

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Иванова Ивана Владимировича «Применение методов дифракции синхротронного излучения и математического моделирования для анализа структуры титановых сплавов, формируемой при деформационном, термическом и фрикционном воздействии», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении)

Актуальность представленной диссертационной работы определяется, в первую очередь, потребностями в развитии, постановке и апробации современных методов исследования трансформации структуры материалов в режиме реального времени при реализации технологических процессов их получения, обработки, а также при эксплуатации изделий, полученных из этих материалов. Дифракционные методы с использованием синхротронного излучения, адаптации которых к исследованию титановых сплавов, подвергаемых деформационном, термическом и фрикционном воздействию, посвящена эта работа, являются наиболее перспективными и обеспечивающими высокую точность результатов. Безусловный интерес представляют и сами объекты исследования, титан и сплавы на его основе, как важнейшие материалы конструкционного назначения, их поведение в условиях различных внешнего воздействия.

Научная новизна работы

1. С использованием метода дифракции синхротронного излучения описаны механизмы преобразований дислокационной структуры на разных стадиях в процессе непрерывного нагрева холоднодеформированных образцов титана и титанового сплава $Ti_{45}Nb$. Показано, что начальные этапы нагрева образцов сопровождаются ростом плотности дислокаций; на последующих этапах одновременно с уменьшением плотности дислокаций образуются высокоэкразированные дислокационные построения, возрастают размеры

элементов зеренно-субзеренной структуры. Параметры микроструктуры коррелируют с изменением механических свойств на разных этапах нагрева.

2. Показано, что в процессе соударения цилиндрического образца технически чистого титана о неподвижную стальную преграду, в результате интерференции деформационных волн, вблизи переднего торца цилиндра формируется область с пониженной концентрацией дефектов кристаллической структуры. С использованием численного моделирования процессов, сопутствующих соударению тел, для конкретной скорости метания установлено отношение длины цилиндра к его диаметру, при котором наблюдается этот эффект.

3. Методом дифракции синхротронного излучения установлено, что процесс сухого трения скольжения титанового сплава $Ti3Fe$ о твердосплавный индентор сопровождается циклическим накоплением дефектов кристаллической структуры с последующей их частичной аннигиляцией. Показано, что этапы накопления и снижения количества дислокаций в интенсивно деформируемом слое коррелируют со стадиями роста и снижения коэффициента трения.

4. Методом дифракции синхротронного излучения в сочетании с дюрOMETрическим анализом изучен характер неоднородной пластической деформации, имеющей место в процессе кручения под высоким давлением титанового сплава $Ti13Nb13Zr$. Структурные эффекты коррелируют с изменением микротвердости сплава.

Практическая значимость диссертации

Проведенные в работе исследования позволили диссертанту сформулировать совокупность предложений по использованию метода дифракции синхротронного излучения для изучения структурных преобразований в машиностроительных материалах в режиме *in-situ*. Разработаны методические рекомендации по использованию метода при исследовании кристаллического строения любых металлических материалов со структурой, соответствующей гексагональной и кубической сингониям.

Достоверность полученных результатов обеспечивается надежностью экспериментальных данных, полученных на современном исследовательском оборудовании, и согласованием сделанных диссертантом заключений с современными представлениями об особенностях формирования дислокационной структуры в условиях термического и деформационного воздействий. Основные результаты отражены в шести статьях в рецензируемых журналах и апробированы на нескольких российских и международных научных конференциях.

Анализ содержания результатов

На отзыв представлена диссертация, изложенная на 186 страницах основного текста, включая 67 рисунков, 10 таблиц. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и шести приложений. Список литературы состоит из 130 наименований.

Во введении обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, приведена цель, сформулированы задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость полученных при выполнении диссертационной работы результатов.

В первой главе по традиции представлен анализ литературных данных по теме исследования. Обзор охватывает три темы, существенные для данной диссертационной работы: имеющиеся в литературе представления о структурных преобразованиях, развивающиеся в материалах при их пластической деформации, нагреве и трении скольжения; методы исследования реальной структуры материалов с акцентом на рентгеновские дифракционные методы анализа профилей дифракционных пиков; объекты исследования - титановые сплавы как важнейшие конструкционные материалы; подробно описаны структура титановых фаз и сплавов, преобразования их при реализации различных методов пластической и термической обработки. По результатам обзора литературных

данных сделаны выводы, обосновывающие актуальность исследований, выполненных в данной диссертационной работе.

Во второй главе приведены исходные характеристики объектов исследования – материалов из титана и титановых сплавов. Описаны используемые методы пластической деформации, нагрева и изнашивания. Подробно изложены методы моделирования процессов высокоскоростного соударения, процессов пластической деформации и нагрева (методом молекулярной динамики). Описаны особенности обработки дифракционных данных, полученных с использованием синхротронного излучения.

Третья глава работы посвящена исследованию структурных преобразований титановых сплавов, подвергнутых пластической деформации с применением метода дифракции синхротронного излучения. По результатам исследований, выполненных на образцах технически чистого α -титана (ВТ1-0), деформированных методом холодной прокатки, сделано заключение, что основной причиной высокой погрешности классических подходов профильного анализа в этом случае является высокая анизотропия упругих свойств, характерных для материалов с гексагональной решеткой. Использование подходов, основанных на дислокационной модели упругих искажений, позволяет не только существенно улучшить качество аппроксимации экспериментальных данных, но, что крайне важно, оценить дислокационную структуру материалов. Сделаны соответствующие заключения о характере дислокационной структуры как для образцов α -титана при различных степенях деформации, так и для сплава состава $\text{Ti}_{13}\text{Nb}_{13}\text{Zr}$, подвергнутого холодной деформации методом кручения под высоким давлением. Отдельный раздел главы посвящен исследованиям структуры титанового стержня (α -титана), подвергнутого высокоскоростной пластической деформации по методу Тейлора. Моделирование процесса высокоскоростного соударения методом конечных элементов подтвердило неравномерное развитие деформационных процессов вдоль стержня и образование зоны, характеризующейся более низкими значениями эффективной

пластической деформации, чем в окружающей ее области. Дана оценка соотношения диаметра и длины металлического стержня, при котором начинается это явление.

В четвертой главе работы приведены результаты исследования структурных преобразований металлического титана и β -титанового сплава Ti45Nb в процессе их нагрева. На основании дифракционных данных описаны стадии трансформации дислокационной структуры в ходе нагрева. Обнаруженные эффекты подтверждены, в ряде случаев, моделированием процесса нагрева сплавов методом молекулярной динамики.

Пятая глава работы посвящена использованию метода дифракции синхротронного излучения для оценки структурных преобразований $\alpha+\beta$ -титанового сплава Ti3Fe в процессе сухого трения скольжения в режиме in-situ. Измерения коэффициента трения в процессе триботехнических испытаний проводилось с использованием оригинальной (разработанной в НГТУ) установки. Показано, что многостадийность процесса фрикционного взаимодействия отражается как на изменении структурных параметров, так и на динамике коэффициента трения. Сделано заключение о высокой эффективности подхода, основанного на дифракции синхротронного излучения, для исследования процессов эксплуатации материалов в режиме реального времени.

В шестой главе приведены практические рекомендации по использованию описанных в диссертационной работе методов исследования дефектного состояния материалов.

В заключении представлены основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Диссертация в целом выполнена на высоком методическом уровне. Основные результаты хорошо представлены в виде графиков и таблиц, качественно и грамотно описаны в тексте. Сделаны корректные выводы и заключения. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Замечания и вопросы

1. По структуре диссертации – не вполне понятно назначение главы 6 и не очевидно соответствие её названия содержанию. Приведенный в ней алгоритм действия при обработке дифракционных данных, как и описание экспериментальной установки для проведения in-situ исследований, можно было поместить в начале, при описании методик в главе 2, а подробности, связанные с использованием тех или иных вычислительных программ, вынести в приложение.
2. Почему технически чистый титан (как это указано на стр.59) марки VT1-0 всюду по тексту диссертации называется титановым сплавом? По определению сплавы – это системы, образованные двумя или более компонентами.
3. На рис. 3.2. приведены, но никак не описаны и не обсуждены рентгенограммы образцов α -титана различной степени деформации. Между тем, наблюдается некоторое перераспределение интенсивности дифракционных максимумов от образца к образцу. Связано ли это с появлением текстуры и как это может сказаться на применении модифицированных методик профильного анализа?
4. Следовало бы обратить больше внимания на оценку погрешности в определении параметров микроструктуры по дифракционным данным. Например, на рис. 3.9а приведены размеры ОКР для нескольких образцов α -титана, и делается вывод о практически линейной зависимости размеров ОКР от степени деформации. Но различия даже между крайними точками укладываются в интервал погрешности 10%, тогда как для остальных восьми промежуточных точек погрешность определения должна быть много меньше, чтобы делать выводы о линейной или иной зависимости. Реально ли это даже при условии синхротронного эксперимента?

Сделанные замечания имеют уточняющий характер и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы И.В.Иванова

Заключение. Диссертационная работа «Применение методов дифракции синхротронного излучения и математического моделирования для анализа структуры титановых сплавов, формируемой при деформационном, термическом и фрикционном воздействии» Иванова Ивана Владимировича выполнена на высоком уровне и является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему.

Содержание диссертационной работы И.В.Иванова соответствует паспорту специальности 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении). Диссертационная работа соответствует требованиям пункта II.9 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Иванов Иван Владимирович, заслуживает присуждения искомой степени кандидата технических наук по 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении).

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник
лаборатории структурных методов
исследования Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
«Федеральный исследовательский центр
«Институт катализа им. Г.К. Борескова
Сибирского отделения Российской академии наук»
630090, Новосибирск, пр. Ак Лаврентьева 5
тел. 8(383)3269547, эл. почта: tsybulya@catalysis.ru

Сергей Васильевич Цыбуля

С отзывом
ознакомлен
02.12.2020

[Handwritten signature] Иванов И.В.

«Подпись С.В.Цыбуля»

Ученый секретарь И
кандидат химически

М.О.Казakov

30.11.2020

Поступил в совет 01.12.2020 *[Signature]* Мухомин А.П.