



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, С.-Петербург, 195251
Телефон (812) 297-20-95, факс 552-60-80
E-mail: office@spbstu.ru

№ _____

ОТЗЫВ

официального оппонента
Скотниковой Маргариты Александровны
на диссертационную работу

Козловой Ирины Рудольфовны

на тему «*Взаимосвязь структуры и свойств
морских титановых сплавов при
повышенных температурах применительно
к изделиям энергетического оборудования*»
представленную на соискание ученой
степени кандидата технических наук по
специальности 05.16.01 – Металловедение и
термическая обработка металлов и сплавов
г. Санкт-Петербург 2016 г

Диссертационная работа **Козловой Ирины Рудольфовны** посвящена установлению взаимосвязи структурного состояния деформированных полуфабрикатов из титановых сплавов систем легирования Ti-Al-Mo-V-C и Ti-Al-Mo-Zr-C с характеристиками жаропрочности, усталости и выбор оптимального типа структуры, обеспечивающего комплекс характеристик работоспособности изготавливаемых из них высоконагруженных элементов паротурбинных установок при температурах эксплуатации до 500 С.

Титан и его сплавы занимают одно из ведущих мест среди конструкционных материалов. Уникальное сочетание высокой удельной прочности, вязкости разрушения, коррозионной стойкости, немагнитности, высокой температуры плавления – определили их широкое применение в изделиях энергетического оборудования, работающих при повышенных температурах.

Создание нового поколения транспортных паротурбинных установок повышенной удельной мощности потребовало разработки новых конструкционных материалов на основе титана с определенным комплексом свойств, удовлетворяющих повышенным параметрам их длительной эксплуатации при повышенных температурах до 500°C.

Большинство разработанных авиационных жаропрочных высоколегированных двухфазных титановых сплавов (BT8, BT9, BT25Y) и высокопрочных сплавов на основе альфа- фазы (BT18Y, BT20) имеют ограниченную свариваемость, характеризуются невысоким уровнем ударной вязкости и пластичности, особенно при наличии концентрации напряжений.

Поэтому, возникла потребность использовать, дополнительно изучив, разработанные в ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» комплексно-легированные специальные морские титановые сплавы систем Ti-Al-Mo-V-C и Ti-Al-Mo-Zr-C различной категории прочности, обладающие высоким уровнем пластичности и ударной вязкости, при температурах эксплуатации до 500°C. Оптимальную технологию изготовления титановых полуфабрикатов необходимо выбирать в первую очередь на основе взаимной связи структуры с изменением свойств

Вх. № <u>2046</u>	Исполнено
<u>14 06</u> 20 <u>16</u> г.	В ДЕЛО
Основн. <u>9</u> л.	№ _____
Прил. _____ л.	подп. _____

полуфабрикатов при металлургическом переделе.

В связи с перечисленными проблемами, диссертационная работа, посвященная обеспечению надежных эксплуатационных свойств (характеристик жаропрочности и усталости) титановых изделий энергетического оборудования, работающего при повышенных температурах, безусловно, является **актуальной**.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Для достижения поставленной цели автором решены следующие научно-технические **задачи**:

1. Определен тип структуры, обеспечивающий в исследуемых титановых сплавах комплекс характеристик работоспособности при температурах до 500°C - структура бимодального типа.
2. Обоснован выбор бимодального типа структуры экспериментальными исследованиями характеристик работоспособности полуфабрикатов с разными типами структуры.
3. Разработаны технологические схемы изготовления деформируемых полуфабрикатов из исследуемых титановых сплавов для получения требуемого бимодального типа структуры.

Научная новизна. Диссертация имеет научную новизну, основные положения диссертации, выносимые на защиту, достаточно обоснованы.

1. Экспериментальным путем установлен уровень характеристик жаропрочности и усталостной прочности морских титановых сплавов композиций Ti-Al-Mo-V-C и Ti-Al-Mo-Zr-C откорректированного состава применительно к условиям эксплуатации паротурбинных установок и, таким образом, обоснована возможность использования указанных корпусных сплавов как жаропрочных материалов.
2. Установлена взаимосвязь структуры с характеристиками работоспособности исследуемых титановых сплавов, определен тип структуры, обеспечивающий конструктивную прочность элементов транспортных паротурбинных установок. Показано, что оптимальной структурой является структура бимодального типа.
3. Установлена природа повышенной микронеоднородности деформирования исследуемых титановых сплавов с пластинчатой морфологией альфа-фазы, обусловленная ее кристаллогеометрическими характеристиками. Это позволяет более объективно производить выбор предпочтительной структуры в конкретных условиях эксплуатации.
4. Формирование заданного типа структуры достигнуто за счет многостадийного деформирования в бета- области с формированием мелкозернистой структуры, а также повышения степени укова при финишных операциях в двухфазной области до уровня 3-8 с обеспечением требуемой проработки внутризеренной структуры, т.е. определены условия получения необходимого типа структуры.

5. Разработаны технологические схемы термопластической и термической обработок, приводящих к формированию бимодального типа структуры и, таким образом, обеспечено промышленное производство титановых материалов со строго регламентированной структурой и повышенным уровнем комплекса свойств.

6. Обоснована возможность использования корпусных морских титановых сплавов систем легирования Ti-Al-Mo-V-C и Ti-Al-Mo-Zr-C в высоконагруженных деталях и сварных узлах паротурбинных установок, эксплуатируемых при повышенных температурах, за счет создания в них регламентированного структурного состояния - структуры бимодального типа.

Достоверность результатов обеспечивается большим объемом экспериментов, выполненных с привлечением современных методов исследования (стандартных и специально разработанных), причем традиционные методики дополнялись такими редко применяемыми в металловедении испытаниями, как кристаллографические исследования субструктуры с помощью метода дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD), электронной микроскопии и других. Подтверждением достоверности служит наличие значительного массива данных для статистической обработки, а также совпадение экспериментальных результатов с расчётными.

Ценность для науки и практики. Диссертация имеет научную и практическую ценность содержит решение задачи, имеющей существенное значение для развития одного из научных направлений материаловедения.

Решаемую автором важную народнохозяйственную проблему можно сформулировать, как разработка путей создания изделий энергетического оборудования из морских титановых сплавов, работающего при повышенных температурах и обеспечение его надежной эксплуатации.

1. Автором разработаны технологические схемы изготовления деформируемых полуфабрикатов из исследуемых титановых сплавов для получения требуемого бимодального типа структуры.

2. Определено оптимальное структурное состояние металла деформированных полуфабрикатов из исследуемых титановых сплавов в условиях эксплуатации паротурбинных установок - структура бимодального типа, представляющая собой разновидность структуры глобулярного типа со значительной объемной долей (не менее 65-70%) пластинчатой составляющей.

3. Разработаны технологические схемы изготовления деформированных полуфабрикатов, состоящие в более многостадийном деформировании при температурах бета- области и более высокой степени укова при температурах двухфазной области, обеспечивающие получение заданного типа структуры и требуемого комплекса характеристик работоспособности.

4. Разработана и внедрена совместно с ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» технологическая документация на изготовление деформированных полуфабрикатов из титановых сплавов систем легирования Ti-Al-Mo-V-C и Ti-

Al-Mo-Zr-C (МП 39.035.П-2010; МП 39.042.П-2011; МП 39.041.П- 2011; МП 39.045.П-2012).

5. Обоснована возможность применения морских высокотехнологичных сплавов титана откорректированного состава на ОАО «Калужский турбинный завод» для высоконагруженных элементов транспортного паротурбинного оборудования, эксплуатируемого при повышенных вплоть до 500°C температурах за счет создания в них регламентированной структуры.
6. Результаты работы внедрены при производстве деформированных полуфабрикатов на ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» и изготовлении паротурбинных установок на ОАО «Калужский турбинный завод».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Диссертационная работа изложена на 174 страницах, содержит 14 таблиц, 76 рисунков и состоит из введения, 4 глав, заключения, выводов, списка условных обозначений, списка литературы, включающего 71 источник, из них 20 на иностранных языках и приложений на 2 листах. Все главы логически взаимосвязаны и последовательно раскрывают содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, задано направление исследований, определено научное и практическое значение решаемой проблемы.

Глава 1 посвящена анализу литературы по исследуемой проблеме. Проанализированы требования к жаропрочным материалам, принципам их легирования, влияние структурного состояния титановых сплавов на физико-механические свойства и характеристики работоспособности, принципы формирования различных типов структуры, показана актуальность выполнения настоящих исследований. Обоснована целесообразность применения хорошо свариваемых морских титановых сплавов для изготовления элементов высоконагруженных транспортных паротурбинных установок. Сформулированы в соответствии с существующим состоянием вопроса задачи исследования.

В главе 2 приведены материалы и методики исследования, использованные в данной работе. Работа проведена на металле опытных партий поковок, катаных прутков и цельнокатаных колец из титановых сплавов систем легирования Ti-Al-Mo-V-C и Ti-Al-Mo-Zr-C. Для обеспечения высокого уровня прочностных характеристик исследуемых полуфабрикатов использовали сплавы откорректированного состава (в пределах марочного состава повышено содержание основных легирующих элементов - алюминия, кислорода и углерода). Структуру исследовали методами оптической микроскопии методом секущих, а также с помощью растрового двулучевого электронно- ионного микроскопа Quanta 200 3DFEG, укомплектованным высокоразрешающей камерой Hikary, методом дифракции обратно-отраженных электронов. Металлографические исследования проводили на инвертированном микроскопе Axiovert 25CA с цифровым анализатором изображения. Стандартные механические характеристики определяли при испытании на растяжение при

комнатной температуре по ГОСТ 1497-84 на напольных разрывных машинах фирмы «Instron». Ударную вязкость определяли на образцах с круглым надрезом по ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре «Trebel», 2123 КМК.

В главе 3 представлены результаты исследования влияния различных типов структур исследуемых титановых сплавов откорректированного состава на физико-механические свойства и характеристики работоспособности элементов паротурбинных установок. Выбранный ряд структур охватывает весь спектр возможных структур двухфазных титановых сплавов. Для этого полученные опытные слитки термопластически обрабатывали по различным технологическим схемам с получением требуемого типа структуры в составе различных полуфабрикатов. Выполнены комплексные металлографические, микроструктурные и имитационные исследования полученных типов структур, а также испытания по определению характеристик конструктивной прочности.

В главе 4 приведен анализ формирования структуры в процессе горячей пластической деформации. Для достижения бимодального типа структуры проведена корректировка существующих технологических схем для каждого типа деформированных полуфабрикатов, включающая в себя следующие обязательные элементы технологии:

- повышение степени деформации при предварительной проработке зеренной структуры в процессе изготовления промежуточной заготовки за счет введения операций всестороннейковки для кованых полуфабрикатов или увеличения операций протяжки для катаных прутков;
- повышение степени деформации на заключительных этапах для обеспечения требуемой проработки внутризеренной структуры: проведение финишных операций строго при температурах верхней части двухфазной области в достаточно узком температурном интервале: $(T_{пп-20}) - (T_{пп-40})$ °С. При этом суммарный объем деформации в этой области составляет не менее 60-70%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе сформулированы 11 основных выводов, достоверность и новизна которых не вызывают сомнения.

1 Необходимость создания конструкционного материала для паротурбинных установок нового поколения обусловлена повышенными параметрами работы паровых турбин, условиями их эксплуатации, а также большим объемом использования сварки. В этом отношении наиболее перспективным материалом являются разработанные ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» для морских условий хорошо свариваемые сплавы титана.

2 Выбор деформированных полуфабрикатов из морских титановых сплавов композиций Ti-Al-Mo-V-C и Ti-Al-Mo-Zr-C откорректированного состава обеспечивает повышенный уровень прочности высоконагруженных элементов паротурбинных установок при температурах эксплуатации.

3. Впервые получены характеристики жаропрочности и усталостной прочности морских титановых сплавов применительно к условиям эксплуатации паротурбинных установок.

4. Определяющее влияние на комплекс физико-механических и эксплуатационных характеристик оказывает соотношение объемных долей альфа фазы различной морфологии. Выбор оптимального структурного состояния основан на вариации соотношения объемных долей альфа- фазы глобулярной и пластинчатой формы, имеющих различное происхождение.
5. Принципиальное различие в кристаллогеометрических параметрах пластинчатой и глобулярных структур обуславливает различную степень неоднородности их пластического деформирования и особенности механизма их деформации, что предопределяет различные свойства титановых сплавов с глобулярным и пластинчатым типами структурам.
6. Конечно-элементный анализ процесса деформирования с учетом реальной структуры и кристаллографических характеристик подтверждает специфические особенности деформирования пластинчатой и глобулярной структур.
7. Исследуемые титановые сплавы с бимодальной структурой по уровню характеристик жаропрочности близки к сплавам с пластинчатой структурой, по уровню характеристик многоциклового усталостной прочности превосходят уровень сплавов с глобулярной структурой, и, таким образом, обеспечивают требуемый комплекс характеристик работоспособности элементов паротурбинных установок в конкретных условиях эксплуатации.
8. Бимодальная структура исследуемых титановых сплавов наиболее эффективно использует возможности «структурного» упрочнения применительно к условиям эксплуатации паротурбинных установок за счет оптимального сочетания в своей морфологии объемных долей глобулярной и пластинчатой составляющих, оказывающих разнонаправленное влияние на характер изменения физико-механических и эксплуатационных свойств.
9. Определены возможности достижения регламентированного структурного состояния в исследуемых сплавах за счет специально разработанных режимов их обработки. Для достижения бимодального типа структуры разработаны технологические схемы, направленные на более полную проработку как зеренной, так и внутризеренной структуры:
 - 9.1. Введение на начальных стадиях деформации всесторонней ковки для малогабаритных поковок и увеличение количества операций ВСК для крупногабаритных поковок, а также проведение операций фазовой перекристаллизации для цельнокатаных колец на начальных стадиях деформации приводит к необходимому измельчению зеренной структуры.
 - 9.2. Выполнение основного объема деформации на заключительных стадиях обработки при температурах верхней части двухфазной области в достаточно узком интервале ($T_{пп} - 20 - T_{пп} - 40$)°C, что обеспечивает полную проработку внутризеренной структуры при регламентированных размерах и соотношении объемных долей пластинчатой и глобулярной составляющих альфа-фазы.
 - 9.3. Введение второй стадии прокатки при температурах двухфазной области ($T_{пп} - 20 - T_{пп} - 40$)°C при изготовлении прутков «лопаточного качества» обеспечивает формирование бимодального типа структуры в готовом полуфабрикате.

10. Разработана и внедрена совместно с ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» технологическая документация на производство деформированных полуфабрикатов из исследуемых титановых сплавов (МП 39.035.П-2010; МП 39.042.П-2011; МП 39.041.П-2011; МП 39.045.П-2012).

11. Проведенный комплекс испытаний на соответствие техническим требованиям, предъявляемым к высоконагруженным деталям и сварным узлам паротурбинных установок, показал, что деформированные полуфабрикаты из исследуемых титановых сплавов откорректированного состава, изготовленные на ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» по разработанным технологиям, полностью соответствуют техническим требованиям ОАО «КТЗ».

В результате проведенных исследований получены новые технические решения, подтвержденные патентом РФ и характеризующиеся мировым уровнем новизны. Работа апробирована на 7 конференциях а также на заседаниях НТС ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». Результаты диссертационной работы нашли отражение в 7 научных статьях в журналах, входящих в перечень ВАК, 1 патенте и имеют существенное значение и широкое внедрение в промышленности.

Личный вклад автора. Из текста диссертации и из большого списка научных трудов, следует отметить большой личный вклад автора в науку. Предложенные автором новые решения строго аргументированы и критически оценены по сравнению с другими известными решениями.

Личный вклад автора в представленной работе заключается в:

- изучении методами оптической и электронной микроскопии, а также методом дифракции обратно-отраженных электронов особенностей структуры, формирующейся в двухфазных титановых сплавах в зависимости от режимов термопластической и термической обработок;
- теоретической и экспериментальной оценке взаимосвязи структуры и характеристик работоспособности титановых сплавов применительно к изделиям энергетического машиностроения;
- установлении природы повышенной микронеоднородности деформирования исследуемых титановых сплавов с пластинчатой морфологией альфа- фазы;
- участии совместно с ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» в разработке технологических схем получения деформированных полуфабрикатов из исследуемых титановых сплавов с заданной регламентированной структурой, обеспечивающей конструктивную прочность изготавливаемых из них элементов паротурбинных установок.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИИ.

1. Во введении диссертационной работы, в качестве альтернативных, автор упоминает авиационные жаропрочные высоколегированные двухфазные титановые сплавы (BT8, BT9, BT25У) и высокопрочные сплавы на основе альфа- фазы (BT18У, BT20).

К сожалению, в работе соискателя не рассматривается двухфазный титановый сплав ВТ6 и не представлены сравнительные результаты «авиационных» и «морских» сплавов систем легирования Ti-Al-Mo-V-C и Ti-Al-Mo-Zr-C при температурах испытания 450, 500 °С.

2. В диссертационной работе автор справедливо отмечает, что применение «морских» менее легированных титановых сплавов способствует повышению коррозионной стойкости, снижению чувствительности к концентрации напряжений, улучшению свариваемости, увеличению технологичности, но требует дополнительной механической проработки в верхней части двухфазной области для обеспечения их жаропрочных свойств при температурах до 500 °С.

Однако, не вполне понятен физический механизм поддержания жаропрочных свойств малолегированных сплавов при нагреве в интервале температур 350...500 °С.

3. В диссертационной работе (в главе 3) приведены интересные экспериментальные данные комплексного исследования морфологии структур 4х типов (полученные при комнатной температуре), их количественных параметров и кристаллографических разориентировок зёрен, субзёрен, а так же их влияние на результаты механических высокотемпературных испытаний в интервале до 500 °С.

К сожалению, не хватает результатов анализа морфологии структур, полученных с помощью высокотемпературной металлографии или их моделей.

4. Как показали результаты, полученные методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD), во всех четырёх типах структур, автором обнаружено наличие больше угловых разориентировок (свыше 15 град.) между частицами альфа-альфа и альфа-бета фазами (стр. 86-87, рис. 3.2 диссертации).

Хотелось бы уточнить, где располагаются при комнатной температуре зёрна бета- фазы в структурах (например, в пластинчатой структуре) малолегированных титановых сплавов. Чтобы правильно интерпретировать результаты новой интересной методики, можно оценить количественный фазовый состав исследованных образцов классическим методом рентгеноструктурного анализа.

5. Информация, представленная автором в диссертации, полностью отражена в автореферате. Однако, отсутствие там сведений о температурах плавления и полиморфного превращения предлагаемых «морских» титановых сплавов, создаёт трудности для восприятия большого объема экспериментов и оценки выбора технологических схем изготовления полуфабрикатов, обеспечивающих формирование в них заданного типа структуры (стр. 61 диссертации) и рекомендации выбора отжига для снятия остаточных напряжений в интервале 870...890 (см. стр. 135 диссертации).

6. Из текста диссертации и автореферата не ясно, какие были размеры опытных слитков и габариты титановых полуфабрикатов, из которых вырезали образцы для механических испытаний и проводили исследования микроструктуры.

7. В тексте диссертации и автореферата имеются опечатки. Так на

стр.141, рис. 4.12 диссертации в подрисуночном тексте приводится неправильное обозначение степени деформации, вместо, скорости деформации.

На стр. 86 (б/н, нижний график, справа), и стр. 87 (рис.3.2,б) диссертации присутствуют опечатки в масштабной сетке вдоль вертикальной оси.

Из рис. 3.3 на стр. 88 диссертации неясно, какие из 5 гистограмм СРГЗ альфа- фазы относятся к 3-м титановым сплавам ВТ1-0, ПТ-7М и ПТ-3В.

На стр. 108, рис. 3.13 нет информации о титановом сплаве, результаты механических испытаний которого приведены.

На стр. 159, табл.4.1 в результатах оценки структуры прутков присутствует некий параметр «С», изменяющийся от 15 до 100 % , но условное обозначение, которого отсутствует.

Заключение по диссертационной работе:

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не подвергают сомнению ее основные выводы.

Результаты диссертации достаточно полно были апробированы на Российских и Международных научно-технических конференциях и внедрены на предприятиях отрасли. Содержание автореферата соответствует материалу диссертации. По актуальности, содержанию, значимости в научном и теоретическом плане рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», а ее автор **Козлова Ирина Рудольфовна**, безусловно, заслуживает присуждения ему этой степени.

Официальный оппонент,
Заведующая кафедрой "Машиноведение и
основы конструирования" института
«Металлургии, машиностроения и
транспорта» СПбПУ, доктор технических
наук, профессор

М.А. Скотникова

Адрес: 195197, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29
Телефон: +7 (921) 987-87-52
e-mail: Skotnikova@mail.ru

Подпись Скотниковой М.А. заверяю



Подпись Скотниковой М.А.
УДОСТОВЕРЯЮ
Ведущий специалист
по кадрам В.В.Ветенин
«10» 06 2016 г.

Ознакомена
игол -
14.06.16.