



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
**«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ
ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский
университет)»
(МАИ)**

Волоколамское шоссе, д. 4,
Москва, А-80, ГСП-3, 125993
Факс: 8-(499)-158-29-77
Тел. 8-(499)-158-43-33
e-mail: mai@mai.ru

ОКПО 02066606 ОГРН 1037739180820
ИНН 7712038455 КПП 774301001

10.06.2016 № 114-27/16
на № _____ от _____

Утверждаю
И.о. проректора по научной работе

А.М. Раздолин

«06» июня 2016 г.

Отзыв

Ведущей организации на диссертацию Козловой И.Р. «Взаимосвязь структуры и свойств высокопрочных морских титановых сплавов при повышенных температурах применительно к изделиям энергетического машиностроения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Актуальность работы.

Исследования, направленные на повышение служебных свойств титановых сплавов на основе разработки новых составов и технологических режимов всегда представляли большой интерес, поскольку, несмотря на огромное разнообразие областей их применения, существует еще значительный резерв в этой области. Особенно это относится к разработке жаропрочных титановых сплавов, работающих в агрессивных средах. Это является межотраслевой проблемой, поскольку это направление представляет интерес не только для судостроения, но также и для авиационной отрасли. С этих позиций безусловно актуальной является рецензируемая диссертационная работа Козловой И.Р., направленная на выявление корреляций между характеристиками структурного состояния деформированных титановых полуфабрикатов и комплексом механических свойств, включающих характеристики жаропрочности и усталости применительно к изделиям энергетического машиностроения.

Научная новизна работы

Основным достоинством работы является удачное сочетание ее четкой практической направленности и убедительной научной интерпретации полученных экспериментальных результатов, что делает эту работу важной и полезной как для технологов, так и для исследователей, работающих в области титановых сплавов. Одним из главных научных достижений работы является эффективное использование метода

Вх. № <u>2031</u>	Исполнено
<u>10</u> <u>06</u> <u>2016</u> г.	В ДЕЛО
Основн. <u>5</u> л.	№ _____
Прил. _____ л.	подп. _____

дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) для интерпретации процессов формирования структурного состояния и особенностей влияния структуры на комплекс служебных свойств. Этот метод активно используется в практике металлофизических, а последнее время и металловедческих исследований и, несмотря на очевидные его преимущества по сравнению с традиционными текстурными исследованиями, вопреки ожиданиям не принес принципиально новых результатов. Тем не менее, в данной работе метод EBSD нашел исключительно эффективное применение. Автору с его помощью удалось не просто найти количественные корреляции между структурными и механическими характеристиками титановых полуфабрикатов, а внести принципиально новый контекст в показатели структурного состояния титановых сплавов. До сих пор геометрические параметры микроструктуры, оставались основными структурными характеристиками, прежде всего это относится к размеру зерна, для которого существует количественная корреляция с показателями прочности - соотношение Холла-Петча. Все остальные характеристики, такие как текстура, морфология фаз, плотность и распределение дислокаций не имеют надежных корреляций с механическими характеристиками и поэтому с позиций микромеханики не могут рассматриваться с практической точки зрения. В настоящей работе найдена еще одна важная структурная характеристика, а именно спектр разориентировок зерен, который определяет несовместность деформации соседних зерен в поликристаллическом агрегате и как показано в данной работе, определяет уровень всего комплекса механических свойств. В работе показано, каким образом можно управлять формированием спектра разориентировок при термопластической обработке, а также как это влияет на комплекс механических свойств, включающий показатели ползучести и длительной прочности, усталостные свойства.

Следует подчеркнуть, что эта характеристика имеет особый смысл именно для титановых сплавов, а среди титановых сплавов именно для сплавов с преобладанием альфа-фазы. Для титана, как для всех ГПУ металлов характерно наличие дефицита легких систем сдвига для совпадающих с осью «с» ориентаций зерен, что осложняет его объемную деформацию. Кроме того, наличие полиморфного превращения не дает заметного эффекта измельчения зерна, как это происходит в сталях, поскольку в соответствии с ориентационными соотношениями (ОС) Бюргерса превращение ОЦК-ГПУ дает в четыре раза меньше вариантов по сравнению с ГЦК-ОЦК превращением в сталях. К этому следует добавить дополнительный эффект от разницы ориентировок соседних зерен, обусловленный анизотропией ТКЛР, свойственный только ГПУ металлам. Важно также, что спектр разориентировок исключительно чувствителен к технологии пластической деформации. Так для пластинчатых структур спектр разориентировок сводится к двум дискретным максимумам под углами 60° и 90° , которые свидетельствуют о том, что альфа фаза целиком образована в результате бета-альфа превращения и не участвовала в деформации сама по себе, поскольку в соответствии с ОС в титане

плоскость базиса альфа-фазы должна быть параллельна плоскостям $\{110\}$ бета-фазы, углы между которыми 60 и 90°. Для бимодальной структуры характерно присутствие наряду с этими дискретными максимумами непрерывного спектра разориентировок. Последний формируется в результате деформации в верхней части двухфазной области за счет деформации самой альфа-фазы.

Следует также отметить удачную попытку конечно-элементного моделирования процесса деформирования с учетом реальной структуры, спектра разориентировок и механизма деформации сплавов. Это позволило рассчитать коэффициенты неоднородности деформации и на этой основе показать, что при пластическом формоизменении наиболее однородно деформируется глобулярная составляющая в моделируемых глобулярной и бимодальной структурах. Более неоднородно деформируется пластинчатая структура, а также пластинчатая составляющая в глобулярной и бимодальной структурах. Особенности влияния структуры на сопротивление деформированию оценивали также по энергетическому параметру. Показано, что титановые сплавы с глобулярной и бимодальной структурой обеспечивают более высокие характеристики прочности и пластичности по сравнению с пластинчатыми и переходными структурами.

Практическая значимость работы

Практическая значимость диссертационной работы сводится к трем взаимосвязанным задачам, успешное решение которых позволило обосновать возможность использования корпусных морских титановых сплавов на основе Ti-Al-Mo-V-C и Ti-Al-Mo-Zr-C в высоконагруженных деталях и сварных узлах паротурбинных установок, работающих при повышенных температурах и внедрить эти технологические решения в промышленность. Во-первых, на основании анализа условий эксплуатации паротурбинных установок совместно с ОАО «КТЗ» сформулированы требования к материалам для их изготовления. Во-вторых, на основе исследования влияния структурного состояния на комплекс механических свойств выявлено оптимальные параметры бимодальной микроструктуры, обеспечивающие необходимый уровень служебных свойств и наконец, разработаны технологические схемы получения полуфабрикатов, приводящих к формированию оптимальной микроструктуры, обеспечивающей промышленное производство титановых полуфабрикатов с регламентированной структурой и повышенным уровнем служебных свойств. Результаты работы внедрены при производстве деформированных полуфабрикатов на ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» и изготовлении паротурбинных установок на ОАО «Калужский турбинный завод», получен патент на изобретение.

Достоверность результатов работы подтверждается тем, что все основные научные выводы и рекомендации получены с помощью комплексного исследования структуры, фазового состава и механических свойств титановых сплавов использованием современных высокоэффективных приборов и установок. Обработка давлением и термическая обработка осуществлялись в основном в промышленных условиях на современном оборудовании, обеспечивающим возможность контроля технологических параметров.

В качестве замечаний отметим:

1. В работе приведены интересные результаты исследования спектра разориентировок зерен в полуфабрикатах с разным типом микроструктуры, при этом не приведено данных о самих преимущественных ориентировках этих зерен, что ограничивает информативность полученных результатов, так, например, наличие максимумов распределения разориентировок при 60° и 90° свидетельствует только о том, что для $\beta \rightarrow \alpha$ превращения выполняются ориентационные соотношения Бюргерса, информация о текстуре позволила бы оценить, например, какие варианты $\beta \rightarrow \alpha$ превращения доминируют при конкретном виде обработки полуфабриката.

2. Расчеты неоднородности деформаций более корректно проводить на основании вычисления разницы направлений для реальных сдвигов в кристаллитах, определяемых действующими системами первичного призматического скольжения, поскольку сама по себе разница в ориентировках, отнесенная к направлению нагружения, не полностью отражает неоднородность деформации поликристалла.

3. В работе уделено мало внимания влиянию химического состава сплавов на их структурно-фазовое состояние и свойства, возможно, что корректировка составов сплавов, первоначально разработанных для других целей, вне марочного состава и не только по альфа-стабилизаторам позволила бы получить еще более высокие результаты.

4. Неудачно сформулированы отдельные положения научной новизны работы, возникает впечатление, что главное ее достижение сводится к получению бимодальной структуры, хотя, по нашему мнению, основным достоинством диссертации является выявление четких корреляций между технологией, структурой и комплексом механических свойств исследованных титановых сплавов.

Сделанные замечания в основном имеют характер рекомендаций по частным вопросам интерпретации результатов исследований и несколько не снижают научной и практической ценности диссертации, которая является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных на высоком методическом и экспериментальном уровне исследований особенностей поведения при пластической деформации и термической обработке титановых сплавов установлены важные в научном и прикладном плане корреляции между их структурными характеристиками и служебными свойствами, на основании которых сформулированы

технологические решения, внедрение которых вносит заметный вклад в развитие экономики страны.

Рецензируемая работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают ее содержание, поэтому автор диссертации Козлова И.Р. безусловно заслуживает присуждения искомой степени. Диссертационная работа была заслушана и получила положительную оценку на заседании кафедры Материаловедение и технология обработки материалов МАИ 26.05.2014 г., Протокол №11(16).

Заведующий кафедрой МиТОМ,
Академик РАН, профессор, д.т.н.,
Заслуженный деятель науки РФ

Проф., каф. МиТОМ, д.т.н.

А.А. Ильин

С.Я. Бецофен

Ознакомлена
10.06.16.
Ильин -