

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации 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»

Работа автора посвящена актуальному вопросу улучшения и создания новых бронезащитных материалов, которые должны в полной мере обеспечивать защиту от поражающих элементов. Одними из перспективных материалов в данной области являются высокопрочные  $(\alpha+\beta)$ -титановые сплавы, обладающие меньшим удельным весом в сочетании с высокой прочностью и невысокой хрупкостью. Наиболее важными требованиями к материалам для бронирования, являются эффективное поглощение энергии удара и замедленная скорость распространения трещины. Это достигается за счет высокой твердости поверхности и вязкой сердцевины. В титановых сплавах с помощью термоводородной обработки (ТВО) может быть создана структура, изменяющаяся по глубине и обеспечивающая различные свойства на поверхности и в сердцевине. Однако для создания такой структуры необходимо исследовать вопросы структурообразования при вводе водорода только с одной стороны поверхности полуфабриката и защиты остальных сторон от взаимодействия с водородом.

Установление закономерностей формирования фазового состава, структуры и свойств в  $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавах при термоводородной обработке в присутствии защитных покрытий для создания линейной градиентной структуры, обеспечивающей высокое сопротивление высокоскоростным динамическим нагрузкам, является актуальной научной и практической задачей.

Автором изучено влияние температурных, временных и концентрационных параметров обработки на формирование термического, электрохимического, микродугового оксидного, ионно-плазменного нитридного барьерных покрытий на поверхности образцов из титановых сплавов ВТ6 и ВТ23. Исследована их стойкость при обработке в вакууме

и защитные свойства от проникновения водорода при различных режимах термоводородной обработки. Установлено, что анодно-оксидное покрытие полностью растворяется при нагреве в вакууме, а барьерные свойства оксидного и нитридного покрытий зависят от расчетного количества вводимого водорода и степени легирования сплава.

Основным достоинством работы является разработка технологии получения в плитах из сплавов ВТ6 и ВТ23 линейной градиентной структуры, включающей: вакуумный отжиг, вакуумное ионно-плазменное напыление нитрида титана или термическое оксидирование в печи с воздушной атмосферой; механическое удаление с одной поверхности заготовок покрытия; наводороживающий отжиг до 0,2 масс.% для сплава ВТ23 и 0,4 масс.% для сплава ВТ6, охлаждение после поглощения заданного количества водорода со скоростью 1 К/с и последующий длительный вакуумный отжиг при температуре 625°C. Пластины толщиной 12 мм и 18 мм с линейно-изменяющейся по сечению структурой, полученной по разработанной технологии, показали стойкость к высокоскоростным динамическим нагрузкам при испытаниях на пулестойкость с использованием боеприпасов калибра 5,45-мм и 7,62-мм с пулей со стальным сердечником и пулей повышенной пробиваемости.

В качестве замечаний можно отметить следующее:

1. В главе 4 автореферата приведены результаты исследования влияния типа барьерного покрытия на глубину его проникновения в образцах из титановых сплавов ВТ6 и ВТ23 при различных расчетных концентрациях вводимого водорода. Однако из текста автореферата не ясен метод расчета и контроля концентрации вводимого в материал водорода. Так же не ясно, для каких из исследованных концентраций водорода приведены данные по твердости поверхностного слоя (40-41 HRC) после проведения низкотемпературного вакуумного отжига для удаления водорода до безопасной концентрации.

2. В выводе № 6 по работе указано, что при однонаправленном поверхностном наводороживании содержание водорода в поверхности

на 0,2 масс.% больше, чем рассчитанное на объем образца. Однако из текста автореферата не понятно, на основании каких данных сделан этот вывод.

3. Автор указывает, что разработанная технология может включать два варианта защитных покрытий: вакуумное ионно-плазменное напыление нитрида титана при температуре 400°C в течение 30 минут или термическое оксидирование в печи с воздушной атмосферой при 900°C в течение 4 часов. Однако в автореферате отсутствуют рекомендации по выбору типа барьерного покрытия при получении в плитах из титановых сплавов линейной градиентной структуры по разработанной технологии.

4. В автореферате не уделено внимание обоснованию выбора температуры вакуумного отжига для удаления водорода (625°C), хотя в выводе № 7 указано, что были проведены масштабные исследования.

Отмеченные замечания не снижают положительной оценки работы Степушина Александра Сергеевича, которая обладает несомненной теоретической и практической значимостью.

Рассматриваемая работа соответствует специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», отвечает критериям «Положения о присуждении ученых степеней» утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Степушин Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Генеральный директор  
Акционерного общества  
«Центр высокопрочных материалов  
«Армированные композиты»,  
доктор технических наук, профессор  
Академик РАН

«24» октября 2022 г.



Е.Ф. Харченко