

На правах рукописи



**КУЗОВЛЕВА Ольга Владимировна**

**АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МЕТАЛ-  
ЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИ-  
ЯХ В СОСТОЯНИИ ПРЕДПРЕВРАЩЕНИЯ**

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Курск 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тульский государственный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Гвоздев Александр Евгеньевич**

Официальные оппоненты:

**Гадалов Владимир Николаевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки Российской Федерации, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Юго–Западный государственный университет»,  
профессор кафедры «Материаловедение и сварочное производство»

**Чуканов Александр Николаевич,**  
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тульский государственный университет», профессор кафедры физики

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва»

Защита состоится 14 ноября 2012 г. в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.105.01 при Юго–Западном государственном университете по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94 (конференц-зал).

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Юго–Западного государственного университета.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.105.01  
**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИ-**



Борис Владимирович Лушников  
**СТИКА РАБОТЫ**

## **Актуальность работы**

Фазовые превращения имеют большое значение в металловедении и термической обработке металлов и сплавов, т.к. влияют на процессы структурообразования металлических систем, физико-механические свойства и определяют, в итоге, ресурс деталей машин и конструкций.

Изучение закономерностей развития фазовых превращений важно для научного и практического использования, поскольку некоторые фазы могут обладать уникальными свойствами. Особый интерес в рассмотрении механизма фазовых превращений представляет состояние предпревращения и наблюдаемое при этом аномальное изменение некоторых свойств и структуры.

Этот вопрос изучался ранее известными представителями ведущих научных школ. Новиков И.И. рассматривал особые состояния металлических кристаллов. Воробьёв В.Г. изучал аномальные свойства металлических сплавов во время протекания фазовых превращений. Гуляев А.П. и Пуарье Ж.П. проводили изучение высокотемпературной пластичности углеродистых сталей. Пресняков А.А., Шоршоров М.Х., Кайбышев О.А., Смирнов О.М., Портной В.К. и другие учёные изучали сверхпластичность различных высоколегированных сталей и сплавов цветных металлов, связанную с диффузионными фазовыми превращениями. Белов К.П. исследовал различные эффекты в металлах и сплавах при фазовых переходах второго рода.

Однако до сих пор не решены в полном объёме задачи о закономерностях изменения физико-механических свойств в различных металлических системах (металлах и сплавах) в состоянии предпревращения; не установлены количественные значения величин температурных интервалов состояния предпревращения; нет исчерпывающих данных о влиянии внешних воздействий различной природы (например, термоциклирования) в различных интервалах состояния предпревращения перед фазовыми переходами второго рода (например, в точке Кюри) на структуру различных мономорфных металлов; не разработаны гипотезы состояния предпревращения; не показана важность состояния предпревращения металлических систем для разработки ресурсосберегающих способов термомеханической обработки высоколегированных промышленных труднодеформируемых сталей.

Диссертационная работа выполнена по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ (ресурсосберегающие технологии, производственные технологии, экология и рациональное природопользование), по госбюджетным темам НИР № 41–06 «Разработка структурно–термомеханических моделей для ресурсосберегающего деформирования стали Р6М5», № 54–01 «Разработка ресурсосберегающих процессов формоизменения заготовок при изотермическом нагружении на основе моделирования и оптимизации структуры и свойств материалов», № 06–10 «Использование состояния предпревращения металлических систем для оптимизации режимов ресурсосберегающих способов их обработки» и при выполнении проекта РНП 3.1.1.8498 «Новые технологии организации и планирования эффективного учебного процесса в высшей школе» по целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 гг.)» в Тульском государственном университете и в базовой лаборатории ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН «Новые процессы формоизменения металлических материалов специального назначения» при ТулГУ.

## **Цель работы**

Установление закономерностей изменения структуры и свойств металлических систем при термомеханическом воздействии на них вблизи температур

фазовых переходов 1-го и 2-го рода, и оптимизация на этой основе режимов ресурсосберегающих технологий формоизменения труднодеформируемых объектов, основанных на использовании резервов пластичности предпереходного состояния.

### **Задачи исследования**

1. Систематизировать и обобщить литературные данные для подготовки анализа состояния вопроса по теме исследования.
2. Обосновать выбор объектов и комплексной методики исследования.
3. Выявить закономерности изменения пластичности в углеродистых сталях марок 10, 35 и У8А при растяжении в состоянии предпревращения.
4. Построить математические модели характеристик пластичности и прочности стали Р6М5–МП и установить закономерности изменения указанных свойств при изотермическом растяжении и сжатии в интервале температур от 600 до 900 °С и скоростей деформации от 0,001 до 0,1 с<sup>-1</sup> в состоянии предпревращения.
5. Установить влияние термоциклической обработки (ТЦО) на количественные характеристики структуры никеля в состоянии предпревращения при фазовом переходе 2-го рода.
6. Разработать гипотезу состояния предпревращения, основанную на особенностях изменения структуры и свойств металлических систем.
7. Создать новый способ ресурсосберегающей термомеханической обработки высоколегированной быстрорежущей стали Р6М5–МП в состоянии предпревращения.

### **Методы исследования**

В работе использованы высокотемпературные механические испытания, рентгеноструктурный фазовый анализ, рентгеновский метод определения текстуры, рентгенофлуорисцентный анализ, дифференциально–термический анализ, металлографические исследования, электронно-микроскопический анализ и методы регрессионного анализа экспериментальных результатов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Закономерности изменения характеристик пластичности углеродистых сталей марок 10, 35 и У8А в состоянии предпревращения.
2. Термо–механические модели характеристик прочности и пластичности высоколегированной быстрорежущей стали Р6М5–МП и закономерности изменения указанных свойств при растяжении и сжатии в различных температурно–скоростных условиях.
3. Выявленные изменения микро- и субструктуры никеля в состоянии предпревращения после ТЦО вблизи точки Кюри.
4. Гипотезу состояния предпревращения металлических систем при полиморфных превращениях.
5. Способ термомеханической обработки быстрорежущей стали Р6М5–МП в состоянии предпревращения.

### **Научная новизна**

1. Установлены закономерности изменения характеристик пластичности сталей марок 10, 35 и У8А при термомеханическом воздействии растяжением в интервале температур от 700 до 870 °С со скоростью деформирования 1 мм/мин, свидетельствующие об экстремальном изменении относительного

удлинения в состоянии предпревращения перед фазовым переходом первого рода.

2. Разработаны математические модели характеристик пластичности и прочности стали Р6М5–МП, описывающие изменение сопротивления деформации при растяжении и сжатии и относительного удлинения при растяжении в интервале температур от 600 до 900°C и скоростей деформации от 0,001 до 0,1 с<sup>-1</sup>, и установлены закономерности изменения характеристик механических свойств в состоянии предпревращения. Установлено, что в этом состоянии в кристаллической решётке металлической системы обеспечиваются наибольшее разупрочнение при  $T_{\sigma min}$  и наибольшая неустойчивость при  $T_{\delta max}$ .

3. Выявлены изменения структуры никеля после термоциклической обработки в состоянии предпревращения перед фазовым переходом 2-го рода, связанные с формированием высокодисперсной и однородной структуры.

4. Предложена гипотеза, связывающая состояние предпревращения металлических систем перед полиморфными превращениями с их метастабильностью, разупрочнением и неустойчивостью, обусловленных образованием структурных вакансий, облегчающих перестройку кристаллической решётки во всём объёме системы при фазовом переходе.

### **Степень обоснованности и достоверности полученных результатов**

Достоверность полученных в диссертации результатов и выводов обеспечивается грамотным использованием современных методов исследований и обработки данных и большим объёмом экспериментальных и теоретических результатов, полученных при решении поставленных задач.

### **Практическая значимость**

1. Освоена и развита методика комплексного исследования поведения металлических систем при различных термомеханических воздействиях.

2. Получены зависимости изменения относительного удлинения сталей марок 10, 35 и У8А от температуры при растяжении, которые могут служить основой для оптимизации температурных условий их обработки в состоянии предпревращения.

3. Установлены температурно–скоростные зависимости изменения характеристик изотермического деформирования стали Р6М5–МП при растяжении и сжатии и рассчитаны экстремальные значения температур минимальной прочности  $T_{\sigma min}$  и максимальной пластичности  $T_{\delta max}$ , являющиеся основой для оптимизации термомеханических условий ресурсосберегающей обработки исследуемых металлических систем в состоянии предпревращения.

4. Выявлено, что термоциклическая обработка никеля в состоянии предпревращения вблизи фазового перехода 2-го рода позволяет получать высокодисперсную и однородную структуру.

5. Разработан способ получения заготовок быстрорежущего инструмента из стали Р6М5–МП в состоянии предпревращения, защищённый патентом РФ на изобретение № 2337977, который обеспечивает повышение коэффициента использования металла, снижение расхода энергоресурсов и увеличение стойкости инструмента.

### **Реализация и внедрение результатов исследований**

Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке малоотходных ресурсосберегающих процессов термомеханической обработки сталей и сплавов, что подтверждено документами от предприятий

«Стройтехника» (г. Подольск), «ПКТИмаш–плюс» и НПП «Вулкан–ТМ» (г. Тула).

Результаты диссертационных исследований использованы в учебном процессе Тульского артиллерийского института и Тульского государственного университета при чтении курсов лекций «Материаловедение» и «Технология конструкционных материалов», что подтверждено соответствующими актами.

### **Апробация работы**

Основные положения и практическое внедрение диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях и выставках.

1. XXI Международная конференция «Нелинейные процессы в твёрдых телах» (Воронеж, 2004 г.).

2. Научно-практические конференции профессорско–преподавательского состава Тульского государственного университета (Тула, 2004–2011 гг.).

3. XV Межвузовская научно–практическая конференция Тульского артиллерийского инженерного института (Тула, 2005 г.).

4. Международная научная конференция по механике сплошных сред WSEAS/IASME Continuum mechanics 2006 (Тула, 2006 г.). Российское заседание специальной секции «Процессы пластического деформирования металлов: моделирование и эксперименты» (Тула, 2006 г.).

5. III Международная конференция ИНТЕРНАС–2007 (Калуга, 2007 г.).

6. XI Международная научно–практическая конференция «Шлифабразив–2007» (Волжский, 2007 г.).

7. XI Международная конференция «Взаимодействие дефектов и неупругие явления в твёрдых телах» (Тула, 2007 г.).

8. II, III и IV Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN (Москва, 2007, 2009 и 2011 гг.).

9. V Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Перспективные материалы» (Москва, 2008, 2009 гг.).

10. VII Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физикохимия и технология неорганических материалов» (Москва, 2010 г.).

11. Международная выставка «Архимед–2009», на которой работа «Энергосберегающие способы малоотходных технологий температурной и механической обработки сталей», выполненная по теме диссертации, удостоена диплома и серебряной медали (Москва, 2009).

12. X юбилейной специализированной выставке «Изделия и технологии двойного назначения–2009», где представленная разработка способа обработки быстрорежущей стали удостоена диплома и золотой медали (Москва, 2009).

13. Выставка научно–технического творчества молодёжи в 2011 г. в городе Туле, где работа «Использование состояния превращения металлических систем для оптимизации режимов ресурсосберегающих способов их обработки и получения металлорежущего инструмента», выполненная по материалам диссертации, удостоена диплома.

14. Конкурс на звание «Лучший молодой учёный Тульского государственного университета, 2010», в котором работа «О состоянии превращения металлов и сплавов: методика и результаты экспериментальных и теоретических исследований и практических разработок», выполненная по теме диссертации, заняла 3-е место.

### **Публикации**

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 18 научных трудах, среди которых 8 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК РФ по специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами и общих выводов. Она изложена на 252 страницах машинописного текста, включает 117 рисунков, 42 таблицы, 47 формул, 23 приложения и содержит список литературы из 173 наименований, среди которых 92 отечественных и 15 иностранных авторов.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, освещено современное состояние вопроса, сформулированы цель и задачи работы.

**Первая глава** представляет собой аналитический обзор отечественной и зарубежной литературы по поведению металлов и сплавов вблизи температур критических точек; рассмотрены классификация и механизмы фазовых превращений.

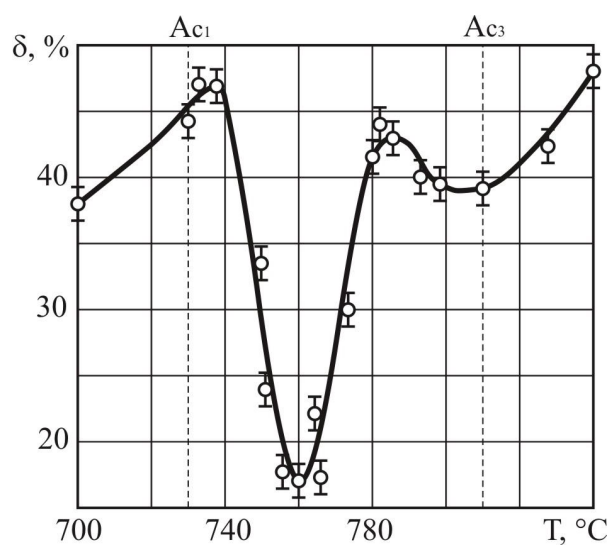
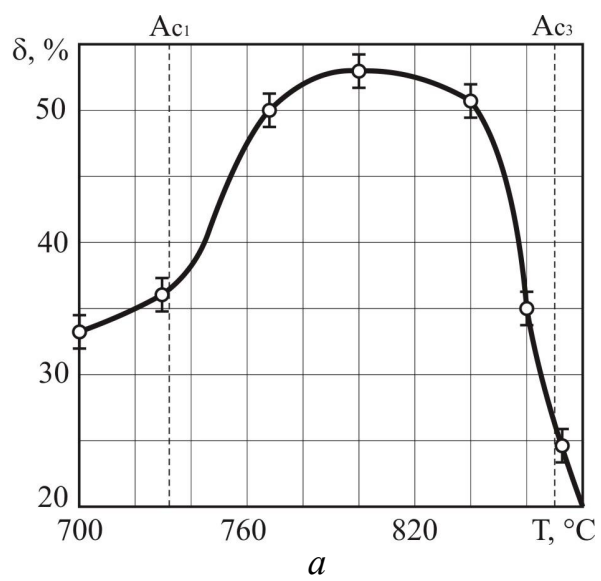
**Во второй главе** изложена методика проведения экспериментальных исследований и приведено обоснование выбора и характеристика объектов исследования: технически чистого никеля, углеродистых сталей марок 10, 35, У8А и высоколегированной быстрорежущей стали Р6М5–МП порошкового способа производства.

**Третья глава** посвящена изучению закономерностей изменения структуры и свойств углеродистых сталей марок 10, 35 и У8А, быстрорежущей стали Р6М5–МП и технически чистого никеля в состоянии предпревращения при термомеханических воздействиях.

Проведены исследования поведения пластичности углеродистых сталей марок 10, 35 и У8А при растяжении в интервале температур  $T = 700\text{--}870\text{ К}$  при скорости деформации 1 мм/мин. Для испытаний использовали цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 5 мм (ГОСТ 1497-84). В каждой точке испытывали по 3–4 образца. Пластичность оценивали величиной относительного удлинения образца после растяжения при комнатной и повышенных температурах на установке МИРИ–100К (ГОСТ 28840–90).

При испытаниях сталей в условиях повышенных температур было выявлено, что растяжение при данной скорости деформации ( $V = 1\text{ мм/мин}$ ) сопровождается чередующимися процессами упрочнения и возврата. При более высоких скоростях таких «скачков» на диаграмме не наблюдается и получаемые значения относительного удлинения ниже, чем при меньших скоростях деформации.

Анализ результатов, полученных для сталей марок 10, 35 и У8А (рисунок 1) показал, что существуют области предпревращения и для  $Ac_1$  и для  $Ac_3$ –переходов.





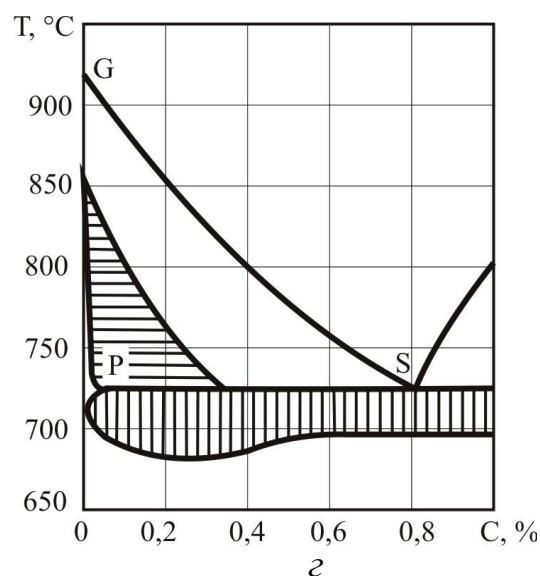
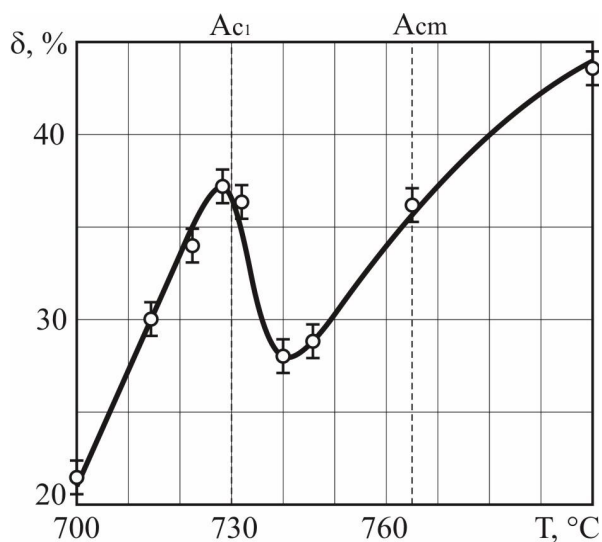


Рис. 1 Сопоставление результатов, полученных для сталей марок 10 (а), 35 (б) и У8А (в), с диаграммой профессора А.П. Гуляева (з)

В состояниях предпревращения (рисунок 1, з: вертикальная штриховка –  $A_{c1}$ -превращение, горизонтальная –  $A_{c3}$ -превращение) можно ожидать появления повышенной пластичности материала, а при совпадении скоростей деформирования и процессов подготовки фазового превращения – сверхпластичности.

Состояние предпревращения для точки  $A_{c3}$  в стали марки 10 приходится на температурный интервал 725–840 °С. Именно в указанном интервале температур реализуется эффект повышенной пластичности ( $\delta \sim 50\%$ ). По диаграмме профессора А.П. Гуляева эффект повышенной пластичности для стали 35 следует ожидать в интервале температур 680–725 °С, а для стали У8А – в интервале 700–725 °С, т.е. полученные результаты не противоречат диаграмме профессора А.П. Гуляева.

Для стали 35 установлено два интервала повышенной пластичности. Вторым максимум пластичности обнаружен вблизи критической точки  $A_{c3}$  и соответствует температурному интервалу 780–800 °С (рисунок 1, б).

В работе установлены закономерности изменения пластичности высоколегированной стали Р6М5–МП и предела прочности при растяжении и сжатии в интервале температур 600–900 °С и скоростей деформации от 0,001 до 0,1 с<sup>-1</sup>.

Если оценивать экстремальные точки с позиций проявления в них эффектов повышенной пластичности и сверхпластичности, то можно сказать, что при  $T=823\text{ }^{\circ}\text{C}$  при скоростях деформации  $0,1$  и  $0,01\text{ с}^{-1}$  проявляется эффект повышенной пластичности, а при скорости деформации  $0,001\text{ с}^{-1}$ , наблюдается эффект сверхпластичности и относительное удлинение  $\delta$  превышает  $100\%$ .

Полученные в результате регрессионного анализа модели, связывающие зависимость относительного удлинения  $\delta$  (1) и сопротивления деформации  $\sigma_B$  (2) стали Р6М5–МП от температуры и скорости деформации, имеют вид:

$$\delta = (40 \pm 5) \cdot 10^2 - (17,2 \pm 2,1) \cdot x_1 + (2,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-2} \cdot x_1^2 - (1,11 \pm 0,06) \cdot 10^{-5} x_1^3 - (11,0 \pm 0,5) \cdot 10^4 \cdot x_2^2 + (10,9 \pm 0,6) \cdot 10^5 \cdot x_2^3, \quad (1)$$

$$\sigma_B = - (75 \pm 13) \cdot 10 + (3,7 \pm 0,5) \cdot x_1 + (75 \pm 6) \cdot 10 \cdot x_2 - (1,2 \pm 0,1) \cdot x_3 - (2,3 \pm 0,2) \cdot x_4 - (0,56 \pm 0,07) \cdot 10^{-2} \cdot x_1^2 - (141 \pm 21) \cdot 10^2 \cdot x_2^2 + (27 \pm 3) \cdot 10^{-7} \cdot x_1^3 + (76 \pm 15) \cdot 10^3 \cdot x_2^3, \quad (2)$$

где  $x_1$  – температура  $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $x_2$  – скорость деформации  $\dot{\epsilon}$ ,  $\text{с}^{-1}$ ;  $x_3$  – размер карбидных частиц  $d$ ,  $\mu\text{м}$ ;  $x_4$  – показатель схемы напряжённого состояния  $n$ .

Вычислены экстремальные значения пластичности  $\delta_{\max}$  и прочности  $\sigma_{\min}$  и значения температур  $T_{\delta\max}$  и  $T_{\sigma\min}$ . Предложено характеризовать состояние металлической системы при  $T_{\sigma\min}$  как состояние термомеханического разупрочнения, характеризуемого наименьшей прочностью  $\sigma_{\min}$ , а при  $T_{\delta\max}$  как состояние термомеханической неустойчивости, характеризуемой максимальной пластичностью  $\delta_{\max}$ .

Установлено, что значения температур минимальной прочности и максимальной пластичности  $T_{\sigma\min}$  и  $T_{\delta\max}$  совпадают и составляют  $823\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что ниже точки  $A_{c1}$  (рисунок 2). Рассчитанные значения температур  $T_{\sigma\min}$  и  $T_{\delta\max}$  использованы на практике при разработке новых способов обработки быстрорежущей стали.

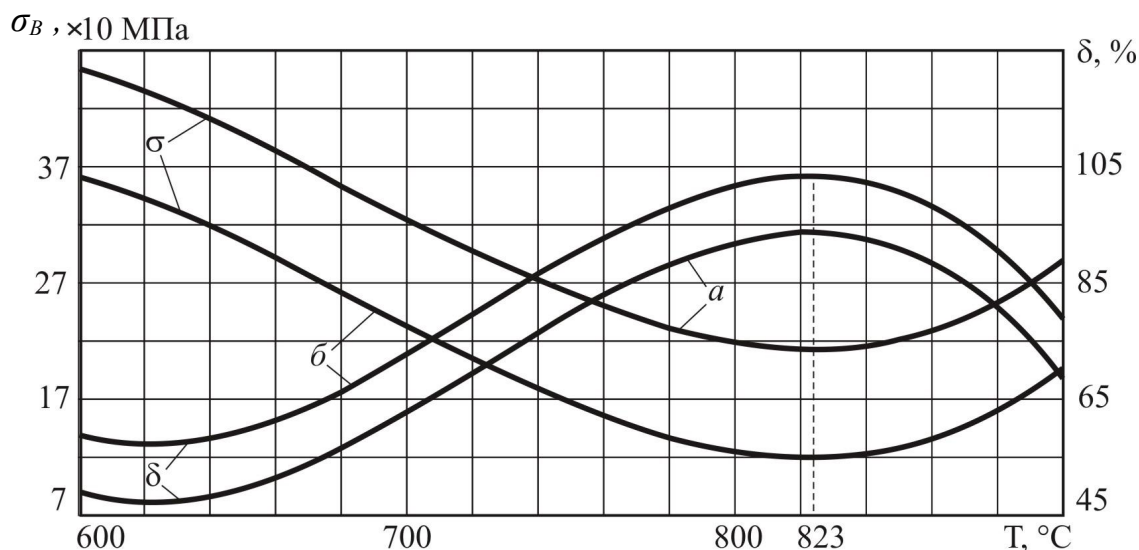


Рис. 2 Зависимости изменения предела прочности  $\sigma_B$  и относительного удлинения  $\delta$  от температуры в условиях растяжения при скорости деформации:  $a - 0,1\text{ с}^{-1}$ ,  $b - 0,001\text{ с}^{-1}$ , полученные по моделям (1) и (2)

Это говорит о том, что материал перед фазовым переходом находится в состоянии механической неустойчивости и разупрочнения, где сопротивление деформации минимально и материал наиболее податлив внешнему воздействию.

С целью обнаружения откликов системы на внешнее воздействие в окрестности точки фазового перехода II рода в работе были проведены исследования на образцах технически чистого никеля. Средний размер зерна никеля

в исходном состоянии ~ 6 мм. Из прутка изготовлены образцы со стороной 10 мм, которые подвергали термоциклической обработке по трём различным режимам (таблица 1). Выдержка при каждой температуре не менее 20 мин.

Таблица 1

Режимы ТЦО и параметры структуры в результате термоциклической обработки

Режим ТЦО	Температура, °С		Средний размер зерна, мкм	Размер субзерна, мкм
	минимальная	максимальная		
Режим I	300	370	26,6	0,10
Режим II	370	470	28,3	0,12
Режим III	470	550	69,0	0,17

При термоциклировании в течение 15 циклов по всем указанным режимам происходило измельчение исходного крупнозернистого никеля, однако параметры структуры существенно различаются (рисунок 3).

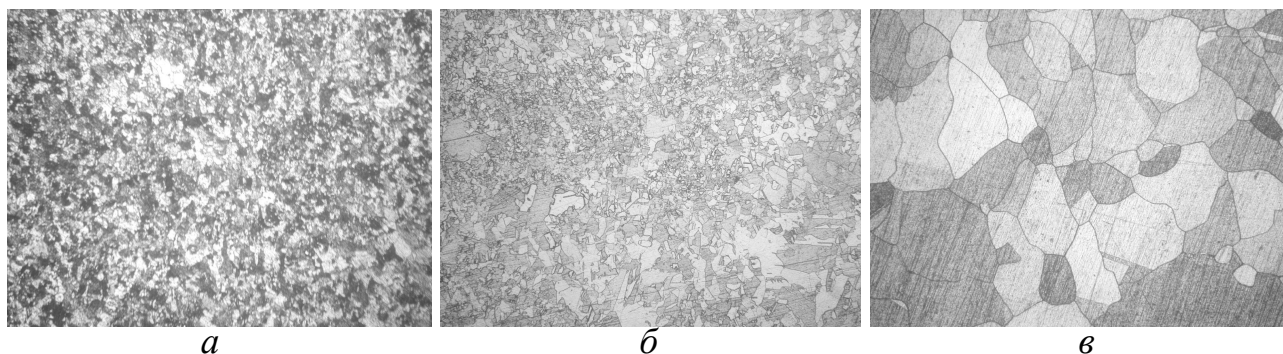


Рис. 3 Микроструктура образцов после 15 циклов ТЦО по режимам I (а), II (б), III (в),  $\times 100$

В таблице 2 приведены средние размеры зёрен после термоциклирования, а также параметры, характеризующие однородность распределения зёрен по размерам (дисперсия  $S^2$  и коэффициент вариации  $V$ ).

Таблица 2

Параметры зёрненной структуры образцов, прошедших ТЦО по различным режимам

Режим ТЦО	$\bar{d}$ , мкм	$S^2$ , мкм	$V$ , %
Режим I	26,6	345	69
Режим II	28,3	930	108
Режим III	69,0	4207	100

Мелкозернистая структура с высокой степенью однородности размера зерна получена после термоциклирования по режиму I, т.е. в температурном диапазоне, предшествующем фазовому переходу 2-го рода.

По литературным данным проведён анализ изменения вблизи точки Кюри таких свойств, как модуль упругости и температурный коэффициент линейного расширения, по поведению которых можно судить об изменении сил межатомного взаимодействия. Максимальные перепады значений рассматриваемых свойств характерны для режима I. Характер изменения этих свойств в период превращения соответствует нашим представлениям об этом состоянии, как о состоянии с ослабленными межатомными связями.

На образцах никеля в исходном состоянии и после ТЦО проводили также рентгеновский текстурный анализ, который показывает, что после ТЦО по режиму I на полюсных фигурах, полученных по кристаллографическим плоскостям (111), (200) и (311), полюсная плотность падает в 1,5–2,0 раза. Это может быть связано с повышением дисперсности и однородности структуры никеля после термоциклирования в состоянии предпревращения, что соответствует результатам выполненного микроскопического анализа никеля (см. таблицу 1).

**Четвёртая глава** посвящена разработке гипотезы об особом состоянии вещества в состоянии предпревращения. Изучены закономерности изменения свойств металлов и сплавов в состоянии предпревращения.

С целью изучения изменения свойств металлов в температурном интервале до температуры фазового равновесия по литературным данным были построены графики изменения плотности ( $d$ ), теплоёмкости ( $C_p$ ) и электросопротивления ( $\rho$ ) в зависимости от температуры для металлов разных подгрупп Периодической системы Д.И. Менделеева, испытывающих полиморфное или магнитное превращение: Fe, Co, Ni, Ti, Zr, Hf, Ca, Tl, Be, Sr, Sc, Y, Cr, Na, Sn, Li, U, Pr, La, Ce<sup>1</sup>.

Считали, что все перечисленные свойства являются линейной функцией температуры<sup>2</sup>. На построенных температурных зависимостях свойств находили температуру, выше которой начинается отклонение от линейного закона. Далее линейный участок зависимости свойства экстраполировали вплоть до температуры фазового превращения.

Выявлено, что в среднем за 288 К перед фазовым превращением начинает отклоняться от линейной зависимости плотность, за 383 К – теплоёмкость и за 239 К – электросопротивление при аллотропических превращениях. Перед плавлением соответствующие величины составляют 384 К – для плотности, 276 К – для теплоёмкости и 206 К – для электросопротивления.

Таким образом, комплекс полученных данных свидетельствует о том, что средние значения температурного интервала  $\Delta T$ , в котором зависимость свойства отклоняется от линейной, составляют: для плотности –  $\Delta T_d = 0,199\Delta T_{фп}$  для теплоёмкости –  $\Delta T_{C_p} = 0,220\Delta T_{фп}$ , для электросопротивления –  $\Delta T_{\rho} = 0,170\Delta T_{фп}$ .

Из этого можно заключить, что в среднем по всем свойствам  $\Delta T = 0,2\Delta T_{фп}$ , то есть задолго до температуры фазового перехода система начинает готовиться к нему.

Для объяснения аномального изменения свойств металлов и сплавов с позиций классической теории образования и роста зародышей новой фазы были проведены количественные оценки размера критического зародыша, количества зародышей и объёмной доли зародышей фаз чистых металлов – титана, таллия и гафния – с различной температурой фазового перехода.

Сравнение параметров процесса зародышеобразования для титана, таллия и гафния проведено для степеней переохлаждения, составляющих 0,2 от температуры  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения.

Установлено, что для объяснения наблюдаемых аномалий теплоёмкости титана возникновением и ростом зародышей  $\beta$ -фазы задолго до температуры полиморфного превращения объёмная доля зародышей вблизи критической точки должна быть не ниже значения 0,6.

<sup>1</sup> Свойства элементов: справочник / М.Е. Дриц [и др.]. – М.: Металлургия, 1985. – 672 с.

<sup>2</sup> Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твёрдого тела / Пер. с англ. / Под ред. С.В. Тябликова. – М.: Изд-во МИР, 1966. – 570 с.

Суммарная объёмная доля зародышей перед  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращением в титане составляет  $3 \cdot 10^{-7}$ , в таллии  $2,5 \cdot 10^{-5}$ . Показано, что в гафнии суммарная объёмная доля зародышей новой фазы к моменту  $\alpha \rightarrow \beta$ -перехода составляет  $10^{-2}$  или 1 % по объёму, которое хотя и является самым высоким значением для исследуемых трёх металлов, не может объяснить экспериментально наблюдаемые изменения теплоёмкости в состоянии предпревращения появлением зародышей новой фазы.

Чтобы понять, с чем связано такое аномальное изменение свойств вблизи температур критических точек, проведены количественные оценки энергии активации процесса, ответственного за аномальное изменение свойств.

Считали, что энергия активации самодиффузии  $E_c$  равна сумме энергии активации образования  $E_v^f$  и миграции  $E_v^m$  вакансий. Зная эти значения для некоторых металлов, с помощью ППП STATGRAPHICS найдена взаимосвязь между ними.

Методом регрессионного анализа сопоставлены значения энергии активации образования вакансий  $E_v^f$  с рассчитанной выше энергией образования квазичастиц (структурных вакансий). Получено уравнение регрессии, описывающее эту взаимосвязь:  $E = 1,7021 + 0,9295 \hat{E}_v^f$ .

Обращает на себя внимание факт близости значений энергии активации образования вакансий для фазовых переходов 1 и 2 рода в тех случаях, если в металле реализуются превращения обоих типов (например, железо) (таблица 3).

Таблица 3

Рассчитанные значения энергии активации изменения свойств и энергии образования вакансий

Металл	$E$ , кДж/моль	$E_v^f$ , кДж/моль	Металл	$E$ , кДж/моль	$E_v^f$ , кДж/моль
Fe	96,35	125,62	Na	7,13	6,94
Fe	115,62	125,26	Sn	31,8	36,61
Co	154,16	136,82	Li	25,05	13,49
Ni	115,62	139,71	Tl	28,91	30,83
Ti	144,54	127,18	U	53,96	48,18
Zr	42,39	44,42	Pr	52,03	53,96
Hf	68,41	75,15	La	69,37	80,93
Ca	65,52	75,13	Ce	62,63	70,34

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что за фазовые переходы в кристаллических телах ответственны, вероятнее всего, вакансии. Именно вакансии освобождают часть занятых атомами матричной фазы узлов решётки при фазовом переходе, чтобы перестройка решетки стала возможной. Необходимо отметить, что за аномальные изменения свойств вблизи критических точек фазовых переходов отвечают также вакансии, которые можно называть структурными.

Аномальные эффекты, например эффект сверхпластичности металлов и сплавов, также обеспечиваются пересыщением вакансиями металлических систем в оптимальных температурно-скоростных условиях деформирования (по данным проф. А.С. Тихонова и М.Х. Шоршорова)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Шоршоров М.Х., Тихонов А.С., Гуров К.П. Сверхпластичность металлических материалов. – М.: Наука, 1973. – 220 с.

Предложена гипотеза, связывающая состояние предпревращения металлических систем перед полиморфными превращениями с их метастабильностью, разупрочнением и неустойчивостью, обусловленных образованием структурных вакансий, облегчающих перестройку кристаллической решётки во всём объёме системы при фазовом превращении.

**В пятой главе** приведено описание разработанного нового способа термомеханической обработки быстрорежущей стали Р6М5–МП, основанного на использовании резервов пластичности предпереходного состояния.

Разработка данного способа термомеханической обработки порошковой быстрорежущей стали и его научное обоснование было выполнено на основе полученных в диссертации результатов и установленных режимов состояния предпревращения стали Р6М5–МП, а также анализа полученных ранее результатов исследования и способов термомеханической обработки гетерофазных металлических систем типа Р6М5, в том числе с участием автора<sup>1</sup>.

Установлено, что для сжатия температурный интервал состояния предпревращения составляет от 800 до 823 °С. Этот температурный интервал рекомендован для получения заготовок металлорежущих дисковых резцов (рисунок 4) изотермической осадкой в температурном интервале состояния предпревращения стали Р6М5–МП перед диффузионным фазовым переходом первого рода.

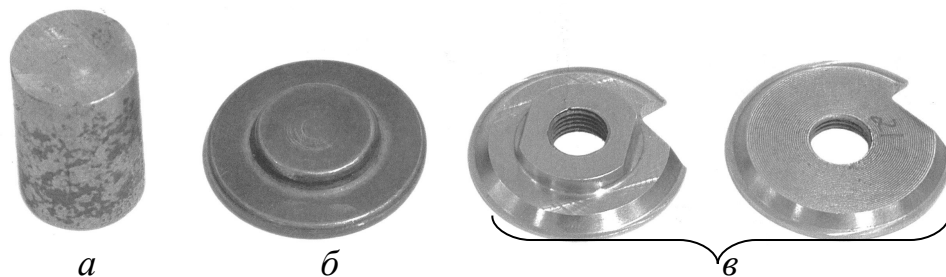


Рис. 4 Дисковые резцы из стали Р6М5–МП, полученные в условиях сверхпластического деформирования: *а* – исходная заготовка; *б* – заготовка после СПД; *в* – резцы

Технологический процесс получения дисковых резцов из стали Р6М5–МП включает в себя следующие технологические операции: отрезку заготовок из стали Р6М5–МП; нанесение на заготовки защитно-смазочного покрытия; сушку покрытия; нагрев заготовок и проведение пластической деформации в два этапа со скоростью деформации на 1-м этапе  $10^{-4} \text{ с}^{-1}$  и на втором  $10^{-2} \text{ с}^{-1}$ ; снятие защитно-смазочного покрытия; контроль размеров заготовки; отделочные операции.

Заготовки дисковых резцов из стали Р6М5–МП получали в изотермическом штампе на гидравлическом прессе ПА 2634 с усилием 2,5 МН и регулируемой скоростью движения ползуна. После деформирования в состоянии предпревращения заготовки дисковых резцов не имеют обезуглероженного слоя.

Способ получения дисковых резцов из стали Р6М5–МП в состоянии предпревращения защищён патентом, который позволяет повысить коэффициент использования металла, снизить расход энергоресурсов и увеличить стойкость инструмента в 1,5–2,0 раза.

<sup>1</sup> Гвоздев А.Е. Производство заготовок быстрорежущего инструмента в условиях сверхпластичности / А.Е. Гвоздев. – М.: Машиностроение, 1992. – 176 с.

Способ обработки быстрорежущей стали Пат. 2287593(2005117663) Российская Федерация, РСТ. / Шоршоров М.Х., Гвоздев А.Е. и др.; заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет. – № 2287593(2005117663); заявл. 07.06.05; опубл. 20.11.06, Бюл. № 32 – 6 с.: ил.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана комплексная методика исследования экстремальных эффектов в состоянии предпревращения в металлических системах, включающая высокотемпературные механические испытания, рентгеноструктурный анализ, рентгенофлуоресцентный анализ, электронно-микроскопический анализ, металлографические исследования, математическое моделирование и регрессионный анализ экспериментальных результатов.

2. Установлены закономерности изменения пластичности на сталях марок 10, 35 и У8А в интервале температур от 700 °С до 870 °С и в состоянии предпревращения перед фазовым переходом первого рода. Выявлено, что относительное удлинение этих сталей изменяется немонотонно: повышается с увеличением температуры, достигает максимума, снижается после температуры критической точки и повышается с последующим возрастанием температуры.

В малоуглеродистых сталях основной вклад в увеличение пластичности вносит состояние предпревращения вблизи точки фазового перехода  $A_{c3}$ , вероятно, из-за малого количества перлита. В эвтектоидной стали У8А основное повышение пластичности обеспечивается состоянием предпревращения вблизи эвтектоидного фазового перехода в точке  $A_{c1}$ . В стали марки 35 на кривой зависимости пластичности от температуры  $\delta(T)$  наблюдаются два экстремума, соответствующие состоянию предпревращения перед точками  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$ . Установлено, что во всех трёх марках исследуемых углеродистых сталей в состоянии предпревращения пластичность выше, чем в аустенитном состоянии.

3. В стали Р6М5-МП состояние предпревращения исследовано по изменению пластичности (относительного удлинения  $\delta$ , %) и прочности (сопротивления пластическому деформированию  $\sigma$ , МПа).

Построены термомеханические модели изменения прочности и пластичности стали Р6М5-МП в интервале изменения температур от 600 °С до 900 °С и скоростей деформации от 0,001 до 0,1 с<sup>-1</sup> при растяжении и сжатии.

Вычислены экстремальные значения пластичности  $\delta_{max}$  и прочности  $\sigma_{min}$  и значения температур  $T_{\delta_{max}}$  и  $T_{\sigma_{min}}$ . Предложено характеризовать состояние металлической системы при  $T_{\sigma_{min}}$  как состояние термомеханического разупрочнения, характеризуемого наименьшей прочностью  $\sigma_{min}$ , а при  $T_{\delta_{max}}$  как состояние термомеханической неустойчивости, характеризуемой максимальной пластичностью  $\delta_{max}$ . Установлено, что значения температур минимальной прочности и максимальной пластичности  $T_{\sigma_{min}}$  и  $T_{\delta_{max}}$  совпадают и составляют 823 °С, что ниже точки  $A_{c1}$ . Рассчитанные значения температур  $T_{\sigma_{min}}$  и  $T_{\delta_{max}}$  использованы на практике при разработке новых способов обработки быстрорежущей стали.

4. Изучено изменение структуры никеля в результате термоциклической обработки по различным режимам: в состоянии предпревращения вблизи точки Кюри (365 °С) при температурах 300–370 °С; в окрестности точки Кюри в диапазоне температур, который располагается по другую (высокотемпературную) сторону от критической температуры фазового перехода второго рода (370–470 °С); в температурном диапазоне развития процесса рекристаллизации в никеле (500–550 °С).

Установлено, что структура никеля в результате термоциклической обработки в состоянии предпревращения вблизи точки Кюри становится более высокодисперсной и однородной по сравнению с исходным состоянием и структурами, полученными по другим режимам.

5. Изучение отклонения от линейности физических свойств (плотности  $d$ , теплоёмкости  $c_p$ , электросопротивления  $\rho$ ) в зависимости от температуры для металлов разных подгрупп периодической системы Д.И. Менделеева (Be, Ca, Sr, Tl, Sc, Y, Zr, Ti, Hf, Cr, Fe, Co, Ni), которые испытывают полиморфное или

магнитное превращение, показало, что в среднем по всем свойствам ( $d$ ,  $c_p$ ,  $\rho$ ) значения температурного интервала  $\Delta T_{cp}$ , т.е. интервала предпревращения, составляют  $0,2 T_{фп}$ . Это свидетельствует о том, что задолго до температуры фазового перехода металлическая система начинает готовиться к нему.

**6.** Выполнены количественные оценки вклада в отклонение от линейной зависимости теплоёмкости низкотемпературной модификации образующихся в состоянии предпревращения зародышей высокотемпературной фазы для трёх чистых металлов: титана, таллия и гафния с различной температурой полиморфного превращения. Установлено, что суммарная объёмная доля зародышей новой фазы перед полиморфным превращением в рассматриваемых металлах пренебрежимо мала. Поэтому формирование свойств металлических систем в состоянии предпревращения не объясняется применением классической флуктуационной теории.

**7.** Рассчитанные на основе количественных оценок значения энергии активации процессов, ответственных за аномальное изменение свойств в состоянии предпревращения и проявление экстремальных эффектов, совпадают с энергией активации образования вакансий, названных в работе структурными.

**8.** Предложена гипотеза, связывающая состояние предпревращения металлических систем перед полиморфными превращениями с их метастабильностью, разупрочнением и неустойчивостью, обусловленных образованием структурных вакансий, облегчающих перестройку кристаллической решётки во всём объёме системы при фазовом переходе.

**9.** Разработан новый способ термомеханической обработки стали Р6М5-МП, основанный на повышенной пластичности заготовок в состоянии предпревращения при последовательном их деформировании с различными скоростями деформации.

Способ защищён патентом на изобретение и позволяет разрабатывать ресурсосберегающие технологии получения заготовок быстрорежущего инструмента повышенной стойкости и экономить энергетические и материальные ресурсы.



## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Гвоздев, А.Е. Деформация, структурообразование и разрушение стали Р6М5 / А.Е. Гвоздев, О.В. Кузовлева, А.В. Кондрашина // Деформация и разрушение материалов. – 2007. – №8. – С. 25–31.
2. Гвоздев, А.Е. Об эффекте сверхпластичности инструментальных сталей и алюминиевых сплавов / А.Е. Гвоздев, О.В. Кузовлева, А.С. Пустовгар, А.В. Афанаскин // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – № 7. – С. 13–20.
3. Тихонова, И.В. Распад цементита углеродистых сталей при термоциклировании / И.В. Тихонова, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, А.Е. Гвоздев // Производство проката. – 2008. – № 8. – С. 36–37.
4. Селедкин, Е.М., Кузовлева О.В., Пустовгар А.С., Гвоздев А.Е., Стариков Н.Е. Моделирование процесса осадки заготовок из инструментальной стали в состоянии сверхпластичности // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 1. – С. 28–31.
5. Тихонова, И.В. Влияние содержания углерода на распад цементита в углеродистых сталях при термоциклической обработке / И.В. Тихонова, О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев // Производство проката. – 2009. – № 5. – С. 29–31.
5. Тихонова, И.В. Влияние термоциклической обработки на структурные превращения в деформированном никеле / И.В. Тихонова, О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Производство проката, 2011. – № 3. – С. 26–28.
7. Кузовлева, О.В. Аномальные изменения структуры и свойств металлов и сплавов при термомеханических воздействиях в состоянии предпревращения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 4. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – С. 286–294.
8. Кузовлева, О.В., Гвоздев А.Е. О закономерностях и причинах изменения пластичности металлов и сплавов в состоянии предпревращения / О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 5. Часть 3. – Тула: изд-во ТулГУ, 2011. – С. 94–103.

### патент

9. Пат. 2007107236/02 (2337977) Российская Федерация, РСТ. / Способ обработки быстрорежущей стали / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, О.В. Кузовлева [и др.]; заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет. – № 2007107236/02; заявл. 26.02.07; опубл. 16.05.08, Бюл. № 31 – 5 с.: ил.

### другие научные публикации

10. Гвоздев, А.Е. Об эффекте сверхпластичности сталей и сплавов / А.Е. Гвоздев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, А.С. Пустовгар // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: доклады II международной конференции. – Москва, 2007. – С.68–70.
11. Гвоздев, А.Е. Анализ закономерностей экстремальных эффектов при фазовых переходах в металлических сплавах с помощью разработанного экспериментального программного комплекса / А.Е. Гвоздев, О.В., Кузовлева, Н.Е. Стариков [и др.]. – Электронное издание № 14225 от 12.09.2008 . № гос. рег. 0320801998 (ФГУП НТИЦ ИНФОРМРЕГИСТР). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – [www.inforeg.ru](http://www.inforeg.ru)
12. Кузовлева, О.В. Анализ структурных превращений никеля при термоциклировании / О.В. Кузовлева // Перспективные материалы: материалы V Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов. – 2008. – С. 145–147.

13. Достоинства и перспективы применения эффекта сверхпластичности сложнолегированных высокопрочных сталей и сплавов / В.М. Павлов, О.В. Кузовлева [и др.] // Инженер и промышленник. 2009. – № 1. – С. 56–58.
14. Тихонова, И.В. Анализ структурных превращений никеля при термоциклировании / И.В. Тихонова, О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сборник материалов третьей международной конференции. – М: Интерконтакт Наука, 2009. – С. 129-130.
15. Тихонова, И.В., Кузовлева О.В., Гвоздев А.Е. О состоянии предпревращения металлов и сплавов: методика и результаты экспериментальных исследований и практических разработок // Электронное издание № 17583 от 27.10.2009. № гос. рег. 0320902220 (ФГУП НТЦ ИНФОРМРЕГИСТР). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – [www.inforeg.ru](http://www.inforeg.ru)
16. Разработка ресурсосберегающих технологий с использованием эффекта повышенной пластичности, термической и комбинированной обработки при производстве металлорежущего инструмента и металлоизделий / В.М. Павлов, Н.Е. Стариков, О.В. Кузовлева [и др.] // Инженер и промышленник. 2010. – №1. – С. 26–28.
17. Комплексный подход к исследованию экстремальных эффектов и сверхпластичности в металлических системах: монография / А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, О.В. Кузовлева и [др.]. – Тула: Издательство ТулГУ, 2011. – 114 с. ISBN 978–5–7679–1904–8.
18. Кузовлева, О.В. Аномальные изменения структуры и свойств металлов и сплавов при термомеханических воздействиях в состоянии предпревращения: монография // Под ред. д-ра техн. наук, проф. А.Е. Гвоздева. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – 266 с. ISBN 978–5–7679–2240–6.



Подписано в печать «25» сентября 2012г. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 1,0. Тираж 120 экз. Заказ 109

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Отпечатано в ЮЗГУ.

