирования 0AB, точками – 0CD, сплошными линиями – результаты численного решения по модели. Рядом с кривыми подписаны соответствующие им звенья траекторий деформирования. Экспериментальные и расчетные данные при лучевом нагружении кручением или растяжением (звенья 0A и 0C) практически совпадают. Расхождение результатов расчетов и экспериментов после излома траектории (звенья AB и

CD) не превышает 6 %.

Проведено **исследование вида разрушения при монотонном и сложном нагружении** (рис. 21). При кручении не происходит потери устойчивости пластического деформирования, как при растяжении с образованием шейки, а разрушение происходит от сдвиговых деформаций в плоскости, перпендикулярной оси стержня. При совместном действии кручения-растяжения образуется шейка, радиус поперечного сечения которой больше, а длина меньше, чем при чистом растяжении. При комбинированном нагружении разрушение происходит по винтовой поверхности с максимальными сдвиговыми деформациями в зависимости от соотношения растяжения и кручения.

При кручении после предварительного растяжения разрушение происходит по поверхности, перпендикулярной к оси стержня, как и при чистом кручении. В проведенных опытах деформации растяжения не превышали 30 %, поэтому наложение кручения не оказало влияния на вид разрушения. При растяжении после предварительного закручивания на 1 оборот наблюдаемая картина разрушения - типичная для растяжения с небольшими отклонениями в сторону смешанного характера, образуется шейка, по краю которой намечается зубчатая картина разрушения. При растяжении после предварительного закручивания на 1,5 оборота деформации кручения во всем объеме поперечного сечения образца увеличиваются, шейка слабо выражена, разрушение носит зубчатый характер с плоскостями, ориентированными под углом  $45^0$  к оси образца, чего нет при растяжении. Это можно объяснить влиянием максимальных деформаций от предварительного кручения вблизи поверхности. Характер разрушения хрупкий, как при растяжении. При растяжении после предварительного закручивания на 2 оборота разрушение происходит по винтовой поверхности, которая наклонена под углом  $45^0$  к оси образца с наложением по краю зубьев меньшей амплитуды, чем в предыдущем случае, характер разрушения хрупкий. При чистом кручении при разрушении получается гладкая поверхность, перпендикулярная к оси. В остальных случаях при комбинированном нагружении кручением-растяжением при больших деформациях разрушение определяется максимальными сдвиговыми деформациями, но оно хрупкое из-за деформационной анизотропии, полученной после предварительного кручения.

Разработанная методика, в отличие от известных ранее аналогов, позволяет получать деформационные и прочностные характеристики материалов независимо от формы образцов и вида нагружения для больших деформаций и с учетом неоднородности НДС вплоть до момента разрушения без привлечения упрощающих гипотез силового и кинематического характера. Представляется возможным получать предельную поверхность разрушения в зависимости от вида напряженного состояния, определенного в численных расчетах на момент разрушения. Высокая информативность и точность получения деформационных и прочностных характеристик материалов позволит повысить уровень

достоверности диагностики состояния и ресурсных параметров материала в элементах конструкций, находящихся в условиях эксплуатации. Данный подход также может использоваться для изучения свойств материалов при других видах статических и динамических испытаний, что дает возможность оценивать предельные характеристики материала при различных видах нагружения и открывает новые перспективы диагностики прочности элементов конструкций.

### **Основные выводы**

1. Разработана экспериментальная методика на основе технологии цифровой фотографии для измерения больших деформаций лабораторных образцов и элементов конструкций. Проведено теоретическое и экспериментальное обоснование ее точности. Построены диаграммы деформирования для стали марок 12X18H10T и 10X18H10T.
2. Предложена модификация экспериментально-расчетной методики получения истинных диаграмм деформирования при кинетическом индентировании упругого шара в образец – пластину (проба Бринелля). Разработана конструкция деформометра для измерения глубины индентирования. Достоверность представленной методики подтверждается сопоставлением результатов расчетов с диаграммами деформирования при растяжении. Построены истинные диаграммы деформирования для ряда конструкционных материалов: 12X18H10T, 10X18H10T, ЭП-648, Д16, сплав меди, сплавы алюминия.
3. Исследован процесс внедрения (дорнования) индентора в форме шара с натягом через предварительно обработанное отверстие с целью калибрования, упрочнения и уменьшения шероховатости поверхности отверстия, результаты численного расчета позволяют определить участки выброса материала в месте входа и выхода индентора из заготовки, а также определить размеры участка калибрования и равномерного упрочнения.
4. Проведено экспериментальное и численное исследование процессов упругопластического деформирования, локализации деформаций и разрушения сплошных осесимметричных образцов из сталей 12X18H10T и 08X18H10T переменной толщины при пропорциональном и непропорциональном кинематическом нагружении кручением и (или) растяжением до разрушения. На основе проведенных экспериментов и расчетов оценены различия в характере и параметрах разрушения при монотонном и сложном нагружении.
5. Проведено экспериментальное исследование материальных параметров модели пластичности для стали 12X18H10T, определяющих влияние изотропной и кинематической частей упрочнения на параметры НДС, при сложном нагружении по двузвенной траектории деформирования и больших деформациях.



Автор выражает благодарность к.т.н. Крамареву Л.Н., Горохову А.Н. и Коробову В. Б. за помощь в проведении экспериментальных исследований, к.ф-м.н. Осетрову С. Л. и к.ф-м.н. Павленковой Е. В. за помощь в численном моделировании.

**Основные результаты и защищаемые положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. Кибец А. И., Лаптев П. В., Ломунов В. К., Жегалов Д. В. Численное моделирование больших формоизменений упругопластической цилиндрической оболочки при осевом сжатии // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. – Н. Новгород: Изд-во Нижегородского ун-та. – 2001. – Вып. 63. – С. 132-137.

2. Баженов В. Г., Жегалов Д. В., Кибец А. И., Крамарев Л. Н., Лаптев П. В., Осетров С. Л. Образование шейки и закритическое поведение упругопластических стержней с различным профилем поперечного сечения // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия Механика. – Н. Новгород: Изд-во Нижегородского ун-та. – 2003. Вып. 1(5). – С. 84-89.

3. Баженов В. Г., Жегалов Д. В., Зефилов С. В., Осетров С. Л. Упругопластическое деформирование и предельные состояния цилиндрических оболочек под действием внутреннего давления при различных граничных условиях // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия Механика. – Н. Новгород: Изд-во Нижегородского ун-та. – 2003. Вып. 1(5). – С. 90-95.

4. Волкова Н. В., Емельянов Д. Н., Жегалов Д. В., Баженова Н. Н., Тараканова И. А. Деформационно-прочностные свойства твердых высоконаполненных полиакрилатных композиций – масс для реставрации памятников из камня // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2004. – Том 10. №2. – С. 231-239.

5. Казаков Д. А., Жегалов Д. В. Использование технологий цифровой фотосъемки для изучения полей деформаций // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. – Н. Новгород: Изд-во Нижегородского ун-та. – 2007. Вып. 69. – С. 99-105.

6. Крамарев Л. Н. Жегалов Д. В. Экспериментальное и численное исследование упругопластических процессов пенетрирования // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. – Н. Новгород: Изд-во Нижегородского ун-та. – 2008. – Вып. 70. – С. 79-88.

7. Баженов В.Г., Жегалов Д.В., Павлѐнкова Е.В. Численное и экспериментальное исследование упругопластических процессов растяжения – кручения осесимметричных тел при больших деформациях // Известия РАН: Механика твердого тела. - 2011. № 2. - С. 57-66.

*В других изданиях*

8. Крамарев Л. Н., Горохов А. Н., Сысоев О. В., Жегалов Д. В. Испытание конструкционных материалов при сложном нагружении с определением параметров предельного состояния // II Научная конференция по механике и прочности конструкций, посвященная 80-летию академика Е. А. Негина (г. Саров, 10-12 января 2001 г.). Сборник докладов. – Саров: ВНИИЭФ. – 2002. – С. 195.

9. Баженов В.Г., Жегалов Д.В., Крамарев Л.Н., Осетров С.Л. Проба Бринелля и построение истинных диаграмм деформирования //Тезисы докладов всероссийской научной конференция по волновой динамике машин и конструкций, посвященная памяти профессора А.И. Весницкого (Н.Новгород 1-5 июня 2004г). – Н.Новгород: Изд-во ООО «Промышленная группа ТИРАСП». – 2004. – С.16.

10. Емельянов Д. Н., Волкова Н. В., Жегалов Д. В., Баженова Н. Н. Реология и физико-механика доделочных масс, используемых при реставрации памятников из камня // 22 симпозиум по реологии. Материалы. Реологическое общество им. Г. В. Виноградова. Российская академия наук. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева. 21-26 июня 2004. – Валдай. – 2004. – С. 52.

11. Грушевский Г. М., Жегалов Д. В. Испытание бетонных элементов при динамических воздействиях // Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов «Архитектура и строительство 2003». Тезисы докладов. Часть 3: Экспериментальные и теоретические исследования строительных конструкций. – Н. Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – 2004, – С. 8-10.

12. Крамарев Л. Н., Жегалов Д. В. Осетров С. Л. Исследование больших деформаций и диаграмм деформирования конструкционных материалов в экспериментах пенетрирования // Сб. тр. II международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (DFMN 2007). – Москва. –2007. – С.608-616.