

На правах рукописи

ТРЕТЬЯКОВ Михаил Павлович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРИТИЧЕСКОЙ
СТАДИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И КРУЧЕНИИ**

01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» на кафедре механики композиционных материалов и конструкций

Научный Вильдеман Валерий Эрвинович

руководитель: доктор физико-математических наук, профессор

Официальные Митюшов Евгений Александрович,

оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры теоретической механики ФГАОУ ВПО
«Уральский федеральный университет им. первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

Радченко Владимир Павлович,

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий
кафедрой прикладной математики и информатики ФГБОУ
ВПО «Самарский государственный технический университет»

**Ведущая Федеральное государственное бюджетное учреждение
организация:** науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук

Защита состоится «___» декабря 2014 года в _____ на заседании
диссертационного совета Д004.012.01 при Институте механики сплошных сред
УРО РАН по адресу: 614000, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, ауд. 423б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института механики
сплошных сред УРО РАН и на сайте <http://icmm.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета,
доктор технических наук

Березин Игорь Константинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Крупные аварии и катастрофы, причины и последствия которых определяющим образом связаны с характером механического разрушения, демонстрируют необходимость развития систем обеспечения безопасности сложных технических объектов с целью учета особенностей их поведения в аварийных ситуациях. Прочностные расчеты, основанные на критериальной оценке напряженно-деформированного состояния в «опасной точке», дают представление лишь о начале процесса разрушения, но не о его кинетике. Разработка научных основ прогнозирования, оценки опасности и предотвращения аварийных ситуаций связана с изучением основных закономерностей неупругого деформирования, вызванного накоплением повреждений.

В этом отношении важным представляется исследование закритической стадии деформирования (или стадии разупрочнения) материалов, непосредственно предшествующей моменту потери несущей способности. Закритическая стадия связана с процессами структурного разрушения и трещинообразования и отражается на диаграмме деформирования в виде ниспадающего участка при прогрессирующих деформациях. Физические причины разупрочнения различных материалов могут существенно отличаться, но, как правило, связаны с возникновением и развитием системы дефектов, процессами накопления повреждений и разрушением структурных элементов. В этом смысле полные диаграммы деформирования, содержащие ниспадающие ветви, несут интегральную информацию о закономерностях накопления повреждений и формирования условий макроразрушения, которые могут не быть однозначно связанными с напряженно-деформированным состоянием в точке деформируемого тела. Ключевое значение при переходе от равновесной стадии накопления повреждений к неравновесной стадии разрушения имеет нагружающая система. Учет закритической стадии деформирования в уточненных расчетах конструкций позволяет выявить резервы несущей способности за счет более точного прогнозирования момента разрушения.

Условия эксплуатации большинства ответственных конструкций обуславливают актуальность теоретического и экспериментального изучения закритической стадии деформирования материалов при сложном напряженном состоянии. Проведение экспериментальных исследований закономерностей механического поведения материалов на стадии закритического деформирования в условиях растяжения, кручения и совместного растяжения с кручением направлено на создание базы для научно обоснованного уточнения и развития моделей разупрочняющихся сред.

Цель работы — развитие методов экспериментального изучения закритической стадии деформирования с учетом жесткости нагружающей системы, получение новых данных о закономерностях механического поведения конструкционных материалов на закритической стадии деформирования при различных видах напряженно-деформированного состояния.

Задачи работы:

- разработка методик проведения испытаний на одноосное растяжение, кручение и совместное растяжение с кручением с построением диаграмм деформирования с ниспадающими участками;
- разработка методик исследования влияния жесткости нагружающей системы на реализацию закритической стадии деформирования и получение соответствующих опытных данных;
- получение новых данных о закритическом деформировании материалов в условиях одноосного растяжения при активном нагружении и разгрузках, а также в условиях дополнительных вибрационных воздействий;
- изучение вопросов интерпретации результатов испытаний при возникновении локализации деформаций на стадии разупрочнения;
- анализ условий перехода процесса деформирования на закритическую стадию в условиях сложного напряженного состояния;
- получение новых данных о закритическом деформировании материалов в условиях плоского напряженного состояния при совместном растяжении и кручении.

Научная новизна исследования заключается в следующем.

1. Сформулированы условия устойчивости закритического деформирования для частных случаев кручения и растяжения с кручением тонкостенного трубчатого образца и получены новые экспериментальные данные, подтверждающие зависимость предельных состояний, соответствующих моменту разрушения, от жесткости нагружающей системы.
2. Получены новые данные об устойчивом закритическом деформировании конструкционных сталей (20, 40Х) при достаточной жесткости нагружающей системы в условиях активного нагружения, разгрузок и повторного нагружения.
3. Получены новые данные (диаграммы деформирования) об условиях перехода на стадию разупрочнения и закономерностях закритического деформирования конструкционных сталей (20, 40Х, 15Х2ГМФ, 16Х12Н2МВФБ) при сложных напряженных состояниях, реализуемых в опытах на совместное (пропорциональное) растяжение и кручение.
4. Впервые получены экспериментальные данные о стабилизирующем влиянии дополнительных вибрационных воздействий (циклическое скручивание) на закритическое деформирование образцов при одноосном растяжении.

На защиту выносятся результаты анализа методических вопросов и полученные новые данные экспериментальных исследований закономерностей закритического деформирования конструкционных сталей при сложных напряженных состояниях, реализуемых в опытах на растяжение с кручением, при различной жесткости нагружающих систем, а также в условиях дополнительных вибрационных воздействий.

Практическая значимость работы состоит в разработке научных основ прогнозирования живучести и снижения катастрофичности разрушения ответственных элементов конструкций. Разработанные методики испытаний могут быть использованы для получения новых данных о закономерностях механического поведения конструкционных материалов на закритической стадии деформирования, которые необходимы для моделирования процессов разрушения с целью обеспечения безопасности технических объектов.

Достоверность результатов. Содержащиеся в работе экспериментальные данные получены в условиях аккредитованной испытательной лаборатории (Центр экспериментальной механики ПНИПУ) с использованием аттестованного оборудования и поверенных средств измерений, достоверность подтверждается качественным соответствием результатов известным данным теоретического и экспериментального изучения закритической стадии деформирования, полученным другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2009, 2014), Всероссийской школе-конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2009, 2011, 2012), Международной конференции «Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела» (Казань, 2009), Международной конференции по экспериментальной механике (ICEM 2010) (Малайзия, 2010), Всероссийской конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (Екатеринбург, 2010), 19-х Петербургских чтениях по проблемам прочности (Санкт-Петербург, 2010), Международной конференции по моделированию материалов и Европейской конференции по механике материалов (ICMM2) (Франция, 2011), Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, 2011, 2013), Международном семинаре «Актуальные проблемы механики и физики мезо-размерных систем» (Пермь, 2011), Европейской конференции по композиционным материалам (ECCM15) (Италия, 2012), IV Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем» (Красноярск, 2012), Международной школе-конференции «Актуальные проблемы механики» (Санкт-Петербург, 2011), Международной конференции «Целостность, прочность и разрушение» (IRF2013) (Португалия, 2013).

В целом диссертация обсуждалась на семинарах Центра экспериментальной механики ПНИПУ (рук. д.ф.-м.н., профессор В.Э. Вильдеман), кафедры механики композиционных материалов и конструкций (рук. д.ф.-м.н., профессор Ю.В. Соколкин), кафедры «Математическое моделирование систем и процессов» (рук. д.ф.-м.н., профессор П.В.Трусов), Института механики сплошных сред УрО РАН (рук. академик РАН В.П. Матвеевко).

Результаты работы использованы при выполнении НИР в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-

технологического комплекса России на 2007-2012 годы» (госконтракт № 02.518.11.7135), грантов РФФИ № 11-08-07016 и № 13-08-00304 (исполнитель), № 14-08-31531 (руководитель), гранта по постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 9 апреля 2010 года (договор № 14В.25.310006 от 24 июня 2013 года).

Публикации. Результаты исследований по теме диссертационной работы отражены в 30 публикациях; основные публикации приведены в списке [1-14], 7 статей [1-7] опубликованы в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержит 77 рисунков, 3 таблицы. Объем диссертационной работы составляет 149 страниц. Библиографический список включает 147 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цели, задачи и новизна диссертационной работы, приводится краткое описание содержания диссертации по главам.

Первая глава посвящена анализу научных публикаций по изучению закритической стадии деформирования и методам исследования поведения материалов в условиях сложного напряженного состояния. Дано описание закритической стадии деформирования материалов, механизмов накопления повреждений и разрушения, приводящих к её появлению, рассмотрены основные закономерности поведения материалов на стадии разупрочнения. Изложены подходы, связывающие реализацию закритической стадии деформирования материалов в конструкции с живучестью и безопасностью ответственных элементов конструкций. Рассмотрены основные экспериментальные методы исследования поведения материалов в условиях сложного напряженного состояния.

Во второй главе рассматриваются некоторые теоретические положения механики закритического деформирования и методические вопросы проведения испытаний с построением диаграмм на стадиях разупрочнения.

В соответствии с работами Вильдемана В.Э., Соколкина Ю.В., Ташкинова А.А. рассматривается необходимое условие устойчивого закритического деформирования материала. С использованием граничных условий контактного типа, которые учитывают жесткость (либо податливость) нагружающей системы, записанных в виде

$$[\sigma_{ij}(r)n_j + R_{ij}(r)u_j(r)]|_{\Sigma_S} = S_i^0(r), \quad [u_i(r) + Q_{ij}(r)\sigma_{jk}(r)n_k(r)]|_{\Sigma_u} = u_i^0(r),$$

где R_{ij} – коэффициенты жесткости нагружающей системы, а Q_{ij} – коэффициенты податливости нагружающей системы, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, $n_j(r)$ – направляющие косинусы вектора нормали к поверхности тела Ω в точке с координатой r , u_i – компоненты вектора перемещений, u_i^0 –

перемещения, номинально заданные на границе Σ_u , S_i^0 – силы, номинально заданные на границе Σ_S , для тела Ω с границей Σ условие устойчивости закритической деформации в ослабленной зоне Ω_0 может быть записано в виде

$$\int_{\Sigma} R_{ij} \delta u_j \delta u_i d\Sigma + \int_{\Omega - \Omega_0} C'_{ijmn} \delta \varepsilon_{mn} \delta \varepsilon_{ij} d\Omega > \int_{\Omega_0} D_{ijmn} \delta \varepsilon_{mn} \delta \varepsilon_{ij} d\Omega.$$

Здесь C'_{ijmn} – компоненты тензора касательных модулей упрочнения, D_{ijmn} – компоненты тензора модулей разупрочнения (взяты с обратным знаком компоненты тензора касательных модулей на стадии разупрочнения).

Рассмотрены условия устойчивости для частных случаев растяжения стержня и кручения тонкостенного трубчатого стержня на испытательной машине с учетом её жесткости.

Для оценки устойчивости закритического деформирования, сопровождающегося равновесным ростом и развитием дефектов, использован энергетический подход механики разрушения, основанный на сравнении приращений работы внешних сил и работы деформаций (суммы приращений упругой энергии и работы разрушения) при самопроизвольном приращении закритической деформации. Условие устойчивости закритической деформации для указанных случаев получено в виде

$$Q_0 > Q_M \text{ и } L_0 > L_M \quad (1)$$

для растяжения и для кручения соответственно, где $Q_M = R_M^{-1}$ – податливость нагружающего устройства испытательной машины при растяжении (R_M – жесткость испытательной машины) и $L_M = N_M^{-1}$ – податливость нагружающего устройства испытательной машины на кручение (N_M – жесткость испытательной машины на кручение), $Q_0 = l' / (DF')$ и $L_0 = l' / (D_C F' R'^2)$ – податливость области разупрочнения на растяжение и кручение соответственно ($D = -d\sigma / d\varepsilon$ – текущее значение касательного модуля разупрочнения при растяжении, $D_C = -d\tau / d\gamma$ – текущее значение касательного модуля разупрочнения при кручении), l' – длина рабочей части, F' – площадь поперечного сечения, R' – средний радиус.

Рассмотрена ситуация, когда разупрочнение материала при деформировании происходит не по всему объему стержня, а лишь в некотором его объеме, который может соответствовать при испытании гладкого образца области локализации. Аналогично, с использованием энергетического подхода механики разрушения, условие устойчивости закритической деформации в ослабленной зоне l' для указанных случаев получено в виде

$$Q_0 > Q_C + Q_M \text{ и } L_0 > L_C + L_M \quad (2)$$

для растяжения и для кручения соответственно, где $Q_C = (l - l') / (EF)$ – податливость основного объема стержня при растяжении и $L_C = (l - l') / (GFR^2)$ – податливость основного объема стержня на кручение, l – длина рабочей части с

площадью сечения F , R – средний радиус, l' – длина области разупрочнения с площадью F' .

Предполагается, что в случае совместного растяжения с кручением (при произвольном соотношении компонент осевой и сдвиговой деформации) стержня, весь объем которого подвергается разупрочнению либо стержня с областью разупрочнения, необходимым условием устойчивого закритического деформирования является одновременное выполнение условий (1) или (2). При невыполнении одного из пары условий (1) или (2) процесс разупрочнения перестанет быть устойчивым, что приведет к неравновесному, лавинообразному, разрушению.

В работе рассмотрены методические вопросы проведения испытаний с построением диаграмм деформирования с ниспадающими участками при одноосном растяжении, кручении и совместном растяжении с кручением на двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8850 (осевая нагрузка ± 100 кН, крутящий момент ± 1 кН·м) с использованием осевых и двухосевых экстензометров и программного обеспечения WaveMatrix. Рассмотрена возможность использования образцов различной геометрии и проанализировано влияние скорости деформирования. Проведено исследование жесткости используемой испытательной машины при растяжении и кручении. Кроме этого, разработано специализированное приспособление для опытного изучения влияния жесткости нагружающих систем на устойчивость процесса закритического деформирования при растяжении.

Устройство включает в себя следующие элементы: корпус, состоящий из двух стаканов, соединяемых между собой посредством резьбового соединения, пакета тарельчатых пружин, направляющего стержня, компенсационных колец, крепежных гаек для фиксации пакета пружин, стержня для установки оснастки в захваты испытательной машины и резьбового отверстия для крепления в оснастке испытываемого образца. Приспособление устанавливается последовательно в цепь «испытательная машина – образец» и дает возможность изменять жесткость нагружающей системы в пределах от 5 МН/м до 120 МН/м (рисунок 1) за счет различных схем сборки пакета тарельчатых пружин. Таким

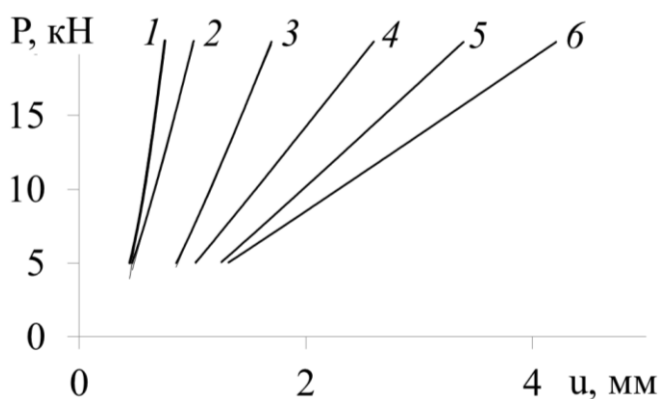


Рисунок 1 – Характеристики жесткости при различных схемах сборки пакета пружин: 1 – 50 МН/м, 2 – 28 МН/м, 3 – 18 МН/м, 4 – 9,5 МН/м, 5 – 7 МН/м, 6 – 5 МН/м

образом, описанная оснастка позволяет проводить испытания на растяжение идентичных по размерам образцов при различной жесткости нагружающей системы.

Третья глава посвящена изучению закритического деформирования сталей при одноосном растяжении. Получены результаты экспериментальных исследований влияния жесткости нагружающей

системы на предельное состояние материала образца при разрушении, выполненных в трех различных группах испытаний, в которых изменение соотношения жесткостей рабочей части образца и нагружающей системы реализовано различными способами.

В первой группе использованы образцы различного диаметра с одинаковым отношением длины рабочей части к диаметру, равном единице. В

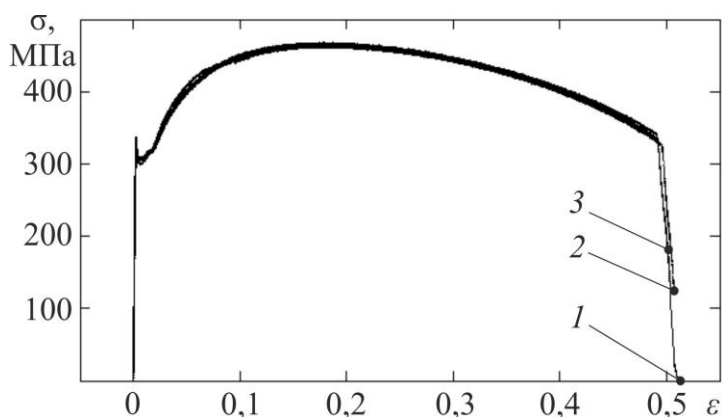


Рисунок 2 – Диаграммы деформирования и моменты разрушения стали 20: 1 – образец без дополнительных элементов, 2 и 3 – с дополнительными участками податливости длиной 30 мм и 60 мм соответственно

этом случае жесткость рабочей части образца возрастает при увеличении диаметра в соответствии с формулой $R_0 = D\pi d^2 / (4l)$, где D – модуль разупрочнения материала, d – диаметр образца, l – длина образца. При этом жесткость нагружающей системы (нагружающего устройства) неизменна. Во второй группе испытаний применялись образцы с дополнительными участками податливости различной длины при постоянных размерах рабочей части. В этом случае

дополнительные участки податливости снижают жесткость нагружающей системы (нагружающее устройство, дополнительные участки) по отношению к рабочей части образца. В третьей группе испытаний использовалось приспособление с переменной жесткостью, описанное во второй главе.

В результате испытаний образцов стали 20 и 40X по всем группам получены данные о том, что при увеличении жесткости нагружающей системы по отношению к области разупрочнения, происходит более полная реализация закритической стадии деформирования (рисунок 2), а момент разрушения, соответствующий точке касания ниспадающего участка диаграммы и характеристики жесткости системы (рисунок 3), соответствует достижению меньшей величины нагрузки.

Таким образом, при обеспечении условий нагружения, характеризующихся высокой жесткостью нагружающей системы, возможно получение диаграмм деформирования с равновесными

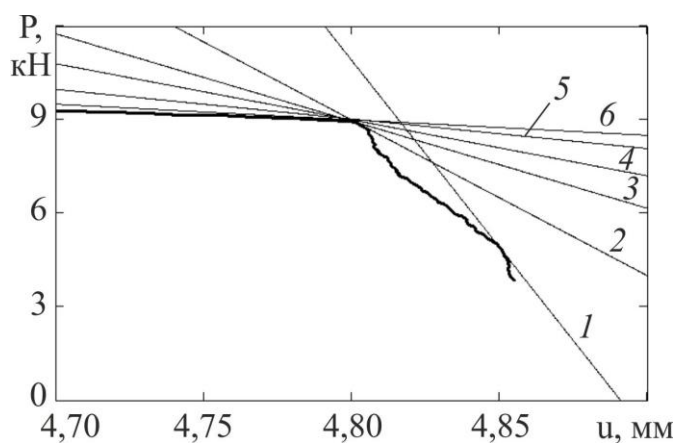


Рисунок 3 – Заключительный участок диаграммы растяжения образца стали 20 и характеристики жесткости нагружающей системы: 1 – 120 МН/м, 2 – 50 МН/м, 3 – 28 МН/м, 4 – 18 МН/м, 5 – 9 МН/м, 6 – 5 МН/м

участками разупрочнения (рисунок 4, *а*), что согласуется с известными теоретическими положениями. Устойчивое закритическое деформирование подтверждено реализацией разгрузок и повторных нагружений на стадии разупрочнения в испытаниях сплошных цилиндрических образцов стали 20 и 40Х (рисунок 1, *б*) при одноосном растяжении. Данные испытаний подтверждают, что в любой точке регистрируемого участка закритического деформирования представляется возможным остановить процесс, разгрузить образец, и продолжить дальнейшее деформирование, причем при повторном нагружении достигается напряженное состояние, соответствующее началу разгрузки.

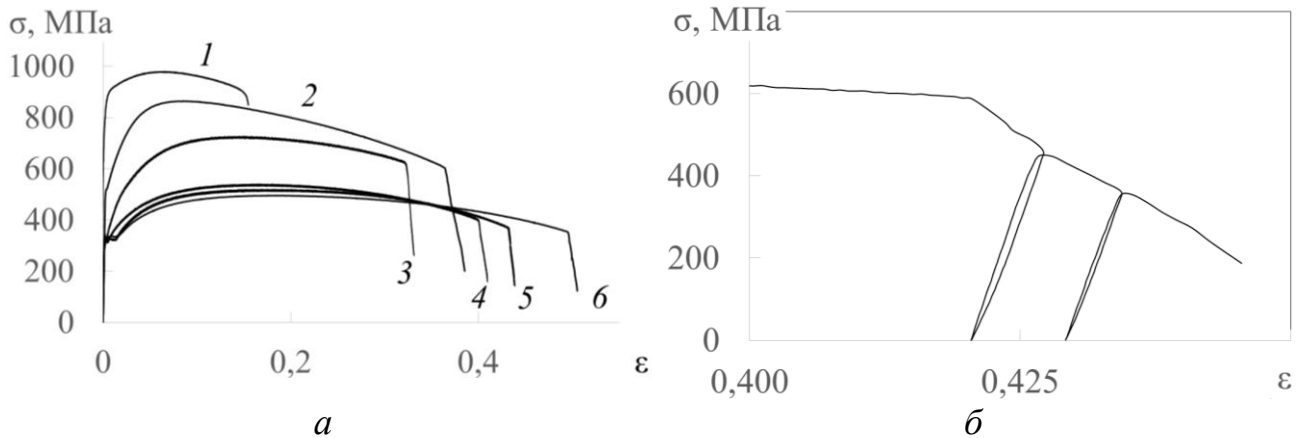


Рисунок 4 – Диаграммы растяжения сталей (*а*): 1 – 15Х2ГМФ, 2 – 40Х, 3 – 45, 4 – 25, 5 – Ст3, 6 – 20, и заключительный ниспадающий участок диаграммы растяжения стали 40Х с разгрузками (*б*)

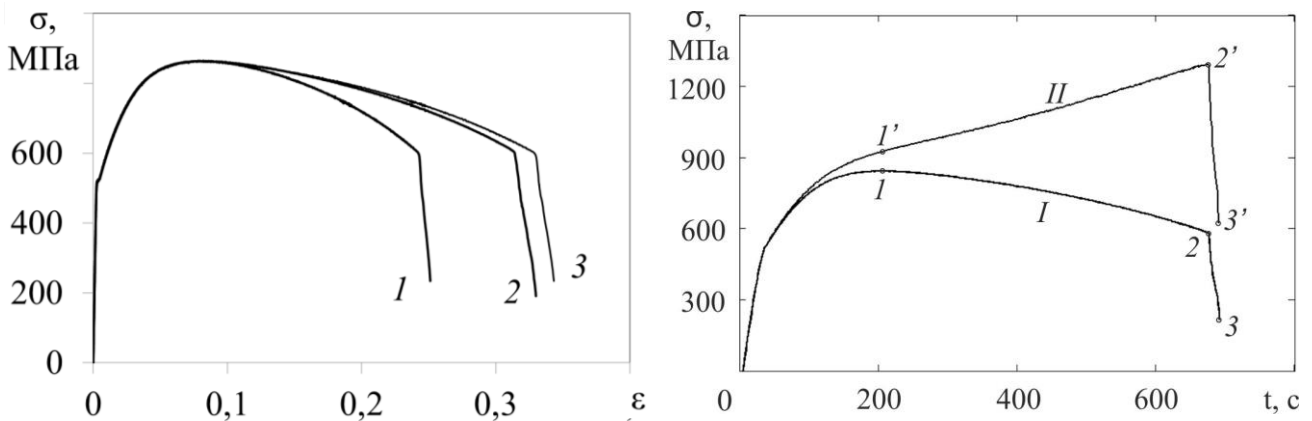


Рисунок 5 – Диаграммы растяжения образцов стали 40Х с отношением длины рабочей части к диаметру 2,50 – 1 и 1,60 – 2, 3 – пересчет 1 на условие 2

Рисунок 6 – Диаграмма растяжения во времени стали 40Х: I – в условных напряжениях и II – в напряжениях с учетом изменения площади образца

В связи с тем, что закритическая стадия деформирования материалов предшествует разрушению и, как правило, характеризуется значительными деформациями и появлением локализации, важное значение имеет анализ вопросов интерпретации экспериментальных данных, полученных в условиях разупрочнения. Учет области локализации деформаций и возникающих при этом участков упругой разгрузки основного материала стержня позволяет

объяснить отличие ниспадающих участков диаграмм деформирования при растяжении сплошных цилиндрических образцов различной длины, и выполнить пересчет ниспадающих участков на приведенную длину (рисунок 5).

Проведены испытания на одноосное растяжение с регистрацией изменения геометрии рабочей части образца (диаметра) с использованием видеосистемы Vic3D. Построены диаграммы в условных напряжениях (*I* на рисунке 6) и в напряжениях, полученных с учетом изменения площади поперечного сечения (*II* на рисунке 6). Видно, что на стадиях упругопластического и закритического деформирования отличие диаграмм становится существенным, диаграмма (*II*) располагается выше диаграммы (*I*). Однако существует диапазон деформаций, соответствующий стадии интенсивного разупрочнения на кривой (*I*), в котором наблюдается снижение напряжений, определенных с учетом изменения сечения образца.

В четвертой главе рассматриваются закономерности закритического деформирования на примере некоторых конструкционных сталей в условиях совместного растяжения и кручения. Выполнены испытания на пропорциональное растяжение с кручением тонкостенных трубчатых образцов конструкционных сталей 20, 40X, 15X2ГМФ и 16X12Н2МВФБ при различных соотношениях осевой и сдвиговой деформации.

С точки зрения использования опытных данных в моделях закритического деформирования важным является вопрос определения момента перехода процесса деформирования на закритическую стадию. При одноосном растяжении и чистом кручении переход на стадию разупрочнения происходит при достижении напряжением соответствующего предела прочности. При комбинированном нагружении в условиях растяжения с кручением ($\dot{\varepsilon}_0 = 3.33 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и $\dot{\gamma}_0 = 2.08 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) тонкостенных трубчатых образцов (рисунок 7) обнаруживается наличие диапазона деформаций (рисунок 7, *II*), в котором одновременно имеет место упрочнение по осевым (рисунок 7, *1*) и разупрочнение по касательным (рисунок 7, *2*) компонентам напряжений.

Для анализа условий перехода процесса деформирования на закритическую стадию в условиях плоского напряженного состояния при совместном растяжении с кручением рассмотрены зависимости изменения во времени осевого напряжения σ (рисунки 8 и 9, *3*), интенсивности напряжений

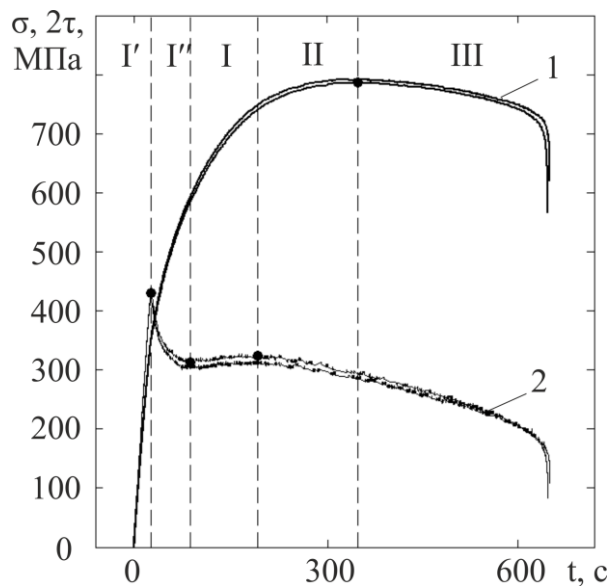


Рисунок 7 – Изменение во времени (испытание на растяжение с кручением) осевого – *1* и удвоенного касательного напряжения – *2* для стали 40X при $\varepsilon / \gamma = 1,6$

$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$ (рисунки 8 и 9, 1), первого главного напряжения $\sigma_1 = \sigma/2 + \sqrt{\sigma^2/4 + \tau^2}$ (рисунки 8 и 9, 2), касательного напряжения τ (рисунки 8 и 9, 5) и максимального касательного напряжения $\tau_{\max} = \sqrt{\sigma^2/4 + \tau^2}$ (рисунки 8 и 9, 4).

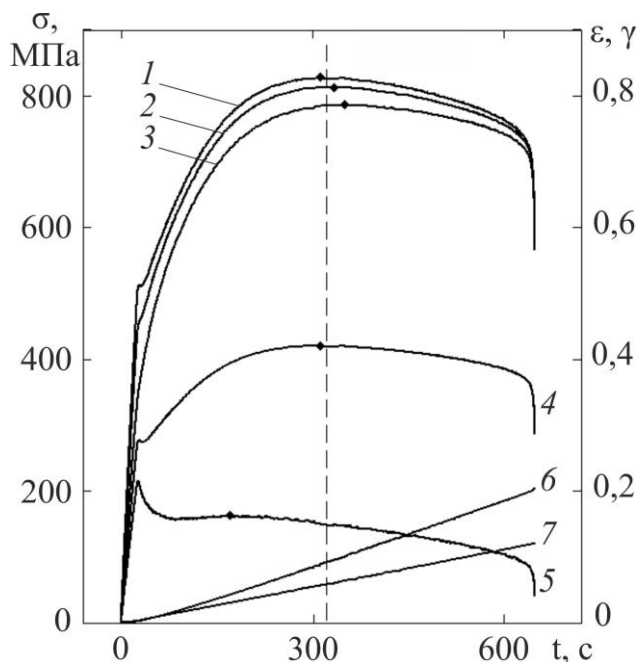


Рисунок 8 – Исследование условий перехода процесса деформирования на закритическую стадию для стали 40X

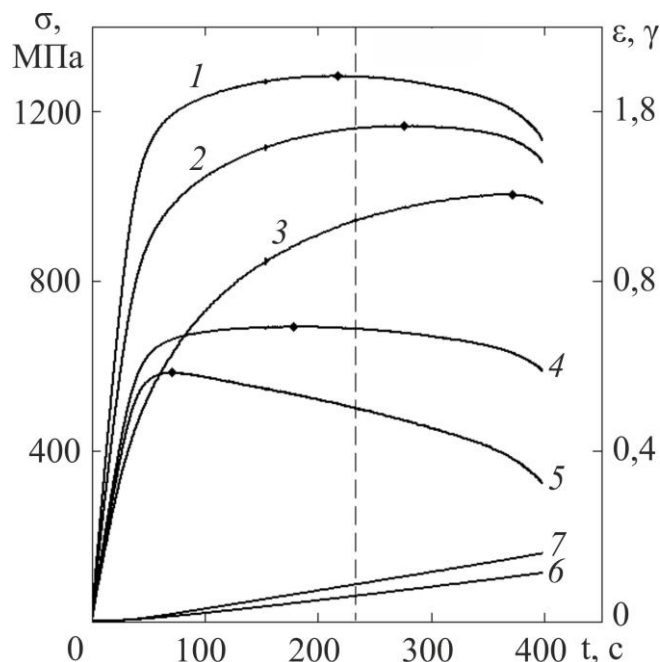


Рисунок 9 – Исследование условий перехода процесса деформирования на закритическую стадию для стали 16X12H2MVFB

Точками на диаграммах отмечены соответствующие максимальные значения, также на графике приведены задаваемая осевая деформации ε (рисунки 8 и 9, 6) и угол сдвига γ (рисунки 8 и 9, 7). Вертикальная штриховая линия (рисунки 8 и 9) соответствует началу выполнения признака закритического деформирования $d\sigma_{ij}d\varepsilon_{ij} < 0$. Для примера приведены результаты для сталей 40X (рисунок 8) и 16X12H2MVFB (рисунок 9). Для рассмотренных материалов и траекторий деформирования наблюдается значительное расхождение в моментах достижения экстремальных значений нормальных и касательных напряжений при переходе на закритическую стадию деформирования, в то время, как моменты начала стадии разупрочнения, определяемые по критериям, связанным со значениями интенсивности напряжений, максимального касательного напряжения, а также по признаку закритической деформации, являются весьма близкими.

Проведен анализ изменения сопротивления материала деформированию при совместном растяжении с кручением, в частности, построены зависимости, отражающие снижение жесткости сплошного цилиндрического образца на кручение после предварительного закритического деформирования, достигнутого при одноосном растяжении до различных степеней деформации.

При реальных режимах эксплуатации конструкций возможно наличие дополнительных воздействий, которые способны оказывать влияние на протекание процессов накопления повреждений в материалах и разрушения. Например, в литературе отмечается существенное влияние вибрационных воздействий малой амплитуды на устойчивость протекающих механических и гидромеханических процессов.

В данной работе реализована методика испытаний на одноосное растяжение при наличии дополнительных вибрационных воздействий на знакопеременное кручение малой амплитуды. Получены диаграммы растяжения образцов стали 40Х (рисунок 10), соответствующие растяжению без дополнительных воздействий (рисунок 10, 1), а также семейство кривых (рисунок 10, 2), полученных при наличии дополнительного вибрационного воздействия на кручение малой амплитуды, реализованного в процессе пластического деформирования при растяжении (рисунок 5, 3).

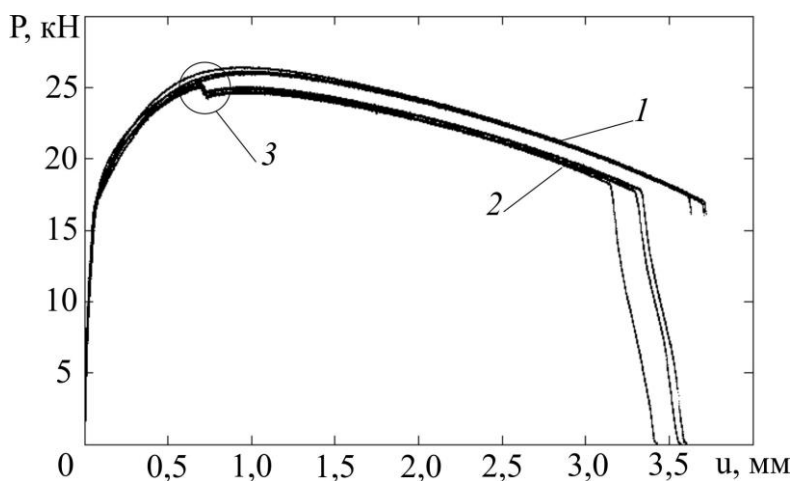


Рисунок 10 – Диаграммы растяжения образцов стали 40Х: без воздействий – 1, с дополнительным вибрационным воздействием – 2, момент включения вибраций – 3

деформирования происходит при меньшей степени реализации стадии разупрочнения и существенной нагрузке.

Отмечено, что в результате испытаний с вибрацией, когда реализуется полная диаграмма деформирования, наблюдается отличие поверхности излома образцов по сравнению с растяжением без воздействий. Разрушение образцов происходило по механизму «чашка – конус». При этом после растяжения образцов с дополнительными вибрационными воздействиями поверхность излома характеризуется наличием волокнистой (матовой) поверхности, которая распространена практически на всю поверхность излома.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. Рассмотрены методические вопросы экспериментальных исследований закритической стадии деформирования конструкционных материалов в условиях растяжения, кручения и совместного растяжения с кручением при использовании двухосевых испытательных систем.

Отмечена возможность положительного влияния указанных дополнительных вибрационных воздействий на процесс закритического деформирования, которое выражается в реализации устойчивого процесса разупрочнения до падения нагрузки на образце до нулевого значения, в то время, как без дополнительных воздействий потеря устойчивости процесса закритического

Проанализированы условия реализации закритического деформирования и вопросы интерпретации опытных данных, предложено специализированное устройство для изменения жесткости нагружающей системы.

2. Получены новые опытные данные, подтверждающие теоретические положения о влиянии жесткости нагружающей системы на степень реализации закритической стадии деформирования. Показано, что моментам разрушения соответствуют различные точки на ниспадающем участке диаграммы деформирования в зависимости от значений жесткости нагружающей системы при использовании образцов различной геометрии либо специализированного устройства.
3. Получены новые экспериментальные данные о закритическом деформировании конструкционных сталей 20, 40Х, 15Х2ГМФ и 16Х12Н2МВФБ при активных нагружениях и разгрузках. Построены диаграммы деформирования в условиях одноосного растяжения и различных случаев пропорционального растяжения с кручением.
4. Предложено объяснение различия ниспадающих участков диаграмм деформирования при растяжении образцов различной длины. Показано, что учет области локализации в рабочей части образца и участков упругой разгрузки позволяет снять указанное противоречие и построить диаграмму деформирования для образца приведенной длины.
5. Проведен анализ условий перехода процесса деформирования на закритическую стадию в условиях сложного напряженного состояния при совместном растяжении и кручении с различным соотношением осевой и сдвиговой деформации. Для ряда сталей выявлено близкое соответствие момента перехода на стадию разупрочнения, определенного по признаку закритического деформирования, моментам достижения максимальных значений интенсивности напряжений и максимальных касательных напряжений.
6. Предложена методика и впервые получены данные экспериментальных исследований, свидетельствующие о стабилизирующем влиянии дополнительных вибрационных воздействий на процессы закритического деформирования. Показано, что циклическое скручивание малой амплитуды может приводить к реализации полных диаграмм деформирования при одноосном растяжении.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Вильдеман В.Э., Санникова Т.В., Третьяков М.П. Экспериментальное исследование закономерностей деформирования и разрушения материалов при плоском напряженном состоянии // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2010. — № 5. — С. 106–111.
Имеется перевод статьи: Vil'deman V.E., Sannikova T.V., Tret'yakov M.P. Experimental investigation of material deformation and failure regularities in a

- flat stressed state // Journal of Machinery Manufacture and Reliability — 2010. — Vol. 39, Issue 5. — pp. 492-496. (Scopus)
2. Вильдеман В.Э., Ипатова А.В., Третьяков М.П., Третьякова Т.В. Механика закритического деформирования и нелокальность условий разрушения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. — 2011. — № 4 (5). — С. 2063–2065.
 3. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2013. — № 2. — С. 93–98.
Имеется перевод статьи: Vildemann V.E., Tretyakov M.P. Material testing by plotting total deformation curves // Journal of Machinery Manufacture and Reliability — 2013. — Vol. 42, Issue 2. — P. 166–170. (Scopus)
 4. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Анализ влияния жесткости нагружающей системы на стадию закритического деформирования материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2013. — № 3. — С. 49–57.
Имеется перевод статьи: Vildemann V.E., Tretyakov M.P. Analysis of the effect of loading system rigidity on postcritical material strain // Journal of Machinery Manufacture and Reliability — 2013. — Vol. 42, Issue 3. — P. 219–226. (Scopus)
 5. Tretyakov M.P., Vildeman V.E. Tests in tension-torsion conditions with descending sections of strain curve construction // Frattura ed Integrita Strutturale. — 2013. — № 24 — pp. 96–101. (Scopus)
 6. Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В., Третьяков М.П. Закритическое деформирование сталей при плоском напряженном состоянии // Известия РАН. Механика твердого тела. — 2014. — № 1. — С. 26–36.
Имеется перевод статьи: Wildemann V. E., Lomakin E. V., Tretyakov M. P. Postcritical deformation of steels in plane stress state // Mechanics of Solids. — 2014. — Vol. 49, Issue 1. — P. 18–26. DOI 10.3103/S0025654414010038. (WoS)
 7. Tretyakov M.P., Vildeman V.E. The postcritical deformation stage and non-local failure conditions // Proc. of ECCM15: European Conference on Composite Materials, Venice, Italy, 24-28 June 2012. — Paper ID: 1117. — ISBN 978-88-88785-33-2. (Scopus)

Статьи в других изданиях и материалах конференций

8. Вассерман Н.Н., Калугин В.Е., Крюков А.А., Третьяков М.П. Экспериментальное изучение закономерностей упругопластического деформирования стали 15Х2ГМФ при растяжении и кручении // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. — 2010. — Том 12, № 5. — С. 15–24.
9. Вассерман Н.Н., Вильдеман В.Э., Крюков А.А., Третьяков М.П. Исследование закономерностей упругопластического деформирования стали 15Х2ГМФ при сложном напряженном состоянии // Вестник ПГТУ. Механика. — 2010. — № 2. — С. 34–47.

10. Крюков А.А., Калугин В.Е., Третьяков М.П., Вассерман Н.Н. Исследование поведения конструкционной стали при простых видах нагружения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. — 2012. — Т. 14, № 1. — С. 41–50.
11. Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Деформационное разупрочнение материалов в условиях плоского напряженного состояния // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2012. — № 2. — С. 190–203.
12. Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Исследование условий перехода процесса деформирования на заkritическую стадию. // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: Тезисы VIII Российской научно-технической конференции, 26 – 30 мая 2014 г. — г. Екатеринбург, 2014. — С. 134.

Монография и учебное пособие

13. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П., Третьякова Т.В. и др. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / Под ред. В.Э. Вильдемана. — М.: ФИЗМАТЛИТ. — 2012. — 212 с.
14. Вильдеман В.Э., Бабушкин А.В., Третьяков М.П. и др. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований: учебное пособие / Под ред. В.Э. Вильдемана. — Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. — 165 с.

Подписано в печать _____ г.
Формат 60 x 90/16. Набор компьютерный.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № _____.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии издательства
Пермского национального исследовательского политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, пр-т Комсомольский, 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33