

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

*кандидата технических наук Щетникова Николая Васильевича на диссертацию Насчетниковой Инны Александровны «Кристаллографические особенности фазовых превращений в сплаве ВТ6», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов*

### **Актуальность темы диссертации**

Диссертационная работа Насчетниковой И.А. посвящена решению одной из фундаментальных и в то же время практически значимых проблем современного металловедения – установлению кристаллографических закономерностей фазовых превращений в двухфазных ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавах на примере сплава ВТ6.

Актуальность работы определяется широким применением титановых сплавов в авиационной и энергетической промышленности, где эти материалы функционируют в условиях повышенных механических и циклических нагрузок. В этих условиях ключевым фактором надежности изделий становится сопротивление зарождению и распространению усталостных трещин, которое, как убедительно показано в современных исследованиях, в значительной степени определяется микроструктурой и кристаллографической текстурой  $\alpha$ -фазы.

Особую значимость приобретает исследование механизмов вариантного отбора при  $\beta \rightarrow \alpha$ -превращении, поскольку именно этот процесс определяет формирование текстуры и, как следствие, анизотропию свойств. При этом влияние кристаллогеометрии границ  $\beta$ -зерен и их роли как центров зарождения  $\alpha$ -фазы остается недостаточно изученным.

В этой связи диссертационная работа Насчетниковой И.А., направленная на выявление кристаллографических закономерностей фазового  $\beta \rightarrow \alpha(\alpha')$ -превращения, включая классификацию  $\beta/\beta$ -границ, анализ механизмов зарождения  $\alpha$ -фазы и установление связи между формирующейся текстурой и кристаллогеометрией исходных  $\beta/\beta$ -границ является актуальной, научно обоснованной и практически значимой.

### **Характеристика структуры и содержания диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и списка литературы, включающего 131 наименование. Общий объем работы составляет 165 страниц, включая 54 рисунка и 19 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет



исследования, приведены положения, выносимые на защиту, а также раскрыты научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** представлен подробный аналитический обзор отечественных и зарубежных исследований, посвященных кристаллографии фазовых превращений в титановых сплавах. Рассмотрены современные представления о механизмах  $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения, ориентационном соотношении Бюргерса, а также существующие модели вариантного отбора при  $\beta \rightarrow \alpha(\alpha')$  превращении. Отмечена ограниченность существующих подходов, обусловленная недостаточным учетом реальной зернограницной структуры.

**Во второй главе** описаны материалы и методики исследования. Особое внимание уделено методам ориентационной микроскопии (ДОЭ), методам обработки данных и численным алгоритмам расчета  $\alpha/\alpha$ -,  $\beta/\beta$ - и  $\alpha/\beta$ -разориентаций. Подробно рассмотрены вопросы корректности реконструкции  $\beta$ -фазы и устранения ошибок идентификации фаз, что является важным методическим вкладом работы.

**Третья глава** посвящена анализу микроструктуры и кристаллографических особенностей  $\beta \rightarrow \alpha(\alpha')$ -превращения при различных скоростях охлаждения. Установлены закономерности формирования различных типов микроструктур (мартенситной, корзиночного плетения, пакетной) и показано, что спектры разориентаций  $\alpha/\alpha$ -границ сохраняют дискретный характер и близки к углам разориентаций в  $\alpha$ -фазе, следующим из выполнения ОС Бюргерса, независимо от условий охлаждения. Особое внимание в главе уделено кристаллогеометрической классификации исходных  $\beta/\beta$ -границ. Автором предложена кристаллогеометрическая классификация  $\beta/\beta$ -границ, которая включает специальные границы; границы, состоящие из участков различной разориентации и общие границы.

**В четвертой главе** проведен углубленный анализ механизмов фазовых превращений, включая экспериментальную оценку кинетики роста  $\alpha$ -фазы и сопоставление ее с различными механизмами (сдвиговым, диффузионным и механизмом «сдвиг + направленные скачки атомов»). На основе полученных данных предложен обобщенный феноменологический механизм  $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения.

**Пятая глава** посвящена решению важной прикладной задачи – объяснению причин аномального роста  $\beta$ -зерен при  $\beta$ -отжиге промышленных полуфабрикатов. Установлена связь данного явления с формированием ограниченной кристаллографической текстуры  $\alpha$ -фазы, состоящей из двух компонент  $\{11\bar{2}0\}\{10\bar{1}0\}$  и  $\{11\bar{2}0\}\{0001\}$ , обусловленной наличием специальных  $\beta/\beta$ -границ близких к  $60^\circ\langle 111 \rangle$  и  $49,5^\circ\langle 110 \rangle$ .

В заключении сформулированы основные результаты и выводы. В конце сформулированы перспективы дальнейших исследований по теме.

Таким образом, содержание диссертации Насчетниковой И.А. соответствует заявленной теме, структура диссертации соответствует общепринятой структуре кандидатских диссертаций в области



металловедения, материал изложен последовательно, а выводы соответствуют поставленным задачам и логически следуют из представленных данных.

### *Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций, сформулированных в диссертации*

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации Насчетниковой И.А., базируются на комплексном подходе, включающем сочетание экспериментальных методов исследования и численного анализа.

Автором выполнен значительный объем экспериментальных работ с использованием современных методов электронной микроскопии (РЭМ, ПЭМ), ориентационного анализа методом ДОЭ, а также микрорентгеноспектрального анализа. Применение данных методов позволило получить достоверную информацию о морфологии, фазовом составе и кристаллографических характеристиках исследуемых структур сплава ВТ6.

Особого внимания заслуживает разработка методики обработки ДОЭ-данных, направленной на устранение ошибок идентификации фаз и корректную реконструкцию  $\beta$ -фазы. Показано, что без учета данных факторов возможны существенные искажения результатов, включая появление ложных максимумов в распределениях разориентаций по углам отклонения от ОС Бюргерса.

Численные расчеты кристаллогеометрических характеристик  $\alpha/\alpha$ -,  $\beta/\beta$ - и  $\alpha/\beta$ -границ выполнены с использованием корректных, математически и кристаллографически обоснованных методов, что обеспечивает надежность полученных результатов.

Обоснованность выводов подтверждается согласованностью экспериментальных данных, полученных различными методами, а также их соответствием современным представлениям.

Таким образом, научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются обоснованными и логически вытекают из полученных результатов.

### *Достоверность положений, выводов, рекомендаций, сформулированных в диссертации*

Достоверность результатов диссертационной работы Насчетниковой И.А. обеспечивается использованием современного сертифицированного оборудования, сопоставлением экспериментальных данных с литературными данными, а также высокой воспроизводимостью полученных результатов. Дополнительным фактором, подтверждающим достоверность результатов,



является использование как экспериментальных, так и расчетных методов, что позволило провести взаимную верификацию полученных данных.

Результаты диссертации опубликованы в 9 научных работах, из них 5 статей опубликованы в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 4 статьи в изданиях, входящих в международные базы цитирования WoS и Scopus; получено одно свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ. Также полученные результаты апробированы на международных конференциях.

Таким образом, представленные в диссертации результаты являются достоверными.

### ***Научная новизна исследования***

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена кристаллогеометрическая классификация  $\beta/\beta$ -границ, включающая специальные, «составные» и общие границы. Показана их роль в формировании зернограничной  $\alpha(\alpha')$ -фазы.
2. Предложен феноменологический механизм  $\beta \rightarrow \alpha(\alpha')$  фазового превращения в сплаве ВТ6, обеспечивающий выполнение ориентационного соотношения Бюргерса при любых условиях охлаждения. Механизм предполагает универсальный сценарий зарождения  $\alpha(\alpha')$ -фазы на специальных  $\beta/\beta$ -границах и два различных сценария ее последующего роста в зависимости от скорости охлаждения: сдвиговый (образование новых пластин на межфазной  $\beta/\alpha$ -границе) и диффузионно-контролируемый (рост существующих пластин).
3. Установлено, что при горячей прокатке сплава ВТ6 формирование ограниченной двухкомпонентной кристаллографической текстуры  $\alpha$ -фазы ( $\{1120\}\langle 1010 \rangle$  и  $\{1120\}\langle 0001 \rangle$ ) в условиях многовариантного  $\beta \rightarrow \alpha(\alpha')$ -превращения обусловлено зарождением  $\alpha$ -фазы на специальных  $\beta/\beta$ -границах с разориентациями, близкими к  $60^\circ\langle 111 \rangle$  и  $49,5^\circ\langle 110 \rangle$ .

### ***Практическая значимость работы***

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

1. Выявлены причины ошибочного индирования  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз и проведения исходных  $\beta/\beta$ -границ при реконструкции высокотемпературной  $\beta$ -фазы методом ориентационной микроскопии, связанные с ошибками при преобразовании Хафа, низким качеством картин Кикучи и выполнением двойного ОС Бюргерса. Разработаны рекомендации по корректной интерпретации результатов ориентационной микроскопии.
2. Установлено, что причиной аномального роста  $\beta$ -зерен при  $\beta$ -отжиге промышленных полуфабрикатов из сплава ВТ6 является наличие в предшествующем  $\alpha$ -состоянии выраженной совершенной



кристаллографической текстуры, состоящей из двух ориентаций  $\{11\bar{2}0\}\langle 10\bar{1}0\rangle$  и  $\{11\bar{2}0\}\langle 0001\rangle$ .

3. Разработан расчетный комплекс для количественной оценки кристаллографических  $\beta/\beta$ -разориентаций в сплаве ВТ6, зарегистрированный в Федеральной службе по интеллектуальной собственности в качестве программы для ЭВМ (свидетельство № 2026618085).

### *Замечания и вопросы по диссертации*

1. В работе используются три скорости (среды) охлаждения – вода, воздух и печь. При этом, охлаждение «в печи» может фактически иметь большой интервал различных скоростей охлаждения, не только средних, но и зависящих от конкретного интервала температур. Была ли проведена фактическая оценка кинетики скорости охлаждения «в печи» относительно интересующего интервала фазового превращения?

2. Будет ли отлична картина, полученная в данной работе, в случае обработки титановых сплавов других классов? Например  $\alpha$ - и псевдо  $\alpha$  – сплавов?

3. Список литературы содержит большое количество иностранных работ, построенных на сплаве Ti-6Al-4V. Хотя и принято считать, что сплав ВТ6 является полным аналогом, но марочный состав иностранного ограничен существенно меньшим максимальным содержанием  $\beta$ -стабилизаторов (Fe 0,3% max, V 4,5% max). Может ли это внести сложности при попытке применения подобного подхода для сплава Ti-6Al-4V?

4. Для объяснения полученных характеристик фазового превращения, использован подход с составной природой кристаллогеометрии некоторых границ. При этом, не описано, каким образом такие границы могут быть получены.

5. В главе 4 при проведении оценки скорости мартенситного превращения использовано значение модуля упругости, типичное для сплава Ti-6Al-4V, при комнатной температуре. Насколько это верно, учитывая что превращение проходит в  $\beta$ -фазе и при повышенной температуре?

6. В главе 5 описывается формирование ограниченной текстуры  $\alpha$  - фазы, за счет формирования на специальных  $\beta/\beta$  -границах. При этом, вклад деформации в формирование текстуры  $\alpha$  -фазы опущен из рассуждения. Почему?

7. На рис.3.1 по морфологическим особенностям структуры, напрашивается предположение, что фотографии б и в нужно поменять местами.



Следует отметить, что указанные вопросы и замечания не снижают ценность диссертационной работы Насчетниковой И.А. и не влияют на общую положительную оценку работы.

### **Заключение**

Диссертационная работа Насчетниковой И.А. на тему «Кристаллографические особенности фазовых превращений в сплаве ВТ6» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная научно-практическая задача, имеющая существенное значение для развития металловедения титановых сплавов.

Диссертация и автореферат соответствуют Паспорту специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. Автореферат диссертации полностью соответствует тексту диссертации, отражает ее основное содержание, имеет логически грамотное построение и последовательность изложения результатов исследования.

По своему содержанию, уровню научной новизны и практической значимости диссертационная работа соответствует требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор, Насчетникова Инна Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

### **Официальный оппонент:**

Кандидат технических наук

ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», г. Верхняя Салда Свердловской области, главный специалист по металловедению Научно-Технического Центра ВСМПО

Щетников Николай Васильевич

«12» мая 2026 г.

### **Контактная информация:**

624760, Свердловская обл., г. Верхняя Салда, ул. Парковая 1

Тел.: +7(967)6382649

E-mail: [shchetnikov\\_nv@vsm-po-avisma.ru](mailto:shchetnikov_nv@vsm-po-avisma.ru)

Подпись Щетникова Н.В. удостоверяю,  
Начальник отдела кадрового администрирования ПАО «Корпорация  
ВСМПО-АВИСМА»



Гребенюк С.В.