

На правах рукописи

Колебина Наталья Владимировна

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА  
ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ТУРБИН**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2016

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор  
**Данилов Владимир Львович**

**Официальные оппоненты:**

**Мовчан Андрей Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом механики адаптивных композиционных материалов и систем, Институт прикладной механики (ИПРИМ РАН)

**Столин Александр Моисеевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией пластического деформирования материалов, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения (ИСМАН РАН)

**Ведущая организация:**

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (НИИ механики МГУ)

Защита диссертации состоится 21 декабря 2016 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 212.141.03 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1 МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.03

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)

Телефон для справок: +7(499)263-66-39

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_ 2016г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.03,  
доктор технических наук

Карпачев А.Ю

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы.** На сегодняшний день гидроэлектроэнергетика является одним из наиболее эффективных направлений энергетической отрасли. Определяющим компонентом ГЭС является гидротурбина. Вне зависимости от принципа работы и устройства гидротурбин, их основной деталью является рабочее колесо с лопастями.

Производство крупногабаритных деталей гидротурбины, диаметр которых варьируется от 2 до 10 метров, является сложным, металлоемким, энергоемким и дорогостоящим процессом. Точность формы лопаток турбины определяет возможность получения заданной производительности турбины в целом. Выделяют два основных способа изготовления лопаток: литье и горячая формовка. Литье - менее металлоемкий процесс, требующий значительных трудозатрат при последующей обработке и ручной полировке поверхности, для того чтобы исправить отклонения толщины и формы. Горячая формовка позволяет получить очень высокую точность формы и толщины, и, тем самым, исключить ручную обработку поверхности. Однако оба процесса производства деталей гидравлических турбин включают в себя множество сварочных операций, что обеспечивает получение сложных форм, но требует использования дополнительного количества сплава и большего объема последующей обработки. Все это влияет на время изготовления, расходы и качество деталей.

Одним из прогрессивных способов изготовления таких деталей является формообразование заготовки методом пластического (или сверхпластического) деформирования. Данный метод обладает рядом преимуществ, таких как повышенная размерная и геометрическая точность изготовления, отсутствие перехода в жидкое состояние материала, снижение металлоемкости и времени производства.

Материал, используемый для изготовления лопаток, оказывает большое влияние на выбор технологии производства. Основные требования, предъявляемые к материалу, прежде всего связаны с эксплуатационными свойствами, такими как устойчивость к коррозии, прочность и свариваемость. Мартенситные, аустенитные, а также дуплексные стали используются в качестве материалов для изготовления колес гидротурбин, в зависимости от типов и размеров турбины. Наиболее распространенные стали – это легированные стали типа 16Cr5Ni, 13Cr4Ni, 13Cr1Ni и т.п.

Низкоуглеродистые мартенситные легированные стали имеют ряд преимуществ над другими видами сталей, таких как: более высокая коррозионная стойкость по сравнению с недорогими углеродистыми стальюми (ферритными стальюми); более высокая свариваемость, чем у аустенитных сталей; повышенная пластичность и прочность на разрыв, а также экономичное легирование (на 25% дешевле) по сравнению с дуплексными нержавеющими стальюми. Такое сочетание факторов делает эти стали экономически выгодными для гидроэлектроэнергетики.

Для нахождения рациональных режимов деформирования, а именно скоростей деформации, температуры нагрева заготовки и усилия деформирования, необходимо математическое моделирование поведения материала в процессе изготовления деталей.

Таким образом, актуальность диссертационной работы определяется необходимостью разработки модели деформирования низкоуглеродистой мартенситной стали с целью определения возможности ее использования в производстве крупногабаритных деталей гидравлических турбин методами пластического или сверхпластического деформирования.

**Степень разработанности темы.** В связи с широким применением данных сталей в сварных конструкциях множество работ Клейнера Л.М. Шацовой А.А., Мельниковой Н.П., Sandvik B.H., Leem D.S. и других посвящено исследованию микроструктуры и ее влиянию на свойства свариваемости и прочности низкоуглеродистых мартенситных сталей при комнатных температурах. В работах Carroug D., Kapoor R., Wang P., Park E.S., Зельдовича В.И., Дьяченко С.С. и других приведены результаты исследований фазовых переходов и их влияния на микроструктуру и механические свойства при комнатных температурах. Однако мало внимания уделено исследованию деформирования таких сталей при высоких температурах, несмотря на их широкое применение при изготовлении методами горячей формовки. Исследованиями деформирования данных сталей при высоких температурах занимались Богачев И.И., Ряпсов И.В., Tong W. и некоторые другие. Опубликованные работы посвящены исследованию влияния отдельных параметров на свойства пластичности, но не приведен закон деформирования данного класса сталей при высоких температурах с учетом влияния структуры.

**Целью диссертационной работы** является разработка математической модели деформирования низкоуглеродистой мартенситной стали при высоких температурах для подбора рациональных параметров процесса производства деталей гидротурбин методом пластического деформирования.

**Для достижения цели поставлены следующие задачи:**

1. Провести экспериментальное исследование упругопластических свойств низкоуглеродистой мартенситной стали класса 1.4313 при температурах от 650°C до 950°C;

2. Установить влияние параметров структуры (размер зерна, фазовый состав, морфология) на процесс деформирования низкоуглеродистой мартенситной стали при температурах от 650°C до 950°C;

3. Разработать математическую модель деформирования низкоуглеродистой мартенситной стали, учитывающую морфологию и фазовый состав стали и описывающую его свойства в указанном диапазоне температур;

4. Разработать численную модель процесса формообразования заготовки для деталей гидравлических турбин с целью установления рациональных технологических параметров таких, как время, сила и скорость деформирования;

5. Выработать рекомендации по выбору параметров для процесса горячего деформирования деталей из исследуемой стали при условии снижения температуры горячей формовки.

**Научная новизна** работы заключается в:

1. Планировании и проведении исследований и получении новых экспериментальных данных о деформировании низкоуглеродистой мартенситной стали класса 1.4313 при повышенных температурах (650°C - 950°C);

2. Определении функциональной зависимости напряжений от деформаций, учитывающей влияние морфологии и фазового состава стали и позволяющей описать поведение низкоуглеродистой мартенситной стали в широком диапазоне температур;

3. Разработке математической модели горячей формовки заготовки лопатки гидравлической турбины, учитывающей морфологию и фазовый состав низкоуглеродистой мартенситной стали, позволяющей определять рациональные параметры процесса без проведения натурных испытаний;

4. Установлении рациональных значений параметров процесса горячей формовки, а именно температуры, скорости и силы деформирования, заготовок из низкоуглеродистой мартенситной стали в широком диапазоне температур.

**Достоверность результатов** подтверждается применением комплекса современной экспериментальной техники и измерительных приборов; использованием комплекса современных методов исследования; воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов, полученных различными методами; применением классических положений механики деформируемого твердого тела.

**На защиту выносятся следующие положения диссертации:**

1. Методика проведения и анализ результатов экспериментальных исследований деформирования низкоуглеродистой мартенситной стали при повышенных температурах;

2. Экспериментальные результаты, устанавливающие влияние различных структурных параметров на механические свойства низкоуглеродистой мартенситной стали в широком диапазоне температур;

3. Полученная функциональная зависимость напряжений от деформаций с учетом скорости деформирования и температурного режима для низкоуглеродистой мартенситной стали;

4. Математическая модель горячей формовки заготовки лопатки гидравлической турбины, учитывающая морфологию и фазовый состав низкоуглеродистой мартенситной стали.

**Практическая значимость** заключается в получении новых экспериментальных данных о механических свойствах низкоуглеродистой мартенситной стали класса 1.4313 для рационализации производства деталей гидравлических турбин, определении функциональной зависимости напряжений от деформаций с учетом скорости деформирования и

температурного режима обработки, разработке методики расчета процесса формообразования детали, учитывающей структуру низкоуглеродистой мартенситной стали, выдаче рекомендаций по совершенствованию процесса изготовления деталей гидравлических турбин.

**Методы исследования.** Модель деформирования материала в широком диапазоне температур, учитывающая изменения структуры стали, была разработана на основании экспериментальных данных. Поведение материала при высокой температуре было исследовано с помощью испытаний на одноосное растяжение. Разработанная модель деформирования материала была использована для конечно-элементного моделирования в программном комплексе ANSYS процесса формовки заготовки лопатки гидравлической турбины. На основании анализа результатов численного моделирования были выработаны рекомендации по совершенствованию процесса изготовления.

**Личный вклад** состоит в проведении экспериментов, обработке и анализе результатов, разработке модели деформирования материала (низкоуглеродистой мартенситной стали) для совершенствования изготовления деталей гидротурбин. Все металлографические исследования и экспериментальные исследования механических свойств нового материала были проведены автором лично. Результаты, представляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены лично автором, либо при его непосредственном участии, что подтверждено публикациями. Во всех необходимых случаях заимствования чужих результатов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

**Реализация работы.** Экспериментальная методика установления деформационных параметров материала, результаты исследований пластических свойств низкоуглеродистой мартенситной стали, а также модель деформирования, учитывающая связь структурного состояния с комплексом механических свойств стали используются на кафедре «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана в курсе «Прикладная теория пластичности и ползучести». Разработанная методика учета морфологии и фазового состава стали в уравнениях состояния при конечно-элементном моделировании, а также КЭ модель горячего деформирования лопатки гидротурбины используется в создании программно-расчетного комплекса в ООО «Фидесис».

Работа является частью исследований, проводимых в 2011-2015 годах по совместному договору между МГТУ им. Н.Э. Баумана и компанией Альстом в рамках совместной аспирантуры с Политехническим Университетом Гренобля.

Отдельные результаты настоящей работы получены в рамках работ по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.577.21.0114 от 23 сентября 2014г. с Министерством образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57714X0114.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. Школа-семинар по структурной макрокинетике для молодых ученых, ИСМАН РАН, (Черноголовка, 2012 г.);
2. Школа-семинар «Школа молодых ученых», (Гренобль, 2013г.);
3. Международная научно-инновационная молодежная конференция «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент», ТГТУ, (г. Тамбов, 2013г., 2014г.);
4. X международная азиатская школа-семинар «Проблемы оптимизации сложных систем», Институт теоретической и прикладной математики НАН КР, Кыргызская Республика, (г. Бишкек, 2014г.);
5. VI Международная конференция «Проблемы механики современных машин», ВСГУТУ, (г. Улан-Удэ, 2015г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 работ, из них 3 статьи в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, общим объемом 4,11 п.л./2,65 п.л.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы, изложена на 159 страницах, включая 97 рисунков и 20 таблиц. Список литературы содержит 132 наименования.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., профессору Данилову В.Л., д.т.н., профессору Бландену Ж.-Ж., профессору Верон М., сотрудникам компании Альстом Фрешинет С. и Прижан С., сотрудникам кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана и лаборатории «Материаловедение, механики и электрохимии» Политехнического Университета Гренобля за помощь и поддержку, оказанные при выполнении работ.

### **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость, приводятся методология исследования и доказательства необходимости подробных знаний микроструктуры и фазовых превращений при нагреве, а также краткое содержание работы по главам.

**В первой главе** приведен общий обзор и анализ предыдущих научных работ, касающихся настоящего исследования. Рассмотрены особенности микроструктуры и фазовых превращений низкоуглеродистой мартенситной стали. Приведены типичный химический состав и влияние легирующих элементов низкоуглеродистой мартенситной стали на фазовый состав и ее свойства. В работах Carroug D., Kapoor R., Rojas M., Tong W., Зельдовича В.И., Дьяченко С.С. и других рассмотрены факторы, влияющие на кинетику и механизм фазовых превращений. На основании работ Садовского В.Д., Ряпсова И.В., Клейнера Л.М. и других показаны возможности термического измельчения структуры низкоуглеродистых мартенситных сталей.

Приведен обзор методик экспериментальных исследований деформирования стали при высоких температурах. Показано влияние параметров испытаний на механические свойства материала. Одними из

основных параметров испытаний для изучения механических свойств материала является температура и скорость деформации. Для количественной оценки влияния скорости деформации на напряжения течения вводят так называемый параметр чувствительности к скорости деформации. Чувствительность к скорости деформации является важным параметром материала, который описывает способность материала сопротивляться образованию шейки и является одним из ключевых факторов для определения механизма деформации. Экспериментальным методам определения значения этого параметра посвящены работы Бэкофена В., Грабского М.В., Хэдворта Дж. и других.

Представлен обзор уравнений, используемых для описания напряженно-деформированного состояния однофазных и двухфазных сталей. Одним из самых распространенных уравнений для описания высокотемпературного деформирования однофазной стали при растяжении является степенной закон ползучести с упрочнением:

$$\sigma = B \dot{\varepsilon}^m \varepsilon^n \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

где  $B$  – постоянная материала,  $\sigma$  – напряжение ползучести,  $\varepsilon$  – деформация ползучести,  $\dot{\varepsilon}$  - скорость деформации ползучести,  $m$  – чувствительность к скорости деформации,  $n$  - параметр упрочнения,  $Q$  - энергия активации деформации ползучести,  $R$  - универсальная газовая постоянная и  $T$  - температура деформации.

Ползучесть может осуществляться посредством различных механизмов, таких как дислокационная ползучесть, межзеренное скольжение и диффузионная ползучесть. Каждый механизм деформации описывается определенным набором значений параметров ( $m$  и  $Q$ ) материала.

В работах Calminger M., Antoun B., Roy K., Tong W., Богачева И.И. и других приведены основные результаты предыдущих исследований деформирования при повышенных температурах аустенитных, мартенситных и низкоуглеродистых мартенситных сталей близких по химическому составу к исследуемой стали. Показано, что мартенситные стали имеют наибольшие значения предела прочности при низких температурах, которые быстро поникаются при повышении температуры и становятся значительно ниже, чем у большинства аустенитных марок сталей.

На данный момент не представлена модель деформирования низкоуглеродистой мартенситной стали в широком интервале температур, учитывающая влияние не только температуры и скорости деформации, но и фазового состава. Поэтому ее разработка позволит совершенствовать процессы изготовления крупногабаритных деталей гидравлических турбин методами пластического деформирования с помощью математического моделирования поведения материала.

**Во второй главе** рассмотрены методические аспекты, связанные с экспериментальными исследованиями механических свойств сталей при высоких температурах.

Одними из основных параметров высокотемпературного формообразования заготовок деталей являются температура и скорость деформирования. Изготовление деталей методами пластического или сверхпластического деформирования, как правило, проводится при температурах от  $800^{\circ}\text{C}$  до  $1050^{\circ}\text{C}$ . Однако высокая температура обработки может привести к возникновению крупнозернистой структуры, особенно при медленном охлаждении, что снижает качество заготовок. Скорость деформирования выбирается с учетом того, что ее снижение приводит к уменьшению силы деформирования. Однако медленное проведение процесса формообразования приводит к чрезмерному охлаждению заготовки, что нежелательно из-за повышения сопротивления деформации. Поэтому для создания математической модели деформирования низкоуглеродистой мартенситной стали при высоких температурах с целью совершенствования процесса изготовления крупногабаритных заготовок лопаток гидравлических турбин, необходимы исследования физико - механических свойств этих сталей в интервале температур от  $600^{\circ}\text{C}$  до  $950^{\circ}\text{C}$  и скоростей от  $10^{-4} \text{ с}^{-1}$  до  $0.01\text{с}^{-1}$ .

В связи с этим были проведены испытания низкоуглеродистой мартенситной стали на одноосное растяжение на установке Zwick 100, с целью установления функциональной зависимости напряжений от деформаций в интервале температур от  $600^{\circ}\text{C}$  до  $950^{\circ}\text{C}$ , а также определения основных параметров материала, таких как чувствительность к скорости деформации, влияние размера зерна и энергии активации деформации. Нагружение образцов, в зависимости от цели испытания, велось до разрушения, либо до достижения заданного удлинения. Для проведения испытаний при высоких температурах, установка была дополнительно оборудована печью и вакуумным насосом.

Вакуумный насос способен создавать вакуум до  $10^{-6}$  мбар с точностью 0.1%. Температура нагрева печи от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $1500^{\circ}\text{C}$  со скоростями от  $1^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  до  $20^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  и точностью задания температуры  $1^{\circ}\text{C}$ . Контроль температуры образца во время эксперимента осуществлялся с помощью трех контактных термопар (Рис.1). Испытания проводились на плоских образцах с размером рабочей части  $10 \times 2,5 \times 1,75\text{мм}$ , геометрия образцов была получена методом электроэрозии.

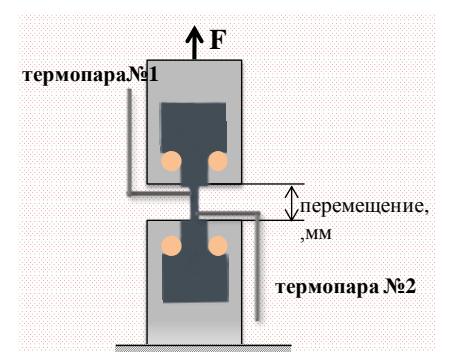


Рис.1. Схема крепления образца и установки контактных термопар.

Для исследования влияния размера зерна на механические характеристики стали при повышенных температурах были исследованы четыре группы образцов с различным размером зерна. Образцы первой группы с размером зерна

$35\pm11$  мкм являлись исходными образцами. Образцы второй, третьей и четвертой групп с размером зерен  $20\pm5$  мкм,  $8\pm2$  мкм и  $6\pm2$  мкм, соответственно, были получены аустенизацией и методом термоциклической обработки. Для установления влияния морфологии и фазового состава на процесс деформирования была выбрана четвертая группа образцов с размером зерна  $6\pm2$  мкм. Приведенные результаты испытаний являются результатом осреднения не менее чем трех повторных экспериментов.

Приведена методика обработки экспериментальных диаграмм и расчета основных параметров материала по экспериментальным данным. А также показана методика анализа микроструктуры образцов после испытаний с целью определения механизма деформации и разрушения.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментального исследования механических свойств стали при испытаниях на одноосное растяжение в интервале температур от  $650^{\circ}\text{C}$  до  $950^{\circ}\text{C}$  и скоростей от  $10^{-4} \text{ с}^{-1}$  до  $0.01 \text{ с}^{-1}$ . Проведен анализ влияния размера зерна, морфологии, фазового состава, температуры, и скорости деформации на механические свойства стали. Также предложена методика двухэтапного деформирования с целью получения больших деформаций (до 30%) при температуре  $730^{\circ}\text{C}$ .

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния размера зерна на деформирование низкоуглеродистой мартенситной стали при температурах  $850^{\circ}\text{C}$  и  $730^{\circ}\text{C}$ . Выбор температур был основан на необходимости получения результатов для однофазного и двухфазного состава стали. Несмотря на большие различия размеров зерен в изученных образцах, поведение образцов при деформации при высоких температурах схожи, уровень напряжений и максимальная деформация незначительно зависят от исходного размера зерна (Рис.2). Влияние размера зерна на чувствительность к скорости деформации несущественно.

Чувствительность к скорости деформации немного выше при температуре  $850^{\circ}\text{C}$ , но всегда в пределах от 0,15 до 0,17, что характерно для дислокационной ползучести.

Уровень напряжения при  $730^{\circ}\text{C}$  выше, чем при  $850^{\circ}\text{C}$  и эта разница основана на двух факторах: температуре и фазовом составе.

Сравнение кривых деформирования для однофазного (аустенит) и образцов показало, что наличие материала при растяжении при

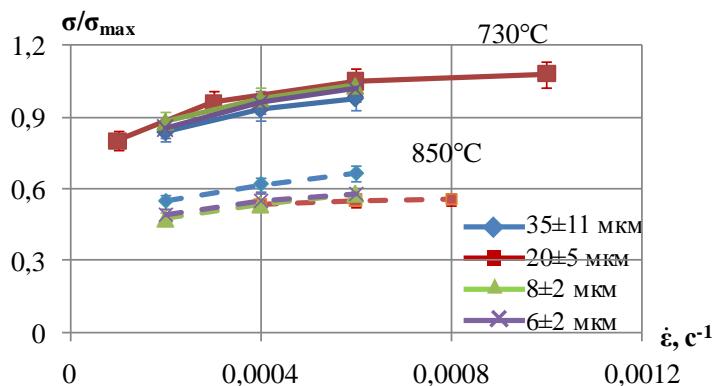


Рис.2.Максимальное напряжение при растяжении в зависимости от скорости деформации и температуры для образцов с различным размером зерна.

двуфазного состояния (аустенит и мартенсит) сильно влияет на поведение материала при растяжении при

высоких температурах (Рис.3). Кривая деформирования однофазного образца имеет заметное упрочнение. Снижение напряжения до разрушения начинается позже, чем для двухфазного состояния, однако это, в основном, связано с повышением температуры, так как максимальная однородная деформация отличается незначительно.

Существенные различия наблюдались при исследовании микроструктуры образцов после испытаний при 730°C и при 850°C. Термообработанные образцы после деформирования при 850°C имеют микроструктуру с равноосными зернами, размер которых незначительно отличается от начального, как в области однородных деформаций, так и в области шейки. Образцы после деформации при 730°C имеют равноосные зерна с начальным

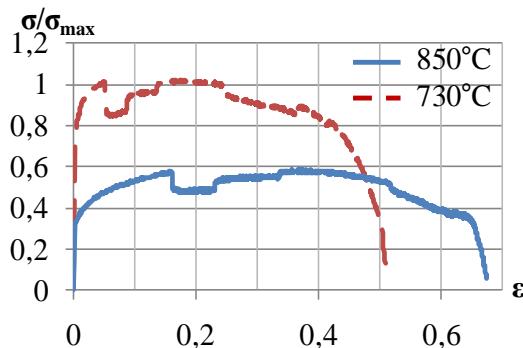


Рис.3. Кривые деформирования при 730°C (двуфазное состояние) и 850°C (однофазное состояние).

деформирование низкоуглеродистой мартенситной стали, на группе образцов с размером зерна  $6 \pm 2$  мкм. Испытания проводились в диапазоне температур от 600°C до 950°C, который был разделен на три подинтервала в соответствии с фазовым составом: 800°C - 950°C, 680°C - 800°C и 650°C - 680°C. Для каждого интервала температур были проведены две серии испытаний:

1. Испытания на растяжение со скачкообразным изменением скорости деформации с целью определения чувствительности к скорости деформации и установления механизма деформации;
2. Испытания на растяжение с постоянной скоростью деформации для установления уровня состояния материала.

Результаты исследования поведения материала в интервале температур аустенитной фазы (800°C - 950°C) показали, что механизм деформации не зависит от размера зерна и имеет низкую чувствительность к скорости деформации, близкой к 0,18. Анализ микроструктуры, а также найденное значение энергии активации деформации показали, что во время деформации происходит процесс рекристаллизации.

Предложена методика для исследования деформирования аустенитной фазы при температурах ниже 800°C . С помощью данной методики было

размером только в области однородной деформации, в то время как в области шейки, микроструктура состоит из небольших зерен (около 2 мкм) и удлиненных зерен мартенсита. При 730°C в зоне шейки происходит динамическая рекристаллизация, что приводит к измельчению зерна. Микроструктура исходного образца в обоих случаях сильно отличалась от термообработанных образцов, что, в первую очередь, связано с влиянием размера зерна.

Проведено исследование влияния температуры и фазового состава на

установлено, что свойства аустенита при температурах от 700°C до 800°C могут быть получены путем интерполяции свойств, определенных при более высоких температурах.

Результаты испытаний в интервале температур фазового перехода (680°C - 800°C) показали, что упрочнение увеличивается с увеличением температуры деформирования.

Исследование процесса деформирования низкоуглеродистой мартенситной стали в интервале температур мартенситной фазы 600°C - 680°C показало, что механизм деформации при температурах выше 650°C отличается от механизма деформации при более низких температурах, в виду активации движения дислокаций.

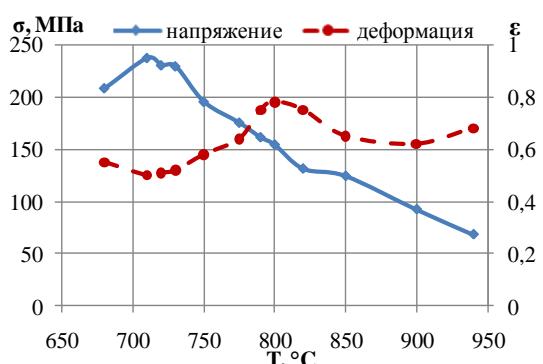


Рис.4. Максимальные напряжения и максимальная деформация до разрушения в зависимости от температуры.

Влияние температуры на максимальные напряжение при растяжении и деформацию до разрушения показано на Рис. 4. При увеличении температуры, максимальное напряжение уменьшается, в то время как максимальная деформация до разрушения заметно увеличивается лишь при температуре конца фазового перехода,  $A_{c3}$  ( $A_{c3} = 800$  °C при скорости нагрева 10°C/мин).

На основании анализа результатов испытаний предложена методика деформирования низкоуглеродистой

мартенситной стали, позволяющая повысить пластические свойства материала. Известно, что уменьшение размера зерна может привести к увеличению деформируемости стали, с этой целью был проведен двухэтапный эксперимент. Двухэтапный эксперимент предполагает, что растяжение проводится с двумя различными скоростями деформации. На первом этапе происходит деформирование с большой скоростью деформации с целью активации процесса динамической рекристаллизации и получения мелкозернистой структуры. На втором этапе происходит деформирование полученной мелкозернистой структуры с малой скоростью деформации.

На основании экспериментальных данных были построены зависимости деформаций начала образования шейки и активации рекристаллизации от скорости деформации. Исходя из анализа этих зависимостей, для первого шага была выбрана скорость деформации  $0,04\text{с}^{-1}$ , после достижения деформации 0,2 скорость уменьшалась до  $0,0004\text{с}^{-1}$ .

Установлено, что использование методики двухэтапного деформирования в интервале температур, соответствующих двухфазной структуре, способствует уменьшению продолжительности деформирования и увеличению области однородной деформации, а также максимальной деформации до разрушения.

Основными результатами третьей главы являются данные экспериментальных исследований, на основе которых может быть установлен закон деформирования низкоуглеродистой мартенситной стали, учитывающий связь структурного состояния с комплексом механических свойств. А также методика двухэтапного деформирования, способствующая повышению пластических свойств стали.

**В четвертой главе** представлено определение уравнения состояния стали с учетом морфологии и фазового состава, а также проведена верификация полученных уравнений.

На основе экспериментальных исследований было установлено, что фазовый состав стали влияет на его механические характеристики. Поэтому было выделено четыре интервала температуры, в зависимости от морфологии и фазового состава. При температурах ниже 680°C, сталь имеет мартенситную структуру, Рис. 3. При нагреве выше 680°C начинается фазовое превращение мартенсита в аустенит, небольшие аустенитные зерна зарождаются на границе пластин и зерен мартенсита. При температурах выше 800°C, существует только аустенитная фаза.

Таким образом, можно выделить три вида морфологии фаз в зависимости от температуры, Рис.6:

- однофазная с известным размером зерна (мартенсит (<680°C) или аустенит (> 800°C));
- матрица мартенсита усиленная небольшими твердыми зернами аустенита (680°C - 730°C);
- фаза аустенита с включениями мартенсита (730°C - 800 ° C).

Уравнение состояния было определено для каждого интервала температур, в соответствии с морфологией и фазовым составом стали.

Кривые деформирования в интервале температур аустенитной фазы имеют заметное упрочнение. Теоретическое описание такого рода кривых соответствует теории ползучести с упрочнением со следующим соотношением между скоростью деформации ползучести, температурой, напряжением и деформацией ползучести:

$$\sigma_A = A_A \dot{\varepsilon}^{m2} \varepsilon^n e^{Q_2 m2/RT} \quad (2)$$

где  $\sigma_A$  - напряжение,  $\varepsilon$  - деформация ползучести,  $\dot{\varepsilon}$  - скорость деформации ползучести,  $m2$  - чувствительность к скорости деформации аустенитной фазы,  $n$  - параметр упрочнения,  $Q_2$  - энергия активации деформации для аустенитной фазы;  $A_A$  - эмпирическая константа.

Кривые деформирования мартенсита не имеют упрочнения. Теоретическое описание такого рода кривых соответствует теории ползучести без упрочнения:

$$\sigma_M = A_M \dot{\varepsilon}^{m1} e^{Q_1 m1/RT} \quad (3)$$

где  $\sigma_M$  - напряжение,  $m1$  - чувствительность к скорости деформации для мартенситной фазы,  $Q_1$  - энергия активации деформаций мартенситной фазы,  $A_M$  - эмпирическая константа.

В соответствии с экспериментальными исследованиями микроструктуры и механических свойств, при температурах 680°C - 730°C сталь была рассмотрена как дисперсно-упрочненная, и описана следующим уравнением состояния:

$$\sigma_1 = A_M(1-f)^{-h(m1)}\dot{\varepsilon}^{m1}e^{Q_1m1/RT} \quad (4)$$

где  $\sigma_1$  - напряжение,  $\dot{\varepsilon}$  - скорость деформации ползучести,  $m1$  - чувствительность к скорости деформации (мартенсита),  $Q_1$  - энергия активации (для мартенсита);  $A_M$  - эмпирическая константа мартенсита,  $f$  - объемная доля аустенита при заданной температуре ( $T$ ),  $h(m1)$  - показатель функции упрочнения, который определяется как:

$$h(m1) = 0.39(1-m1) + 2.5(m1) \quad (5)$$

Однако уравнение состояния (4) описывает поведение материала при условии, что вторая фаза не образует замкнутой структуры в материале и не деформируется.

Учитывая, что при температурах 730°C - 800°C аустенит является основной фазой, испытывающей деформации, а также, что он более трудно деформируемый, и при этом микроструктурный анализ не выявил кавитаций в однородной области деформации на границах зерен, необходимо, чтобы мартенситная фаза имела такие же деформации. Основываясь на этих фактах, уравнение состояния было записано в виде суммы напряжений аустенитной и мартенситной фазы, так как обе фазы имеют одинаковую деформацию:

$$\sigma_2 = f\sigma_A + (1-f)\sigma_M \quad (6)$$

где  $\sigma_2$  - напряжение,  $f$  - объемная доля аустенита при данной температуре;  $\sigma_A$  - напряжения в аустенитной фазе, определяемые по уравнению состояния (2),  $\sigma_M$  - напряжения в мартенситной фазе, определяемые по уравнению состояния (3).

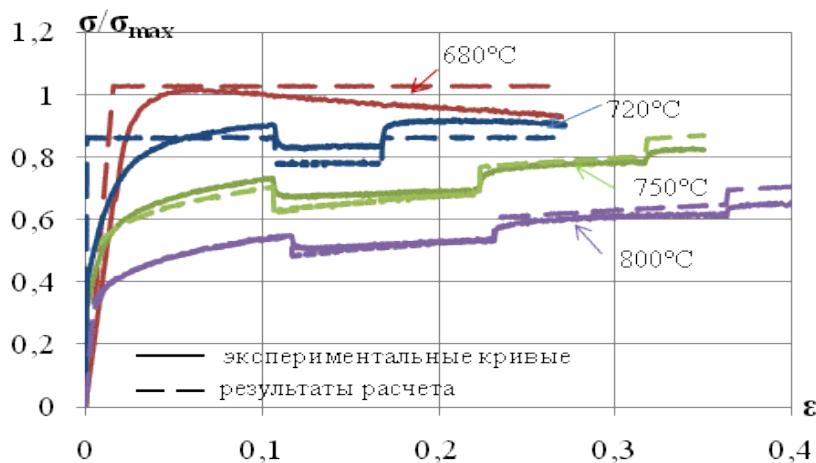


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и теоретических кривых, рассчитанных по уравнениям (2), (3), (4) и (6) при испытании со скачкообразным изменением скорости деформации при 680°C, 720°C, 750°C и 800°C.

Параметры уравнения состояния были найдены методом аппроксимации экспериментальных кривых. В данной работе для определения параметров уравнения использовался метод наименьших квадратов. Все параметры

уравнения определялись в зоне однородной деформации по экспериментальным кривым при постоянной скорости деформации. Экспериментальные кривые со скачкообразным изменением скорости деформации использовались для верификации полученного уравнения состояния

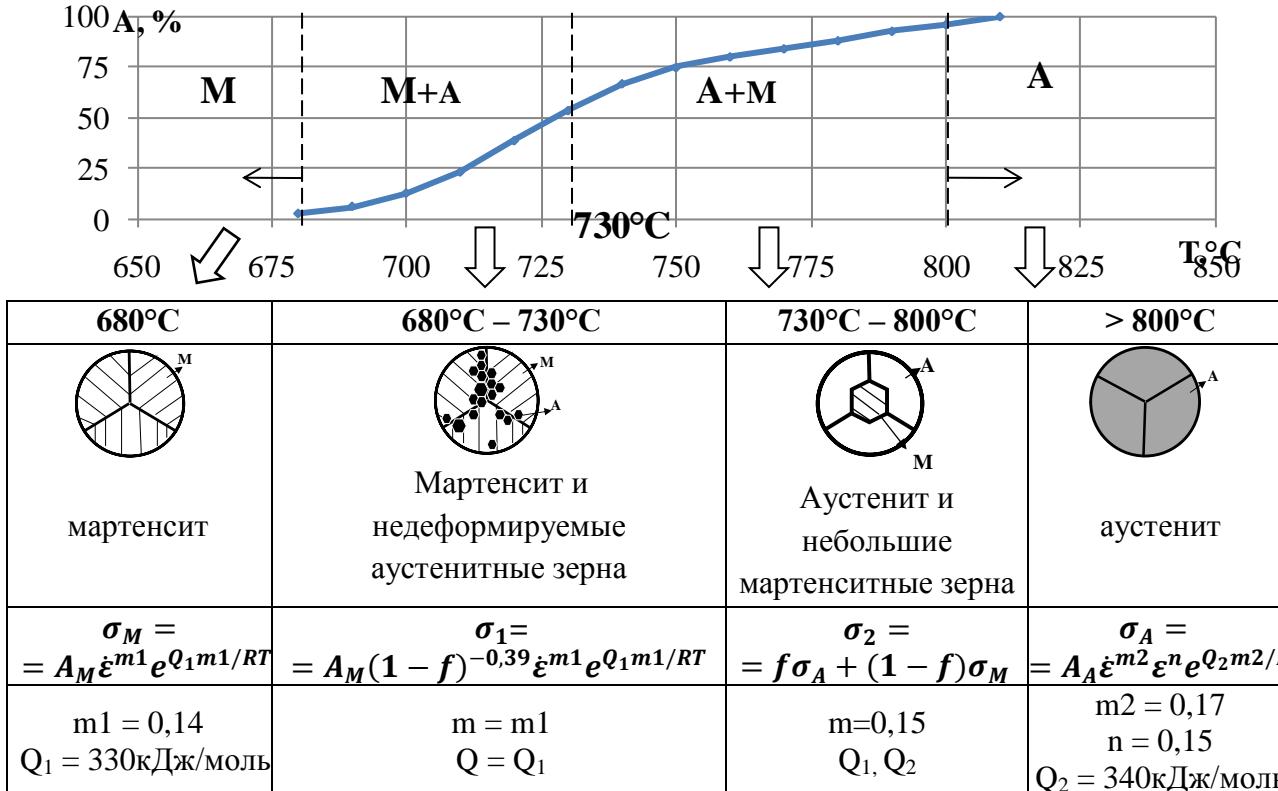


Рис.6. Уравнения состояния и параметры материала в зависимости от морфологии и фазового состава стали.

Для проверки адекватности выбранных уравнений, а также возможности описания поведения материала при различных историях нагружения, была проведена верификация полученных уравнений на примере процесса релаксации. С использованием полученных уравнений была решена задача о релаксации напряжения растянутого образца при температуре  $800^{\circ}\text{C}$ , а затем проведено сравнение с экспериментальными данными.

Для проверки возможности использования полученных уравнений для численных расчетов методом конечных элементов было проведено сравнение экспериментальных данных и результатов расчета в программном комплексе ANSYS при моделировании процесса растяжения.

Основным результатом главы является разработанная модель деформирования низкоуглеродистой мартенситной стали в широком диапазоне температур, учитывающая морфологию и фазовый состав стали, которая позволяет моделировать поведения материала при высоких температурах.

В пятой главе показано обобщение полученных уравнений на случай сложного напряженного состояния. Представлено численное моделирование трехточечного изгиба широкой полосы в конечно-элементном программном

комплексе ANSYS с использование уравнений состояния, полученных в главе 4. Проанализированы и определены параметры деформирования (температура и скорость перемещения пуансона), которые позволяют получить необходимую форму заготовки. Представлено численное моделирование формовки заготовки лопатки.

Лопатки гидротурбин имеют сложную форму, которая постоянно совершенствуется с целью повышения их производительности. Одной из основных операций изготовления лопаток гидротурбин является горячая формовка. Основные деформации при формовке связаны с изгибом. Для упрощения соединений деталей необходимо формирование заготовок сложной формы, в которых максимальный угол изгиба составляет  $90^\circ$ . В связи с этим трехточечный изгиб – это самый простой способ определения возможности формирования необходимого угла заготовки. Поэтому для моделирования была выбрана данная задача. Целью моделирования являлось определение возможности изгиба заготовок на угол  $90^\circ$  и оптимизация параметров деформирования (уменьшения силы и температуры формовки), Рис.7.

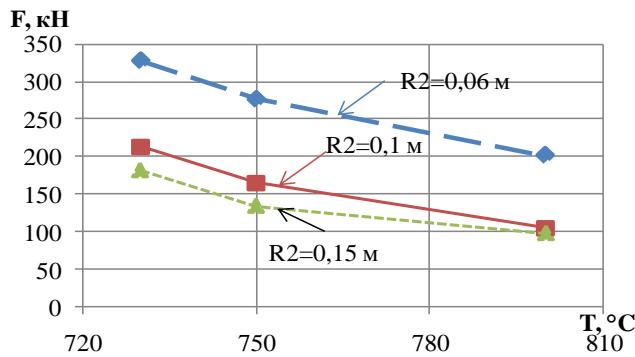


Рис.7. Зависимость максимальной силы от температуры и радиуса пуансона при скорости перемещения 0,0008 мм/с.

допустимой скорости деформирования;

- температура  $800^\circ\text{C}$  может быть выбрана в качестве оптимальной температуры для горячей штамповки, поскольку она обеспечивает больший угол изгиба в широком диапазоне скоростей деформации.

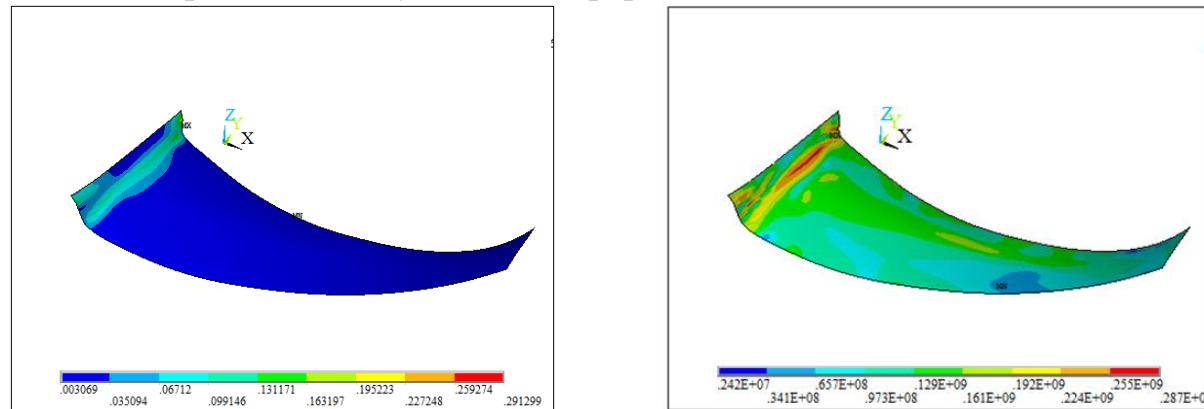
Используя уравнения состояния, полученные в предыдущей главе, а также результаты трехточечного изгиба было проведено моделирование процесса формовки лопатки гидравлической турбины. Численный анализ позволяет определять рациональные параметры процесса формовки без натурных экспериментов. Целью моделирования являлось определение силы, которая возникает при штамповке заготовки лопатки гидравлической турбины, а также определение возможности формовки сложной формы с углом  $90^\circ$ .

Результаты численного анализа напряженно-деформированного состояния заготовки лопатки при горячем деформировании показаны на Рис.8. На

на основании результатов численного моделирования трехточечного изгиба было установлено, что:

- изгиб на угол  $90^\circ$  в пределах допустимых деформаций возможен при  $800^\circ\text{C}$  со скоростью перемещения пуансона в диапазоне 0,016мм /с до 0,0008мм/с, радиус пуансона более 0,06м;
- уменьшение температуры деформирования приводит к увеличению силы и уменьшению

основании результатов расчета и предыдущих экспериментальных исследований деформирования низкоуглеродистой мартенситной стали в заданных условиях, установлено, что при температуре формовки 800°C и скорости перемещения пуансона в диапазоне 0,016мм /с до 0,0008мм/с возможно получение более сложной формы лопатки гидротурбины без достижения предельно допустимых деформаций.



а) Распределение эквивалентной деформации. б) Распределение эквивалентного напряжения.

Рис.8. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния при горячей формовке лопатки гидротурбины с усложненной геометрией.

Таким образом, предложенная модель позволяет определять параметры горячего деформирования заготовок деталей гидротурбин, обеспечивающие необходимые значения деформаций без повреждений.

### **Основные результаты и выводы**

1. Получены новые экспериментальные данные о деформировании низкоуглеродистой мартенситной стали при испытаниях на растяжение в интервале температур 650°C - 950°C.
2. Установлено влияние скорости деформации, а также морфологии и фазового состава на процесс деформирования низкоуглеродистой мартенситной стали.
3. Предложена методика проведения двухэтапных испытаний на растяжение при различных температурах. Экспериментально установлено, что такая методика приводит к уменьшению длительности деформирования примерно на 30% и увеличению зоны однородной деформации.
4. На основе положений механики деформируемого твердого тела разработана модель деформирования перспективной низкоуглеродистой мартенситной стали в широком интервале температур (650°C-950°C), учитывающая связь структурного состояния с комплексом механических свойств.
5. Представлена конечно-элементная модель лопатки турбины с использованием разработанной модели материала, которая позволяет

определять параметры горячего деформирования заготовки для совершенствования процессов изготовления деталей гидротурбин.

6. Показано, что формовка при температуре 800°C обеспечивает необходимые значения деформаций без повреждений в широком интервале скоростей перемещений при снижении силы штамповки.

### **Список литературы:**

1. Колебина Н.В., Данилов В.Л., Верон М., Прижан С. Исследование кратковременной ползучести перспективной турбинной стали // Наука и образование. Электрон. журн., 2014. Вып. 11. DOI: [10.7463/1114.0733687](https://doi.org/10.7463/1114.0733687) (0.810 п.л./0.35п.л.)
2. Колебина Н.В., Данилов В.Л., Фрешинет С. Получение мелкозернистой структуры термообработкой в низкоуглеродистых мартенситных сталях // Наука и образование. Электрон. журн., 2015. Вып. 11. DOI: [10.7463/0915.0810545](https://doi.org/10.7463/0915.0810545) (1.155п.л./0.45п.л.)
3. Колебина Н.В., Данилов В.Л. Моделирование процесса высокотемпературного деформирования низкоуглеродистой стали // Системы управления и информационные технологии, 2016, №2(64), 98-100 (0.345п.л./0.2 п.л.)
4. Колебина Н.В. и др. Изучение микроструктуры новой низкоуглеродистой мартенситной стали // 5-я международная научно-инновационная молодежная конференция: Материалы НТК. Тамбов: ТСТГУ, 2013. С. 122-124. (0.125 п.л./0.05 п.л.)
5. Колебина Н.В. и др. Улучшение деформируемости турбинной стали путем создания мелкозернистой структуры// 6-я международная научно-инновационная молодежная конференция: Материалы НТК. Тамбов: ТСТГУ, 2014. С. 101-103. (0.175 п.л./0.075 п.л.)
6. Колебина Н.В., Данилов В.Л., Blandin J.-J., Prigent S. Физико-математическая модель сверхпластичности и кратковременной ползучести мартенситной стали // X-я международная школа-семинар «Проблемы оптимизации сложных систем»: Труды НТК. с. Булан-Соготту: Институт теоретической и прикладной математики НАН КР, 2014. С. 422-424.(0.175 п.л./0.075п.л.)
7. Колебина Н.В., Данилов В.Л., Прижан С. Анализ глубокого деформирования мартенситной стали в условиях сверхпластичности // VI-я международная конференция. Проблемы механики современных машин: Материалы НТК. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2015. Т. 2. С. 200-204. (0.285 п.л./0.1 п.л.)
8. Kolebina N.V., Danilov V.L. Influence of morphology and phase constitution on creep properties of low-carbon martenstic steel // Nanomechanics Science and Technology: An International Journal, 2015, vol.6, №3, pp. 1-9.(1.04 п.л./0.65 п.л. )