



**УТВЕРЖДАЮ**

Первый проректор по науке,  
д.т.н., профессор

Еникеев Р.Д.

« 26 » октября 2022 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» на диссертационную работу **Степушина Александра Сергеевича** «Создание линейной градиентной структуры в  $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавах для обеспечения высокого сопротивления динамическим нагрузкам», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

#### Актуальность темы диссертации

В настоящее время в мире постоянно ведутся работы по улучшению и созданию новых бронезащитных материалов, которые должны обеспечивать защиту от поражающих элементов. Перспективными материалами в данной области являются среднепрочные и высокопрочные  $(\alpha+\beta)$ - титановые сплавы, такие как ВТ6, ВТ23, ВТ22.

Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к материалам для бронирования, являются эффективное поглощение энергии удара и замедленная скорость распространения трещины. Применительно к титановым сплавам возможность увеличения стойкости к высокоскоростным направленным динамическим нагрузкам реализуется за счет формирования в полуфабрикate регламентированной структуры: с высокой твердостью поверхности с одной стороны, за счет дисперсной структуры, и вязкостью противоположной, за счет пластинчатой структуры. Для сплавов на основе титана это может быть реализовано за счет однонаправленного ввода водорода в присутствии барьерного покрытия. Поэтому изучение возможности применения термоводородной обработки для создания однонаправленной градиентной структуры в титановых сплавах в присутствии защитных (барьерных) покрытий является актуальной задачей.

### Общая характеристика работы.

Для создания градиентной структуры в титановых сплавах Степушиным А.С. была исследована стойкость различных покрытий при обработке в вакууме и от проникновения водорода. Было проанализировано четыре различных типа покрытий: оксидное, полученное при изотермической выдержке в печи с воздушной атмосферой при различных температурах; нитридное, полученное при вакуумной ионно-плазменной обработке; оксидное, полученное при микродуговом оксидировании, и анодно-оксидное, сформированное при электрохимическом анодировании. Автор установил, что только оксидное покрытие, полученное при температуре 900°C в течение 4 часов, и нитридное, сформированное при ионно-плазменном напылении при температуре 400°C в течение 30 минут, стойки к проникновению водорода при 800°C.

В диссертационной работе исследованы также особенности формирования фазового состава и структуры в образцах из сплавов ВТ6 и ВТ23 при однонаправленном наводороживающем отжиге, когда пять сторон образца были защищены барьерным покрытием. По мере удаления от поверхности, вследствие снижения содержания водорода, структура изменяется от практически однофазной  $\beta$  до двухфазной ( $\alpha+\beta$ ). Показано, что оксидные и нитридные покрытия устойчивы до концентрации 0,4 масс.% водорода включительно. При больших концентрациях водорода со стороны барьерного покрытия происходит его проникновение. В процессе дегазации при низкотемпературном вакуумном отжиге формируется линейная градиентная структура: в приповерхностных слоях со стороны, не защищенной покрытием перед наводороживающим отжигом, формируется мелкодисперсная структура, а с противоположной – сохраняется крупнопластинчатая. Твердость поверхностного слоя с дисперсной ( $\alpha+\beta$ )-структурой составила 40 – 41 ед. HRC, а с противоположной стороны – 33 ед. HRC. Созданная линейная градиентная структура обеспечивает высокую прочность и работу зарождения трещины, и низкую скорость её распространения.

Проведенные испытания на пулестойкость пластин из титановых сплавов ВТ6 и ВТ23 толщиной 12 и 18 мм с линейно-изменяющейся по сечению структурой, полученной по разработанной технологии, и плит с объемной крупнопластинчатой структурой, полученной отжигом в  $\beta$ -области показали, что образцы с линейной градиентной структурой стойки к высокоскоростным динамическим нагрузкам при испытании на пулестойкость к боеприпасам калибров 5,45-мм и 7,62-мм с пулями со стальным сердечником и пулями повышенной пробиваемости.

### Характеристика научной новизны

Наиболее важными и новыми результатами диссертационной работы являются:

1. Определенные температурно-концентрационные режимы стойкости оксидных и нитридных покрытий при обработке в вакууме к проникновению водорода.
2. Принципы формирования линейной градиентной структуры, которая по сечению полуфабрикатов изменяется от мелкодисперсной со стороны введения водорода до крупнопластинчатой с противоположной, вследствие различной интенсивности протекания фазовых и структурных превращений, связанных с обратимым легированием водородом.

### Практическая значимость работы

На основе полученных в диссертационной работе Степушина А.С. результатов разработана последовательность технологических операций и контролируемых параметров для создания в плитах из двухфазных ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавов ВТ6 и ВТ23 линейной градиентной структурой, которая обеспечивает им повышенные характеристики прочности и ударной вязкости, и способна выдержать выстрелы боеприпасами калибрами 5,45-мм и 7,62-мм с пулями со стальным сердечником и повышенной пробиваемости,

Такая технология, включающая этапы термической обработки в  $\beta$ -области для формирования крупнопластинчатой структуры; термического оксидирования или вакуумной ионно-плазменной обработки для нанесения барьерного покрытия; механической обработки для создания условий однонаправленного легирования водородом и однонаправленной термоводородной обработки. Разрабатываемая автором технология может быть применима и для других высокопрочных конструкционных двухфазных титановых сплавов, таких как ВТ22.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием поверенного и сертифицированного оборудования с использованием лицензионного программного обеспечения; проведением исследований и испытаний в соответствии с требованиями научно-технической документации, действующей на территории Российской Федерации (ГОСТ); хорошим совпадением экспериментальных данных и теоретических расчетов, использованием методов математической статистики при обработке результатов.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, апробированы на 18 научно-технических конференциях, опубликованы в 22 печатных работах, в том числе в 3 статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и в 6 статьях, включенных в международные системы цитирования. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в различных

областях машиностроения для изготовления защитных облегченных конструкций, способных противостоять высокоэнергетическим направленным ударным воздействиям.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По работе можно сделать следующие замечания

1. Не достаточно обоснован выбор материалов исследований. Оба сплава, и ВТ6 и ВТ23 относятся к  $(\alpha+\beta)$ - сплавам, и отличаются лишь разной группой прочности. ВТ6 является сплавом средней прочности, в то время как сплав ВТ23 ближе к высокопрочным титановым сплавам. И вывод о более высокой пулестойкости пластин из сплава ВТ23, чем из сплава ВТ6, как нам кажется, является ожидаемым результатом. Более интересным было бы сравнение сплавов различных структурных классов: например,  $\alpha$ -,  $(\alpha+\beta)$  и псевдо  $\beta$  сплавов.

2. Автор достаточно подробно изучил защитные свойства оксидных и нитридных покрытий и покрытий полученных методом МДО на образцах из сплавов ВТ6 и ВТ23 от проникновения водорода. Однако четких выводов о барьерных свойствах этих покрытий, об их преимуществах и недостатках почему-то в выводах не обнаружили.

3. При создании однонаправленной градиентной структуры автор употребляет термины «крупнопластинчатая» и «мелкодисперсная структура», однако каких-то количественных параметров для характеристики этих структур (размеры зерен фаз, объемные доли фаз и другие металлографические параметры) не приводит.

4. Не ясно, чем обусловлена толщина изделий 12 и 18 мм: только толщиной исходного материала или это максимально достижимые размеры линейной градиентной структуры. Как изменятся свойства и размеры (толщина изделия), если создать линейную градиентную структуру с 2-х противоположных сторон листа?

Следует отметить, что сделанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работы и ее общей высокой оценки.

Диссертация Степушина А.С. выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой получено новое технологическое решение, основанное на комплексной обработке, включающей нанесение барьерного покрытия и термоводородную обработку, позволившее создать линейную градиентную структуру в титановых сплавах ВТ6 и ВТ23, изменяющуюся от мелкодисперсной с одной стороны полуфабриката, до крупнопластинчатой с противоположной стороны, что обеспечило их повышенное сопротивление высокоскоростному динамическому нагружению.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», а область исследований соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

П.1. Изучение взаимосвязи химического и фазового составов (характеризуемых различными типами диаграмм), в том числе диаграммами состояния с физическими, механическими, химическими и другими свойствами сплавов. В работе изучены закономерности формирования фазового состава и структуры промышленных титановых сплавов ВТ6 и ВТ23 при однонаправленном легировании водородом.

П.2. Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях. В работе установлено влияние легирования водородом в присутствии барьерного оксидного или нитридного покрытия и последующего низкотемпературного вакуумного отжига на закономерности формирования однонаправленной градиентной структуры сплавов ВТ6 и ВТ23.

П.3. Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов. В работе определено влияние сформированной с помощью термоводородной обработки с однонаправленным наводороживающим отжигом линейной градиентной структуры на механические свойства сплавов ВТ6 и ВТ23.

П.6. Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химикотермической, термомеханической и других видов обработок, связанных с термическим воздействием, а также специализированного оборудования. В работе разработана технология получения в плитах из титановых сплавов ВТ6 и ВТ23 линейной градиентной структуры, включающая вакуумный отжиг в  $\beta$ -области с последующим медленным охлаждением до комнатной температуры; низкотемпературное напыление вакуумное ионно-плазменное напыление нитрида титана или высокотемпературное термическое оксидирование в печи с воздушной атмосферой; механическое удаление с одной поверхности заготовок покрытия; наводороживающий отжиг с охлаждением после поглощения заданного количества водорода со скоростью 1 К/с и последующий низкотемпературный вакуумный отжиг.

П.8. Исследование работоспособности металлов и сплавов в различных условиях, выбор и рекомендация наиболее экономичных и надежных металлических материалов для конкретных технических назначений с целью сокращения металлоемкости, увеличения ресурса работы, повышения уровня

заданных физических и химических характеристик деталей машин, механизмов, приборов и конструкций. В работе показано положительное влияние разработанной технологии обработки на механические, технологические и эксплуатационные свойства сплавов. Полученные по разработанной технологии плиты показали высокое сопротивление высокоскоростным динамическим нагрузкам при испытаниях боеприпасами калибров 5,45 и 7,62-мм.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Степушин Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Материаловедение и физика металлов» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», протокол № 4 от 25 октября 2022 года. На заседании присутствовало 32 НПП, из них 5 докторов наук. Результаты голосования: «за» – 32, против – нет, воздержавшихся – нет.

Заведующий кафедрой  
«Материаловедение  
и физика металлов»  
д.т.н., доцент



Парфенов Евгений Владимирович

E-mail: [parfenov.ev@ugatu.su](mailto:parfenov.ev@ugatu.su)  
Тел: + 7 (908) 350-21-78

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»  
450008, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12  
Электронная почта: [info@ugatu.su](mailto:info@ugatu.su), Адрес в сети интернет: <https://www.ugatu.su>  
Телефон: + 7 (908) 350-35-82