

На правах рукописи



**ШМЫРОВА Алиса Владимировна**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ  
ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ ИХ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ**

Специальность 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и  
сплавов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2021

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение и технология обработки материалов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор  
**Егорова Юлия Борисовна**

Официальные оппоненты: – **Овчинников Виктор Васильевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», заведующий кафедрой

– **Александров Андрей Валентинович**,  
кандидат технических наук,  
ЗАО «Межгосударственная ассоциация  
Титан», генеральный директор

Ведущая организация: – ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита диссертации состоится 28 декабря 2021 года в 09 часов 45 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 212.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте [skvorcovasv@mai.ru](mailto:skvorcovasv@mai.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=160761](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=160761)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета

Скворцова С.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Титановые сплавы заняли прочное место в ведущих отраслях техники, возникают все новые области их применения, в которых они дают существенный экономический эффект по сравнению с другими материалами. Однако рост титанового производства возможен только при условии разработки новых высокотехнологичных сплавов, оптимизации состава, структуры и свойств традиционных титановых сплавов, совершенствования существующих и внедрения инновационных технологических процессов.

До настоящего времени разработка практически всех титановых сплавов осуществлялась путем перебора различных композиций легирующих элементов и установлением связей «химический состав – свойства» при различных температурах. Вместе с тем, за годы исследования титана и его сплавов накоплен значительный экспериментальный, теоретический и практический материал, который можно использовать не только для совершенствования техпроцессов, но и для разработки методов моделирования состава сплавов и прогнозирования их свойств. Для титановых сплавов сложность прогнозирования обусловлена их крайней структурной чувствительностью и неоднозначностью влияния типа и параметров структуры на комплекс механических свойств. Это приводит к тому, что свойства даже однотипных полуфабрикатов могут изменяться в довольно широких пределах. Для прогнозирования комплекса свойств промышленных полуфабрикатов целесообразно выявить степень влияния не только типа и параметров структуры, но и колебаний химического состава. При условии получения значимых статистических связей «марочный состав – структура - свойства полуфабриката» их необходимо учитывать при моделировании и совершенствовании технологических процессов, прогнозировании свойств, разработке новых сплавов, повышении качества полуфабрикатов.

Титановые сплавы относятся к материалам, предназначенным для длительной эксплуатации не только при комнатной, но и при достаточно высоких температурах. Однако до сих пор не установлены количественные зависимости прочностных свойств титановых сплавов разных классов от эквивалентов по алюминию и молибдену при различных температурах испытания, сопоставимых с условиями эксплуатации.

Все вышесказанное позволяет констатировать, что установление количественных зависимостей механических свойств промышленных полуфабрикатов из титановых сплавов от химического состава и структуры на основе комплексного статистического анализа литературных данных, результатов экспериментальных исследований, производственных испытаний и промышленного контроля полуфабрикатов, изготовленных по серийным технологиям, а также прогнозирование их механических свойств при температурах эксплуатации является актуальной научной и практической задачей.

### **Цель и задачи**

**Цель** диссертационной работы состояла в установлении статистических закономерностей совместного влияния химического состава и структуры на механические свойства деформированных полуфабрикатов из титановых сплавов и разработка на этой основе методов прогнозирования их механических свойств при температурах 20-600°.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить **следующие задачи:**

1. Обобщить и статистически проанализировать литературные данные, содержащие сведения о пределе прочности отоженных полуфабрикатов из титановых сплавов разных классов при температурах 20-600°С. Провести сопоставление температурных зависимостей предела прочности титановых сплавов на основе кластерного анализа.

2. Собрать и обобщить литературные данные, результаты производственных испытаний и промышленного контроля химического состава, структуры и механических свойств полуфабрикатов (слитки, прутки, поковки, плиты) из различных модификаций титановых сплавов типа Ti-6Al-4V (VT6, VT6C, Grade 5, Grade 23).

3. Провести корреляционно-регрессионный анализ для исследования зависимостей механических свойств от содержания легирующих элементов и примесей (в перерасчете на эквиваленты по алюминию и молибдену), типа и параметров структуры различных полуфабрикатов из сплавов типа Ti-6Al-4V.

4. Выявить структурное состояние с учетом химического состава, обеспечивающее требуемый уровень механических свойств прутков диаметром 16-155 мм из сплава VT6 после отжига.

5. Провести оценку влияния колебаний марочного состава и режимов закалки на механические свойства штампованных поковок дисков из сплава ВТ6 со смешанной структурой.

6. На основе проведенных исследований обосновать модели для прогнозирования механических свойств промышленных полуфабрикатов из титановых сплавов при температурах 20-600°C. Провести проверку предложенных моделей.

7. Предложить рекомендации, направленные на повышение качества полуфабрикатов из сплава ВТ6.

### **Научная новизна**

1. На основе кластерного анализа выявлено 8 групп серийных титановых сплавов с одинаковой интенсивностью снижения предела прочности с ростом температуры. Разработаны зависимости, которые позволяют проводить прогнозирование уровня прочности отожденных полуфабрикатов в условиях эксплуатации, если известно его значение при комнатной температуре.
2. Статистически обосновано, что основной вклад в сохранение прочности при повышенных температурах вносят элементы, эквивалентные алюминию. Степень влияния  $\alpha$ -стабилизаторов и нейтральных упрочнителей (в перерасчете на прочностной эквивалент по алюминию) составляет 40-60 МПа/% (м.) в зависимости от температуры испытания в интервале 20-600°C.
3. Построены прочностные диаграммы в координатах «Предел прочности – эквивалент по алюминию – эквивалент по молибдену», которые позволяют проводить моделирование состава сплава с заданным уровнем прочности при температурах 20-600°C.
4. Уточнены модели для оценки предела прочности, характеристик пластичности и ударной вязкости кованных, прессованных и катаных прутков разного диаметра из сплавов типа Ti-6Al-4V (ВТ6, ВТ6С, Grade 5, Grade23) после стандартного отжига. Статистически обосновано, что марочное изменение суммарного содержания ванадия и железа (в перерасчете на прочностной эквивалент по молибдену) с 2,0 до 3,5% не оказывает значимого влияния на их пластичность и ударную вязкость.
5. Установлены значения эквивалентов по алюминию и молибдену с учетом параметров структуры, обеспечивающие выполнение требований ОСТ1

90173-75 и ОСТ1 90266-86 к механическим свойствам катаных прутков диаметром 16-155 мм из сплава ВТ6.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Разработаны регрессионные модели для оценки средних типичных значений предела прочности отожженных прутков и листов разных сплавов в зависимости от эквивалентов по алюминию и молибдену и температуры испытания в интервале от 20 до 600°C. Полученные результаты дают возможность не только проводить прогнозирование прочностных свойств серийных сплавов при различных температурах, но и обосновать оптимальные составы новых сплавов с учетом требований к условиям их эксплуатации.
2. Разработаны регрессионные модели для прогнозирования механических свойств промышленных прутков из различных модификаций сплавов типа Ti-6Al-4V в зависимости от колебаний химического состава после стандартного отжига.
3. Предложены рекомендации по корректировке химического состава поковок дисков сплава ВТ6 на основе вероятностно-статистического подхода. Для исключения выпадов по «3 $\sigma$ »-интервалу и возможности появления брака целесообразно снизить расчетное содержание легирующих элементов и кислорода в слитках сплава ВТ6 путем корректировки состава шихты.

### **Методология и методы исследования**

Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных ученых, государственные и отраслевые стандарты РФ. При выполнении работы были использованы современные методы исследования: металлографический анализ, испытания на растяжение, ударную вязкость, измерение твердости, комплексный статистический анализ больших массивов экспериментальных и литературных данных, а также результатов производственных испытаний и промышленного контроля.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Статистические закономерности влияния температуры испытания на предел прочности титановых сплавов разных классов в отожженном состоянии.
2. Зависимости предела прочности  $\alpha$ -, псевдо  $\alpha$ -,  $\alpha+\beta$ -титановых сплавов от прочностных эквивалентов по алюминию и молибдену при температурах 20-600°C. Диаграммы «Предел прочности – эквивалент по алюминию – эквивалент по молибдену» при температурах 20-600°C.

3. Регрессионные модели для прогнозирования механических свойств промышленных прутков из различных модификаций сплавов типа Ti-6Al-4V при комнатной температуре.
4. Результаты статистической оценки влияния типа и параметров структуры на механические свойства различных полуфабрикатов из титановых сплавов типа Ti-6Al-4V.
5. Регрессионные модели для прогнозирования механических свойств катаных прутков диаметром 16-155 мм из сплава ВТ6 в зависимости от химического состава, типа и параметров структуры.
6. Результаты статистической оценки влияния колебаний марочного состава и температуры нагрева под закалку на механические свойства поковок дисков сплава ВТ6.

**Степень достоверности результатов.** Все результаты получены на поверенном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения, испытания и измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ, достоверность результатов подтверждается хорошим совпадением экспериментальных данных и теоретических расчетов, использованием методов математической статистики при обработке результатов.

**Апробация работы.** Материалы работы доложены на 22 научно-технических конференциях, в том числе: на XLI - XLVII Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, 2015 - 2021 гг.); XVI, XVIII, XIX Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва, 2017, 2019, 2020 гг.); III, V Международная молодежная научно-практическая конференция «Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование» (г. Курск, 2016, 2018 г.); V, VI, VII Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (г. Сочи, 2019-2021 гг.); I - VI Всероссийская Молодёжная научно-практическая конференция «Колачёвские чтения» (г. Ступино, 2015-2018, 2020, 2021 гг.).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 29 работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, и в 3 статьях в журналах, включенных в международные системы цитирования. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

**Личный вклад** автора состоит в непосредственном участии в постановке цели и задач исследования, в проведении теоретических и экспериментальных

исследований, анализе и обработке полученных результатов, их обобщении, формулировке выводов по диссертации, а также подготовке публикаций и докладов на научных конференциях.

**Объем диссертации и её структура** Диссертация изложена на 181 страницах машинописного текста, содержит 73 рисунка и 61 таблицу. Работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов и списка литературы из 114 наименований.

## **Глава 1. Состояние вопроса**

В главе обобщены и проанализированы результаты исследований по влиянию химического состава, структуры и температуры испытания на механические свойства титановых сплавов. Дана характеристика сплавов типа Ti-6Al-4V. Отмечено, что для отечественных сплавов ВТ6, ВТ6С, ВТ6ч, ВТ6к не были проведены столь же масштабные исследования по влиянию параметров структуры, как для сплавов ВТ3-1, ВТ9 и др. Обзор литературных данных показал, что влияние структуры на механические свойства сплавов типа Ti-6Al-4V неоднозначно, а сопоставление опубликованных результатов осложнено тем, что в большинстве статей приведены неполные сведения о химическом составе, режимах деформации и термической обработки и т.п. Приведен обзор работ по прогнозированию свойств титановых сплавов типа Ti-6Al-4V. На основе литературного обзора сформулированы цель и задачи исследования.

## **Глава 2. Объекты и методы исследования**

Объектами исследования послужили листы, прутки, поковки, плиты из различных титановых сплавов, сведения о которых опубликованы в справочниках, монографиях, статьях, трудах конференций и различной нормативной документации (табл. 1). Объектами исследования также являлись слитки, кованные, катаные и прессованные прутки из различных модификаций сплавов типа Ti-6Al-4V (ВТ6, ВТ6С, Grade 5, Grade 23) и штампованные поковки дисков из сплава ВТ6, изготовленные по промышленным технологиям в период с 1999 по 2016 гг. (табл. 1). Степень легирования полуфабрикатов оценивали с помощью структурных и прочностных эквивалентов легирующих элементов и примесей по алюминию и молибдену  $[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}$ ,  $[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}$ ,  $[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$ ,  $[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$ . Термическая обработка промышленных полуфабрикатов была проведена по стандартным режимам в производственных условиях (за

исключением катаных прутков Ø16-155 мм из сплава ВТ6): прутки сплавов ВТ6, ВТ6С, Grade 5, Grade 23 – простой отжиг при 750-850°C, 1-2 ч, воздух; поковки дисков из сплава ВТ6 – закалка 930-950°C, 2 ч, вода + старение 750°C, 2 часа, воздух. Механические испытания были проведены при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 1497-84, ASTM E 8, ГОСТ 9013-59, ГОСТ 9454-88.

Таблица 1

Объекты исследования

<b>Статистический массив; объем выборки</b>	<b>Задача исследования</b>	<b>Полуфабрикат Сплав</b>	<b>Термическая обработка</b>
Литературные данные 1980-2020 гг.; 185 данных	Исследование зависимости предела прочности от химического состава и температуры 20-600°C	Листы, прутки 37 отечественных сплавов разных классов	Стандартный отжиг
Промышленные данные 1999-2011 гг.; 397 образцов для механических испытаний	Исследование зависимости механических свойств от прочностных эквивалентов по алюминию и молибдену при комнатной температуре	Катаные, кованые, прессованные прутки диаметром 14-150 мм ВТ6, ВТ6С, Grade 5, Grade 23	Заводской отжиг
Отечественные и зарубежные литературные данные 1960-2020 гг.; 348 данных	Исследование влияния типа и параметров структуры на механические свойства сплавов типа Ti-6Al-4V при комнатной температуре	Прутки, поковки, штамповки, плиты ВТ6, ВТ6С, ВТ6ч, Ti-6Al-4V	Отжиг; закалка, закалка+старение по различным режимам
Промышленные данные 2012-2017 гг.; Экспериментальные данные; 344 образца для механических испытаний	Исследование совместного влияния химического состава и структуры на механические свойства при комнатной температуре	Катаные прутки диаметром 16-155 мм ВТ6	Простой, двойной, изотермический отжиг
Промышленные данные 2009-2014 гг.; 695 образцов для механических испытаний	Оценка влияния колебаний марочного состава и температуры закалки на механические свойства при комнатной температуре	Штампованные поковки дисков ВТ6	Закалка + старение

Экспериментальные исследования\* проводили на образцах, вырезанных в продольном направлении из катаных прутков Ø16-155 мм сплава ВТ6.

\* Основные экспериментальные результаты получены на оборудовании ресурсного центра коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ.

Образцы подвергали отжигу по разным режимам: простой отжиг (600-920°C, 20-180 мин, охлаждение на воздухе или с печью), двойной (900-960°C, 20-60 мин, охлаждение на воздухе, 450-730°C, 60-360 мин, охлаждение на воздухе), изотермический (850-1000°C, 30-120 мин, охлаждение в печи до 500-750°C, выдержка до 2 ч, охлаждение на воздухе). Температуру полиморфного превращения ( $T_{\text{пл}}$ ) определяли методом пробных закалок. Нагрев образцов проводили в воздушной атмосфере в электропечи СНОЛ-2.2,5.1,8/10-ИЗ (до 1000°C) и в высокотемпературной электропечи СНОЛ 6/12 (до 1250°C). Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе АХЮ Observer.Alm (Karl Zeiss Jena, Германия). Анализ полученных изображений осуществляли с помощью программного комплекса NEXSYS ImageExpert Pro3.6. Измерение твердости по методу Роквелла проводили на приборе ВУЕНЛЕР Macromet 5100Т по шкале НРС с нагрузкой 1500 Н согласно ГОСТ 9013-59. Свойства при испытаниях на растяжение определяли в соответствии с ГОСТ 1497-84 на гладких образцах диаметром 5 мм, длиной рабочей части 25 мм при нормальной температуре на универсальной машине TIRA-test 2300. Испытания на ударный изгиб образцов с U-образным концентратором (КСУ) проводили при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 9454-78.

Статистический анализ в ППП «Stadia» и «Statistica» включал первичную статистическую обработку, статистическую оценку стабильности, корреляционно-регрессионный и кластерный анализ с доверительной вероятностью 0,95 по стандартным методикам. Долю вариации свойств, обусловленную влиянием какого-либо фактора, оценивали с помощью соотношения:  $\gamma=R^2 \cdot 100\%$  ( $R$  – коэффициент корреляции). Исследуемые факторы: содержание легирующих элементов и примесей, структурные и прочностные эквиваленты по алюминию и молибдену, механические свойства (предел прочности  $\sigma_b$ , относительное удлинение  $\delta$ , поперечное сужение  $\psi$ , ударная вязкость КСУ, твердость по Роквеллу НРС), тип и параметры микроструктуры (размер  $\beta$ -зерна  $D_\beta$  и  $\alpha$ -колоний  $d_\alpha$ , толщина пластин первичной  $b_\alpha$  и вторичной  $b_2$   $\alpha$ -фазы, размер  $\alpha$ -глобулей  $a_\alpha$ ), диаметр прутка, режимы термической обработки, температура испытания.

### Глава 3. Статистическое сопоставление и прогнозирование механических свойств титановых сплавов от эквивалентов по алюминию и молибдену при температурах эксплуатации (20-600°C)

О возможности работы титановых сплавов при различных температурах можно судить, прежде всего, по зависимости кратковременных прочностных свойств от температуры. На первом этапе работы для каждого сплава на основе обобщения опубликованных сведений были предварительно сопоставлены температурные зависимости (при 20÷600°C) предела прочности прутков и листов после стандартного отжига. На основе процедуры «Сравнение регрессий» было установлено, что предел прочности прутков и листов незначительно (со статистической точки зрения) отличаются друг от друга, поэтому они были объединены в одну статистическую совокупность.

Сопоставление сплавов по уровню прочности осложняется тем, что в разных температурных интервалах степень разупрочнения сплавов неодинакова. Поэтому было проведено сопоставление не абсолютных значений предела прочности (в МПа), а относительных, выраженных в процентах по сравнению с комнатной температурой. Для сопоставления был выбран метод кластерного анализа, который позволил выделить 8 групп сплавов с приблизительно одинаковой интенсивностью снижения предела прочности  $\sigma_b$  с повышением температуры (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики полиномиальной модели 3-й степени (1) для оценки предела прочности (в % по отношению к комнатной температуре) титановых сплавов в зависимости от температуры испытания 20-600°C (отжиг по стандартным режимам)

№ кластера	Сплав	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$R^*$	$S_M^*$ , %
1	BT1-00; BT1-0	-0,3011	0,00042	$-2,135 \cdot 10^{-7}$	0,98	2,3
2	AT2; OT4-0; OT4-1	-0,2612	0,00053	$-4,966 \cdot 10^{-7}$	0,99	2,2
3	AT3; AT4; OT4; BT4; BT16	-0,2100	0,00055	$-6,364 \cdot 10^{-7}$	0,98	2,5
4	BT5; BT5-1	-0,1750	0,00027	$-2,019 \cdot 10^{-7}$	0,99	1,4
5	BT6C; BT6; BT14; BT23; BT22; BT15	-0,1290	0,00026	$-3,326 \cdot 10^{-7}$	0,99	1,3
6	BT20; BT3-1	-0,1320	0,00030	$-3,737 \cdot 10^{-7}$	0,99	0,8
7	BT8; BT9; BT36; BT46; BT25Y; BT25	-0,0994	0,00022	$-2,859 \cdot 10^{-7}$	0,99	1,0
8	BT18; BT18Y; BT41	-0,0832	0,00021	$-2,852 \cdot 10^{-7}$	0,99	1,9

Примечание: \*  $R$  – коэффициент корреляции,  $S_M$  – статистическая ошибка модели.

Для каждой группы были исследованы регрессионные зависимости  $\sigma_B$  (в %) от температуры испытания. Из нескольких моделей (линейная, экспоненциальная, параболическая, полиномиальная 3-й степени) был выбран полином 3-й степени, имеющий наиболее высокие формальные характеристики (коэффициент корреляции 0,99; минимальная ошибка модели 1,0-2,5%):

$$\sigma_B = 100 + b_1 \cdot (t - 20) + b_2 \cdot (t - 20)^2 + b_3 \cdot (t - 20)^3, \% \quad (1)$$

Коэффициенты регрессии  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  приведены в табл. 2, а температурные зависимости для каждого кластера – на рис. 1.

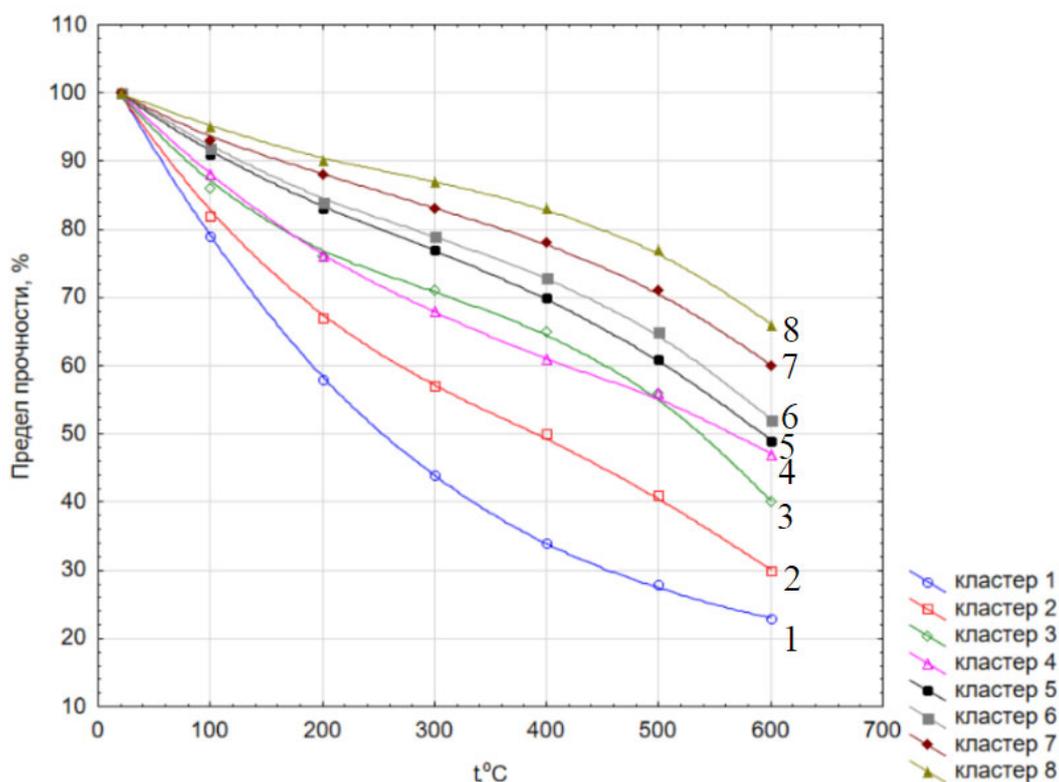


Рисунок 1 - Температурная зависимость предела прочности (в % по отношению к комнатной температуре) разных кластеров титановых сплавов (отожженное состояние).

В наибольшей степени  $\sigma_B$  падает с повышением температуры для технического титана, входящего в кластер 1. Наименьшая интенсивность снижения  $\sigma_B$ , как и следовало ожидать, наблюдается для кластера 8, в который входят высокожаропрочные псевдо  $\alpha$ -сплавы ВТ18, ВТ18У, ВТ41. При 300°C сплавы этой группы сохраняют до ~90% предела прочности, характерного для комнатной температуры, в то время как технический титан до ~45%. Внутри каждого кластера  $\sigma_B$  может изменяться в довольно широких пределах в зависимости от химического состава.

С увеличением  $[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$  с  $\sim 0,5$  до  $\sim 16\%*$  наблюдается рост  $\sigma_{\text{В}}$  при всех исследованных температурах. С повышением температуры с 20 до 600°C наклон прямых немного уменьшается, но степень влияния  $\alpha$ -стабилизаторов и нейтральных упрочнителей остается довольно высокой и составляет 40-60 МПа/% (табл. 3). С увеличением  $[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$  с 0 до  $\sim 8,0\%$   $\sigma_{\text{В}}$  повышается по прямолинейной зависимости, но угол наклона прямых уменьшается с ростом температуры и влияние  $\beta$ -стабилизаторов на  $\sigma_{\text{В}}$  ослабляется с 50 до 12 МПа/% (табл. 3). На основе проведенных исследований построены прочностные диаграммы, которые позволяют проводить моделирование состава сплава с заданным уровнем прочности при температурах 20-600°C (рис. 2).

Таблица 3

Результаты регрессионного анализа зависимости предела прочности от прочностных эквивалентов по алюминию и молибдену при различных температурах для  $\alpha$ -, псевдо  $\alpha$ - и  $\alpha+\beta$ -сплавов

№	Температура испытаний, °С	Регрессионная модель $[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}=2,3-16,0\%$ , $[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}=0,1-8,0\%$	R	$S_{\text{м}}$ , МПа
1	20	$\sigma_{\text{В}}=235+60[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}+50[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$	0,96	35
2	100	$\sigma_{\text{В}}=200+56[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}+36[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$	0,97	20
3	200	$\sigma_{\text{В}}=170+52[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}+34[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$	0,97	25
4	300	$\sigma_{\text{В}}=150+50[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}+33[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$	0,96	25
5	400	$\sigma_{\text{В}}=120+49[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}+30[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$	0,96	20
6	500	$\sigma_{\text{В}}=90+46[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}+23[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$	0,96	25
7	600	$\sigma_{\text{В}}=70+40[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}+12[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$	0,95	25

Сравнение результатов производственных испытаний прутков из различных модификаций сплава Ti-6Al-4V и теоретической прочности, рассчитанной в зависимости от конкретного химического состава по соотношению (1) из табл. 3, показало наличие отклонений, которые могут быть обусловлены различными технологическими факторами: влиянием конкретных режимов обработки давлением и термической обработки, структурой, наличием неучтенных примесей, методическими ошибками и т.п.

\* - здесь и далее указаны % по массе.

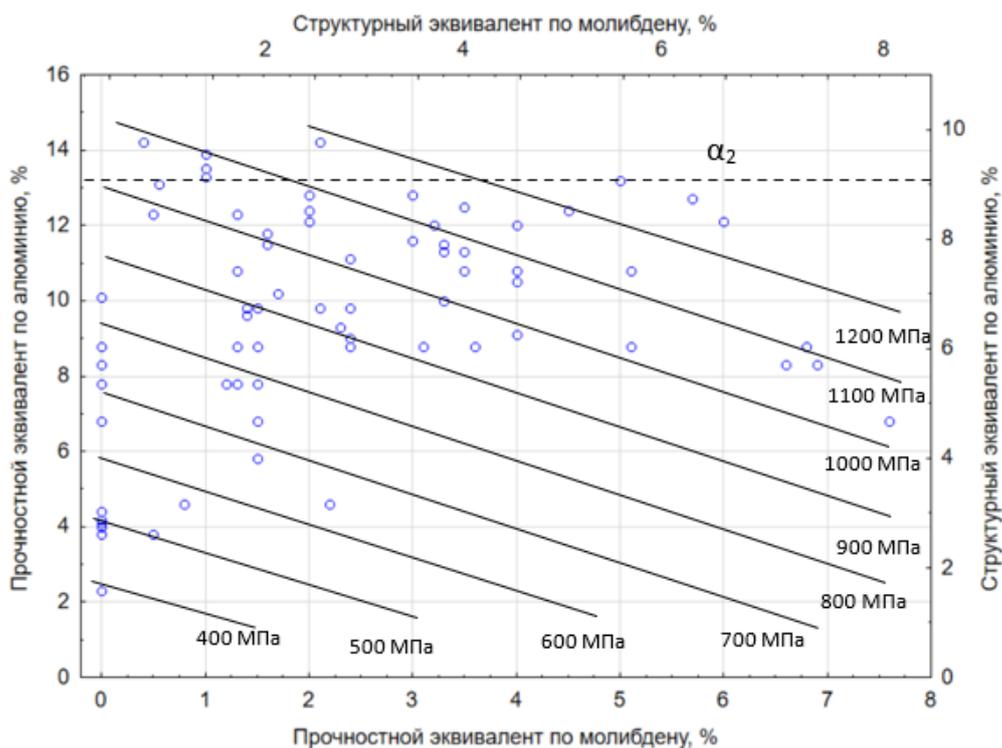


Рисунок 2 – Прочностная диаграмма для  $\alpha$ -, псевдо  $\alpha$ - и  $\alpha+\beta$ -титановых сплавов при 20°C.

Поэтому на следующем этапе задача исследования состояла в уточнении свободного члена и факторных коэффициентов регрессии в соотношении (1) из табл. 3 на основе данных промышленного контроля механических свойств прутков из различных модификаций сплава Ti-6Al-4V (табл. 4).

Таблица 4  
Прочностные эквиваленты по алюминию и молибдену прутков из различных модификаций сплава Ti-6Al-4V

Полуфабрикат	$[Al]_{\text{экв}}^{np}, \%$		$[Mo]_{\text{экв}}^{np}, \%$	
	среднее	S*	среднее	S*
Кованые прутки Ø 14 мм из сплава BT6	9,5	0,68	2,7	0,13
Кованые прутки Ø 14 мм из сплава BT6C	9,0	0,38	2,7	0,09
Кованые прутки Ø 14 мм из сплава Grade 5	9,6	0,72	2,8	0,15
Кованые прутки Ø 14 мм из сплава Grade 23	8,8	0,35	2,6	0,09
Катаные прутки Ø 15-150 мм из сплава BT6	10,4	0,71	2,6	0,17
Прессованные прутки Ø14-40 мм из сплава BT6	9,4	0,4	3,0	0,11
Кованые прутки Ø70-90 мм из сплава Grade 5	10,2	0,48	2,7	0,17

Примечание: \* S – стандартное отклонение.

Было выявлено, что химический состав полуфабрикатов из сплавов типа Ti-6Al-4V отличается от классического состава ( $[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}=7,0\%$ ,  $[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}=3,2\%$ ;  $[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПП}}=9,8\%$ ,  $[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПП}}=2,4\%$ ). Эквиваленты и механические свойства прутков промышленного производства могут изменяться в следующих пределах (указан трехсигмовый интервал):  $[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}=7,0-10,0\%$ ,  $[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}=2,5-4,0\%$ ;  $[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПП}}=7,5-12,5\%$ ,  $[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПП}}=2,0-3,5\%$ ,  $\sigma_B=800-1150\text{МПа}$ ,  $\delta=7-25\%$ ,  $\psi=22-57\%$ ,  $KCU=0,3-1,2\text{МДж/м}^2$ . Было установлено, что предел прочности в большей степени зависит от степени легирования сплава по сравнению с другими свойствами (коэффициент корреляции  $R=0,65-0,68$ ). Характеристики пластичности и ударной вязкости значимо зависят от содержания элементов, эквивалентных алюминию ( $R= -0,45 \div -0,63$ ), но не зависят от  $[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПП}}$  ( $R \leq 0,3$ ). Это связано с тем, что единственным легирующим элементом в сплавах типа Ti-6Al-4V, относящимся к  $\beta$ -стабилизаторам, является ванадий, который оказывает благоприятное влияние на пластичность сплавов.

На основе проведенного анализа было подтверждено, что коэффициенты упрочнения  $\sim 60$  и  $\sim 50$  МПа/% в соотношении (1) из табл. 3 являются статистически устойчивыми для всех исследованных прутков и не зависят от вида деформации (ковка, прокатка или прессование). Поэтому для оценки предела прочности промышленных прутков можно использовать соотношение:

$$\sigma_B^{\text{расч}} = \sigma_0 + (60 \pm 5)[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПП}} + (50 \pm 5)[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПП}} \quad (2)$$

Так как изменение  $[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПП}}$  в статистическом интервале легирования, равном 2,0 – 3,5%, не оказывает значимого влияния на характеристики пластичности и ударную вязкость сплавов типа Ti-6Al-4V, то их можно оценить с помощью соотношений:

$$\delta^{\text{расч}} = \delta_0 - (1,5 \pm 0,5)[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПП}} \quad (3)$$

$$\psi^{\text{расч}} = \psi_0 - (2,5 \pm 0,5)[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПП}} \quad (4)$$

$$KCU^{\text{расч}} = KCU_0 - (0,11 \pm 0,05)[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПП}} \quad (5)$$

Свободные члены  $\sigma_0$ ,  $\delta_0$ ,  $\psi_0$ ,  $KCU_0$  для прутков, полученных различными способами, приведены в табл. 5. Модели (2) – (5) пригодны для прогнозной оценки среднестатистических значений механических свойств прутков сплавов типа Ti-6Al-4V с ошибками, определяемыми существующим уровнем производства полуфабрикатов, и доверительной вероятностью 0,95. Оценка

предела прочности прутка при комнатной температуре по модели (2) дает возможность провести прогноз уровня его прочности при разных температурах с использованием полинома 3-й степени (1) и коэффициентов регрессии, приведенных в табл. 2.

Таблица 5

Значения свободных членов в соотношениях (2) - (5) для прутков из различных модификаций сплава Ti-6Al-4V после отжига\* при 750-850°C

Полуфабрикат	Диаметр прутка, мм	$\sigma_0$ , МПа	$\delta_0$ , %	$\psi_0$ , %	$KCU_0$ , МДж/м <sup>2</sup>
Кованый пруток	14	280	28	65	1,7
	70-90	270	26	60	1,7
Катаный пруток	15-50	260	32	65	1,7
	50-100	260	30	63	1,6
	100-150	255	25	60	1,5
Прессованный пруток	14-40	300	30	65	1,7
Статистическая ошибка модели		35	2,0	5,0	0,15

Примечание: \* - охлаждение на воздухе.

#### Глава 4. Статистические исследования влияния химического состава и структуры на механические свойства сплавов типа Ti-6Al-4V

Задача работы на следующем этапе исследований состояла в статистической оценке совместного влияния колебаний марочного состава, типа и параметров структуры на механические свойства прутков диаметром 16-155 мм из сплава ВТ6, изготовленных в 2012-2017 гг. Типичные структуры приведены на рис. 3. В зависимости от колебаний химического состава, режимов отжига, типа структуры, диаметра прутка механические свойства имеют большой общий разброс, выходящий за границы ОСТ (табл. 6, 7).

При одинаковом химическом составе образцы с глобулярной структурой имеют более высокие характеристики прочности (на ~60-80 МПа) и пластичности по сравнению с остальными структурами (рис. 4), а при одном и том же уровне прочности относительное удлинение образцов с глобулярной структурой выше на ~5% по сравнению с пластинчатой, а поперечное сужение - на ~15% (рис. 5), что совпадает с результатами проведенного статистического анализа литературных данных. Характеристики пластичности образцов со смешанной структурой лежат немного ниже глобулярной ( $\delta$  на ~2%;  $\psi$  на ~5%), а свойства образцов с переходной структурой немного выше пластинчатой.

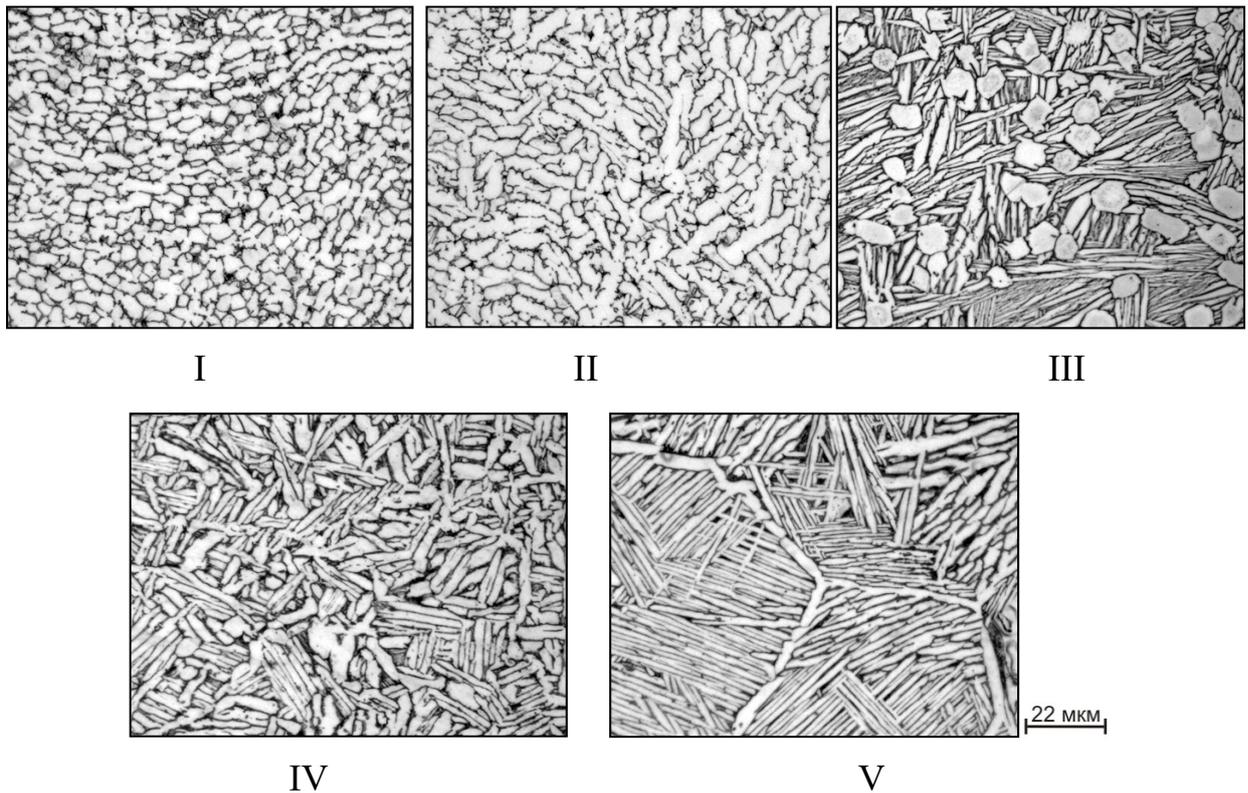


Рисунок 3 – Типичные микроструктуры прутков сплава ВТ6 после отжига: I – глобулярная, II – переходная, III - смешанная, IV – корзинчатая, V – пластинчатая структуры.

Таблица 6  
Механические свойства\* прутков диаметром 16-155 мм из сплава ВТ6 с разным типом структуры в зависимости от видов отжига

Вид отжига	Число и доля образцов	[Al] <sub>ЭКВ</sub> <sup>СТР</sup> %	[Mo] <sub>ЭКВ</sub> <sup>СТР</sup> %	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	ψ, %	KCU, МДж/м <sup>2</sup>	HRC
Простой	196 (57%)	<u>7,1-9,6</u> 8,5	<u>2,8-4,1</u> 3,2	<u>788-1109</u> 990	<u>8-20</u> 15,4	<u>13-48</u> 37,3	<u>0,31-1,14</u> 0,52	<u>26-37</u> 33
Двойной	96 (28%)	<u>7,1-9,3</u> 8,0	<u>2,9-4,4</u> 3,3	<u>816-1074</u> 937	<u>6-20</u> 16,0	<u>14-59</u> 37,0	<u>0,36-1,3</u> 0,8	<u>27-40</u> 32
Изотермический	52 (15%)	<u>8,1-9,5</u> 8,8	<u>3,1-4,4</u> 3,7	<u>851-1063</u> 985	<u>7-21</u> 15,3	<u>9-38</u> 28,4	<u>0,32-0,88</u> 0,48	<u>31-37</u> 35
Все виды отжига	344 (100%)	<u>7,1-9,6</u> 8,4	<u>2,8-4,4</u> 3,3	<u>788-1109</u> 976	<u>6,0-21,0</u> 15,6	<u>9,0-59,0</u> 36,0	<u>0,31-1,31</u> 0,57	<u>26-40</u> 33
Общий разброс		2,5	1,6	321	15,0	50,0	1,0	14
ОСТ1 90173-75 Прутки 10-60 мм				900-1050	≥10	≥30	≥0,4	-
ОСТ1 90266-86 Прутки 65-100 мм				900-1050	≥10	≥27	≥0,3	-
ОСТ1 90266-86 Прутки от 110 мм				835-1050	≥8	≥25	≥0,3	-

Примечание: \* - в числителе – диапазон, в знаменателе – среднее.

Механические свойства\* прутков диаметром 16-155 мм сплава ВТ6  
в зависимости от типа структуры

Тип и параметры структуры	Число и доля образцов	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	HRC
I (глобулярная) $a_\alpha = 2,1-9,3$ мкм	103 (30%)	$\frac{929-1076}{1013}$	$\frac{10-21}{17}$	$\frac{24-48}{37}$	$\frac{0,31-0,92}{0,49}$	$\frac{30-36}{34}$
II (переходная) $b_1 = 1,3-5,5$ мкм	85 (25%)	$\frac{816-1100}{975}$	$\frac{7-20}{15}$	$\frac{9-48}{35}$	$\frac{0,34-1,31}{0,56}$	$\frac{28-37}{33}$
III (смешанная) $a_\alpha = 2,9-9,5$ мкм $b_2 = 1,0-4,1$ мкм	97 (28%)	$\frac{788-1109}{970}$	$\frac{10-21}{16}$	$\frac{20-59}{39}$	$\frac{0,33-1,24}{0,58}$	$\frac{27-38}{32}$
IV (корзинчатая) $b_\alpha = 1,7-3,6$ мкм	14 (4%)	$\frac{897-1053}{991}$	$\frac{6-20}{14}$	$\frac{14-50}{28}$	$\frac{0,47-0,78}{0,67}$	$\frac{30-36}{34}$
V (пластинчатая) $b_\alpha = 2,0-5,5$ мкм	45 (13%)	$\frac{818-1050}{896}$	$\frac{8-19}{14}$	$\frac{13-47}{30}$	$\frac{0,49-1,14}{0,8}$	$\frac{26-40}{32}$
I-V	344 (100%)	$\frac{788-1109}{976}$	$\frac{6,0-21,0}{15,6}$	$\frac{9,0-59,0}{36,0}$	$\frac{0,31-1,31}{0,57}$	$\frac{26-40}{33}$

Примечание: \* - в числителе – диапазон, в знаменателе – среднее.

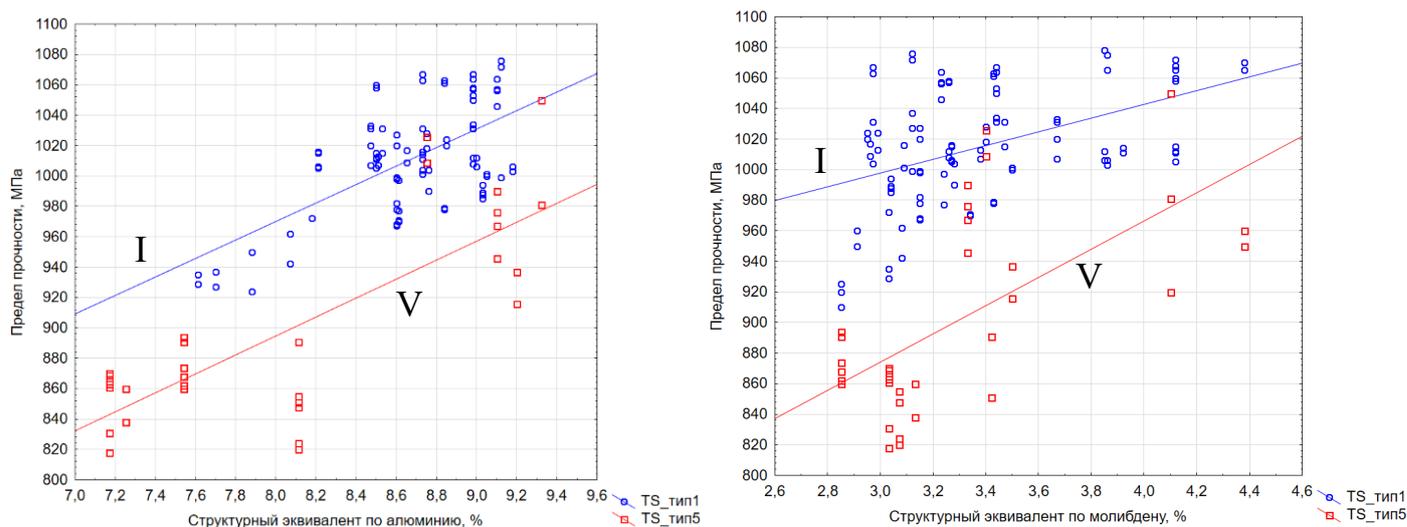


Рисунок 4 - Зависимость предела прочности прутков диаметром 16-155 мм из сплава ВТ6 с глобулярной (I) и пластинчатой структурами (V) от эквивалентов по алюминию и молибдену после разных видов отжига.

Для прутков сплава ВТ6 с глобулярной и смешанной структурами увеличение размера  $\alpha$ -глобулей с  $\sim 2,0$  до  $\sim 9,5$  мкм приводит к снижению предела прочности, росту пластичности и ударной вязкости. Для прутков с пластинчатой и переходной структурами увеличение толщины  $\alpha$ -пластин с  $\sim 1,5$  до  $5,5$  мкм приводит к снижению  $\sigma_b$ . На зависимостях  $\delta$  и  $\psi$  наблюдается максимум при толщине пластин  $\sim 3,0-3,5$  мкм, что соответствует закономерностям, установленными Бруном М.Я. для сплавов ВТ3-1 и ВТ9.

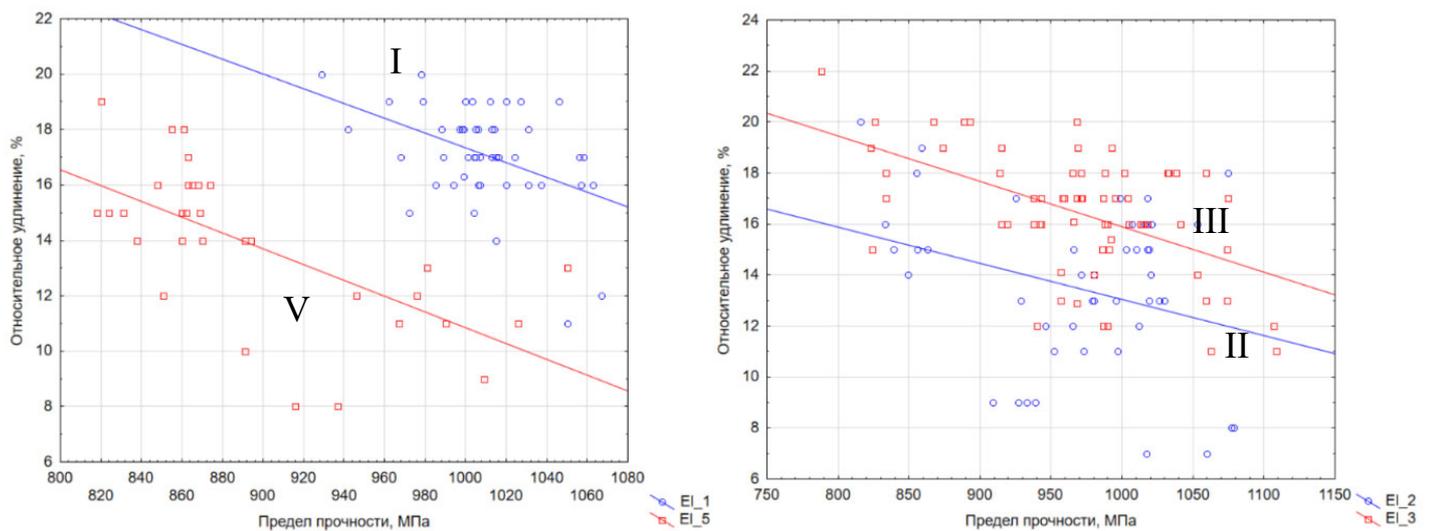


Рисунок 5 - Сопоставление относительного удлинения в зависимости от предела прочности прутков диаметром 16-155 мм из сплава ВТ6 с глобулярной (I), переходной (II), смешанной (III) и пластинчатой структурами (V).

Характеристики пластичности  $\delta$  и  $\psi$  для прутков с глобулярной и смешанной структурами в большей степени удовлетворяют требованиям ОСТ по сравнению с другими структурами. Однако для всех типов структуры встречаются значения предела прочности, лежащие выше максимума по ОСТ (1050 МПа). Это может быть связано с влиянием не только типа структуры, но и химического состава и размеров структурных составляющих.

Для разных типов структуры были выявлены значения эквивалентов и параметров структуры, которые не обеспечивают выполнение требований ОСТ. Например, для прутков с глобулярной структурой установлено, что если  $[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} > 8,5\%$ , а размер глобулей менее  $\sim 4$  мкм, то сплав ВТ6 может иметь прочностные и пластические свойства, не удовлетворяющие требованиям ОСТ ( $\sigma_{\text{в}} \geq 1050$  МПа,  $\delta \leq 8-10\%$ ,  $\psi \leq 25-30\%$ ). Для прутков с пластинчатой структурой выявлено, что при толщине пластин от 2,5 до 5,5 мкм встречаются значения прочности, выходящих за регламентируемые значения ( $\sigma_{\text{в}} < 835-900$  МПа), что характерно для прутков с эквивалентами по алюминию и молибдену  $< 8,2\%$  и  $< 3,4\%$  соответственно.

На основе проведенных исследований установлены зависимости параметров структуры прутков от режимов отжига, а также механических свойств от параметров структуры разного типа (табл. 8). Построены диаграммы в координатах «Эквивалент по алюминию - параметр структуры – предел прочности» при разных значениях эквивалента по молибдену, позволяющие

прогнозировать предел прочности прутков сплава ВТ6 с различной структурой (рис. 6).

Таблица 8

Результаты регрессионного анализа зависимости предела прочности прутков сплава ВТ6 от параметров структуры и структурных эквивалентов по алюминию и молибдену

Тип структуры	Регрессионная модель	R	S <sub>М</sub> , МПа
Глобулярная	$\sigma_{\text{в}}=350 + 65[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{cmp}} + 45 [Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{cmp}} - 11 \cdot a_{\alpha}$	0,75	30
Переходная	$\sigma_{\text{в}}=332 + 65[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{cmp}} + 45 [Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{cmp}} - 18b_{\alpha}$	0,72	29
Смешанная	$\sigma_{\text{в}}=430 + 65[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{cmp}} + 45 [Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{cmp}} - 11 \cdot a_{\alpha} - 30 \cdot b_2$	0,78	24
Пластинчатая	$\sigma_{\text{в}}=290 + 65 [Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{cmp}} + 45 [Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{cmp}} - 18b_{\alpha}$	0,77	25

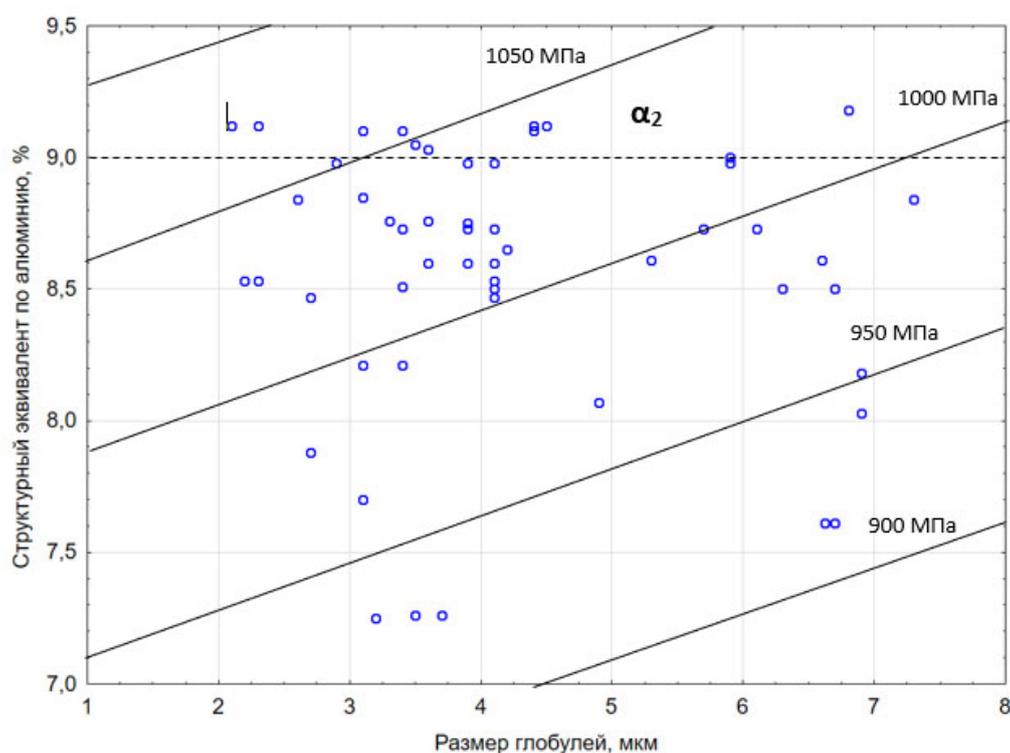


Рисунок 6 - Диаграмма «Эквивалент по алюминию – толщина  $\alpha$ -глобулей – предел прочности» для прутков диаметром 15-60 мм из сплава ВТ6 с глобулярной структурой и эквивалентом по молибдену 3,3%, соответствующим среднему статистическому значению.

Из диаграмм следует, что предел прочности, удовлетворяющий требованиям отраслевых стандартов, можно получить при разных сочетаниях параметров структуры и эквивалентов по алюминию и молибдену. Однако для

прутков с глобулярной и смешанной структурами для этого существует больше вариантов по сравнению с пластинчатой и переходной структурами.

Если ориентироваться на обеспечение значений предела прочности 975 МПа (среднее по ОСТ), то с учетом исключения возможности образования алюминида титана  $\alpha_2$  для прутков с глобулярной структурой целесообразно обеспечить следующие значения:  $[Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} = 8,0\%$ ,  $[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} = 3,3\%$ , размер глобулей  $\sim 3,5-4,5$  мкм (рис. 6). Такие параметры для прутков, имеющих после деформации глобулярную структуру с размером глобулей  $\sim 3,0-4,0$  мкм, можно получить после отжига по режиму 820-840°C, 45-60 мин, охлаждение на воздухе.

Задача следующего этапа работы состояла в оценке влияния температуры нагрева под закалку, содержания легирующих элементов и примесей, эквивалентов по алюминию и молибдену на механические свойства штамповок дисков титанового сплава ВТ6. Микроструктура относилась преимущественно к глобулярно-пластинчатому (смешанному) типу (баллы 2 и 2а по 9-балльной шкале). Выявлено, что доля вариации прочностных свойств, обусловленная колебаниями химического состава (в перерасчете на эквиваленты), составляет  $\sim 35\%$ ; пластических свойств и ударной вязкости – всего  $\sim 10-15\%$ ; роль остальных факторов незначима. На основе вероятностного подхода обосновано, что для исключения возможности выпадов по «3 $\sigma$ »-интервалу целесообразно снизить расчетное содержание легирующих элементов и кислорода в слитках сплава ВТ6 путем корректировки состава шихты.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Проведено сопоставление предела прочности разных титановых сплавов на основе кластерного анализа, который позволил выделить 8 групп (кластеров) сплавов с приблизительно одинаковой интенсивностью снижения предела прочности с повышением температуры испытания в интервале 20-600°C.
2. Предложены регрессионные модели, позволяющие провести оценку (с доверительной вероятностью 0,95) прогнозируемого уровня предела прочности сплавов разных классов при температуре эксплуатации, если известно значение предела прочности отожженного полуфабриката при комнатной температуре.

3. Обоснованы регрессионные модели для оценки типичных значений предела прочности отоженных прутков и листов из  $\alpha$ -, псевдо  $\alpha$ -,  $\alpha+\beta$ -сплавов от прочностных эквивалентов по алюминию и молибдену при температурах  $20\div 600^\circ\text{C}$ , сопоставимых с условиями эксплуатации.
4. Уточнены модели для оценки средних значений механических свойств прутков сплавов типа Ti-6Al-4V от прочностных эквивалентов легирующих элементов и примесей по алюминию и молибдену при комнатной температуре (с доверительной вероятностью 0,95). Статистически обосновано, что изменение суммарного содержания ванадия и железа (в перерасчете на прочностной эквивалент по молибдену) с 2,0 до 3,5% не оказывает значимого влияния на пластичность и ударную вязкость сплавов типа Ti-6Al-4V (после стандартного отжига).
5. Получены экспериментальные данные о совместном влиянии химического состава, типа и параметров структуры на механические свойства катаных прутков сплава ВТ6. На основе проведенных исследований установлены зависимости параметров структуры от режимов отжига, а также механических свойств от химического состава и параметров структуры разного типа.
6. На основе обобщения литературных и экспериментальных данных обосновано, что при одном и том же уровне прочности относительное удлинение прутков сплава ВТ6 с глобулярной структурой выше на  $\sim 5\%$  по сравнению с пластинчатой, а поперечное сужение выше на  $\sim 15\%$ . Свойства образцов со смешанной структурой лежат немного ниже глобулярной ( $\delta$  на  $\sim 2\%$ ;  $\psi$  на  $\sim 5\%$ ), а свойства образцов с переходной немного выше пластинчатой.
7. Для прутков сплава ВТ6 с разным типом структуры были обоснованы значения эквивалентов и параметров структуры, которые обеспечивают выполнение требований отраслевых стандартов.
8. Предложены рекомендации для повышения качества поковок дисков титанового сплава ВТ6. На основе вероятностного подхода обосновано, что целесообразно снизить расчетное содержание легирующих элементов и кислорода в слитках сплава ВТ6 путем корректировки состава шихты.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. Егорова Ю.Б. Влияние химического состава и термической обработки на механические свойства поковок псевдо  $\beta$ -титанового сплава / *Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Чибисова Е.В., Шмырова А.В.* // Вестник Московского авиационного института, 2018. №1, с.190-201.
2. Egorova Y.B. Influence of Chemical Composition and Heat Treatment Modes on Mechanical Properties of Titanium Alloy VT22 Bars / *Egorova Y.B., Davydenko L.V., Shmyrova A.V.* // Solid State Phenomena, 2020, v. 299, p. 582-587.
3. Полькин И.С. Статистическое сопоставление прочностных свойств титана и его сплавов при повышенных температурах / *Полькин И.С., Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Шмырова А.В.* // Титан, 2020, №3-4, с. 18-24.
4. Егорова Ю.Б. Влияние химического состава и режимов термической обработки на механические свойства прутков титанового сплава VT22 / *Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Шмырова А.В.* // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал, 2019, т. 7, №3, с.17-22.
5. Egorova Y.B. Prediction of Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Bars Depending on Aluminum and Molybdenum Strength Equivalents / *Egorova Y.B., Davydenko L.V., Shmyrova A.V.* // Solid State Phenomena, 2021, v. 316, p. 227-232.
6. Егорова Ю.Б. Прогнозирование механических свойств прутков из сплава Ti-6Al-4V в зависимости от прочностных эквивалентов по алюминию и молибдену при температурах 20-600°C / *Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Мамонов И.М., Шмырова А.В.* // Титан, 2021, №2, с. 25-33.
7. Egorova Y.B. Predicting Strength of Titanium Alloys Using Aluminum and Molybdenum Equivalents at Operating Temperatures / *Egorova Y.B., Davydenko L.V., Shmyrova A.V.* // Defect and Diffusion Forum, 2021, Vol. 410, p.15-20.