

На правах рукописи



**ЧИБИСОВА Евгения Валерьевна**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ  
И ОБОСНОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ  
ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность 2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре «Моделирование систем и информационные технологии» Ступинского филиала 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  
«Материаловедение»
- **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 02 декабря 2021 года в 13 часов 00 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 С. В. и по электронной почте skvorcovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=160189](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=160189)

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

Ученый секретарь  
диссертационного Совета

Скворцова С.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В настоящее время развитие материаловедения и технологий обработки материалов происходит не только на основе традиционных методов, но и с использованием моделирования, конструирования новых материалов и прогнозирования свойств с использованием различных программных комплексов. Однако точность моделирования и прогнозирования в материаловедении до сих пор недостаточно высока, что связано с неоднозначностью и неопределенностью связей «состав материала – структура – свойства». Это обусловлено влиянием довольно большого числа погрешностей, среди которых, в частности применительно к теме диссертации, можно выделить следующие: 1) разброс состава, структуры и свойств сплавов (как в объеме изделия, так и внутри партии однотипных изделий), связанный с неизбежной вариативностью технологических режимов при производстве полуфабрикатов; 2) случайные погрешности измерения химического состава и физико-механических свойств материалов.

Поэтому важно учитывать статистический характер формирования конечных служебных характеристик изделия. Прогнозирование свойств титановых сплавов должно быть основано на вероятностном подходе и комплексном статистическом исследовании результатов экспериментов, производственных испытаний и промышленного контроля полуфабрикатов, изготовленных по серийным технологиям. Это, в свою очередь, позволит формировать более достоверные базы данных для дальнейших исследований.

Вероятностно-статистические методы можно также успешно использовать для повышения качества промышленных полуфабрикатов. Для этого необходимо выявить влияние колебаний химического состава и технологических режимов обработки на формирование структуры и механические свойства полуфабрикатов.

Все вышесказанное позволяет констатировать, что установление зависимостей различных свойств полуфабрикатов из титановых сплавов от химического состава, структуры и режимов термической обработки на основе комплексного статистического анализа результатов экспериментальных исследований, производственных испытаний и промышленного контроля полуфабрикатов, изготовленных по серийным технологиям, а также обоснование методов вероятностного прогнозирования свойств, в том числе и для повышения качества изделий, является актуальной научной и практической задачей.

### Цель и задачи

**Цель** настоящей работы состояла в установлении статистических закономерностей влияния химического состава, режимов термической обработки, структуры на механические свойства прутков и поковок из титановых сплавов и обосновании регрессионных моделей для вероятностного прогнозирования комплекса свойств и повышения качества полуфабрикатов.

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

- собрать и обобщить литературные данные, результаты производственных испытаний и промышленного контроля химического состава, температуры полиморфного превращения ( $T_{\text{ПП}}$ ) слитков и механических свойств прутков и поковок из титановых сплавов после стандартной термической обработки; провести оценку стабильности исследуемых факторов;
- исследовать влияние химического состава, структуры и различных режимов отжига на механические свойства прутков диаметром 15-150 мм из сплава ВТ6;
- провести корреляционно-регрессионный анализ для исследования зависимостей механических свойств от степени легирования, режимов термической обработки, типа и параметров структуры прутков и поковок титановых сплавов Ti-6Al-4V (ВТ6, ВТ6С, ВТ6ч, Grade 5, Grade 23), ВТ3-1, Ti-10V-2Fe-3Al;
- провести статистическую оценку возможности микролегирования кислородом титана и титановых сплавов для повышения прочностных свойств полуфабрикатов с учетом исключения возможности образования  $\alpha_2$ -фазы;
- на основе проведенных исследований обосновать математические модели для прогнозирования температуры полиморфного превращения слитков разных сплавов и механических свойств прутков 15-150 мм из сплава ВТ6, поковок из сплавов ВТ3-1 и Ti-10V-2Fe-3Al; провести проверку предложенных моделей;
- разработать рекомендации, направленные на повышение качества полуфабрикатов из различных модификаций сплава Ti-6Al-4V на основе оценки стабильности их химического состава, режимов термической обработки и комплекса механических свойств;
- проанализировать существующие в открытом доступе информационные системы по титановым сплавам и разработать прототип открытой веб-платформы для сбора данных, публикации и обсуждения математических моделей, предназначенных для прогнозирования свойств.

### **Научная новизна**

1. Установлено, что 0,1 % кислорода повышает предел прочности на 125 МПа только при его содержаниях в сплавах менее 0,15 % масс. В интервале концентраций от 0,15 до 0,4% влияние кислорода ослабляется и составляет ~85 МПа, а при 0,4÷0,7% – ~60 МПа на 0,1%. Предложена корректировка формулы для расчета прочностного эквивалента по алюминию с учетом возможности легирования титана и его сплавов кислородом.
2. Обоснована граница  $\alpha+\beta\rightarrow\beta$ -перехода в зависимости от содержания  $\alpha$ - и  $\beta$ -стабилизаторов, эквивалентного алюминию и молибдену. Построена диаграмма «Температура полиморфного превращения – структурный эквивалент по алюминию – структурный эквивалент по молибдену», позволяющая проводить прогнозирование температуры полиморфного превращения титановых сплавов с доверительной вероятностью 0,95.
3. Показано, что суммарное влияние легирующих элементов и примесей (в перерасчете на эквиваленты по алюминию и молибдену) на температуру полиморфного превращения и механические свойства титановых сплавов может составлять до 40 % разброса в пределах технических нормативов.
4. Обоснованы предельно допустимые колебания химического состава, которые обеспечивают стабильность свойств и температуры полиморфного превращения для сплавов типа Ti-6Al-4V. Стандартные отклонения для эквивалентов по алюминию и молибдену должны удовлетворять требованиям:  $S_{[Al]} \leq 0,25\%$ ,  $S_{[Mo]} \leq 0,15\%$ .
5. Установлено, что среднее расчетное значение структурного эквивалента по алюминию не должно превышать 8,0% при стандартном отклонении  $S_{[Al]} \leq 0,25\%$  для исключения образования алюминида титана в сплавах типа Ti-6Al-4V.

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

1. Разработаны модели для прогнозирования (с доверительной вероятностью 0,95) температуры полиморфного превращения слитков титановых сплавов разных классов и механических свойств прутков сплавов типа Ti-6Al-4V, поковок сплавов BT3-1, Ti-10V-2Fe-3Al.
2. Разработаны рекомендации для повышения стабильности температуры полиморфного превращения и механических свойств полуфабрикатов из сплавов типа Ti-6Al-4V путем корректировки состава слитков и режимов отжига. Показано, что для повышения качества слитков целесообразно сузить диапазон

легирования алюминием, ванадием и кислородом, а также контролировать предельно допустимое содержание алюминия с учетом других  $\alpha$ -стабилизаторов, исключающее образование алюминида титана.

3. Предложена концепция создания многопользовательской системы, предназначенной для сбора, хранения в открытом доступе и обработки данных по титановым сплавам, прогнозирования свойств сплавов и открытого обсуждения результатов. Разработаны прототипы базы данных и пользовательского интерфейса системы.

#### **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 легирующих элементов и примесей на  $T_{III}$  титановых сплавов.
2. Статистические закономерности влияния микролегирования кислородом на механические свойства титана и сплавов типа Ti-6Al-4V.
3. Результаты статистической оценки стабильности химического состава и механических свойств различных полуфабрикатов из титановых сплавов Ti-6Al-4V и BT3-1.
4. Регрессионные модели для прогнозирования механических свойств прутков и поковок с доверительной вероятностью 0,95.
5. Результаты теоретической оценки диапазона легирования и режимов отжига сплава Ti-6Al-4V, обеспечивающих стабильность свойств и исключающих образование алюминида титана.
6. Прототип веб-платформы АИС «Титановые сплавы»

**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 23 научно-технических конференциях, в т.ч.: на III Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2010), Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии» (Москва, 2010), 77 Международной научно-технической конференции «Автомобиле- и тракторостроение в России» (Москва, 2012), Международной школе «Физическое материаловедение» (Новочеркасск, 2012); IV Международной научно-практической конференции «Современные концепции научных исследований» (Москва, 2014); Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение: наука и образование» (Санкт-Петербург, 2017, 2018); Международной научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", (Москва, 2018); XVII Международной научно-практической конференции «Управление качеством» (Москва, 2018); 16 Международной научно-технической конференции «Новые перспективные материалы, оборудование и технологии их получения» (Москва, 2015); XV и XVI Международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, 2016, 2017); XLI–XLIV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2015 - 2018), I-VI Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Колачёвские чтения» (Ступино 2015-2021).

**Публикации** Основное содержание диссертации опубликовано в 46 работах, в том числе в 12 статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, из которых 2 статьи опубликованы 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 216 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и 95 таблиц. Работа состоит из

введения, 4 глав, общих выводов, списка литературы из 190 наименований и приложений.

## **Глава 1. Состояние вопроса**

В главе обобщены и проанализированы результаты исследований по влиянию легирующих элементов и примесей на температуру полиморфного превращения и механические свойства различных полуфабрикатов из титановых сплавов. Рассмотрены связи механических свойств с типом и параметрами структуры. Даны характеристики сплавов Ti-6Al-4V, ВТЗ-1, Ti-10V-2Fe-3Al. Приведен обзор электронных справочников и систем прогнозирования свойств титановых сплавов. На основе литературного обзора сформулированы цель и задачи исследования.

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

Исходными данными послужили литературные сведения, данные промышленного контроля и производственных испытаний, а также результаты собственных исследований. Из данных, приведенных в различных публикациях, в качестве объектов для исследований были выбраны прутки и поковки. Объектами исследования также послужили полуфабрикаты, изготовленные по промышленным технологиям с 1970 по 2016 годы (табл. 1). Термическая обработка была проведена в производственных условиях по стандартным режимам, за исключением катаных прутков Ø15-150 мм из сплава ВТ6. Механические испытания на растяжение, ударную вязкость, вязкость разрушения, измерение твердости были проведены в заводских лабораториях в соответствии с ГОСТ 1497-61, ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9454-78, ГОСТ 9012-59, ASTM E 8, ГОСТ 25-506-85.

Экспериментальные исследования\* проводили на образцах, вырезанных в продольном направлении из катаных прутков Ø15-150 мм сплава ВТ6. Температуру полиморфного превращения ( $T_{\text{пп}}$ ) определяли методом пробных закалок. Образцы для механических испытаний были подвергнуты простому отжигу при температурах 600-920°C в течение 0,33 – 3 ч с последующим охлаждением на воздухе. 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).

---

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



## Объекты исследования

Сплав	Вид полуфабриката	Кол-во образцов	Напр-е вырезки образцов	Термическая обработка
BT1-00, BT1-0, Grade 2, Grade 4, BT5, BT5-1, OT4, BT20, BT6, BT6C, Grade 5, Grade 23, BT3-1, BT8, BT9, BT14, BT16, BT23, BT22, BT15	Слитки	более 6000	-	-
BT6, BT6C, BT6к, Grade 5, Grade 23	Кованые прутки 14x14мм; катаные прутки Ø14 мм	256	продольное	Отжиг 750-850 °С, 1 ч, воздух
BT6	Прессованные прутки Ø14-40 мм	16	продольное	Отжиг 750-850 °С, 1-2 ч, воздух
	Кованые поковки одного типоразмера	36	поперечное	Отжиг 750-850 °С, 2-3 ч, воздух
	Штампованные поковки одного типоразмера	1261	тангенц.	Двойной отжиг 930-950 °С, 2 ч, вода, 750 °С, 2 ч, воздух
	Катаные прутки Ø15-150 мм	191	продольное	Отжиг 600-920 °С, 0,33-3 ч, воздух
BT6ч	Плиты толщиной 30 мм	12	продольное	Отжиг 800 °С, 1 ч, воздух
Grade 5	Кованые прутки Ø70-90 мм	32	продольное	Отжиг 750-850 °С, 2-3 ч, воздух
BT3-1	Штампованные поковки, 13 типоразмеров	383	продольное, поперечное	Изотермический отжиг 920-960 °С, 1-3 ч, + 550-560 °С, 2 ч, воздух
Ti-10V-2Fe-3Al	Штампованные поковки одного типоразмера	1560	тангенциальное	Закалка 763-798 °С, 3 ч., вода + старение 500-515 °С, 8 ч, воздух

Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе AXIO Observer.Alm (Karl Zeiss Jena, Германия). Анализ полученных изображений осуществляли с помощью программного комплекса NEXSYS ImageExpert Pro3.6. Измерение твердости по методу Роквелла осуществляли на приборе BUENLER Macromet 5100T по шкале HRC 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 (KCU) проводили при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 9454-78.

Для статистического анализа использовали программы Stadia 7, Statistica 10, а также библиотек языка Python для анализа данных. Было отобрано 49 факторов, в том числе содержание легирующих элементов и примесей, структурные и прочностные эквиваленты по алюминию  $Al_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}$ ,  $Al_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$  и молибдену  $Mo_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}$ ,  $Mo_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$ ,  $T_{\text{ПП}}$ , режимы термической обработки, тип и параметры структуры (толщина и длина  $\alpha$ -пластин, размер  $\alpha$ -глобулей), механические свойства (предел прочности, условный предел текучести, относительное удлинение, поперечное сужение, твердость по Роквеллу, ударная вязкость, вязкость разрушения), диаметр прутков и год выпуска полуфабрикатов. Статистические исследования включали в себя первичную статистическую обработку, проверку статистических гипотез, оценку стабильности химического состава и механических свойств, корреляционно-регрессионный анализ с доверительной вероятностью 0,95. Долю вариации свойств, обусловленную влиянием какого-либо фактора, оценивали с помощью соотношения:  $\gamma=R^2 \cdot 100\%$  ( $R$  – коэффициент корреляции).

### **Глава 3. Статистические исследования температуры полиморфного превращения и механических свойств полуфабрикатов из титановых сплавов**

В главе приведены результаты оценки стабильности химического состава и  $T_{\text{ПП}}$  слитков из сплавов разных классов, а также механических свойств различных полуфабрикатов из сплавов Ti-6Al-4V, VT3-1, Ti-10V-2Fe-3Al. На основе корреляционного анализа зависимости  $T_{\text{ПП}}$  от степени легирования было установлено, что коэффициент множественной корреляции  $R$  существенно зависит от однородности химического состава в пределах партии однотипных слитков одного сплава. Показано, что для стабилизации разброса  $T_{\text{ПП}}$  следует сохранять величину суммарных колебаний химического состава, эквивалентного алюминию и молибдену, на уровне  $6S \leq 2,5\%$  (стандартное отклонение  $S \leq 0,4\%$ ). На основе проведенного анализа разработана модель для оценки  $T_{\text{ПП}}$  в зависимости от эквивалентов и построена диаграмма при  $t_0=882^\circ\text{C}$ , соответствующей  $T_{\text{ПП}}$  титана высокой чистоты (рис. 1):

$$T_{\text{ПП}} = t_0 + (20 \pm 0,8) \cdot [Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} - (0,23 \pm 0,05)([Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}})^2 - (10,3 \pm 0,6) \cdot [Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} + (0,44 \pm 0,05) \cdot ([Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}})^2 \quad (1)$$

Коэффициент корреляции 0,98. На диаграмме выделены области, характеризующие фактический разброс марочного состава и  $T_{III}$  для различных отечественных титановых сплавов.

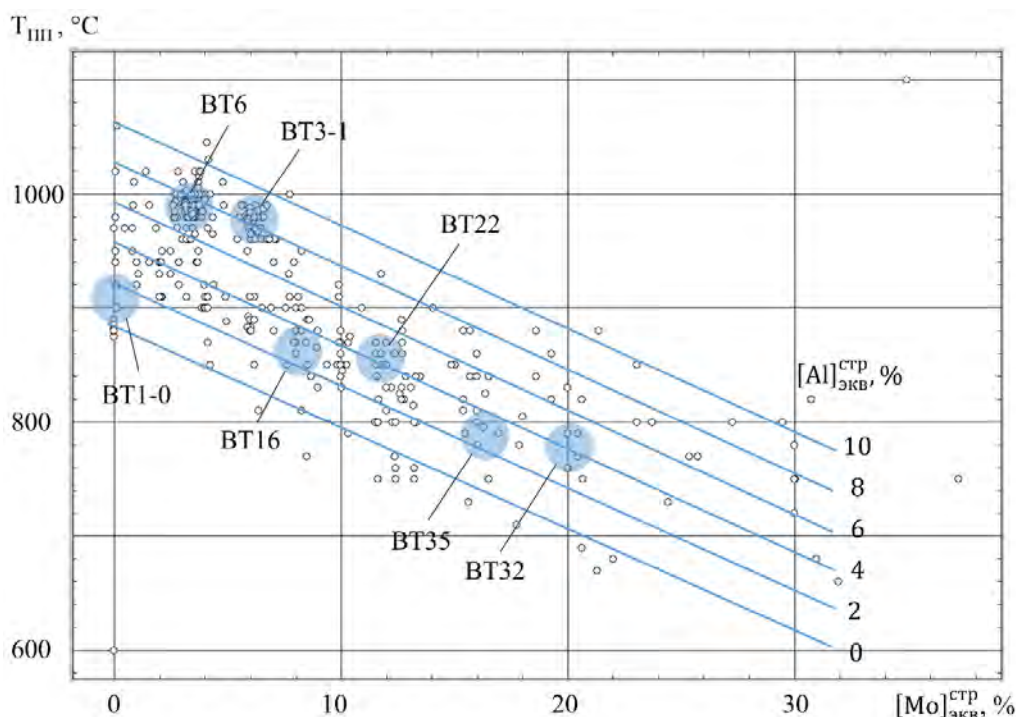


Рисунок 1 – Диаграмма « $T_{III} - Mo_{ЭКВ}^{стр} - Al_{ЭКВ}^{стр}$ »

Была проведена статистическая оценка влияния содержания кислорода на механические свойства титана (иодидного, электролитического, магниетермического титана, технического титана марок VT1-00, VT1-0, Grade 1, Grade 2, Grade 3, Grade 4) и сплавов типа Ti-6Al-4V (VT6С, VT6ч, VT6, Grade 23, Grade 5). В области малых концентраций (до 0,15% м.) повышение содержания кислорода на 0,1% м. приводит к увеличению прочности на 125 МПа (или 1250 МПа/% м.). Если кислород вводится как легирующий элемент (при 0,15-0,4 % м.), то его упрочняющее действие намного меньше и составляет 850 МПа/% м., а при 0,4-0,7 % – 600 МПа/% м. Тогда прочностной эквивалент по алюминию при содержаниях кислорода  $O \approx 0,15-0,4$  % будет иметь вид:

$$[Al]_{ЭКВ}^{np} = \%Al + \frac{\%Sn}{2} + \frac{\%Zr}{3} + 3,3 \cdot (\%Si) + 15 \cdot (\%O) + 33(\%N) + 12(\%C). \quad (2)$$

Для технического титана при  $O \approx 0,4-0,7$  %:

$$[Al]_{ЭКВ}^{np} = \%Al + 10(\%O) + 33(\%N) + 12(\%C). \quad (3)$$

Для повышения прочностных характеристик целесообразно легирование кислородом технического титана до 0,4%, титановых сплавов неответственного

назначения до  $\sim 0,25\%$ . Однако микролегирование кислородом сплавов типа Ti-6Al-4V возможно при условии соблюдения требования:  $Al_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} < 9\%$ . Вместе с тем было установлено, что для полуфабрикатов из сплавов ВТ6 и Grade 5  $Al_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}$  может достигать значений, превышающих критический уровень 9%, свыше которого возможно образование алюминидов титана и снижение  $\delta$ ,  $\psi$ , КСУ до минимальных пределов по НД (рис. 2).

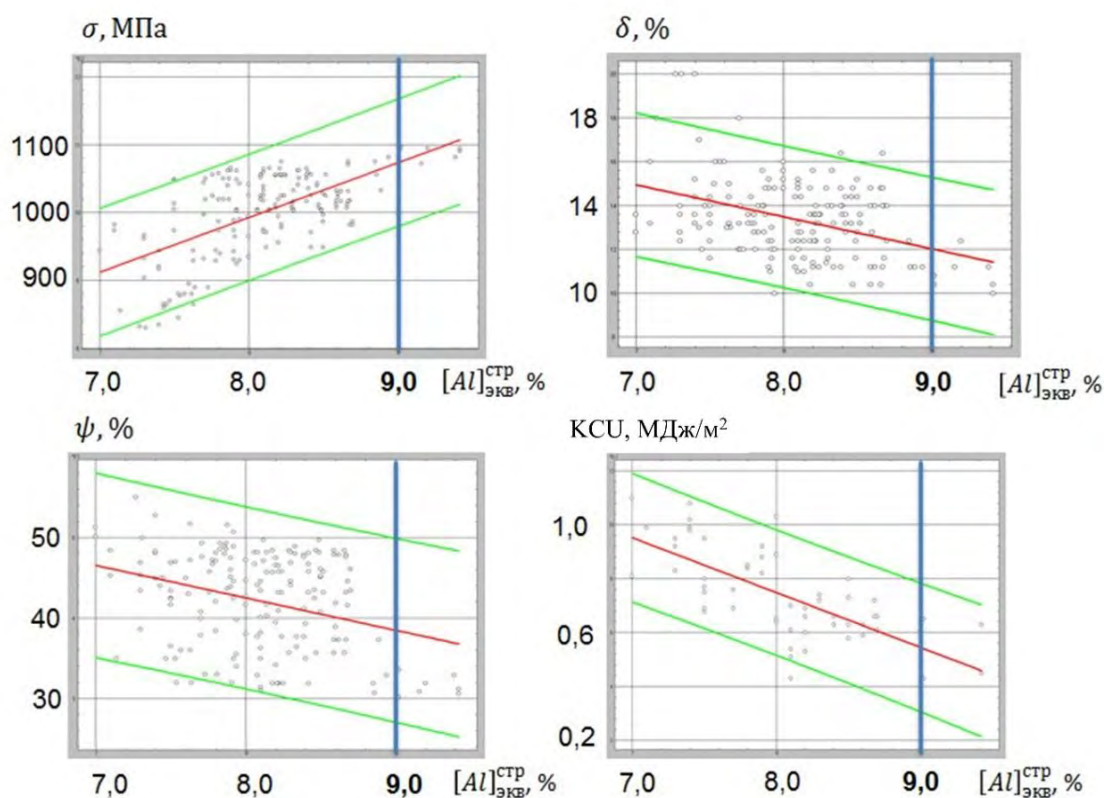


Рисунок 2 – Зависимость механических свойств прутков от структурного эквивалента по алюминию сплавов Ti-6Al-4V после отжига при 750-850 °С

Была проведена оценка влияния колебаний химического состава на разброс механических свойств различных полуфабрикатов из сплавов Ti-6Al-4V и ВТ3-1 после термической обработки по промышленным режимам. Коэффициенты корреляции ( $R \leq 0,2$ ) свидетельствуют о том, что изменение содержания каждого элемента по отдельности или не влияет, или слабо влияет на свойства, но их совместное действие, выраженное через  $Al_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}$ ,  $Al_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$ ,  $Mo_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}$  и  $Mo_{\text{ЭКВ}}^{\text{ПР}}$ , оказалось более существенным ( $R \geq 0,5$ ). Если разница между максимальными и минимальными значениями  $Al_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}$  и  $Mo_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}$  достигает величины «трехсигмового» интервала  $6S = 2,5\%$  и более, а стандартное отклонение  $S$  превышает  $\sim 0,5\%$ , то коэффициенты корреляции являются значимыми и свидетельствуют о наличии устойчивой статистической связи между исследуемыми факторами.

Для стабилизации разброса свойств в пределах партии однотипных полуфабрикатов сплава Ti-6Al-4V необходимо, чтобы величина суммарных колебаний химического состава в перерасчете на эквиваленты, была на уровне  $6S_{[Al]+[Mo]} \leq 2,0 \div 2,5\%$  ( $S_{[Al]+[Mo]} \leq 0,3 \div 0,4\%$ ). Степень влияния  $\beta$ -стабилизаторов на механические свойства слабее, чем  $\alpha$ -стабилизаторов. Поэтому, если оставить разброс V, Fe и, соответственно,  $Mo_{\text{ЭКВ}}^{\text{стр}}$ ,  $Mo_{\text{ЭКВ}}^{\text{пр}}$  на прежнем уровне ( $6S = 0,5 \div 1,0\%$ ), то для  $Al_{\text{ЭКВ}}^{\text{стр}}$  величина «трехсигмового» интервала  $6S$  не должна превышать 1,5%, т.е.  $S \leq 0,25\%$ .

На следующем этапе исследований были проанализированы механические свойства катаных прутков  $\varnothing 15-150$  мм из сплава ВТ6 (69 плавов) после простого отжига по режимам (600-920 °С, 20-180 мин, воздух), выходящим за границы, установленные ПИ ВИАМ. Различные типы структуры были получены путем изменения режимов деформации и термической обработки. Все наблюдаемые структуры прутков были разделены на 5 типов: I – глобулярная (равноосная), II – переходная, III – смешанная (глобулярная и пластинчатая), IV – корзинчатая, V – пластинчатая (рис. 3).

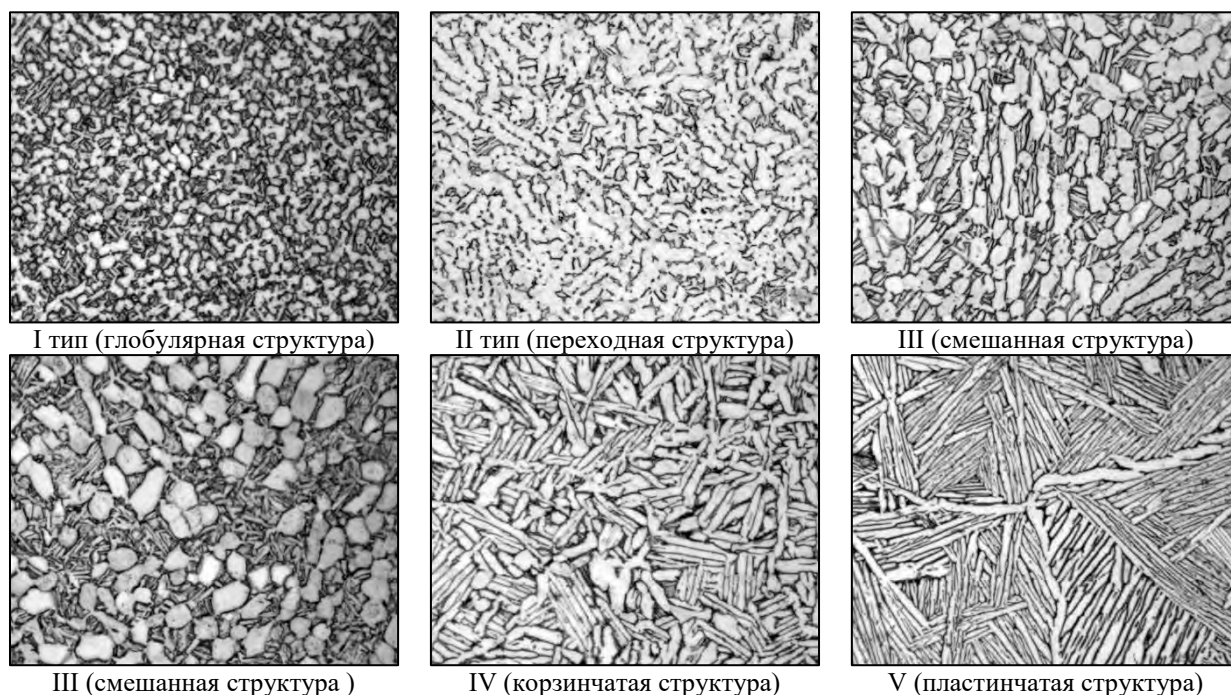


Рисунок 3 – Основные типы структуры прутков сплава ВТ6 после отжига, х450

Средний уровень прочностных свойств прутков с глобулярной структурой несколько выше по сравнению с переходной и смешанной структурами, при этом характеристики пластичности и ударная вязкость мало различаются (табл. 2), в то

время как механические свойства прутков с корзинчатой и пластинчатой структурами значительно ниже по сравнению с другими структурами. На основе однофакторного корреляционного анализа было установлено, что прочностные и пластические свойства снижаются, а КСЧ повышается при переходе от глобулярной к пластинчатой структуре. Предел прочности и твердость возрастают с увеличением эквивалентов по алюминию и молибдену (коэффициент парной корреляции  $R=0,3\div 0,5$ ), а характеристики пластичности и ударная вязкость снижаются ( $R=-0,2\div -0,5$ ).

Таблица 2

Механические свойства прутков диаметром 15-150 мм сплава ВТ6 после отжига  
(в числителе диапазон, в знаменателе – среднее значение)

Тип и параметры структуры	Число обр-в (доля, %)	[Al] <sub>ЭКВ</sub> <sup>СТР</sup> %	[Mo] <sub>ЭКВ</sub> <sup>СТР</sup> %	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСЧ, МДж/м <sup>2</sup>	HRC
I глобулярная	46 (28%)	<u>7,6-9,1</u> 8,6	<u>3,0-3,5</u> 3,2	<u>929-1076</u> 1017	<u>10-20</u> 16	<u>24-48</u> 38	<u>0,31-0,92</u> 0,48	<u>30-36</u> 34
II переходная	42 (26%)	<u>7,1-9,6</u> 8,6	<u>2,9-4,2</u> 3,3	<u>833-1100</u> 1000	<u>12-18</u> 15	<u>19-48</u> 37	<u>0,34-0,9</u> 0,52	<u>29-37</u> 34
III смешанная	58 (36%)	<u>7,1-9,1</u> 8,3	<u>2,8-3,9</u> 3,3	<u>788-1109</u> 981	<u>10-20</u> 16	<u>21-46</u> 39	<u>0,35-0,9</u> 0,53	<u>27-36</u> 32
IV корзинчатая	2 (1%)	9,0	3,14	<u>954-984</u> 969	<u>10-12</u> 11	<u>25-28</u> 27	<u>0,62-0,68</u> 0,65	33
V пластинчатая	14 (9%)	<u>7,2-9,2</u> 8,3	<u>3,0-3,5</u> 3,2	<u>818-1026</u> 913	<u>8-19</u> 12	<u>13-47</u> 29	<u>0,49-1,1</u> 0,67	<u>26-36</u> 31
I-V	162 (100%)	<u>7,1-9,6</u> 8,5	<u>2,8-4,2</u> 3,22	<u>788-1109</u> 990	<u>8-20</u> 15	<u>13-48</u> 37	<u>0,31-1,1</u> 0,52	<u>26-37</u> 33

В зависимости от температуры и продолжительности отжига прочностные свойства могут как увеличиваться, так и уменьшаться, что обусловлено изменением соотношения  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз и степени их легирования. Максимальные значения прочностных свойств наблюдаются после отжига при температурах  $650\div 750$  °С, разнице между  $T_{III}$  и  $t_{отж}$ , равной  $\Delta t=250\div 425$  °С, продолжительности отжига ~60 мин (рис. 4).

Совместное влияние степени легирования, режимов отжига и диаметра прутка на свойства сплава ВТ6 более существенное, так как коэффициенты множественной корреляции возросли до  $0,7\div 0,9$  по сравнению с однофакторным анализом (табл. 3).

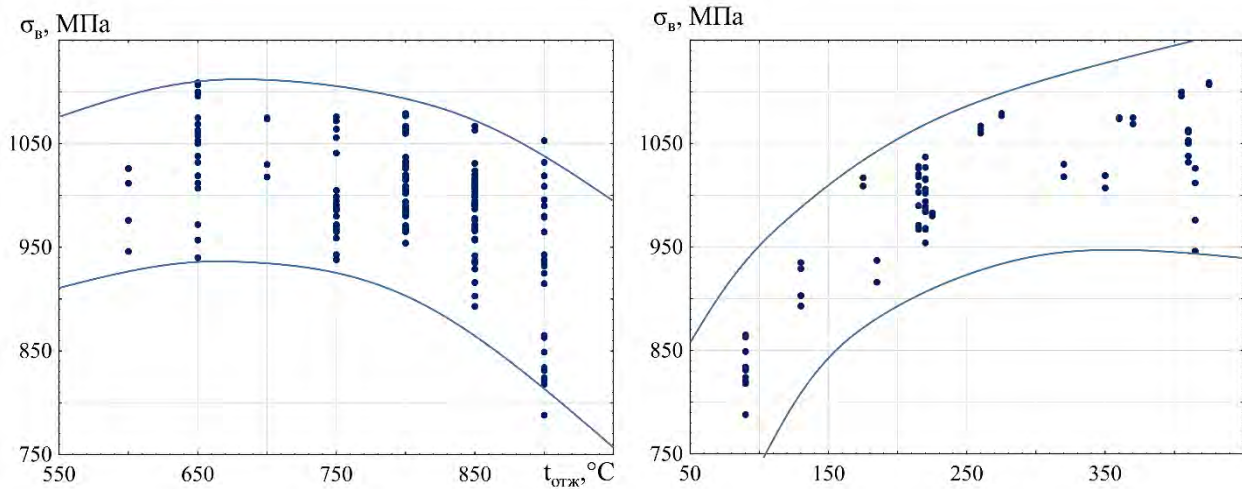


Рисунок 4 – Зависимость предела прочности прутков Ø 15-150 мм сплава ВТ6 от температуры отжига и разности  $\Delta t$  между  $T_{III}$  и  $t_{отж}$ .

Таблица 3

Зависимость механических свойств сплава ВТ6 от химического состава, режимов отжига и диаметра прутка

№	Регрессионная модель*	R	Стат. ошибка
1	$\sigma_B = \sigma_0 + 35 \cdot [Al]_{ЭКВ}^{СТР} [Al]_{ЭКВ}^{СТР} + 30,4 \cdot [Mo]_{ЭКВ}^{СТР} [Mo]_{ЭКВ}^{СТР} + 1,8 \cdot \Delta t - 0,0027 \cdot \Delta t^2 - 0,43 \cdot d$	0,89	45,0 МПа
2	$\delta = \delta_0 - 1,57 \cdot [Al]_{ЭКВ}^{СТР} [Al]_{ЭКВ}^{СТР} + 0,008 \cdot [Mo]_{ЭКВ}^{СТР} [Mo]_{ЭКВ}^{СТР} - 0,005 \cdot \Delta t - 0,064 \cdot d$	0,68	1,7 %
3	$\psi = \psi_0 - 2,46 \cdot [Al]_{ЭКВ}^{СТР} [Al]_{ЭКВ}^{СТР} + 0,006 \cdot [Mo]_{ЭКВ}^{СТР} [Mo]_{ЭКВ}^{СТР} - 0,03 \cdot \Delta t - 0,13 \cdot d$	0,68	5,2%
4	$KCU = KCU_0 - 0,014 \cdot [Al]_{ЭКВ}^{СТР} [Al]_{ЭКВ}^{СТР} - 0,002 \cdot [Mo]_{ЭКВ}^{СТР} [Mo]_{ЭКВ}^{СТР} - 0,0083 \cdot \Delta t + 0,000013 \cdot \Delta t^2 - 0,09 \cdot \tau_{отж} - 0,024 \cdot \tau_{отж}^2 - 0,003 \cdot d$	0,90	0,12 МДж/м <sup>2</sup>

Примечание: \* - свободные члены  $\sigma_0$ ,  $\delta_0$ ,  $\psi_0$ ,  $KCU_0$  зависят от типа структуры.

На следующем этапе исследований на основе литературных и производственных данных были проанализированы механические свойства поковок из сплавов ВТЗ-1 и Ti-10V-2Fe-3Al после термической обработки по стандартным режимам. Для поковок сплава ВТЗ-1 после изотермического отжига регрессионные зависимости предела прочности от толщины (диаметра) и длины  $\alpha$ -зерен для глобулярной и переходной структуры имеют вид:

$$\sigma_B = \sigma_0 + (133 \pm 20) \cdot a_{\alpha}^{-1/2}, \quad (4)$$

$$\sigma_B = \sigma_0 + (58 \pm 12) \cdot a_{\alpha}^{-1/2} + (30 \pm 8) \cdot l_{\alpha}^{-1/2}, \quad (5)$$

Свободный член  $\sigma_0$  можно оценить по соотношению:

$$\sigma_0 = k_{\sigma} \cdot 235 + 65 \cdot [Al]_{ЭКВ}^{СТР} + 45 \cdot [Mo]_{ЭКВ}^{СТР}, \quad (6)$$

где 235 МПа – предел прочности титана высокой чистоты,  $k_{\sigma}$  – эмпирический (поправочный) коэффициент, который зависит от типоразмера поковок.

Для поковок сплава Ti-10V-2Fe-3Al регрессионные зависимости предела прочности от химического состава, температур закалки и старения имеет вид:

$$\sigma_B = 918 + 22 [Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} + 22 [Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} . \quad (7)$$

$$\sigma_B = 1631 + 14,5 [Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} + 25,3 [Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} + 1,2 \cdot t_3 - 3,24 \cdot t_{\text{СТ}} . \quad (8)$$

Для проверки статистической устойчивости коэффициентов упрочнения для эквивалентов по алюминию и молибдену в соотношении (7) был проанализирован предел прочности 53 титановых сплавов разных классов после закалки и старения по стандартным режимам на основе обобщения литературных данных. Проведенный анализ показал, коэффициенты упрочнения  $\alpha$ - и  $\beta$ -стабилизаторами  $\sim 22 \pm 10$  МПа/% в модели (7) можно считать статистически значимыми. В модели 8, содержащей дополнительно еще два фактора (температуры закалки и старения), степень влияния эквивалента по алюминию немного ниже, но все же находится в доверительном интервале  $12 \div 32$  МПа/%м.

#### Глава 4. Практическое применение результатов исследований

Результаты статистических исследований показали, что из кратковременных механических свойств наиболее хорошо поддаются прогнозированию прочностные свойства, а хуже всего – характеристики пластичности, особенно относительное удлинение. Скорее всего, это связано с влиянием случайных и систематических факторов, которые не удалось в полной мере выявить и учесть в процессе исследования и к которым, прежде всего, следует отнести режимы горячей деформации, определяющие тип и параметры структуры полуфабрикатов. В табл. 4 и 5 обобщены результаты исследований по влиянию типа, балла, параметров структуры и химического состава на разброс свойств прутков и поковок. Доля вариации механических свойств из-за влияния типа структуры составляет  $\sim 10$ - $20\%$ , но сильно зависит от колебаний размера структурных составляющих (табл. 4). Так, например, для сплава ВТ6 изменение размера  $\alpha$ -глобулей  $a_{\alpha}$  с  $\sim 3$  до  $\sim 6$  мкм (трехсигмовый интервал  $6S_a = 5,0$  мкм) слабо влияет на предел прочности (доля вариации менее  $5\%$ ), в то время как для поковок сплава ВТЗ-1 увеличение  $a_{\alpha}$  с  $\sim 3$  до  $\sim 20$  мкм ( $6S_a = 28,0$  мкм) привело к повышению доли вариации до  $45\%$ .



Доля вариации\* механических свойств, обусловленная влиянием структуры прутков сплава ВТ6 и штампованных поковок сплава ВТЗ-1

Сплав	Полуфабрикат	Характеристики структуры**	Доля вариации* свойств, %				
			$\sigma_b$	$\delta$	$\psi$	KCU	HRC
ВТ6	Прутки Ø15-60	I – III типы структуры	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>10</b>
		Балл микроструктуры (1-4)	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	1
		Глобулярная структура $a_\alpha=2,9-5,9$ мкм, $6S_a=5,0$ мкм	5	3	5	5	1
		Смешанная структура $a_\alpha=3,5-6,7$ мкм; $b_2=1,7-3,0$ мкм; $6S_a=5,4$ мкм, $6S_b=3,0$ мкм	4	3	4	6	1
ВТЗ-1	Поковки типоразмер №1	I – V типы структуры***	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	-
		Глобулярная структура $a_\alpha=3,3-20,2$ мкм, $6S_a=28,0$ мкм	<b>45</b>	-	<b>20</b>	-	-
		Переходная структура $a_\alpha=3,0-20,5$ мкм; $b_\alpha=9,5-25,6$ мкм $6S_a=36,4$ мкм, $6S_b=43,8$ мкм	<b>60</b>	-	<b>25</b>	-	-
	Поковки типоразмер №9	I – V типы структуры***	<b>20</b>	7	<b>15</b>	<b>15</b>	-
		Глобулярная структура $a_\alpha=5,2-15,5$ мкм, $6S_a=22,0$ мкм	<b>25</b>	-	<b>20</b>	<b>20</b>	-
		Переходная структура $a_\alpha=5,5-21,0$ мкм; $b_\alpha=10,2-25,3$ мкм $6S_a=30,4$ мкм, $6S_b=40,8$ мкм	<b>35</b>	-	<b>20</b>	<b>20</b>	-

Примечания: \* жирным шрифтом выделены значимые значения; \*\*  $a_\alpha$  – размер глобулей для глобулярной и смешанной структуры;  $a_\alpha$  и  $b_\alpha$  – толщина и длина  $\alpha$ -частиц для переходной структуры;  $b_2$  – толщина вторичной  $\alpha$ -фазы для смешанной структуры; \*\*\* по типовой 7-балльной шкале: I – глобулярная, II – переходная, III – смешанная, IV и V – пластинчатая структура без оторочки и с оторочкой по границе зерна; структуры IV и V встречались только в комбинации с другими структурами.

На основе корреляционного анализа было установлено, что на разброс механических свойств однотипных полуфабрикатов из сплавов ВТ6 и ВТЗ-1 в большей степени влияет изменение марочного состава, чем тип структуры (глобулярная, переходная, смешанная) (табл. 5). Влияние степени легирования на прочностные свойства выше, чем на характеристики пластичности. Из табл. 5 следует, что доля вариации свойств более 25% наблюдается при  $6S_{[Al]+[Mo]} \geq 2,0 \div 2,5$  %. В этом случае не только прочностные свойства, но и  $T_{ПП}$  значимо зависят от колебаний химического состава и могут оцениваться по конкретному содержанию легирующих элементов и примесей, в частности, с помощью  $Al_{ЭКВ}^{стр}$  и  $Mo_{ЭКВ}^{стр}$ .

В работе были разработаны рекомендации для оценки  $T_{ПП}$  титановых сплавов и прогнозирования механических свойств полуфабрикатов в зависимости от химического состава и режимов термической обработки (с вероятностью 0,95). Для оценки среднего значения  $T_{ПП}$  можно использовать модель (1) со стандартной ошибкой  $15^\circ\text{C}$  и  $R=0,98$ . Свободный член  $t_0$  лежит в интервале  $\sim 850-950^\circ\text{C}$ , зависит

от конкретной технологии изготовления слитка и может быть определен на основе данных статистического контроля.

Таблица 5

Доля вариации механических свойств, обусловленная колебаниями марочного состава полуфабрикатов из исследованных сплавов

Сплав	Полуфабрикат, термическая обработка	n	$6S_{[Al]+[Mo]}$ , %	Доля вариации свойств*, %			
				$\sigma_b$	$\delta$	$\psi$	KCU
BT6, BT6C, Grade 5, Grade 23	Кованые прутки 14x14 мм, отжиг	256	4,1	<b>40</b>	<b>16</b>	<b>25</b>	<b>40</b>
BT6	Катаные прутки Ø15-150, отжиг	162	3,8	<b>30</b>	4	<b>10</b>	<b>25</b>
	Кованые прутки 14x14 мм, отжиг	54	2,3	<b>22</b>	6	<b>6</b>	<b>25</b>
	Штампованные поковки дисков, двойной отжиг	653	2,1	<b>23</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>14</b>
BT3-1	Штампованные поковки типоразмер 1, изотермический отжиг	62	3,9	<b>42</b>	<b>10</b>	<b>28</b>	<b>11</b>
	Штампованные поковки типоразмер 9, изотермический отжиг	44	2,1	<b>26</b>	5	<b>16</b>	<b>28</b>

Примечания: \* жирным шрифтом выделены значимые значения

Прогнозирование предела прочности штампованных поволоков сплава BT3-1 после изотермического отжига ( $t_1 = T_{III} - (30 \div 60) \text{ }^\circ\text{C}$ , 1-3 ч, охлаждение с печью до  $t_2 = 550 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , 2 ч, воздухе) можно проводить в зависимости от химического состава, параметров равноосной и переходной структуры по соотношениям (4-6). Статистическая ошибка оценки среднего значения составляет 15-17 МПа при  $R=0,67-0,76$ . Для катаных прутков диаметром 15-150 мм сплава BT6 после отжига при 600-900  $^\circ\text{C}$  (охлаждение на воздухе) целесообразно использовать многофакторные модели, характеризующие зависимость механических свойств от структурных эквивалентов по алюминию и молибдену, режимов отжига, диаметра прутка (табл. 3).

Для штампованных поволоков сплава Ti-10V-2Fe-3Al после закалки и старения ( $T_{III} - (15 \div 40) \text{ }^\circ\text{C}$ , вода + 480-510  $^\circ\text{C}$ , 8 ч, воздух) средние значения предела прочности можно оценить по модели (8) в зависимости от эквивалентов по алюминию и молибдену, температур закалки и старения с ошибкой 27 МПа. Для оценки относительного удлинения, поперечного сужения, ударной вязкости и вязкости разрушения лучше использовать модели, позволяющие прогнозировать эти свойства в зависимости от предела прочности или условного предела

текучести, так как коэффициенты корреляции выше. Проверка полученных моделей показала хорошую сходимость расчетных и фактических значений механических свойств.

На основе проведенных исследований предложены рекомендации по повышению качества полуфабрикатов из сплава ВТ6 путем корректировки диапазона легирования и режимов отжига с учетом технологического разброса. Было установлено, что для повышения стабильности химического состава и свойств полуфабрикатов сплавов типа Ti-6Al-4V целесообразно:

- 1) установить предельно допустимые колебания алюминия, ванадия и примесей:  $S_{Al} \leq 0,2\%$ ,  $S_O \leq 0,02\%$ ,  $S_N \leq 0,006\%$ ,  $S_C \leq 0,006\%$ ,  $S_V \leq 0,15\%$ ;
- 2) сузить расчетный диапазон легирования алюминием до  $6S_{Al}^{нл} = 1,2\%$ , что должно соответствовать  $5,4 \div 6,6\%$  (вместо  $5,3-6,8\%$  для ВТ6, ВТ6ч, Grade5 по НД),
- 3) установить максимально допустимое суммарное содержание  $\alpha$ -стабилизаторов, исключаящее негативное влияние алюминидов титана на свойства при  $Al_{экв}^{стр} \geq 9\%$ ; для этого среднее расчетное значение  $Al_{экв}^{стр}$  не должно превышать  $\sim 8,0\%$  при  $S_{[Al]} \leq 0,25\%$ ;
- 4) не превышать среднее расчетное содержание алюминия  $\sim 6,1\%$  при  $S_{Al} = 0,2\%$  или  $\sim 6,5\%$  при  $S_{Al} = 0,1\%$ ;
- 5) регламентировать предельно допустимое содержание алюминия с учетом содержания примесей (табл. 6).

Таблица 6

Рекомендуемые максимальные содержания алюминия и кислорода в сплаве ВТ6 в зависимости от содержания углерода и азота

C, %	N, %	O, %	Al, %
0,01	0,01	0,19	<b>6,8</b>
		<b>0,20</b>	6,7
		0,25	6,2
0,02	0,01	0,18	<b>6,8</b>
		<b>0,20</b>	6,6
		0,25	6,1
0,03	0,02	0,15	<b>6,8</b>
		<b>0,20</b>	6,3
		0,25	5,8

Примечание: жирным шрифтом выделено максимальное содержание по ОСТ1 900013-81.

Регрессионные модели, предназначенные для прогнозирования (табл. 3), можно использовать для обеспечения необходимого комплекса свойств прутков  $\varnothing 15 \div 150$  мм из сплава ВТ6. Как следует из разработанных моделей, существует

множество вариантов и комбинаций режимов отжига в зависимости от химического состава, диаметра прутка и требуемых механических свойств.

Для повышения стабильности свойств была проведена оценка стандартного отклонения предела прочности  $S_\sigma$  прутков сплава ВТ6 в зависимости от стандартного отклонения  $S_{[Al]+[Mo]}$  и абсолютного разброса температуры отжига  $\Delta t_{отж} = t_{отж}^{max} - t_{отж}^{min}$ . В частности, для обеспечения  $6S_\sigma = 90$  МПа необходимо выполнение требований:  $S_{[Al]+[Mo]} \approx 0,3\%$ ;  $\Delta t_{отж} \approx 20 \div 25$  °С.

На основе проведенного анализа было установлено, что оптимальный комплекс кратковременных механических свойств катаных прутков диаметром 15-60 мм из сплава ВТ6 с глобулярной, переходной и смешанной структурой достигается при эквивалентах  $Al_{эКВ}^{стр} = 8,0\%$ ,  $Mo_{эКВ}^{стр} = 3,2\%$  после отжига при  $t_{отж} = 800-840$ °С (в зависимости от типа структуры) в течение 45-60 мин с охлаждением на воздухе. Такие режимы позволяют получить прогнозируемый уровень предела прочности ( $\sigma_B = 975 \pm 15$  МПа) при значениях других свойств не ниже установленных ОСТ1 90173-75.

В работе предложена концепция открытой автоматизированной информационной системы «Титановые сплавы», которая состоит из нескольких модулей. База данных позволяет сохранять справочные и экспериментальные сведения. Поиск информации в системе возможен на основе разработанного классификатора марок сплавов по различным параметрам: по коэффициенту  $\beta$ -стабилизации, эквивалентам по алюминию и молибдену, фазовому составу, уровню прочности и др. В состав АИС входят также программы для анализа данных, прогнозирования свойств и моделирования сплавов. Предусмотрена возможность публикации пользовательских моделей и средств для обсуждения полученных результатов. В настоящее время разработана архитектура реляционной базы данных в среде Microsoft SQL Server и пользовательский веб-интерфейс системы средствами MVC Microsoft Visual Studio.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основе комплексных статистических исследований проведена оценка стабильности химического состава,  $T_{III}$  слитков, механических свойств прутков и поковок титановых сплавов, изготовленных на различных предприятиях с 1970 по 2016 гг.

2. Статистически обосновано, что доля вариации  $T_{\text{III}}$  и механических свойств прутков и поковок из сплавов Ti-6Al-4V и BT3-1 после стандартной термической обработки зависит от величины колебаний марочного состава (в перерасчете на эквиваленты по алюминию и молибдену  $6S_{[\text{Al}]+[\text{Mo}]}$ ) и для прочностных свойств может достигать 40%. Для характеристик пластичности этот показатель меньше и лежит в интервале 10-30%.
3. На основе обобщения литературных данных и результатов промышленного контроля выявлены статистические зависимости  $T_{\text{III}}$  от химического состава; построена диаграмма «эквивалент по алюминию – эквивалент по молибдену –  $T_{\text{III}}$ ».
4. Уточнена эффективность влияния кислорода, как легирующего элемента (до 0,7% м.), на предел прочности титана и его сплавов. Предложена корректировка формулы для расчета прочностного эквивалента по алюминию с учетом возможности легирования кислородом титана до 0,4% и его сплавов до 0,25%.
5. На основе проведенных статистических исследований и теоретической оценки разработаны рекомендации для определения расчетных значений (с учетом технологического разброса) основных компонентов и примесей, а также режимов простого отжига, обеспечивающих повышение стабильности химического состава,  $T_{\text{III}}$  и механических свойств полуфабрикатов из сплава Ti-6Al-4V.
6. Обосновано, что для обеспечения среднего регламентируемого уровня механических свойств прутки из сплава BT6 должны иметь химический состав, эквивалентный  $[\text{Al}]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}=8,0\%$ ,  $[\text{Mo}]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}=3,2\%$ .
7. Статистически скорректирован режим отжига прутков диаметром 15-60 мм из сплава BT6 (800-840°C, 45-90 мин, охлаждение на воздухе), который обеспечивает стабильность механических свойств с глобулярной, переходной и смешанной структурами и позволяет получить прогнозируемый уровень предела прочности  $975 \pm 15$  МПа при значениях остальных механических свойств не ниже установленных ОСТ1 90173–75.
8. Обоснована принципиальная возможность статистического прогнозирования  $T_{\text{III}}$  слитков разных сплавов и механических свойств кованных и катаных прутков, штампованных поковок из титановых сплавов BT6 и BT3-1 в зависимости от эквивалентов по алюминию и молибдену, структуры и режимов термической обработки.

9. Разработан прототип открытой веб-платформы, предназначенной для моделирования состава титановых сплавов и прогнозирования их свойств.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. Егорова, Ю.Б. Прогнозирование механических свойств титановых сплавов в зависимости от эквивалентов по алюминию и молибдену / *Егорова Ю.Б., Белова С.Б., Чибисова Е.В., Давыденко Л.В.* // Материаловедение. 2015. – №5. С. 24-30.
2. Егорова Ю.Б. Прогнозирование температуры полиморфного превращения промышленных слитков титановых сплавов по их химическому составу / *Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Чибисова Е.В., Белова С.Б.* // Электрометаллургия. 2016. – №12. С. 6-14.
3. Егорова Ю.Б. Повышение стабильности механических свойств деформированных полуфабрикатов из титанового сплава Ti-6Al-4V / *Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Чибисова Е.В., Мамонов И.М., Белова С.Б.* // Титан. 2017. – №2 (56). С. 30-36.
4. 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. – т. 25. С. 190-201.
5. Егорова Ю.Б. Теоретическое и статистическое обоснование стабильности механических свойств полуфабрикатов из сплава Ti-6Al-4V / *Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Чибисова Е.В., Белова С.Б.* // МИТОМ. 2018. – №5. С. 4-12.  
Yu. B. Egorova. Theoretical and Statistical Basis for Stability of Titanium Alloy Ti-6%Al-4%V Semiproduct Mechanical Properties / *Yu. B. Egorova, L. V. Davydenko, E. V. Chibisova, S. B. Belova.* // Metal Science and Heat Treatment. 2018. – Vol. 60. Issue 5-6. pp. 277-284.
6. Егорова Ю.Б. Прогнозирование механических свойств поковок из титановых сплавов VT6 и VT3-1 в зависимости от химического состава и структуры / *Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Белова С.Б., Чибисова Е.В.* // Известия вузов. Цв. Metallургия. 2018. – №1. С. 12-21.  
Yu. B. Egorova. Forecasting Mechanical Properties of Forgings of VT6 and VT3-1 Titanium Alloys Depending on the Chemical Composition and Structure / *Yu. B. Egorova, L.V. Davydenko, S.B. Belova, E.V. Chibisova.* // Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2018. – V.59, №2. pp. 148-156.
7. Yu.B. Egorova. Heat Treatment Regimes Influence on Mechanical Properties of Forging Products of  $\alpha+\beta$ - and Pseudo  $\beta$ -Titanium Alloys / *Yu.B. Egorova, L.V. Davydenko, E.V. Chibisova.* // Solid State Phenomena. 2018. – Vol. 284. pp. 289-294.
8. Егорова Ю.Б. Информационные технологии в материаловедении титановых сплавов: проблемы, возможности и перспективы / *Егорова Ю.Б., Мамонов И.М., Давыденко Л.В., Чибисова Е.В.* // Титан. 2019. – №3. С. 31-36.
9. Егорова Ю.Б. Прогнозирование механических свойств прутков из сплава VT6 в зависимости от химического состава и режимов отжига / *Егорова Ю.Б.,*

*Скворцова С.В., Давыденко Л.В., Чибисова Е.В., Гвоздева О.Н. // Титан. 2019. – №4. С. 9-16.*

10. Yu.B. Egorova Study of stability of chemical composition and characteristics of machinability of titanium alloys of Ti-Al-V and Ti-Al-Mo-V-Cr-Fe systems / *Yu.B. Egorova, L.V. Davydenko, E.N. Egorov, E.V. Chibisova, I.Yu. Starchikova // International Review of Mechanical Engineering (IREME). 2020. – 14 (2). P. 111-118.*
11. Егорова Ю.Б. Исследование стабильности механических свойств прутков из сплава ВТ6 в зависимости от химического состава и режимов отжига / *Егорова Ю.Б., Скворцова С.В., Давыденко Л.В., Гвоздева О.Н., Чибисова Е.В. // Титан. 2020. – №1. С. 11-18.*
12. Егорова Ю.Б. Повышение стабильности механических свойств полуфабрикатов из сплава Ti-6Al-4V путем корректировки диапазона легирования и режимов отжига / *Егорова Ю.Б., Скворцова С.В., Давыденко Л.В., Чибисова Е.В. // Металлург. 2021. – №8. С. 55-63.*