

УТВЕРЖДАЮ

Зам директора по научной работе
Федерального исследовательского центра
Институт прикладной физики Российской
и наук», д.ф.-м.н., профессор

М.Ю.Глявин

28» сентября 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Мухаметгалиной Айгуль Ахтамовны на тему

«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

На сегодняшний день существует большое многообразие технологических способов обработки металлических материалов, основанных на применении ультразвуковых колебаний, например, обработка давлением, упрочняющая поверхностная обработка, обработка кристаллизующихся расплавов и др. Во множестве исследований показано, что с помощью ультразвуковых колебаний можно оказывать воздействие на структуру и свойства металлических материалов, так как упругие напряжения сжатия-растяжения, вызываемые ультразвуковой волной, могут приводить к генерации и перераспределению дефектов кристаллической решетки. При этом, в зависимости от исходного состояния материала (отожженный или упрочненный), его особенностей (систем скольжения, энергии дефекта упаковки, температуры плавления и т.д.), а также от параметров ультразвуковой обработки (амплитуды, времени), такие важные свойства материала как прочность, пластичность, термостабильность структуры, могут как повышаться, так и снижаться. Этот эффект вызвал значительный интерес исследователей к объемной ультразвуковой обработке (УЗО), особенно с появлением нанокристаллических и ультрамелкозернистых материалов с уникальными механическими и физическими свойствами. Перспективность применения УЗО к таким материалам связана с возможностью снятия внутренних напряжений в заготовках, полученных методами холодной и теплой пластической деформации. Однако, предварительные исследования в этом направлении показали, что многие вопросы о механизмах воздействия ультразвука на дефектную структуру деформированных материалов остаются открытыми, а данные, полученные разными авторами на различных материалах (никеле, цирконии, гафнии и титане), противоречивы. В связи с этим, исследования, направленные на углубленное понимание процессов, происходящих в структуре деформированных материалов под действием ультразвуковых колебаний, являются актуальными.

Еще больший интерес исследователи проявляют к ультразвуковой сварке (УЗС) металлов, о чём свидетельствует рост количества публикуемых статей по этой теме. Такой интерес связан

Федеральный ИИПФМ
№ 407
от 29.09.2023

с широким спектром применения ультразвуковой сварки: от традиционных областей промышленности (медицинская, автомобилестроение, электротехника и т.д.) до активно развивающихся технологий быстрого прототипирования или аддитивного производства. Преимущества этого метода сварки (низкое тепловыделение и энергопотребление, высокая производительность, отсутствие требований к защитной газовой среде) открывают возможности его использования на рынке технического обслуживания и ремонта деталей и оборудования, в том числе из дорогостоящих титановых сплавов. Стоит отметить, что среди обилия научных работ, всего несколько из них посвящены ультразвуковой сварке титана или его сплавов, в которых основное внимание уделялось исследованию свойств соединений, а не их структуре. Поэтому подробный структурный анализ придает этой диссертационной работе особую актуальность и вносит значительный вклад в понимание механизмов формирования соединений в процессе УЗС.

С физической точки зрения, в процессах УЗО и УЗС материал подвергается колебательным воздействиям близкой природы, но различной интенсивности, поэтому изучение эволюции структуры и механических свойств при таких воздействиях представляет большой фундаментальный интерес.

Структура и основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы из 205 наименований. Общий объем диссертации составляет 125 страниц машинописного текста, включая 74 рисунка, 10 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и степень ее разработанности, приведены цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология исследований, степень достоверности и апробация результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации представлен обзор литературы, отражающий современное состояние исследований о влиянии ультразвуковой обработки и сварки на структуру и свойства кристаллических материалов.

Вторая глава содержит описание объектов и методов исследования. Для объемной ультразвуковой обработки в качестве объектов исследований выбраны технически чистый титан ВТ1-0, подвергнутый кручению под давлением, и сплавы ВТ5 (Ti-5Al-0,5V) и ВТ6 (Ti-6Al-4V), подвергнутые равноканальному угловому прессованию. Для УЗС использованы отожженные листы сплава ВТ1-0. В главе подробно изложена методика проведения УЗО и УЗС и режимы обработки. Описаны экспериментальные методы структурного анализа (просвечивающей и растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, аннигиляции позитронов), определения механических свойств и микротвердости, а также численный метод молекулярно-динамического моделирования.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния УЗО на изменения структуры и свойств титана и его сплавов, подвергнутых интенсивной пластической деформации. Методами просвечивающей электронной микроскопии значимых различий в дислокационной структуре до и после ультразвуковой обработки не выявлено. Методами структурного анализа (аннигиляции позитронов и рентгеноструктурного анализа) показано, что в образцах сплава ВТ5, подвергнутых равноканальному угловому прессованию и последующей ультразвуковой обработке с амплитудой напряжений 100 МПа, наблюдается почти трехкратное повышение концентрации вакансионных кластеров и почти двукратное увеличение плотности дислокаций. Автор предполагает, что эти изменения способствовали формированию новых

высокоугловых α/α границ, которые наблюдались в образцах сплавов ВТ5 и ВТ6 после последующего прогрева при 600°C. Показано, что наблюдаемые после УЗО изменения в дефектной структуре мало влияют на прочностные свойства деформированного титана и его сплавов. Однако результаты испытаний на растяжение при 600°C показали, что образцы сплава ВТ6, подвергнутые УЗО, демонстрировали большие значения удлинения до разрыва, равномерного удлинения, меньшие значения напряжений течения и большую чувствительность к скорости деформации по сравнению с исходными образцами.

В четвертой главе приведены результаты молекулярно-динамического моделирования воздействия осциллирующих напряжений на неравновесные границы зерен на примере бикристаллов титана. Показано, что под действием высокочастотных напряжений растяжения-сжатия границы зерен в деформированном титане, содержащие дисклинации, могут генерировать решеточные дислокации, что приводит к снижению дальнедействующих полей напряжений. Автор проводит сравнительный анализ результатов моделирования с данными аналогичных исследований, полученных ранее д.ф.м.н. А.А. Назаровым для никеля, и делает вывод, что пороговая амплитуда деформаций, при которой граница начинает генерировать дислокации, в бикристаллах титана примерно в шесть раз больше, чем в бикристаллах никеля.

Пятая глава посвящена исследованию эволюции микроструктуры технически чистого титана ВТ1-0 в процессе УЗС, а также изучению влияния усилия сжатия и времени сварки на качество соединений. Результаты испытаний на срез показали, что при выбранных условиях сварки формируются качественные соединения с прочностью, близкой к прочности соединений, полученных контактной точечной сваркой. Показано, что в области соединения образуется зона термомеханического влияния. Автор приводит подробный анализ микроструктуры и микротекстуры соединений, на основе которого делает вывод, что изменения в центральной области этой зоны указывают на протекание $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ превращения, а структура периферийной области характерна для титана, подвергнутого интенсивной сдвиговой деформации при повышенных температурах однофазной α -области. На основе структурных наблюдений предложена схема эволюции микроструктуры в процессе УЗС.

В заключении диссертационной работы представлены **основные выводы**, а также приводятся рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Научная новизна работы

Среди результатов, полученных автором, можно отметить следующие:

1. Ультразвуковая обработка с амплитудой напряжений 100 МПа приводит к увеличению плотности дислокаций и концентрации вакансионных кластеров в α -фазе деформированного титана почти в два и три раза, соответственно.
2. Образцы сплава ВТ6, подвергнутые ультразвуковой обработке с амплитудой напряжений 100 МПа, в ходе деформации с низкими скоростями при 600°C демонстрируют большие значения удлинений и коэффициента скоростной чувствительности, а также меньшие напряжения течения по сравнению с образцами, не подвергнутыми УЗО.
3. Методом компьютерного моделирования установлено, что критические амплитуды деформаций, необходимые для релаксации дальнедействующих полей напряжений, источниками которых являются неравновесные границы зерен, для титана почти в шесть раз выше, чем для никеля.
4. В процессе ультразвуковой сварки листов титана в области соединения происходят структурно-фазовые перестройки, включающие полиморфное $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ превращение.

Теоретическая и практическая значимость. Значимость диссертационной работы А.А. Мухаметгалиной для развития физики конденсированного состояния не вызывает сомнения, так как она вносит вклад в понимание механизмов физического воздействия механических колебаний высокой частоты в широком интервале амплитуд деформаций от 10^{-4} - 10^{-3} до 10^{-2} - 10^{-1} при УЗО и УЗС, соответственно, на структуру и свойства титана. Полученные новые результаты о влиянии ультразвука на дефектную структуру и свойства деформированного титана, о закономерностях эволюции микроструктуры в процессе формирования соединений листов титана при ультразвуковой сварке могут быть использованы для дальнейшего развития фундаментальных знаний о взаимодействии кристаллических материалов с высокочастотными колебаниями, а также для разработки новых методов обработки металлов и сплавов.

Установленный в работе эффект снижения напряжения течения, увеличения удлинения и скоростной чувствительности при 600°C прессованных заготовок сплава ВТ6, подвергнутых УЗО, может быть использован в технологических процессах, основанных на эффекте сверхпластичности. Важное практическое значение также имеют предложенные в работе режимы УЗС, обеспечивающие получение твердофазных соединений листов титана.

Диссертация является самостоятельной работой, обобщившей результаты, полученные автором лично или при его непосредственном участии.

Полученные А.А. Мухаметгалиной **результаты и выводы представляются вполне достоверными**. Об этом свидетельствует применение хорошо апробированных методов структурного анализа (просвечивающей и растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, аннигиляции позитронов), методов определения механических свойств, микротвердости, а также широко распространенного метода молекулярно-динамического компьютерного моделирования.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В третьей главе не хватает объяснения, почему повышение плотности дислокаций после УЗО в сплавах титана не отразилось на микротвердости.
2. Методом моделирования автор рассматривает только один из возможных механизмов генерации дислокаций, а именно механизм релаксации неравновесной границы зерен, под действием осциллирующих напряжений. Возможно, стоит рассмотреть поведение внутризеренных источников дислокаций, чтобы получить большее соответствие эксперименту.
3. Из литературных данных очевидно, что длительность ультразвукового воздействия играет значительную роль в процессе УЗС, в связи с чем возникает вопрос, из каких соображений выбирался временной интервал при сварке листов титана?
4. На основе структурного анализа сварных соединений сделан вывод, что в процессе УЗС в течение пары секунд происходит полиморфное превращение, при этом измерение температуры термопарой не дало корректных результатов. Могла ли интенсивная сдвиговая деформация способствовать развитию сдвигового механизма $\alpha \rightarrow \beta$ превращения в процессе УЗС?

Указанные замечания не снижают ценности результатов, полученных А.А. Мухаметгалиной. Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертации. Результаты исследования опубликованы в 11 работах и прошли рецензирование в редакциях ведущих журналов, рекомендованных ВАК и индексируемых в международных базах данных

Scopus и/или Web of Science, 3 из которых относятся к журналам квартиля Q1 и 1 – к журналам категории K-1.

Заключение. Диссертация А.А. Мухаметгалиной «Влияние ультразвуковой обработки и сварки на структуру и механические свойства титана» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся новые научно обоснованные сведения, связанные со структурными эффектами в кристаллических материалах под действием высокочастотных колебаний и имеющие высокую значимость для развития физики конденсированного состояния.

Содержание диссертации соответствует п. 1. «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления» и п. 4. «Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ» паспорта специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

По своей актуальности, новизне, научной и практической значимости, совокупности полученных результатов диссертация А.А. Мухаметгалиной «Влияние ультразвуковой обработки и сварки на структуру и механические свойства титана» отвечает квалификационным требованиям, установленным в п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа рассмотрена и обсуждена на заседании лаборатории физического материаловедения протокол заседания № 1 от «12» сентября 2023 года.

Руководитель научного направления ИПМ РАН,
и. о. заведующего лабораторией физического
материаловедения д.ф.-м.н., профессор,
Заслуженный деятель науки РФ

В.Н. Перевезенцев

Данные о ведущей организации:

Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПМ РАН), 603024, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, д. 85, тел.: +7 (831) 432-03-00, эл. почта: erof.vi@yandex.ru

Я, Перевезенцев Владимир Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.105.01, и их дальнейшую обработку.

Подпись Перевезенцева Владимира Николаевича
Учёный секретарь ИПМ РАН, к.т.н.



ентября__2023 г.

Е.А.Мотова

сентября__2023 г.