

3-2007-84

На правах рукописи  
УДК 539.171.4 + 539.319

ТАМОНОВ  
Андрей Владимирович

НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ОСТАТОЧНО-НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Специальность: 01.04.07 — физика конденсированного  
состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Объединенный институт  
ядерных исследований  
Дубна 2007  
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований.

**Научный руководитель:**

профессор, доктор физико-математических наук  
Балагуров Анатолий Михайлович

**Официальные оппоненты:**

профессор, доктор физико-математических наук  
Никитин Анатолий Николаевич,  
профессор, доктор физико-математических наук  
Трунов Виталий Андреевич

**Ведущая организация:**

Тульский государственный университет

Защита состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2007 г. в \_\_\_\_ часов  
на заседании диссертационного совета Д.720.001.06  
Объединенного института ядерных исследований  
по адресу: 141980, ул. Жолио Кюри 6, г. Дубна, Московская обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат физико-математических наук



Попеко А.Г.

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Взаимодействие тепловых нейтронов с веществом относительно слабо: нейтроны не нарушают структуру и не изменяют химические свойства вещества. Слабое взаимодействие обуславливает и большую глубину проникновения нейтронов в образец (в отличие от рентгеновских лучей и электронов), что позволяет исследовать объемные структурные и динамические эффекты.

Перечисленные свойства дополняются тем, что длина волны тепловых и холодных нейтронов ( $\lambda = 1 - 10 \text{ \AA}$ ) и их энергия ( $E_n = 1 - 100 \text{ мэВ}$ ) соответствуют типичным межатомным расстояниям в твердых телах и характерным энергиям возбуждений. Таким образом, один и тот же источник нейтронов дает возможность исследовать и структуру, и динамику вещества.

В 1936 г. вскоре после открытия нейтрона была продемонстрирована дифракция нейтронов, причем, как было выяснено впоследствии, положения дифракционных пиков строго соответствуют закону Вульфа-Брэгга. Таким образом, появилась возможность использовать нейтроны в качестве прецизионного инструмента для измерения микроскопических деформаций кристаллической решетки по смещению дифракционных пиков, и затем, используя закон Гука, определять остаточные напряжения в исследуемом образце.

Остаточными напряжениями принято называть такие напряжения (сжатие или растяжение), которые существуют и уравниваются внутри твердого тела после устранения причин вызвавших их появление. К внутренним напряжениям относятся также напряжения, которые возникают в материале эксплуатируемой детали или конструкции под действием внешних полей и определяют сопротивляемость материала внешним воздействиям - его прочность. Остаточные напряжения возникают в материалах и конструкциях вследствие механического и температурного воздействия на материал в процессе его изготовления, вследствие пластической деформации такого материала, фазовых переходов и как следствие

имеют место практически во всех деталях и конструкциях. Практически все процессы, используемые при производстве материалов и конструкций, создают те или иные остаточные напряжения.

Остаточные напряжения играют значительную роль в природе и технике, причем она может быть как положительной, так и отрицательной. Грамотное использование внутреннего остаточного состояния различных конструкций и изделий позволяет улучшить их эксплуатационные характеристики и это можно целенаправленно использовать в реальных приложениях. В упругой области остаточные напряжения суммируются с приложенными эксплуатационными напряжениями. При этом обычно сжимающие остаточные напряжения оказывают положительный эффект на усталостную долговечность и сопротивление коррозии под напряжением, так как препятствуют зарождению и распространению трещин в материале. Растягивающие напряжения наоборот ухудшают механические характеристики материала.

Остаточно-напряженное состояние конструкционных материалов и изделий сильно влияет на их эксплуатационные физико-механические свойства. Наличие или отсутствие остаточных напряжений в материале, их распределение по сечению изделия сильно сказываются на прочности и сроке эксплуатации. Таким образом, прочность, надежность и степень пригодности конструкций для использования по эксплуатационному назначению во многом определяются наличием, характером и величиной внутренних напряжений.

Существующие сегодня различные технологии термообработки позволяют управлять остаточно-напряженным состоянием материала, создавая такое распределение напряжений по сечению детали, которое позволяет компенсировать или минимизировать приложенные эксплуатационные напряжения. Например, создавать напряжения сжатия на поверхности детали, которая работает в условиях растяжения. Таким образом, остаточные напряжения будут стремиться затормозить или вообще прекратить зарождение и рост трещин, образующихся на поверхности. Поэтому, управляя формированием остаточно-напряженного состояния материала детали, мы можем использовать имеющиеся внутренние

напряжения для улучшения эксплуатационных свойств ответственных изделий, обеспечивая, таким образом, их безопасную эксплуатацию.

Актуальность выбранной темы определяется первостепенной важностью вопросов, связанных с увеличением ресурса работы и оптимизацией эксплуатационных свойств изделий и материалов, а также обеспечением безопасной эксплуатации ответственных изделий, использующихся в ядерной и других отраслях промышленности.

### ***Цели и задачи исследования***

Основной целью работы являлась демонстрация возможности применения метода дифракции нейтронов высокого разрешения для анализа остаточно-напряженного состояния материалов и изделий с целью оптимизации технологии их изготовления, улучшения их эксплуатационных характеристик и увеличения срока службы. В ходе работы завершено создание и выполнена аттестация нейтронного фурье-дифрактометра ФСД (Фурье-Стресс-Дифрактометр), разработана методика проведения на нем дифракционных экспериментов и исследованы внутренние механические напряжения в ряде модельных и реальных изделий и материалов.

### ***Научная новизна результатов исследований***

В настоящее время ОИЯИ является единственным научным центром в России, в котором проводятся регулярные исследования остаточных напряжений с помощью дифракции нейтронов. В ЛНФ ОИЯИ на импульсном реакторе ИБР-2 создан и действует уникальный специализированный дифрактометр для такого рода исследований – Фурье-Стресс-Дифрактометр (ФСД), который по своим параметрам является установкой мирового уровня. Дифракция нейтронов является сравнительно новым методом измерения как макро- так и микронапряжений и обладает серьезными преимуществами перед традиционными методами.

В данной работе впервые сделана попытка обобщить результаты исследований остаточных напряжений в различных классах конструкционных

материалов и изделий из них методом дифракции нейтронов, и на основе полученных выводов разработать методику оптимизации остаточно-напряженного состояния с целью увеличения срока службы и улучшения эксплуатационных характеристик исследуемых материалов и изделий из них.

### **Практическая значимость работы.**

Все полученные в диссертационной работе экспериментальные результаты представляют существенную практическую ценность. Результаты проведения модельных экспериментов позволили впервые в России аттестовать метод дифракции нейтронов и нейтронный стресс-сканер ФСД для измерения остаточных напряжений в материалах и изделиях. Результаты работы по оптимизации технологии изготовления ударника перфоратора уже внедрены в производство, о чем свидетельствует соответствующий акт. Результаты других экспериментальных работ находятся на стадии патентования и внедрения в производство.

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

- Результаты разработки, создания и аттестации нейтронного Фурье стресс дифрактометра – ФСД.
- Результаты экспериментов по исследованию внутренних механических напряжений в модельных и реальных изделиях и материалах.
- Результаты работы по оптимизации технологии термообработки ударника перфоратора, в результате чего удалось увеличить время наработки его на отказ в 2,5 раза.
- Результаты экспериментов по определению остаточно-напряженного состояния в различных сечениях биметаллического переходника нержавеющей стали – сплав циркония.
- Результаты исследования остаточных напряжений в современных композиционных материалах WC-Co и W-Cu, подвергшихся различной термообработке.

- Возможность применения метода дифракции нейтронов высокого разрешения для анализа остаточно-напряженного состояния материалов и изделий с целью оптимизации технологии их изготовления, улучшения их эксплуатационных характеристик и увеличения срока службы.

### **Апробация работы**

Результаты исследований частично уже внедрены в производство, например, работы по оптимизации технологии изготовления ударника перфоратора. Результаты других экспериментальных работ находятся на стадии патентования и внедрения в производство.

Все экспериментальные результаты, положенные в основу диссертации докладывались на национальных и международных конференциях и школах: на 7-ой Европейской конференции по остаточным напряжениям (Берлин, Германия, 2006); на 10-ой Европейской конференции по порошковой дифракции (Женева, Швейцария, 2006); на серии рабочих совещаний Международной коллаборации по стандартизации нейтронных методов “NET – Network on Neutron Techniques Standardization for Structural Integrity”: 6-ое (Петтен, Нидерланды, 2004), 7-ое (Милтон Кейнс, Великобритания, 2005), 8-ое (Петтен, Нидерланды, 2005), 9-ое (Стамбул, Турция, 2006), 10-ое (Петтен, Нидерланды, 2006); на Семинаре в Институте им. Пауля Шеррера (Виллиген, Швейцария, 2005); на 9-ой Европейской конференции по порошковой дифракции (Прага, Чехия, 2004); на XVIII Совещании по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния (Заречный, Россия, 2004); на 5-ой конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», (Дубна, Россия, 2004); на рабочем совещании Германия - ОИЯИ по исследованиям конденсированных сред на реакторе ИБР-2 (Дубна, Россия, 2004); на 4-ой Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (Москва, Россия, 2003); на Российской научной конференции «Материалы ядерной техники. Радиационная повреждаемость и свойства - теория, моделирование, эксперимент»

(Агой, Россия, 2003); на 2-ой Международной конференции по определению внутренних напряжений с помощью нейтронного и синхротронного излучений (Манчестер, Великобритания, 2003); на 10-ом Международном семинаре по применению нейтронного рассеяния для исследований конденсированных сред (Познань, Польша, 2003); на Европейской школе по рассеяния нейтронов (Будапешт, Венгрия, 2003); на 1-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» (Москва, Россия, 2002); на Совместной летней школе ОИЯИ – Румыния по использованию нейтронов (охрана окружающей среды, физика конденсированных сред, ядерная физика) (Бая Маре, Румыния, 2002), на XVII Сессии по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния (Гатчина, Россия, 2002); на 1-ой летней школе по исследованиям конденсированного состояния вещества (Цуоз, Швейцария, 2002); на Конференциях молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, Россия, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007 гг.); на семинарах ЛНФ ОИЯИ; Тульского государственного университета; Института Пауля Шеррера (PSI, Швейцария).

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы (103 наименований). Диссертация содержит 131 страницу, 70 рисунков и 14 таблиц.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики имени И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия).

### **Публикации**

Результаты работ, выполненных по теме диссертации, опубликованы в 15 статьях, список которых приведен в конце автореферата.

## **Краткое содержание работы**

Во введении обосновывается актуальность поставленной задачи, формулируются цель и научная новизна проводимых исследований. Кроме того, показана практическая значимость работы и приведен краткий обзор содержания глав диссертации. Представлены положения, выносимые на защиту и перечень печатных работ, в которых отражены основные результаты проведенных исследований.

В первой главе приводятся теоретические основы основных положений теории упругости, вводится понятие и классификация остаточных напряжений, а также рассматриваются основы наиболее распространенных методов определения остаточных напряжений в материалах и изделиях. Приведен сравнительный анализ возможностей этих методов. Кроме того, в этой главе приведены элементы теории термических процессов обработки материалов и рассмотрены основные методы формирования остаточно-напряженного состояния материалов. Глава состоит из четырех частей.

В первой части приводится краткий обзор основных положений теории упругости, вводятся понятия тензора деформаций и тензора напряжений, связь между которыми описывается законом Гука. В обобщенной форме зависимость деформации от напряжения выражается как:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2)$$

где  $S_{ijkl}$  и  $C_{ijkl}$  – упругие модули податливости и жесткости материала, являющиеся тензорами четвертого ранга.

При этом, в случае рассмотрения изотропного материала упругие постоянные будут одинаковы во всех направлениях, т.о. число независимых упругих модулей снизится до двух. В этом случае обобщенный закон Гука сильно упрощается и принимает следующий вид:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \quad (3)$$

или

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{kk} \quad (4)$$

где  $k$  – индекс суммирования от 1 до 3,  $\delta$  - символ Кронекера, принимающий значения

$$\delta_{ij} = 1, \text{ если } i=j$$

$$\delta_{ij} = 0, \text{ если } i \neq j,$$

$E$  – модуль Юнга или модуль продольной упругости,  $E = \frac{1}{S_{11}}$ ,

$\nu$  - коэффициент Пуассона

$$\nu = -S_{12}E = -\frac{S_{12}}{S_{11}}$$

Кроме того, в первой части первой главы изложены наиболее часто используемые в практической работе модели Фойгта, Ройса и Кронера.

Во второй части первой главы введены понятие и классификация остаточных напряжений. При этом остаточными напряжениями называют такие напряжения (сжатие или растяжение), которые существуют и уравниваются внутри твердого тела после устранения причин вызвавших их появление. Эти напряжения всегда внутренние и их образование всегда связано с неоднородными линейными или объемными деформациями в смежных объемах материала, агрегата или конструкции.

К внутренним напряжениям относятся также напряжения, которые возникают в материале эксплуатируемой детали или конструкции под действием внешних полей и определяют сопротивляемость материала внешним воздействиям - его прочность. Остаточные напряжения возникают в материалах и конструкциях вследствие механического и температурного воздействия на материал в процессе его изготовления, вследствие пластической деформации такого материала, фазовых переходов и, как следствие, имеют место практически во всех деталях и конструкциях.

При этом обычно сжимающие остаточные напряжения оказывают положительный эффект на усталостную долговечность и сопротивление коррозии под напряжением, а растягивающие напряжения наоборот ухудшают

механические характеристики материала. В упругой области остаточные напряжения суммируются с приложенными эксплуатационными напряжениями. (Рис.1.). Именно по этой причине сжатие позволяет снизить результирующее напряжение, действующее на материал, что соответственно приводит к повышению усталостной прочности.

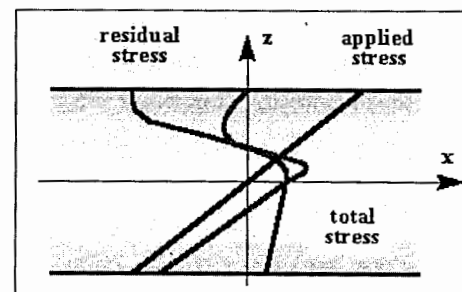


Рис. 1. Суммирование остаточного и приложенного эксплуатационного напряжений.

Таким образом, прочность, надежность и степень пригодности конструкций для использования по эксплуатационному назначению во многом определяются наличием, характером и величиной внутренних напряжений.

В третьей части первой главы приводится краткое описание наиболее распространенных методов определения остаточных напряжений, которые условно разделяются на разрушающие и неразрушающие методы. К разрушающим методам в первую очередь относят различные механические методики. Все механические методы измеряют упругие макроскопические деформации материала и затем, используя закон Гука, определяют внутренние остаточные напряжения. При этом механические методы достаточно точны, но главным их недостатком является то, что исследуемый материал или конструкция разрушается во время измерений. Механические методы определяют только напряжения 1-го рода. Большое влияние на точность измерения деформаций оказывает выбор способа удаления слоев материала, т.к. он может вносить дополнительные внутренние напряжения.

Неразрушающие методы измерения остаточных напряжений основаны на измерении некоторого физического параметра, так или иначе связанного с

остаточными напряжениями. На сегодняшний день известно несколько таких физических параметров, это - микродеформация кристаллической решетки материала, скорость распространения ультразвука в материале, электрическая проводимость материала, магнитные свойства материала и некоторые другие. Каждый из таких методов имеет свои преимущества и недостатки, поэтому в практических применениях используют наиболее подходящий метод для решения поставленной задачи. В этой части первой главы приводится сравнительная таблица наиболее распространенных методов определения остаточных напряжений.

И в заключительной четвертой части первой главы описаны существующие методы, позволяющие формировать остаточные напряжения, возникающие в материалах в процессе их изготовления. Так современные технологии и задачи машиностроения требуют не только анализировать остаточные напряжения в материалах, но также и управлять ими. Задача формирования и оптимизации остаточно-напряженного состояния материалов становится решающей для изготовления изделий, отвечающих современным требованиям, и работающим часто в очень жестких условиях. К основным методам формирования остаточных напряжений в материалах и конструкциях относят: механическое и температурное воздействия на материал, пластическая деформация такого материала, фазовые переходы. В промышленности в основном используются термическая обработка, химико-термическая обработка и пластическое деформирование.

**Вторая глава** полностью посвящена рассмотрению используемого в работе экспериментального метода дифракции нейтронов высокого разрешения. В результате проведения нейтрон-дифракционных экспериментов получают дифракционные спектры. При этом, определяя положения и интенсивность дифракционных пиков, получают структурную информацию, информацию о текстуре исследуемого образца, а определяя точное положение дифракционных пиков можно найти параметры решетки. Таким образом, сдвиг дифракционного пика позволяет вычислить изменение параметра решетки, а соответственно упругую деформацию кристаллической решетки и остаточные напряжения. А из

анализа формы дифракционных пиков можно получить информацию об искажениях кристаллической решетки внутри отдельных зерен (микродеформациях) и их размерах. На Рис.2 показан типичный дифракционный спектр, получаемый в результате эксперимента по времени пролета.

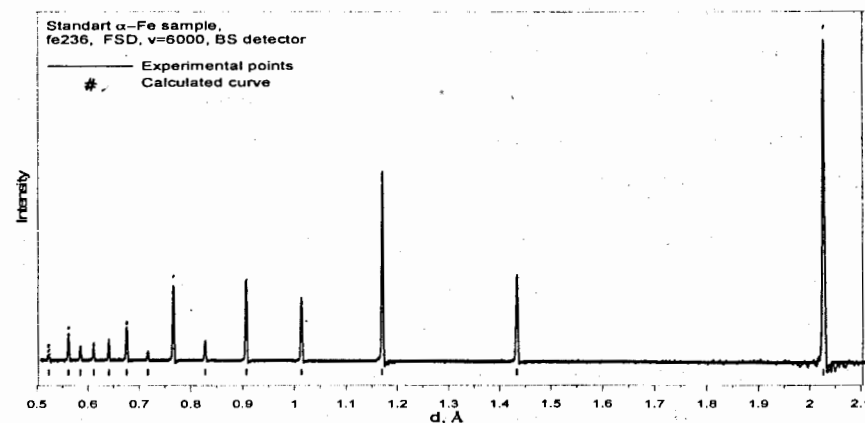


Рис.2. Типичный дифракционный спектр от  $\alpha$ -Fe образца, получаемый в результате эксперимента по времени пролета.

Во второй части второй главы приводится краткое описание существующих источников нейтронов (реакторы постоянного действия, импульсные реакторы и источники нейтронов на основе ускорителей).

В третьей части второй главы описаны подробности используемых в работе экспериментальных методов определения остаточных напряжений с помощью дифракции нейтронов, которые разделяются на два типа: метод постоянной длины волны и метод времени пролета (TOF метод), включающий в себя метод обратного времени пролета (RTOF метод).

При этом метод постоянной длины волны применяется на источниках нейтронов с непрерывным потоком, а постановка эксперимента такая же, как в рентгеновской дифрактометрии. Особенностью метода постоянной длины волны является измерение обычно только одного дифракционного отражения ( $hkl$ ), для которого и определяются остаточные деформации и напряжения, что в случае исследования сильно текстурированных образцов приводит к существенным погрешностям.

Метод времени пролета наиболее эффективно используется на импульсных источниках нейтронов, где энергетический спектр тепловых нейтронов из реактора имеет непрерывный (максвелловский) характер, скорость тепловых нейтронов невелика и есть возможность осуществить анализ энергии (или длины волны) нейтрона по времени пролета. Особенностью этого метода является использование «белого» пучка нейтронов. Что позволяет в свою очередь определять остаточные деформации и напряжения для многих кристаллографических плоскостей и получать усредненные значения для исследуемого поликристалла.

Метод обратного времени пролета удобно использовать на источниках нейтронов с длинным импульсом, каким является реактор ИБР-2 [1]. Это специальная корреляционная методика, основанная на использовании быстрого Фурье-прерывателя нейтронного пучка [2]. В результате его использования, нейтронный пучок модулируется по интенсивности, фактически разбиваясь на импульсы, ширина которых обратно пропорциональна скорости вращения прерывателя и при скорости 3000 об/мин составляет около 20 мкс (в то время как импульс тепловых нейтронов ИБР-2 имеет ширину 320 мкс). При этом RTOF-метод позволяет радикально улучшить разрешения (приблизительно в 40 раз) при незначительной потере в светосиле.

Использование метода дифракции нейтронов по времени пролета для определения остаточных напряжений имеет следующие основные преимущества:

- 1) сохраняется целостность исследуемого объекта (неразрушающий контроль),
- 2) глубина сканирования исследуемого материала намного превышает возможности других методов, (до 3 см для сталей, до 10 см для алюминия),
- 3) высокое пространственное разрешение (до 1 мм в любом направлении),
- 4) возможность широкого варьирования измеряемого объема от 1 мм<sup>3</sup> до 1000 мм<sup>3</sup>,
- 5) из сдвига дифракционных пиков определяется усредненная по измеряемому объему деформация решетки,

- 6) использование TOF – метода дает возможность наблюдать несколько дифракционных отражений одновременно, что позволяет одновременно определить деформации для разных кристаллографических направлений ( $hkl$ ),
- 7) определяется кристаллографическая анизотропия деформаций,
- 8) в случае многофазного материала (композиты, керамики, сплавы) одновременно определяются распределение напряжений для каждой фазы отдельно,
- 9) применение профильного анализа дифракционного спектра по методу Ритвельда позволяет определять деформацию, усредненную не только по измеряемому объему, но и по всем кристаллографическим направлениям ( $hkl$ ). В случае многофазных материалов появляется возможность оценить соотношение фаз.
- 10) изучая уширения дифракционных пиков можно определить микронапряжения в пределах зерен,
- 11) анализируя форму отдельных дифракционных пиков (ширина пика в зависимости от направления  $[hkl]$  в кристалле, его асимметрия, крылья пика) можно получить данные о размере кристаллитов, распределении плотности дислокаций, точечных дефектов и микронапряжениях в материале,
- 12) могут изучаться как магнитные, так и немагнитные материалы,
- 13) изучение характеристик конструкционных материалов возможно в режиме *in situ* (т.е. непосредственно во время приложения внешней нагрузки или температуры),
- 14) одновременно с внутренними напряжениями может быть определена текстура материала.

В четвертой части второй главы приводится описание используемого экспериментального оборудования, включающего: нейтронные дифрактометры Фурье стресс дифрактометр (ФСД) [3] и Фурье дифрактометр высокого разрешения (ФДВР) [4]; дополнительное оборудования из окружения образца (5-



ти кружный гониометр Huber, линейный сканер, зеркальная печь, нагрузочная машина TIRA), позволяющее расширить возможности эксперимента, и, например, проводить эксперименты при высоких температурах и приложенной внешней нагрузке.

Здесь же приводится детальное описание процедуры постановки нейтрон-дифракционного эксперимента, позиционирования образца в нейтронном пучке, возникающие при этом поверхностные эффекты. Обсуждены причины возникновения наиболее распространенных ошибок экспериментаторов. Кроме того, подробно рассматривается этап анализа экспериментальных данных.

Третья глава содержит результаты всех экспериментальных работ, рассмотренных в диссертации. В ней на реальных примерах показываются результаты оптимизации технологических процессов изготовления изделий после анализа остаточно-напряженного состояния методом дифракции нейтронов. Приводятся четыре примера для различных классов основных конструкционных материалов: алюминия, стали, композиционных материалов, многокомпонентных и многофазных материалов. Кроме того, в ходе выполнения диссертационной работы, были выполнены эксперименты по анализу остаточно-напряженного состояния в материалах с эффектом памяти формы, на примере наиболее распространенного материала TiNi. Все представленные эксперименты выполнены лично автором диссертации с помощью метода дифракции нейтронов высокого разрешения на нейтронных дифрактометрах ФСД, ФДВР (ЛНФ ОИЯИ), POLDI (PSI, Switzerland) и D1A (ILL, France).

В первой части третьей главы, приведены результаты модельных экспериментов по аттестации метода дифракции нейтронов и основного оборудования, используемого в работе – нейтронного Фурье стресс дифрактометра ФСД. Цель первого модельного эксперимента – наглядное экспериментальное подтверждение возможности использования метода дифракции нейтронов для определения остаточных деформаций и соответственно напряжений. Это показано на сравнении нейтронного метода с обычным механическим методом. При проведении эксперимента по растяжению плоской

пластины из сплава алюминия деформация образца одновременно измеряется двумя методами. С одной стороны, деформация образца в упругой области определяется по изменению параметра кристаллической решетки материала при изменении внешней нагрузки. А с другой стороны, полная деформация образца измерялась с помощью многоразового экстензометра “MiniMFA”, который входит в комплект к нагрузочной машине “Tira-test 2560”, прикрепленного к измеряемому образцу.

В результате проведенных экспериментов на четырех идентичных образцах были получены:

- зависимости деформации кристаллической решетки (определены методом дифракции нейтронов) образцов от приложенной нагрузки, которые ведут себя полностью в соответствии с теорией упругости;
- модули Юнга для всех измеренных образцов, которые совпадают с табличными значениями;
- зависимости упругой деформации кристаллической решетки (определены из метода дифракции нейтронов) от общей деформации образца (определена механическим методом), которые в упругой области полностью совпадают по абсолютной величине. А в пластической области, макродеформация быстро увеличивается (образец сильно удлиняется), но при этом решетка слабо реагирует на увеличивающуюся нагрузку.

Совокупность результатов первого модельного эксперимента по растяжению образца наглядно доказывает, что метод дифракции нейтронов может успешно применяться для определения остаточных деформаций в упругой области. Точность определения деформаций составляет  $5 \times 10^{-5}$ , что для обычных конструкционных материалов составляет 10-30 МПа и вполне достаточно для проведения практического инженерного анализа. В пластической же области, метод позволяет приблизительно оценить уровень пластической деформации.

Целью второго модельного эксперимента была наглядная демонстрация возможности метода определять пространственное распределение деформаций на

нейтронном дифрактометре ФСД. Для этого был выполнен эксперимент по изгибу пластины из стали X18H10T, нагруженной в четырехточечном изгибате. В ходе эксперимента определялось пространственное распределение деформации вдоль линии нагружения. В результате эксперимента полученная линейная зависимость деформации  $\epsilon$  от координаты  $x$  измеряемых точек, лежащих вдоль линии нагружения полностью соответствует расчетам (Рис.3). Таким образом, полученные результаты второго модельного эксперимента прямо подтверждает соответствие измеряемых значений деформации, теоретически предсказанным значениям, и свидетельствует о возможности использования метода дифракции нейтронов и нейтронного дифрактометра ФСД для решения задач по определению пространственного распределения деформации по сечению изделия.

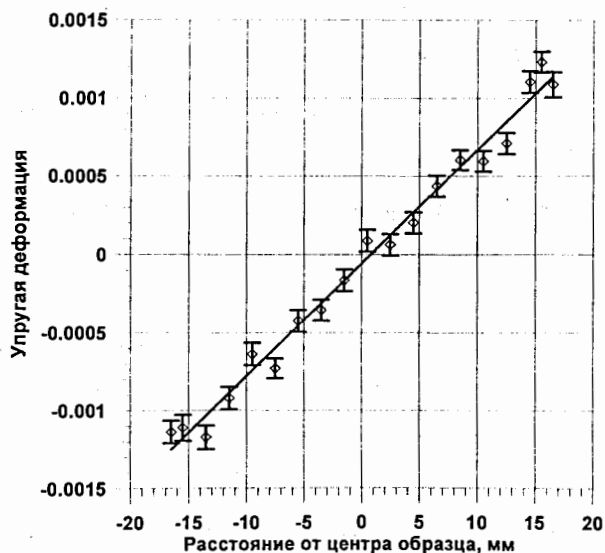
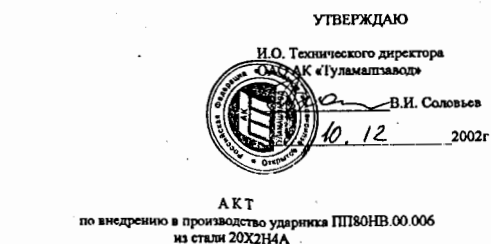


Рис.3. Зависимость деформации пластины из нержавеющей стали X18H10T от координаты измеряемой точки. Начало координат помещено в центр пластины.

По результатам выполненного исследования была проведена метрологическая аттестация нейтронного Фурье стресс дифрактометра, расположенного на 11 канале реактора ИБР-2 и получено свидетельство об аттестации средства измерения.

Во второй части третьей главы рассмотрены детали экспериментальной работы по анализу остаточно-напряженного состояния ударника перфоратора, с целью оптимизации технологического процесса изготовления для увеличения срока его службы и улучшения эксплуатационных характеристик стали. Ударник перфоратора является тяжело нагруженной деталью, работающей при высоких циклических нагрузках. Задача была выполнена в рамках соглашения с крупным машиностроительным заводом "ТУЛАМАШЗАВОД" и имеет прикладное значение. В результате данной работы была выработана и внедрена в производство новая технология термообработки этого изделия, позволившая увеличить среднее время наработки на отказ в 2,5 раза с 40 до 100 часов (Рис.4).



Объединенным институтом ядерных исследований (г.Дубна) совместно с кафедрой физики Тульского государственного университета проведены исследования распределения остаточных внутренних напряжений в ударниках пневмоперфоратора методом дифракции нейтронов.

Исследования проводились сравнительно на серийных ударниках из стали 65С2ВА с объемной закалкой и из стали 20Х2Н4А с цементацией.

Исследованиями установлено, что характер распределения остаточных напряжений в ударнике из стали 20Х2Н4А благоприятен для повышения сопротивления материала усталостному разрушению.

На основании этого заключения в пневмоперфораторе ПП180НВ была внедрена в производство ударник ПП180НВ.00.006 из стали 20Х2Н4А с химико-термической обработкой – цементацией.

Внедрение этой стали обеспечило повышение характеристики средней наработки на отказ в 2,5 раза. При использовании стали 65С2ВА средняя наработка на отказ составляла 40 часов, а из стали 20Х2Н4А эта характеристика была увеличена до 100 часов.

С.И. Главный конструктор  
Директор ВЗП-1

Г.Н. Зинин  
В.И. Арефьев.

Рис.4. Акт по внедрению в производство ударника из стали 20Х2Н4А.

В третьей части третьей главы представлено исследование остаточного напряженного состояния другого реального изделия биметаллического переходника нержавеющей стали – сплав циркония. Исследуемый биметаллический переходник нержавеющей стали - сплав циркония используется в конструкции каналов реакторов РБМК, и представляет собой цилиндр сложного сечения с наружным слоем из стали и внутренним - из сплава циркония. Основной целью исследования является оптимизация технологического процесса изготовления переходника для увеличения срока его службы и улучшения эксплуатационных характеристик материала. Задача выполнена в рамках соглашения с Министерством атомной энергии РФ и имеет прикладное значение. В результате проведенного исследования обнаружено, что дополнительная термообработка готового переходника позволит создать значительно большие по величине сжимающие напряжения в одном из исследованных сечений (сечении А-В), в области первого циркониевого зуба, что позволит компенсировать негативный эффект от наличия концентратора напряжения в этой области; а также позволит компенсировать приложенные напряжения растяжения. Такая термообработка позволит значительно улучшить результирующее напряженное состояние переходника, соответственно улучшить все его эксплуатационные свойства и срок его работы.

В четвертой части третьей главы сообщаются результаты анализа макро- и микронапряжений в современных композиционных материалах WC-Co и W-Cu с твердой керамической и металлической матрицей и металлическим наполнителем. Основной прикладной целью исследования являлась оптимизация технологического процесса термообработки при производстве таких композиционных материалов, с точки зрения улучшения их эксплуатационных характеристик. Второй же - фундаментальной целью было исследование механизма, отвечающего за появление остаточных напряжений в таких композитных материалах, в особенности неравновесных эффектов, возникающих во время термической обработки, механического и термомеханического нагружения. В ходе работы были проведены исследования серии образцов, подвергшихся различной термообработке. Такие неравновесные эффекты, как

неоднородное и быстрое охлаждение, пластическая деформация металлической фазы и возникновение микротрещин в твердой фазе, оказывают огромное влияние на остаточное напряженное состояние материала, и соответственно на его эксплуатационные характеристики. Использование дополнительной термообработки позволяет управлять остаточным напряженным состоянием таких композитов и создавать такое остаточное напряженное состояние, которое не только не ухудшит эксплуатационные характеристики материала, но и наоборот позволит улучшить их, с точки зрения повышения надежности и долговечности работы.

В ходе исследования было показано, что термическая обработка с экстремально неравномерным охлаждением образцов (композитной пластины, припаянной на стальную подложку) ведет к сдвигу макронапряжений к более сжимающим на поверхности пластины (что улучшает эксплуатационные характеристики данного композита) и увеличению растягивающих напряжений на границе со стальной подложкой. Усиливая неравномерность охлаждения можно продолжить эту тенденцию. Задача была выполнена в рамках сотрудничества с Дрезденским институтом неразрушающих методов контроля. Результаты данной работы в настоящий момент патентуются для последующего внедрения в производство.

В заключении диссертационной работы суммированы основные результаты и приведены главные выводы работы.

## Результаты, выносимые на защиту.

В представленной диссертационной работе приведены результаты исследований внутренних механических напряжений в ответственных материалах и изделиях из них и получены следующие основные результаты:

1. Разработан, создан и аттестован первый в России специализированный нейтронный стресс-дифрактометр – ФСД. Разработана методика проведения на нем дифракционных экспериментов. Проведена метрологическая аттестация дифрактометра и получено свидетельство об аттестации средства измерения.

2. Проведены эксперименты по исследованию внутренних механических напряжений в модельных и реальных изделиях и материалах, представляющих различные классы основных конструкционных материалов: стали, многокомпонентные и многофазные материалы, композиционные материалы, материалы с эффектом памяти формы. Точность определения напряжений соответствует реальным потребностям инженеров и составляет 10-30 МПа.

3. Экспериментально определено остаточно-напряженное состояние образцов ударника перфоратора, подвергнутых различным термообработкам. Выданы конкретные рекомендации по оптимизации технологии термообработки ударника перфоратора, в результате чего удалось увеличить время наработки его на отказ в 2,5 раза. Новая технология термообработки внедрена в производство, что подтверждено соответствующим актом.

4. Экспериментально определено остаточно-напряженное состояние в различных сечениях биметаллического переходника нержавеющей сталь – сплав циркония. Обнаружено, что наиболее опасным с точки зрения разрушения переходника и наиболее вероятным местом зарождения усталостных трещин является сечение А-В. Рекомендовано внедрить новую термообработку готового переходника, которая позволит создать значительно большие по величине сжимающие напряжения в сечении А-В, что позволит компенсировать негативный эффект от наличия концентратора напряжения в этой области; а также позволит компенсировать приложенные напряжения растяжения.

5. Исследованы остаточные напряжения в современных композиционных материалах WC-Co и W-Cu, подвергшихся различной термообработке. Показано, что термическая обработка с экстремально неравномерным охлаждением образцов (композитной пластины, припаянной на стальную подложку) ведет к сдвигу макронапряжений к более сжимающим на поверхности пластины (что улучшает эксплуатационные характеристики данного композита) и увеличению растягивающих напряжений на границе со стальной подложкой. Усиливая неравномерность охлаждения можно продолжить эту тенденцию. Результаты данной работы в настоящий момент патентуются для последующего внедрения в производство.

6. На модельных и реальных образцах продемонстрирована возможность применения метода дифракции нейтронов высокого разрешения для анализа остаточно-напряженного состояния материалов и изделий с целью оптимизации технологии их изготовления, улучшения их эксплуатационных характеристик и увеличения срока службы.

7. Созданный дифрактометр ФСД и развитая методика позволяют с необходимой точностью решать такие инженерные задачи, как изучение деформаций в многокомпонентных и многофазных системах; определение остаточных напряжений, возникающих после различных технологических операций (сварки, проката, отжига, закалки и т.д.); деформаций, возникающих под воздействием циклических нагрузок (механических и термических), радиационного облучения и др.

## Цитируемая литература.

1. Ананьев В.Д., Блохинцев Д.И., Булкин Ю.М. и др. *ИБР-2- Импульсный реактор периодического действия для нейтронных исследований.* – ПТЭ, вып. 5, 1977, с.17-35.
2. Hiismaki P., et al., *Nucl. Instr and Meth.* 126 (1975) 435.
3. A.M. Balagurov, G.D. Bokuchava, E.S. Kuzmin, A.V. Tamonov, V.V. Zhuk. *Neutron RTOF diffractometer FSD for residual stress investigation, Zeitschrift fur Kristallographie*, 2006, Supplement Issue no. 23, pp.217-222.
4. Aksenov V.L., Balagurov A.M., Simkin V.G., Trounov V.A., Hiismaki P. et al., *J. Neutron Research*, v.5, p.181, (1997).

Результаты исследований, представленные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. G.D. Bokuchava, A.V. Tamonov, N.R. Shamsutdinov, A.M. Balagurov, D.M. Levin. *Reverse Time-of-Flight Neutron Diffraction Study of Residual Stresses in Perforator's Striker. Journal of Neutron Research*, 2001, Vol. 9, pp. 255-261.
2. A.V. Tamonov, V.V. Sumin. *Investigation of residual stresses in bimetallic stainless steel – zirconium adapter by neutron diffraction, Journal of Neutron Research*, 2004, Vol. 12 (1-3), pp.69-73.
3. A.M. Balagurov, G.D. Bokuchava, E.S. Kuzmin, A.V. Tamonov, V.V. Zhuk. *Neutron RTOF diffractometer FSD for residual stress investigation, Zeitschrift fur Kristallographie*, 2006, Supplement Issue no. 23, pp.217-222.
4. С.Д. Прокошкин, А.В. Коротницкий, А.В. Тамонов, И.Ю. Хмелевская, Е.А. Карцева. *Исследование кристаллической решетки мартенсита бинарного сплава Ti-Ni методом времяпролетной нейтрографии in situ при изменении температуры и напряжения, Физика металлов и металловедение*, 2004, т.98, №1, с. 44-50.
5. А.В. Тамонов, В.В. Сумин, А.М. Балагуров, Г.Д. Бокучава. *Исследования внутренних напряжений в материалах для атомной науки и техники, Вопросы Атомной Науки и Техники: Материаловедение и новые материалы*, 2004, т.2(63), с.359-367.
6. А.В. Тамонов, Г.Д. Бокучава, Н.Р. Шамсутдинов, Ю. Шрайбер. *Исследование W/Si композитов методом нейтронной дифракции, Вопросы Атомной Науки и Техники: Материаловедение и новые материалы*, 2004, т.2(63), с.376-383.
7. S.D. Prokoshkin, A.V. Korotitskiy, A.V. Tamonov, I.Yu. Khmelevskaya, V. Brailovski and S. Turenne, *Comparative X-ray and time-of-flight neutron diffraction studies of martensite crystal lattice in stressed and unstressed binary Ti-Ni alloys, Materials Science and Engineering A*, 2006, Vol.438-440, pp.549-552.

8. J. Schreiber, A. Tamonov, V. Richter, K. Voigt, G. Bokuchava, *Investigation of non-equilibrium effects on residual stress state of metallic composites. Proc. of European Conference on Hard Materials and Diamond Tooling* (European Powder Metallurgy Association), 2002, p.114.
9. G.D. Bokuchava, V.V. Sumin, A.V. Tamonov. *Residual stress evaluation in core component of a nuclear reactor. Annual report 2001 of FLNP JINR*, 2002, p.99.
10. А.В. Тамонов, Г.Д. Бокучава, Н.Р. Шамсутдинов, Ю. Шрайбер. *Исследование W/Cu композитов методом нейтронной дифракции. Труды 6-ой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, Дубна, 4- 9 Фев 2002, с.129.*
11. G.D.Bokuchava, V.L.Aksenov, A.M. Balagurov, E.S. Kuzmin, A.V. Tamonov, V.V. Zhuk, V.V. Zhuravlev, V.A. Trounov, V.A. Kudrjashev, A.P. Bulkin. *Fourier stress diffractometer (FSD): First results. Annual report 2000 of FLNP JINR*, 2001, p106.
12. V.V. Sumin, A.V. Tamonov. *Study of residual stresses in bimetallic adapter steel-zirconium. Annual report 2002 of FLNP JINR*, 2003.
13. А.В. Тамонов, В.В. Сумин. *Исследование градиента остаточных напряжений в биметаллической трубе сплав циркония-нержавеющая сталь методом дифракции нейтронов. Труды 10-ой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 2006, с.247-253.*
14. А.В. Тамонов, И.В. Папушкин. *Измерения остаточно-напряженного состояния стальной пластины со сварным швом. Труды 10 научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 2006, с.254-259.*
15. J. Schreiber, V. Richter, K. Voigt, G.D. Bokuchava, A.V. Tamonov. *Investigation of non-equilibrium effects on residual stress state of metallic composites. Annual report 2002 of FLNP JINR*, 2003.

Получено 9 июня 2007 г.