

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертационную работу  
«Применение методов дифракции синхротронного излучения и математического моделирования для анализа структуры титановых сплавов, формируемой при деформационном, термическом и фрикционном воздействии»,**

**представленную ИВАНОВЫМ ИВАНОМ ВЛАДИМИРОВИЧЕМ  
на соискание учёной степени кандидата технических наук по  
специальности 05.16.09 Материаловедение (в машиностроении)**

Диссертационная работа Иванова Ивана Владимировича посвящена исследованию особенностей эволюции структуры титановых сплавов в условиях деформации, нагрева и сухого трения. В своей работе автор применяет современные методы исследования структуры материалов в сочетании с математическим моделированием, что позволяет выявить особенности структуры титановых сплавов, формируемой при реализации различных схем технологического воздействия. Проведенные автором исследования позволили установить ряд закономерностей эволюции дислокационной структуры и улучшить понимание особенностей ее формирования.

### **Актуальность диссертационной работы**

Диссертационная работа И.В. Иванова посвящена определению ряда важных для материаловедения титановых сплавов закономерностей, связанных с эволюцией их фазового состава и дислокационной структуры при реализации различных схем деформационного и термического воздействия. В частности, диссертантом изучено влияние схем пластической деформации, нагрева и сухого трения скольжения на структуру ряда титановых сплавов, обладающих  $\alpha$ -,  $\alpha'$ -,  $\beta$ -,  $\alpha+\beta$ -структурой. Основным методом исследования, использованный в данной диссертационной работе, основан на явлении дифракции синхротронного излучения.

Актуальность данной диссертационной работы подтверждается общим уровнем интереса научно-технического сообщества к разработке новых методов исследования материалов. Однако, зачастую, реализация эффективных подходов к исследованию структуры требует применения аналитического оборудования, характеризующегося малым временным и пространственным разрешением. Обозначенное в работе И.В. Иванова решение – использование современных моделей профильного анализа, является одним из наиболее актуальных. Использование данного подхода позволяет проводить исследования структуры титановых сплавов не только в лабораторных условиях, но также и при реализации комплексных схем деформационного и термического воздействия в режиме *in-situ*.



Таким образом, диссертационная работа И.В. Иванова является актуальной, а представленные в ней результаты имеют важное как научное, так и прикладное значение.

Содержание введения, шести глав, заключения, а также списка литературы в полной мере отражают логику проведенного научного исследования. В свою очередь, содержание автореферата полностью отражает основные положения и результаты диссертационной работы.

### **Анализ содержания диссертации**

Объем работы составляет 186 страниц. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, шести приложений и списка литературы, включающего в себя 130 источников.

**Во введении** представлено обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы ее цели и задачи, описаны методы исследований, приведена научная новизна, сформулированы положения, выносимые на защиту, описана теоретическая и практическая ценность работы, обоснована достоверность результатов, отражен личный вклад автора.

**В первой главе** работы автором представлен краткий анализ структурных преобразований, развивающихся в материалах при их пластической деформации, нагреве и триботехническом воздействии. Представлен анализ основных методов исследования структурных параметров материалов. Отдельно рассмотрены методы дифракционного профильного анализа, отмечены их достоинства, недостатки и особенности применения.

**Вторая глава** содержит описание методов получения материалов, а также методов их исследования. Поскольку ряд исследований проводился в режиме *in-situ* методом дифракции синхротронного излучения, в данной главе приводится подробное описание схем реализации данных экспериментов. Автор приводит детали использованных методов математического моделирования и особенности обработки данных, получаемых методом дифракции синхротронного излучения.

**В третьей главе** описаны результаты исследований структурных преобразований титановых сплавов, подвергнутых пластической деформации. Автором было показано, что при реализации методов профильного анализа с целью снижения ошибки аппроксимации целесообразно использовать подходы, основанные на дислокационной модели упругих искажений. Кроме того, показано, что реализация подобных подходов позволяет рассчитать различные параметры дислокационного строения материала. Автором было установлено, что при холодной прокатке титанового сплава VT1-0 с обжатием до ~60% плотность дислокаций достигает  $37 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ . При этом наиболее распространены низкоэнергетические дислокации с вектором Бюргерса  $\vec{b}_a$ .

В данной главе приводятся также результаты исследований мартенситного  $\alpha'$ -титанового сплава  $Ti_{13}Nb_{13}Zr$ , подвергнутого деформации методом кручения под высоким давлением. Автором было установлено, что исходный



фазовый состав сплава претерпевает значительные изменения. Используя подход, основанный на сканировании материала синхротронным пучком, показано, что распределение фаз по сечению деформированного диска неравномерно.

Рациональность применения метода дифракции синхротронного излучения показана также на примере исследования структуры сплава VT1-0, подвергнутого высокоскоростной пластической деформации. Удачное сочетание дифракционных методов экспериментального исследования и математического моделирования позволило автору выявить тонкие особенности структуры деформированного материала. В частности, было показано, что вблизи переднего торца цилиндра формируется зона, характеризующаяся более низкими значениями пластического течения (и, соответственно, меньшей дефектностью) по сравнению с окружающими ее объемами материала.

**В четвертой главе** приведены результаты исследования структурных преобразований титановых сплавов в процессе их нагрева. Особенностью данного раздела является тот факт, что проведенные исследования дислокационной структуры материалов проведены в режиме *in-situ*. Это вызвало автору выявить ряд неизвестных ранее фактов, касающихся преобразованию дислокационной структуры титановых сплавов в условиях индукционного нагрева.

В диссертации описаны дислокационные преобразования, обусловленные термическим воздействием на заготовки из сплава VT1-0. Методом дифракции синхротронного излучения установлено, что в температурном интервале 25-300 °C происходит рост плотности дислокаций на 10 % относительно исходного (холоднодеформированного) состояния. Данное явление было косвенно подтверждено использованием моделирования методом молекулярной динамики.

Подобная динамика дислокационных преобразований была замечена также и при анализе  $\beta$ -титанового сплава Ti45Nb. В данном случае рост плотности дислокаций составляет ~ 4% относительно холоднодеформированного материала. Кроме того, при изучении данного сплава было обнаружено, что в диапазоне 400 - 495 °C происходит увеличение среднего радиуса области упругих искажений вокруг дислокаций с 7,4 до 22 нм, а на участке 500 - 520 °C - его уменьшение с 22 до 16 нм. Зафиксированные преобразования были обоснованы автором путем моделирования динамики краевых дислокаций с использованием континуальной теории дислокаций.

В этом же разделе приведены результаты механических испытаний анализируемых сплавов. Оба приведенных параметра – предел прочности и микротвердость коррелируют с зафиксированными в работе структурными преобразованиями.

**В пятой главе** приведены результаты оценки структурных преобразований  $\alpha+\beta$ -титанового сплава Ti<sub>3</sub>Fe в процессе сухого трения скольжения образцов в режиме *in-situ*. Полученные в работе результаты свидетельствуют о высокой эффективности подхода, основанного на дифракции синхротронного излучения для исследования процессов эксплуатации материалов в режи-



ме реального времени. Специально разработанная установка, реализующая процесс сухого трения, позволила проводить измерения коэффициента трения в процессе триботехнических испытаний. Автором выявлена многостадийность процесса фрикционного взаимодействия образца с контртелом. Экспериментально показано, что на этапе приработки одновременно со снижением коэффициента трения происходит упрочнение материала, сопровождающееся ростом плотности дислокаций до  $25 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2}$ . Дальнейшее фрикционное воздействие приводит к последовательному росту и снижению плотности дислокаций. Автор связывает данное явление с периодической сменой процессов деформационного упрочнения и адгезионного срыва поверхностных слоев титанового сплава.

**В шестой главе** диссертации описаны прикладные аспекты научного исследования. В первом ее разделе автор приводит рекомендации по использованию описанных в диссертационной работе методов исследования дефектного состояния материалов для практического применения с приведением примера ее реализации. Вторая часть данной главы посвящена описанию конструктивных особенностей разработанной экспериментальной установки, предназначенной для исследования эволюции структурного состояния металлических сплавов непосредственно в процессе их изнашивания по схеме трения скольжения.

**В заключении** диссертационной работы изложены основные результаты и выводы.

**Научная новизна** диссертационной работы составляет совокупность данных о тонких структурных преобразованиях сплавов на основе титана, полученных с использованием дифракции синхротронного излучения. Автором зафиксирован ряд особенностей эволюции дислокационной структуры титановых сплавов при реализации различных схем пластической деформации, нагрева и сухого трения. Установлено, что в процессе соударения стержня о неподвижную стальную преграду в результате интерференции деформационных волн вблизи переднего торца образца формируется область, характеризующаяся меньшими значениями пластической деформации. Показано, что начальные этапы нагрева прокатанных в холодном состоянии образцов из  $\alpha$ -сплава VT1-0 и  $\beta$ -сплава Ti45Nb сопровождаются ростом плотности дислокаций на 10% и 4% соответственно, а характер изменения среднего радиуса области упругих искажений дислокаций и параметра Вилкенса свидетельствует о том, что на последующих этапах нагрева одновременно с уменьшением плотности дислокаций образуются высокоэкразированные дислокационные построения. Установлено, что процесс сухого трения скольжения  $\alpha+\beta$ -титанового сплава о твердосплавный индентор сопровождается циклическим накоплением дефектов кристаллической структуры в поверхностном слое сплава Ti3Fe и последующей их частичной аннигиляцией. Показано, что при деформации методом кручения под высоким давлением сплава Ti13Nb13Zr превращение  $\alpha'$ -фазы с образованием  $\beta$ - и  $\omega$ -фаз развивается лишь в центральной части деформируемого диска.



## **Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность экспериментальных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием современных методов исследования и различных методов математического моделирования. Полученные автором результаты не противоречат имеющимся представлениям об эволюции дислокационной структуры в титановых сплавах. Основные результаты изложены в 12 печатных работах, в том числе в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и международных изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

## **Научная значимость диссертационной работы**

Научная значимость работы заключается в расширении имеющихся представлений об эволюции дислокационной структуры титановых сплавов, формируемой при реализации процессов пластической деформации, нагрева и сухого трения скольжения.

## **Практическая ценность**

Предложенные при выполнении диссертационной работы подходы могут быть использованы при анализе структуры титановых сплавов, подвергнутых различным видам деформационного и теплового воздействия.

В рамках запланированных исследований с участием диссертанта разработана экспериментальная установка, предназначенная для проведения *in-situ* исследований материалов триботехнического назначения с использованием метода синхротронной микродифрактометрии.

## **Замечания по работе**

1. В названии диссертации заявлено о применении математического моделирования наравне с методом дифракции синхротронного излучения для анализа структуры титановых сплавов, сформированной различными способами. Однако, в самой работе объем данных, полученных математическим моделированием, мал, по сравнению с экспериментальными исследованиями, что дает основание сомневаться в целесообразности упоминания математического моделирования в названии работы.

2. Основная часть работы посвящена структурным исследованиям титановых сплавов, однако анализу влияния структурных превращений на их механические свойства уделено недостаточно внимания. Нет сравнительного анализа изменения свойств титановых сплавов при разных способах модифицирования дислокационной структуры.

3. В главе 4 диссертации уделяется большое внимание влиянию последующего нагрева на дислокационную структуру титановых сплавов, полученную высокоскоростной пластической деформацией. Однако в 6 главе, посвященной изменению структуры поверхностного слоя титанового сплава



в процессе сухого трения скольжения, подобные исследования не приводят-ся, что обедняет работу.

### **Соответствие содержания работы указанной специальности**

По своему содержанию представленная к защите диссертационная работа соответствует формуле специальности и пунктам 1, 6 и 8 паспорта научной специальности 05.16.09 материаловедение (в машиностроении):

- п. 1. – «теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий»;

- п. 6. – «разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств материалов на образцах и изделиях»;

- п. 8. – «разработка и компьютерная реализация математических моделей физико-химических, гидродинамических, тепловых, хемореологических и деформационных превращений при производстве, обработке, переработке и эксплуатации различных материалов. Компьютерное проектирование композиционных материалов. Компьютерный анализ и оптимизация процессов получения и эксплуатации материалов».

### **Соответствие автореферата содержанию диссертации**

Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертационной работы и опубликованным автором работам.

### **Заключение**

Диссертационная работа Иванова Ивана Владимировича «Применение методов дифракции синхротронного излучения и математического моделирования для анализа структуры титановых сплавов, формируемой при деформационном, термическом и фрикционном воздействии» является законченным исследованием, выполненным на актуальную тему, связанную с изучением особенностей эволюции дислокационной структуры титановых сплавов при реализации различных схем технологического воздействия.

По объёму выполненного исследования, новизне полученных результатов и выводов, их научному и практическому значению диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития одной из актуальных задач современного материаловедения, связанной с формированием обоснованных представлений о структуре титановых сплавов, и полностью соответствует всем требованиям пункта II. 9 Положения о присуждении ученых степеней от 24 сентября 2013 года № 842 (в ред. Постановлений Правительства Российской Федерации от 21.04.2016 № 335, от 02.08.2016 № 748, от 29.05.2017 № 650, от 28.08.2017 № 1024), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Её автор, Иванов Иван Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кан-

дидата технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении).

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, доцент,  
доцент отделения материаловедения  
инженерной школы новых  
производственных технологий  
Федерального государственного ав-  
тономного образовательного учреж-  
дения высшего образования «На-  
циональный исследовательский  
Томский политехнический универ-  
ситет»

Ж.Г. Ковалевская


Собственноручную по  
Ж.Г. Ковалевской зав

Ученый секретарь Уч

О.А. Ананьева

Дата подписания отзыва 20.11. 2020 г.

Поступила в секрет 01.12.2020  Пуккина А.Р.

Создан заказчик 02.12.2020  Уланов В.В.

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
+7(3822) 60-63-33  
адрес электронной почты: kovalevskaya@tpu.ru