

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу
**МУХАМЕТГАЛИНОЙ АЙГУЛЬ АХТАМОВНЫ «ВЛИЯНИЕ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ И СВАРКИ НА СТРУКТУРУ И
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА», представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.8 – Физика конденсированного состояния**

Актуальность темы диссертации. Титановые сплавы благодаря высокой прочности, пластичности, теплостойкости, исключительной коррозионной стойкости и малому удельному весу становятся все более востребованы в качестве материалов для авиации, космических аппаратов, надводных и подводных судов, скоростных поездов, автомобилей и велосипедов, ортопедических и зубных имплантатов. Важное направление совершенствования титановых сплавов связано с формированием в них ультрамелкозернистых (УМЗ) и нанокристаллических структур методами интенсивной пластической деформации (ИПД). Однако повышение прочности за счет деформационного измельчения зерен сопровождается, как правило, снижением пластичности из-за большой запасенной упругой энергии, которая в значительной степени связана с неравновесными границами зерен. Перспективным методом релаксации напряжений без заметного изменения размера зерен УМЗ металлов и сплавов, перераспределения в них дислокаций и вакансий, увеличения их пластичности без снижения прочности может стать объемная ультразвуковая обработка (УЗО), при которой материал подвергается воздействию осциллирующих напряжений растяжения-сжатия в объеме материала. Современные сплавы на основе титана являются наиболее распространённым материалом деталей авиационных газотурбинных двигателей, работающих при температурах до 500...550°C. Это определяет важность изучения поведения при нагреве УМЗ титановых сплавов, подвергнутых объемной УЗО.

С развитием техники возрастает интерес к другому применению ультразвуковых колебаний – в современной технологии ультразвуковой сварки (УЗС), при которой интенсивные колебания создают знакопеременные сдвиговые перемещения (трение) и деформации в соединяемых элементах. Однако в отличие от УЗС мягких металлов (Al, Cu) и их сплавов, значительно меньше изучены особенности УЗС титана.

Поэтому не вызывает сомнений **актуальность диссертационной работы** Мухаметгалиной А.А., направленной на разработку научных основ объемной ультразвуковой обработки и ультразвуковой сварки титана и его сплавов в ультрамелкозернистом состоянии на основе изучения влияния высокочастотных колебаний различной интенсивности на изменения структуры и механических свойств указанных материалов при комнатной и повышенной (600 °C) температурах.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка сокращений и списка цитируемой литературы из 205 источников.

Во **введении** дано обоснование актуальности работы, заявлены ее цель и решаемые задачи, сформулированы научная новизна и выносимые на защиту положения, представлены теоретическая и практическая значимость результатов, степень достоверности и апробация результатов, личный вклад автора.

И-
подпись ИПСМ
№ 406
от 29.08.2023

В **первой главе** представлен аналитический обзор вопросов, возникающих при разработке и реализации ультразвуковых технологий: принципы действия УЗО и УЗС, механизм формирования твердофазных соединений при УЗС, моделирование процессов УЗО, влияние ультразвуковых колебаний на дефекты в металлах, их структуру и механические свойства, термическую стабильность. Рассмотрены также микроструктура и свойства УМЗ материалов, подвергнутых ИПД. На основе выводов по обзору литературы сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** представлены исследуемые материалы (чистый титан ВТ1-0, однофазный α -сплав ВТ5 и двухфазный ($\alpha+\beta$)-сплав ВТ6), описание оборудования и реализованных технологий объемной УЗО и УЗС, методы структурного анализа и определения механических характеристик при измерении микротвердости и испытаниях на растяжение и срез. Рассмотрены также использованные подходы к моделированию методом молекулярной динамики, описанию межатомного взаимодействия, анализу и визуализации структур.

В **третьей главе** диссертации при рассмотрении влияния объемной УЗО на структуру и прочностные свойства титана и его сплавов, подвергнутых ИПД методами кручения под высоким давлением (КВД) и равноканального углового прессования (РКУП), получен целый ряд **научных результатов, имеющих как научную, так и практическую ценность.** Экспериментально установлено, что объемная УЗО с амплитудами напряжений до 100 МПа не приводит к заметному изменению прочностных свойств титана ВТ1-0 после КВД, а также сплавов ВТ5 и ВТ6 при комнатной температуре, однако обеспечивает повышение удлинения и скоростной чувствительности напряжения течения в ходе деформации двухфазного сплава ВТ6 с низкими скоростями при 600 °С. Это связано со структурными изменениями в легированной α -фазе титана под влиянием УЗО. С использованием метода аннигиляции позитронов в прутках однофазного α -сплава ВТ5, подвергнутых РКУП, установлены трехкратный рост концентрации вакансионных кластеров и двукратное увеличение плотности дислокаций в результате УЗО с амплитудой напряжений 100 МПа. Показано, что инициированные УЗО изменения в тонкой структуре сплава способствуют формированию новых рекристаллизованных зерен во время последующей выдержки при 600 °С.

В **четвертой главе** диссертации на основе проведенного молекулярно-динамического моделирования воздействия осциллирующих напряжений на неравновесные границы зерен на примере бикристаллов α -титана получены следующие **новые научные результаты.** Показано, что генерируемые ультразвуковыми колебаниями высокочастотные напряжения растяжения-сжатия способствуют снижению дальнедействующих полей напряжений, которые возникают за счет эмиссии (генерации) решеточных дислокаций неравновесными границами зерен в титане. Пороговая амплитуда осциллирующих деформаций, при которой происходит генерация дислокаций неравновесной границей зерен и снижаются дальнедействующие поля напряжений, в бикристаллах титана оказалась примерно в шесть раз большей, чем в бикристаллах никеля, подвергнутого КВД и УЗО.

В **пятой главе** диссертации **оригинальные научные результаты** получены при исследовании эволюции микроструктуры технически чистого титана ВТ1-0 в процессе УЗС, а также изучении влияния усилия сжатия и времени сварки на качество соединений. Установлена возможность формирования в процессе ультразвуковой сварки

качественного прочного твердофазного соединения листов титана с образованием зоны термомеханического воздействия, в которой происходят структурно-фазовые перестройки, включающие полиморфное $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ превращение в результате существенного повышения температуры за счет интенсивного трения и высокоскоростной знакопеременной деформации с последующим охлаждением. Наиболее качественное бездефектное соединение зафиксировано в центральной области зоны термомеханического воздействия. Длина и ширина этой зоны увеличиваются по мере роста усилия сжатия и времени сварки, которое оказывает большее влияние на линейную плотность бездефектного соединения и величину деформации сжатия.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации основана на применении современных взаимодополняющих методов исследования структурно-фазового состояния сплавов (оптической, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, аннигиляции позитронов), гостированных методов определения микротвердости (ГОСТ 2999-75), механических свойств при испытаниях на растяжение при комнатной (ГОСТ 1497-84) и повышенной (ГОСТ 9651-84 (ИСО 783-89)) температурах и при испытаниях на срез (ГОСТ 6996-66). Приведенные в диссертационной работе результаты исследований и испытаний, полученные с использованием различных методик, достаточно хорошо согласуются между собой. Полученные данные обсуждены на основе общепринятых положений физики конденсированного состояния и физического металловедения. При выполнении диссертационной работы был использован методологический подход, включающий использование как теоретических (анализ, сравнение, индукция, дедукция), так и эмпирических методов исследования (моделирование, эксперимент). Достоверность результатов численных исследований обеспечена применением известных и апробированных методов молекулярной динамики и их физической непротиворечивостью.

Научная и практическая ценность результатов. Проведенное комплексное теоретико-экспериментальное исследование технологических и металлофизических аспектов объемной УЗО и УЗС чистого титана и титановых сплавов с разным фазовым составом и различной дисперсностью исходной структуры (включая ультрамелкозернистую) теоретически и экспериментально обосновывает получение прочных и одновременно пластичных УМЗ титановых сплавов, а также их качественных прочных твердофазных сварных соединений. Это имеет важное прикладное значение для использования объемной УЗО в технологических процессах, основанных на эффекте сверхпластичности (в частности, ультразвуковая обработка пресованных заготовок сплава ВТ6 повышает показатели сверхпластичности материала при 600 °С), а также для получения ультразвуковой сваркой твердофазных соединений листов титана, прочность которых сопоставима с прочностью соединений, полученных точечной контактной сваркой. Таким образом, **практическая значимость работы** очевидна.

Замечания по работе:

1. В названии диссертационной работы целесообразно было бы указать ультрамелкозернистое (УМЗ) структурное состояние титана и его сплавов. В работе неоднократно отмечается расхождение полученных данных о влиянии УЗО на характеристики УМЗ титана и титановых сплавов с результатами влияния УЗО на структуру и свойства деформированных на меньшую степень металлических материалов.

В диссертации эти несоответствия с литературными данными объяснены различиями в условиях УЗО и особенностями структуры материалов без углубленного анализа. В чем могут заключаться физические причины установленного отсутствия заметного влияния объемной УЗО на структуру и механические свойства при комнатной температуре УМЗ титана и его сплавов?

2. В главе 1 «Обзор литературы» следовало бы четко разграничивать различные виды ультразвуковых обработок. В частности, на страницах 5 и 11 диссертации ударные упрочняющие обработки поверхности инденторами, представленные в статьях [5-8] из списка литературы, не корректно названы «обработкой ультразвуком».

3. Рассмотренная в разделе 1.3.1 структура УМЗ материалов, полученных методами интенсивной пластической деформации (ИПД), почему-то представлена на примере Al сплава при наличии большого количества публикаций по УМЗ титановым сплавам после ИПД. И по другим разделам литературного обзора можно было бы отдавать приоритет именно титановым сплавам, составившим предмет исследования в диссертации. Не приведены литературные данные по КВД и РКУП титана и его сплавов, хотя эти методы использованы в экспериментальной части диссертации.

4. В разделе 2.1 «Материалы исследований» отсутствует таблица с химическими составами исследованных материалов.

5. Имеется замечание к описанию рисунка 3.12 на стр. 70. Сказано, что после испытаний на растяжение при 600 °С «в рабочей части всех образцов равноосные α -зерна размером менее 1 мкм заменили вытянутые крупные зерна первичной α -фазы (рисунок 3.12)». Однако на рисунке 3.12 не видны «вытянутые крупные зерна». Кроме того, в исходной структуре сплава ВТ6 после РКУП, как сказано на стр. 64, «наблюдаются сравнительно крупные (размерами 1-3 мкм) фрагменты α -фазы (рисунок 3.4)».

6. Есть ряд замечаний к таблицам и рисункам: в заголовке табл. 3.3 и подписях к рисункам 3.9-3.15 не указана температура испытания сплава на растяжение (600 °С); имеется смещение цифр у оси абсцисс на рисунке 3.2; не указан исследованный материал (сплав или титан) в заголовках таблиц 3.5, 3.6 и 5.1, в подписях к рисункам 5.2-5.17 и в заголовках разделов 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3, 5.4, 5.5.

Текст диссертации написан грамотно, почти без орфографических, пунктуационных и стилистических неточностей (как исключения: отсутствие требуемой запятой на стр. 62, опечатка на стр. 66).

Отмеченные отдельные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертационной работы и не снижают ее научной и практической значимости. Диссертационная работа Мухаметгалиной А.А. представляет собой законченное актуальное исследование, которое характеризуется обоснованностью вынесенных на защиту научных положений, выводов и практических рекомендаций. Автореферат соответствует тексту диссертации. Материалы работы достаточно полно опубликованы в журналах из списка ВАК и изданиях, входящих в системы цитирования Web of Science и Scopus. Результаты докладывались на 11 конференциях.

Таким образом, по актуальности и объему выполненных исследований, новизне, достоверности, научной и практической значимости полученных результатов и выводов диссертационная работа А.А. Мухаметгалиной «Влияние ультразвуковой обработки и сварки на структуру и механические свойства титана» является законченной научно-квалификационной работой, соответствует критериям, установленным в пп. 9-14

Положения о присуждении ученых степеней (Постановление правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842) и требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Мухаметгалина Айгуль Ахтамовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник, заведующий отделом материаловедения,
заведующий лабораторией механических свойств
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт физики металлов
имени М.Н. Михеева Уральского отделения
Российской академии наук

Макаров Алексей Викторович

Докторская диссертация защищена по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18, ИФМ УрО РАН
Телефон (343) 378-36-40 e-mail: avm@imp.uran.ru

Согласен на обработку персональных данных.

28.09.2023

