

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Зайнетдиновой Гульнары Тахировны «Влияние химического состава, термической и химикотермической обработок на износостойкость псевдо  $\beta$ -титановых сплавов», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

### Актуальность работы.

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к применению в различных областях машиностроения псевдо  $\beta$ -титановых сплавов. Это обусловлено как их высоким комплексом механических свойств ( $\sigma_B \geq 1200$  МПа,  $\delta \geq 5\%$ ), так и возможностью управлять их технологическими характеристиками методами термической обработки.

Так псевдо  $\beta$ -сплавы обладают высокой прокаливаемостью и низкими критическими скоростями охлаждения, что позволяет достаточно легко фиксировать в материале малолегированную пластичную  $\beta$ -фазу. В то же время при упрочняющей термической обработки в них можно формировать мелкодисперсную  $\alpha$ -фазу с объемной долей не менее 50%, что обеспечивает сочетание высокой прочности с хорошей пластичностью. В связи с этим возникает необходимость в научных исследованиях этих материалов с установлением закономерности влияния технологических схем и режимов обработки на структуру и свойства псевдо  $\beta$ -титановых сплавов в зависимости от области их применения. Поэтому диссертационная работа Зайнетдиновой Г.Т., направленная на установление закономерностей влияния химического и фазового состава, поверхностной и объемной структуры, формирующихся при термической и вакуумной ионно-плазменной обработках, на твердость и износостойкость псевдо  $\beta$ -титановых сплавов является актуальной с научной точки зрения и имеет важное практическое значение для разработки и производства деталей с высоким уровнем триботехнических характеристик.

### Общая характеристика работы.

Диссертационная работа имеет методологически обоснованное построение. На основе всестороннего анализа состояния вопроса определены цели и задачи исследования. На первом этапе проводится выбор состава сплавов для исследований. Исходя из необходимости обеспечения максимального термического упрочнения, автор определяет молибденовый эквивалент перспективных сплавов равным  $[Mo]_{\text{экв}} = 12 - 14\%$  при максимально возможным без образования  $\alpha_2$ -фазы содержании алюминия в 6-7%. Для определения оптимальных соотношений изоморфных и эвтектоидобразующих элементов, а также дополнительного легирования нейтральными упрочнителями (Zr, Sn), выплавлены модельные сплавы, а также включены в исследования промышленные сплавы VT22 и Ti-5553.

На следующем этапе работы изучено влияние химического состава материала на его структуру и свойства после термической упрочняющей обработки, которое позволило определить состав перспективного опытного сплава и сосредоточить внимание при дальнейших исследованиях именно на нём в сравнении с промышленными сплавами. В результате проведённой работы найдены режимы термической обработки (закалка и старение), обеспечивающие максимальную твёрдость материала.

Представляет интерес использования низкотемпературного ионно-вакуумного азотирования для термически упрочненных псевдо  $\beta$ -титановых сплавов. В этом случае предпринята попытка нахождения режимов обработки, позволяющих сохранять высокую твёрдость основы и дополнительно повысить твёрдость и износостойкость поверхности как за счёт твёрдорастворного упрочнения азотом  $\alpha$ -фазы, так и формирования керамического покрытия на основе TiN. Автору удалось найти режимы комбинированной технологии, обеспечивающие градиентное изменение твёрдости от поверхности к основе материала, исключая опасность разрушения и отслоение покрытия из нитрида титана при механических нагрузках.

Сделанные в работе рекомендации по обработке псевдо  $\beta$ -титановых сплавов были проверены при испытаниях модельных образцов на трение. Полученные при этом закономерности изменения коэффициента трения и износостойкости могут быть применены при разработке технологии изготовления пар трения для различных видов техники. Так разработанные технологические рекомендации были использованы для изготовления опытных образцов медицинского изделия «Комплекс универсальный для поддержки насосной функции левого и правого желудочков сердца – «СТРИМ КАРДИО»», о чем имеется акт в приложении диссертационной работы.

Научная новизна диссертационной работы Зайнетдиновой Г.Т. не вызывает сомнения и её основные положения могут быть сформулированы следующими пунктами:

- теоретически обоснован и экспериментально подтвержден состав нового псевдо  $\beta$ -титанового сплава Ti-6Al-4V-1Mo-1Cr-3,5Fe-2Sn-2Zr, который в термоупрочненном состоянии имеет более высокую твёрдость по сравнению с применяемые в промышленности сплавами VT22 и Ti-5553;

- показано, что сочетанием ионно-вакуумного азотирования и нанесения нитрида титана можно сформировать плотное безпористое покрытие TiN толщиной около 2 мкм, переходящее в твёрдый раствор азота в  $\alpha$ -титане и частиц Ti<sub>2</sub>N глубиной до 100 мкм, которое позволяет исключить скалывание покрытия при испытаниях на трения;

- установлены закономерности влияния упрочняющей термической обработки, ионно-вакуумного азотирования и нанесения покрытия из нитрида титана на триботехнические характеристики псевдо  $\beta$ -титановых сплавов в парах трения со сталью ШХ15 и керамикой ZrO<sub>2</sub>.

Рекомендации по практическому использованию основных результатов работы.

Разработанная комплексная технология упрочняющей термической обработки, ионно-вакуумного азотирования и нанесения покрытия нитрида титана может быть успешно использована для разработки и производства элементов конструкции из высокопрочных псевдо  $\beta$ -титановых сплавов, работающих в условиях трения, в авиа-, судостроении и машиностроении, а также в медицине.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современного оборудования с лицензированным программным обеспечением и проведением испытаний в соответствии с ГОСТ.

Вместе с тем по работе имеются следующие замечания:

1. По существующей российской классификации анализируемые сплавы относятся к двухфазным сплавам переходного класса, а не псевдо  $\beta$ . Эта группа начинается с молибденового эквивалента больше 15.
2. В работе говорится, что размер выплавленных опытных слитков: высота 14 мм, диаметр 40 мм. Вместе с тем нет данных об однородности структуры, которая в сплавах с железом, как правило, неоднородна. В тексте нет сведений о гомогенизационных отжигах и других обработках, которые уменьшают ликвацию.
3. Диссертант проводит деление сплавов по содержанию эвтектоидообразующих элементов исходя из значения 4.5. Это не корректно, так как все анализируемые модельные сплавы суммарно содержат более 4,5% хрома и железа.
4. По мнению диссертанта введение олова тормозит  $\beta \rightarrow \alpha$  превращение при охлаждении? Однако, олово увеличивает алюминиевый эквивалент и, с этих позиций, должно способствовать образованию  $\alpha$ -фазы, а не тормозить это превращение.
5. В постановке задачи диссертант отмечает (стр.58): «Благодаря тому, что эти сплавы обладают высокой прочностью, твердостью, высокой коррозионной стойкостью, их можно рассмотреть, как материал для изготовления подшипников. Однако титановые сплавы обладают низкой коррозионной стойкостью». Речь, наверное, идет об износостойкости?
6. Рассматривая влияние температуры нагрева под закалку, автор почему-то предполагает возможность протекания мартенситного превращения в анализируемых сплавах, которые обладают молибденовым эквивалентом 12-14. Как это объяснить?
7. На рис.3.7 и далее линии  $\beta$ -фазы ошибочно указаны, как 111, а не 110.
8. На стр.90 утверждается, что: «После закалки из  $(\alpha+\beta)$ -области твердость сплавов повышается, так как еще добавляется вклад дисперсионного упрочнения от  $\alpha$ - частиц (таблица 4.2)». Утверждение не корректно, так как размер  $\alpha$ -фазы, сформировавшейся в двухфазной области, составляет микрометры. Такие частицы не могут обуславливать дисперсионное

упрочнение в связи с их большим размером. Повышение прочности в этом случае обусловлено формированием двухфазной структуры.

Сделанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работы.

Диссертационная работа Зайнетдиновой Гульнары Тахировны выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченную самостоятельную научно-квалифицированную работу, в которой представлены научно-обоснованные технические и технологические решения по упрочняющей термической обработке, ионно-вакуумному азотированию и нанесению покрытия нитрида титана, обеспечивающие повышение триботехнических характеристик псевдо  $\beta$ -титановых сплавов.

Результаты диссертационной работы прошли апробацию на пяти международных научно-технических конференциях, опубликованных в 13 печатных научных работах, из которых 8 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК, и в 5 журналах, включенных в международные базы цитирования.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

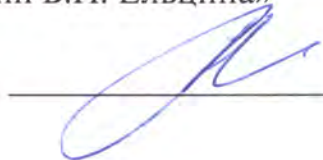
По научному уровню, полученным научно-техническим и практическим результатам, содержанию и оформлению, представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-16 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Зайнетдинова Гульнара Тахировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)».

Официальный оппонент

Доктор технических наук, профессор,

Заведующий кафедрой «Термообработка и физика металлов»

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»



Попов Артемий Александрович

21 ноября 2024 г.

г. Екатеринбург, 620002, ул. Мира, 19, УрФУ

Тел. 8-912-605-2477

e-mail: [a.a.popov@urfu.ru](mailto:a.a.popov@urfu.ru)

Подпись А.А.Попова заверяю:

Ученый секретарь университета



Б.А.Морозова