

ОТЗЫВ

*официального оппонента к. т. н., доцента Панина Павла Васильевича
на диссертацию Степушина Александра Сергеевича «Создание линейной градиентной
структуры в $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавах для обеспечения высокого сопротивления
динамическим нагрузкам», представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов»*

Актуальность темы исследований

Хорошо известно, что высоким сопротивлением к динамическим нагрузкам обладают слоистые материалы, в которых внешние слои (непосредственно подвергаемые ударному воздействию) должны обладать высокой твердостью и прочностью для эффективного поглощения энергии удара, в то время как функция подлежащих слоев заключается в торможении распространения трещины – для этого они должны иметь высокую вязкость разрушения. Примерами таких материалов являются слоистые композиты, в которых слои обладают разнородными структурами и свойствами. Автор диссертационной работы Степушин Александр Сергеевич показал возможность формирования разнородных структур в пределах одного материала, в качестве которого выбраны титановые сплавы, что позволило достичь высоких показателей их удельной динамической стойкости. Выбранное автором направление научных исследований, безусловно, является *актуальным*, т.к. оно связано с технологиями производства элементов бронезащиты, которые являются весьма востребованной продукцией.

Диссертация посвящена созданию линейно-изменяющихся (градиентных) структур в деформированных полуфабрикатах из титановых сплавов марок ВТ6 и ВТ23 с целью повышения стойкости к высокоскоростным динамическим нагрузкам. Автором предложен и опробован вариант термоводородной обработки (ТВО), заключающийся в обратимом водородном легировании тестовых образцов из горячекатаных плит исследуемых сплавов. При этом термодиффузионное насыщение водородом осуществлялось только с одной стороны образца, в то время как другие плоскости были защищены специально наносимыми барьерными слоями, в качестве которых выбраны и исследованы оксидное, нитридное и МДО покрытия.

Барьерные покрытия препятствуют наводороживанию и, таким образом, в процессе наводороживающего отжига для поглощения водорода остается доступна только одна, не защищенная покрытием плоскость образца. Так создается градиент концентрации

водорода вглубь от поверхности, что, в свою очередь, приводит к структурным изменениям, выражающимся в различной степени завершенности $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения в зависимости от фактической концентрации введенного водорода. Последующий низкотемпературный вакуумный отжиг, применяемый для удаления водорода, обеспечивает условия, при которых в процессе дегазации зарождение новых частиц α -фазы преобладает над процессами их роста. В результате формируется линейная градиентная структура, которая изменяется от мелкодисперсной со стороны введения водорода до крупнопластинчатой ($\alpha + \beta$) – с противоположной стороны (в сердцевине образца). Результаты проведенных исследований подтвердили высокую эффективность структур, полученных с помощью однонаправленной ТВО титановых сплавов ВТ6 и ВТ23, к динамическим нагрузкам. Разработанная технология была масштабирована автором – в результате получены бронепластины $150 \times 70 \times h$ мм (где h – толщина исходного полуфабриката – плиты). При этом особого внимания заслуживает натуральный эксперимент по оценке динамической стойкости бронепластин, выполненный на баллистическом стенде (оценка пулестойкости). Таким образом, проведенные автором исследования укладываются в известный принцип «материал – технология – изделие», а полученные результаты свидетельствуют об успешном решении поставленных задач.

Научная новизна и практическая значимость работы

Научная новизна и обоснованность выносимых на защиту положений и выводов работы не вызывает сомнений. Наиболее важными, по мнению официального оппонента, являются следующие положения.

1. Установлено, что защитные свойства оксидного и нитридного покрытий от проникновения водорода в титановые сплавы зависят от расчетной концентрации вводимого водорода и степени легирования сплава. Показано, что при температуре 800°C однонаправленное легирование водородом сплава ВТ6 с оксидным покрытием возможно до 0,4 масс.%, а сплава ВТ23 до 0,2 масс.%, а с нитридным покрытием – до 0,4 масс.% для обоих сплавов. При превышении этих значений концентрации водорода и, соответственно, исходного давления водорода над сплавом защитные свойства покрытий снижаются.

2. Показано, что однонаправленное легирование водородом с последующим низкотемпературным (625°C) вакуумным отжигом позволяет создать в плитах толщиной 12 мм из титановых сплавов ВТ6 и ВТ23 линейную градиентную структуру, 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. При этом твердость изменяется от 42 до 33 ед. НРС соответственно.

Практическая значимость работы заключается в разработке технологии получения в плитах из сплавов ВТ6 и ВТ23 линейной градиентной структуры, включающей:

- вакуумный отжиг в β -области с последующим медленным охлаждением до комнатной температуры;

- 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;

- механическое удаление с одной поверхности заготовок покрытия;

- наводороживающий отжиг при 800°C 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 вакуумный отжиг в течение 8–10 часов при температуре 625°C.

Полученные по разработанной технологии плиты показали высокое сопротивление высокоскоростным динамическим нагрузкам при испытаниях боеприпасами калибров 5,45-мм и 7,62-мм (пулями со стальным сердечником и пулями повышенной пробиваемости).

Достоверность результатов не подлежит сомнению, т.к. автор применял современные методы исследования, а выводы базируются на большом объеме экспериментального материала и соответствуют теоретическим предпосылкам. Полученные результаты согласуются с известными положениями водородной технологии титановых сплавов, опубликованными другими авторами. Положительные результаты испытаний с надлежащей статистической обработкой и оценкой погрешностей также подтверждают достоверность результатов работы. В целом научные и практические результаты работы представляют собой значительный вклад в развитие отечественного материаловедения и дают основания полагать, что предложенный автором подход, заключающийся в однонаправленной ТВО, будет полезен при производстве конкурентоспособной продукции.

Замечания

В качестве *замечаний и рекомендаций* можно выделить следующие аспекты рассматриваемой работы.

1. В диссертации отсутствует обоснование выбора объектов исследования. Не ясно, почему автором выбраны титановые сплавы марок ВТ6 и ВТ23. Не вполне обоснован и

выбор защитных (барьерных) покрытий, препятствующих проникновению водорода. В целом, по мнению оппонента, автор недостаточно уделил внимание вопросам выбора объектов исследования.

2. В работе много уделено внимания температурно-кинетическим параметрам формирования барьерных покрытий, однако недостаточно подробно освещена кинетика водородного газонасыщения тестовых образцов из сплава ВТ23 – целесообразно было бы провести количественные или хотя бы оценочные исследования влияния продолжительности процесса наводороживания на глубину распределения водорода, чтобы иметь возможность сравнить с соответствующими результатами для сплава ВТ6.

3. В работе слабо отражена взаимосвязь количественных параметров формируемых микроструктур с комплексом получаемых свойств. Значения прочности и ударной вязкости в различных состояниях приводятся феноменологически, без анализа закономерностей влияния структуры на эти характеристики.

4. Для сравнительной оценки полученных в работе экспериментальных результатов испытаний на пулестойкость следовало бы привести соответствующие известные результаты для других (альтернативных) материалов – сталей (типа 42ХСНМА), алюминиевых сплавов (типа АМБТ) и др. Сравнительные данные позволили бы дать более полную оценку достигнутым автором показателям пулестойкости.

5. Автором не приведены данные по возможному дальнейшему масштабированию разработанной технологии однонаправленной ТВО. Имеется ли соответствующее оборудование для термодиффузионного насыщения водородом крупногабаритных полуфабрикатов (плит) из титановых сплавов – применительно к изготовлению бронепластин с размерами, приемлемыми для защиты автотранспортных средств?

Сделанные замечания не касаются существа работы, имеют скорее дискуссионный характер, не влияют на её основные результаты и выводы, и не снижают общую высокую оценку работы.

Заключение

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, доложены на 18 научно-технических конференциях, опубликованы в 22 научных работах, из них 3 – в изданиях, входящих в перечень ВАК, и 6 – в журналах, включенных в международные системы цитирования. Опубликованные работы и автореферат полностью отражают содержание диссертации. Автореферат и диссертация содержат все необходимые разделы.

Диссертационная работа А.С. Степушина представляет собой законченную квалификационную работу, выполненную автором самостоятельно на высоком научном

уровне. В работе представлены научные результаты, позволяющие их квалифицировать как новые. Полученные автором работы результаты изложены профессионально, грамотно и логично, достоверны, цели и выводы надежно обоснованы. Оформление работы соответствует предъявляемым требованиям.

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

Официальный оппонент:

кандидат технических наук (специальность 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»), доцент, ведущий научный сотрудник Лаборатории «Титановые сплавы для конструкций планера и двигателя самолета» (608) Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»


«01 декабря» 2022 г. E-mail: PaninPav@yandex.ru
Тел.: +7 (499) 263-86-11

Панин Павел Васильевич

E-mail: PaninPav@yandex.ru

Тел.: +7 (499) 263-86-11

Подпись в. н. с. Панина П.В. удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета



/Свириденко Д.С./

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ)

Почтовый адрес: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17

Тел.: +7 (499) 263-88-70

E-mail: admin@viam.ru