

## АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 6D060400 – «Физика»

**Буйткенова Дастана Болатулы**

### **Структурно-фазовые состояния и свойства детонационных покрытий на основе карбосилицида титана до и после импульсно-плазменной обработки**

В настоящее время наблюдается потребность в недорогих, но высокоэффективных технологиях модификации поверхности и нанесения защитных покрытий, позволяющих повысить эксплуатационные характеристики стальных изделий. Знание закономерностей диффузионных процессов и изучение кинетики превращений, происходящих при нанесении покрытий позволит существенно повысить эффективность поиска оптимальных методов их обработки. В настоящее время наиболее эффективным считается применение высокоскоростных технологий напыления покрытий, которые характеризуются высокой производительностью, универсальностью и простотой в управлении технологических параметров. А также интенсивно развиваются методы обработки поверхности изделий с применением комбинированных технологий, которые стимулируют процесс изменения структурно-фазового состояния материала, тем самым получая модифицированный поверхностный слой или покрытие с заданными свойствами.

Особый интерес представляет получение композиционных покрытий на основе МАХ-фазы (тройные карбиды  $M_{n+1}AC_n$  и нитриды  $M_{n+1}AN_n$ , М – переходный металл, А – элемент IIIA или IVA подгруппы). Интерес к МАХ-фазам (например, карбосилицид титана  $Ti_3SiC_2$ ) объясняется уникальным сочетанием в нем свойств металла и керамики: как керамика он жесткий, легкий, высокопрочный и износостойкий, имеет высокую температуру плавления, при этом легко обрабатывается как металлы. К числу наиболее новых композиционных материалов относится семейство так называемых МАХ–соединений, представляющих собой карбиды и силициды, отвечающие формуле  $Ti_3SiC_2$ . Благодаря особенностям строения кристаллической решетки  $Ti_3SiC_2$  характеризуется уникальным сочетанием физико-химико-механических свойств. Также системы Ti-Si-C имеют хорошие характеристики в условиях абразивного износа, коррозии, а также относительно низкую стоимость. Сочетание высокой износостойкости и коррозионностойкости позволяет использовать этого материала в качестве износостойких покрытий. Однако, несмотря на уникальность полезных в практическом отношении свойств, как массивные материалы, так и покрытия из  $Ti_3SiC_2$  до настоящего времени не нашел широкого применения в производстве. Одним из сдерживающих факторов широкого использования покрытия  $Ti_3SiC_2$  является сложность получения его в виде однофазного продукта из-за разложения МАХ-фаз при высоких температурах нанесения покрытий. Получение покрытий на основе  $Ti_3SiC_2$  газотремическими

методами обычно сопровождается образованием фаз Ti–C и Ti–Si. Получение покрытий со сравнительно большим содержанием  $Ti_3SiC_2$  возможно при некоторых способах газотермического напыления, в частности при детонационном напылении, который осуществляется использованием газового взрыва для разгона и разогрева частиц, напыляемого порошкового материала. При детонационном напылении порошковый материал плавится и с высокой скоростью под воздействием ударной волны движется к подложке образуя покрытие на её поверхности. Поскольку формирование структурно-фазовых состояний детонационных покрытий сильно зависит от технологического режима напыления, то увеличить объемной доли фазы  $Ti_3SiC_2$  можно путем подбора оптимальных режимов напыления. Увеличение объемной доли фазы  $Ti_3SiC_2$  обеспечивает высокие механические и трибологические свойства композитов.

Содержание  $Ti_3SiC_2$  можно в некоторой степени увеличить за счет применения объемной или поверхностной термической обработки. Однако, объемная термическая обработка имеет недостатки, связанные с разупрочнением материала подложки, а также применение объемной термической обработки экономически нецелесообразно. Поэтому, на наш взгляд, целесообразно применять способы поверхностной термической обработки концентрированными потоками энергии. Поверхностную обработку концентрированными потоками энергии можно осуществлять применением лазерного луча, электронного пучка, плазменного потока и т.д. Среди них, особый интерес представляет плазменный источник нагрева, в частности импульсно-плазменная обработка.

Таким образом, одним из перспективных направлений получения однофазных покрытий  $Ti_3SiC_2$  с высокими трибологическими характеристиками является применение комбинированного способа, включающего детонационное напыление порошка из  $Ti_3SiC_2$  и последующую импульсно-плазменную обработку. Поэтому, необходимо изучить закономерности формирования структуры и свойств покрытий на основе карбосилицида титана в зависимости от технологического режима детонационного напыления и изучить влияние нагрева на фазовые превращения в покрытиях на основе карбосилицида титана, а также изучить влияние режима импульсно-плазменной обработки на структурно-фазовые состояния и свойства покрытий на основе карбосилицида титана.

В литературных источниках нет общего мнения о формировании структуры и свойств покрытий на основе карбосилицида титана в зависимости от технологического режима детонационного напыления. А также в литературе нет данных о влиянии импульсно-плазменной обработки на структурные и фазовые превращения в детонационных покрытиях на основе Ti-Si-C. Кроме того, недостаточно изучены трибологические характеристики покрытий на основе карбосилицида титана.

Поэтому изучение закономерностей формирования структурно-фазовых состояний и трибологических свойств покрытий на основе карбосилицида титана в зависимости от технологического режима детонационного напыления

и от последующих термической и импульсно-плазменной обработок представляется актуальной.

**Целью работы** является исследование особенности формирования структурно-фазового состояния и свойств покрытий на основе карбосилицида титана при детонационном напылении и последующих термической и импульсно-плазменной обработок.

Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие **задачи**:

- определить влияние параметров детонационного напыления (соотношение и степень заполнения ствола ацетилен-кислородной смесью, дистанция напыления) на формирование структурно-фазового состояния и механико-трибологических свойств покрытий на основе карбосилицида титана;

- изучить процесс фазообразования детонационных покрытий на основе карбосилицида титана при термической обработке;

- изучить особенности структурно-фазового состояния поверхностных слоев детонационных покрытий на основе карбосилицида титана при импульсно-плазменной обработке;

- оценка износостойкости и анализ эффективности применения карбосилицидных покрытий, полученных методом детонационного напыления с последующей импульсно-плазменной обработки.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Формирование структурно-фазового состава и свойств покрытий на основе карбосилицида титана в зависимости от технологических параметров детонационного напыления. Получения покрытий на основе карбосилицида титана при детонационном напылении со следующими параметрами: объем взрывчатой смеси кислород-ацетилен 60 % с соотношением  $O_2/C_2H_2=1,856$ , дистанция напыления 50 мм, обеспечивает высокую твердость ( $\sim 1000HV$ ) и износостойкость за счет минимального разложения фазы  $Ti_3SiC_2$  (содержание фаз 39 вес.%). При увеличении объема заполнения детонационного ствола взрывчатой газовой смесью до 70 % из-за высокотемпературной ударной волны происходит разложение  $Ti_3SiC_2$  (МАХ-фазы) и уменьшение её объемной доли в составе покрытий до 29 вес.%.

2. Изменение структуры и свойств детонационных покрытий на основе карбосилицида титана в зависимости от температуры нагрева. В результате термической обработки при температуре 700-900 °С в течение 1 ч в покрытиях на основе карбосилицида титана наблюдается структурно-фазовое превращение с незначительным увеличением объемной доли МАХ-фазы ( $Ti_3SiC_2$ ) и выравнивание микроструктуры покрытий. Термическая обработка при 800 °С в течении 1 ч приводит к увеличению микротвердости и износостойкости покрытий приблизительно в 2,0-2,5 раза по сравнению с образцами до отжига.

3. Особенности структурно-фазовых превращений детонационных покрытий на основе карбосилицида титана при импульсно-плазменной обработке. После импульсно-плазменной обработки при следующих режимах:

электрод W, частота 1,2 Гц, скорость прохода 5 мм/сек, количество проходов 1, дистанция обработки 50 мм, содержание МАХ-фазы в составе детонационных покрытий увеличивается примерно в 1,7 раза. Обработка покрытий потоками импульсной плазмы позволяет формировать модифицированный слой толщиной до 20 мкм. Модифицирование структурно-фазового состояния приповерхностных слоев карбосилицидных покрытий приводит к изменению их механических характеристик: увеличению микротвердости поверхности до 1,8 раз, уменьшению коэффициента сухого трения 1,5-2,0 раза и повышению износостойкости образцов.

**Объект исследования** – детонационные покрытия на основе карбосилицида титана до и после импульсно-плазменной обработки.

**Предмет исследования** – структурно-фазовые превращения, происходящие в детонационных покрытиях до и после импульсно-плазменной обработки и их взаимосвязь со свойствами покрытий (твердость, адгезионная прочность и износостойкость).

**Методы исследования.** Для изучения структурно-фазовых состояний детонационных покрытий на основе карбосилицида титана применялись следующие методы экспериментального исследования: рентгеноструктурный анализ, сканирующая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, электронная Оже-спектроскопия, профилометрия. Механические характеристики покрытий определялись методом скретч-тестирования (метод царапания), путем измерения микротвердости, а также измерением твердости и модуля упругости покрытий на поперечном сечении образца методом наноиндентирования. Трибологические свойства покрытий определялись измерением коэффициента трения и износа трущихся поверхностей по схеме «шар-диск», а также испытаниями на абразивное и ударно-абразивное изнашивание.

При выполнении работы использовали ресурсы и оборудование Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» и Национальной научной лаборатории коллективного пользования НАО ВКУ имени Сарсена Аманжолова, лаборатории Карагандинского университета имени академика Е.А. Букетова, Научно-производственной фирмы ТОО «PlasmaScience», Вроцлавского университета науки и технологий (г. Вроцлав, Польша), Центра измерения свойств материалов ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, Россия) и Института электросварки имени Е.О. Патона НАН Украины (г. Киев, Украина).

#### **Научная новизна работы:**

– впервые рассмотрены возможности применения детонационного напыления для получения покрытий на основе карбосилицида титана ( $Ti_3SiC_2$ ), которые обеспечивает низкую степень разложения МАХ-фаз. На основе оценки влияния основных параметров режима детонационного напыления на структурно-фазовые состояния и свойства покрытий сделан обоснованный выбор рационального режима нанесения покрытий;

– впервые изучены влияния импульсно-плазменной обработки на структурно-фазовые состояния и свойства (твердость и износостойкость) детонационных карбосилицидных покрытий. На основе полученных данных разработан новый комбинированный способ получения износостойкого покрытия, включающий детонационное напыление и последующую обработку импульсно-плазменным воздействием и предложено ее применение в качестве финишной обработки для дополнительного повышения механико-трибологических характеристик поверхностных слоев покрытий. Разработанный способ защищен патентом на полезную модель «Способ получения износостойкого покрытия» (№6659 опуб. 12.11.2021г.).

**Практическая значимость.** Предложены эффективные пути повышения износостойкости детонационных покрытий на основе карбосилицида титана с применением импульсно-плазменной обработки. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании технологии получения износостойких покрытий на основе МАХ-фаз для повышения срока службы стальных деталей, в частности деталей почвообрабатывающих машин, работающих в условиях износа и трения.

**Связь работы с научно-исследовательскими проектами.** Диссертационная работа на тему «Структурно-фазовые состояния и свойства детонационных покрытий на основе карбосилицида титана до и после импульсно-плазменной обработки» соответствует приоритетному направлению развития науки «Энергетика и машиностроение» и выполнена в соответствии со следующими проектами, финансируемыми Комитетом науки МОН РК:

– BR05236748 «Исследования и разработка инновационных технологий получения износостойких материалов для изделий машиностроения», программно-целевое финансирование на 2018-2020 гг., договор №197 от 16.03.2018 г.;

– AP08957719 «Разработка способа упрочнения и восстановления рабочих органов почвообрабатывающих машин», грантовое финансирование на 2020-2021 гг., договор №223 от 12.11.2020 г.

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора состоит в участии в проведении экспериментов, получении результатов, изложенных в диссертации, обобщении и анализе полученных результатов, написании научных статей по теме диссертации. Постановка задачи, формулировка основных выводов и положений диссертационной работы были проведены совместно с научными консультантами.

**Степень обоснованности и достоверности результатов** обеспечивается использованием современных методов изучения структуры, химического и фазового состава, профиля поверхности, механических и трибологических испытаний, стандартных методик испытаний, большими объемами и повторяемостью экспериментальных данных. Результаты исследования, проведенные в диссертационной работе, не противоречат известным научным представлениям и результатам.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты доложены на: 11-ом Международном симпозиуме «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка», г. Минск, Белоруссия, 10-12 апреля 2019 г.; в Международной научно-практической конференции «XXXVIIIth Autumn Tribology School 2019» с 10 по 13 сентября 2019 года.; XIII International Scientific and Practical Conference «International Trends in Science and Technology», Warsaw, Poland, 25 May, 2019; VI Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2020» 11-14 февраля 2020 г.; 14-ом Международном симпозиуме «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка», г. Минск, Белоруссия, 9-11 сентября 2020 г.; IEEE 10th International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties” (NAP-2020) Sumy, Ukraine, 9-13 November 2020.; IEEE 11th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2021) 5-11 September 2021; в Международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии», Томск, 2021. Кроме того, основные научные результаты докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Физика и технологии» и научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» ВКУ имени Сарсена Аманжолова.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 19 работ, из них 5 статей в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science и Scopus, 4 статьи в журналах рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки МОН РК, 9 работ в материалах республиканских и международных конференций, а также 1 патент на полезную модель Республики Казахстан.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 224 наименований и 2 приложений. Общий объем диссертации 113 страниц, включая 64 рисунка и 16 таблиц.