

Отзыв

официального оппонента на диссертацию и автореферат Бердина Николая Валерьевича «Формирование микрокристаллической структуры в титановом сплаве BT5-1 при горячей деформационной обработке», представленных на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Актуальность темы диссертации. Титановые сплавы относятся к труднодеформируемым материалам, в частности, из-за присущей им грубопластинчатой структуры, которая существенно ограничивает их пластичность при горячей деформации, но и не позволяет обеспечить баланс прочности, пластичности и вязкости при комнатной температуре. Поэтому формированию мелкозернистой структуры в титановых сплавах посвящено достаточно много исследований. Большой частью они касаются двухфазных титановых сплавов и развиваемых в ходе измельчения микроструктуры процессов рекристаллизации/глобуляризации. Альфа-титановые сплавы, такие как BT5-1, в меньшей степени исследованы, хотя применяются для изготовления ряда ответственных деталей газотурбинных двигателей, для которых получение оптимального соотношения разных механических характеристик имеет большое значение. Формирование мелкозернистой структуры определяется не только температурно-скоростными условиями деформации, но и, очевидно, схемой нагружения. Влияние последнего на формирование структуры исследовалось в ряде немногочисленных работ. Однако систематических исследований не проводилось. В этой связи несомненный **научный и практический** интерес представляет установить влияние температурно-скоростных режимов деформации, вида напряженного и деформированного состояния на формирование мелкозернистой структуры, в частности, на примере сплава BT5-1 и на этой основе разработать технологический процесс получения заготовок с регламентированным типом микроструктуры для изготовления полых конструкций. Применение полученных знаний при разработке высокоэффективных и энергосберегающих технологий изготовления деталей и узлов современных газотурбинных двигателей представляет собой **актуальную** проблему.

Содержание и структура диссертации логически связаны и соответствуют поставленной цели исследования. Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов по работе, библиографического списка из 128 наименований, изложена на 171 страницах текста, содержит 81 рисунок и 26 таблиц.

Во введении обоснована актуальность работы, определены ее цели и задачи, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, отмечена достоверность полученных результатов и личный вклад соискателя, представлены апробация и публикации по работе.

В главе 1 автором выполнен аналитический обзор литературных источников по исследуемой проблеме, в котором критически проанализированы методы получения и структурные особенности формирования микрокристаллической структуры в титане и его сплавах термической, термоциклической и деформационной обработкой. Показано, что термодинамическая устойчивость пластин альфа фазы не позволяет добиться ее измельчения в сплавах с пластинчатой структурой термической и термоциклической обработкой. Рассмотрены различные подходы к формированию микрокристаллической структуры методами горячей деформации. Изучены работы, демонстрирующие влияние напряженного и деформированного состояния на механическое поведение и преобразование структуры в титановых сплавах. Автор обращает внимание, что тип формируемой структуры зависит от многих факторов: исходной структуры материала, скорости и степени деформации и температуры обработки, а также напряженного и деформированного состояния. По данным разных источников приводятся различные технологические приемы получения микрокристаллической структуры в Ti и его сплавах и примеры применения полуфабрикатов с такой структурой в двигателестроительной промышленности. Отмечены технологические трудности получения микрокристаллической структуры в крупногабаритных заготовках.

Автор использовал в аналитическом обзоре не все известные к моменту представления диссертации литературные источники. Например, были бы полезны:

Mehrer, H. The effect of pressure on diffusion. Defect and Diffusion Forum, Volume 129-130, 1996, Pages 57-74.

Semiatin, S.L. An Overview of the Thermomechanical Processing of α/β Titanium Alloys: Current Status and Future Research Opportunities, *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, Volume 51, Issue 6, 1 June 2020, Pages 2593-2625.

Однако, в целом количество проанализированных источников достаточно для выбранного направления исследований. Представлены основные достижения отечественных и зарубежных исследователей в этой области. Между тем автором справедливо сделан вывод о недостаточном объеме исследований в области формирования микрокристаллической структуры в титановых сплавах и факторах, влияющих на развитие этого процесса. На основании литературного обзора была обоснована цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе приведены материалы исследования, способы получения в них микрокристаллической структуры и режимы деформационно-термической обработки. Представлено описание методик проведения микроструктурных исследований и механических испытаний. Взяты для исследования оптическая и электронная, качественная и количественная металлография, определение разориентировки зерен методом дифракции отраженных электронов, рентгеноструктурный анализ.

В третьей главе рассматриваются особенности механического поведения сплава VT5-1 и трансформации его исходной крупнокристаллической структуры в микрокристаллическую при трех видах нагружения: одноосного растяжения, сжатия и кручения. Было высказано предположение, что при каждом виде нагружения температурно-скоростные режимы деформирования по-своему влияют на механизмы пластического течения, развитие динамического возврата и рекристаллизации. Поэтому было установлено, что при равных температурно - скоростных условиях средний размер наблюдаемых рекристаллизованных зерен, например, при одноосном сжатии ниже, чем при одноосном растяжении образцов. Причиной может быть, по мнению автора, поле гидростатического давления, которое снижает равновесную концентрацию вакансий, замедляет поперечное скольжение дислокаций и создает условия для образования зерен с меньшим критическим размером. Также, при сжатии по сравнению с растяжением стимулируется множественное скольжение вблизи границ альфа колоний, что способствует

развитию динамической рекристаллизации и образованию в приграничных областях мелких зерен. Рассматривая пластическую деформацию сдвигом, активированную при кручении, показано, что этот вид нагружения стимулирует множественное скольжение и ведет к развитию в приграничных областях динамической рекристаллизации и образованию в них микрокристаллической структуры. Предположено, что в отличие от кручения при растяжении и сжатии рекристаллизационные процессы по границам альфа колоний стимулируют релаксацию напряжений в результате разворота рекристаллизованных зерен, вследствие активизации зернограничного проскальзывания. Это также обеспечивается геометрическим фактором – изменением формы рабочей части образцов, замедляя распространение динамической рекристаллизации вглубь колоний. В заключении диссертант справедливо отметил, что выбранный подход к исследованию не позволяет сделать достаточно определенные выводы об особенностях того или иного вида нагружения, характере пластического течения материала, соотношении вкладов механизмов деформации и структурообразования в титановых сплавах. Возможно, раздельное исследование влияния напряженного и деформированного состояния позволит установить закономерности механического поведения и структурообразования.

В четвертой главе исследовано влияние относительного гидростатического давления на механическое поведение, развитие рекристаллизационных процессов и измельчение исходной крупнокристаллической структуры в титановом сплаве VT5-1 при горячей деформации в однофазной альфа области одноосным сжатием цилиндрических образцов одинакового диаметра и различной высоты. Напряженное состояние формируемое в образцах при их деформации наряду с тензором напряжений было описано скалярными величинами – показателем вида напряженного состояния K_1 (коэффициент Лодэ) и показателем напряженного состояния K_2 (относительное гидростатическое давление). Исследование механического поведения показало, что высота образцов оказывает значительное влияние на характер кривых напряжение-деформация: если при большой высоте образца отмечена протяженная стадия стабильного течения, то при наименьшей высоте сразу наступает деформационное упрочнение. При наименьшей высоте образца имеет место и наибольшее напряжение течения уже на начальной стадии. Обнаружено, что деформация всех образцов происходит неравномерно, но наименее выражено образование «бочки» при малой исходной высоте образца. Исследование тонкой структуры показало, по мнению диссертанта, что изменение высоты образцов, влияя на жесткость напряженного состояния,

повышает при малой высоте образцов квазигидростатическое давление, которое подавляет дислокационную подвижность внутри зерен и, соответственно, уменьшает способность границ активно выступать в роли центров рекристаллизации.

Пятая глава посвящена исследованию роли параметров деформируемого состояния: величины накопленной деформации и траектории результирующего вектора деформации на формирование микрокристаллической структуры в ходе горячей деформации. Исследование проводили в условиях 2-х компонентного (кручение + растяжение) нагружения, а также при изменении соотношения компонентов векторов кручения и растяжения результирующего вектора деформации. Показано, что наиболее интенсивно материал разупрочняется при добавлении к кручению образцов небольшой доли растяжения. При последующем увеличении растягивающей компоненты разупрочнение достигает минимума в случае деформирования образцов одноосным растяжением из-за локализации деформации. Исследование микроструктуры образцов позволило установить оптимальные соотношения между компонентами кручения и растяжения результирующего вектора деформации, при которых формируется наиболее однородная микрокристаллическая структура. Исследование роли деформированного состояния в механическом поведении и эволюции структуры сплава VT5-1 демонстрирует возможность формирования микрокристаллической структуры в заготовках предложенным методом.

В шестой главе показаны практические возможности применения полученных результатов. В качестве примера взяты технологические схемы изготовления макета рабочего колеса центробежного насоса для перекачки жидких сред при криогенных температурах из титанового сплава VT5-1 и макета полых лопаток первой ступени компрессора из титанового сплава VT6. Технологические схемы изготовления изделий включали получение определенного типа заготовок методом горячей деформации двух компонентным (кручение + растяжение) нагружением, направленной на формирование на первом переходе микрокристаллической структуры в ~ 70...80% объема заготовки. Это обеспечивало повышенный уровень механических свойств в детали, а также устранение из технологической схемы операции сварки плавлением в первом случае. Во втором случае, метод исключает нахождение в горячей зоне деформирующего инструмента, а деформационная и термическая обработки проводится за один цикл нагрева. В результате существенно снизилась трудоемкость и себестоимость изготовления деталей.

В заключении приведены основные выводы по диссертационной работе. Они обоснованы и достоверны. Полученные результаты работы соответствуют поставленной цели и задачам.

Новизна полученных результатов

1. Полученные результаты отражают проведенное достаточно систематическое исследование связи между видом нагружения (растяжение, сжатие, кручение) и эволюцией структуры. Определены температурно-скоростные режимы при каждом виде нагружения, приводящие к формированию микрокристаллической структуры.

2. Автором разработана реологическая модель механического поведения титанового сплава ВТ5-1, позволяющая выполнить анализ формирования напряженно-деформированного состояния, определить показатели вида напряженного состояния К1 (коэффициент Лодэ) и напряженного состояния К2 (относительное гидростатическое давление), а также значения компонент скорости и степени деформации.

3. На примере горячей пластической деформации образцов с одинаковым диаметром и различной высотой для одноосного сжатия установлено влияние напряженного состояния на механическое поведение и формирование микроструктуры в сплаве ВТ5-1. Так, развитие динамической рекристаллизации тормозится с увеличением значения относительного гидростатического давления К2 с -1,7 до -9,0.

4. Исследовано механическое поведение и эволюция структуры при 2х-компонентном (кручение + растяжение) нагружении, демонстрирующем влияние деформированного состояния (траектории вектора деформации). Обнаружены соотношения компонент кручения к растяжению, величины начальной скорости деформации и значения модуля вектора деформации, повышающие эффективность преобразования крупнокристаллической микроструктуры в микрокристаллическую.

5. Продемонстрированы технологические схемы изготовления изделий, включающие получение определенного типа заготовок методом горячей деформации двух компонентным (кручение + растяжение) нагружением, направленным на формирование микрокристаллической структуры.

Подытоживая **научные результаты**, полученные автором в качестве основных, можно отметить следующее:

Наиболее интересные результаты были получены при изучении влияния отдельных схем деформации и их комбинаций на формирование микроструктурной структуры в сплавах и на механическое поведение, необходимое для выполнения технологических операций. Следует отметить также стремление автора связать сложное влияние параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) с формированием микроструктурной структуры в титановых сплавах при горячей деформации.

Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором диссертации

Научная значимость. Подобное систематическое исследование закономерностей механического поведения и эволюции структуры при различных видах нагружения, выявляющее роль напряженного и деформированного состояния, во многих результатах выполнено впервые и может служить научным фундаментом для разработки новых технологий изготовления полуфабрикатов из титановых сплавов и совершенствования режимов их обработки используемых в промышленности.

Практическая значимость работы не вызывает сомнений, так как результаты использованы при создании опытного технологического процесса получения заготовок для производства моноколеса компрессора полноразмерного фрагмента насоса высокого давления из титанового сплава BT5-1 и имитаторов полых титановых лопаток из титанового сплава BT6 рабочего колеса первой ступени компрессора современного газотурбинного двигателя.

Достоверность и обоснованность положений и выводов диссертации основана на применении взаимодополняющих современных аналитических методов исследований структуры: дифракционная просвечивающая электронная микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, оптическая микроскопия, механические испытания. Приведенные в работе результаты исследований, полученные с использованием различных методик, достаточно хорошо согласуются между собой и не противоречат известным научным представлениям и результатам. Полученные экспериментальные данные о структуре и механических свойствах сплавов обсуждены на основе общепринятых положений современного материаловедения. Достоверность полученных результатов обеспечена повторяемостью выявленных закономерностей, сопоставимостью результатов с данными других авторов. Результаты исследований опубликованы в реферируемых научных изданиях из

перечня ВАК, а также апробированы на всероссийских конференциях и школах.

Научные положения, вынесенные на защиту, обоснованы, достоверны и отличаются новизной. Содержание автореферата отвечает содержанию диссертации. Тема диссертации соответствует заявленной специальности. Диссертация представляет собой законченную работу в целом. Основные результаты работы опубликованы в научных изданиях, причем 8 статей были опубликованы в журналах, рекомендованных для публикации ВАК; получено 6 патентов РФ. Результаты представлялись на 8 научных конференциях и школах. По качеству оформления, языку и стилю автореферата и диссертации, а также некоторым результатам имеются **замечания**:

1. Стиль изложения. Стр.7 диссертации: Научная новизна. Установлена связь между температурно-скоростными условиями горячей деформации, типовыми видами (растяжение, сжатие, кручение) нагружения с формированием микрокристаллической структуры. Не ясно с чем установлена связь?
2. В диссертации и автореферате содержится достаточно много орфографических и стилистических ошибок.
3. Глава 2 и 3 диссертации. Описание микроструктуры сплава ВТ5-1. Она описывается по строению, как пластинчатого типа. Встречается утверждение, что пластины – частицы альфа фазы. Между тем, если деформация выполнялась в однофазной области, тогда и структура однофазная, а пластины не частицы, а субзерна, повторяющие форму бывших частиц альфа фазы. Прокомментируйте, правильно ли понимается структура?
4. Глава 2 и 3 диссертации. Указано, что в сплаве ВТ5-1 конечная температура полиморфного превращения 950°C , но какова начальная? Если интервал превращений, как обычно в этом сплаве, 50°C , то тогда деформация при $T=900^{\circ}\text{C}$ происходит в двухфазной области, а не в однофазной. Поясните? Если так, то деформация в двухфазной области существенно отличается по своему поведению от однофазной.
5. Стр.13 автореферата, Глава 4: ...показатель напряженного состояния K_2 , при прочих равных условиях (температура, скорость и степень, а также вид НДС) оказывает влияние на развитие процессов

динамической рекристаллизации. Можно предположить, что это влияние выражается в подавлении процессов зернограничной и объемной диффузии, которая определяет зарождение зародышей динамической рекристаллизации и их дальнейший рост. При формулировании этого вывода использовались ли какие-либо оценки по влиянию гидростатического давления на диффузию? Если нет, то почему возникла в этом уверенность?

6. Глава 4 диссертации: При изучении связи напряженно-деформированного состояния материала со структурообразованием автором выбран путь изучения влияния множества разных факторов, характеризующих это состояние. Из диссертации не ясна причина такой уверенности выбранного пути. В частности, важно понимание траектории деформации представительных материальных точек в заготовке. Диссертант упоминает важность кривизны накопленной деформации, но нет связи ее с исследуемыми факторами?
7. Глава 4 диссертации. Известно, что при одноосном сжатии в заготовках вследствие трения между торцами и инструментом возникают зоны затрудненной деформации и интенсивного течения. Характер микроструктуры в них принципиально разный, в том числе из-за условий деформации в этих зонах. Как принималось во внимание это обстоятельство в эксперименте?

Однако, сделанные замечания не изменяют общей безусловно положительной оценки результатов диссертационной работы и не снижают ее научной и практической ценности. Диссертация Бердина Н.В. представляет собой законченное исследование, которое характеризуется обоснованностью вынесенных на защиту научных положений, а также выводов и рекомендаций. Автореферат соответствует тексту диссертации. Следует также отметить, что представленная работа соответствует паспорту специальности 5.16.01-металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки) в пунктах 2 (теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях), 3 (теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства) и 4 (теоретические и экспериментальные исследования термических, термоупругих, термопластических, термохимических, термомагнитных,

радиационных, акустических и других воздействий на изменения структурного состояния и свойств металлов и сплавов).

Диссертация Бердина Н.В. является законченной научно-квалификационной работой, отвечающей требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, соответствует требованиям п. 7 Положения о порядке присуждения учёных степеней и содержит научно обоснованные технические и технологические решения по важной народно-хозяйственной задаче: разработка методов получения регламентированных микроструктур в металлах и сплавах, обеспечивающих высокий уровень механических, технологических и эксплуатационных свойств в изделиях и рекомендаций для их практического использования, а автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент

Профессор кафедры «Материаловедение и нанотехнологии»,
Заведующий лабораторией «Объемные наноструктурные материалы»
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Белгородский государственный национальный
исследовательский университет»

д. т. н., профессор


09.11.2020 г.

Г.А. Салищев

Подпись Г.А. Салищева удостоверяю:

Личную подпись удостоверяю Документовед управления по развитию персонала и кадровой работе	<i>Салищев Г.А.</i>
	<i>Савин / Воробьева О.В.</i>

