

УДК 669.295:669.017
ГРНТИ 53.49.15

На правах рукописи

И.Кол -

КОЗЛОВА Ирина Рудольфовна

**«ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МОРСКИХ
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ИЗДЕЛИЯМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ»**

Специальность: 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2016

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей»

Научный руководитель, Леонов Валерий Петрович	Доктор технических наук, старший научный сотрудник
Официальные оппоненты Полькин Игорь Степанович	Доктор технических наук, профессор; ОАО «Всероссийский институт легких сплавов»; главный научный сотрудник.
Скотникова Маргарита Александровна	Доктор технических наук, профессор; «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» ФГАОУ ВО «СПбГПУ»; Институт «Металлургии, машиностроения и транспорта»; зав.кафедрой «Машиноведение и вопросы конструирования» .
Ведущая организация	Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Защита диссертации состоится 28 июня 2016 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета Д411.006.01 при ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» по адресу 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., д.49.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», а также на сайте: <http://dissovet.crism-prometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=9>.

Автореферат разослан _____ 2016 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д411.006.01
Заслуженный деятель науки РФ
д.т.н., профессор



В.А.Мальшевский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Известно, что титановые сплавы благодаря высокому уровню удельных эксплуатационных характеристик, коррозионной стойкости во многих средах, а также удовлетворительной технологичности, нашли широкое применение в паротурбиностроении. 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 работы. Условия эксплуатации транспортных паротурбинных установок обусловлены длительным воздействием высоких температур при заданном ресурсе, ограниченном количеством циклов возникновения экстремальных нагрузок. Необходимость применения сварки в узлах сопловой коробки, в местах соединения лопаток с дисками, соединения элементов корпуса и др. требует использования хорошо свариваемых сплавов. Большинство разработанных авиационных жаропрочных высоколегированных двухфазных титановых сплавов (BT8, BT9, BT25Y) и высокопрочных сплавов на основе альфа-фазы (BT18Y, BT20) либо несвариваемые или имеют ограниченную свариваемость, либо характеризуются невысоким уровнем ударной вязкости и пластичности, особенно при наличии концентрации напряжений. Разработанные во ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» комплексно-легированные специальные морские титановые сплавы различной категории прочности обладают высоким уровнем пластичности и ударной вязкости, однако их используют для энергетического оборудования судов и кораблей, эксплуатируемых при температурах не выше 350°C, при более высоких температурах эти сплавы не изучены для условий работы деталей современного энергооборудования. Для рассматриваемых транспортных паротурбинных установок с ограниченным ресурсом эксплуатации целесообразно использовать разработанные во ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» для морских конструкций высокопрочные корпусные сплавы титана систем легирования Ti-Al-Mo-V-C и Ti-Al-Mo-Zr-C, не склонные к снижению пластичности в зоне термического влияния сварного соединения. Высокий эквивалент альфа-стабилизаторов и нейтральных упрочнителей обеспечивает этим сплавам достаточно высокие жаропрочные свойства. Предел текучести указанных сплавов более 700 МПа при ударной вязкости более 45 Дж/см². Благодаря наличию в структуре небольшого количества бета-фазы они обладают хорошей свариваемостью и удовлетворительной технологической пластичностью в металлургическом производстве. Однако опыт использования корпусных сплавов как жаропрочных материалов практически отсутствует. Для использования их в изделиях энергетического оборудования, эксплуатируемого при повышенных (вплоть до 500°C) температурах, необходимо исследовать характеристики жаропрочности, а также усталостные характеристики при повышенных температурах. Известно, что практически все физико-механические свойства титановых сплавов являются структурно-чувствительными, при этом

структура двухфазных сплавов титана отличается исключительным разнообразием. Установление связей конкретных механических свойств с типом и параметрами структуры для промышленного производства титановых материалов со строго регламентированной структурой, обеспечивающей повышенный уровень комплекса свойств является актуальным и практически важным. Формирование структуры титановых сплавов определяется температурным режимом и схемой деформации при изготовлении полуфабрикатов. В связи с этим диссертационная работа посвящена решению проблемы обеспечения комплекса характеристик работоспособности деформированных полуфабрикатов из морских титановых сплавов, предназначенных для изготовления высоконагруженных деталей и сварных узлов судовых паротурбинных установок на основании научно обоснованного выбора и экспериментального подтверждения возможности создания регламентированной структуры за счет корректировки технологических схем их изготовления.

Степень разработанности. Общие аспекты взаимосвязи структуры и свойств титановых сплавов рассмотрены в многочисленных отечественных и зарубежных работах. Первые систематические исследования начаты еще в 70-годах в ВИЛСе М.Я.Бруном с сотрудниками. Позднее А.А.Ильин и И.С.Полькин исследовали возможности управления структурой титановых сплавов. В данной работе изучены вопросы влияния структуры на характеристики работоспособности морских титановых сплавов для условий эксплуатации транспортных ПТУ.

Цель работы. Установление взаимосвязи структурного состояния деформированных полуфабрикатов из титановых сплавов систем легирования Ti-Al-Mo-V-C и Ti-Al-Mo-Zr-C с характеристиками жаропрочности и усталости и выбор оптимального типа структуры, обеспечивающего комплекс характеристик работоспособности изготавливаемых из них высоконагруженных элементов паротурбинных установок при температурах эксплуатации.

Для достижения поставленной цели решены следующие **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.

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.

Методы исследования.

В работе использованы современные методы исследования структуры – оптическая и электронная микроскопия, а также метод дифракции обратно-отраженных электронов. Для определения параметров конструктивной прочности проведены экспериментальные исследования. Применено компьютерное моделирование для исследования процесса пластического деформирования.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. 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.

2. Разработаны технологические схемы изготовления деформированных полуфабрикатов, состоящие в более многостадийном деформировании при температурах бета-области и более высокой степени уюва при температурах двухфазной области, обеспечивающие получение заданного типа структуры и требуемого комплекса характеристик работоспособности.
3. 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).
4. 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.
5. Результаты работы внедрены при производстве деформированных полуфабрикатов на ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» и изготовлении паротурбинных установок на ОАО «Калужский турбинный завод».

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты комплекса испытаний по определению характеристик жаропрочности и усталостной прочности деформированных полуфабрикатов из сплавов Ti-Al-Mo-V-C и Ti-Al-Mo-Zr-C.
2. Результаты оценки взаимосвязи структуры, включая ориентационные и геометрические факторы, и комплекс механических и служебных свойств деформированных полуфабрикатов из титановых сплавов систем легирования Ti-Al-Mo-V-C и Ti-Al-Mo-Zr-C.
3. Технологические решения получения оптимальной структуры за счет регламентации режимов многостадийной горячей пластической деформации различных полуфабрикатов.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждается совпадением результатов эксперимента с имеющимися литературными данными; положительным опытом внедрения результатов работы при производстве деформированных полуфабрикатов на ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» и при изготовлении элементов паротурбинных установок на ОАО «Калужский турбинный завод». Основные научные положения, содержащиеся в диссертационной работе, доложены и обсуждены на Международных конференциях «Ti-2010 в СНГ», Екатеринбург, 2010; «Ti-2011 в СНГ», Львов, 2011; «Ti-2012 в СНГ», Казань, 2012, «Ti-2013 в СНГ», Донецк, 2013; Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат-2013», Москва, ФГУП «ВИАМ», 2013; II Всероссийской научно-технической конференции «Роль фундаментальных исследований при реализации стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», Москва, ВИАМ, 2015.

Личный вклад автора 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.

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в 7 научных трудах, опубликованных в изданиях, входящих в перечень ВАК, 1 патенте и сборниках трудов материалов конференций.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 174 страницах, содержит 14 таблиц, 76 рисунков и состоит из введения, 4 глав, заключения, выводов, списка условных обозначений, списка литературы, содержащего 71 источник, и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обоснована актуальность и общая характеристика работы, сформулирована цель и задачи исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе дан аналитический обзор литературы по исследуемому вопросу. 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 элементов высоконагруженных транспортных паротурбинных установок. Сформулированы в соответствии с существующим состоянием вопроса задачи исследования.

Во второй главе представлена характеристика материалов, исследованных в работе, а также методики комплексных исследований и испытаний металла деформированных полуфабрикатов, позволяющих выполнить оценку качества и характеристик работоспособности. 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, а также методом дифракции обратно-отраженных электронов. Металлографические исследования проводили на инвертированном металломикроскопе Axiovert 25CA с цифровым анализатором изображения. Количественную оценку структурных составляющих проводили методом секущих. Ориентационные исследования методом автоматизированного анализа картин дифракции обратно отраженных электронов проведены совместно с к.х.н. С.Н.Петровым и А.В.Пташник с помощью растрового двулучевого электронно-ионного микроскопа Quanta 200 3DFEG, укомплектованным высокоразрешающей камерой Hikary. 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.

Разработанные на основании анализа условий эксплуатации морских паротурбинных установок критерии оценки их работоспособности содержат:

1. Контроль кратковременной прочности при повышенных температурах. Испытание на статическое растяжение проводили на цилиндрических образцах с резьбовой головкой при рабочих температурах по ГОСТ 9651 на напольных разрывных машинах фирмы «Instron» с определением стандартных механических характеристик.
2. Контроль характеристик жаропрочности – длительной прочности, длительной пластичности и сопротивления ползучести при рабочих температурах с определением пределов длительной прочности и ползучести при заданном допуске на остаточную деформацию ползучести и заданной базе испытаний. Испытания при рабочих температурах проводили по схеме одноосного растяжения на машине длительного нагружения АИМА-2. Испытание на сопротивление ползучести проводили в соответствии с ГОСТ 3248, на длительную прочность - по ГОСТ 10145.
3. Контроль характеристик усталостной прочности при рабочих температурах с определением предела выносливости. Испытание на многоцикловую усталость выполняли на цилиндрических гладких образцах корсетного типа с диаметром рабочей части 8 мм и образцах с надрезом при рабочих температурах на установке МУНТ-6000 в соответствии с ГОСТ 25.502-79. Схема нагружения – чистый изгиб при вращении с частотой 50 Гц.

На основании анализа условий эксплуатации морских паротурбинных установок совместно с ОАО «КТЗ» сформулированы требования к материалам для их изготовления (таблица 1), где:

σ_b^t – временное сопротивление разрыву при рабочих температурах;

$\sigma_{0,2}^{20}$ – предел текучести при комнатной температуре;

σ_{100}^t – предел длительной прочности на базе 100 часов при рабочих температурах;

$\sigma_{0,2/100}^t$ – предел ползучести на базе 100 часов при допуске на остаточную деформацию 0,2% при рабочих температурах;

$\sigma_{-1Н/200}^t$ – предел малоциклового усталостной прочности на базе 200 циклов (вид нагружения – отнулевое циклическое растяжение с постоянной амплитудой нагрузки), определенный на образцах с надрезом при рабочих температурах;

$\sigma_{-1/10}^t$ – предел многоциклового усталостной прочности на базе 10^7 циклов при рабочих температурах;

$\sigma_{-1Н/10}^t$ – предел многоциклового усталостной прочности на базе 10^7 циклов при рабочих температурах, определенный на образцах с надрезом.

Таблица 1 – Технические требования к деформируемым полуфабрикатам из исследуемых титановых сплавов откорректированного состава


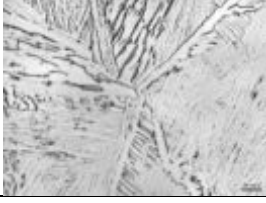
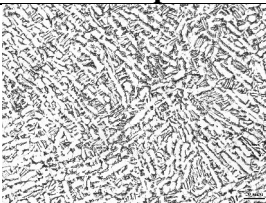
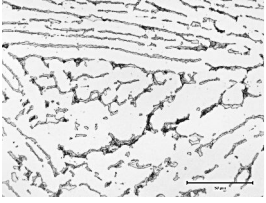
Характеристика	Сплав Ti-Al-Mo-V-C	Характеристика	Сплав Ti-Al-Mo-Zr-C
Поковки			
$\sigma_B^{20}/\sigma_B^{420}$, МПа	$\geq 834/\geq 441$	$\sigma_B^{20}/\sigma_B^{500}$, МПа	$\geq 883/\geq 490$
$\sigma_{0,2}^{20}$, МПа	≥ 785	$\sigma_{0,2}^{20}$, МПа	≥ 834
δ^{20} , %	≥ 10	δ^{20} , %	≥ 10
ψ^{20}/ψ^{420} , %	$\geq 25/\geq 40$	ψ^{20}/ψ^{500} , %	$\geq 25/\geq 40$
КСУ, Дж/см ²	≥ 49	КСУ, Дж/см ²	≥ 44
σ_{100}^{420} , МПа	≥ 392	σ_{100}^{500} , МПа	≥ 392
$\sigma_{0,2/100}^{420}$, МПа	≥ 245	$\sigma_{0,2/100}^{500}$, МПа	$\geq 196-245$
Катаные прутки			
$\sigma_B^{20}/\sigma_B^{450}$, МПа	$\geq 785/\geq 441$	$\sigma_B^{20}/\sigma_B^{500}$, МПа	$\geq 834/\geq 490$
$\sigma_{0,2}^{20}$, МПа	≥ 736	$\sigma_{0,2}^{20}$, МПа	≥ 785
δ^{20} , %	≥ 10	δ^{20} , %	≥ 10
ψ^{20} , %	$\geq 25 - \text{Ø } 25-50 \text{ мм}$ $\geq 20 - \text{Ø } 55-90 \text{ мм}$	ψ^{20} , %	$\geq 25 - \text{Ø } 25-50 \text{ мм}$ $\geq 20 - \text{Ø } 55-90 \text{ мм}$
КСУ, Дж/см ²	≥ 49	КСУ, Дж/см ²	≥ 44
σ_{100}^{450} , МПа	≥ 343	σ_{100}^{500} , МПа	≥ 343
$\sigma_{0,2/100}^{450}$, МПа	≥ 245	$\sigma_{0,2/100}^{500}$, МПа	≥ 245
$\sigma_{-1/10}^{20}/\sigma_{-1/10}^{350}$, МПа	$\geq 343/\geq 294$	-	
Цельнокатаные кольца			
$\sigma_B^{20}/\sigma_B^{400}$, МПа	$\geq 834/\geq 490$	-	
$\sigma_{0,2}^{20}$, МПа	≥ 785		
δ^{20} , %	≥ 10		
ψ^{20} , %	≥ 25		
КСУ, Дж/см ²	≥ 49		
σ_{100}^{400} , МПа	≥ 392		
$\sigma_{0,2/100}^{400}$, МПа	≥ 294		

Выполнена статистическая оценка уровня стандартных механических свойств исследуемых титановых сплавов откорректированного состава. Проведено компьютерное моделирование процесса деформирования исследуемых титановых сплавов с различными типами структурами.

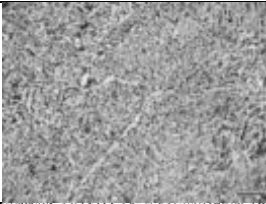
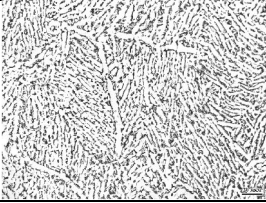
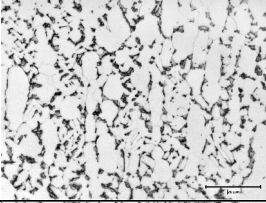
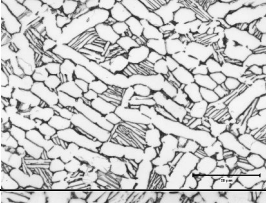


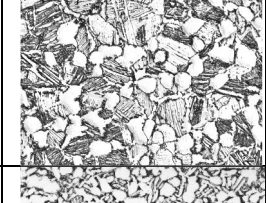
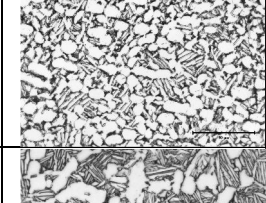

Расчеты методом конечных элементов выполнены с помощью программного комплекса Z-SET (версия 8.4) ведущим инженером ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» А.Ю.Мусиенко.

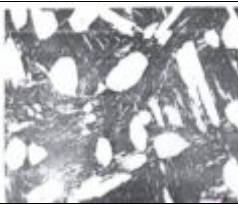
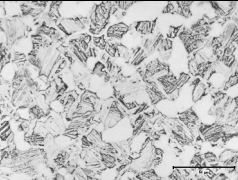
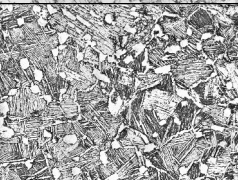

В третьей главе представлены результаты исследования влияния различных типов структур исследуемых титановых сплавов откорректированного состава на физико-механические свойства и характеристики работоспособности элементов паротурбинных установок. Выбранный ряд структур охватывает весь спектр возможных 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. Структуры исследуемых полуфабрикатов и количественная оценка их структурных составляющих приведены в таблице 2, где D – размер исходных бета-зерен; D_p – размер рекристаллизованных бета-зерен; b_1 – размер частиц первичной альфа-фазы; b_2 – размер пластин вторичной альфа-фазы; d – размер альфа-колоний; γ – объемная доля первичной альфа-фазы.

Таблица 2 - Характеристики структуры исследуемых титановых сплавов

Сплав	Полу-фабрикат	Структура	Оцениваемые параметры					
			b_1 , мкм	b_2 , мкм	D , мкм	D , мм	D_p , мкм	γ , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пластинчатые структуры								
Ti-Al-Mo-Zr-C	катаный пруток Ø 60 мм		3-10	-	70-100	0,3-0,4	-	90
Ti-Al-Mo-V-C	катаный пруток Ø 60 мм		3-8	-	50-100	0,3-0,4	-	90
Переходные структуры								
Ti-Al-Mo-V-C	катаный пруток Ø 60 мм		4-7	1-1,5	-	0,1-0,15	-	83
Ti-Al-Mo-Zr-C	Поковка-диск		8-25	<0,5	60-120	0,3-0,4	-	90

продолжение таблицы 2

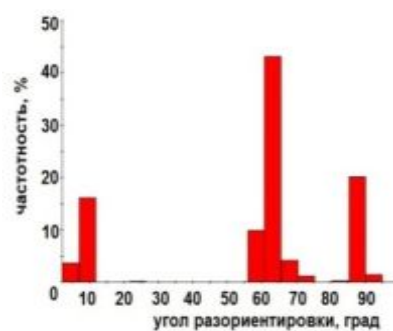
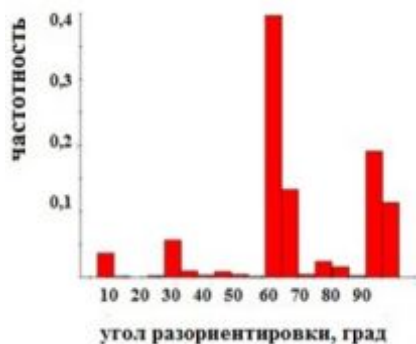
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ti-Al-Mo-Zr-C	Катаный пруток Ø 30 мм		3-5	-	-	0,05-0,15	-	85
Ti-Al-Mo-Zr-C	Катаный пруток Ø 30 мм		3-6	< 0,5	30-40	0,1-0,15	-	85
Глобулярные структуры								
Ti-Al-Mo-V-C	Катаный пруток Ø 25 мм		4-8	< 0,5	-	-	25-40	70
Ti-Al-Mo-Zr-C	Поковка диск		8-12	1,5-2,5	-	-	70-80	60
Ti-Al-Mo-V-C	Поковка вал		10-25	2,5-4	-	-	45-80	45
Ti-Al-Mo-V-C	Поковка -диск		12-30	1,5-3,5	-	-	65-80	45
Бимодальные структуры								
Ti-Al-Mo-V-C	Катаный пруток Ø 25 мм		6-10	1-2	-	-	30-50	30
Ti-Al-Mo-V-C	Цельно-катаное кольцо		7-15	0,5-2	-	-	25-40	30
Ti-Al-Mo-V-C	Цельно-катаное кольцо		10-15	0,1-1,5	-	-	40-70	25

продолжение таблицы 2								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ti-Al-Mo-Zr-C	Поковка-плита		12-20	1,0-1,5	-	-	70-80	25
Ti-Al-Mo-V-C	Поковка-диск		10-20	0,5-1,5	-	-	40-55	25
Ti-Al-Mo-Zr-C	Катаный пруток Ø 30 мм		7-12	0,8-2	-	-	30-80	15
Ti-Al-Mo-Zr-C	Катаный пруток Ø 30 мм		6-10	1-2	-	-	30-50	15

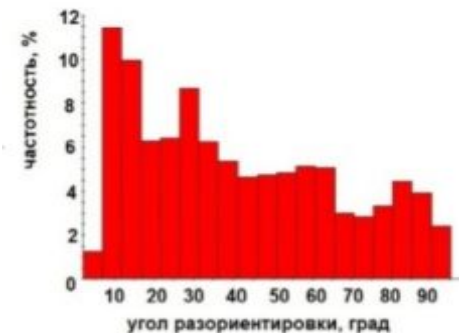
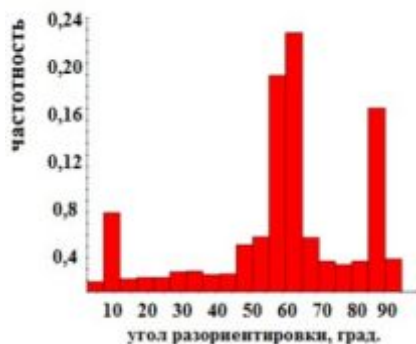
Металлографический анализ показывает, что наименее проработанными являются исследуемые крупнозернистые пластинчатые структуры с размером нерекристаллизованных бета-зерен до 0,4 мм, объемная доля первичной альфа-фазы максимальна - до 90%, сохранилась оторочка первичной альфа-фазы по границам зерен шириной до 5-9 мкм. Более проработаны переходные структуры - размер бета-зерна менее 150 мкм, уменьшена объемная доля первичной альфа-фазы, степень сфероидизации пластин альфа-фазы незначительна. Наиболее проработаны мелкозернистые рекристаллизованные глобулярные и бимодальные структуры с размером бета-зерен от 30 до 80 мкм. В глобулярных структурах частицы первичной альфа-фазы размером в среднем 8-30 мкм не полностью сфероидизированы, в бимодальных структурах первичная альфа-фаза полностью глобуляризована, размер глобулей в среднем от 10 до 25 мкм. Объемная доля первичной альфа-фазы в глобулярных структурах снижена до 45-70%, в бимодальных – не более 30%. Представленные структуры по морфологическим признакам охватывают весь спектр возможных структур, что дает возможность в полном объеме исследовать их взаимосвязь с физико-механическими свойствами и характеристиками работоспособности в условиях эксплуатации транспортных ПТУ.

Методом ориентационной микроскопии исследован спектр разориентировок границ зерен (СРГЗ) в альфа-фазе. На рисунке 1 представлены результаты исследования как сплавов систем легирования Ti-Al-Mo-V-C и Ti-Al-Mo-Zr-C, так и некоторых промышленных титановых сплавов.

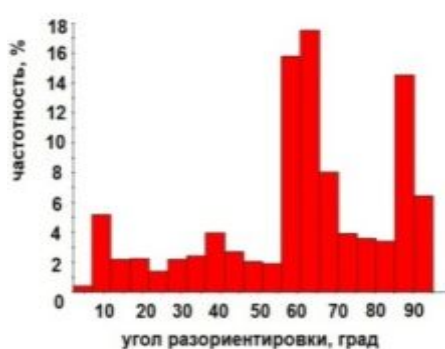
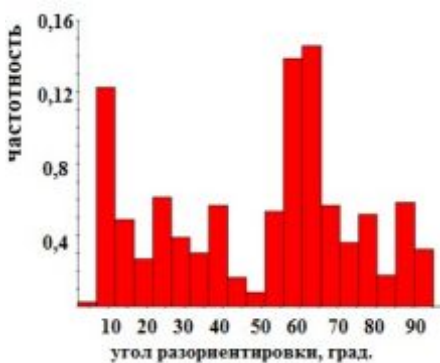
Пластинчатые структуры



Глобулярные структуры



Бимодальные структуры



а)

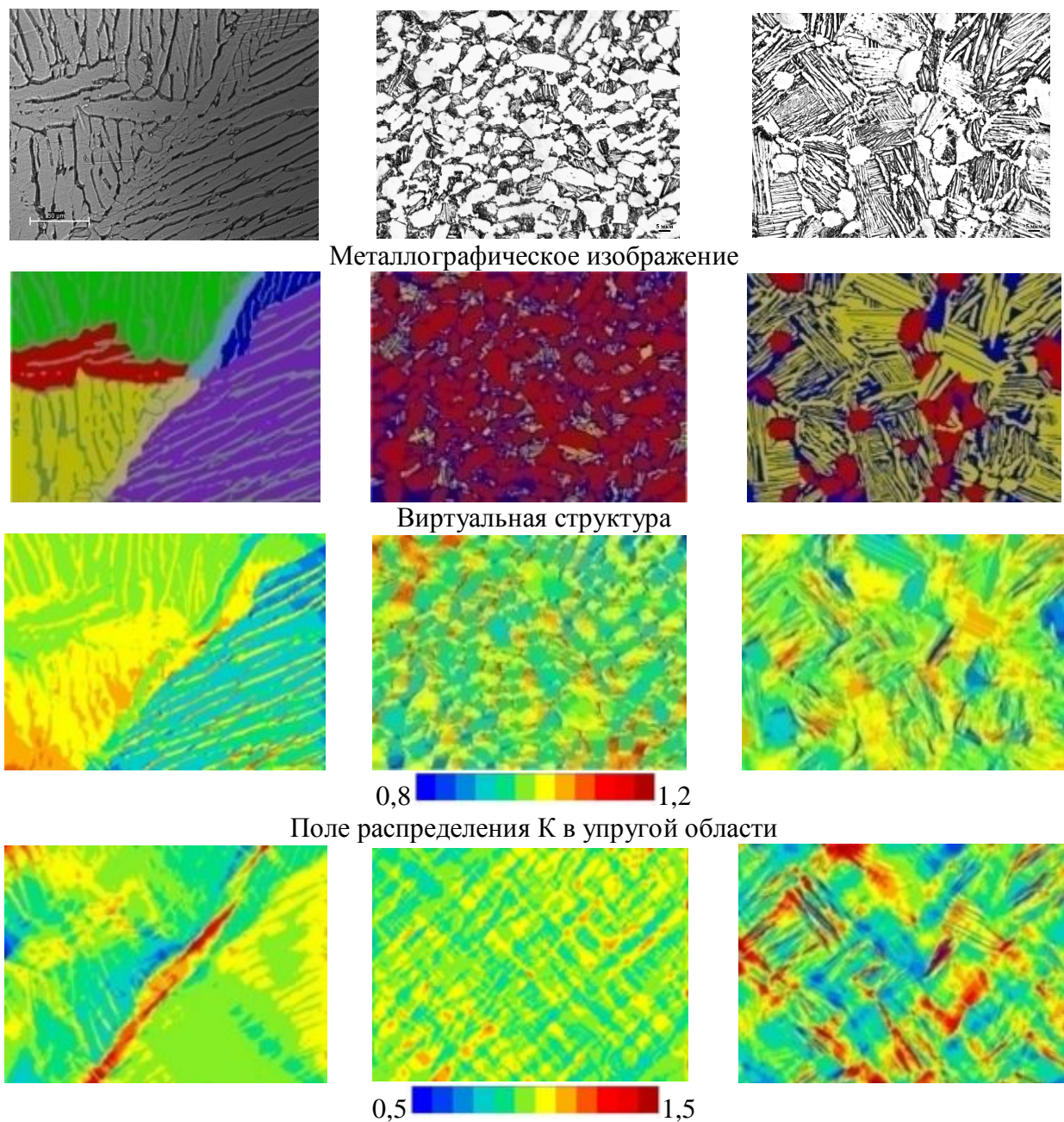
б)

Рисунок 1 – СРГЗ альфа-фазы исследуемых титановых сплавов (а), а также промышленных титановых сплавов (б) с различными типами структуры.

Измерения разориентаций в альфа фазе показали, что пластинчатая структура характеризуется ограниченным набором разориентировок с дискретным их распределением и ярко выраженными максимумами в диапазоне БУГ - 60 и 90 градусов. Полученные большие углы разориентировок между колониями пластин в пластинчатой структуре соответствуют результатам металлографического анализа – колонии пластин развернуты друг относительно друга на большие углы (таблица 1). На сплавах с глобулярной и бимодальной структурами СРГЗ непрерывен и охватывает весь диапазон возможных разориентировок. Следует отметить, что здесь сохраняются пики в 60 и 90 градусов за счет наличия определенного количества пластинчатой составляющей, т.е. распределение представляет собой суперпозицию непрерывного равномерного и дискретного распределений. Полученное ограниченное число вариантов ориентационной связи альфа-колоний с исходной бета-фазой соответствуют теоретически рассчитанным еще в 1979 году специалистами

ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» разориентировкам в альфа-фазе на примере пластинчатой морфологии малолегированного псевдо-альфа сплава титана - **10,5; 60; 60,8; 63,3 и 90** градусов и обусловлено формированием пластинчатой структуры в результате полиморфного превращения. Формирование глобулярной структуры в процессе деформации приводит к полному непрерывному спектру распределения разориентировок. Таким образом, выявлено различие в спектре угла разориентировок в альфа-фазе: пластинчатые структуры характеризуются наличием ограниченного числа кристаллографически обусловленных границ с достаточно большими углами разориентировки в области БУГ - 60 и 90 градусов, глобулярные структуры характеризуются хаотичным распределением ориентировок. Топология структуры предопределяет механизм деформации и свойства титановых сплавов с различными типами структуры. Различная ориентировка кристаллов по отношению к действующей нагрузке предопределяют возможность появления значительной микронеоднородности деформации. Внешний вид линий скольжения определяется ориентационным и размерным факторами: чем ближе направление скольжения к направлению действию нагрузки, тем тоньше полоса скольжения, с увеличением угла между этими направлениями полосы скольжения расширяются. Увеличение размера структурных составляющих также огрубляет полосы скольжения. Можно предположить, что большие углы разориентировки (в среднем 60 и 90 градусов) в исследуемых титановых сплавах с достаточно крупнопластинчатой структурой способствуют уширению (огрублению) полос скольжения при нагружении, что приводит к повышенной микронеоднородности деформации и раннему зарождению трещин. Разнонаправленность следов скольжения в достаточно мелкозернистой глобулярной структуре приводит к более равномерному распределению деформации по объему материала и позволяет более полно реализовать ресурс пластичности за счет тонкого скольжения. Бимодальная структура, состоящая из пластинчатой и глобулярной составляющих, объединяет в себе особенности механизмов деформации указанных структур и, соответственно, физико-механических свойств. Микронеоднородность пластического деформирования различных типов структур исследовали расчетным способом. Произведен конечно-элементный расчет процесса деформирования с учетом реальной структуры и кристаллографических характеристик. Виртуальные модели созданы на основе металлографического изображения. Для оцифровки изображения использована программа GetData Graph Digitizer, для создания конечно-элементных сеток – препроцессор программного комплекса Z-set. Виртуальные модели учитывают морфологию, тип кристаллической решетки, кристаллографический механизм скольжения, а также фактические свойства каждой фазы. Результаты расчета приведены на рисунке 2.

Коэффициент неоднородности деформации рассчитывали как отношение деформации в структурном элементе в направлении действия нагрузки ϵ_i к средней деформации в рассчитываемой структуре под воздействием внешней нагрузки ϵ_m : $K = \epsilon_i / \epsilon_m$.



Поле распределения K в упруго-пластической области

а) пластинчатая структура б) глобулярная структура в) бимодальная структура

Рис.2 – Металлографическое изображение, виртуальная структура и расчетные поля коэффициента неоднородности деформации исследуемых структур.

Конечно-элементный расчет показал, что при пластическом деформировании достаточно однородно деформируется глобулярная составляющая в рассчитываемых глобулярной и бимодальной структурах. Более неоднородно деформируется пластинчатая структура, а также пластинчатая составляющая в глобулярной и бимодальной структурах. Проведенный КЭ-анализ соответствует результатам ориентационной микроскопии и подтверждает известные литературные

данные о значительном превышении степени локальной неоднородности деформирования пластинчатой структуры по сравнению с глобулярной.

Особенности влияния структуры на сопротивление деформированию оценивали также по энергетическому параметру. Распределение значений локальных энергий деформирования Ψ на поверхности моделей исследованных структур представлено на рисунке 3.

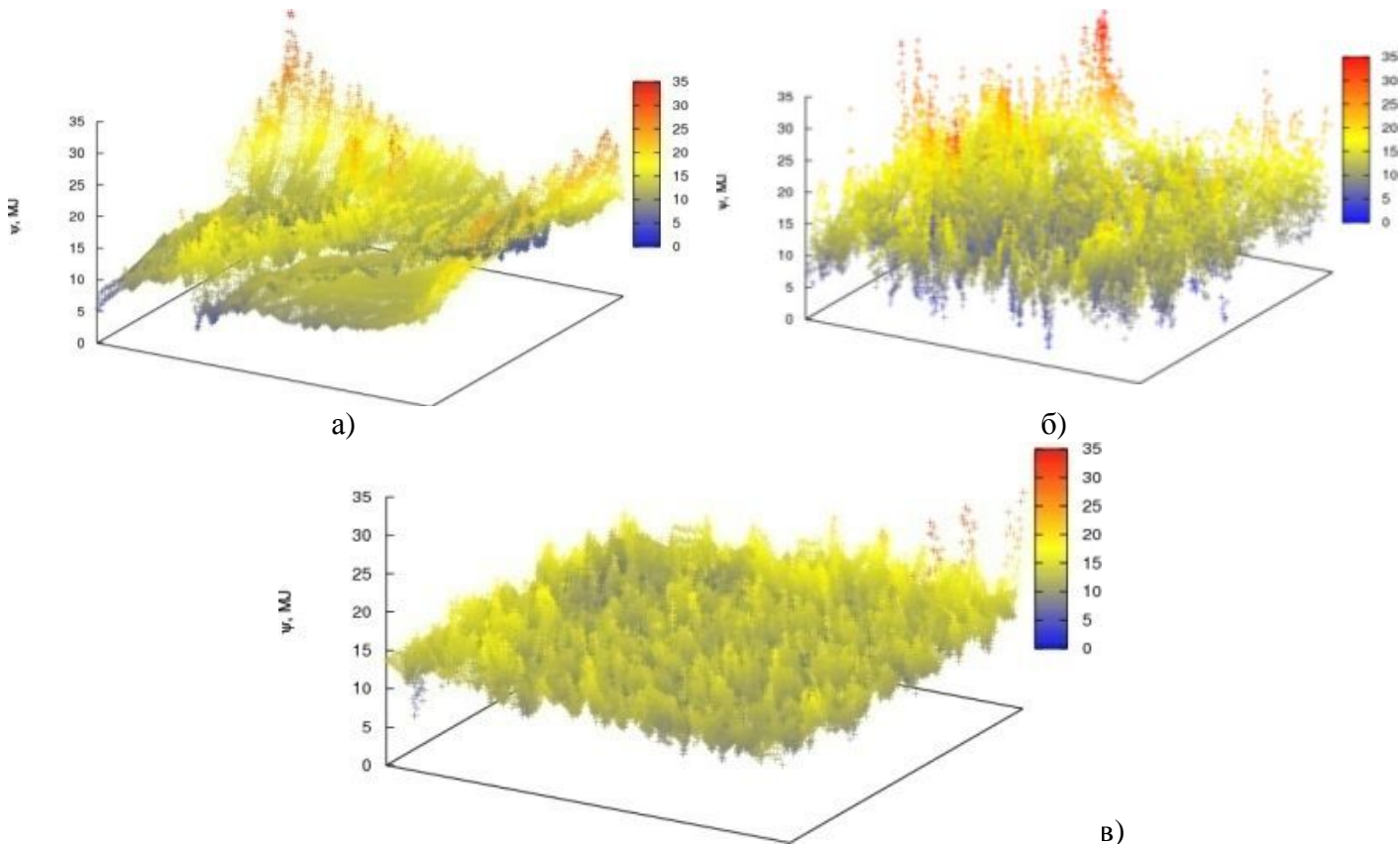


Рисунок 3 - Значения локальной энергии на поверхности виртуальной пластинчатой (а), бимодальной (б) и глобулярной (в) структур при упруго-пластическом нагружении ($\epsilon_m=2\%$).

Анализ данных показывает, что глобулярная структура характеризуется компактным распределением локальной энергии деформирования с меньшим локальным максимумом, чем пластинчатая и бимодальная структуры, имеющие существенную неоднородность по затратам на пластическую деформацию отдельных структурных элементов. Разориентированные под большими углами колонии однонаправленных альфа-пластин требуют существенно больших энергетических затрат на пластическое деформирование по сравнению с глобулярной структурой.

Стандартные механические характеристики

Стандартные механические характеристики исследуемых сплавов как функция структуры схематично представлены на рисунках 4 и 5 при комнатной и максимальных рабочих температурах: для сплава Ti-Al-Mo-V-C – 450°C, для сплава Ti-Al-Mo-Zr-C – 500°C.

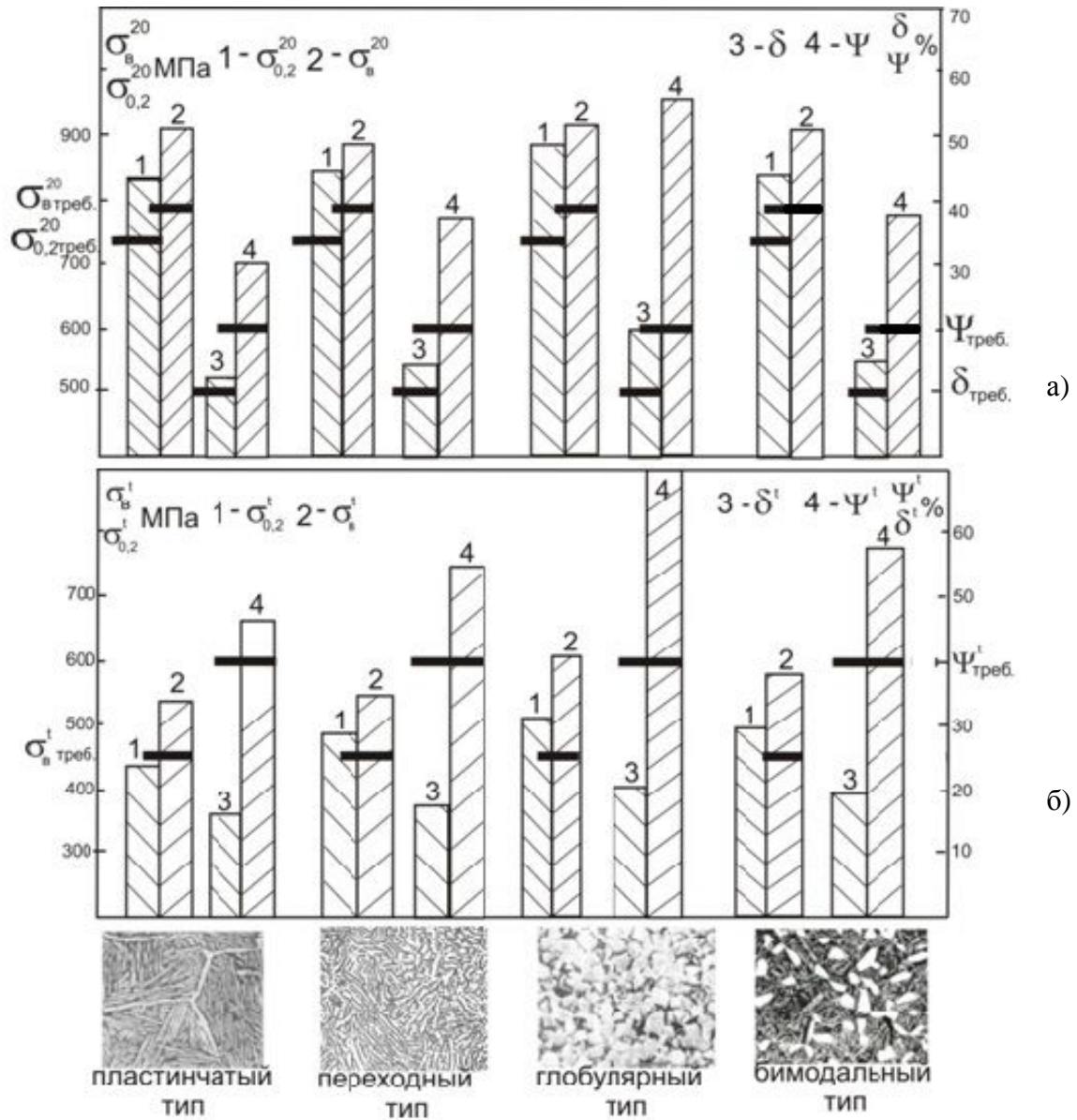


Рисунок 4 – Стандартные механические свойства сплава Ti-Al-Mo-V-C с различными типами структуры при комнатной (а) и максимальной рабочей температуре (б), чертой обозначены нормативные требования для соответствующей характеристики.

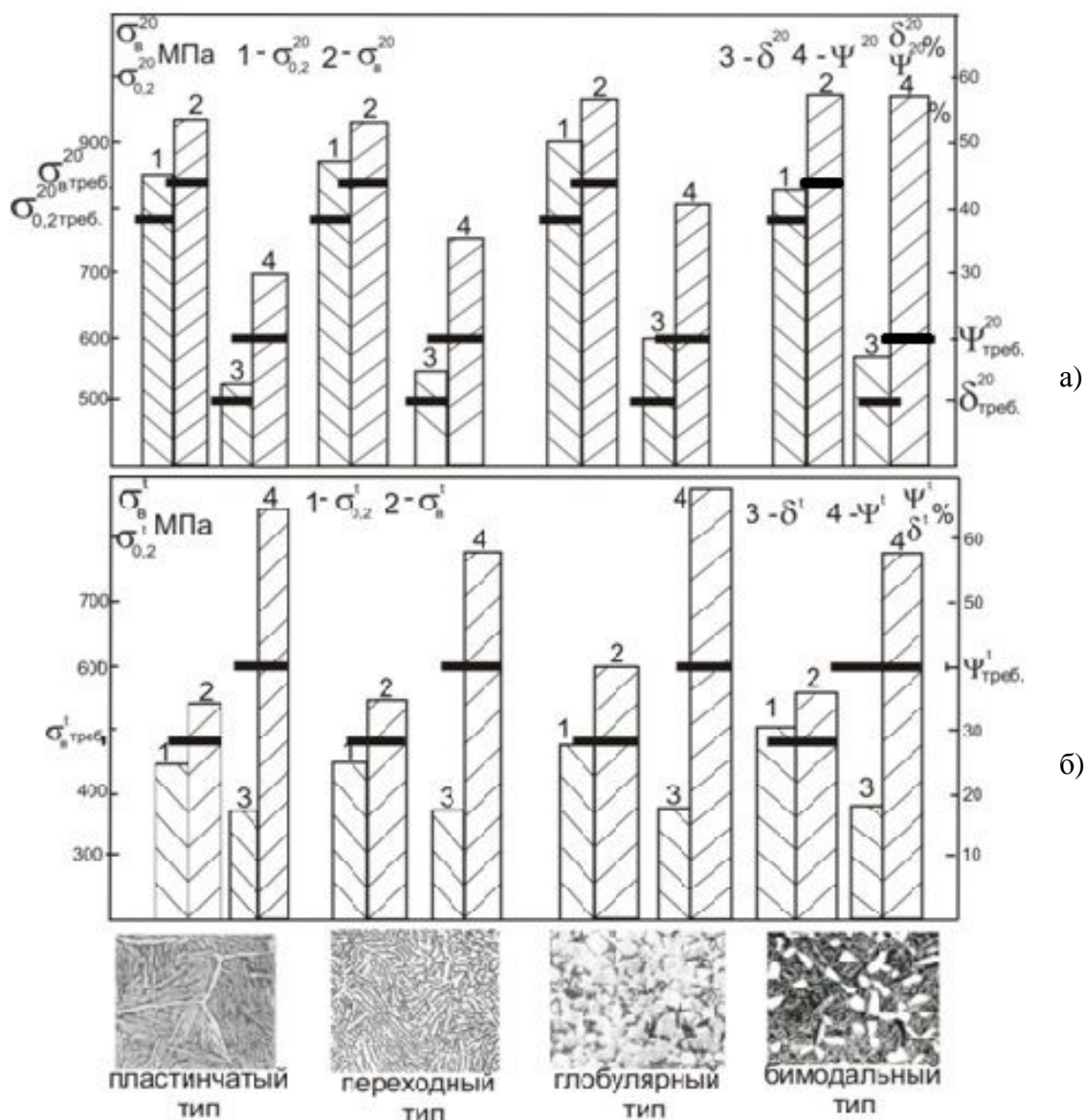


Рисунок 5 – Стандартные механические свойства сплава Ti-Al-Mo-Zr-C с различными типами структуры при комнатной (а) и максимальной рабочей температуре (б), чертой обозначены нормативные требования для соответствующей характеристики.

Анализ данных показывает, что исследуемые титановые сплавы с глобулярной и бимодальной структурой обеспечивают более высокие характеристики прочности и пластичности по сравнению с пластинчатыми и переходными структурами. При этом максимальные прочностные и пластические характеристики свойственны глобулярной структуре - наиболее мелкозернистой по результатам ориентационной микроскопии. Выбор для исследований морских титановых сплавов откорректированного состава обеспечил достаточно высокий уровень прочностных и пластических свойств при рабочих температурах, удовлетворяющий техническим требованиям, приведенным в таблице 1. Степень снижения прочностных характеристик исследуемых сплавов при повышении температуры представлена на рисунке 6.

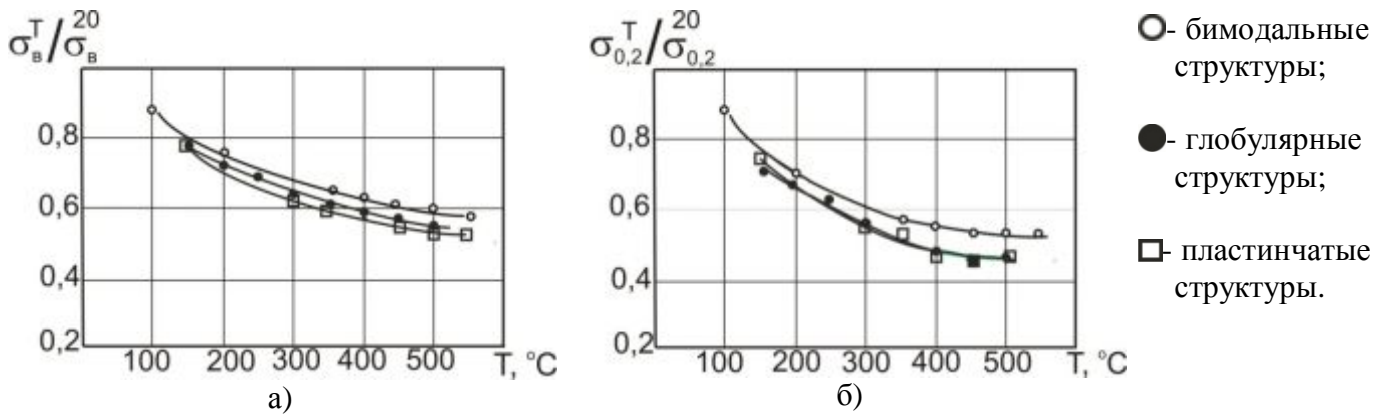


Рисунок 6 – Изменение временного сопротивления разрыву (а) и предела текучести (б) исследуемых титановых сплавов с разными типами структуры при повышении температуры.

Анализ представленных данных показывает, что при повышении температуры исследуемые бимодальные структуры имеют наименьшую степень разупрочнения.

Характеристики жаропрочности

Результаты испытаний по определению сопротивления ползучести и длительной прочности исследуемых титановых сплавов представлены на рисунке 7 и на рисунке 8 соответственно.

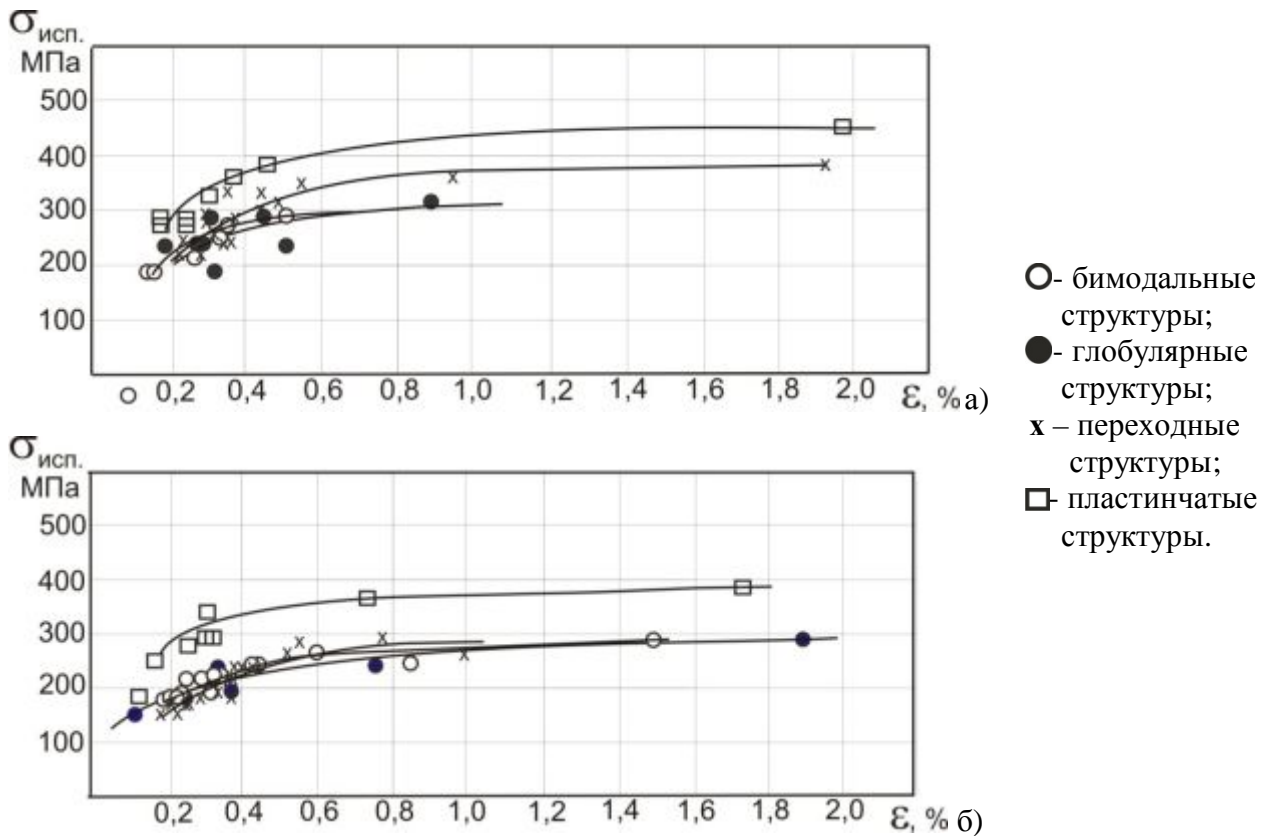
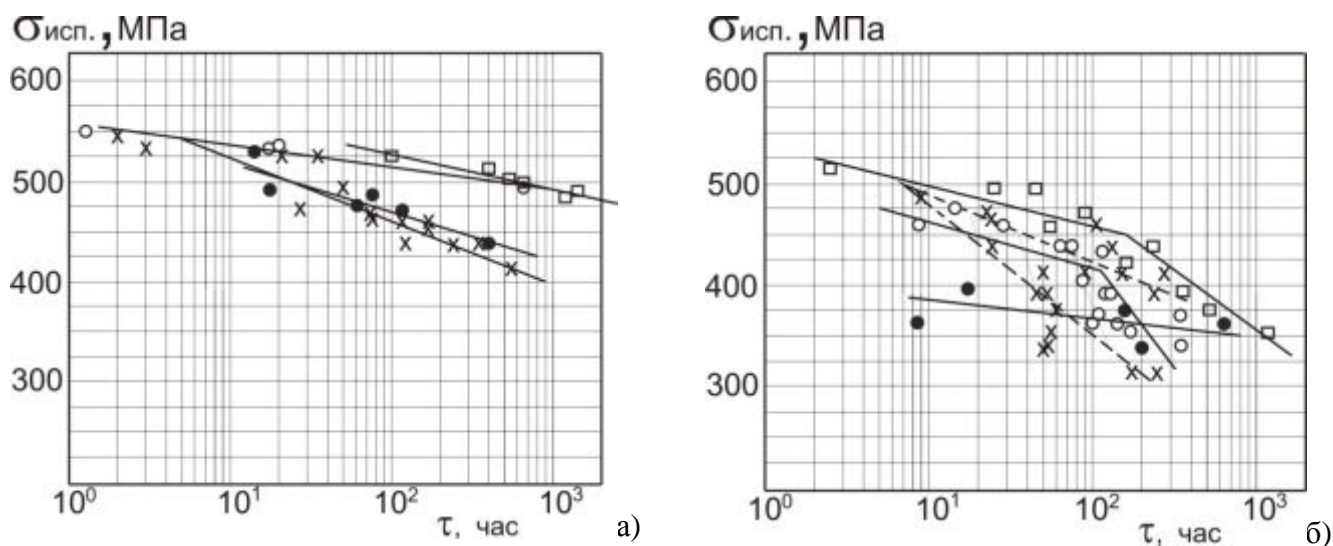


Рисунок 7 - Изохронные кривые ползучести исследуемых титановых сплавов на базе 100 часов: а) - сплава Ti-Al-Mo-V-C (при T = 450°C) ; б) - сплава Ti-Al-Mo-Zr-C (при T = 500°C) с различными типами структуры

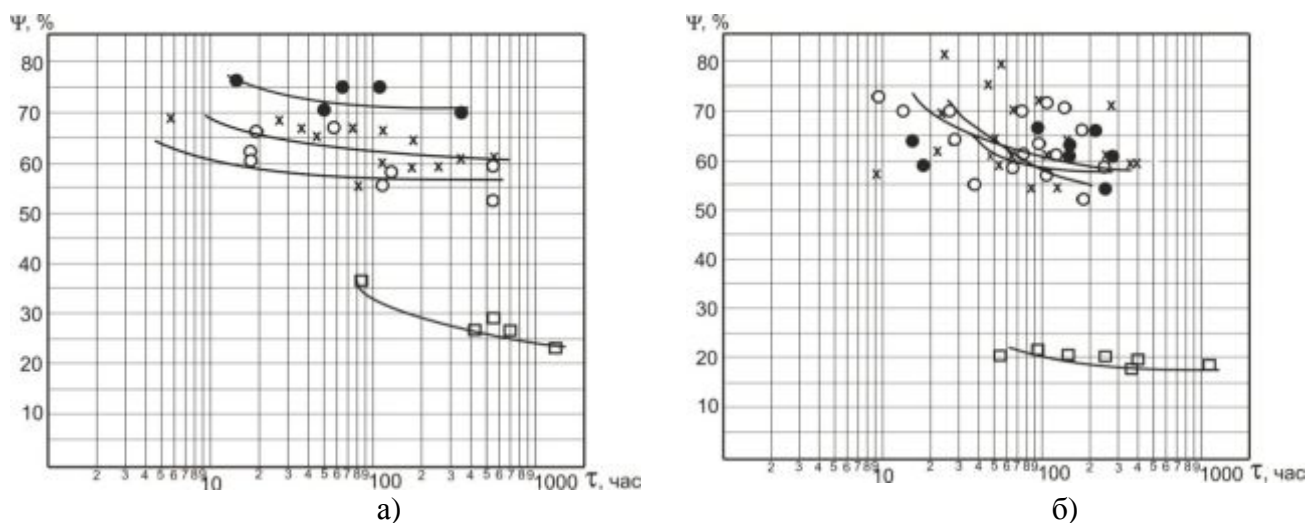


○ - бимодальные структуры; ● - глобулярные структуры;
 x - переходные структуры; □ - пластинчатые структуры

Рисунок 8 – Длительная прочность исследуемых титановых сплавов: а) - сплава Ti-Al-Mo-V-C ($T = 450^{\circ}\text{C}$); б) - сплава Ti-Al-Mo-Zr-C ($T = 500^{\circ}\text{C}$) с различными типами структуры

Анализ полученных данных показывает, что наибольшие характеристики жаропрочности имеют исследуемые пластинчатые структуры, поскольку в условиях повышенных температур и длительных статических испытаний основной вклад в деформацию и разрушение приносят процессы ползучести и развития трещин, минимальные на пластинчатых структурах. Переходные, глобулярные и бимодальные структуры характеризуются более низкими значениями характеристик жаропрочности. При этом значительная объемная доля пластинчатой составляющей в бимодальных структурах обеспечивает некоторое превышение характеристик длительной прочности по сравнению с чисто глобулярными структурами.

Длительную пластичность оценивали по уровню относительного сужения при испытаниях на длительную прочность. Результаты испытаний представлены на рисунке 9.



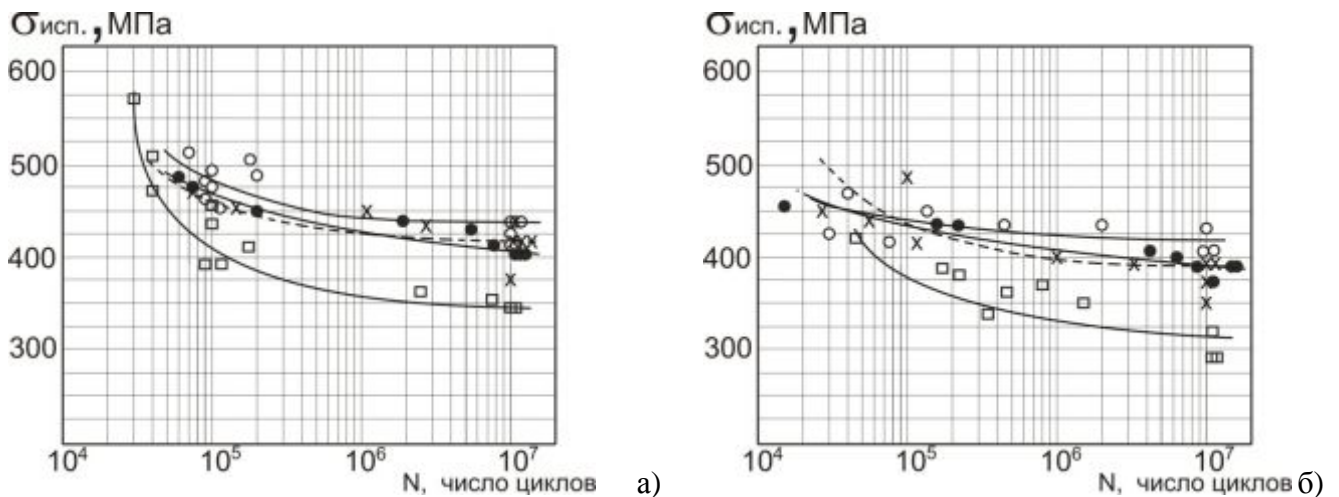
○ - бимодальные структуры; ● - глобулярные структуры;
 x - переходные структуры; □ - пластинчатые структуры

Рисунок 9 – Предельная пластичность исследуемых титановых сплавов: а) - сплава Ti-Al-Mo-V-C ($T = 450^{\circ}\text{C}$); б) - сплава Ti-Al-Mo-Zr-C ($T = 500^{\circ}\text{C}$) с различными типами структуры

Анализ представленных графиков показывает, что пластичность рекристаллизованных в разной степени переходной, глобулярной и бимодальной структур для сплава Ti-Al-Mo-V-C практически не изменяется при увеличении длительности испытаний, для сплава Ti-Al-Mo-Zr-C незначительно снижается, при этом полученные значения предельной пластичности для указанных типов структур находятся на достаточно высоком уровне – 50-70%, соответствующему значениям относительного сужения при кратковременных испытаниях (рисунки 4 и 5), Длительная пластичность пластинчатых структур значительно ниже (на 30-50%) начальных показателей пластичности, т.е. при длительном нагружении пластинчатая структура характеризуется недостаточной термической стабильностью. Как было показано выше, в пластинчатой структуре из-за неблагоприятного кристаллографического расположения структурных составляющих, развивается грубое скольжение, приводящее к локализации деформации и преждевременному зарождению трещин, т.е. происходит уменьшение деформационной способности материала. Более мелкозернистые и разориентированные переходные, глобулярные и бимодальные структуры характеризуются равномерным распределением деформации, что позволяет реализовать тонкое скольжение и обеспечить ресурс пластичности.

Характеристики выносливости

Результаты испытаний на многоцикловую усталостную прочность приведены на рисунке 10 для сплава Ti-Al-Mo-V-C.



○ - бимодальные структуры; ● - глобулярные структуры;
x – переходные структуры; □ - пластинчатые структуры

Рисунок 10 - Многоцикловая усталостная прочность исследуемого титанового сплава Ti-Al-Mo-V-C с различными типами структуры: а) - при $T = 20^\circ\text{C}$; б) - при $T = 350^\circ\text{C}$.

В данном случае в условиях переменных напряжений при более низких температурах и меньшей продолжительности испытания больший вклад в процессы деформации и разрушения приносят процессы зарождения трещин. Анализ графиков показывает, что исследуемые

титановые сплавы с бимодальной, глобулярной и переходной структурами, характеризующиеся максимальным сопротивлением зарождению трещин, демонстрируют более высокие значения многоциклового усталостной прочности. Пластинчатые структуры, на которых облегчено зарождение трещин, характеризуются минимальными значениями выносливости. На рисунке 11 представлены конкретные значения служебных характеристик исследуемых титановых сплавов в зависимости от типа структуры.

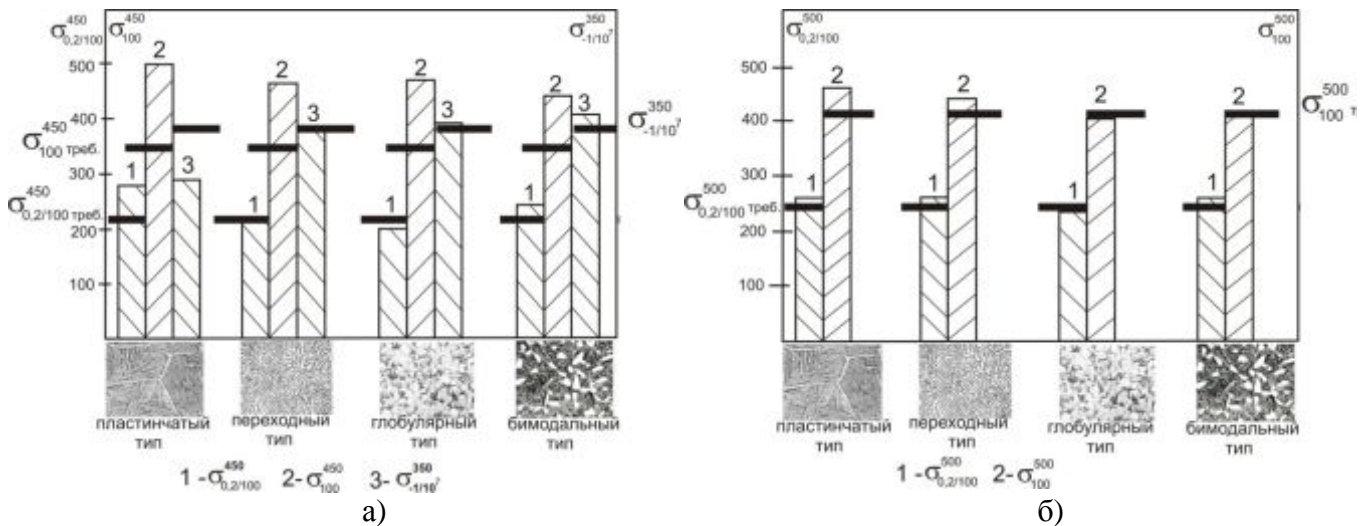


Рисунок 11 – Предел ползучести, длительной и многоциклового усталостной прочности исследуемых титановых сплавов с различными типами структуры: (а) - сплав композиции Ti-Al-Mo-V-C, (б) – сплав композиции Ti-Al-Mo-Zr-C.

Анализ представленных данных показывает, что исследуемые пластинчатые структуры при высоком уровне характеристик жаропрочности, не обеспечивают требуемый уровень многоциклового усталостной прочности (таблица 1). В противоположность этому исследуемые глобулярные структуры, имеющие высокий предел многоциклового усталостной прочности, соответствующий техническим требованиям, предъявляемым к материалам для паротурбинных установок, по сопротивлению ползучести не соответствуют указанным требованиям. Исследуемые бимодальные структуры, соединяющие в своей морфологии определенные объемные доли глобулярной и пластинчатой составляющих, разнонаправлено влияющих на физико-механические свойства титановых сплавов, по уровню характеристик жаропрочности приближаются к пластинчатым структурам, по показателям циклической прочности превосходят уровень глобулярных структур и, тем самым, обеспечивают оптимальное сочетание указанных выше «противоречивых» свойств и соответствие техническим требованиям, предъявляемым к материалам для судовых ПТУ.

В четвертой главе проведен 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 всесторонней ковки для кованных полуфабрикатов или увеличения операций протяжки для катаных прутков;
- повышение степени деформации на заключительных этапах для обеспечения требуемой проработки внутриверенной структуры: проведение финишных операций строго при температурах верхней части двухфазной области в достаточно узком температурном интервале - ($T_{пп-20}$) – ($T_{пп-40}$) °C при этом суммарный объем деформации в этой области составляет не менее 60-70%.

Откорректированные технологические схемы изготовления кованой заготовки представлены на рисунке 12, непосредственно поковок – на рисунке 13.

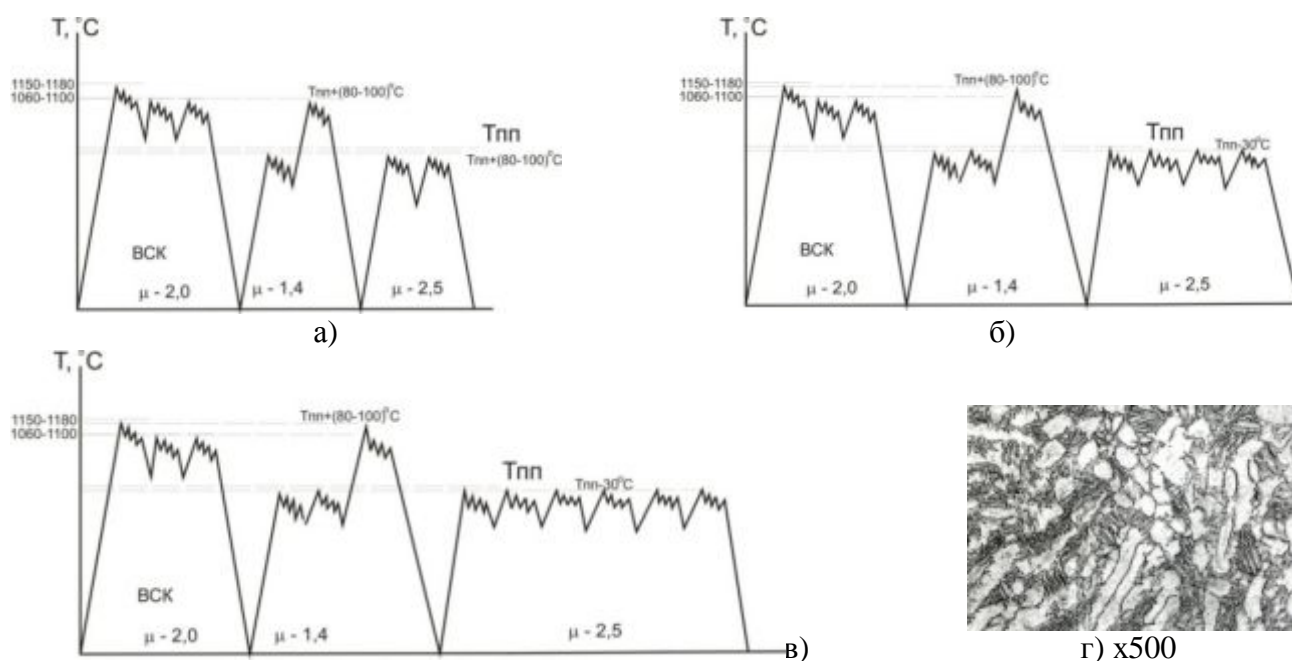
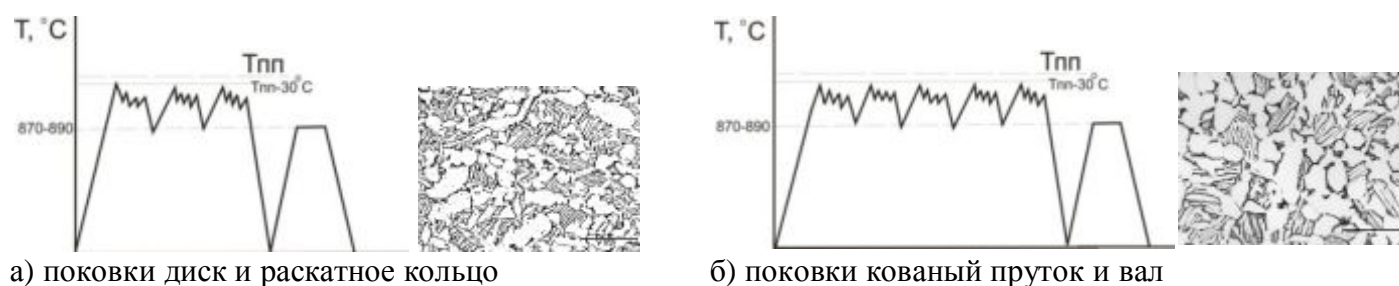


Рисунок 12 – Разработанные технологические схемы изготовления кованных заготовок диска (а), кованого прутка и раскатного кольца (б), вала (в), и структура кузнечной заготовки (г).



а) поковки диск и раскатное кольцо

б) поковки кованный пруток и вал

Рисунок 13 - Разработанные технологические схемы изготовления поковок и структура готового полуфабриката: (а) – минимальное число переходов; (б) – максимальное число переходов.

Разработанная технологическая схема изготовления цельнокатаных колец представлена на рисунке 14 и 15.

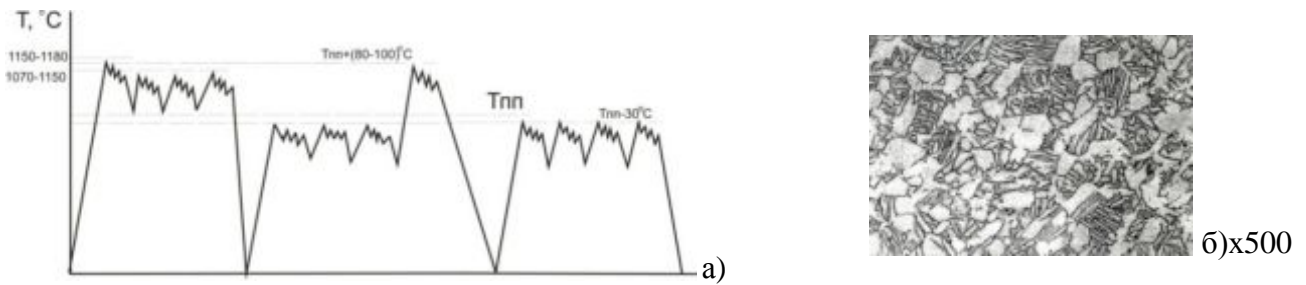


Рисунок 14 – Разработанная технологическая схема изготовления ковanej заготовки для цельнокатаных колец (а) и ее структура (б).

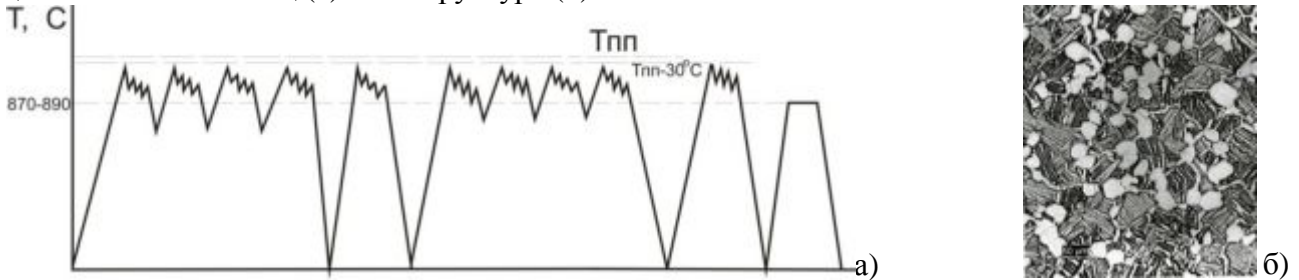


Рисунок 15 - Разработанная технологическая схема изготовления цельнокатаных колец (а) и пример структуры (б).

Необходимое измельчение зеренной структуры поковок и цельнокатаных колец достигнуто за счет введения на начальных стадиях деформации всестороннейковки для малогабаритных поковок и увеличение операций всестороннейковки для крупногабаритных поковок и цельнокатаных колец. Выполнение основного объема деформации на заключительных стадиях обработки при температурах верхней части двухфазной области в достаточно узком интервале ($T_{гр}-20-T_{гр}-40$)°C обеспечивает полную проработку внутризеренной структуры при регламентированных размерах и соотношении объемных долей пластинчатой и глобулярной составляющих альфа-фазы.

На рисунках 16-17 приведены разработанные технологические схемы изготовления катаных прутков. Существующая схема изготовления основного сортамента прутков предусматривает одностадийную прокатку с получением структуры пластинчатого типа, характеризующуюся пониженными значениями многоциклового выносливости. При этом лопатки всех ступеней турбины, изготавливаемые из прутков диаметром 55-65 мм подвержены вибрационным воздействиям. Для повышения уровня циклической прочности прутков «лопаточного качества» введена вторая стадия прокатки с объемом деформации не менее 60%. В результате в прутках лопаточного качества сформирован требуемый тип структуры.

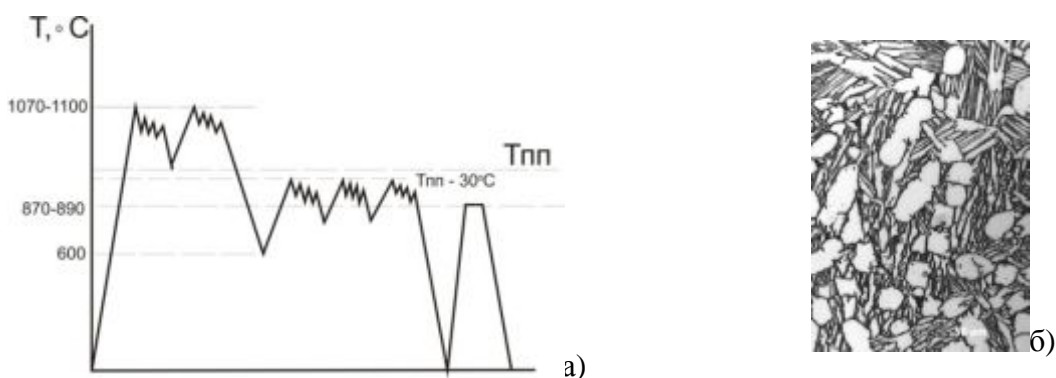


Рисунок 16 - Разработанная технологическая схема изготовления катаных прутков диаметром 50-65 мм (а) и пример структуры (б).

Для прутков большего размера от 70 до 90 мм с целью измельчения зеренной структуры введена операция фазовой перекристаллизации при изготовлении прутковой заготовки. Для необходимой проработки внутризеренной структуры финишные этапы обработки проведены при температурах двухфазной области с суммарным объемом деформации не менее 60%.

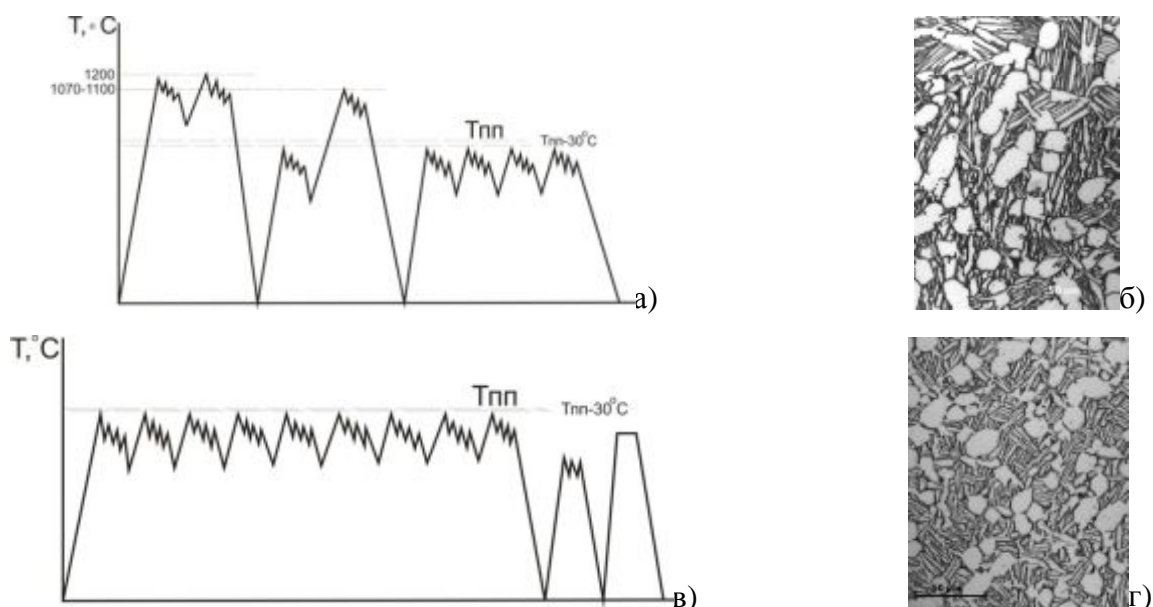


Рисунок 17 - Разработанная технологическая схема изготовления катаных прутков \varnothing 70-90 мм: прутковая заготовка (а) и ее структура (б), пруток (в) и структура готового полуфабриката (г).

Таким образом, изготовление деформированных полуфабрикатов по разработанным технологическим схемам, внедренным на ПАО «Корпорация ВСПО-АВИСМА» приводит к получению в них заданного бимодального типа структуры.

В заключении приведены установленные гарантированные значения механических характеристик деформированных полуфабрикатов из исследуемых титановых сплавов откорректированного состава с оптимальным типом структуры, обеспечивающие конструктивную прочность высоконагруженных элементов паротурбинных установок в конкретных условиях эксплуатации. Для высокотемпературной зоны рекомендован более

жаропрочный титановый сплав Ti-Al-Mo-Zr-C, для низкотемпературной зоны – титановый сплав Ti-Al-Mo-V-C с соответствующими характеристиками жаропрочности.

Таблица 3 - Рекомендованные гарантированные технические характеристики титановых сплавов для высокотемпературной зоны транспортных ПТУ

Область применения	Гарантированные механические характеристики титановых сплавов				
Детали и сварные узлы магистрали подвода острого пара к ПТУ	Стандартные механические свойства, МПа				
	$\sigma_B^{20} \geq 925$		$\sigma_B^{500} \geq 535$		$\sigma_{0,2}^{20} \geq 865$
	Служебные характеристики, МПа				
	σ_{100}^{500}	$\sigma_{0,2/100}^{500}$	$\sigma_{-1/200}^{500}$	$\sigma_{-1/200}^{500}$ при $K_\sigma \sim 4,8$	$\sigma_{-1H/200}^{500}$ при $K_\sigma \sim 3,2$
	≥ 410	185-245	≥ 555	≥ 810	≥ 800
Болты, шпильки, винты и др. детали, включая малогабаритные детали	Стандартные механические свойства, МПа				
	$\sigma_B^{20} \geq 925$		$\sigma_B^{500} \geq 540$		$\sigma_{0,2}^{20} \geq 885$
	Служебные характеристики $\sigma_{0,2/100}^{500} \geq 185$ МПа				

Таблица 4 – Рекомендованные гарантированные технические характеристики титановых сплавов для низкотемпературной зоны транспортных ПТУ

Область применения	Гарантированные механические характеристики титановых сплавов						
Диски рабочих колес турбины и турбонасоса, детали упругой муфты, другие детали ротора	Стандартные механические свойства, МПа						
	$\sigma_B^{20} \geq 905$		$\sigma_B^{420} \geq 535$		$\sigma_{0,2}^{20} \geq 855$		
	Служебные характеристики, МПа						
	σ_{100}^{20}	σ_{100}^{420}	$\sigma_{0,2/100}^{420}$	$\sigma_{-1/200}^{350}$	$\sigma_{-1H/200}^{450}$	$\sigma_{-1/10}^{20}$	$\sigma_{-1/10}^{350}$
	≥ 655	≥ 540	223-343	≥ 815	≥ 815	≥ 450	≥ 380
Рабочие, сопловые и направляющие лопатки турбины и турбонасоса	Стандартные механические свойства, МПа						
	$\sigma_B^{20} \geq 905$		$\sigma_B^{450} \geq 535$		$\sigma_{0,2}^{20} \geq 840$		
	Служебные характеристики, МПа						
	$\sigma_{-1/10}^{20}$		$\sigma_{-1/10}^{350}$		$\sigma_{-1H/10}^{20}$ при $K_\sigma \sim 3,2$		$\sigma_{-1H/10}^{350}$ при $K_\sigma \sim 3,2$
	≥ 412		≥ 383		≥ 274		≥ 186
Болты, шпильки, винты	Служебные характеристики, МПа						
	$\sigma_{0,2/100}^{420} \geq 215$		$\sigma_{-1/10}^{20} \geq 450$		$\sigma_{-1/10}^{350} \geq 363$		
Детали диафрагм паровой турбины, другие детали статора	Стандартные механические свойства, МПа						
	$\sigma_B^{20} \geq 930$		$\sigma_B^{400} \geq 580$		$\sigma_{0,2}^{20} \geq 865$		
	Служебные характеристики, МПа						
	$\sigma_{100}^{400} \geq 560$			$\sigma_{0,2/100}^{400} \geq 380$			

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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 ($T_{пп-20}$ - $T_{пп-40}$)°С, 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 (Т_{пп-20} - Т_{пп-40})°С 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».

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях.

1. Иванова Л.А., Козлова И.Р., Кудрявцев А.С., Чудаков Е.В. Исследование жаропрочности свариваемых титановых сплавов марок 5В и 37 применительно к изделиям машиностроения // Вопросы материаловедения. -2009. - № 3(59). С.152-161.

2. Иванова Л.А., Козлова И.Р., Кудрявцев А.С., Чудаков Е.В. // Влияние термопластической обработки на комплекс свойств и структуру высокопрочных титановых сплавов типа 5В, используемых для деталей энергооборудования. Титан. – 2010. - № 3 (29). – С.36-42.

3. Травин, В.В., Иванова Л.А., Водопьянов В.И., Козлова И.Р. // Сопротивление титановых сплавов статическим и малоцикловым нагрузкам в зонах концентрации.– Титан. – 2011. - № 3 (33) – С.9-17.

4. Иванова Л.А., Козлова И.Р., Кудрявцев А.С., Чудаков Е.В. // Материаловедческое обеспечение производства цельнокатаных колец из свариваемых высокопрочных титановых сплавов для деталей энергомашиностроения.- Титан. – 2013. - № 2 (40). – с.29-34.

5. Иванова Л.А., Травин В.В., Кудрявцев А.С., Козлова И.Р. // Ползучесть псевдо-альфа титановых сплавов и ее влияние на напряженно-деформированное состояние деталей паровых турбин. – Титан. – 2013. - № 2 (40). – С.4-12.

6. Орыщенко А.С., Козлова И.Р., Иванова Л.А., Кудрявцев А.С., Чудаков Е.В. // Исследование характеристик работоспособности высокопрочных псевдо-альфа титановых сплавов в изделиях энергетического оборудования. – Титан. – 2013. - № 2(42). – С.12-19.

7. Мусиенко А.Ю., Леонов В.П., Козлова И.Р., Паноцкий Д.А. // Компьютерное моделирование реальной структуры титановых сплавов при исследовании процессов деформирования и разрушения. Титан. 2014. - № 3 (45). – С. 45-64.

8. Патент на изобретение РФ № 2439183 «Сплав на основе титана». Леонов В.П., Кудрявцев А.С., Чудаков Е.В., Щербинин В.Ф., Молчанова Н.Ф., Козлова И.Р., 07.04.2010 г.