

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

**Е. В. Павленкова
Д. В. Жегалов**

**ЧИСЛОВЫЕ МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОГО
АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ
И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методической комиссией механико-математического факультета для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки 010500 «Прикладная математика и информатика», 010900 «Механика»

Нижегород
2012

УДК 539.3

ББК 22.2

П-12

П-12 Павленкова Е. В., Жегалов Д. В. ЧИСЛОВЫЕ МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ: Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 101 с.

Рецензент: доктор технических наук, профессор **А. И. Рузанов**

В учебно-методическом пособии представлен комплексный подход к решению задач упругопластического деформирования материалов при больших деформациях, включающий в себя экспериментальные исследования и численное моделирование. Для оценки изменения полей деформаций лабораторных образцов в процессе нагружения предложена регистрирующая система на базе цифровой фотокамеры, совмещенной с компьютером. Для компьютерного моделирования процессов деформирования упругопластических тел вращения (образцов) сформулированы определяющая система уравнений в обобщенной двумерной постановке, включающей кручение, вариационно-разностный метод и алгоритм численного решения. Представлены результаты экспериментальных и численных исследований процессов деформирования и разрушения осесимметричных образцов и элементов конструкций при комбинированных монотонных нагружениях кручением-растяжением до разрушения (последовательное нагружение растяжением и кручением, кручением и растяжением).

Учебно-методическое пособие полезно при выполнении курсовых и дипломных работ и приобретения практических навыков решения прикладных задач механики и математической физики студентами механико-математического факультета (направления «Прикладная математика и информатика», «Механика»).

Ответственный за выпуск:

Председатель методической комиссии механико-математического факультета ННГУ, к.ф.-м.н., доцент **Н.А. Денисова**

УДК 539.3

ББК 22.2

© Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2012

ВВЕДЕНИЕ

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 неоднородность 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.

Глава 1. Экспериментально-численные методы построения диаграмм деформирования материалов из стали и сплавов

1.1. Методы измерения полей смещений и деформаций на поверхности деформируемых материалов

При проведении численных исследований деформационных и прочностных характеристик элементов конструкций необходимо иметь диаграмму деформирования, предельные деформационные и прочностные характеристики материалов. Для их получения используются экспериментальные методы исследования. Наибольший интерес представляет распределение тензорных характеристик в объеме материала, но прямых экспериментальных данных о таких распределениях практически не существует. Существующие экспериментальные методы основаны на исследовании локальных неоднородностей пластической деформации на поверхности объекта исследования.

Существующие методы измерения деформаций можно разделить на две группы: методы измерения деформаций в отдельных точках тела и методы, измеряющие деформацию непрерывно по всему исследуемому полю зрения. К методам измерения деформаций в отдельных точках тела могут быть отнесены методы тензометрии с разнообразными типами датчиков и преобразователей, используемых в них [167, 72, 198]. Ко второй группе относятся оптико-геометрические (метод делительных и муаровых сеток), интерференционно-оптические и поляризационно-оптические методы.

Тензометрия — способ измерения напряженно-деформированного состояния конструкции. Базируется на определении напряжений и деформаций в наружных слоях детали с помощью тензодатчиков и регистрирующей аппаратуры. В основе современных тензометров лежит принцип определения изменения длины базы, ограниченной считывающими элементами тензометра. Тензометр состоит из тензодатчика, воспринимающего деформации, усилителя-преобразователя и регистрирующего устройства.

Наиболее широкое распространение получили электротензометры. Преобразование измеряемой информации в электрические сигналы осуществляется индуктивными, емкостными тензодатчиками или тензодатчиками сопротивления. Лорд Кельвин первым обратил внимание на то обстоятельство, что изменение деформации проводника сопровождается изменением его электрического сопротивления [225]. Существуют проволочные, фольговые и полупроводниковые тензорезисторы. К достоинствам электротензометров можно отнести: возможность обработки результатов в реальном времени; возможность измерения в труднодоступных местах и на большом отдалении от регистрирующей аппаратуры; возможность измерения различных по величине деформаций одной и той же электрической

цепью, меняя ее настройки; низкая инерционность; возможность построения сложных и больших по площади охвата конструктивных схем. Но также имеются недостатки: тензорезисторы являются датчиками однократного действия; их необходимо тарировать перед проведением эксперимента; условия окружающей среды, например, температура и качество монтажа вносят погрешность в результаты измерений.

Механические, оптические, пневматические, струнные (акустические), емкостные, пьезоэлектрические, индуктивные, механотронные датчики и др. [198] применяются в основном для измерения статических деформаций в локальных, наиболее нагруженных местах конструкций или в известных заранее концентраторах напряжений. Их преимуществом является то, что все измерительное устройство расположено в месте измерения, а измеряемая величина непосредственно отсчитывается по шкале. В оптико-механических тензометрах об измеряемой деформации судят по величине отклонения светового луча. Они применяются для измерения статических и динамических деформаций в большом диапазоне частот [181].

Однако широко распространенные тензометрические методы измерения позволяют осуществить только более или менее точное исследование объекта измерения. Также и многопозиционная система 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).

Метод делительных сеток является старейшим и наиболее простым из оптических методов экспериментального анализа деформаций и напряжений. На исследуемую поверхность наносят систему точек, линий или других меток, изменение их взаимного расположения и конфигурации позволяет определить перемещения точек на поверхности образца, а также деформации, скорости и другие производные. [188, 224]. Метод сеток применяется для решения большого числа задач экспериментальной механики, особенно в задачах пластического деформирования металлов при обработке давлением и в исследованиях развития вершины трещины [170].

Для исследования неоднородности пластических деформаций целесообразно применять нормальные, касательные и сетки из систем

соприкасающихся окружностей. Выбор типа сетки зависит от напряженного состояния образца и задач, поставленных исследованием. Наиболее часто используются нормальные сетки из системы взаимно перпендикулярных линий, расположенных по направлениям главных нормальных напряжений и удлинений. Такие сетки легко наносятся на образцы и не требуют сложных измерений, но позволяют измерять только продольное и поперечное удлинение элементов поверхности, а сдвиговые деформации приходится вычислять. Касательные сетки состоят из системы взаимно перпендикулярных линий, расположенных по исходным направлениям главных касательных напряжений и сдвигов. По изменению начального прямого угла между линиями сетки они позволяют измерять величину пластического сдвига и определять зону пластических деформаций. Когда направление главных напряжений заранее не известно и имеют место значительные концентрации деформаций, целесообразно применять сетки из системы соприкасающихся окружностей. Их применение позволяет выявить направление наибольших удлинений (главные оси эллипса деформаций) и по перемещению точек сопряжения окружностей измерить пластический сдвиг, а также, если было известно начальное положение главных осей, проследить за расхождением направлений главных и наибольших деформаций в процессе испытания.

Для измерения параметров ячеек делительной сетки используют измерительный микроскоп с визирным перекрестьем и координатным столиком, а также поворотную платформу с угломером.

Известны различные способы нанесения сеток. Это механические способы (царапанье, выдавливание, штампование, перфорирование), накатка, фотосетки и фоторастры.

Погрешность метода зависит от величины деформации. Чем выше деформация тем выше точность. Так при деформациях более 50% точность достигает 0,4%, а при деформациях менее 5% на базе менее 1 мм проявляется нечувствительность метода. При вычислении малых деформаций на погрешность сильно влияет погрешность измерения смещений, поэтому точность определения компонент тензора деформаций крайне низка и не достаточна для расчетных целей.

Главное достоинство метода сеток - это простота используемой аппаратуры, недостатки – сравнительно невысокая точность определения величин, дискретность результатов в зависимости от шага сетки, необходимость специального инструмента и различных подходов для нанесения сеток на различные поверхности. Метод лучше всего подходит для изучения деформаций материала после однократного нагружения из-за необратимого неоднородного изменения базы сетки в процессе пластического деформирования. По этой причине автоматизация процедуры определения смещений и деформаций затруднена [188].

Разновидностью метода делительных сеток является метод визиопластичности. Визиопластичность [video plasticity] — экспериментально-аналитический метод определения напряженно-деформированного состояния в стационарных процессах плоского или осесимметричного течения, при котором периодически фотографируется координатная сетка, нанесенная на внутреннюю плоскость составного образца. По замеренному смещению узлов сетки устанавливается векторное поле скорости перемещения металла и рассчитывается деформированное, а затем и напряженное, состояние по известным системам дифференциальных уравнений [2].

Цифровая фотография и системы машинного зрения используются в основном лишь для контроля геометрических размеров и качества выпускаемых промышленностью продуктов и материалов. Выпускающиеся производителями измерительного оборудования видеоэкстензометры, позволяют регистрировать на поверхности образцов перемещения специально нанесенных оптических меток, что не позволяет в полном объеме контролировать формоизменение лабораторных образцов и материалов в процессе деформирования.

В настоящее время использование метода делительных сеток ограничено, поскольку для численного исследования деформаций необходимо получение точных значений координат узлов и размеров ячеек сетки, что при классическом подходе является довольно трудоемкой задачей. Однако развитие цифровой техники позволило с легкостью получать цифровые снимки исследуемой области экспериментального образца с нанесенной делительной сеткой.

Развитием метода сеток является метод муаровых полос. Различают муаровые картины, основанные на геометрической и на оптической интерференции. Метод геометрического муара основан на явлении образования квазиинтерференционных полос при наложении друг на друга прозрачных пластинок с нанесенными на них достаточно плотными массивами линий, окружностей, точек либо других фигур [78, 182, 180, 198].

На исследуемый образец наносят измерительную решетку, затем образец деформируют и с помощью специальной измерительной аппаратурой совмещают нанесенную решетку с эталонной. При этом получается фиксируемая картина перемещений. Картины муаровых полос используются для измерения величин, характеризующих изменение геометрии тела (перемещения, углы поворота, кривизны и деформации) при упругопластическом и пластическом деформировании металлов. Они также увеличивают небольшие деформации линий сеток и позволяют их измерять.

Интерференционный муар включает в себя понятия и методы геометрического муара и оптической интерферометрии. Гилд [213] показал, что муар, образованный сетками низкой частоты так же может быть объяснен на основе задержки света или механической интерференции. В этом методе

учитывается дифракция света на сетке, шаг которой сопоставим с длиной волн оптического диапазона. Измерения с использованием интерференционного муара выполняют в следующей последовательности: на образец наносят скрещенную дифракционную решетку (объектная решетка); затем образец деформируют, а решетку освещают двумя пучками когерентного света; эти пучки образуют слои усиливающей и ослабляющей интерференции в зоне их пересечения; эта виртуальная решетка пересекает плоскость образца, образуя систему светлых и темных полос (опорная решетка); объектная и опорная решетки при наложении дают муаровую картину, которая наблюдается и фотографируется. Таким образом осуществляется измерение полей перемещений в плоскости образца. К достоинствам метода можно отнести высокую чувствительность, контраст и разрешающую способность, локализацию картины полос на поверхности объекта, большой диапазон измерений, измерения в реальном времени. Недостатком метода является чувствительность к вибрациям.

Поляризационно-оптический метод (метод фотоупругости) позволяет проводить исследования полей напряжений (деформаций) с применением плоских и пространственных моделей конструкций (или их зон), изготовленных из прозрачных материалов, обладающих ярко выраженным физическим свойством - так называемой оптической чувствительностью.

Брюстер, открывший явление двойного лучепреломления в 1816 году, предложил воспользоваться им для изучения напряженного состояния плоских стеклянных моделей. Позднее в работах Неймана, Максвелла, Вертгейма и др. были установлены связи между оптическими эффектами и напряжениями в упругих моделях. Важным шагом в развитии поляризационно-оптического метода стало доказательство Леви (1898 г.) теоремы о том, что для широкого класса задач теории упругости распределение напряжений не зависит от упругих постоянных материала (модуля упругости - E и коэффициента Пуассона - μ) и, следовательно, может быть найдено на основе исследования моделей, упругие константы материалов которых отличаются от соответствующих характеристик материалов натурной конструкции. [3, 198].

В основе метода лежит явление искусственного двойного лучепреломления, заключающееся в том, что прозрачные материалы под воздействием механических напряжений становятся оптически анизотропными. Степень этой анизотропии в каждой точке материала зависит от напряженно-деформированного состояния и характеризуется тензором диэлектрической проницаемости. Оптические параметры, связанные тензором диэлектрической проницаемости, могут быть измерены с помощью специальных приборов - полярископов. Для этого через прозрачную модель (как правило, плоскую пластинку) пропускают пучок поляризованного света, вследствие чего на экране полярископа возникает интерференционная картина, характеризующая напряженно-деформированное состояние модели. Достоинства метода:

наглядность получаемых картин перемещений; возможность изучения нестандартных конструкций, работающих при сложном нагружении; возможность анализа сварочных напряжений. Недостатки метода: необходимость выполнения точной модели из оптически чувствительного материала; необходимость проведения тарировки оптически чувствительного материала; необходимость использования специального оборудования (полярископы, полярометры, поляризационно-проекционные установки и др.).

Метод оптически чувствительных (фотоупругих) покрытий существенно расширяет область применения метода фотоупругости, позволяя проводить исследования НДС натуральных объектов, как в лабораторных, так и в эксплуатационных условиях. При исследованиях методом фотоупругих покрытий на поверхность детали наклеивают тонкий слой оптически чувствительного материала (фотоупругое покрытие), что позволяет изучать непрозрачные объекты. В качестве покрытий используют полимерные материалы, которые обладают необходимыми оптико-механическими свойствами и сравнительно просты в использовании. При нагружении детали покрытие деформируется вместе с ее поверхностью. Обусловленная этими деформациями интерференционная картина наблюдается с помощью отражательного полярископа. По этой картине на основе закона фотоупругости определяются величины и распределение деформаций, возникающих на поверхности исследуемой детали. Метод позволяет эффективно решать широкий круг задач: исследование упругопластических деформаций, изучение процессов разрушения и ползучести, деформации анизотропных тел, деформации в микрообластях, оценка температурных деформаций и напряжений, изучение динамических процессов, определение остаточных напряжений и др. К его достоинствам также можно отнести сравнительную простоту используемой аппаратуры. А недостатками являются: сложность выбора толщины покрытия, т.к. от нее с одной стороны зависит точность измерения, а с другой – равномерность напряженно-деформированного состояния в покрытии; температурное влияние на пленку и необходимость тарировочных испытаний. Точность измерений напряженно-деформированного состояния на поверхности натуральных машиностроительных конструкций и образцов с применением фотоупругих покрытий зависит от погрешности измерений оптической разности хода, влияния жесткости покрытия, неравномерности толщины покрытия, влияния неравномерности распределения деформаций по толщине покрытия. При этом принято считать, что при проведении измерений в зонах концентрации напряжений наиболее существенным из них является влияние неравномерности деформаций по толщине покрытия. В связи с этим разработаны способы коррекции результатов оптических измерений, соответствующих средним по толщине покрытия деформациям, которые при больших градиентах деформаций на исследуемой поверхности могут отличаться от измеряемых величин [3, 227]. Эти способы

основаны на проведении повторных экспериментов при различных толщинах покрытия, что существенно увеличивает объем измерений и предъявляет особые требования к технике эксперимента. Предложенный в работах [3, 14] приближенный метод корректировки результатов измерений в покрытии позволяет избежать повторных оптических измерений. Однако он весьма сложен для широкого применения при решении практических задач, так как требует на первом этапе раздельного определения всех компонент средних по толщине деформаций в покрытии, а затем численного решения уравнения второго порядка в частных производных для всей исследуемой двумерной области. Такая двойная расчетная процедура обработки экспериментальных данных может привести к достаточно существенным погрешностям в результате. Следует отметить, что систематические данные для количественной оценки влияния неравномерности деформаций по толщине покрытия в зонах больших градиентов до сих пор отсутствуют.

Метод хрупких покрытий аналогичен методу оптически чувствительных покрытий и отличается от него типом используемых материалов и интерпретацией полученных экспериментальных данных. На поверхность исследуемой детали наносят тонкий слой хрупкого покрытия, в котором при нагрузке детали получают такие же деформации, как в точках ее поверхности. Когда относительное удлинение (или растягивающее напряжение) в какой-либо точке поверхности детали достигает определенной величины, то в связанной с ней точке покрытия возникает трещина, что рассматривается как тензочувствительность покрытия. Исследование различных хрупких покрытий показывает, что трещина в покрытии независимо от вида напряженно-деформированного состояния получается в зависимости от состава покрытия при определенном относительном удлинении или же при определенном растягивающем напряжении. По мере увеличения нагрузки, прилагаемой к детали, трещина распространяется от более напряженного к менее напряженному месту. Таким образом находят зоны наибольших растягивающих напряжений (относительных удлинений) и главные их направления, при этом ход трещины совпадает с траекторией главного напряжения.

Если применяют покрытие со стабильной тензочувствительностью, в котором трещина возникает при достаточно строго определенной величине растягивающего напряжения (деформации), то, проводя по мере увеличения нагрузки линии, до которых доходят на поверхности детали трещины в покрытии, можно определить с соответствующей погрешностью величины напряжений (деформаций) во всей зоне поверхности, где будут получены трещины в покрытии. При снятии нагрузки трещины в покрытии сохраняются.

При приложении быстро изменяющейся динамической нагрузки, когда наблюдение за ростом трещин по мере увеличения нагрузки невозможно, картина трещин даст траектории напряжений, покажет места наибольших

растягивающих напряжений (деформаций); линия, проведенная по концам трещин, даст точки поверхности детали, имеющие одинаковую величину наибольших растягивающих напряжений (деформаций). Поэтому в случае динамических нагрузок для оценки величин напряжений (деформаций), имевшихся в различных местах поверхности детали, применяют покрытия с различной тензочувствительностью. Для наблюдения деформаций сжатия процесс следует вести в обратном порядке, т.е. наносит хрупкое покрытие на предварительно напряженный объект с последующей его разгрузкой. Метод хрупких покрытий применим только к статическим нагрузкам, а при динамических нагрузках – только к одноразовой ударной нагрузке. Покрытие может быть использовано только для одного испытания, а в случае серийного испытания – и для ступенчато возрастающих нагрузок. [94, 166, 87].

Метод голографической интерферометрии находит широкое применение в экспериментальной механике для определения компонент вектора смещения. Впервые метод был использован в 1965 году Пауэлом и Стетсоном и с тех пор значительно эволюционировал. Голографическая интерферометрия – это способ получения и интерпретации интерференционных картин, образованных волновыми фронтами, если, по крайней мере, один из них восстановлен с помощью голограммы. Этот способ позволяет измерять оптическую разность хода интерферирующих волн, которая может быть обусловлена такими факторами, как: изменение формы и положения исследуемого объекта в пространстве, изменение оптических характеристик среды или объекта, изменение длин интерферирующих волн и др. Достоинства метода: возможность использования в исследованиях широкого диапазона волн (электромагнитные, рентгеновские, акустические); наличие нескольких схем записи голограмм, которые зависят от требуемых данных; широкий диапазон решаемых задач; размер голограммы в общем случае не зависит от размера исследуемой конструкции – чем она больше, тем более точные экспериментальные данные мы получим. Недостатки: громоздкость и высокая цена экспериментальных установок (необходим лазер и регистрирующие фотопластины) и относительная сложность интерпретации полученных данных [155]. Наиболее просто этим методом изучаются перемещения из плоскости деформируемой детали. Обладая рядом бесспорных достоинств: бесконтактностью, апостериорностью, констинуальностью, отсутствием особых требований к чистоте обработки изучаемых поверхностей, возможностью контроля за соблюдением граничных условий в ходе эксперимента и т.п., - голографическая интерферометрия диффузно-отражающих объектов в ее общепринятом варианте оказывается зачастую чрезвычайно чувствительным методом с низкой помехоустойчивостью. К тому же из-за ограниченного разрешения оптических систем невозможен надежный замер прогибов в местах с их резким градиентом. Перечисленные обстоятельства заставляют искать пути снижения чувствительности метода.

Метод спекл-интерферометрии является развитием метода голографической интерферометрии и основан на спекл-эффекте, наблюдаемом оптическими приборами с ограниченной апертурой при отражении когерентной волны от диффузно-отражающей поверхности. При этом чувствительность интерференционных полос к величине и направлению смещения поверхности варьируется в значительно более широких пределах, нежели в методах голографической интерферометрии. Кроме того, здесь не требуется очень высокой разрешающей способности регистрирующей среды, понижены требования к механической стабильности элементов и значительно упрощена автоматизированная оценка интерферограмм [107].

Для расширения диапазона измеряемых перемещений в ряде работ рассматриваются методы типа разностных контурных карт, а также основанные на объединении методов Муара и голографии [166]. Однако трудоемкость и низкий контраст получаемых картин препятствует их широкому распространению.

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.

1.2. Испытание на растяжение и получение истинных диаграмм деформирования

Первые описания поведения тел при больших деформациях встречаются в работах Бернулли, Кулона, Навье и Кариолиса. Обзор экспериментов проведенных до 1800г. выполнил Ж.-В. Понселе, он же и ввел понятие диаграммы растяжения образцов [38, 85, 184]. Площадку текучести, образование и развитие шейки на образце первым обнаружил Г. Ламе [184]. Логарифмические деформации первым предложил П. Людвик, он же вероятно первым выдвинул теорию единой кривой [131]. Первую диаграмму «истинное напряжение – истинная деформация» построил К. Мак-Грегор [217].

Обзор исследований приводится в работах [38, 156]. Следует заметить, что трудности при обработке экспериментальных данных возникают при больших деформациях из-за неоднородности НДС по длине образца, а также развивающейся от опорной утолщенной части испытуемых образцов по мере увеличения степени деформации, еще до появления шейки. Участки стержня, которые граничат с головкою образца, растягиваются менее существенно, чем

участки, расположенные в середине образца, вследствие наличия трехосного напряженного состояния вблизи головок. В работах В.С. Ивановой [87], П.Ф. Кошелева и Г.В. Ужика [116] установлено, что пластическая деформация начинается от концов образца, а упрочнение начинается, когда пластическая деформация распространяется по всей рабочей части образца. Таким образом имеет место неодносное напряженное состояние, и оно порождает нелинейный краевой эффект изменения толщины рабочей части образца, распространяющийся от краев в зависимости от степени деформации. В работе О.Д. Кайбышева [100] сделан вывод, что к большим ошибкам приводит предположение о равномерном удлинении по всей длине образца из-за неоднородности сечения при растяжении (до 20% - при расчете напряжений и до 40% - при определении деформаций). Обычно для определения продольных деформаций в зоне однородности НДС применяют тензодатчики с базой меньшей, чем рабочая часть. Но и они способны оценить только малые деформации и используются для определения упругих характеристик и начала зоны пластичности [83]. Предпочтительнее измерять в процессе нагружения либо изменение площади поперечного сечения образца или радиус образца, но возникают трудности, связанные с локализацией деформаций [73]. Большие пластические деформации отличает существенная неравномерность течения, она проявляется как развитие местных локальных деформаций, имеющих большую величину [165].

Кроме нелинейного краевого эффекта при построении полной истинной диаграммы деформирования следует учитывать неодносность и неоднородность НДС в образцах после образования шейки. Момент, когда начинается образование шейки, в основном зависит от способности материала к упрочнению, появление шейки объясняется Г. Заксом [70]. Л. М. Качанов рассматривает появление шейки у цилиндрического образца с помощью линий скольжения, полей скоростей и разрывности этих полей [103, 104].

А. Консидер ввел условие максимальной нагрузки, как критерий момента появления шейки в виде метода подкасательной [132, 149]. Этим методом решено большое количество технологических задач, примеры которых можно найти в работах [6, 40, 103, 104, 132, 149]

Некоторые авторы считают, что шейка начинает развиваться с максимума нагрузки [192], некоторые считают, что шейка начинает образовываться до достижения нагрузкой максимума [196], или после нее [142]. На уровне максимума нагрузки на диаграмме растяжения образца имеется некоторый горизонтальный участок, в начале этого участка появляется шейка, а развивается она после конца его [131].

Многочисленные работы [36, 50, 58, 66, 73, 74, 103, 110] посвящены исследованию деформирования и потере устойчивости пластического деформирования оболочек и стержней. Появление шейки и локализация деформаций при растяжении образцов является потерей устойчивости

пластического деформирования и проявляется при различных видах нагружения.

Момент достижения нагрузкой максимального значения и момент локализации пластического деформирования могут не совпадать [110, 109], а потеря устойчивости конструкций существенным образом зависит от способа нагружения. Условие Друкера [77] используется в качестве критерия потери устойчивости, в работе М.Я. Бровмана [42] оно было проверено экспериментально. В других работах применяются предельные поверхности, предложенные Х. Свифтом, Р. Хиллом, Марциняком и Кущински, Сингом и Рао и др. В работе [215] исследуется потеря устойчивости тонкостенной оболочки в сравнении идей А. Консидера, Ф. Друкера, Х. Свифта, Р. Хилла и метода распространения деформаций. Сравнение описания предельных деформаций, предложенных Р. Хиллом, Х. Свифтом, Марциняком и Кущински, Сингом и Рао проводится в работе [187]. Метод Синга и Рао наилучшим образом описывает предельные деформации.

Сложность описания диаграммы упругопластического деформирования до разрушения заключается в объяснении и описании ниспадающего участка диаграммы, так называемой стадии неустойчивого (закритического) деформирования [56, 57, 168].

Сопrotивление разрушению является не только свойством материала, но и зависит от жесткости нагружающей системы, в которую входят как нагружающее устройство, так и само деформируемое тело, окружающее зону разрушения. В работах [125, 159, 189] установлено, что режим нагружения также существенно сказывается на характере ниспадающей ветви диаграммы: когда к находящемуся в однородном напряженном состоянии телу прикладываются не зависящие от его сопротивления силы, разрушению соответствуют максимально достижимые значения напряжений, как это обычно и принимается в расчетах на прочность; случае «жесткого нагружения» (когда задаются перемещения точек на границе) возможно равновесное протекание процесса деформирования, что находит свое отражение на ниспадающей ветви диаграммы деформирования.

Из-за наличия ниспадающей ветви на диаграмме деформирования, характеристикой разрушения материала стали считать не точку максимума на условной диаграмме деформирования, а конечную точку диаграммы. В работе [189] Я.Б. Фридман отмечает, что эта точка отражает состояние, соответствующее началу заключительной быстропротекающей неравновесной стадии процесса разрушения, при этом разрушение заканчивается при усилии, близком к нулю.

Существуют разные мнения о возможности построения полной диаграммы деформирования. Г. А. Черепанов утверждает, что закритический участок является динамической характеристикой системы «образец-испытательная машина» и не зависит от физических свойств материала в

закритической области» [194]. А. А. Лебедев с соавторами на основе экспериментов показали, что ниспадающая ветвь все же зависит не только от жесткости испытательной машины, но и является характеристикой материала. Кроме этого наличие ниспадающего участка диаграммы свидетельствует о том, что разрушение материала не является мгновенным актом, а происходит непрерывно в течение определенного времени [126,127, 128, 178]. Исследование разрушения образцов при растяжении Р.Г. Шина и В.Л. Каткова [195] установили: сначала происходит разрыхление материала, образуются микропоры и микротрещины, происходит рассеянное накопление поврежденности в материале на уровне микроструктуры (деформационное разупрочнение материала); затем возникает магистральная внутренняя трещина, резко меняется сопротивление образца и нагрузка начинает падать. Попытка разработать математическую модель микронеоднородной среды, которая бы описывала полную диаграмму упругопластического деформирования, включая участок закритического деформирования, в случае «жесткого» нагружения делается в работе [168]. Теоретически обосновывается осуществимость состояний материала, соответствующих ниспадающей ветви диаграммы деформирования, без учета эффекта накопления повреждений, в работах [151, 173].

Мало внимания в современной литературе уделено исследованию закритического поведения стержней и оболочек при растяжении, а возникающее сложное объемное НДС затрудняет получение аналитических решений. Приближенные решения о распределении напряжений и деформаций вдоль минимального сечения шейки в сплошном цилиндрическом образце получены в работах Бриджмена [41], и в работах Давиденкова и Спиридоновой [68]. Эти решения основаны на гипотезах: окружная и радиальная деформации равны и постоянны вдоль сечения; известен закон изменения кривизны траектории главных напряжений (для каждого подхода свой). В работе А. М. Жукова получено точное аналитическое решение задачи о распределении напряжений и деформаций в начальный момент образования шейки [80]. Разными авторами предложены поправки к распределению Бриджмена, Давиденкова и Спиридоновой [15, 47, 71, 81, 123, 124, 133, 160].

Разные авторы занимались экспериментальным анализом, проверкой решений и принятых гипотез, полученные результаты в целом говорят об удовлетворительном согласовании с экспериментальными результатами [15, 41, 47, 64, 68, 71, 149, 160, 163].

В шейке деформация локализуется в малой зоне вблизи минимального поперечного сечения, ограниченной точками перегиба профиля шейки и при изучении разрушения важно знать НДС всего образца [41, 149, 216]. Поля напряжений и деформаций в зоне около минимального сечения шейки определяются в работе М.А. Карпан [216], на основе широко известных результатов опытов Бриджмена [41]. На основе данных Давиденкова и

Спиридоновой [68] та же задача решается в работе О.Д. Хлопотова [191]. В работах [104, 177] приведены решения с использованием линий скольжения и полей скоростей. Решения на основе метода конечных элементов представлены в работах [101, 226]. Определение траекторий главных напряжений в шейке на основе преобразования исходной сетки координат с помощью конформных отображений рассмотрено в работе [75]. А.А. Пресняков в работе [165] привел подробный обзор работ о развитии шейки в образце.

Построением истинных диаграмм деформирования после потери устойчивости пластического деформирования экспериментально занимался К. Мак-Греггор [149, 217]. В своих исследованиях он показал, что после начала локализации деформирования зависимость средних вдоль минимального сечения шейки продольных напряжений от деформаций будет линейна или близка к этому. В работах [149, 161, 220] реализована эта идея. Истинная диаграмма деформирования строится до точки, соответствующей максимальной растягивающей силе, затем проводится прямая, касательная к построенной кривой, а по этой прямой ведется обратный пересчет по формулам Бриджмена [41].

В работах [41, 59, 75, 149, 154, 220, 223] выполнен анализ возможных форм шеек и геометрии образцов в области шейки, даны подходы к описанию формы шейки и проведено сравнение с экспериментом.

Влияние размеров образцов на показатели прочности бескислородной меди исследовано в работе [148], авторы установили, что у коротких образцов шейка появляется раньше. При испытаниях образцов малого диаметра проявляется влияние масштабного фактора [129, 154]. В работе Н.Д. Сазановой [175] установлено оптимальное отношение длины образца к его диаметру, равное 5-10, при достижении этого отношения значений более 30 может проявиться влияние объема.

Целью изучения прочности твердых тел является предсказание разрушения конкретных конструкций. Проблема не может быть решена только путем изучения разрушения образцов при лабораторных испытаниях, т.к. при производстве конструкций свойства материалов искажаются технологическими процессами [96], а характер развития локализации деформации в эксперименте и технологическом процессе несопоставим [165]. Важной проблемой лабораторной методики является учет влияния геометрии испытуемого образца на результаты испытаний. В работах [69, 129, 148, 150, 154, 165] представлены многочисленные исследования на эту тему.

Для идентификации деформационных и прочностных характеристик материалов при больших упругопластических деформациях целесообразно применение методов математического моделирования процессов деформирования лабораторных образцов или элементов конструкций. 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 [22, 24, 25, 26].

1.3. Испытания на твердость и получение истинных диаграмм деформирования.

Испытания на твердость для определения свойств упругопластических материалов по широте применения не уступают испытаниям на растяжение. Эти испытания относятся к методам безобразцового неразрушающего контроля механических свойств материалов.

Под твердостью понимают свойство поверхностного слоя испытываемого материала сопротивляться локальной упругой и пластической деформации или разрушению при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твердого и не получающего остаточной деформации тела (индентора) строго определенной формы и размера.

В зависимости от скорости приложения нагрузки способы определения твердости делятся на статические и динамические, а по способу приложения нагрузки на методы вдавливания и царапания. Наиболее распространенными являются методы, в которых используется статическое вдавливание индентора по нормали к поверхности испытываемого материала. Получаемые числа твердости (например, по Бринеллю НВ, Виккерсу НV, Роквеллу НR) не дают достаточной информации для оценки процесса упругопластического деформирования материала, потому что представляют лишь конечный результат оценки процесса контактного деформирования материала индентором, при указанной стандартом, т.е. фиксированной конечной нагрузке на индентор [83].

Непрерывно регистрируя диаграмму вдавливания при нагружении индентора, можно получить более полную информацию о физико-механических свойствах материалов и параметрах упрочнения. При вдавливании на разные глубины конуса или пирамиды образуются подобные отпечатки, создающие подобные поля деформаций в зоне отпечатка, среднее давление на поверхности отпечатка оказывается постоянной величиной. В процессе вдавливания шара на разные глубины среднее давление в отпечатке изменяется в зависимости от угла вдавливания и от степени деформации, а при вдавливании шара под действием различных нагрузок можно получить кривую твердости, которая дает существенно большую информацию. Шар можно рассматривать как универсальный индентор с переменным углом заострения, возрастающим по мере углубления, а построение диаграмм твердости с помощью конического или пирамидального индентора требует нескольких инденторов с разными углами [35].

В работе В. М. Матюнина [141] приведен обзор и анализ методов кинетического индентирования и получения диаграмм деформирования.

Существующие методики исследования свойств материала на основе кинетического индентирования можно разделить на два направления. Первое направление характеризуется измерением геометрических параметров отпечатков, восстановленных после снятия нагрузки. Оно подразумевает проведение серии последовательных вдавливаний с регистрацией прилагаемого к индентору максимального усилия и поперечного размера лунки на каждом шаге. Этот метод представлен в работах Тейбора [222] и Марковца [134]. Второе направление основано на непрерывной регистрации нагрузки на индентор и глубины вдавливания индентора. Это направление реализовано в работах Бакирова [35], Булычева и Алехина [45], Хаггага [204] и др.

В последнее время появились работы, в которых истинные диаграммы деформирования получаются с помощью применения методов идентификации. Это работы М.Б. Бакирова и В.В. Потапова [34, 35], А. Hasanov и Z. Seyidmamedov [205, 206]. Авторами предложены итерационные методы построения диаграмм на основе сопоставления полученных экспериментально и численно зависимостей нагружающих усилий от глубины внедрения при испытаниях на кинетическое индентирование. Использование этих методов при больших деформациях неэффективно и приводит к большим временным затратам на численное решение прямой задачи и медленной сходимости алгоритма. Эти методы позволяют строить диаграммы с приемлемой точностью лишь для малых деформаций. 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 [22, 23, 24, 27, 156].

При построении кривых твердости в качестве среднего текущего напряжения обычно выбирают твердость по площади поверхности отпечатка НВ (твердость по Бринеллю) или твердость по площади его проекции НМ (твердость по Майеру). Твердость по Майеру представляет среднее давление на поверхность отпечатка. На кривых твердости по оси абсцисс откладывают степень деформации материала при вдавливании. При испытании определяют угол вдавливания индентора, относительную глубину отпечатка, отношение диаметра отпечатка к диаметру индентора и другие отношения.

Проблема выбора оптимальной методики по определению механических свойств из кинетической диаграммы вдавливания актуальна для безобразцового контроля конструкционных сталей. Для всех представленных подходов определения механических свойств по параметрам диаграммы вдавливания требуются корреляционные зависимости, которые будут отличаться для разных материалов. Определение взаимосвязей между диаграммой деформирования при одноосном растяжении образцов и кривой твердости является одной из центральных задач теории твердости.

Тэйбор заложил основы метода определения механических свойств материалов по диаграмме вдавливания, он впервые показал возможность получения целой кривой деформирования при вдавливании шарового индентора. В работах [221, 222], исследуя слабо упрочняющиеся металлы, он получил, что величина среднего давления в отпечатке НМ связана с напряжением при растяжении линейной зависимостью, кроме этого для неупрочняющихся материалов среднее контактное давление под индентором равно утроенному значению предела текучести. Тэйбор предложил оценивать степень деформации в лунке пропорционально отношению диаметра проекции отпечатка к диаметру шара и определил коэффициент пропорциональности 0.2, т.е. при вдавливании индентора эквивалентная пластическая деформация ограничена 20%. По многочисленным экспериментальным данным он сделал вывод, что для слабоупрочняющихся материалов коэффициенты упрочнения кривых одноосного растяжения и вдавливания шара примерно равны. В дальнейшем Майер отметил, что изменение среднего контактного давления с изменением размера отпечатка описывается степенной функцией. Позднее D.M. Marsh [218], R. Hill [209] и K.L. Jonson [214] установили, что коэффициент пропорциональности между средним давлением в отпечатке НМ и напряжением при растяжении можно считать постоянным только после установления режима пластического течения. В работах [209, 214, 218] был предложен параметр для определения режима пластического течения. Этот параметр зависит от угла контакта и отношения модуля упругости материала к пределу текучести, а в переходной области является линейной функцией логарифма от введенного параметра. Нижняя граница переходной области в работе Тэйбора [222] определяется условием зарождения пластичности. Фрэнсис [202] осуществил коррекцию констант, используемых в зависимостях, на основе анализа экспериментальных данных. Эти положения легли в основу распространенных методик интерпретации диаграмм вдавливания.

Процесс индентирования можно условно разделить на 3 стадии:

1) в начале наблюдается упругий режим, он описывается теорией Герца [208];

2) затем под индентором формируется область пластичности, что характеризуется переменным значением отношения среднего контактного давления под индентором к текущему значению напряжения (переходный режим);

3) в дальнейшем отношение среднего контактного давления под индентором к текущему значению напряжения стабилизируется (пластичный режим).

Модификации методик Тейбора – Джонсона были предложены различными авторами. В работах [211, 212] Т. Ishibashi и S. Shimoda предложили скорректировать предложенную Тейбором зависимость, заменив в ней диаметр индентора на диаметр кривизны лунки, таким образом можно

исключить влияние упругих свойства индентора на результаты испытаний. Кривизну лунки авторы предлагают определять расчетным методом. При этом делаются предположения: при разгрузке контакт индентора и образца описывается теорией Герца, диаметр лунки не изменяется в ходе разгрузки. Эти допущения обоснованы лишь для малых деформаций, которые характерны для переходного режима нагружения и начала пластического режима, но именно в этой области поправки можно считать значимыми. Их использование позволяет скорректировать результаты индентирования в твердые материалы, для мягких материалов эти поправки не столь значимы.

Фрэнсис [202] предложил определять эффективную пластическую деформацию под индентором через отношение глубины и базового радиуса сегмента материала, выдавленного индентором, чтобы привести к единому знаменателю данные, полученные для материалов, характеризующихся образованием наплыва при индентировании, и материалы, характеризующиеся образованием прогиба. Такое определение практически совпадает с определением Тейбора для материалов, характеризующимися малыми значениями наплыва или прогиба.

М. П. Марковец [134] предложил определять эффективную пластическую деформацию под индентором как относительное приращение площади поверхности при образовании лунки. Это определение логически обосновано, но не согласуется с многочисленными экспериментальными данными, полученными Тейбором. Развитая в работах В.М. Матюнина [136, 140, 143], эта методика дает процедуру определения пределов текучести и прочности испытуемого материала. Авторы утверждают, что условному пределу текучести соответствует значение деформаций, равное 0,002, и необходимо найти значение твердости по Бриннелю (НВ) для этой деформации (твердость на пределе текучести). Соотношение между твердостью на пределе текучести и пределом текучести для легированных сталей приведено в ГОСТ 22762-77 Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара [144]. Для нахождения значения предела прочности вводят характеристику - твердость на пределе прочности. При вдавливании шара в сталь текущее значение НВ при возрастании степени деформации сначала возрастает, потом достигает максимума, а затем уменьшается. Близкие значения показывает сопоставление степеней деформации при максимальных значениях на диаграммах растяжения и диаграммах твердости. Авторами методики предлагается определять предел прочности, связывая максимальное значение на диаграмме твердости, обозначаемое как твердость на пределе прочности, с максимальным значением на диаграмме растяжения. В работе [135] предлагается соотношение для углеродистых и легированных сталей. Определять соотношение значения твердости на пределе текучести и твердости на пределе прочности по двум вдавливаниям под разными нагрузками предлагается в работе [143].

Ф.М. Haggag предложил методику, основанную на непрерывной регистрации диаграммы вдавливания индентора в серии циклов нагрузки-разгрузки при увеличивающемся максимальном усилии [204]. В процессе испытаний необходимо регистрировать силу, прилагаемую к индентору, и перемещение индентора. Расчеты автора также основаны на соотношениях, предложенных Тейбором – Джонсоном, и используют значения максимального усилия на индентор и перемещение индентора в момент полной разгрузки.

В работах М.Б. Бакирова и В.В. Потапова [35] реализовано дальнейшее развитие методов, основанных на соотношениях Тейбора – Джонсона. Авторы получили уточненные значения для коэффициента пропорциональности между средним давлением в отпечатке НМ и напряжением при растяжении, сделали поправку на изменение угла вдавливания шара к поверхности испытуемого материала от влияния упругой деформации индентора. На основе статистической обработки для некоторых марок сталей авторами получены зависимости, связывающие параметры аппроксимации кривых вдавливания и диаграммы деформирования. Разработана и предложена методика получения пределов текучести и пределов прочности с заявленным расхождением результатов эксперимента и расчета менее 10% для исследуемых материалов.

В работах В.П. Алехина и С.И. Булычева [4, 44] также описана методика определения коэффициентов подобия между диаграммами восстановленной твердости и растяжения. Методика учитывает зависимость пластической деформации в отпечатке от коэффициента деформационного упрочнения материала и от упругих деформаций отпечатка. Авторы утверждают, что для разработки более точных методик определения механических свойств по невозстановленной твердости необходимо использовать гистерезис. Гистерезис в отпечатке предлагается регистрировать на непрерывной диаграмме вдавливания при повторном нагружении отпечатка. Кроме этого предложены модели и способы более точного расчета упругих деформаций и модуля Юнга в пластическом отпечатке.

Аналитическая методика определения диаграмм деформирования по диаграммам вдавливания, основанная на уточнении полученной ранее взаимосвязи параметров аппроксимации диаграмм с учетом трения, предложена в работе М.М. Матлина и А.И. Мозгуновой [139].

Следует отметить, что дальнейшее развитие метода кинетической твердости осуществляется в направлении расширения возможностей определения состояния материала в ходе испытаний по вдавливанию. С этой целью происходит интеграция методов определения твердости неразрушающими методами контроля свойств конструкционных материалов. Например, М.Б. Бакиров и В.В. Потапов [35] и М.Н. Михеев и Э.С. Горкунов [147] предлагают объединять методы измерения твердости с магнитными и акустическими методами. В этом случае, по утверждению авторов, появляется возможность более точно оценить степень пластической деформации и

проанализировать разрушение в зоне отпечатка. Также интеграция методов позволяет более точно оценить переход в зоне упругопластического деформирования материала под индентором от упругого к пластическому вдавливанию.

1.4. Задачи о комбинированном нагружении кручением с растяжением

Проектирование и прочностной расчет современных деталей и элементов конструкций определяется экстремальными значениями их рабочих параметров в условиях сложного напряженного состояния. Многие конструкции находятся в условиях неодноосного или немонотонного нагружения. Это вызывает необходимость изучения особенностей механического поведения материалов при многокомпонентном, в том числе сложном, нагружении. На практике, для испытаний на сложное нагружение и для изучения особенностей механического поведения материалов при больших степенях деформаций наиболее часто применяют растяжение с кручением. Известно, что 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 однородного цилиндрического стержня из сверхпластичного материала при двухкомпонентном нагружении осевой силой и крутящим моментом рассмотрено в работе Ф. У. Еникеева [79]. Кинематика процесса определяется зависимостями от времени осевой и угловой скоростей движения торцов стержня одного относительно другого. Ряд характеристик деформированного состояния рассмотрен в лагранжевом и эйлеровом представлениях.

Влияние кручения на явление неустойчивости в виде образования шейки исследуется в статье Л. М. Зубова, Д. Н. Шейдакова [84]. Для растягиваемого стержня, имеющего форму кругового цилиндра, докритическое состояние описывается точным решением задачи нелинейной теории упругости о равновесии скрученного и растянутого цилиндра. Устойчивость стержней изучается на основе трехмерных уравнений нейтрального равновесия изотропного несжимаемого тела. После разделения переменных уравнения нейтрального равновесия приводятся к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, которую можно решить численным методом. Авторы делают выводы о том, что наибольшее удлинение цилиндра без потери устойчивости происходит при чистом растяжении, а дополнительное скручивание только вызовет потерю устойчивости на более ранней стадии растяжения.

Методика определения напряженного состояния в рамках теории течения с изотропным упрочнением предложена в статье В. К. Бердина, Р. М. Кашаева

[39]. Авторы рассмотрели растяжение с одновременным кручением сплошного цилиндрического образца из материала, чувствительного к скорости деформации, в условиях пропорционального нагружения. На базе гипотезы о пропорциональности девиаторов напряжений и скорости деформаций ими был проведен анализ напряженно-деформированного состояния. Таким образом была построена диаграмма деформирования титанового сплава ВТ9 по данным испытаний на растяжение с одновременным кручением в условиях сверхпластичности. Интенсивность напряжений при растяжении с одновременным кручением сплошного цилиндрического образца определяли двумя способами: через осевое усилие и через крутящий момент. Зависимости интенсивности напряжений от степени деформаций, полученные таким образом, совпали и в рамках допустимой погрешности эксперимента соответствуют диаграмме растяжения.

Широкий спектр вопросов комбинированного нагружения представлен в работах Б. Д. Аннина. Им были проведены эксперименты на сложное нагружение тонкостенных трубчатых образцов при малых пластических деформациях. Результаты представлены в работах [7, 9, 12, 8]. Многочисленные опыты проводились с целью изучения поверхности текучести. По результатам проведенных опытов был сделан вывод, что малые пластические деформации существенно изменяют поверхность текучести вблизи точки поверхности, противоположной точке нагружения.

Результаты его экспериментов по проверке постулата изотропии в пространстве напряжений для меди приведены в работе [11]. Для данных путей нагружения постулат изотропии выполняется удовлетворительно.

Циклическое деформирование в условиях сложного нагружения исследовалось в работе [10]. Наблюдался рост пластической деформации, приводящий к потере устойчивости образца, а интенсивность деформаций не превышала 4% в момент потери устойчивости. Отдельно вопрос потери устойчивости цилиндрической оболочки при кручении и кручении с растяжением рассматривался в работе [65].

Для идентификации деформационных и прочностных характеристик материалов при больших упругопластических деформациях в условиях сложного напряженного состояния целесообразно применение методов математического моделирования процессов деформирования лабораторных образцов или элементов конструкций. Вариационно-разностный метод решения обобщенных двумерных задач кручения, позволяющий моделировать процессы деформирования упругопластических тел вращения при комбинированном воздействии осесимметричного нагружения и кручения с учетом больших деформаций разработан В. Г. Баженовым и его учениками [22, 28, 29].

1.5. Математические модели деформирования упругопластических материалов

В настоящее время одной из главных задач механики сплошных сред является разработка моделей нелинейного поведения различных материалов. Сформулированы общие фундаментальные постулаты и разработан ряд общих положений, определяющих структуру соотношений между напряжениями и деформациями и позволяющих вести теоретические и экспериментальные исследования свойств этих соотношений, однако при конкретном применении моделей возникают значительные трудности в их оснащении материальными функциями и константами.

В расчетах конструкций применение математической модели поведения материала возможно только тогда, когда разработана четкая методика определения ее параметров. На сегодняшний день для описания пластического деформирования существует большое количество моделей, основные из них представлены в работах [48, 85, 95, 169].

Теория упругости и применяемый для ее описания закон Гука является наиболее разработанной и экспериментально исследованной моделью. Но большое разнообразие свойств упругопластических твердых тел затрудняет создание феноменологической модели, которая смогла бы охватить весь накопленный экспериментальный материал и была бы применимой для практических расчетов.

Для лучевых путей нагружения наиболее разработанной и обоснованной экспериментально и теоретически является теория малых упругопластических деформаций [85, 89, 90]. К широкому распространению этой теории привели сравнительная простота соотношений и возможность общих методов решения для значительного класса задач. В работах [43, 108] расширен класс путей нагружения, для которых теория имеет физический смысл, а также сформулированы более общие критерии ее применимости для класса путей нагружения, близких к лучевым.

Для произвольных сложных путей нагружения лишь общая теория пластичности А. А.Ильюшина [89] устанавливает связь между напряжениями и деформациями на основе экспериментально подтвержденного постулата изотропии. А его метод СН-ЭВМ [92, 93, 90] указывает пути решения краевой задачи теории пластичности. Недостатком является то, что методика СН-ЭВМ достаточно трудоемка и применение ее при решении прикладных задач вызывает значительные сложности [17, 16, 90].

Развитие теорий типа течения начнется с работ Сен-Венана, Мизеса, Леви [85]. Подробный обзор теорий течения и их обобщений приведен в работах Р. А. Васина [48], В. Г. Зубчанинова [85], А. Ю. Ишлинского [95], там же содержится обширная библиография по данному вопросу. Известными обобщениями этих теорий для упрочняющихся упругопластических тел

являются дифференциальные теории пластичности. В основе их лежит ассоциированный закон течения: направление вектора скорости пластических деформаций совпадает с нормалью к поверхности текучести в точке нагружения; поверхность текучести в процессе деформирования может смещаться в пространстве напряжений, менять форму и размеры. Для изотропных материалов начальная поверхность текучести хорошо описывается уравнением, предложенным Мизесом [85].

В работах Р. А. Васина [54] и В. Г. Зубчанинова [85] приведен анализ некоторых теорий течения с позиции общей теории пластичности А. А. Ильюшина. Экспериментальные исследования и сравнительные расчеты показали, что для траекторий в виде двухзвенных ломанных теория течения качественно лучше описывает экспериментальные результаты, чем деформационная теория. Также авторы подтверждают неприемлемость гипотезы теории течения о независимости упрочнения от угла между градиентом к поверхности текучести и вектором приращений напряжений. Этот факт был впервые отмечен А. А. Ильюшиным. Многие положения теории течения подвергаются критике, границы применимости ее не установлены, но некоторые имеющиеся экспериментальные исследования и теоретические результаты показывают, что данные теории могут быть использованы для оценки кинетики напряженно-деформированного состояния при упругопластическом деформировании. Теории типа течения также правильно описывают предельные случаи. Известно, что при простых путях нагружения дифференциальные теории переходят в соотношения деформационной теории пластичности в приращениях. При отсутствии упрочнения из указанных теорий получаются соотношения идеально-упругопластического тела.

В развитие дифференциальных моделей теории пластичности большой вклад внесли работы следующих авторов: Р. А. Арутюняна и А. А. Вакуленко [13], А. Ю. Ишлинского и Д. Д. Ивлева [95], Ю. Г. Коротких [99, 112, 113, 115, 114], В. В. Новожилова и Ю. И. Кадашевича [96, 97, 98], В. Прагера [164], Кукуджанова В. Н. [121], Е. И. Шемякина [169] и др. Их исследования показали, что результаты расчетов по теории течения с комбинированным упрочнением интегрально правильно описывают процессы упругопластического деформирования умеренной кривизны [130].

В работах Ю. Г. Коротких, С. А. Капустина и др. [99, 112, 113, 114, 115] предлагаются соотношения теории пластичности, основанные на гипотезе кинематического и изотропного упрочнения. В рамках предложенной теории возможны широкие обобщения зависимостей параметров модели от скорости деформирования, гидростатического давления и температуры. Так же авторами обсуждаются некоторые вопросы базовых экспериментов по определению скалярных параметров и намечены подходы к экспериментальному определению рамок применимости модели. Соотношения теории позволяют описать в первом приближении пространственный эффект Баушингера при

различных температурно-скоростных режимах деформирования, зависимость поведения материала от истории нагружения и эффекта запаздывания свойств материала, а также некоторые явления установившейся и неуставившейся ползучести. Частными случаями данной теории являются многие простейшие варианты теории течения и деформационная теория в приращениях.

Соотношения дифференциальных теорий пластичности имеют вид дифференциальных неинтегрируемых соотношений, это отражает факт зависимости напряженно-деформированного состояния упругопластического тела от истории нагружения.

Для исследования больших деформаций и предельных состояний элементов конструкций необходимо иметь истинные диаграммы деформирования материалов вплоть до момента разрушения. Для получения этих диаграмм обычно используют экспериментальные результаты растяжения образцов с рабочей частью в виде цилиндра (стержень или оболочка) или стержня с прямоугольным сечением [83].

1.6. Методы численного моделирования процессов деформирования элементов конструкций

Для решения задач деформирования и прочности упругопластических конструкций разработано множество методов численного моделирования, но не существует единого метода или численной схемы, достаточно эффективно решающей любую поставленную задачу. В работах [32, 37, 61, 137, 156, 162, 119, 185] приведен обзор основных подходов к численному решению задач механики сплошных сред. Среди всего многообразия численных методик можно выделить: метод конечных разностей, метод конечных элементов, вариационно-разностный метод.

Метод конечных разностей (МКР) [62, 120, 172, 176] основан на замене исходной системы дифференциальных уравнений в частных производных ее дискретным аналогом, который получается в результате аппроксимации производных по пространственным координатам некоторыми разностными соотношениями. Расчетная область разбивается на ячейки, вершины ячеек образуют разностную сетку области. Искомые функции заменяются совокупностью их узловых значений, которые вычисляются из дискретного аналога определяющей системы уравнений. Для регулярных, не искажающихся в процессе деформирования сеток, используют простые разности первого или второго порядка. Наибольшее распространение среди схем МКР получила схема "крест" [122], она отличается простотой и высокой алгоритмичностью. При построении разностных соотношений для неоднородных участков сетки, или вблизи границ расчетной области проявляются неудобства простейших аппроксимаций производных. Их устранение возможно с помощью формул

естественной аппроксимации частных производных по пространственным переменным [152]. Среди многочисленных работ, использующих естественную аппроксимацию, можно выделить работу [186]. К недостаткам конечно-разностного метода следует отнести проблему граничных условий, содержащих условия на производные, поэтому при построении конечно-разностных схем все чаще прибегают к интегральным формулировкам задач.

В методе конечных элементов (МКЭ) [63, 82, 145, 153, 177, 200, 232] расчетная область разбивается на ряд ячеек - конечных элементов (КЭ). В каждом КЭ задается стандартная система базисных функций - функций форм, которая аппроксимирует перемещения, деформации и напряжения. Численное решение определяется из минимизации вариационной задачи на введенном множестве базисных функций. Достоинством МКЭ является то, что осуществляется непосредственный переход к дискретной модели, минуя стадию формулировки краевой задачи для системы дифференциальных уравнений. Кроме этого его достоинствами являются: универсальность, независимость вычислений в отдельных элементах, возможность уточнения решения путем повышения порядка аппроксимации и т.д. МКЭ получил широкое распространение, хотя следует заметить, что последовательное применение идей МКЭ к решению упругопластических задач приводит к созданию алгоритмичных, но все же трудоемких методов.

Вариационно-разностный метод (ВРМ) [18, 19, 21, 76, 156, 176, 177] занимает промежуточное положение между МКР и МКЭ. ВРМ сочетают в себе простоту в реализации, присущую МКР, и алгоритмичность МКЭ. Метод основан на сеточной аппроксимации вариационного уравнения или вариационной задачи для некоторого функционала. Построение разрешающих соотношений сводится к конечно-разностной аппроксимации вариационного уравнения, а также приравнивания нулю коэффициентов при вариациях узловых перемещений.

Главные достоинства ВРМ: возможность использования неравномерных и нерегулярных сеток; единообразный расчет внутренних и граничных узлов; меньшие по сравнению с МКР требования к гладкости функций. Все это делает ВРМ очень удобными для программной реализации, и дает возможность применять для областей сложной формы. Полученные в результате разностные схемы по форме аналогичны разностной схеме Уилкинса [152], но в сравнении с ней более алгоритмичны и универсальны.

Важным моментом построения численной схемы является дискретизация определяющей системы уравнений по времени. Разные авторы применяют различные схемы интегрирования в зависимости от особенностей рассматриваемого класса задач. Явные схемы в работах [30, 186], неявные [102, 120], смешанные [200, 210]. В большинстве случаев используют явные схемы второго порядка точности относительно шага интегрирования по времени, они выгодно отличаются от неявных схем простотой и экономичностью. Но явные

схемы условно устойчивы и шаг интегрирования по времени определяется минимальным по области размером конечного элемента. При анализе низкочастотных процессов неявные схемы интегрирования по времени имеют существенное преимущество. Шаг интегрирования по времени определяется из соображений точности решения при условии, что доказана безусловная устойчивость схемы. Условия точности на гладких решениях менее жесткие, чем условия устойчивости, что может компенсировать затраты на решение сложных систем уравнений. При решении динамических физически нелинейных задач, использование итерационных процедур накладывает ограничения на временной шаг, что с учетом более высокой трудоемкости на шаге неявных схем делает их применение нерациональным [32]. Совместное использование явных и неявных методов интегрирования уравнений движения по времени имеет смысл при решении задач, имеющих концентраторы, сосредоточенные внешние воздействия или локальные смятия сетки, возникающие в результате высокоскоростного соударения. Следует учитывать, что при объединении этих явных и неявных методов теряется алгоритмичность и возникают проблемы стыковки отдельных подобластей, в которых применяются разные способы интегрирования.

В механике сплошных сред при описании движения исследуемого тела обычно исходят из двух методов: Лагранжа и Эйлера [88], отличающихся выбором независимых переменных. В методе Лагранжа напряжения, деформации, температура и другие параметры могут быть выражены как функции материальных координат. В случае эйлерова описания сетка фиксируется в принимаемой системе отсчета. В различных приложениях использовались как представление Лагранжа [186, 197], так и представление Эйлера [146, 172]. Каждому из представлений присущи определенные преимущества и недостатки и своя область эффективной применимости. В литературе [31, 146, 156, 190, 197], посвященной обсуждению этого вопроса, представлены следующие достоинства и недостатки этих методов.

Достоинством лагранжевых переменных является то, что движение расчетной сетки осуществляется вместе со средой. Это дает возможность автоматически определять границы области и линии раздела сред, не возникает особых проблем с учетом информации, характеризующей историю нагружения, а при использовании эйлеровых переменных требуется формирование соответствующих процедур.

Недостатком метода Лагранжа является то, что ячейка, будучи деформируемой, не может искажаться беспредельно, поскольку это сопровождается уменьшением шага интегрирования по времени и потерей точности решения.

Достоинством эйлеровых переменных является то, что они позволяют проводить расчеты без каких-либо затруднений и при интенсивных деформациях и больших относительных перемещениях. Однако эффективность

метода Эйлера значительно снижается рядом недостатков: трудно определять малые изменения параметров при исследовании движения в большой области; возникают проблемы с определением границ; число узлов разностной сетки расчетной области меняется в процессе счета, что приводит к понижению точности решения задачи.

Для многих задач не подходит ни чисто лагранжевы, ни чисто эйлеров метод. Разработке методов, сочетающих преимущества лагранжевого и эйлерового способа описания движения среды, посвящены следующие работы [111, 152, 190]. Эти совмещенные методы, с одной стороны обладают большой общностью и универсальностью, но имеют сложную логическую структуру, что повышает их трудоемкость. Таким образом, исходя из результатов исследований [146, 156, 190, 197], можно сказать, что при деформировании упругопластических элементов конструкций, рассматриваемых в настоящей работе, целесообразно использовать лагранжевы переменные. При больших деформациях в лагранжевой постановке задачи часто возникают области с сильными искажениями сетки, этом случае получение решения без коррекции сетки становится затруднительным. Некоторые общие соображения по перестройке сетки, варианты интерполяции искомых величин со старой сетки на новую и обзор работ приведены [1, 55, 67, 156, 174].

1.7. Экспериментально-теоретические методы изучения свойств конструкционных материалов

Современные экспериментально-теоретические методы изучения свойств материалов основаны на сравнительном анализе и минимизации расхождения экспериментальных и теоретических результатов деформирования элементов конструкций и лабораторных образцов. Они позволяют уточнить характеристики материалов, закладываемые в расчет, а также прогнозировать дальнейшее поведение конструкций.

А. А. Ильюшиным впервые применялся экспериментально-теоретический подход для получения зависимостей между напряжениями и деформациями упругопластических материалов при произвольных путях нагружения для общей математической теории пластичности в методике СН-ЭВМ [92, 93, 89]. Метод основан на сравнении результатов экспериментов на сложное нагружение (СН) и результатов расчетов (ЭВМ). Интервал нагружения разбивается на ряд малых этапов. Первоначальный расчет осуществляется с использованием упрощенных определяющих соотношений (теории упругости или теории малых упругопластических деформаций). В дальнейшем производится итерационное уточнение определяющих соотношений. Если экспериментальные и расчетные траектории деформации (напряжений) близки, то принятые на данной итерации соотношения считаются справедливыми и

процесс останавливается. Затем осуществляется переход к следующему этапу нагружения. На данный момент известны лишь немногочисленные примеры применения метода СН-ЭВМ [16, 17], что обусловлено трудностью его реализации, поэтому большое распространение получил так называемый теоретический СН-ЭВМ метод или метод корректирующего анализа [91, 130]. В теоретическом СН-ЭВМ методе этап экспериментального определения вида функциональной зависимости между параметрами, описывающими состояние материала, заменяется выбором из имеющихся в наличии частных теорий пластичности соответствующих процессу нагружения. Результаты применения метода и их практическая сходимость рассматриваются в работах [49, 50, 51, 52, 53, 117].

В настоящее время имеют большое распространение методы идентификации, основанные на решении обратных задач и применении методов оптимизации. Они используются в механике композиционных материалов как для идентификации физико-механических характеристик материала в конструкции, так и для определения характеристик составляющих композитного материала [5Ошибка! Источник ссылки не найден., 5, 46, 60, 105, 106, 138, 171, 179, 181, 183, 193, 199, 201, 203, 207, 219].

Также появились работы, посвященные получению истинных диаграмм деформирования на основе применения методов идентификации. Экспериментально-расчетный метод построения диаграмм деформирования для изотропных и анизотропных материалов после образования шейки при растяжении стержней с прямоугольным сечением предложен в работах Z. L. Zhang [228, 229, 230, 231]. Для построения диаграмм деформирования необходимо знать из эксперимента зависимость растягивающих усилий от изменения ширины и толщины образца в минимальном сечении шейки. Построения диаграмм основано на коррекции напряжений в шейке, предложенной П. Бриджменом [41] для цилиндрических образцов. Метод проверен на изотропных стальных образцах и на анизотропных алюминиевых сплавах. Совпадение расчета истинной диаграммы с экспериментом оказалось весьма близким, а результаты, полученные на плоских образцах, позволяют рассчитывать процесс образования шейки на стандартных цилиндрических образцах.

Алгоритм построения диаграмм на основе сравнения зависимости сжимающей силы от глубины внедрения, полученной из эксперимента и численного моделирования кинетического индентирования шара в образец представлен в работе [34]. Построение осуществляется в два этапа. На первом этапе находится предел текучести, на втором этапе строится участок упрочнения. Каждый этап представляет собой итерационный процесс приближения расчетной диаграммы к экспериментальной. Критерий сходимости - разность работ упругопластической деформации. Подобный подход обладает недостатками, связанными с большими временными затратами

на численный расчет задачи для каждой итерации и вопросами точности и устойчивости алгоритма.

А. Hasanov и Z. Seyidmamedov [205, 206] предлагают строить диаграммы деформирования путем решения задачи минимизации дополнительного функционала, представляющего собой норму отклонения определенного из численного решения задачи внедрения усилия, прикладываемого к индентору от экспериментального при одинаковых смещениях. Постановка задачи осуществляется в предположении применимости деформационной теории пластичности и малости градиентов перемещений. Весь процесс нагружения разбивается на ряд интервалов и производится итерационное уточнение характеристик материала. Полученная диаграмма аппроксимируется кусочно-линейной функцией. Сначала находится модуль упругости и предел текучести, затем находятся модули упрочнения на каждом интервале разбиения. Авторы доказывают существование решения задачи минимизации. Прямая задача внедрения индентора решается методом конечных элементов. Сходимость процедуры решения проверяется на тестовых примерах. Указанные подходы позволяют строить диаграммы с приемлемой точностью лишь для малых деформаций. Использование этих методов при больших деформациях неэффективно и приводит к большим временным затратам на численное решение прямой задачи и медленной сходимости алгоритма. Способ получения деформационных и прочностных характеристик при больших деформациях на основе применения компьютерного моделирования и методов идентификации представлен в работах [22-29].

Из анализа рассмотренных экспериментально-теоретических методов получения свойств материалов можно сделать вывод, что развитие этих методов и исследование процессов деформирования и предельных состояний элементов конструкций при различных видах нагружения являются актуальными задачами.

1.8. Выводы к главе 1

Проведенный выше анализ литературы, посвященной моделям поведения упругопластических материалов, методам получения констант материала, методам численного моделирования задач деформирования позволяет сделать следующие выводы.

Изучение закономерностей упругопластического деформирования и прочностных свойств материала необходимо для решения прикладных задач и для дальнейшего развития теории пластичности.

Для описания пластического деформирования создано большое количество моделей. Исследования показали, что результаты расчетов по теории течения с изотропным и кинематическим упрочнением интегрально

правильно описывают процессы упругопластического деформирования умеренной кривизны.

Для конструирования и численного моделирования деформирования конструкций необходимо знать свойства материалов до разрушения. Построение истинных диаграмм деформирования упругопластических материалов обычно основывается на экспериментальных данных, полученных из испытаний лабораторных образцов. При обработке экспериментальных данных возникают трудности, связанные с учетом неоднородности и неоднородности НДС в образце. Это вызвано нелинейными краевыми эффектами и локализацией деформаций.

Предпочтительным методом испытаний для построения диаграмм деформирования является кручение сплошных осесимметричных образцов, поскольку наибольшие однородные деформации до разрушения достигаются при испытаниях кручением в поверхностном слое образца. Экспериментальным способом установлено, что образцы при кручении не образуют шейки, в процессе деформирования сохраняется первоначальная форма образца, при этом его длина и радиус мало меняются даже при больших степенях деформаций. Неоднородность напряженного состояния образцов вдоль радиуса при кручении существенно расширяет пределы устойчивости процесса пластического деформирования.

Проведение классических лабораторных испытаний предусматривает вырезку из деталей стандартных образцов. При необходимости сплошного контроля или малом размере деталей такие испытания практически неосуществимы. Также лабораторные испытания дают усредненные значения механических свойств материала, а в ряде случаев необходимо располагать данными о прочностных свойствах материала детали на конкретных участках ее поверхности, являющихся линиями опасных сечений, в которых действуют наибольшие напряжения в эксплуатационных условиях.

Возможность применения существующих оптических методов 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. Цифровая фотография и системы машинного зрения используются в основном лишь для контроля геометрических размеров и качества выпускаемых промышленностью продуктов и материалов. Выпускающиеся производителями измерительного оборудования видеоэкстензометры позволяют регистрировать на поверхности образцов перемещения специально нанесенных оптических меток, что не позволяет в полном объеме контролировать формоизменение лабораторных образцов и элементов конструкций в процессе деформирования. Развитие новых технологий в области цифровой видеотехники позволяет на базе компактной цифровой фотокамеры, совмещенной с персональным компьютером

разработать регистрирующую систему для оценки деформационных характеристик в лабораторном образце или элементе конструкции в процессе их деформирования. Программное обеспечение позволяет производить дистанционную съемку, управлять работой фотокамеры, получать и обрабатывать необходимую экспериментальную информацию в цифровом и графическом виде непосредственно в ходе эксперимента.

Из безобразцовых методов определения свойств упругопластических материалов универсальным методом для получения диаграмм деформирования является кинетическое индентирование шара в исследуемый образец (проба Бринелля). Он относится к методам неразрушающего контроля механических свойств материалов. Определение взаимосвязей между диаграммой деформирования при одноосном растяжении образцов и кривой твердости является актуальной задачей экспериментально-теоретического исследования. Известные методы получения диаграмм деформирования при проведении испытаний на внедрения шара с непрерывной регистрацией сжимающей нагрузки и глубины внедрения позволяют получать механические константы (упругие характеристики, предел текучести, временное сопротивление) с достаточной для расчетов точностью. Но они позволяют исследовать лишь начальную стадию пластического деформирования. Несмотря на все разнообразие существующих подходов к определению механических свойств, проблема построения истинных диаграмм деформирования конструкционных упругопластических материалов с заданной точностью исходя из кинетической диаграммы вдавливания и деформирования лабораторных образцов не может считаться решенной.

Для получения деформационных и прочностных характеристик материалов и исследования процессов деформирования и разрушения конструкций целесообразно развитие экспериментально-расчетного подхода, основанного на идентификации экспериментальных результатов с помощью численного моделирования процессов деформирования и разрушения лабораторных образцов и элементов конструкций. Данный подход позволяет получать качественно более достоверные результаты о поведении материала, чем обычно применяемые методы.

Применение численного моделирования и методов идентификации позволяет изучать свойства материалов, а также процессы деформирования и разрушения при достаточно сложной геометрии образцов с учетом эффектов геометрической и физической нелинейности, краевых эффектов, неоднородности НДС без привлечения упрощающих предположений и априорных гипотез силового и кинематического характера.

Для эффективного использования численных методов в рамках экспериментально-расчетного подхода требуется развитие и адаптация существующих алгоритмов решения упругопластических задач с учетом больших формоизменений и разрушения, а также снижение стоимости,

повышение точности и увеличение информативности экспериментальных способов получения констант материала.

Глава 2. Автоматизированный комплекс измерения деформаций с использованием средств цифровой фотографии

2.1. Общие положения использования цифровой фотографии для измерения деформаций

В экспериментальной механике для наблюдения за изменениями полей напряжений и деформаций в нагруженных элементах конструкций часто используются различные оптические методы. Они основаны на явлениях фотоупругости, геометрического и интерференционного муара, голографической и лазерной спектроинтерферометрии и др. Общими недостатками этих методов являются сложность в практической реализации, последующей обработки для получения необходимой информации из эксперимента. Цифровая фотография и системы машинного зрения в настоящее время используются в основном лишь для контроля геометрических размеров и качества выпускаемых промышленностью продуктов и материалов. Видеоэкстензометры, выпускающиеся производителями измерительного оборудования, позволяют регистрировать на поверхности образцов перемещения специально нанесенных оптических меток, что не позволяет в полном объеме контролировать формоизменение лабораторных образцов и материалов в процессе деформирования.

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 позволяют получать изображение деформируемого объекта с разрешающей способностью более 20 мегапикселей и обеспечивают достаточную точность при измерении перемещений контролируемых точек на поверхности лабораторного образца в ходе испытания. Это позволяет отслеживать формоизменение границ объекта исследования, а нанесение на поверхность объекта реперных точек, линий, сеток - изменение их положения в результате деформирования образца в процессе эксперимента. Точность измерения предложенной системы зависит от разрешающей способности матрицы цифрового фотоаппарата и размеров рассматриваемой части поверхности образца. Увеличение цифровой фотографии при дальнейшей обработке позволяет измерять положение искомой точки с точностью до 1 пикселя. Программное обеспечение позволяет производить дистанционную съемку, управлять работой фотокамеры, получать и обрабатывать необходимую экспериментальную информацию в цифровом и графическом виде непосредственно в ходе эксперимента. Каждый полученный кадр (фотоснимок) синхронизируется с нагрузкой, действующей в образце в момент регистрации. Информация, содержащаяся в каждом снимке, после

соответствующей обработки отражает напряженно-деформированное состояние в рабочей части лабораторного образца вплоть до момента разрушения.

2.2. Экспериментальный комплекс

Экспериментальный комплекс включает в себя испытательную машину, оборудованную соответствующими датчиками силоизмерения и деформации, цифровую фотокамеру, осветительное оборудование, персональный компьютер с пакетом прикладных программ для обработки фотоизображений.

Эксперименты проводились на следующих испытательных машинах:

Универсальная испытательная машина УМЭ-10ТМ (модернизированная):

Диапазон нагрузок: ± 100 кН;

Диапазон скоростей деформаций: $10^{-6} \dots 10^{-2}$ 1/с;

Температурный режим: $T = +20^{\circ}\text{C} \dots +900^{\circ}\text{C}$ (криокамера $-100^{\circ}\text{C} \dots +20^{\circ}\text{C}$);

Форма образцов: цилиндрические сплошные, трубчатые $D_{\max} = 12$ мм;

Средства измерения: измерители деформации (деформометры), устанавливаемые на рабочую часть образца, измеритель силы (тензометрический преобразователь);

Средства управления: управляющий комплекс National Instruments;

Типы проводимых экспериментов:

1) Стандартные физико-механические характеристики (ГОСТ 1497, ГОСТ 10006, ГОСТ 9651, ASTM E 8, EN 10002);

2) Параметры моделей деформирования при монотонном нагружении;

3) Параметры деформационного циклического упрочнения;

4) Параметры высокотемпературной кратковременной ползучести.

Универсальная испытательная машина ЦДТЕ 30:

Диапазон нагрузок: ± 300 кН;

Диапазон скоростей деформаций: $10^{-4} \dots 10^{-2}$ 1/с;

Температурный режим: $T = +20^{\circ}\text{C}$;

Форма образцов: цилиндрические сплошные, трубчатые $D_{\max} = 16-20$ мм;

Средства измерения: измерители деформации (деформометры), устанавливаемые на рабочую часть образца, измеритель силы (тензометрический преобразователь);

Средства управления: управляющий комплекс National Instruments;

Типы проводимых экспериментов: параметры классической механики разрушения.

Испытательная машина УРС 20-6000:

Диапазон нагрузок: ± 200 кН;

Диапазон скоростей деформаций: $10^{-4} \dots 10^1$ 1/с;

Температурный режим: $T = +20^{\circ}\text{C}$

Форма образцов: цилиндрические сплошные, трубчатые $D_{\max} = 16$ мм;

Средства измерения: измерители деформации (деформометры), устанавливаемые на рабочую часть образца, измеритель силы (тензометрический преобразователь);

Средства управления: ПЭВМ платы расширения АЦП-ЦАП;

Типы проводимых экспериментов:

- 1) Параметры малоциклового и многоциклового усталости (ГОСТ 25.502, ГОСТ 25.503);
- 2) Параметры классической механики разрушения;
- 3) Параметры моделей устойчивого роста магистральных трещин.

Испытательная машина ZWICK-Z030:

Диапазон нагрузок: ± 30 кН;

Диапазон скоростей деформаций: 0,0005.....1000 мм/мин;

Температурный режим: $T = 20^{\circ}\text{C}$, $+200^{\circ}\text{C}$... $+1100^{\circ}\text{C}$;

Форма образцов: цилиндрические сплошные, трубчатые $D_{\max} = 7$ мм, плоские $H = 1-3$ мм;

Средства измерения: измерители деформации (деформометры), устанавливаемые на рабочую часть образца, измеритель силы (тензометрический преобразователь);

Средства управления: ПЭВМ платы расширения АЦП-ЦАП;

Типы проводимых экспериментов:

- 1) Стандартные физико-механические характеристики (ГОСТ 1497, ГОСТ 10006, ГОСТ 9651, ASTM E 8, EN 10002);
- 2) Параметры малоциклового усталости (ГОСТ 25.502, ГОСТ 25.503);
- 3) Параметры моделей деформирования при монотонном нагружении;
- 4) Параметры высокотемпературной ползучести и длительной прочности, на временной базе ~ 450 часов (ГОСТ 3248, ГОСТ 9654-81, ГОСТ 10145-81).

Машина испытательная универсальная МИУ-500.1К:

Диапазон нагрузок: ± 500 кН;

Диапазон скоростей деформаций: $10^{-6} \dots 10^{-2}$ 1/с;

Температурный режим: $T = 20^{\circ}\text{C}$, $+100^{\circ}\text{C}$... $+1100^{\circ}\text{C}$;

Форма образцов: цилиндрические сплошные, трубчатые $D_{\max} = 25$ мм, плоские $H = 3-7$ мм;

Средства измерения: измерители деформации (деформометры), устанавливаемые на рабочую часть образца, измеритель силы (тензометрический преобразователь);

Средства управления: ПЭВМ платы расширения АЦП-ЦАП;

Типы проводимых экспериментов:

- 1) Стандартные физико-механические характеристики (ГОСТ 1497, ГОСТ 10006, ГОСТ 9651, ASTM E 8, EN 10002);
- 2) Параметры малоциклового усталости (ГОСТ 25.502, ГОСТ 25.503, ГОСТ 25.505);
- 3) Параметры классической механики разрушения.

Первоначальная отладка и апробация измерительного комплекса осуществлялось с использованием цифровой фотокамеры **SONY CYBERSHOT DSC-F77**. Ее основные технические характеристики:

Матрица: ПЗС 1/1,8", 4,13 млн. пикс. (рабочих 3,95 млн. пикс.);
Разрешение: 2272 x 1704, 2272 x 1520 (3:2);
Светочувствительность: Автоматическая, в эквиваленте ISO 100, 200, 400;
Объектив: Carl Zeiss, фокусное расстояние 7.65мм (37мм в эквиваленте для 35мм), светосила 1:2,8;
Запись изображения: JPEG;
Диапазон выдержек: 1/30сек. - 1/1000сек;
Видоискатель: Оптический;
ЖКД: TFT 1,5", 123200 пикс.;
Хранение информации: Memory Stick;
Встроенная вспышка: диапазон работы от 0,5м до 1,7м;
Связь с компьютером: USB.

Затем измерительный комплекс был оснащен зеркальной цифровой фотокамерой **Canon EOS 5D Mark II**. Основные технические характеристики фотокамеры:

Чувствительность: 100 - 3200 ISO, Auto ISO;
Форматы изображения: 2 JPEG, RAW;
Время работы таймера, с: 2, 10, пользовательские установки;
Интерфейсы: USB 2.0, видео, HDMI, аудио, разъем для пульта ДУ;
Максимальная серия снимков: 78 для JPEG, 13 для RAW;
ЖК-экран: 920000 пикселей, 3 дюйма;
Максимальная частота кадров видеоролика: 30 кадров/с;
Видеокодеки: MPEG4;
Экспокоррекция: +/- 2 EV с шагом 1/3 ступени;
Кроп-фактор: 1;
Видоискатель: зеркальный (TTL);
Поле зрения видоискателя: 98%;
Тип матрицы: CMOS;
Скорость съемки: 3.9 кадр./сек;
Выдержка: 30 - 1/8000 с.;
Общее число пикселей: 22 млн.;
Формат записи видео: MOV;
Физический размер: 35 мм (36 x 24 мм);
Число эффективных пикселей: 21.1 млн.;
Максимальное разрешение роликов: 1920x1080;
Глубина цвета: 42 бит;
Максимальное разрешение: 5616 x 3744;
Формат кадра (фотосъемка): 3:2;

Дополнительные возможности: крепление для штатива, дистанционное управление, датчик ориентации, управление с компьютера.

В зависимости от параметров съемки фотокамера используется с объективом **EF 24-105 f/4L IS USM** (фокусное расстояние 24 - 105 мм, диафрагма F4, минимальная диафрагма F22, угол обзора 23.20 - 84 град.мин, минимальное расстояние фокусировки 0,45м), либо с объективом **EF EF 75-300 f/4-5,6 III USM** (фокусное расстояние 75 - 300мм, диафрагма F4 - F5.60, минимальная диафрагма F45, угол обзора 8.15 - 32.11 град.мин, минимальное расстояние фокусировки 1,5 м).

Для установки фотокамеры используется фотоштатив **Rekam RT-L38**. Для получения наилучшего качества изображений используется комплект студийного освещения **Rekam Light Kit** (3 лампы постоянного света).

2.3. Программное обеспечение

Для обработки фотоизображений используется персональный компьютер с пакетом прикладных программ производства компании National Instruments. Система проведения испытаний от компании National Instruments основана на концепции виртуальных приборов (ВП). Эта система включает в себя: программные средства управления проведением испытаний; средства для разработки тестовых систем; специализированные службы и драйверы, отвечающие за измерения; высокопроизводительные модульные приборы. В данной работе было применено следующее программное обеспечение:

Vision Development Module, Vision Assistant – модуль разработки технического зрения. В модуль входит конструктор алгоритмов (*Vision Assistant*), позволяющий реализовать, отладить и экспортировать в виде ВП алгоритм обработки изображения в полностью интерактивном режиме. Библиотека функций и ВП модуля – это множество средств и реализованных стандартных операций обработки изображения;

Vision Builder for Automated Inspection (Vision Builder AI) – настраиваемое программное обеспечение для систем машинного зрения, которое можно использовать для конфигурирования, прототипирования, тестирования и запуска приложений машинного зрения. Создание приложений в *Vision Builder AI* не требует написания программ. *Vision Builder AI* позволяет с лёгкостью конфигурировать и тестировать последовательность шагов контроля изображений, а также запускать системы для автоматического контроля изображений. *Vision Builder AI* позволяет выполнять сложные задачи контроля изображений и принимать решения, основываясь на результатах выполнения отдельных задач, а также экспортировать сконфигурированные

задачи в LabVIEW для расширения возможностей приложения, если это необходимо;

LabVIEW – это графическая среда проектирования для разработки гибких и масштабируемых приложений. Для создания приложений машинного зрения с интеллектуальной камерой и LabVIEW необходимы следующие дополнительные модули: LabVIEW Real-Time Module, Vision Development Module и Vision Acquisition Software;

Модуль LabVIEW Real-Time (RT) объединяет возможности графической среды проектирования LabVIEW с производительностью оборудования реального времени, позволяя создавать детерминированные системы реального времени. Разрабатывая приложение в LabVIEW, в дальнейшем возможно его использование в целевой системе реального времени, например, на интеллектуальной камере. Целевая система RT выполняет программу, не используя интерфейса пользователя, и поэтому представляет собой надёжную платформу для приложений реального времени;

NI Vision Development Module обеспечивает ввод и обработку изображений, а для анализа использует библиотеку, содержащую сотни функций для решения следующих типовых задач машинного зрения: сравнение с образцом, анализ по точкам, калибровка, измерения, воспроизведение чёрно-белых, цветных и бинарных изображений. С модулем NI Vision Development можно вводить, отображать и сохранять изображения, а также проводить их обработку и анализ. Используя NI Vision Development Module, можно разрабатывать простые и сложные приложения без знаний особенностей реализации алгоритмов;

Драйвер NI-IMAQ выполняет все функции, необходимые для получения и сохранения изображений, но не предоставляет возможности для их анализа. NI-IMAQ включает в себя функции высокого и низкого уровня. Примером функции высокого уровня может служить операция получения изображений в однократном или непрерывном режиме. Операции, которые требуют продвинутых знаний устройства NI 17xx и процесса ввода изображений, например, настройка последовательности изображений, являются примером функций низкого уровня.

Каждый полученный кадр (фотоснимок) синхронизируется с нагрузкой, действующей в образце в момент регистрации. Программное обеспечение позволяет производить дистанционную съёмку, управлять работой фотокамеры, получать и обрабатывать необходимую экспериментальную информацию в цифровом и графическом виде непосредственно в ходе эксперимента. 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.

2.4. Точность измерения

Точность измерения перемещений точек на поверхности образца зависит от разрешающей способности матрицы цифрового фотоаппарата и размеров рассматриваемой части поверхности образца, а увеличение цифровой фотографии при дальнейшей обработке позволяет измерять положение искомой точки с точностью до 1 пикселя (рис. 2.1). Каждый эффективный пиксель матрицы фотокамеры, используемый для формирования изображения на снимке, характеризуется тремя параметрами: координатами на плоскости и цветностью. Это позволяет отслеживать формоизменение границ объекта исследования, а нанесение на поверхность объекта реперных точек, линий, сеток - изменение их положения в результате деформирования образца в процессе эксперимента.

Точность измерения перемещений точек на поверхности образца равна удвоенной разрешающей способности матрицы цифрового фотоаппарата.

У фотоаппарата SONY CYBERSHOT DSC-F77 матрица 4,2 Мрiх (мегапикселя) позволяет получать фотографии с максимальным размером 2272 x 1704 пикселей, и если съемка производится на рабочей части образца длиной 50мм, точность в продольном направлении составит $2 \times 50 / 2272 = 0,044\text{мм}$ в 1 пикселе или 0,088%. У фотоаппарата Canon EOS 5D Mark II матрица 21 Мрiх позволяет получать цветные фотографии размером 5616 x 3744 пикселей, точность в продольном направлении составляет $2 \times 50 / 5616 = 0,018\text{мм}$ в 1 пикселе или 0,036%, для рабочего поля того же размера, что приближается к точности методов тензометрирования.

2.5. Методика проведения эксперимента

Предложенная методика 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 для фиксирования заданной базы (нескольких баз);
- 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, таким образом, 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 (построение истинной диаграммы деформирования, поскольку регистрируется фактический диаметр образца в процессе нагружения и в момент образования шейки, вплоть до разрушения; изучение формоизменения образца при различных нагружениях; изучения местных пластических деформаций и т.д.). Для апробации предложенной методики был осуществлен ряд экспериментов.

2.6. Эксперимент по одноосному растяжению цилиндрической оболочки

Эксперимент был проведен на образцах из стали марки 12Х18Н10Т на испытательной машине УМЭ-10ТМ. Один торец стержня жестко закреплен, другой конец 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. Первый кадр показан на рис. 2.1. Деформирование образца в процессе испытания представлено на рис. 2.2.

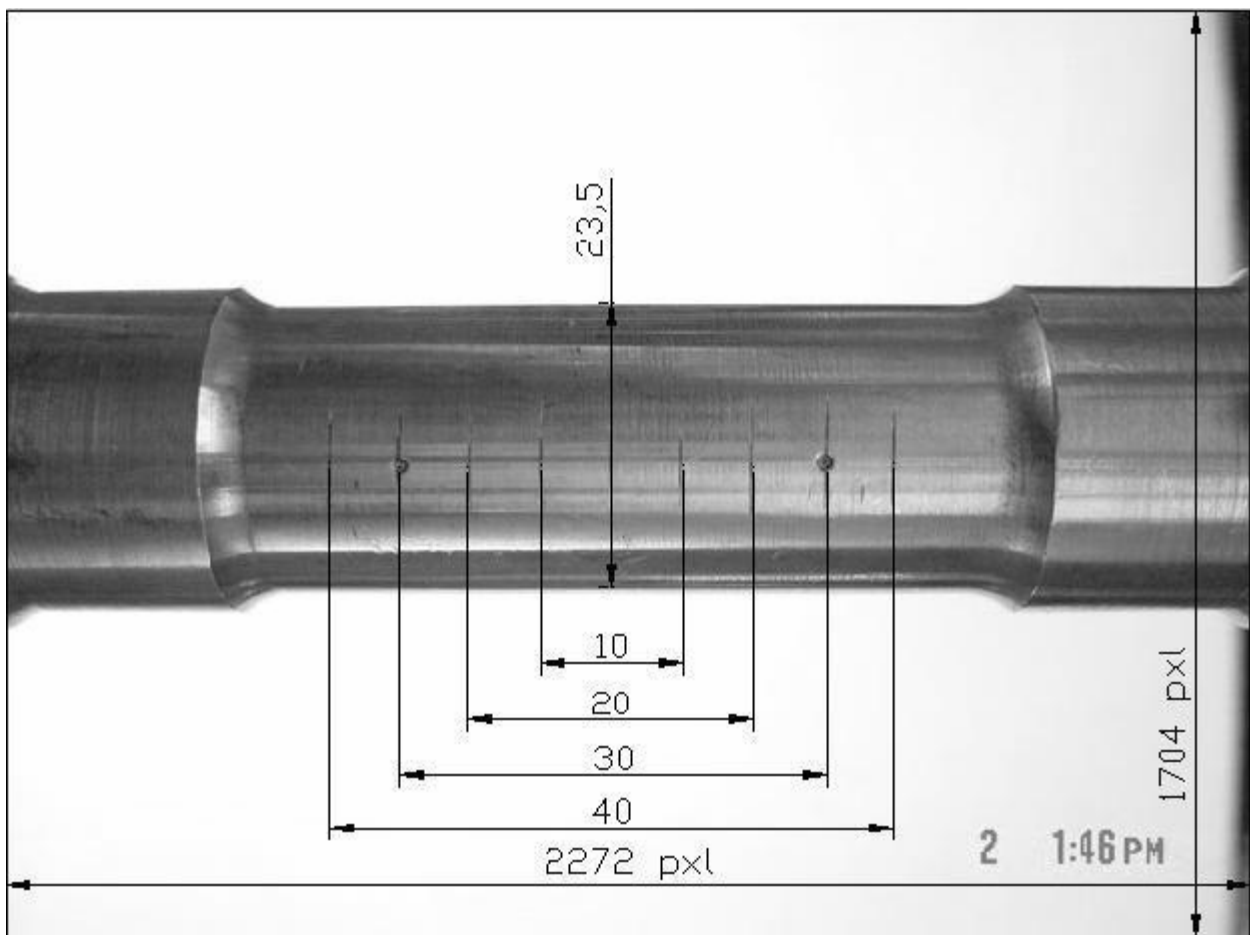


Рис. 2.1 Первый кадр (базы для измерений)

Для трубчатого образца при построении истинной диаграммы деформирования использовались следующие гипотезы и 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.

На рис. 2.2 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.

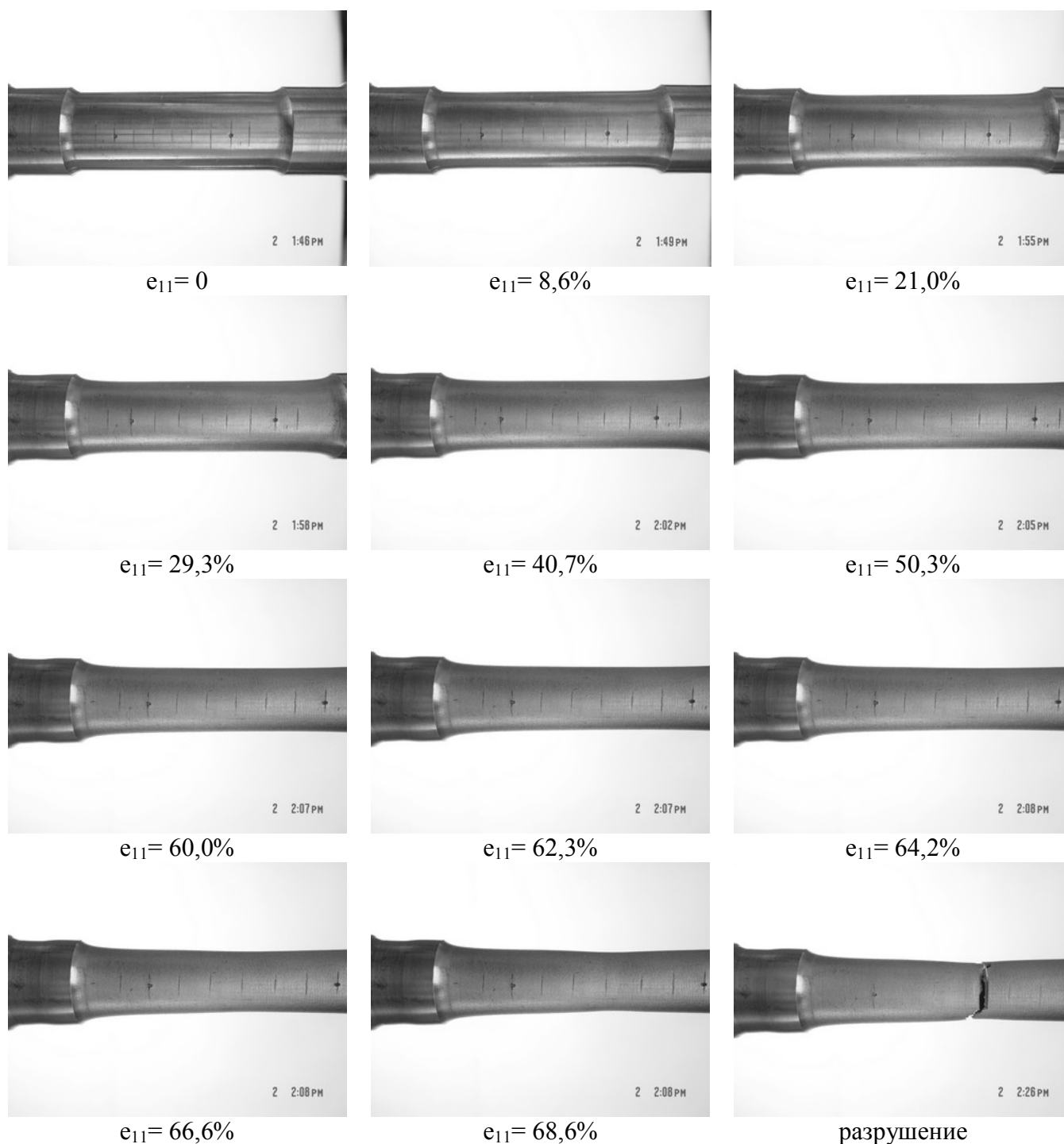


Рис. 2.2 Деформирование образца в процессе испытания

Параллельно с фоторегистратией процесса деформирования образца традиционным способом строилась машинная диаграмма растяжения, где деформация измерялась с помощью тензометрического преобразователя (деформометра), установленного на подвижной траверсе испытательной машины (рис. 2.3).

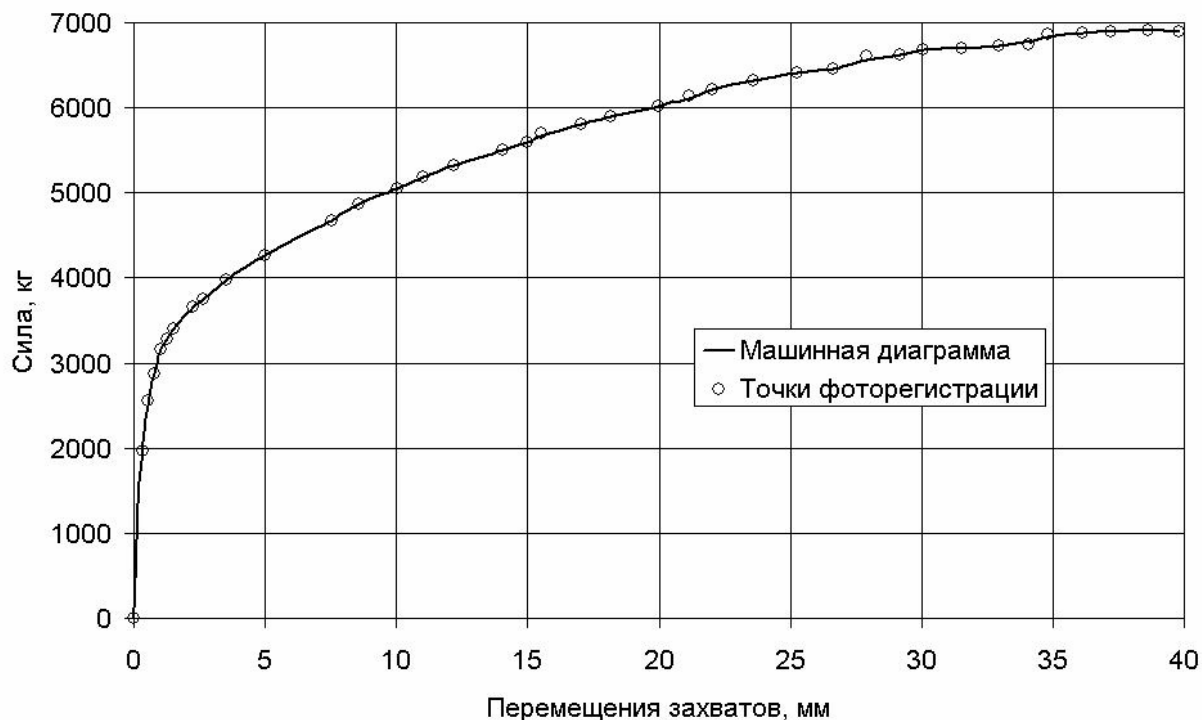


Рис. 2.3 Диаграмма растяжения

Построение истинной диаграммы деформирования основывалось на зависимости осевого усилия от перемещения торца, полученной из эксперимента до момента начала разрушения образца. Численное решение задачи первоначально проводилось с использованием диаграммы деформирования, полученной экспериментально в предположении равномерного деформирования рабочей части испытуемых образцов. Для этого зависимость $P \sim \Delta L$ приводилась к истинным напряжениям и логарифмическим деформациям по формулам:

$$e_i = \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right), \quad (2.6.1)$$

$$\sigma_i = \frac{F}{S}, \quad (2.6.2)$$

где L_0 – начальная длина образца;

ΔL – перемещение торца в процессе нагружения;

F – осевое усилие на торце;

S – истинная, т. е. фактическая площадь поперечного сечения, полученная фоторегистрацией.

Полученные различными способами диаграммы деформирования для базы 40мм представлены на представлении на рис 2.4.



Рис. 2.4. Диаграммы деформирования, полученные различными способами

Здесь же исследовалось перемещение точек на рабочей части образца, в зависимости от выбранной базы измерения и строились соответствующие «истинные» диаграммы деформирования с учетом фактической площади образца в конкретный момент времени испытания. По рискам на рабочей части образца получены диаграммы деформирования для различных баз измерений, они представлены на рис. 2.5.

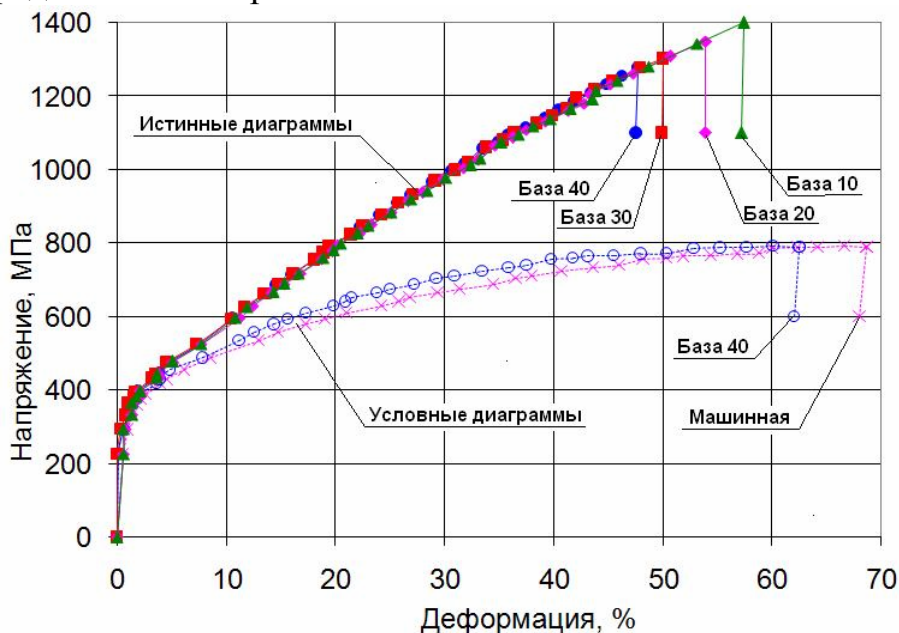


Рис. 2.5 Диаграммы деформирования

Расхождение в 10% по остаточной деформации при регистрации процесса деформирования до разрушения этими двумя способами объясняется

косвенным методом измерения деформации с помощью деформометра (по перемещению захватов).

На рис. 2.5 (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 10мм (кривая, отмеченная ромбиками) и базе 40мм (кривая, отмеченная треугольниками) составляет почти 25%, то есть существенно зависит от выбираемой базы измерения.

2.7. Построение истинных диаграмм деформирования при растяжении цилиндрического стержня

Испытания проводились на цилиндрических образцах из стали 12X18H10T при одноосном растяжении на испытательной машине УМЭ-10ТМ. Один торец стержня жестко закреплен, другой двигался с постоянной скоростью. Образец имел следующие начальные размеры: диаметр 11,43мм; длина рабочей части образца 60,0мм. Перед проведением эксперимента на рабочей части образца наносились риски на расстояниях: 30, 20, 10 (мм), которые являются исходными базами для измерений. Риски наносились методом царапанья. Деформирование образца в процессе испытания представлено на рис. 2.6.

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. В районе шейки напряженное состояние образца теряет характер одноосного растяжения его цилиндрической части с одним главным осевым напряжением и превращается в объемах, примыкающих к шейке, в трехосное растяжение с тремя главными напряжениями: осевым, радиальным и тангенциальным. На основании экспериментальных исследований Н. Н. Давиденков и Н. И. Спиридонова [68], а затем Бриджмен [41] установили, что в наименьшем сечении шейки истинные (главные) деформации (удлинения) 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. Используя указанные предложения, авторы [41, 68] в результате исследования действительного распределения напряжений в зоне наименьшего сечения шейки получили аналитические выражения напряжений в зоне наименьшего сечения шейки в функции расстояния от центра сечения.

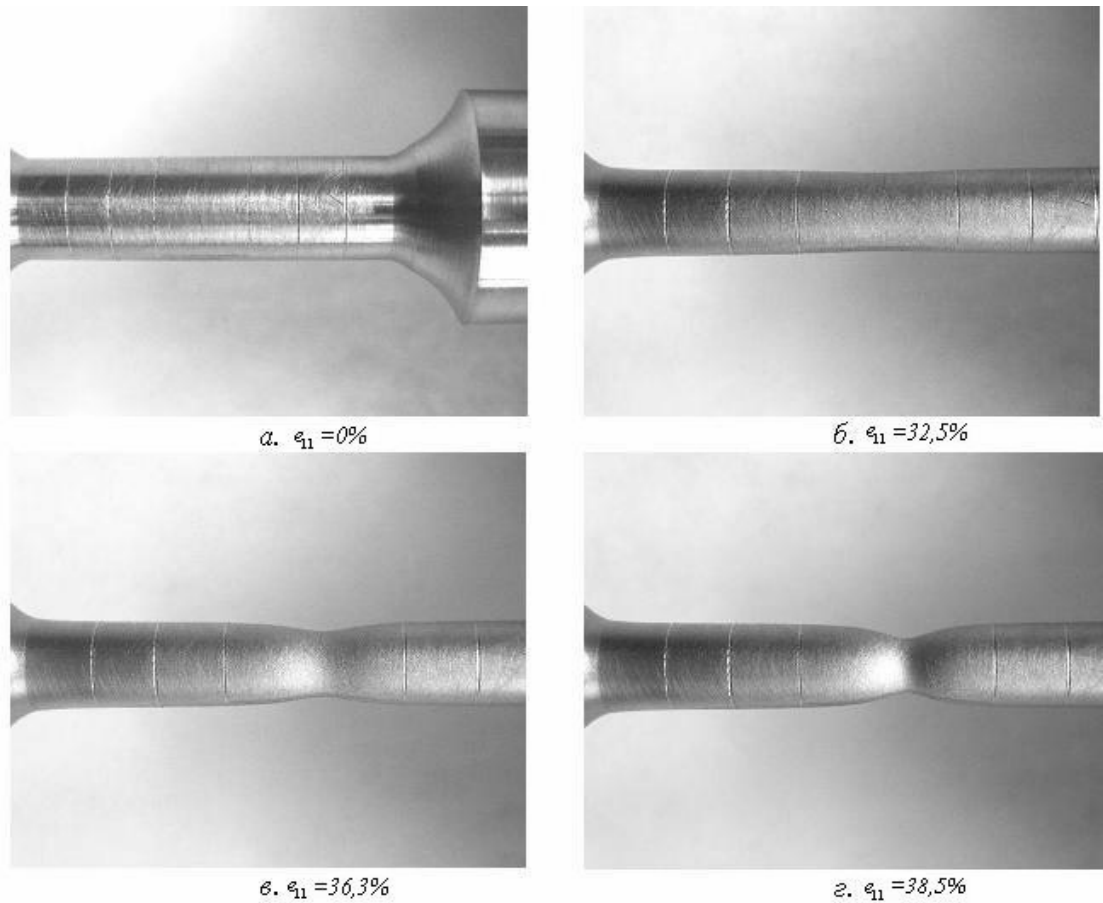


Рис. 2.6. Деформирование образца в процессе испытания

Согласно им тангенциальные и радиальные напряжения на наружной поверхности шейки равны нулю и достигают наибольшего значения в центре наименьшего сечения шейки. Таким образом, интенсивность напряжений в наиболее опасном сечении стержня можно определять по формуле:

$$\sigma_i = \frac{\sigma_m}{1 + \frac{a}{4R}}; \quad (2.7.1)$$

где a – радиус наименьшего поперечного сечения в шейке;

R – радиус кривизны контура шейки в точке наименьшего поперечного сечения;

$\sigma_m = \frac{F}{\pi a^2}$ – среднее нормальное напряжение в шейке образца;

F – сила, действующая в образце.

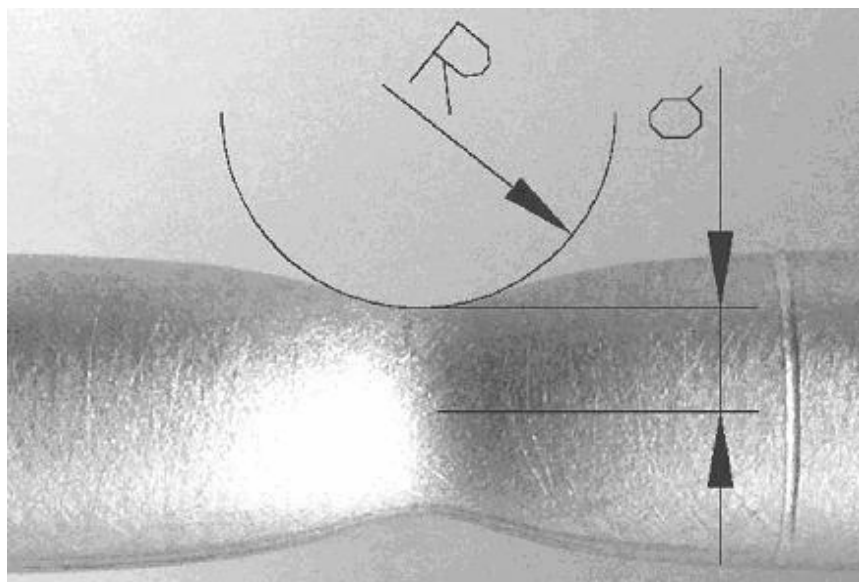


Рис. 2.7. Геометрия образца в области шейки

Истинная деформация в наименьшем сечении шейки в этом случае определяется в зависимости от поперечного сужения:

$$e = \ln \frac{1}{1-\psi} ; \quad (2.7.2)$$

где $\psi = \frac{A_0 - A}{A_0}$ – относительное сужение поперечного сечения, A_0 – площадь сечения образца до деформации; A – действительная площадь поперечного сечения.

Таким образом, в процессе испытания помимо построения машинной (первичной) диаграммы растяжения (рис 2.8) и условной диаграммы напряжений (рис 2.9) необходимо иметь информацию о текущих значениях минимального диаметра шейки и радиуса кривизны ее контура в точках наименьшего поперечного сечения вплоть до момента разрушения образца. Предложенная измерительная система позволяет получать указанную информацию из эксперимента (рис. 2.6), а после обработки графических файлов (фотоизображений) процесса получать значения искомых параметров R и a (рис. 2.7). В процессе испытания после обработки фотографий были определены необходимые размеры в развивающейся шейке и построена диаграмма деформирования образца до разрушения $\sigma_i \sim e$ (рис. 2.10). На рисунке 2.11 вместе показаны условные диаграммы напряжений для различных баз измерения деформаций и диаграмма деформирования.

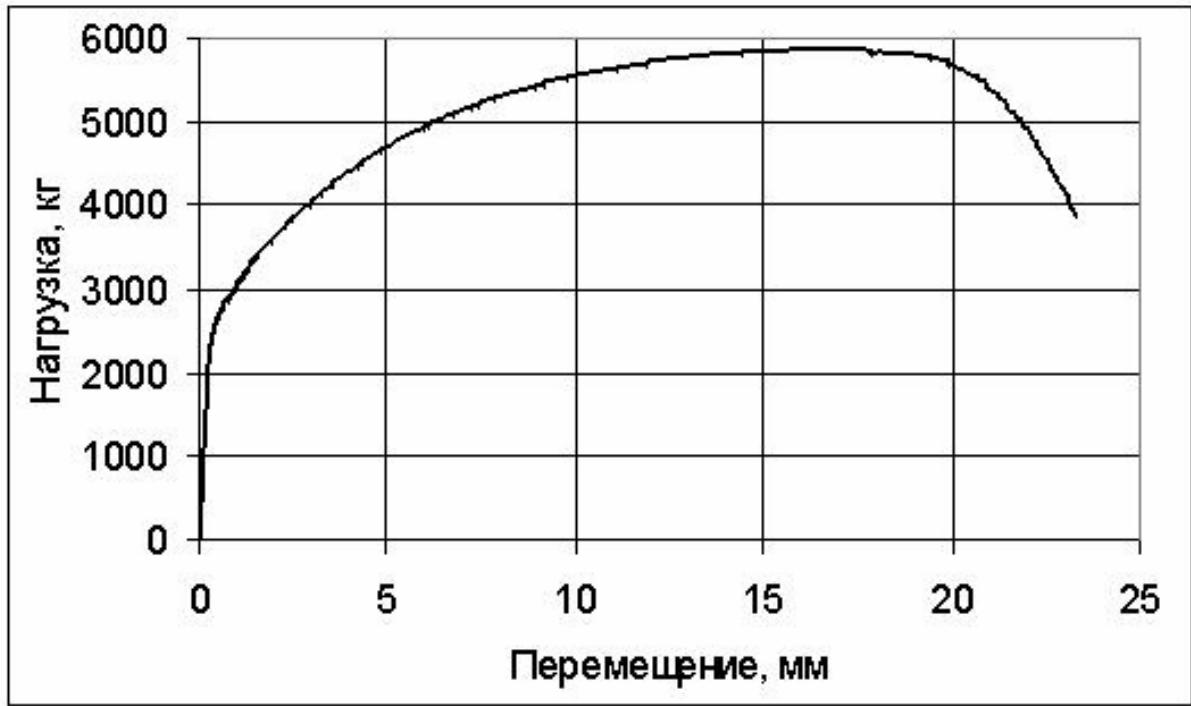
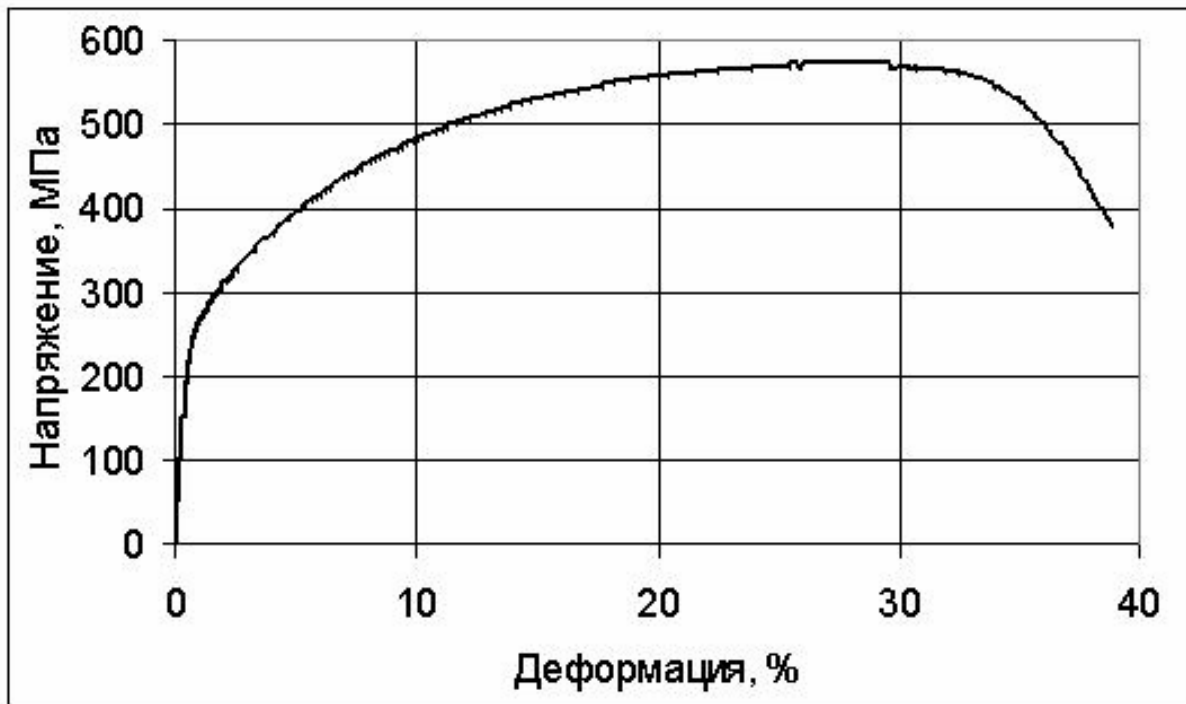


Рис 2.8. Первичная диаграмма растяжения



Рис

2.9. Условная диаграмма напряжений

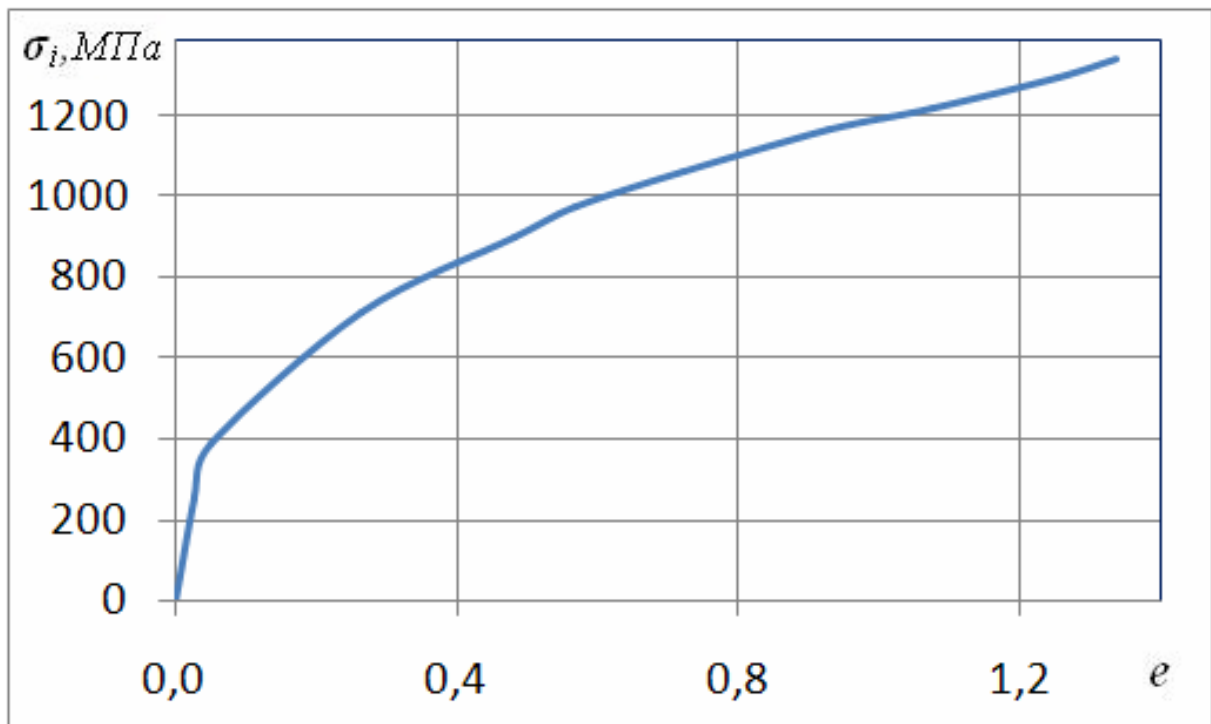


Рис 2.10 Диаграмма деформирования

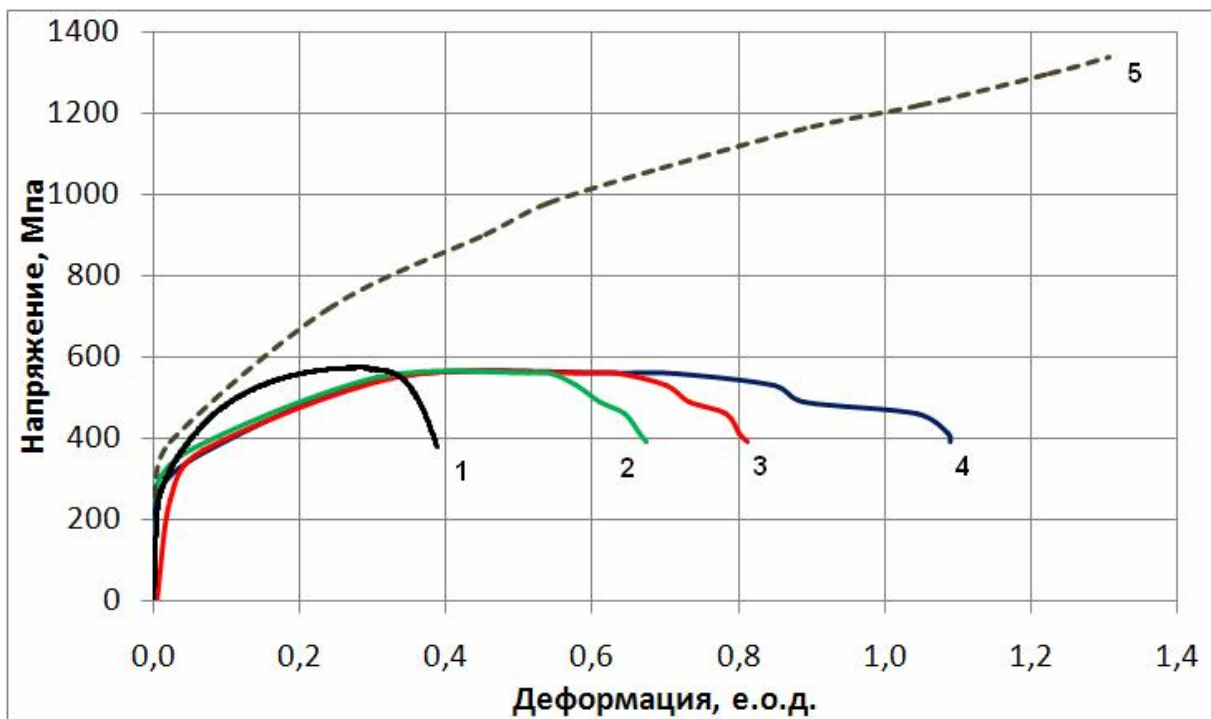


Рис. 2.11. Диаграммы растяжения: 1 – условная диаграмма напряжений (по перемещению захватов); 2, 3, 4 – условные диаграммы напряжений полученные фоторегистацией (2 - на базе 30мм, 3 – на базе 20мм, 4 – на базе 10мм); 5 – диаграмма деформирования (интенсивность напряжений – истинная деформация).

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. Позволяет строить диаграммы деформирования в соответствии с анализом распределения напряжений в шейке Н. Н. Давиденкова и Н. И. Спиридоновой [68], Бриджмена [41] менее трудоемким способом. Также позволяет определять изменения коэффициента поперечной деформации (коэффициент Пуассона) за пределом упругости.

2.8. Исследование процесса деформирования при кручении цилиндрических стержней

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.

Для удобства измерения на поверхность образца наносится сетка. В процессе разработки представленной регистрирующей системы рассматривались различные способы нанесения сеток на поверхность образца (накат, травление, шелкография и т. д.) [170, 188, 224]. В данном случае для цифрового фотоаппарата SONY Cyber-shot DSC-F77 достаточно использования сеток выполненных способом царапанья инструментальным резцом при изготовлении образца. Для измерений фотокамерами, имеющими большую разрешающую способность, потребуются другие, более точные способы нанесения сеток на поверхность образца.

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.

Крутящий момент регистрировался испытательной машиной, для синхронизации его величина в момент съемки фиксировалась засечками на диаграммном аппарате.

Образец до испытания представлен на рис. 2.12. Процесс деформирования представлен на рис. 2.13.

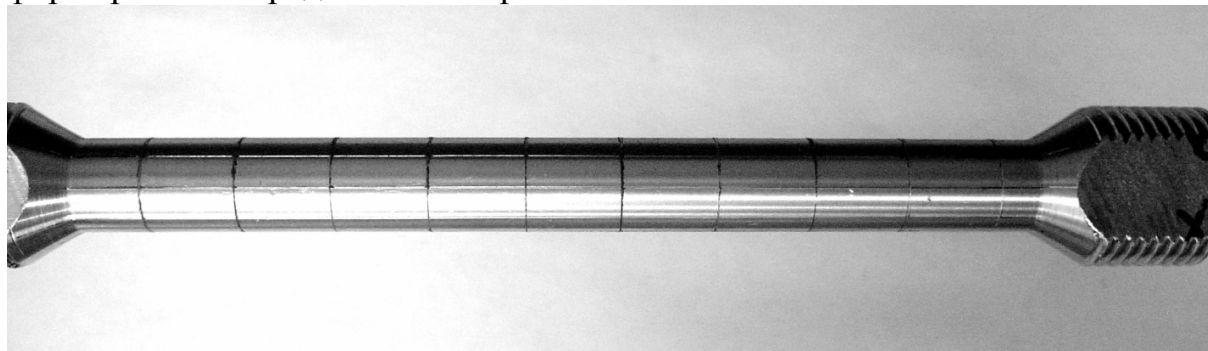


Рис. 2.12. Образец с нанесенными рисками

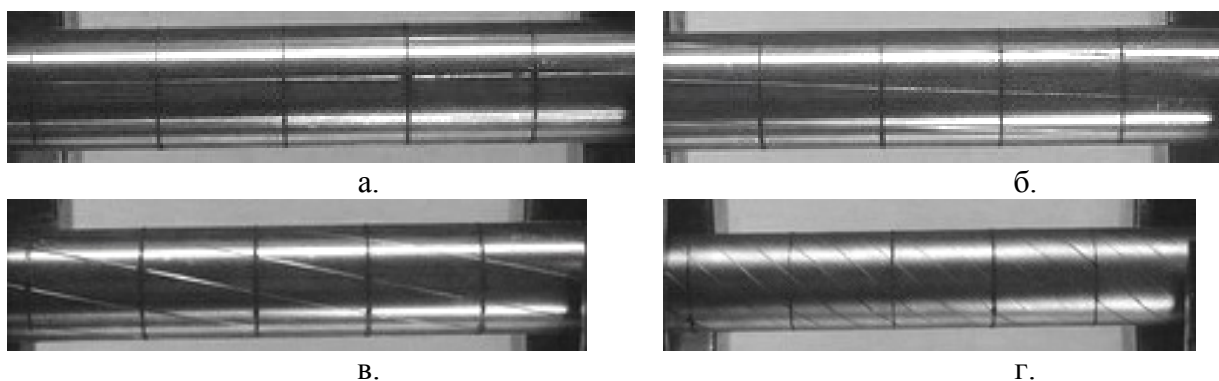


Рис. 2.13 Процесс деформирования

На рисунке 2.14 представлено сравнение первичной (машинной) диаграммы кручения (угол закручивания получен традиционным способом непосредственно с испытательной машины) и диаграммы кручения при значениях угла закручивания полученных с фоторегистрации. Совпадение кривых свидетельствует о применимости предложенной методики.

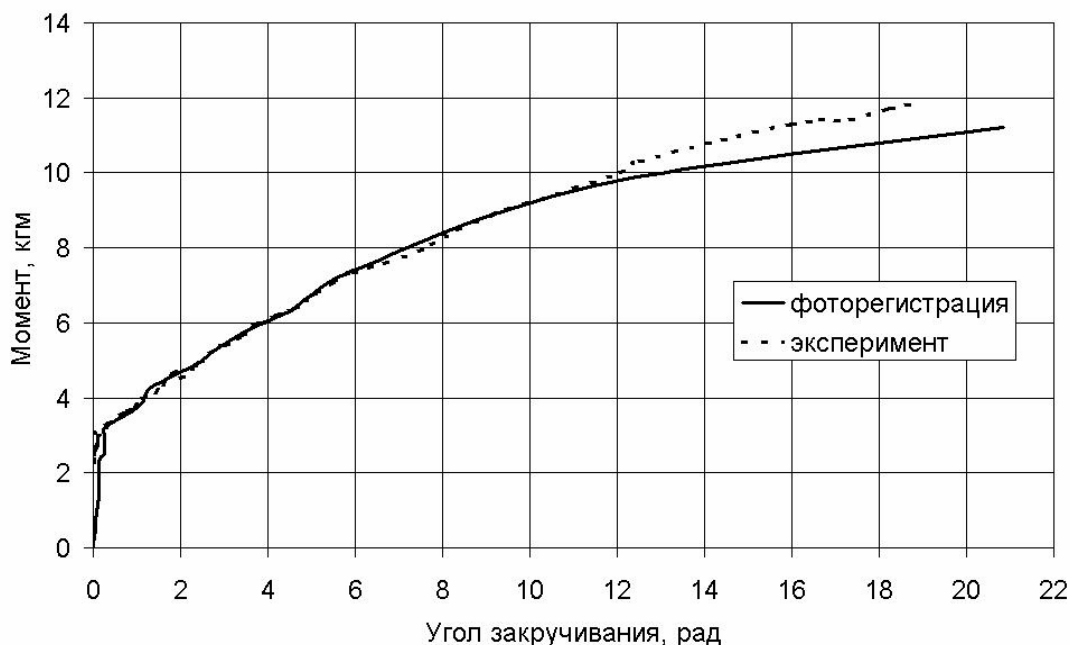


Рис. 2.14 Диаграммы кручения, полученные различными способами

2.9. Исследование эффекта Пойнтинга при кручении цилиндрических стержней

С использованием предложенной методики была проведена экспериментальная оценка изменения длины сплошного цилиндрического образца при кручении на примере стали 12X18H10T.

Испытания проводились на цилиндрических образцах из стали 12X18H10T при кручении на модернизированной испытательной машине ЦДТЕ-30. 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 (рис. 2.15).

Для синхронизации фотоизображений с крутящим моментом и углом закручивания наложение осуществлялось ступенями с фотосъемкой на каждой ступени. Крутящий момент измерялся измерителем силы испытательной машины (тензометрический преобразователем), угол закручивания измерялся деформометром, регистрация осуществлялась под управлением измерительного комплекса National Instruments. Обработка экспериментальных данных (фотоизображений) проводилась в приложении Vision Builder for Automated Inspection (Vision Builder AI). Окно программы с блок-схемой задачи

определения изменения диаметра и продольного удлинения представлено на рис. 2.16.



Рис. 2.15. Рабочая часть образца с нанесенными рисками

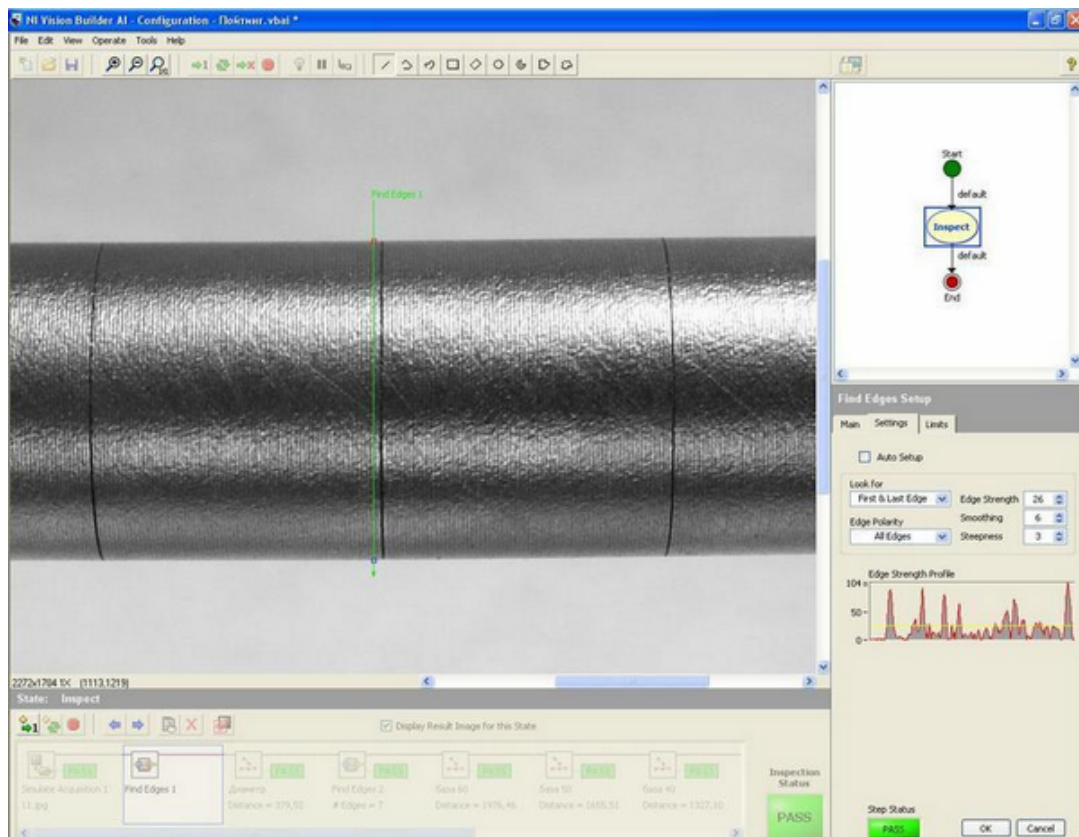


Рис. 2.16. Окно программы Vision Builder AI с блок-схемой задачи

Изменение продольной деформации в зависимости от угла закручивания представлено на рис. 2.17.

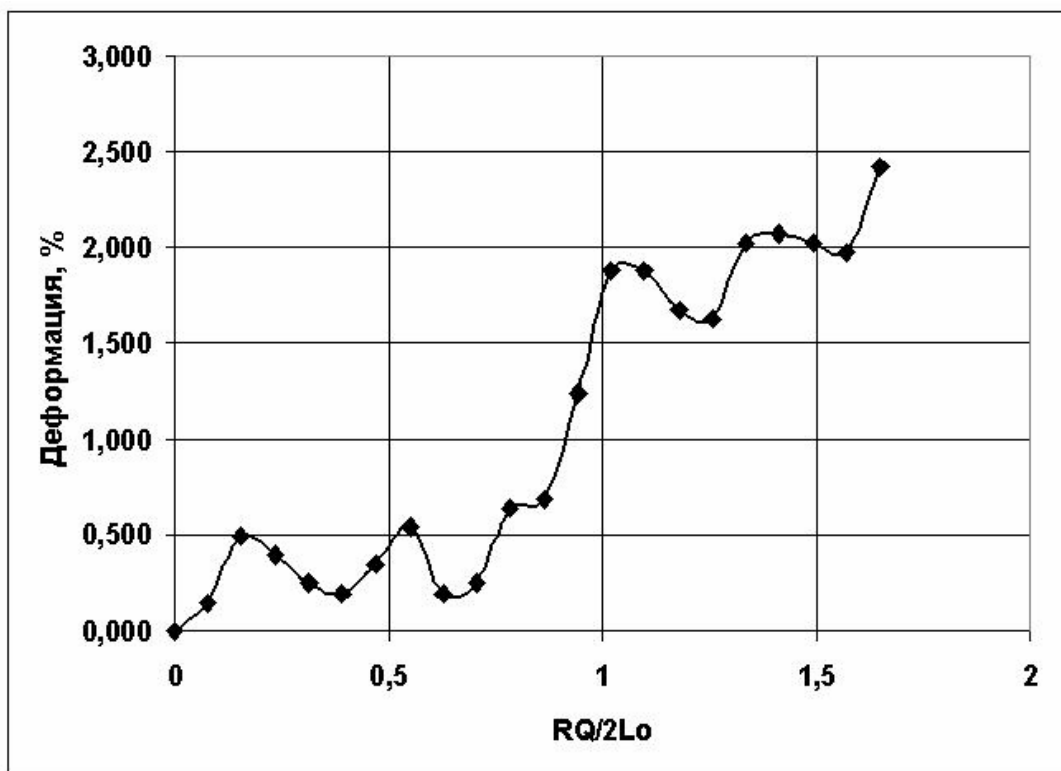


Рис. 2.17 Продольная деформация в зависимости от угла закручивания

Также была проведена экспериментальная оценка изменения длины сплошного цилиндрического образца при кручении со ступенчатым режимом нагружения с разгрузками на каждой ступени и замером полной длины образца. Испытания проводились на машине ЦДТЕ-30 с замером крутящего момента и угла закручивания. Центрирование образцов в захватах испытательной машины выполнялось по центровочным отверстиям через шарики с гарантированным зазором относительно верхнего захвата. Измерение полной длины образца проводилось с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм. Образец после разгрузки устанавливался на подвижной траверсе испытательной машины в вертикальном положении. Индикатор, закрепленный на кронштейне с магнитным устройством, определял измерительную схему. Образец с шариком в верхнем центровочном отверстии подводился под шток индикатора до получения максимального отклонения стрелки, по которой определялось изменение размера по высоте. Удлинение образца для относительной деформации $R\theta/2L_0=0,5$ (R -радиус рабочей части образца, θ -угол закручивания, L_0 -начальная длина) составило порядка 1-1,5% (рис. 2.18)

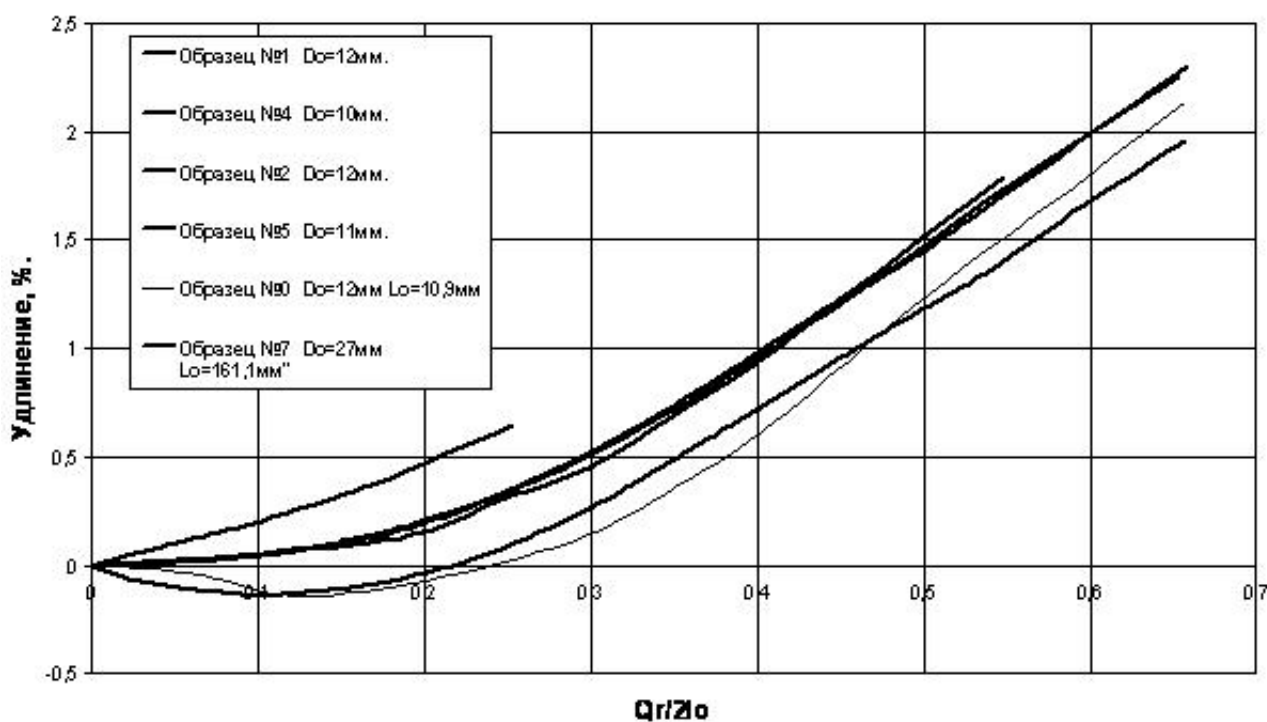


Рис. 2.18 Удлинение в зависимости от угла закручивания

2.10. Выводы к главе 2

Разработанный экспериментальный комплекс позволяет при проведении различных видов экспериментов контролировать перемещение точек на границах и поверхности рабочей части образца, а также отслеживать изменения геометрических размеров рабочей части по двум координатам одновременно. Предлагаемая экспериментальная методика существенно расширяет возможности оценки напряженно-деформированного состояния изучаемого объекта в области больших деформаций. Точность предложенного метода измерения деформаций достигает 0,04%. Возможна разнообразная обработка полученных результатов: построение истинной диаграммы деформирования вплоть до разрушения, поскольку регистрируется фактический диаметр образца в процессе нагружения и в момент образования шейки; изучение формоизменения и потери устойчивости при различных нагружениях; изучения краевых эффектов, местных пластических деформаций и т.д. Экспериментальный комплекс внедрен в экспериментальную практику лаборатории статических испытаний НИИМ ННГУ им. Н.И. Лобачевского. С использованием данной системы проводились различные эксперименты:

- эксперименты на осевое растяжение цилиндрических стержней и оболочек;

- эксперименты на кручение цилиндрических стержней;

- эксперименты на осевое сжатие с измерением поперечной деформации (рис. 2.19);

эксперименты на трех-точечный изгиб балки с надрезом (рис. 2.20);
эксперименты кручение цилиндрической оболочки без сердечника и со
стальным и фторопластовым сердечниками (рис. 2.21).

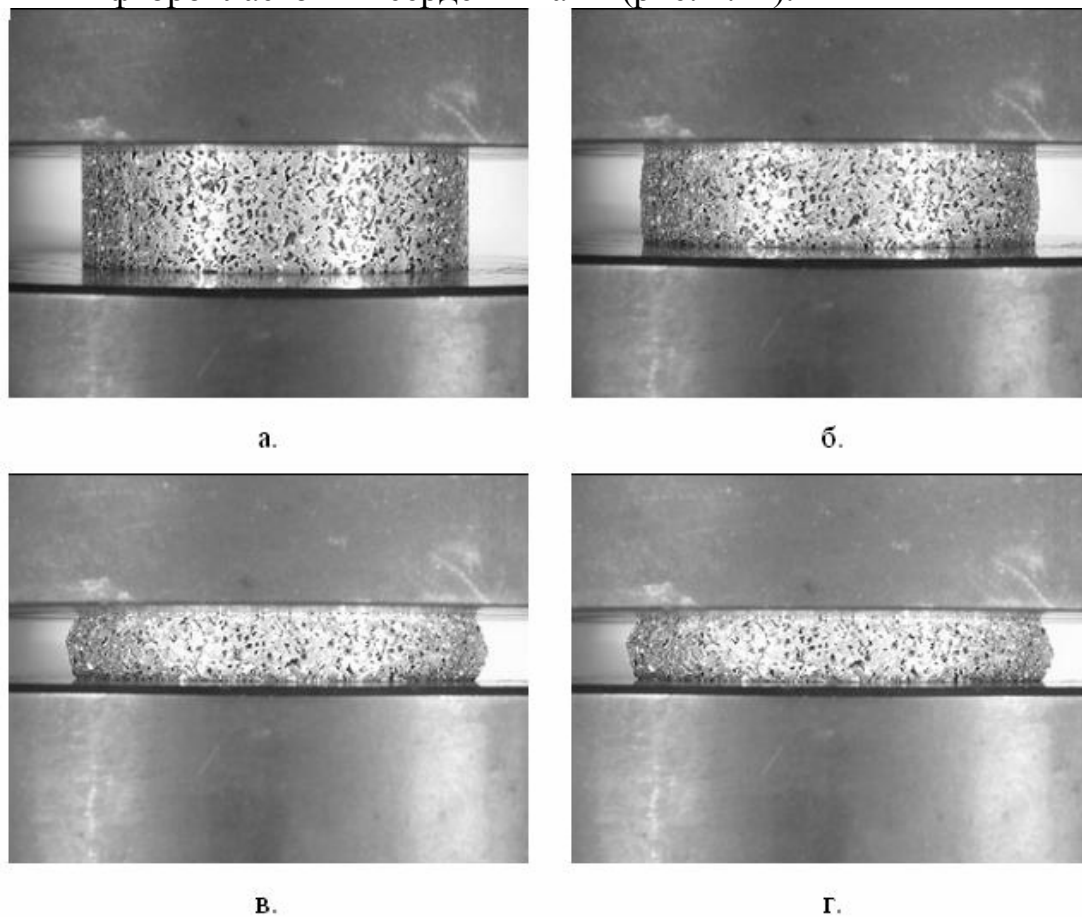


Рис 2.19. Осевое сжатие пористого алюминиевого сплава АК-7

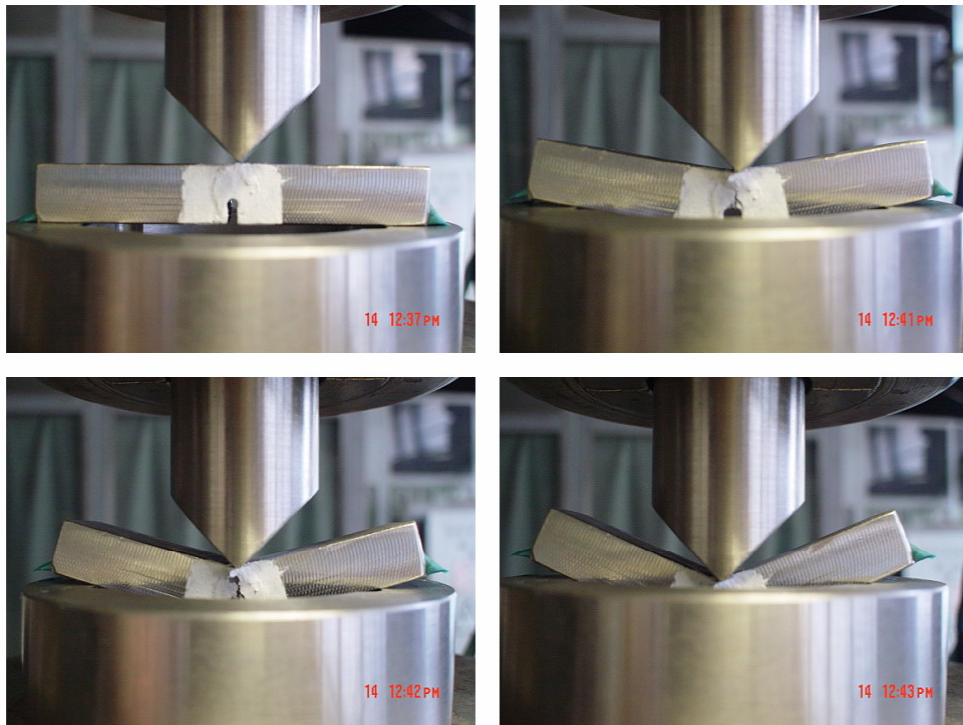


Рис 2.20. Трех-точечный изгиб балки с надрезом

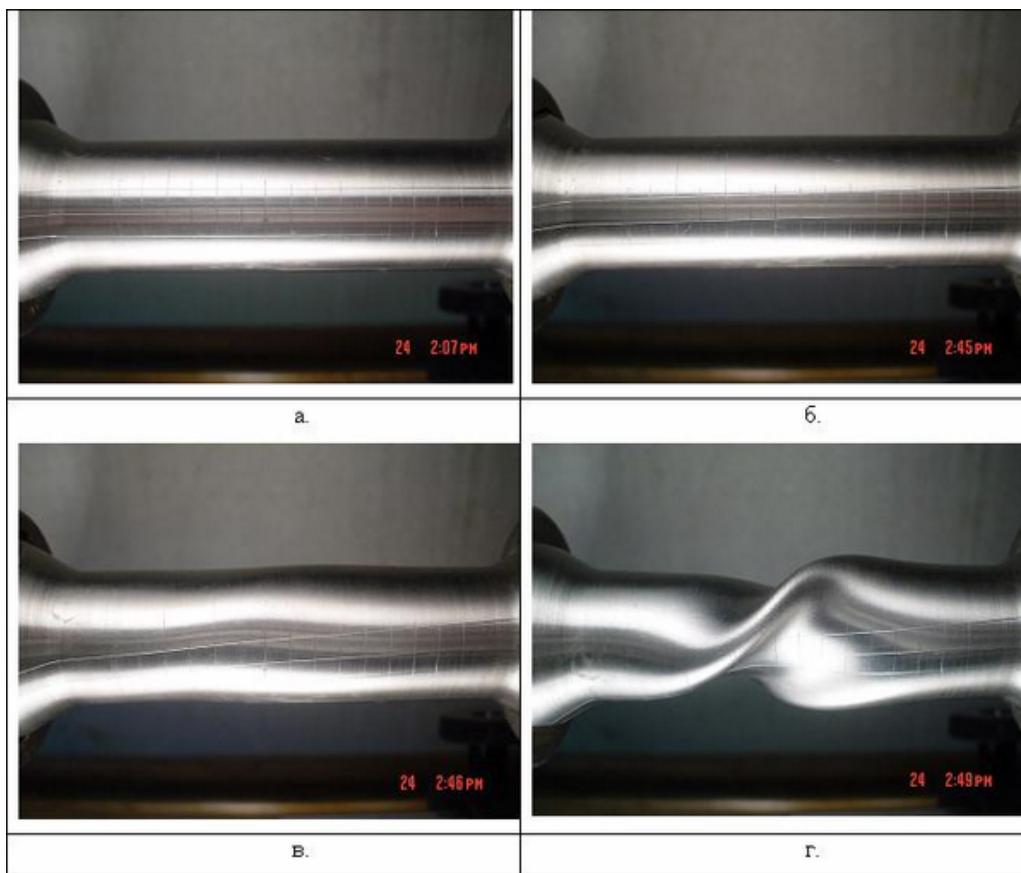


Рис. 2.21. Кручение трубчатого образца без сердечника

Глава 3. Экспериментальное и численное исследование параметров напряженно-деформированного состояния при сложном нагружении растяжением и кручением

Одной из областей применения методики численного решения задач упругопластического деформирования тел вращения произвольной формы является исследование поведения элементов конструкций в условиях сложного нагружения при больших степенях деформаций. Одним из вариантов реализации сложного нагружения в экспериментальной практике является растяжение с кручением. При комбинированном нагружении кручением–растяжением стандартных тонкостенных трубчатых образцов невозможно достигнуть больших степеней деформаций вследствие потери устойчивости, поэтому представляет интерес анализ процесса деформирования и напряженно-деформированного состояния сплошных цилиндрических образцов.

Традиционные методики определения механических свойств материалов, основывающиеся на прямых измерениях параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) в ходе испытаний при простых и сложных нагружениях, как правило, не позволяют оценить прочностные характеристики. Во многих конструкционных материалах разрушению предшествуют неоднородное и неодноосное НДС, концентрация напряжений и немалые деформации. Для идентификации деформационных и прочностных характеристик материалов при больших упругопластических деформациях в условиях сложного напряженного состояния и сложного нагружения целесообразно применение методов математического моделирования процессов деформирования лабораторных образцов или элементов конструкций.

С этой целью разработана и программно реализована в рамках ПК «Динамика-2» [20] достаточно общая методика численного решения обобщенных двумерных задач кручения, позволяющая моделировать процессы деформирования упругопластических тел вращения при комбинированном воздействии осесимметричного нагружения и кручения с учетом больших деформаций при простых и сложных нагружениях. Движение тел описывается общим уравнением динамики, следующим из уравнения баланса виртуальных мощностей работы в цилиндрической системе координат. В силу осевой симметрии все искомые функции зависят от радиальной и осевой координат и не зависят от окружной. Поворот частиц среды как жесткого целого учитывается производной Яуманна. Для описания упругопластических свойств материала при сложном нагружении реализована модель пластичности с комбинированным изотропным и кинематическим упрочнением. Определяющая система уравнений решается методом конечного элемента в сочетании с явной схемой интегрирования во времени типа «крест».

Проведены экспериментальные и численные исследования процессов деформирования сплошных цилиндрических образцов из сталей 12X18H10T

при комбинированных монотонных нагружениях кручением-растяжением до разрушения (последовательное нагружение растяжением и кручением, кручением и растяжением). Сопоставление результатов численного моделирования и экспериментальных данных подтверждает достоверность и работоспособность методик.

3.1. Методика численного решения

Для решения обобщенных двумерных задач кручения был разработан вариационно-разностный метод, позволяющий моделировать процессы деформирования упругопластических тел вращения при комбинированном воздействии осесимметричного нагружения и кручения с учетом больших деформаций [21, 29, 33, 157]. При решении обобщенных двумерных задач кручения исходим из уравнения баланса виртуальных мощностей работы, записанного в цилиндрической системе координат r, β, z (Oz – ось вращения):

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} (\sigma_{rr} \delta \dot{e}_{rr} + \sigma_{\beta\beta} \delta \dot{e}_{\beta\beta} + \sigma_{zz} \delta \dot{e}_{zz} + 2\sigma_{rz} \delta \dot{e}_{rz} + 2\sigma_{r\beta} \delta \dot{e}_{r\beta} + 2\sigma_{\beta z} \delta \dot{e}_{\beta z}) rd\Omega + \\ & + \iint_{\Omega} (\rho w_r \delta \dot{u}_r + \rho w_{\beta} \delta \dot{u}_{\beta} + \rho w_z \delta \dot{u}_z) rd\Omega - \int_{G_p} (p_r \delta \dot{u}_r + p_{\beta} \delta \dot{u}_{\beta} + p_z \delta \dot{u}_z) rdG - \\ & - \int_{G_q} (q_r \delta \dot{u}_r + q_{\beta} \delta \dot{u}_{\beta} + q_z \delta \dot{u}_z) rdG = 0. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Здесь σ_{ij} , \dot{e}_{ij} – компоненты тензора напряжений Коши и скоростей деформаций, \dot{u}_{α} , w_{α} – компоненты векторов скорости перемещения и ускорения перемещения; p_{α} , q_{α} – компоненты поверхностных и контактных нагрузок ($i, j, \alpha = r, \beta, z$), ρ – плотность, Ω – область, занимаемая меридиональным сечением сплошной среды, G_p – часть поверхности, на которой задается априори известная поверхностная нагрузка, G_q – часть поверхности, на которой задаются контактные давления, определяемые в процессе решения. В силу осевой симметрии все искомые функции зависят от радиальной и осевой координат и не зависят от окружной.

Кинематические соотношения формулируются в скоростях и строятся в метрике текущего состояния, что позволяет учитывать большие формоизменения. Компоненты тензоров скоростей деформаций и скоростей вращения с учетом $\dot{u}_{\beta} = r\dot{\theta}$ (θ – угол закручивания по окружной координате β) имеют вид:

$$\begin{aligned}
\dot{e}_{rr} &= \dot{u}_{r,r}, & \dot{e}_{\beta\beta} &= \dot{u}_r r^{-1}, & \dot{e}_{zz} &= \dot{u}_{z,z}, \\
\dot{e}_{zr} &= \frac{1}{2}(\dot{u}_{z,r} + \dot{u}_{r,z}), & \dot{e}_{r\beta} &= \frac{1}{2}r\dot{\theta}_{,r}, & \dot{e}_{\beta z} &= \frac{1}{2}r\dot{\theta}_{,z}, \\
\dot{\omega}_{zr} &= \frac{1}{2}(\dot{u}_{z,r} - \dot{u}_{r,z}), & \dot{\omega}_{r\beta} &= -\frac{1}{2}(r\dot{\theta}_{,r} + 2\dot{\theta}), & \dot{\omega}_{\beta z} &= \frac{1}{2}r\dot{\theta}_{,z}.
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Для устранения особенности на оси вращения и повышения точности численного решения уравнений движения вводятся новые функции $\dot{v}_r = r\dot{u}_r$, $\dot{v}_z = r\dot{u}_z$, $\dot{\theta} = r^{-1}\dot{u}_\beta$. Тогда общее уравнение динамики (3.1) с учетом соотношений (4.2) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned}
& \iint_{\Omega} \left(\sigma_{rr} \frac{\partial \delta \dot{v}_r}{\partial r} + \sigma_{rz} \frac{\partial \delta \dot{v}_r}{\partial z} - \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\beta\beta}}{r} \delta \dot{v}_r + \rho w_r \delta \dot{v}_r \right) d\Omega - \int_G (p_r + q_r) \delta \dot{v}_r dG = 0 \\
& \iint_{\Omega} \left(\sigma_{r\beta} \frac{\partial \delta \dot{\theta}}{\partial r} + \sigma_{\beta z} \frac{\partial \delta \dot{\theta}}{\partial z} + \rho w_\beta \delta \dot{\theta} \right) r^2 d\Omega - \int_G (p_\beta + q_\beta) r^2 \delta \dot{\theta} dG = 0 \\
& \iint_{\Omega} \left(\sigma_{zz} \frac{\partial \delta \dot{v}_z}{\partial z} + \sigma_{rz} \frac{\partial \delta \dot{v}_z}{\partial r} - \frac{\sigma_{rz}}{r} \delta \dot{v}_z + \rho w_z \delta \dot{v}_z \right) d\Omega - \int_G (p_z + q_z) \delta \dot{v}_z dG = 0.
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Для описания упругопластических свойств материалов применяется вариант теории течения с комбинированным нелинейным изотропным и кинематическим упрочнением. В качестве определяющих соотношений используется модификация математической модели теории пластичности, разработанной Ю.Г. Коротких [99] и описывающей процессы сложного пластического деформирования конструкционных материалов при многоосных непропорциональных путях комбинированного термосилового нагружения. Проведено развитие модели для случая больших упругопластических деформаций, эффекты циклического деформирования и термического нагружения в настоящей работе не учитываются.

Скорость деформации \dot{e}_{ij} можно представить в виде суммы скоростей упругих \dot{e}_{ij}^e и пластических \dot{e}_{ij}^p составляющих:

$$\dot{e}_{ij} = \dot{e}_{ij}^e + \dot{e}_{ij}^p. \tag{3.4}$$

Связь между компонентами девиатора скоростей напряжений $\dot{\sigma}'_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} - \delta_{ij}\dot{\sigma}$ и упругими составляющими компонент девиатора скоростей деформаций $\dot{e}'_{ij} = \dot{e}_{ij} - \delta_{ij}\dot{e} - \dot{e}_{ij}^p$ осуществляется на основе обобщенного закона Гука в метрике текущего состояния:

$$D_J \sigma'_{ij} = 2G \dot{e}'_{ij}, \quad D_J \sigma'_{ij} = \dot{\sigma}'_{ij} - \dot{\omega}_{ik} \sigma'_{kj} - \dot{\omega}_{jk} \sigma'_{ik}, \tag{3.5}$$

где D_J - производная Яуманна; G – модуль сдвига; δ_{ij} - символ Кронекера.

Связь между скоростями шаровых составляющих напряжений $\dot{\sigma}$ и деформаций \dot{e} полагается линейной:

$$\dot{\sigma} = 3K\dot{e}, \quad \dot{\sigma} = \frac{1}{3}\dot{\sigma}_{ii}, \quad \dot{e} = \frac{1}{3}\dot{e}_{ii}, \quad \dot{e}_{ii}^p = 0, \quad (3.6)$$

здесь K – модуль объемного сжатия.

Уравнение поверхности текучести, ограничивающей в пространстве девиаторов напряжений область упругих состояний, принимается в форме Мизеса. Скорости пластических составляющих деформации определяются ассоциированным законом течения:

$$\dot{e}_{ij}^p = \lambda S_{ij}, \quad S_{ij}S_{ij} = C_p^2, \quad S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}. \quad (3.7)$$

Здесь S_{ij} – тензор активных напряжений, $C_p = C_p(\alpha)$ – радиус поверхности текучести, ρ_{ij} – тензор микронапряжений, определяющий координаты центра поверхности текучести. Изменение радиуса поверхности текучести описывается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \Delta C_p &= q_\alpha \Delta \alpha, \quad C_p = \int_0^\alpha q_\alpha d\alpha, \quad q_\alpha = \frac{q_2 A \psi + (1-A)q_1}{A\psi + (1-A)}, \\ 0 \leq \psi &\leq 1, \quad A = 1 - \cos^2 \theta, \quad \cos \theta = n_{ij}^e n_{ij}^s, \\ n_{ij}^e &= \frac{\Delta e'_{ij}}{\sqrt{\Delta e'_{ij} \Delta e'_{ij}}}, \quad n_{ij}^s = \frac{S_{ij}}{\sqrt{S_{ij} S_{ij}}}, \\ \Delta \alpha &= \sqrt{\frac{2}{3} \Delta e_{ij}^p \Delta e_{ij}^p}, \quad \alpha = \int_0^t \Delta \alpha dt. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Здесь α – параметр Одквиста, q_α – модуль изотропного упрочнения, учитывающий изменение изотропного упрочнения материала в зависимости от направления деформирования в данной точке траектории; θ – угол между векторами приращения девиатора деформаций и нормалью к поверхности текучести, n_{ij}^e и n_{ij}^s – направляющие косинусы вектора приращения девиатора деформаций и нормали к поверхности текучести. При пропорциональном нагружении $\theta = 0$, $\cos \theta = 1$, $A = 0$, $q_\alpha = q_1$, q_1 – модуль изотропного упрочнения материала при пропорциональном нагружении (одноосное растяжение или кручение образца). При непропорциональном нагружении с углом $\theta = \pi/2$ $\cos \theta = 0$, $A = 1$, $q_\alpha = q_2$, q_2 – модуль изотропного упрочнения при нагружении по касательной к поверхности текучести. Смещение поверхности текучести описывается следующим уравнением:

$$\dot{\rho}_{ij} = g_1 \dot{e}_{ij}^p - g_2(\alpha) \rho_{ij} \dot{\alpha}, \quad \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt \quad (3.9)$$

Здесь $g_1 = const$ и $g_2 = g_2(\mathbf{x})$ – модули кинематического упрочнения.

Параметр $\dot{\lambda}$ тождественно равен нулю при упругом деформировании, а при пластическом деформировании определяется из условия прохождения текущей поверхности текучести через конец вектора девиатора напряжений.

Для определения материальных параметров C_p , g_1 и g_2 требуются экспериментальные данные по монотонному нагружению кручением или растяжением до больших деформаций и по эффекту Баушингера. Известно, что для процессов активного нагружения, близких к пропорциональным, достаточно учитывать лишь нелинейное изотропное упрочнение, для которого не требуются данные по эффекту Баушингера. В этом случае задается только истинная диаграмма деформирования материала $C_p = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_i(\mathbf{x})$.

Полная система уравнений при заданных начальных и граничных условиях решается по явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа «крест» [20]. Пространственные производные аппроксимируются исходя из дивергентной схемы в предположении линейного изменения вдоль каждой из сторон четырехугольной элементарной ячейки. Перемещения и скорости перемещений определяются в узлах разностной сетки, а тензоры напряжений и скоростей деформаций – в центрах ячеек. Описанные численные методики и алгоритмы реализованы в рамках пакета прикладных программ (ППП) «Динамика-2» [20].

3.2. Экспериментальное и численное исследование параметров напряженно-деформированного состояния при сложном нагружении растяжением и кручением

Для оценки достоверности методики проводится сопоставление результатов численного и экспериментального исследований процесса деформирования сплошного осесимметричного образца переменной толщины при последовательном нагружении кручением и растяжением вплоть до разрушения.

Эксперименты проводились на испытательной машине ЦДТЕ-30. 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. При численном моделировании, исходя из симметрии, рассматривалась половина образца. Поперечное сечение на плоскости симметрии образца полагалось неподвижным. В расчетах на торцевом сечении образца задаются постоянные угловая или осевая скорости.

Характерной особенностью конструктивной схемы образца являются короткая рабочая часть и плавный переход от рабочей части к захватной

(отсутствуют концентраторы напряжений). Геометрические параметры образца (рис. 3.1): радиус и длина рабочей части $R_1 = 6,1 \cdot 10^{-3}$ м, $L_1/R_1 = 6,557$, размеры переходной части $R_2/R_1 = 9,836$, $L_2/L_1 = 0,25$, $L_3/L_1 = 0,775$, радиус и длина цилиндрического захвата $R_3/R_1 = 1,967$, $L_4/L_1 = 0,575$, общая длина образца $L = 0,168$ м.

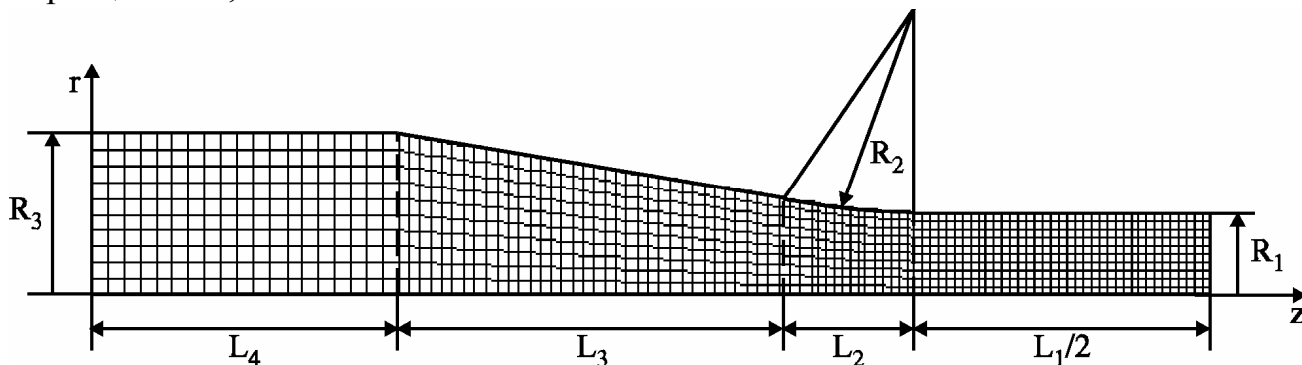


Рис. 3.1. Конструктивная схема образца

Материал образца — сталь 12X18H10T, упругие характеристики материала: модуль объемного сжатия $K = 1,667 \cdot 10^5$ МПа, модуль сдвига $G = 7,692 \cdot 10^4$ МПа, предел текучести $\sigma^T = 240$ МПа и плотность $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³. В качестве скалярной функции $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon)$ принималась диаграмма деформирования, построенная на основе эксперимента по монотонному кручению до разрушения идентичного образца по методике [26]. Данные по эффекту Баушингера при малых деформациях были получены в работе [118] на основе опытов растяжения-сжатия образца по специальной циклической программе нагружения.

Для случая больших деформаций 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 $\varepsilon = 0,03$. 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 Δ 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 $\varepsilon = 33\%$, 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. 3.2).

На рис. 3.2 цифрой 1 отмечена диаграмма деформирования, цифрой 2 – данные по эффекту Баушингера (отношение обратного предела текучести к пределу текучести). На основе этих экспериментальных данных были получены материальные параметры для модели пластичности (3.4 - 3.9) по формулам:

$$\sigma_T = \frac{1+\delta}{2} \sigma_i, \quad \sqrt{\frac{2}{3}} C_p = \sigma_T, \quad \rho_{11} = \frac{2}{3} \left(\sigma_i - \sqrt{\frac{3}{2}} C_p \right) = \frac{1-\delta}{3} \sigma_i,$$

$$g_2 = \frac{1}{\rho_{11}} \left(g_1 - \frac{d\rho_{11}}{d\epsilon} \right).$$

Здесь $g_1 = 19000 \text{ МПа}$ - тангенс угла наклона касательной к кривой $\rho_{11} = \rho_{11}(\epsilon)$ в начале координат.

На рис. 3.2 цифрой 3 отмечена зависимость $\hat{\sigma}_T = \frac{\sigma_T(\epsilon)}{\sigma_T}$, цифрой 4 –

$$\hat{C}_p = \frac{C_p(\epsilon)}{\sigma_T}, \text{ цифрой 5 – } \hat{\rho}_{11} = \frac{\rho_{11}(\epsilon)}{\sigma_T}, \text{ цифрой 6 – } g_2 = g_2(\epsilon).$$

Известно, что эффект Баушингера у стали имеет место при степенях деформации до 2 %. из экспериментов видно, что центр поверхности текучести смещается и при больших деформациях, о чем свидетельствует монотонное возрастание графика $\hat{\rho}_{11} = \hat{\rho}_{11}(\epsilon)$ при всех значения ϵ . В работе [99]

принималось, что $g_2 = const$, $\rho_{11} = \frac{g_1}{g_2} \left(1 - e^{-g_2 \epsilon} \right)$, и $\lim_{\epsilon \rightarrow \infty} \rho_{11} = g_2$. При таком

предположении при степенях деформации больше 2 % центр поверхности текучести не смещается. На рис. 3.3 приведены материальные параметры модели пластичности [99]. Цифрой 1 отмечена диаграмма деформирования, цифрой 2 – данные по эффекту Баушингера, цифрой 3 – зависимость

$$\hat{\sigma}_T = \frac{\sigma_T(\epsilon)}{\sigma_T}, \text{ цифрой 4 – } \hat{C}_p = \frac{C_p(\epsilon)}{\sigma_T}, \text{ цифрой 5 – } \hat{\rho}_{11} = \frac{\rho_{11}(\epsilon)}{\sigma_T}. \text{ Это}$$

предположение хорошо согласуется с экспериментальными данными при степенях деформации до 2 %, но оно неприменимо при больших степенях деформаций.

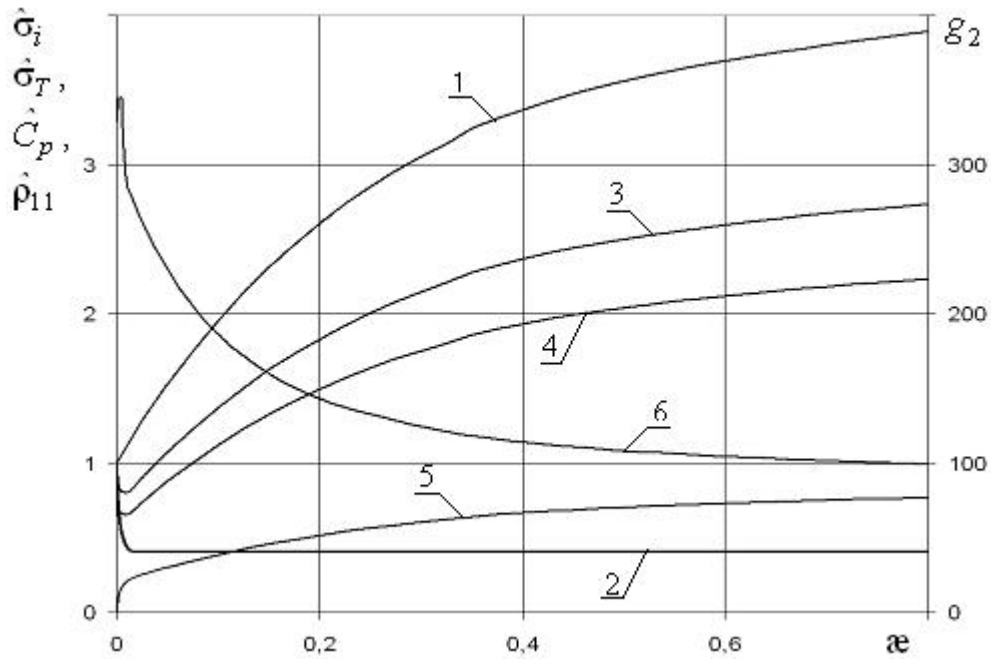


Рис. 3.2. Материальные параметры модели пластичности для стали 12X18H10T

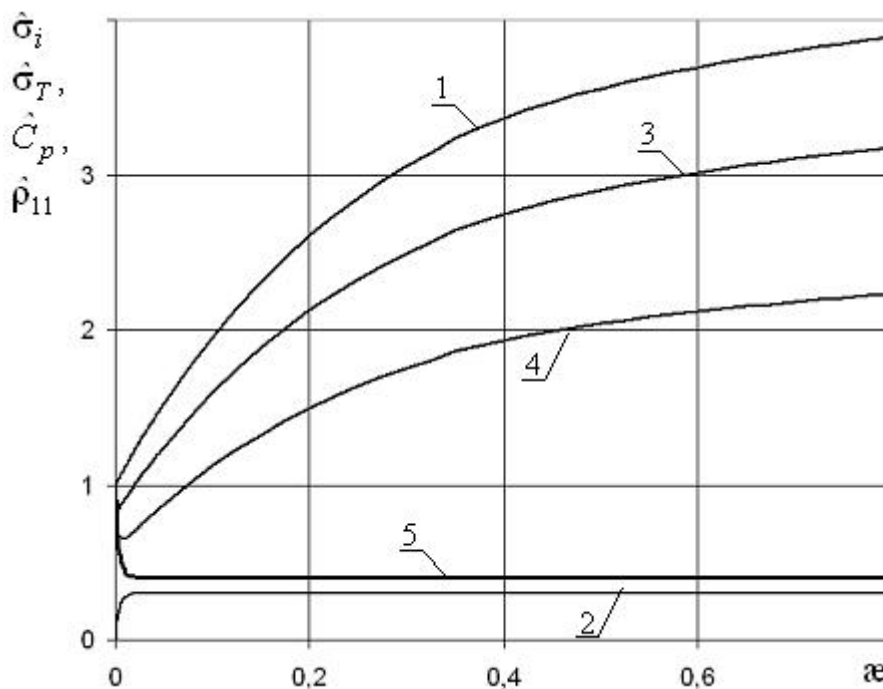


Рис. 3.3. Материальные параметры модели пластичности для стали 12X18H10T (модель [99])

В экспериментах на сложное нагружение измерялись зависимости осевой силы от удлинения образцов $P = P(\Delta l)$ и крутящего момента от угла закручивания между торцевыми сечениями образцов $M = M(\theta)$. Для анализа результатов расчетов и экспериментальных данных вводятся следующие параметры:

$$\bar{e}_{zz} = \frac{u_z}{L_1}, \quad \bar{e}_{\beta z} = \frac{1}{2} \frac{R_1 \theta}{L_1},$$

$$\hat{M} = \frac{M}{M_T}, \quad M = 2\pi \int_0^R \sigma_{\beta z} r^2 dr, \quad M_T = (2/3\sqrt{3})\pi R_1^3 \sigma^T$$

$$\hat{F} = \frac{F}{F_T}, \quad F = 2\pi \int_0^R \sigma_{zz} r dr, \quad F_T = \pi R_1^2 \sigma^T.$$

Здесь \bar{e}_{zz} и $\bar{e}_{\beta z}$ - условные осевая и сдвиговая деформации соответственно на поверхности рабочей части образца, отнесенные к начальным длине L_1 и радиусу и R_1 рабочей части образца, u_z ($u_z = \Delta l$) и θ - осевое перемещение и угол закручивания между торцами.

3.2.1. Исследование процесса деформирования при последовательном нагружении кручением и растяжением

Проводились квазистатические испытания сплошных цилиндрических образцов кручением и растяжением. Первоначально образцы нагружались кручением до угла закручивания 1, 1.5, 2 оборота (табл. 3.1), затем растяжением до разрушения.

Таблица 3.1

№ эксперимента	Количество оборотов после I этапа нагружения	$\theta, ^\circ$ - угол закручивания после I этапа нагружения	$\bar{e}_{\beta z}$ - условная сдвиговая деформация после I этапа нагружения
Кр1	3,45	1242	1,91
Кр2	2	722	1,1
Кр4	1,5	544,5	0,83
Кр5	1	361	0,54
Кр6	1,5	532,7	0,7998
Кр7	2	714	1,077
Кр10	1	361	0,55
Кр11	1	362	0,548

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 ($q_x = q_1$). На рис. 3.4 приведены экспериментальные (точки) и расчетная (сплошная линия) зависимости крутящего момента от условной сдвиговой деформации $\hat{M} = \hat{M}(\bar{e}_{\beta z})$. При численном моделировании монотонного кручения образцов модели

пластичности с изотропным и с комбинированным упрочнением дают одинаковый результат.

На рис. 3.5–3.7 представлены экспериментальные (точки, треугольники, квадраты) и расчетные (сплошные линии) зависимости осевой силы от относительной осевой деформации $\hat{F} = \hat{F}(\bar{e}_{zz})$ при растяжении образцов после кручения до углов закручивания 1, 1.5 и 2 оборота соответственно.

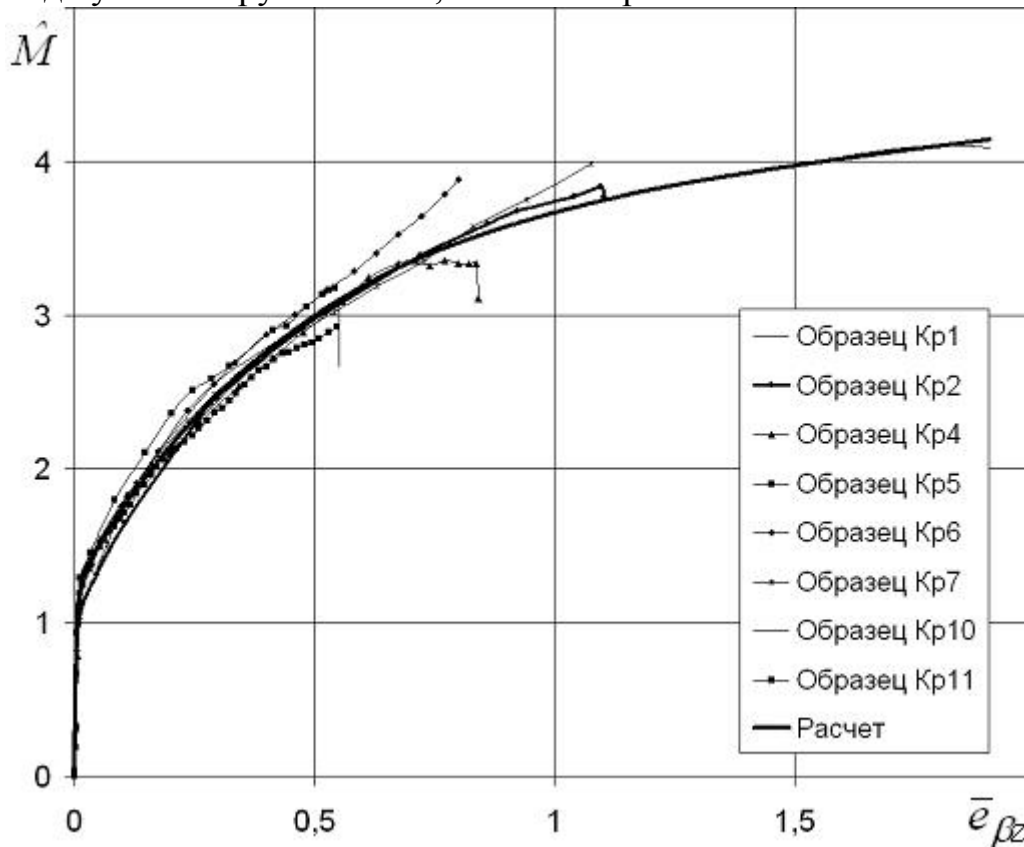


Рис. 3.4. I этап нагружения – кручение. Сравнение расчета с экспериментом

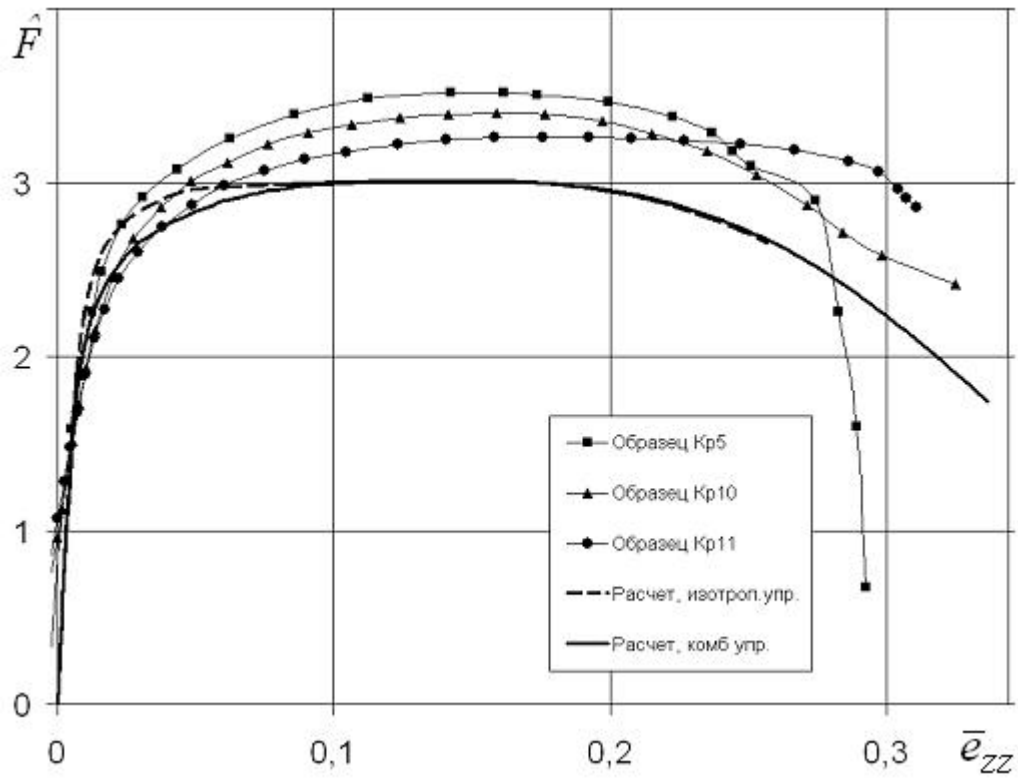


Рис. 3.5. Кручение (1 оборот) – растяжение

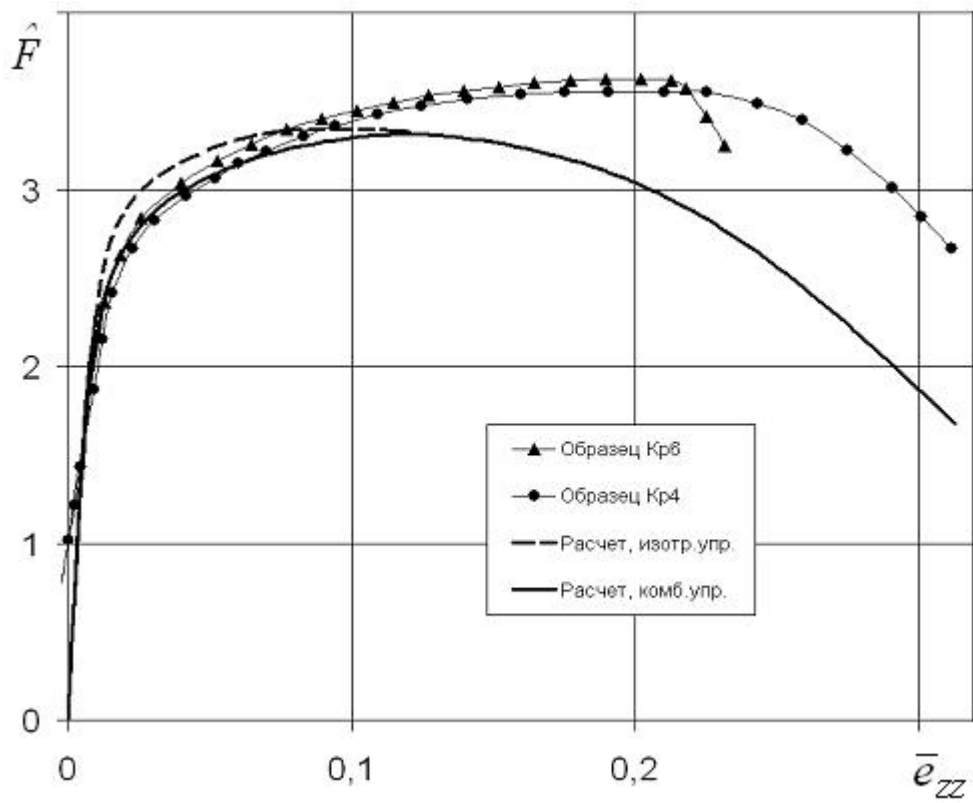


Рис. 3.6. Кручение (1.5 оборота) – растяжение

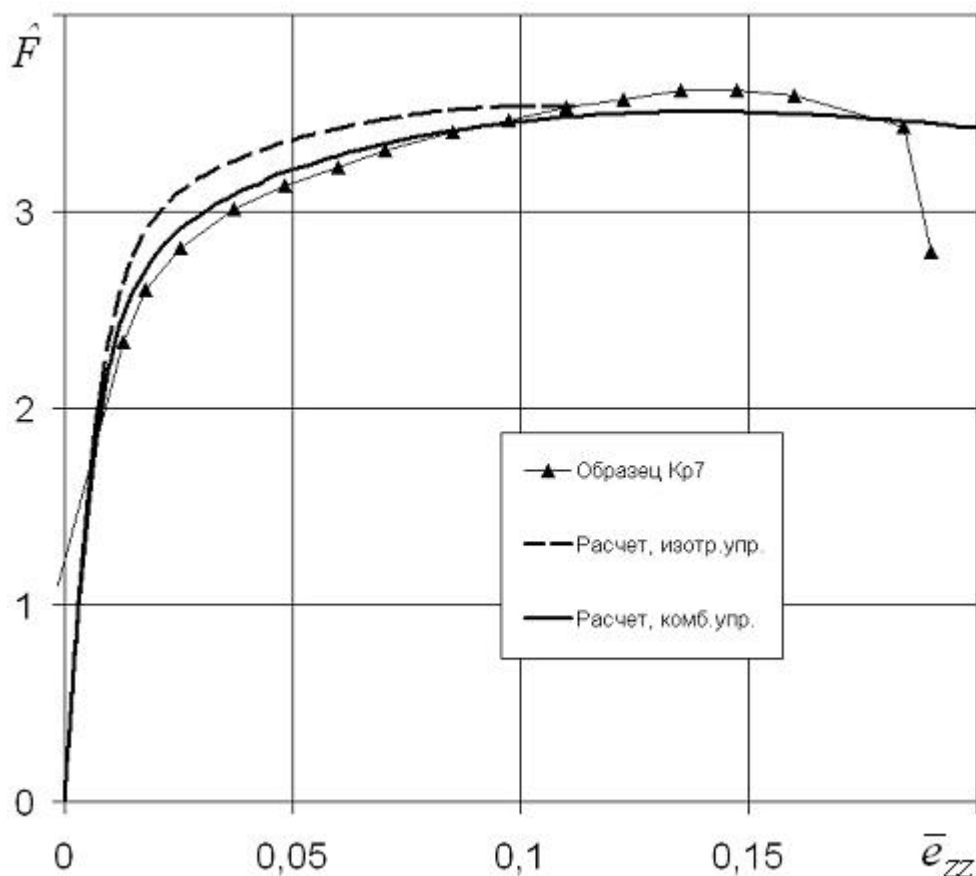


Рис. 3.7. Кручение (2 оборота) – растяжение

3.2.2. Исследование процесса деформирования при последовательном нагружении растяжением и кручением

Проводились квазистатические испытания сплошных цилиндрических образцов растяжением и кручением. Первоначально образцы растягивались до относительной осевой деформации $\bar{e}_{zz} \approx 0.2$ и $\bar{e}_{zz} \approx 0.48$ (Таблица 3.2), затем нагружались кручением до разрушения.

Таблица 3.2

№ эксперимента	Δl , мм – удлинение после I этапа нагружения	\bar{e}_{zz} - условная осевая деформация после I этапа нагружения
P1*	25,085	0,627
P2	9,395	0,235
P3	19,062	0,477
P4	8,253	0,206
P5*	23,514	0,588

* Данные приведены для максимального значения осевой силы

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 ($q_{\alpha} = q_1$). На рис. 3.8 приведены экспериментальные (точки) и расчетные (сплошная линия) зависимости осевой силы от относительной осевой деформации $\hat{F} = \hat{F}(\bar{e}_{zz})$. При численном моделировании монотонного растяжения образцов модели пластичности с изотропным и с комбинированным упрочнением дают одинаковый результат.

На рис. 3.9, 3.10 представлены экспериментальные (точки, треугольники, квадраты) и расчетная (сплошная линия) зависимости крутящего момента от условной сдвиговой деформации $\hat{M} = \hat{M}(\bar{e}_{\beta z})$ при кручении образцов после растяжения до условной осевой деформации $\bar{e}_{zz} \approx 0.2$ и $\bar{e}_{zz} \approx 0.48$ соответственно.

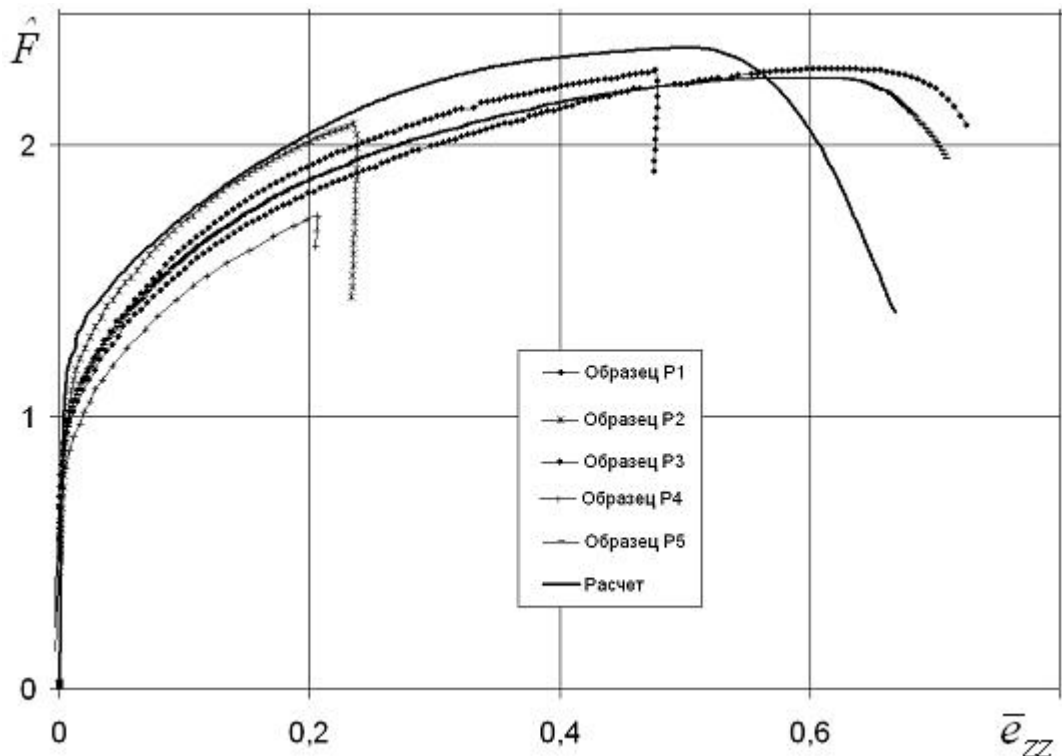


Рис. 3.8. I этап нагружения – растяжение. Сравнение расчета с экспериментом

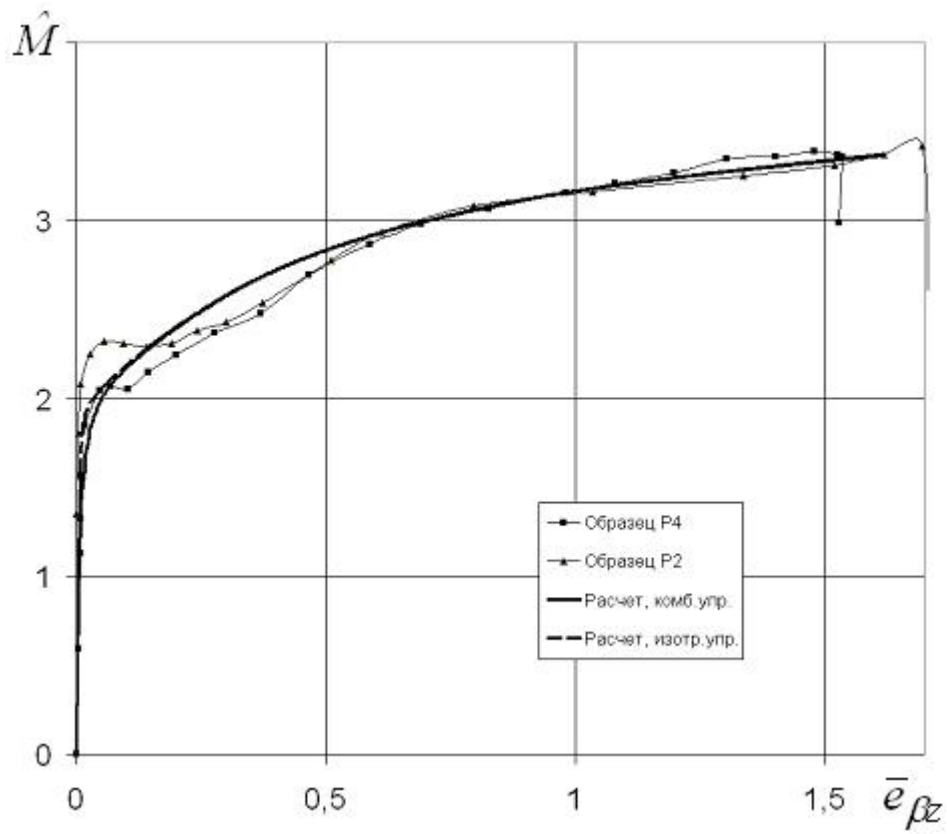


Рис. 3.9. Растяжение ($\bar{e}_{zz} \approx 0.2$) – кручение

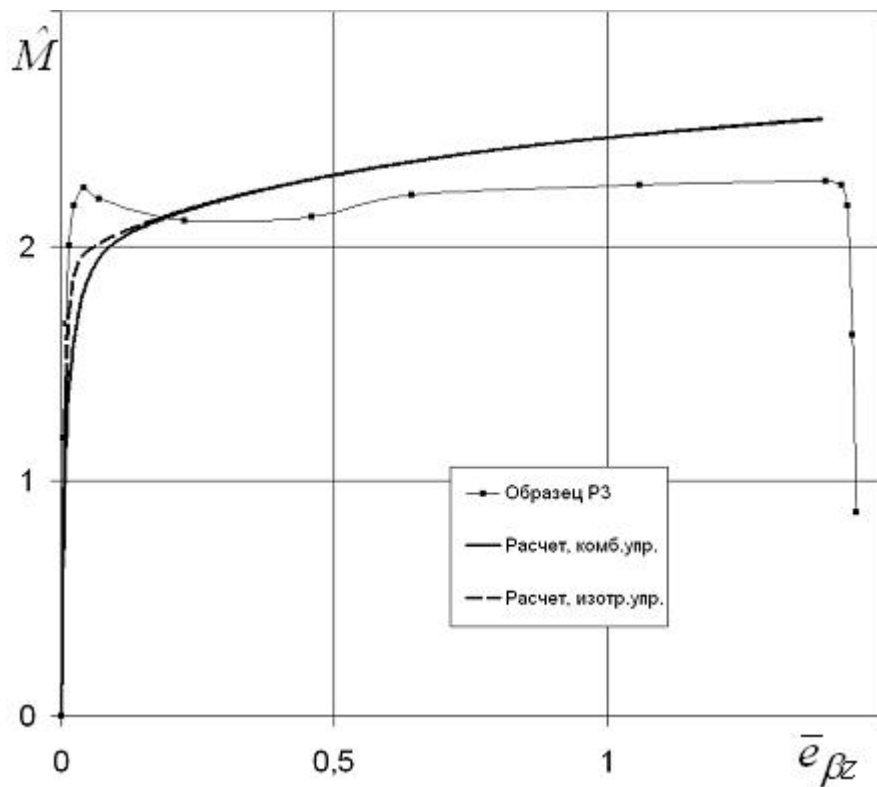


Рис. 3.10. Растяжение ($\bar{e}_{zz} \approx 0.48$) – кручение

На рис. 3.11 показаны «нырки» на диаграмме деформирования после излома траектории. Цифрами 1, 2, 3 отмечены кривые, соответствующие углам закручивания 1, 1,5 и 2 оборота после I этапа нагружения соответственно. Из рисунка видно, что длина и глубина «нырка» (Таблица 3.3) увеличиваются с увеличением степени деформации, накопленной на I этапе нагружения. Эти результаты качественно согласуются с известными экспериментальными данными при малых степенях деформаций [86].

Таблица 3.3

θ , оборот	1	1,5	2
Глубина нырка, %	17,7	18,9	20,0

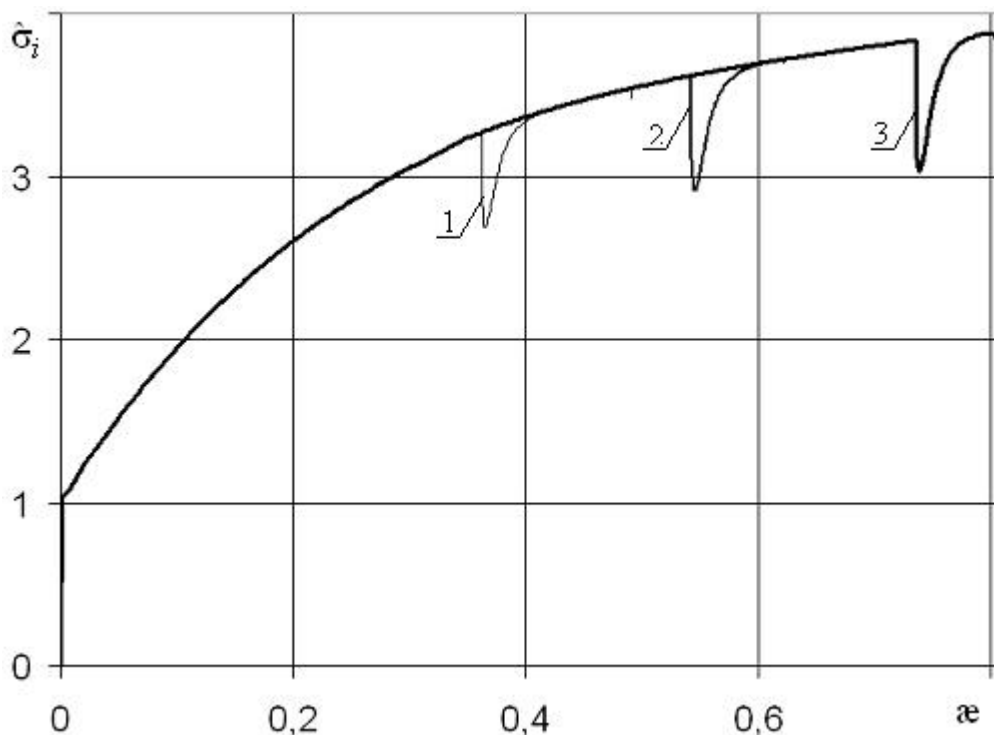


Рис. 3.11. «Нырки» на диаграмме деформирования после излома траектории

Таким образом, 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. Рассогласование результатов расчетов с экспериментальными данными, по-видимому, можно объяснить неучетом зависимости изотропной части упрочнения от направления деформирования.

3.2.3. Численное исследование влияния зависимости изотропной части упрочнения от направления деформирования после точки излома траектории на параметры напряженно-деформированного состояния

Проводилось численное исследование параметра q_2 модели пластичности (3.4)-(3.9), определяющего влияние изотропной части упрочнения на параметры НДС при последовательном нагружении кручением-растяжением после точки излома.

Согласно (3.8), при пропорциональном нагружении $\theta = 0$, $\cos \theta = 1$, $A = 0$, $q_{\text{ж}} = q_1$. При непропорциональном нагружении с углом $\theta = \pi/2$ $\cos \theta = 0$, $A = 1$, $q_{\text{ж}} = q_2$. В данном исследовании полагалось, что в процессе деформирования после излома траектории на $\theta = \pi/2$ $q_2 = kq_1$, где $k = \text{const}$.

На рис. 3.12-3.14 приведены зависимости осевой силы от относительной осевой деформации $\hat{F} = \hat{F}(\bar{e}_{zz})$ при растяжении образцов после I этапа нагружения кручением до 1, 1.5 и 2 оборотов соответственно. Точками и треугольниками отмечены экспериментальные данные, сплошными жирными линиями – расчеты без учета зависимости изотропной части упрочнения от направления деформирования после точка излома траектории ($k = 1$), тонкими – расчеты с учетом этой зависимости. Соответствующие значения параметра k приведены рядом с кривыми.

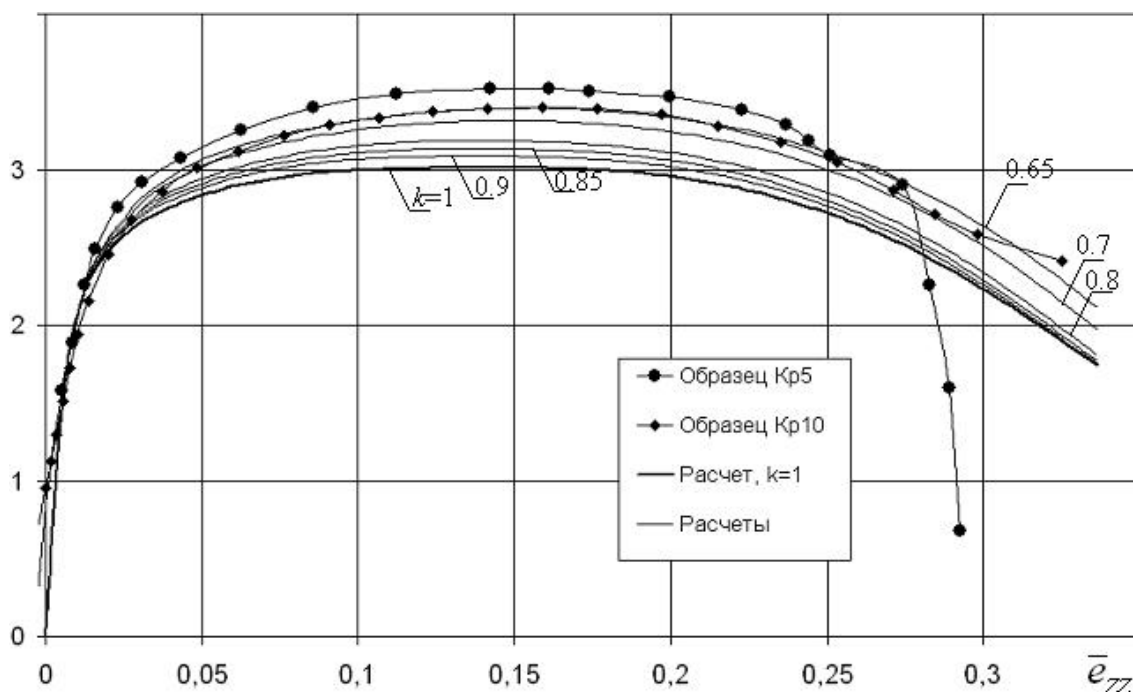


Рис. 3.12. Кручение (1 оборот) – растяжение. Исследование параметра q_2

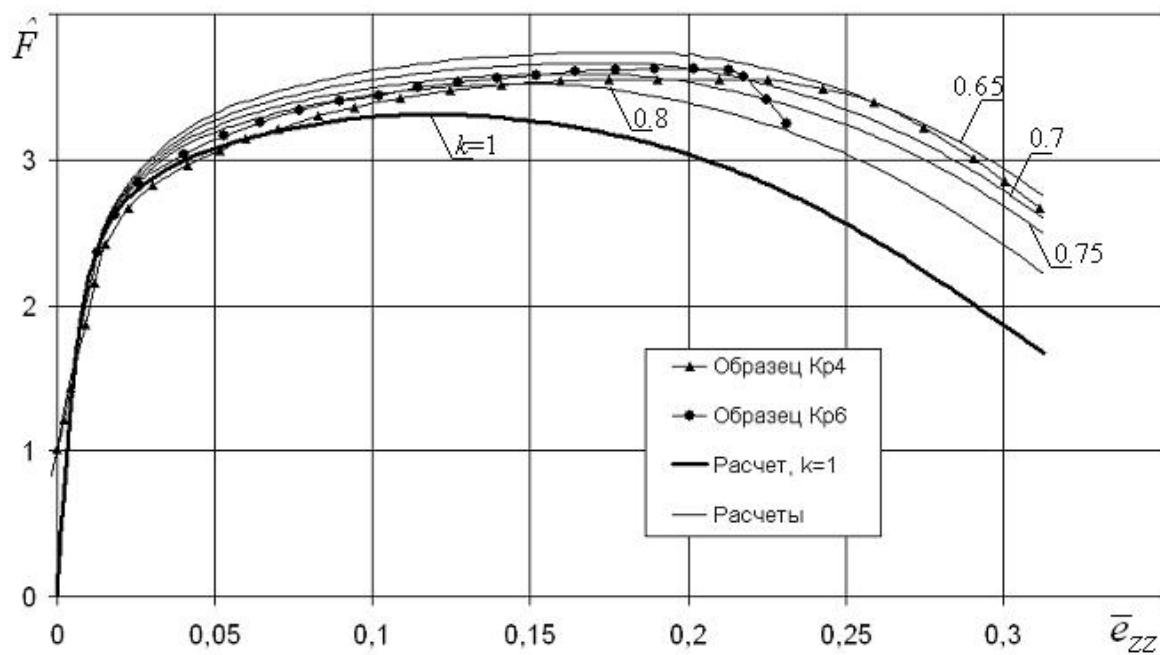


Рис. 3.13. Кручение (1.5 оборота) – растяжение. Исследование параметра q_2

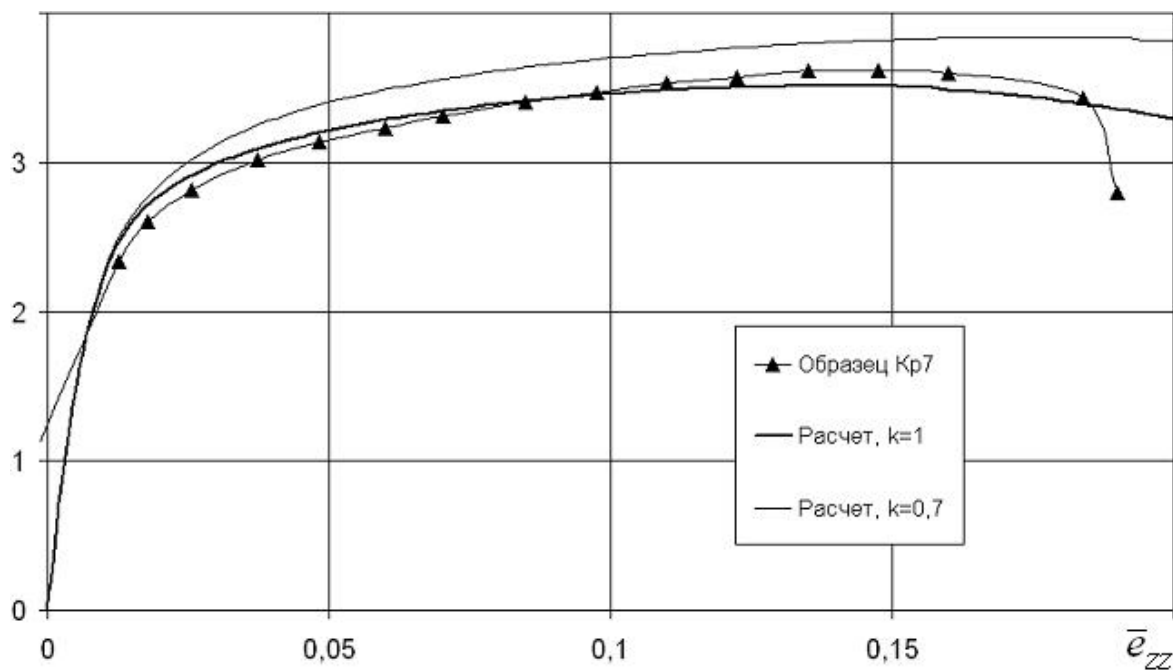


Рис. 3.14. Кручение (2 оборота) – растяжение. Исследование параметра q_2

Проведенные расчеты показали, что в изотропной части упрочнения следует учитывать направление деформирования.

3.2.4. Исследование вида разрушения при монотонном и сложном нагружении

На рис. 3.15 приведена фотография образцов после испытаний при монотонном нагружении до момента разрушения: 1 - кручение, 2 – растяжение, 3 - комбинированное нагружение кручением с растяжением. Видно, что при кручении не происходит потери устойчивости пластического деформирования с образованием шейки (как при растяжении), разрушение происходит от сдвиговых напряжений в плоскости, перпендикулярной оси симметрии стержня. При совместном действии кручения с растяжением образуется шейка, причем радиус ее минимального сечения больше, чем при чистом растяжении, а длина меньше, разрушение происходит по винтовой поверхности, определяемой максимальными сдвиговыми деформациями в зависимости от преобладания растяжения или кручения.

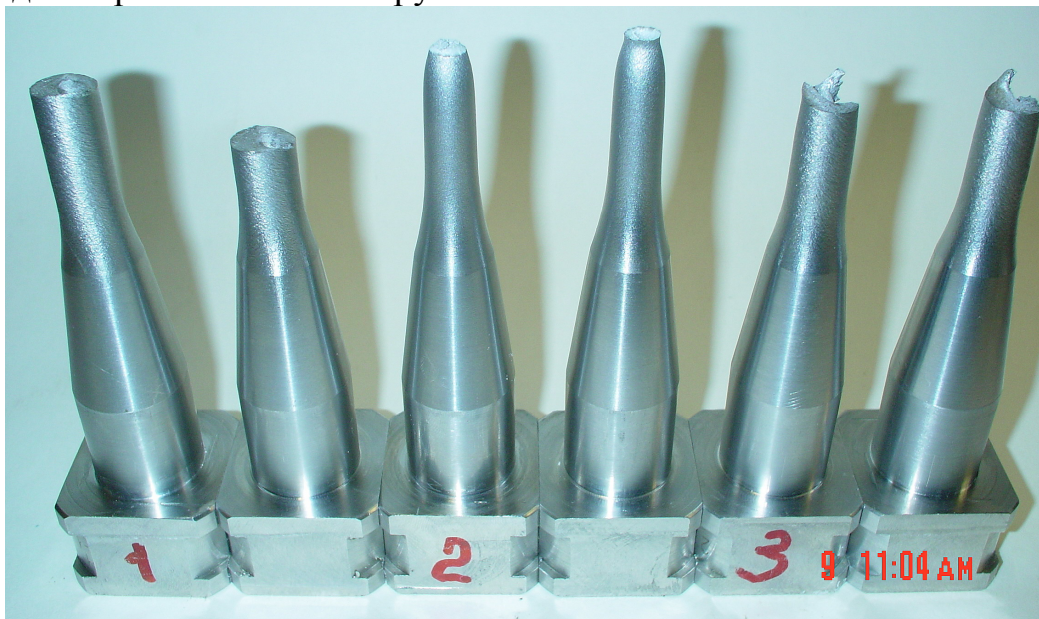


Рис. 3.15. Остаточные формы сплошных осесимметричных образцов при монотонном нагружении: 1 – эксперимент на кручение, 2 – эксперимент на растяжение, 3 – эксперимент на комбинированное нагружение

На рис. 3.16 приведена фотография образцов после испытаний по двузвенным ломаным траектория деформирования: 1 – растяжение, 2 – кручение до 1 оборота и растяжение до разрушения, 3 – кручение до 2 оборотов и растяжение до разрушения, 4 – кручение, 5 – растяжение до $\bar{\epsilon}_{zz} \approx 0.2$ и кручение до разрушения, 6 - растяжение до $\bar{\epsilon}_{zz} \approx 0.48$ и кручение до разрушения.



Рис. 3.16. Остаточные формы сплошных осесимметричных образцов при сложном нагружении: 1 – эксперимент на растяжение; 2, 3 – кручение и растяжение; 4 – эксперимент на кручение; 5, 6 - растяжение и кручение

На рис. 3.17, 3.18 приведены фотографии места разрушения образца, испытанного по программе: кручение до 2 оборотов, растяжение до разрушения. На рис. 3.18 образец повернут на 180° .

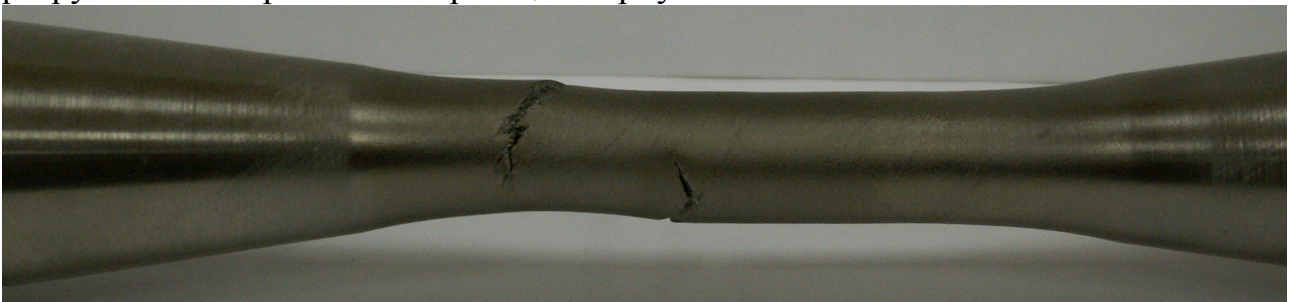


Рис. 3.17

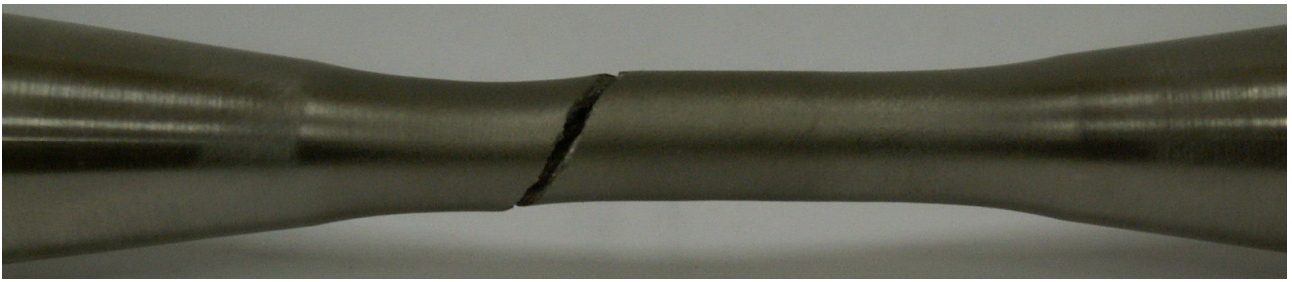


Рис. 3.18

На рис. 3.19-3.21 приведены фотографии места разрушения образца, испытанного по программе: кручение до 1.5 оборотов, затем растяжение до разрушения. На рис. 3.20 и 3.21 образец повернут на 90° и 180° .

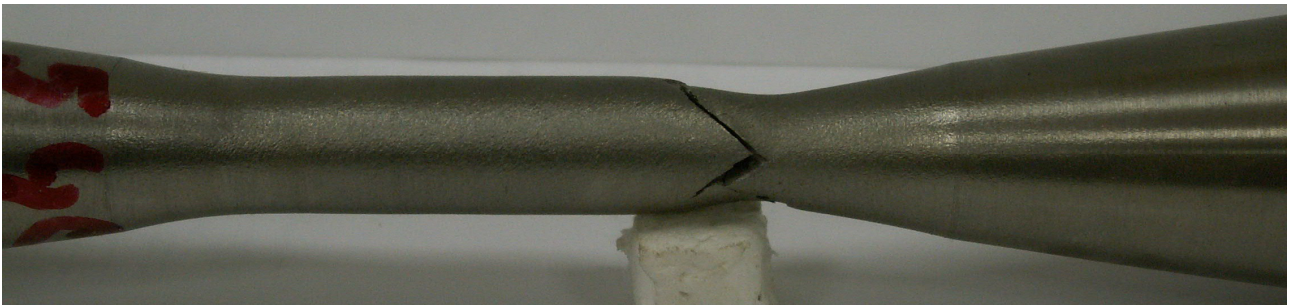


Рис. 3.19



Рис. 3.20



Рис. 3.21

По результатам исследования видно, что 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° 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° 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.

Различия в характере и параметрах разрушения при монотонном и сложном нагружении сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4

Тип нагружения	Вид разрушения
Растяжение	Потеря устойчивости пластического деформирования с образованием шейки
Кручение	Разрушение от сдвиговых деформаций в плоскости, перпендикулярной оси стержня
Совместное действие кручения и растяжения	Образуется шейка, радиус поперечного сечения которой больше, а длина меньше, чем при чистом растяжении.
Кручение после растяжения	Разрушение происходит по поверхности, перпендикулярной к оси стержня, как и при чистом кручении
Растяжение после предварительного закручивания на 1 оборот	Картина разрушения - типичная для растяжения с небольшими отклонениями в сторону смешанного характера, образуется шейка, по краю которой намечается зубчатая картина разрушения
Растяжение 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° к оси образца
Растяжение после предварительного закручивания на 2 оборота	Разрушение происходит по винтовой поверхности, которая наклонена под углом 45° к оси образца с наложением по краю зубьев меньшей амплитуды, чем в предыдущем случае

4.3. Выводы к главе 3

Для описания упругопластических свойств материала при сложном нагружении проведена модификация модели теории пластичности с изотропным и кинематическим упрочнением. Разработан алгоритм численной реализации этих соотношений.

По специально разработанной методике из базовых экспериментов получены материальные параметры модели пластичности при монотонном упругопластическом деформировании для конструкционной стали 08X18H10T при больших деформациях.

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.

Выполнена оценка влияния сложного (лучевого) нагружения на форму (вид) и предельные характеристики материала при разрушении в зависимости от вида нагружения.

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.

Заключение

Экспериментальная методика, разработанная на основе технологии цифровой фотографии, позволяет с достаточной для практических нужд точностью измерять большие деформации лабораторных образцов и элементов конструкций. Проведено теоретическое и экспериментальное обоснование ее точности. Построены диаграммы деформирования для стали марок 12X18H10T и 10X18H10T.

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 кинематическим нагружением кручением и (или) растяжением до разрушения. На основе проведенных экспериментов и расчетов оценены различия в характере и параметрах разрушения при монотонном и сложном нагружении.

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.

Список литературы

1. Аганин А.А., Кузнецов В.Б. Метод консервативной интерполяции интегральных параметров ячеек произвольных сеток // Динамика оболочек в потоке. – 1985. - вып.18. - С. 144-159.
2. Аксенов Л. Б., Востров В. Н., Вагин В. А. Экспериментальные методы решения задач пластического деформирования. - СПб.: Изд-во СПбГТУ. - 1998. - 112 с.
3. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х., Поляризованно-оптические методы механики деформируемого тела. – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит. – 1973. – 579 с.
4. Алехин В.П., Булычев С.И., Калмакова А.В. и др. Кинетическое индентирование в проблеме неразрушающего контроля и диагностики материалов. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. - т.70, №6. - С. 46-51.
5. Алфутов Н.А., Таирова Л.П. Возможности определения свойств монослоя в композите // Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов: Проблемы. – Рига: Зинате. – 1986. - С. 212-215.
6. Андрищенко А.Г., Малинин Н.Н. Пластическая неустойчивость ортотропных оболочек вращения // Изв. вузов. Машиностроение. – 1976. - № 3.
7. Аннин Б.Д. О потере устойчивости цилиндрической оболочки при кручении // Теория оболочек и пластин. Труды VIII Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластин. - М.: Наука. - 1973. - С. 82-84.
8. Аннин Б.Д., Жигалкин В.М. Поведение материалов в условиях сложного нагружения. – Новосибирск: Издательство СО РАН. - 1999. - 342 с.
9. Аннин Б.Д. Современные модели пластических тел. Новосибирск: НГУ. - 1975.
10. Аннин Б.Д. Циклическое деформирование в условиях сложного нагружения // Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии: Тр. Всесоюз. совещ., Киев, 1977. - Киев: Наукова думка. - 1978. - С. 113-116.
11. Аннин Б.Д., Русов Б.П. Экспериментальная проверка постулата изотропии в пространстве напряжений // Динамика сплошной среды. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО РАН. - 1969. - Вып. 3. - С. 122-125.
12. Аннин Б.Д. Экспериментальное исследование свойств материалов при сложном нагружении // Механика твердого тела. Варшава: Гос. науч. изд-во. - 1978. - С. 347-351.
13. Арутюнян Р.А., Вакуленко А.А. О многократном нагружении упруго-пластической среды // Изв. АН СССР. Механика. – 1965. - № 4. - С. 53-61.

14. Ахметзянов М.Х. К оценке систематической погрешности метода фотоупругих покрытий. Тр. НИИЖТ. - Новосибирск. – 1970. - вып. 96. - С. 43-51.
15. Ахметзянов М.Х., Албаут Г.Н., Барышников В.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния в шейке плоских металлических образцов при растяжении методом фотоупругих покрытий // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. - т.70, №8. - С.41-51.
16. Бабамурадов К.Ш., Дудура Н.И., Убайдиллаев А.У. Применение аппроксимационного метода СН-ЭВМ для решения упругопластических задач при сложном нагружении // В кн.: Вопросы вычислительной и прикладной математики. - Ташкент. - № 63. – 1981. - С. 69-80.
17. Бабамурадов К.Ш. Некоторые вопросы решения краевых задач пластичности при сложных многопараметрических нагружениях // В кн.: Вопросы вычислительной и прикладной математики. – Ташкент. - № 73. - 1984. - С.3-15.
18. Баженов В.Г. Нелинейные задачи динамики тонкостенных конструкций при импульсных воздействиях // Прикл. пробл. прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб., Горьк. ун-т. – 1981. - вып. 18. - С.57-66.
19. Баженов В.Г. Численное исследование нестационарных процессов деформации упругопластических оболочек // Проблемы прочности. – 1984. - №11. - С.51-54.
20. Баженов В.Г., Зефиоров С.В., Кочетков А.В. и др. Пакет программ «Динамика-2» для решения плоских и осесимметричных нелинейных задач нестационарного взаимодействия конструкций со сжимаемыми средами // Мат. моделирование. - 2000. - Т.12., № 6. - С. 67-72.
21. Баженов В.Г., Чекмарев Д.Т. Решение задач нестационарной динамики пластин и оболочек вариационно-разностным методом: учебное пособие. – Н.Новгород: Изд-во ННГУ. – 2000. –107 с.
22. Баженов В.Г. Математическое моделирование и методы идентификации деформационных и прочностных характеристик материалов // Физическая мезомеханика. - 2007г. - Том 10, №5. - С. 91-105.
23. Баженов В.Г., Зефиоров С.В., Осетров С.Л. Экспериментально-расчетный метод построения истинных диаграмм деформирования при больших деформациях на основе испытаний на твердость // ДАН. - 2006 г. - Том 407, №2. - С. 1-3.
24. Баженов В.Г., Зефиоров С. В., Осетров С. Л. Метод идентификации деформационных и прочностных свойств металлов и сплавов // Деформация и разрушение материалов. – 2007 г. - №3. - С. 43-47.
25. Баженов В.Г., Ломунов В. К. Экспериментально-теоретическое исследование процесса образования шейки при растяжении стального трубчатого образца до разрыва // Пробл. прочности и пластичности: Межвуз.

сборник. - Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета. – 2001. - вып. 63. - С. 35 – 41.

26. Баженов В.Г., Кибец А.И., Лаптев П.В. и др. Экспериментально-теоретическое исследование предельных состояний упругопластических стержней различного поперечного сечения при растяжении // Проблемы механики. Сб. статей к 90-летию со дня рождения А.И. Ишлинского. Под ред. Климова Д.М. и др. - М.: Физматлит. - 2003. - С.116-123.

27. Баженов В.Г., Крамарев Л.Н., Осетров С.Л. Экспериментальное и теоретическое исследование упругопластического деформирования и разрушения стального шара при сжатии между пластинами // Межвуз. сб. Проблемы прочности и пластичности. - Н.Новгород: Изд-во ННГУ. - 2003. - Вып.65. - С. 85-91.

28. Баженов В.Г., Зефирова С.В., Павленкова Е.В. Экспериментально-численный метод изучения деформационных и прочностных характеристик упругопластических материалов при кручении с растяжением // Проблемы механики деформируемых тел и горных пород. Сб. статей к 75-летию со дня рождения Е. И. Шемякина. - М.: ФИЗМАТЛИТ. - 2006 г. - С. 74-82 .

29. Баженов В.Г., Зефирова С.В., Крамарев Л.Н. и др. Моделирование процессов деформирования и локализации пластических деформаций при кручении-растяжении тел вращения // Прикладная математика и механика. - 2008. - Том 72, Вып. 2. - С. 342-350.

30. Баженов В.Г., Кибец А.И. Численное моделирование трехмерных задач нестационарного деформирования упругопластических конструкций методом конечного элемента // Изв. РАН МТТ – 1994. - №1. - с.52-59.

31. Баженов В.Г., Рузанов А.И., Угодчиков А.Г. О численных методах и результатах решения нестационарных задач теории упругости и пластичности // Численные методы механики сплошной среды. – 1985. - т.16, №4. - С.129-149.

32. Баженов В.Г., Чекмарев Д.Т. Численные методы решения задач нестационарной динамики тонкостенных конструкций // Изв. РАН МТТ, - 2001. - №5. - С. 156-173

33. Баженов В.Г., Зефирова С.В., Кибец А.И. О численной реализации вариационно-разностной моментной схемы решения нелинейных задач динамики нетонких оболочек при импульсном воздействии // Прикл. пробл. прочности и пластичности. Методы решения: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьк. ун-т. – 1988. - С. 66-73.

34. Бакиров М.Б., Зайцев М.А., Фролов И.В. Математическое моделирование процесса вдавливания сферы в упругопластическое полупространство // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2001. т.67, №1. - С.37-47.

35. Бакиров М.Б., Потапов В.В. Феноменологическая методика определения механических свойств корпусных сталей ВВЭР по диаграмме

вдавливания шарового индентора //Заводская лаборатория. – 2000. - №12. - С. 35-44.

36. Бастун В.Н. О влиянии геометрической формы конструкций на ее несущую способность // Прикл. механика. – 1973. - т.9, вып.8. - С. 57-63.

37. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука. – 1987. - 600с.

38. Белл Жд. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 2. Конечные деформации. – М.: Наука. – 1984. – 432с.

39. Бердин В.К., Кашаев Р.М. Об определении напряженного состояния при растяжении с кручением сплошного цилиндра // Проблемы прочности. – 2001. - № 1. – С. 28-37.

40. Бочарова С.А. О потере устойчивости и трещинообразования при разрушении толстостенных цилиндров // Изв. вузов Машиностроение. – 1979. - №5. - С. 5-8.

41. Бриджмен П. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Изд-во иностр. лит.. - 1955.

42. Бровман М.Я. Экспериментальная проверка постулата Друкера // ПМТФ. – 1978. - №6. - С. 142-148.

43. Будянский Б. Переоценка деформационных теорий пластичности. Сб. переводов, механика. - 1960. – № 2.

44. Булычев С.И. О корреляции диаграмм вдавливания и растяжения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2001. - т.67, №11. - С. 33-41.

45. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. – М.: Машиностроение. – 1990. - 224с.

46. Быков Д.Л., Коновалов Д.Н. Определение материальных функций нелинейной теории термовязкоупругости с использованием ее иерархической структуры // Изв. РАН МТТ. – 1999. - №5. - С. 189-205.

47. Важенцев Ю.Г., Исаев В.В. К вопросу о напряженном состоянии в шейке круглого и плоского образца при растяжении // Проблемы прочности. – 1988. - №4. - С. 66-69.

48. Васин Р.А. Определяющие соотношения теории пластичности. // Итоги науки и техники, Сер. Механика деформируемого твердого тела - М.: ВИНТИ. – 1990. - т. 21. - С. 3-75.

49. Васин Р.А., Давранов Ю. Об исследованиях сходимости метода СН-ЭВМ в теоретическом эксперименте. // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности: Материалы VII Всесоюз. конф. (Миасс, 1981). – Новосибирск. – 1982. - С. 299-304.

50. Васин Р.А., Ильюшин А.А., Моссаковский П.А. Исследование определяющих соотношений и критериев разрушения на сплошных и толстостенных трубчатых цилиндрических образцах. // Изв. РАН МТТ. – 1994. - №2. - С. 177-184.

51. Васин Р.А., Рябов А.А., Столяров Н.Н. Двухпараметрическое нагружение гибких пластин и оболочек в упругопластической области // Прикл. механика. – Киев. – 1985. - т.21, №1. - С. 117-119.
52. Васин Р.А., Столяров Н.Н. О применение метода СН-ЭВМ к задачам расчета напряженно-деформированного состояния пластин и оболочек // Прикл. механика. – Киев. – 1984. - т. 20, № 8. - С. 68-73.
53. Васин Р.А., Широков Р.И. Применение метода СН-ЭВМ к решению краевой задачи при простом нагружении // Вопросы вычислительной и прикладной математики. – Ташкент. – 1983. - №70. - С. 130-135.
54. Васин Р.А., Ленский В.С., Ленский Э.В. Динамические зависимости между напряжениями и деформациями // Новое в зарубежной науке. Проблемы динамики упругопластических сред. – М., 1975.
55. Вилкова Г.А., Садырин А.И. Ударное деформирование двухслойной металлокерамической пластины // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Анализ и оптимизация деформируемых систем: Всесокз. межвуз. сб. /Горьк. ун-т. – 1988. - С. 120-124.
56. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Краевые задачи континуальной механики разрушения. // - Пермь: Препринт, УрОРАН, 1992, 78с.
57. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. – М.: Наука, 1997, 288с.
58. Виноградова А.М. Об образовании шейки при растяжении полых цилиндрических образцов // Изв. АН СССР МТТ. – 1971. - №6. - С. 150-157.
59. Воронцов В.К., Зотов В.Ф., Рукавишников А.А. и др. Определение напряжений в шейке растягиваемого образца по пластическим характеристикам // Новые методы испыт. Металлов. – М.: Металлургия. – 1973. - вып.2. - С. 85-88.
60. Воронцов Г.В., Плющев Б.И., Резниченко А.И. Определение приведенных упругих характеристик армированных композитных материалов методами обратных задач тензометрирования //Механика композит. материалов. – 1990. - №4. - С. 733-736.
61. Годунов С.К., Забродин А.В. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976.
62. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. – М.: Наука, 1973.
63. Голованов А.И., Бережной Д.В. Метод конечных элементов в механике деформируемых твердых тел. – Казань, 2001, 301с.
64. Грешнов В. М., Боткин А. В., Напалков А. В.. Анализ напряженно-деформированного состояния в шейке круглого образца при растяжении // Изв. вузов. Машиностр. – 1998. - №4-6. - С. 22-27.
65. Григолюк Э.И., Кабанов В.В. Устойчивость оболочек. – М.: Наука, 1978.

66. Григорьев А.С. О теории и задачах равновесия оболочек при больших деформациях // Изв. АН СССР МТТ. – 1970. - №1.
67. Гулидов А.И., Фомин В.М. Модификация метода Уилкинса для решения задач соударения тел. – Новосибирск, 1980, 30с. (Препринт /СО АН СССР, ИТПМ, №49).
68. Давиденков Н.А., Спиридонова Н.И. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца //Заводская лаборатория. – 1945. - №6. - С. 583-593.
69. Давиденков Н.Н. О влиянии размеров образцов на их механические свойства // Заводская лаборатория. – 1960. - №3. - С. 319-320.
70. Давиденков Н.Н. О природе шейки при растяжении образцов // Журнал технической физики. – 1955. - т.25, вып.5. - С. 877-880.
71. Давиденков Н.Н., Рене И.П. // Заводская лаборатория. – 1963. - т.29, №5. - С. 51-52.
72. Дайчик М.Л., Пригоровский Н.И., Хуршудов Г.Х. Методы и средства натурной тензометрии: справочник. - М.: Машиностроение, 1989. - 240 с. (Основы проектирования машин).
73. Дегтярев В.П. Деформации и разрушение в высоко напряженных конструкциях. – М.: Машиностроение, 1987, 105с.
74. Дель Г.Д, Одинг С.С. Устойчивость пластического растяжения // Прикладная механика. – 1982. - т. XVIII, №11. - С. 86-91.
75. Дильман В. Л., Остсемин А. А.. К анализу напряженного состояния в шейке образца при растяжении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1998. - т.64, №1. - С. 47-49.
76. Дресвянников В.И. О численной реализации нелинейных уравнений динамики упругопластических оболочек // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб., Горьк. ун-т. – Горький. – 1976. - вып.3. - С. 82-90.
77. Друкер Д. О постулате устойчивости материала в механике сплошной среды // Механика. Сб. переводов иностр. статей. – 1964. - №3. - С. 115-128.
78. Дюрелли А., Паркс В. Анализ деформаций с использованием муара. - М.: Мир, 1974.
79. Еникеев, Ф.У. Кинематика процесса растяжения с кручением однородного цилиндрического стержня из сверхпластичного материала // Металлы. - 1999. - № 2. - С. 89-98.
80. Жуков А.М. Новые дополнительные данные о свойствах сплава Д16Т при растяжении с кручением // Изв. РАН МТТ. - 1995. - №2. - С. 175-180.
81. Зайков М.А., Бусенко Г.А. К вопросу о критерии напряженного состояния при растяжении с образованием шейки на образце // Тр. ЦНИИ технол. маш.. – 1972. - №111. - С. 47-50.

82. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация / Пер. с англ. под ред Н.С. Бахвалова. – М.: Мир, 1986, 318с.
83. Золоторевский С.М. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1983, 352с.
84. Зубов Л.М., Шейдаков Д.Н. О влиянии кручения на устойчивость упругого цилиндра при растяжении // Прикладная математика и механика. – 2005. –Т. 69, вып. 1. – С. 53-59.
85. Зубчанинов В.Г. Математическая теория пластичности: Монография. – Тверь: ТГТУ, 2002, 300с.
86. Зубчанинов В.Г. Механика сплошных деформируемых сред. Тверь; ТГТУ, Чудо, 2000, 703с.
87. Иванова В.С. О природе деформаций на площадке текучести металлов // Докл. АН СССР. – 1954. - т. 94, №2. - С. 217.
88. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. – М.: Изд-во МГУ, 1990, 310с.
89. Ильюшин А.А. Пластичность: Основы общей математической теории. – М.: Изд-во АН СССР, 1963, 272с.
90. Ильюшин А.А., Ленский В.С. Модель и алгоритм. // Всесоюзн. межвуз. сб. Прикладные проблемы прочности и пластичности. – 1975. - вып.1. - С. 3-18.
91. Ильюшин А.А., Ленский В.С. О соотношениях и методах современной теории пластичности. //Успехи механики деформируемых сред. – М.: Наука. – 1975. - С. 240-255.
92. Ильюшин, А.А. Метод СН-ЭВМ в теории пластичности // Проблемы прикладной математики и механики. – М.: Наука. - 1971. - С. 166-178.
93. Ильюшин А.А. Об одной модели, поясняющей аппроксимационный метод СН-ЭВМ в теории пластичности // Упругость и неупругость. – М.: Изд-во МГУ. - 1971. - вып.1. - С. 52-58.
94. Исследования и изобретательство в машиностроении: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / М.Ф. Пашкевич, А.А. Жолобов, Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро, В.М.Пашкевич; Под общ. Ред. М.Ф.Пашкевича. - Мн.: Адукацыя і выхаванне, 2005. - 287 с.: ил.
95. Ишлинский А.Ю., Ивлев Д.Д. Математическая теория пластичности. – М.: Физматлит, 2001, 2003, 704с.
96. Кадашевич Ю.И., Новожилов В.В. Микронапряжения в конструкционных материалах. – Л.: Машиностроение, 1990, 233с.
97. Кадашевич Ю.И., Новожилов В.В. Теория пластичности, учитывающая эффект Баушингера // ДАН СССР. – 1957. - Т. 117, вып.4. - С. 586-588.

98. Кадашевич, Ю.И., Новожилов В.В. Теория пластичности, учитывающие остаточные микронапряжения // ПММ. – 1958. - т.22, №1. - С. 79-89.
99. Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. Монография. – Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 1999. – 226 с.
100. Кайбышев О.Д. Пластичность и сверхпластичность металлов. – М.: Металлургия, 1975, 280с.
101. Капустин С.А., Бухарев Ю.Н., Митин А.А. и др. Численное моделирование процесса упругопластического деформирования и разрушения стандартного образца при растяжении // Проблемы машиностроения и надежности машин. – М.: Изд-во РАН. – 1998. - №3. - С. 52-56.
102. Капустин С.А., Латухин А.Ю. О применении неявных схем для исследования нестационарного поведения криволинейных стержней с учетом геометрической нелинейности. // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Алгоритмизация и автоматизация решения задач упругости и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. /Горьк. ун-т. – 1980. - С. 68-75.
103. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974, 312с.
104. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. 420с.
105. Каюмов Р.А. Расширенная задача идентификации механических характеристик материалов по результатам испытаний конструкций // Изв. РАН МТТ. – 2004. - № 2. - С. 94-103.
106. Каюмов Р.А. Связная задача расчета механических характеристик материалов и конструкций из них //Изв. РАН МТТ. – 1999. - № 6. - С. 118-127.
107. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия – М: «Наука», 1985, 224 с.
108. Ключников В.Д. О возможном пути построения соотношений пластичности // ПММ. - 1959. - т.23, вып.2.
109. Ковальчук Б.И. К вопросу о потери устойчивости пластического деформирования оболочек // Пробл. прочности. – 1983. - № 5. - С. 11-16.
110. Колпак Е.П. Устойчивость безмоментных оболочек при больших деформациях. – С.Петербург: СПбГУ, 2000, 248с.
111. Корнеев А.И., Шуталев В.Б. Численное исследование трехмерного напряженного состояния стержня при ударе торцом и боковой поверхностью // Аналитические и численные методы решения краевых задач пластичности и вязкоупругости. – Свердловск. – 1986. - С. 77-82.
112. Коротких Ю.Г. Математическая модель упругопластической среды, основанная на концепции кинематического и изотропного упрочнения и ее реализация в статических и кинематических задачах // Тр. II Всесоюз. Конф. по

числ. методам решения задач теории упругости и пластичности. – Новосибирск: Изд. ВЦ СО АН СССР. - 1971. - С. 156-169.

113. Коротких Ю.Г. О базовом эксперименте для модели термовязкопластичности // Прикладные проблемы прочности и пластичности. – 1977. - № 6. - С. 3-20.

114. Коротких Ю.Г., Маковкин Г.А. О моделировании процессов непропорционального упругопластического деформирования на базе уравнений пластичности с комбинированным упрочнением // Прикладные проблемы прочности и пластичности. – М.: Товарищество научных изданий КМК. - 1997. - С. 5-10.

115. Коротких Ю.Г. О некоторых проблемах численного исследования упругопластических волн в твердых телах // Методы решения задач упругости и пластичности: Учен. зап. Горьк. ун-т. – 1971. - вып.134(4), сер. Механика. - С. 69-90.

116. Кошелев П.Ф., Ужик Г.В. Исследование пластической деформации в местах концентрации напряжений методом травления // Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение. – 1959. - № 1.

117. Кравчук А.С. О методе последовательных приближений в теории пластичности при сложном нагружении // Изв. АН СССР. МТТ. – 1969. - № 4. - С. 188-191.

118. Крамарев Л.Н. Методика экспериментального определения скалярных функций модели термовязкопластичности для знакопеременного неизотермического нагружения. Дисс. ... канд. физ.-мат. Наук. - М., 1977, 127 с.

119. Кукуджанов В.Н. Численное моделирование динамических процессов деформирования и разрушения упругопластических сред // Успехи механики. – 1985. - т.8, №4. - С. 21-65.

120. Кукуджанов В.Н., Кондауров В.И. Численное решение неоднородных задач динамики твердого тела. // Пробл. динамики упругопластических сред. – М.: Мир. – 1975. - С. 39-84.

121. Кукуджанов, В.Н. Микроскопическая модель разрушения неупругого материала и ее применение к исследованию локализации деформаций // Изв. РАН МТТ. – 1999. - № 5.

122. Курант Р., Фридрихс, Леви Г. О разностных уравнениях математической физики // Успехи математических наук. – 1940. - вып.8. - С. 112-125.

123. Кутяйкин В.Г. К вопросу определения коэффициента напряженного состояния в шейке образца при растяжении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. - №9. т.68. - С. 53-55.

124. Кутяйкин В.Г. Расчет истинных значений пластичности и напряжения течения при испытаниях на растяжение // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. - т.70, №5. - С. 54-57.

125. Лебедев А.А., Марусий О.И., Чаусов Н.Г. и др. Исследование кинетики разрушения материалов на заключительной стадии деформирования // Проблемы прочности. – 1982. - №1. - С. 12-18.
126. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г. Установка для испытания материалов с построением полностью равновесных диаграмм деформирования // Проблемы прочности. – 1981. - №12. - С. 104–106.
127. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., Евецкий Ю.П. Методика построения полных диаграмм деформирования листовых материалов // Проблемы прочности. – 1986. - №9. - С. 29–32.
128. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., Марусий О.И. и др. Кинематика разрушения листовой аустенитной стали на заключительной стадии деформирования // Проблемы прочности. – 1989. - №3. - С. 16–21.
129. Лебедев Д.В. Испытания на растяжение геометрически подобных образцов // Методы и средства контроля в горной металлургии. – М.: Металлургия, 1984, с.77-80.
130. Ленский В.С. Современные вопросы и задачи пластичности в теоретическом и прикладном аспектах // Упругость и неупругость. – М.:Изд-во МГУ. - 1978. - вып.5. - с. 65-96
131. Людвик П. Основы технологической механики // Расчеты на прочность. – М.: Машиностроение. -1971. - вып.15. - С. 130-168.
132. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975, 399с.,
133. Малинин Н.Н., Петросян Ж.Л. Напряжения в наименьшем сечении шейки растянутого круглого образца // Изв. вуз. Машиностроение. – 1967. - №6. - С. 34-39.
134. Марковец М.П. Определение механических свойств по твердости. – М.: Машиностроение, 1979, 191с.
135. Марковец М.П., Дегтярев В.И., Матюнин В.М. Построение диаграмм твердости при вдавливании шара. Металл в современных энергоустановках. - М.: Энергия, 1972.
136. Марковец М.П., Матюнин В.М., Семин А.М. // Изв. АН СССР МТТ. – 1985. - № 4. - С. 185-187.
137. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1980.
138. Матвеев В.П., Юрлова Н.А. Идентификация эффективных упругопостоянных композитных оболочек на основе статических и динамических экспериментов // Изв. РАН МТТ. – 1998. - №3. - С. 12-20.
139. Матлин М.М., Мозгунова А.И. Аналитическое определение параметров внедрения сферического индентора по диаграмме растяжения материала контртела // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2001. - т.67, №11. - С. 47-51.
140. Матюнин В.М. // Прикладная физика. – 1995. - № 3-4. - С. 141-153.

141. Матюнин В.М. Методы твердости в диагностике материалов. Состояние, проблемы и перспективы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. - т.70, №6. - С. 37-41.
142. Матюнин В.М. Особенности перехода равномерной деформации в сосредоточенную // Тр. МЭИ. – 1976. - вып. 305. - С. 76-78.
143. Матюнин В.М., Борисов В.Г., Юзиков Б.А. // Дефектоскопия. – 1995. - № 8. - С. 61-68.
144. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара. ГОСТ 22762-77.
145. Метод конечных элементов в механике твердых тел. // Под общ. ред. А.С. Сахарова и И. Альтенбаха. -Киев: Вища школа, Головное изд-во, 1982.
146. Методы численного анализа волновых процессов в сплошных средах и тонкостенных конструкциях с учетом сопутствующих явлений / В.Г. Баженов, С.М. Белевич, Ю.Г. Коротких, Е.И. Санков, А.Г. Угодчиков // Нелинейные и тепловые эффекты при переходных волновых процессах: Тр. симпозиума. Горький – Таллин. - 1973. - Ч. 1. - С. 135-165.
147. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука, 1993, 249с.
148. Мофа Н.Н., Пресняков А.А., Черноглазова Т.В. Влияние размеров образцов на показатели прочности бескислородной меди // Проблемы прочности. – 1984. - №9. - С. 64-67.
149. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. // Пер. с англ. под ред. Г.С. Шапиро. М.: Изд-во иностр. Лит., 1954, т.1., М.: Мир, т.2, 1969.
150. Наумов Н.М., Савельева В.В., Комарова В.П. К вопросу об унификации круглых разрывных образцов при испытании на растяжение алюминиевых сплавов // Технол. легк. сплавов. – 1983. - № 11-12. - С. 39-41.
151. Никитин Л.В., Рыжак Е.И. Об осуществимости состояний материала, соответствующих «падающему» участку диаграммы // Изв. АН СССР МТТ. – 1986. - №2. – С. 155-161.
152. Нох В.Ф. СЭЛ - совместный эйлера-лагранжев метод для расчета нестационарных двумерных задач // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967, с.128-184.
153. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. – М.: Мир, 1976, 464с.
154. Одинг С.С. Исследование процесса образования и развития шейки при растяжении цилиндрического образца // Проблемы прочности. – 1983. - №10. - С. 103-106.
155. Оптическая голография / под ред. Колфилда Г., в 2-х томах – М: “Мир”, 1982, 736 с.
156. Осетров, С.Л. Идентификация монотонных процессов деформирования и предельных состояний упругопластических элементов

конструкций: Дис...канд.физ.-мат.наук: 01.02.06 / С.Л. Осетров. – Н.Новгород, 2004. – 119 с.

157. Павленкова Е.В. Ч Численное решение обобщенных двумерных нестационарных задач кручения упругопластических тел вращения: Дис...канд.физ.-мат.наук: 01.02.06 / Е. В. Павленкова. – Н.Новгород, 2006. – 160 с.

158. Патент на изобретение № 2324162 "Способ определения деформационных и прочностных свойств материалов при больших деформациях и неоднородном напряженно-деформированном состоянии" / Баженов В.Г. (RU), Зефилов С.В. (RU), Крамарев Л.Н. (RU), Осетров С.Л. (RU), Павленкова Е.В. (RU). Заявка № 2006115805. Приоритет изобретения 06мая 2006 г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 мая 2008 г.

159. Пежина П. Моделирование закритического поведения и разрушения диссипативного твердого тела. // Теоретические основы инженерных расчетов. - 1984. - т.106. - №4. - С. 107-117.

160. Петросян Ж.Л. //Изв. вузов. Машиностроение. - 1967. - №7. - С. 54-58.

161. Петросян Ж.Л., Ширшов А.А. К построению диаграммы деформирования после построения шейки // Изв. вузов. Машиностроение. - 1967. - №2. - С. 27-30.

162. Победря Б. Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Изд-во МГУ, 1981.

163. Полухин П.И., Воронцов В.К., Кудрин А.В., Чиченев Н.А. Деформации и напряжения при обработке металлов давлением (применение методов муара и координат сеток). – М.: Metallurgia, 1974.

164. Прагер В. Проблемы теории пластичности // Пер. с нем. – М.: Физматгиз, 1958.

165. Пресняков А.А. Локализация пластической деформации. – М.: Машиностроение, 1988, 56с.

166. Пригоровский Н. И., Панских В. К. Метод хрупких тензочувствительных покрытий. - М.: Наука, 1978, 184 с.

167. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. Справочник. - М.: Машиностроение, 1983, 248 с.

168. Радченко В.П., Небогина Е.В., Басов М.В. Структурно-феноменологический подход к описанию полной диаграммы упругопластического деформирования // Изв. вуз. Машиностроение. - 2000. - №5-6. - С. 3-13.

169. Ревуженко А.Ф., Чанышев А.И., Шемякин Е.И. Математические модели упругопластических тел // Актуальные проблемы вычислительной математики и математического моделирования.- Новосибирск: Наука, 1985.

170. Ренне И. П. Теоретические основы экспериментальных методов исследования деформаций методом сеток в процессах обработки металлов давлением. – Тула: ТПИ, 1979, 96 с.
171. Рикардс Р., Чате А. Идентификация механических свойств композитных материалов на основе планирования экспериментов // Механика композит. материалов. - 1998. - т.34, №1. - С. 3-16.
172. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. – М.: Мир, 1972, 418с.
173. Рыжак Е.И. К вопросу об осуществимости однородного закритического деформирования при испытаниях в жесткой трехосной машине // Изв. АН СССР МТТ. - 1991. - №1. - С. 111-127.
174. Садырин А.И. Алгоритм нерегулярной перестройки плоских треугольных сеток в МКЭ // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Алгоритмизация и автоматизация решения задач упругости и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. /Горьк. ун-т. - 1985. - С. 8-13.
175. Сазанова Н.Д. Испытание жаропрочных материалов на ползучесть и длительную прочность. – М.: Машиностроение, 1965.
176. Самарский А.А. Теория разностных схем. - М.: Наука, 1983.
177. Сегал В.М. Пластическое течение при растяжении осесимметричных образцов с шейкой // ПМТФ. - 1969. - №2. - С. 141-144.
178. Стружаков В.В., Миронов В.И. Деформационное разрушение материала в элементах конструкций. – Екатеринбург: УрОРАН, 1995, 190с.
179. Суворова Ю.В., Дабрынина В.С., Статников И.Н., Барт Ю.Я. Определение свойств композита в конструкции методом параметрической идентификации // Механика композит. материалов. - 1989. - №1. - С.150-157.
180. Сухарев И.П., Ушаков Б.Н. Исследование деформаций и напряжений методом муаровых полос. - М.: Машиностроение, 1969, 208с.
181. Таирова Л.П. Расчет упругих постоянных монослоя по экспериментально определенным упругим характеристикам многослойных армированных пластиков // Сб. тр. МВТУ. - 1987. - № 22. - С. 3-9.
182. Теокарис П. Муаровые полосы при исследовании деформаций. – М.: Мир, 1972.
183. Терегулов И.Г., Каюмов Р.А., Бутенко Ю.И. и др. Определение механических характеристик композитов по результатам испытаний многослойных образцов //Механика композит. материалов. - 1995. - т.31, №5. - С. 607-615.
184. Тимошенко С.П. История науки о сопротивлении материалов с краткими сведениями из истории теории упругости и теории сооружений. – М.: Гостехиздат, 1957.
185. Угодчиков А.Г., Баженов В.Г., Рузанов А.И. О численных методах и результатах решения нестационарных задач теории упругости и пластичности //

Численные методы механики сплошной среды, СО АН СССР. – Новосибирск. - 1985. - т.16, №4. - С. 129-149.

186. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. - М.: Мир, 1967. с.212-263.

187. Фракз В., Сташович Ф. Вычисление диаграммы предельных деформаций для стального листа, подвергнутого глубокой вытяжке // Материалы 4-го Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», Ярополец, 14-18 февраля, 2000, - М.: Графрос. - 2000. - С. 48-49.

188. Фридман Я. Б., Зилова Т. К., Демина Н. И. Изучение пластической деформации и разрушения методом накатанных сеток. – М.: Оборонгиз, 1962.

189. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч.1 Деформация и разрушение. – М.:Машиностроение, 1974, 472с.; Ч.2. Механические испытания. Конструкционная прочность. – М.: Машиностроение, 1974, 368с.

190. Харлоу Ф.Х. Численный метод частиц в ячейках для задач гидродинамики // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир. - 1967. - С. 316-342.

191. Хлопотов О.Д. Напряженное состояние растянутого цилиндрического образца // Проблемы прочности. - 1974. - №4. - С. 78-81.

192. Христенко И.Н., Пашенко А.А. Условие образования шейки при растяжении стальных образцов // Изв. АН СССР, Металлы. - 1987. - №6. - С. 105-107.

193. Цвелодуб И.Ю. К определению прочностных характеристик физически нелинейного включения в линейно-упругой среде // ПМТФ. - 2000. - т.41, №4. - С. 178-184.

194. Черепанов Г.П. О закритических деформациях // Проблемы прочности. - 1985. - №8. -С. 3-8.

195. Шин Р.Г., Катков В.Л. Механизмы деформирования микронеоднородной среды // Проблемы прочности. - 1987. - №10. - С. 72–74.

196. Шнейдерман А.Ш. О распределении деформаций в шейке образца при растяжении // Заводская лаборатория. - 1975. - т.41, №6. - С.728-730.

197. Шульц У.Д. Двумерные конечно-разностные уравнения в переменных Лагранжа. // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967, с.9-54.

198. Экспериментальная механика: в 2-х т. / Под ред. А. Кобаяси.- М: Мир, 1990.

199. Яхно В.Г. Обратные задачи для дифференциальных уравнений упругости. – Новосибирск: Наука, 1990, 303с.

200. Belytchko T., Mullen R. Stability explicit-implicit mesh partitions in time integrations //Int. J. Num. Meth. in Eng., 1979, v.12, p.1575-1586.

201. Courage W.M.G., Schreurs P.J.G., Janssen J.D. Estimation of mechanical parameter values of composites with the use of finite element and identification technique //Comput. and Struct., 1990, v.34, №2, p.231-237.
202. Francis H.A. //Journal of Engineering Materials and technology, 1976, №7, p.272-281
203. Frederiksen P.S. Experimental procedure and results for the identification of elastic constants of thick orthotropic plates //J. Composite Mater., 1997, v.31, №4, p.360-382.
204. Haggag F.M. Use of Ball Indentation Testing to Measure Flow Properties and Estimate Fracture Toughness in Metallic Materials //ASTM STP 1092, 1999, P.208.
205. Hasanov A. An inverse problem for an elastoplastic medium. //SIAM J. Appl. Math., 1995, 55, №6, p.1736-1752.
206. Hasanov A., Seyidmamedov Z. The solution of an axisymmetric inverse elasto-plastic problem using penetration diagrams. //Int. J. Non-Linear Mech., 1995, v.30, №4, p.465-477.
207. Hendriks M.A., Oomens C.W.J., Jans H.W.J., Janssen J.D. A numerical experimental approach for mechanical characterization of composites //Proc. 9th Int. Conf. Experim. Mech. Copenhagen, 1990. Copenhagen: Danish Counc. Sci. and Industr. Res., 1990, v.2, p.552-561.
208. Hertz H. //J. Reine Angew Math., 92, 156, 1881. Reprinted in English in 1896 Hertz's Miscellaneous Papers (London, Macmillan), chap.5.
209. Hill R. Mathematics Theory of Plasticity – Oxford: Clarendon Press, 1950, 97p.
210. Huges T.J.R., Pister K.S., Taylor R.L. Implicit-explicit finite elements in nonlinear transient analysis. //Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., 1979, v.17-18, №1, p.159-182.
211. Ishibashi T., Shimoda S. //Bull. Jpn. Soc. Mech. Eng., 1986, v.29, №258, p.4013-4019.,
212. Ishibashi T., Shimoda S. //JSME. International Journal, Ser.1, 1988, v.31, №1, p.117-125.
213. J. Guild, The Interference System of Crossed Diffraction Gratings, Clarendon Press, Oxford, 1956.
214. Jonson K.L. //Mech. Phys. Solids, 1970, v.18, №2, p.124-137.
215. Kaftanoglu B. Plastic Instability of Thin Shells Deformed by Rigid Punches and by Hydraulic Pressure //Trans. ASME, Series D. Journal of basic engineering, 1973, № 1.
216. Kaplan M.A. The Stress and Deformation in Mild Steel During Axigymmetric Necking //Trans. of ASME, Series E. Journal of applied mechanics, 1973, № 1.
217. Mac-Gregor C.N. //The Tension Test. Proceeding of the American Society for Testing and Materials, №40, p.508-534.

218. Marsh D.M. /Proc. Roy. Soc., 1964, v.279, №1378, A, p.424-440.
219. Ohkami T., Ichikawa Y., Kawamoto T. A boundary element method for identifying orthotropic material parameters //Intern. J. Numer. and Anal. Meth. Geomech., 1991, V.15, №9, p.609-625.
220. Shanly F.R. Tensile instability (necking) of ductile materials //Aerospace Engineering, 1961, V.20, №12, p.30,31,55-61.
221. Tabor D. The Hardness and Strength of Metals //Inst. Met. 79, 1951, p.1-18.
222. Tabor D. The Hardness of Metals. – Oxford: Clarendon Press, 1951, 304p.
223. Thomaon P.K. An analysis of necking in axi-symmetric tension specimens //Int. J. of Mech. Sci., 1969, v.11, №5, p.481-490.
224. V. J. Parks, Strain Measurement Using Grids, Opt. Eng., 21, no. 4 (1982), 633-639.
225. W. Thomson (Lord Kelvin), On the Electrodynamic Qualities of Metals, Proc. R. Soc. London, 146 (1856), 649-751.
226. Yamada Y., Hirakawa T., Wifi A.S. Analysis of large deformation and bifurcation in plasticity problem by the finite element method //Finite Elem. Nonlinear Mech. Trondheim., 1978, v.1, p.393-412.
227. Zandman F., Render S., Dally J.W. Photoelastic coatings. SESA monograph, 1977, No. 3, 173 p.
228. Zhang Z. L., Odegard J., Hauge M. P. Etc.. A notches cross weld tensile testing method for determining true stress-strain curves for weldments //Engineering Fracture Mech, 2002, 69, p.353-366.
229. Zhang Z. L., Odegard J., Hauge M. P. Etc.. Determining material true stress-strain curve from tensile specimens with rectangular cross-section. //Int. J. Solids and Struct, 1999, 36, p.3497-3516.
230. Zhang Z. L., Odegard J., Sovik O. P. Determining true stress-strain curve for isotropic and anisotropic materials with rectangular tensile bars: method and verifications. //Comput. Mater. Sci., 2001, 20, №1, p.77-85.
231. Zhang Z. L., Odegard J., Sovik O. P. Etc.. A study on determining true stress-strain curve for anisotropic materials with rectangular tensile bars. //Int. J. Solids and Struct., 2001, 38, №26-27, p.4489-4505.
232. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. Finite Element Method: Volumes 1, 2, 5th Edition London, 2000, 712pp.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. Экспериментально-численные методы построения диаграмм деформирования материалов из стали и сплавов.....	4
1.1. Методы измерения полей смещений и деформаций на поверхности деформируемых материалов.....	4
1.2. Испытание на растяжение и получение истинных диаграмм деформирования	12
1.3. Испытания на твердость и получение истинных диаграмм деформирования. .	17
1.4. Задачи о комбинированном нагружении кручением с растяжением.....	22
1.5. Математические модели деформирования упругопластических материалов...	24
1.6. Методы численного моделирования процессов деформирования элементов конструкций	26
1.7. Экспериментально-теоретические методы изучения свойств конструкционных материалов	29
1.8. Выводы к главе 1	31
Глава 2. Автоматизированный комплекс измерения деформаций с использованием средств цифровой фотографии.....	35
2.1. Общие положения использования цифровой фотографии для измерения деформаций	35
2.2. Экспериментальный комплекс.....	36
2.3. Программное обеспечение	39
2.4. Точность измерения.....	41
2.5. Методика проведения эксперимента	41
2.6. Эксперимент по одноосному растяжению цилиндрической оболочки.....	42
2.7. Построение истинных диаграмм деформирования при растяжении цилиндрического стержня	47
2.8. Исследование процесса деформирования при кручении цилиндрических стержней	52
2.9. Исследование эффекта Пойнтинга при кручении цилиндрических стержней	54
2.10. Выводы к главе 2	57
Глава 3. Экспериментальное и численное исследование параметров напряженно-деформированного состояния при сложном нагружении растяжением и кручением	60
3.1. Методика численного решения.....	61
3.2. Экспериментальное и численное исследование параметров напряженно-деформированного состояния при сложном нагружении растяжением и кручением	64
3.2.1. Исследование процесса деформирования при последовательном нагружении кручением и растяжением	68
3.2.2. Исследование процесса деформирования при последовательном нагружении растяжением и кручением	71
3.2.3. Численное исследование влияния зависимости изотропной части упрочнения от направления деформирования после точки излома траектории на параметры напряженно-деформированного состояния	75
3.2.4. Исследование вида разрушения при монотонном и сложном нагружении.....	77
4.3. Выводы к главе 3	81
Заключение	83
Список литературы.....	84
Содержание.....	100

Елена Владимировна **Павленкова**
Дмитрий Владимирович **Жегалов**

Числовые методы экспериментально-теоретического анализа больших деформаций элементов конструкций и определения параметров математических моделей упругопластических материалов

Электронное методическое пособие

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.