



Современным подходом к повышению прочностных и трибологических свойств металлокерамических покрытий является формирование в них иерархии наноструктурных составляющих в виде наноразмерных включений керамических фаз с характерными размерами от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров. Иерархия наноскопических составляющих внутренней структуры определяет многостадийность процесса развития повреждений и трещин, и, следовательно, способствует повышению прочности и вязкости разрушения покрытий. При этом неаддитивность влияния различных структурных составляющих приводит к тому, что требования к внутренней структуре наноструктурированных металлокерамических покрытий должны относиться не только к объемной доле и характерным размерам наноскопических составляющих, но и к иерархии масштабов структурных элементов в целом и, в частности, к морфологии наноструктуры.

Диссертационная работа Чеснокова А.Е. посвящена изучению закономерностей формирования высокопрочных структур в порошковых металлокерамических частицах состава TiC-(NiCr)-сплав и в газотермических покрытиях на их основе. Металлокерамические порошки получались методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) порошковых смесей титана с углеродом (ламповая сажа) и металлическим связующим (никельхромовый сплав ПХ80Н20) с последующим механическим измельчением синтезированных компактов. Рассматривались два режима СВС: свободное горение и синтез под давлением.

В работе исследованы закономерности формирования структуры и трибологических свойств плазменных и детонационных покрытий, получаемых напылением металлокерамических частиц с различными значениями дисперсности частиц и соотношения керамической и металлической составляющих. Анализировалось влияние параметров высокоэнергетической обработки на структуру и свойства синтезированных металлокерамических порошковых частиц, а также структуру и свойства получаемых с их помощью плазменных и детонационных металлокерамических покрытий.

Актуальность и новизна проведенного комплекса исследований определяется тем, что эти исследования являются частью Программы разработки новых технологий повышения ресурса работы критических элементов высоконагруженных трибомеханических систем путем проведения многостороннего изучения физико-химических и механических свойств поверхностных слоев металлокерамических композиционных материалов и покрытий высокодисперсного строения. Данная Программа относится к критической технологии «Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов» из перечня критических технологий Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. N 899).

#### **Цель и задачи исследований.**

Целью диссертационной работы является получение данных о структуре и износостойкости металлокерамических покрытий, получаемых плазменным и детонационным напылением металлокерамических порошков на основе высокодисперсного карбида титана с никельхромовым связующим при различном соотношении керамической и металлической компонент. Для достижения этой цели проведен анализ закономерностей влияния параметров высокоэнергетической обработки компонентов металлокерамической композиции и напыленных покрытий на структуру и свойства порошковых частиц и получаемых на их основе металлокерамических покрытий. Тематика диссертационной работы соответствует программе исследований, проводимых в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН по разделу: «Разработка научных принципов формирования

покрытий и поверхностных слоёв с низкоразмерными структурными элементами для создания материалов с высокими физико-механическими характеристиками». Значительная часть представленных в диссертации результатов получена при проведении совместных с ИТПМ СО РАН исследований в рамках интеграционных проектов СО РАН (2012-2014 гг.) и представлена в ряде совместных публикаций в российских и зарубежных изданиях.

Достижение поставленной цели в диссертации реализовано через решение следующих задач:

- изучение влияния механической обработки на характеристики исходных порошковых частиц титана и нихрома для высокотемпературного синтеза металлокерамики TiC-(NiCr);

- изучение влияния механической обработки порошковой смеси исходных элементов на микроструктуру и твердость металлокерамики TiC-*n*%об.(NiCr) (*n*=30, 40, 50), полученной методом СВС под давлением и в свободном состоянии исходной порошковой прессовки;

- выявление основных особенностей структуры металлокерамических порошковых частиц, полученных механическим измельчением синтезированных металлокерамических компактов;

- исследование микроструктуры и стойкости к абразивному износу металлокерамических покрытий, полученных методами плазменного и детонационного напыления металлокерамических порошков;

- сравнительный анализ структурных и трибологических параметров детонационных покрытий из синтезированных металлокерамических порошков состава TiC-(NiCr) с различным содержанием керамической компоненты и детонационных покрытий на основе широко используемого коммерческого порошка Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-21%об.(NiCr).

Особый интерес вызывают представленные в диссертации результаты исследования влияния импульсного электронно-пучкового облучения на морфологию поверхности и внутреннюю структуру плазменных металлокерамических покрытий, напыленных металлокерамическими порошками с частицами различных характерных размеров. Полученные в диссертации данные о влиянии импульсного электронно-пучкового облучения на значения пористости и дисперсности внутренней структуры металлокерамических покрытий, напыленных металлокерамическими частицами различной крупности, хорошо коррелируют с результатами проводимых в ИФПМ СО РАН исследований модификации структурно-фазового состояния поверхностных слоев металлокерамических композитов при импульсном электронно-пучковом облучении в плазмах инертных газов. Это говорит об общности закономерностей процессов структурно-фазовой модификации металлокерамических композитов и металлокерамических покрытий при внешнем высокоэнергетическом воздействии.

Востребованность научно-технических результатов диссертационной работы определяется широким применением высокоресурсных металлокерамических покрытий в узлах трения трибомеханических систем (в частности, систем, функционирующих при высоких температурах и в агрессивных средах) и в качестве критических элементов режущего и обрабатываемого инструмента. Эффективность работы таких трибомеханических систем определяется физическими и механическими свойствами поверхностных слоев (или покрытий) толщиной до 100...200 микрон.

В качестве примеров потенциальных потребителей результатов диссертационной работы можно назвать следующие:

- ФГУП ВИАМ (г. Москва), для разработки металлокерамических покрытий с высокими значениями износостойкости и ударной прочности в широком диапазоне

температур эксплуатации;

- электровакуумный завод ХК ОАО НЭВЗ-СОЮЗ (г. Новосибирск), для разработки технологии упрочнения поверхностных слоев керамических материалов;
- ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» (г. С-Петербург), для разработки технологии получения металлокерамических покрытий целевого назначения;
- ОАО «Новосибирский инструментальный завод», для придания повышенных потребительских свойств слесарно-монтажному инструменту.

### **Значимость для науки полученных результатов.**

В диссертационной работе получен ряд оригинальных результатов, расширяющих круг знаний о возможностях целенаправленного влияния на морфологию и структурное совершенство порошковых металлокерамических покрытий. В частности, определены параметры высокоэнергетической обработки, как исходных порошковых компонентов, так и напыленных покрытий, обеспечивающие формирование в металлокерамических покрытиях неравновесных структурно-фазовых состояний, обладающих высокими физическо-механическими (в частности, прочностными) и трибологическими свойствами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые определены условия и режимы обработки исходных порошковых частиц титана и никельхромового сплава в энергонапряженной планетарной мельнице, обеспечивающие достижение максимальных значений удельной поверхности и минимальных размеров исходных порошковых частиц. Определены параметры высокотемпературного синтеза, обеспечивающие формирование в металлокерамическом продукте  $TiC-30\%об.(NiCr)$  однородной структуры с включениями карбида титана сфероподобной формы. Такая структура способствует повышению твердости синтезированной металлокерамики более чем на 15%.

2. Впервые показано, что увеличение объемной доли инертного металлического связующего (никельхромового сплава) в исходной порошковой смеси титана и углерода приводит к уменьшению размера карбидных включений в металлокерамическом продукте  $TiC-n\%об.(Ni-Cr)$  ( $n=30, 40, 50$ ), синтезированном, как в свободном режиме горения, так путем синтеза под давлением. Дано феноменологическое обоснование эффекта диспергирования карбидной компоненты в зависимости от объемного содержания инертного металлического связующего.

3. Установлено, что импульсное электронно-пучковое облучение плазменных металлокерамических покрытий, напыленных металлокерамическим порошком с размером частиц от 70 до 90 мкм и отличающихся сравнительно высокими значениями шероховатости ( $Ra \sim 100$  мкм) и пористости (до 30%), практически полностью устраняет пористость покрытий толщиной до 70 мкм и значительно уменьшает шероховатость поверхности.

4. Показано, что стойкость к абразивному износу металлокерамического покрытия из синтезированного в свободном режиме горения металлокерамического продукта состава  $TiC-30 об. \%(Ni-Cr)$ , измеренная по международному стандарту ASTM G65, превосходит на 20% износостойкость покрытия из широко известного коммерческого порошка состава  $Cr_3C_2-21\%об. (Ni-Cr)$ .

### **Значимость для производства.**

Высокоресурсные металлокерамические покрытия представляют постоянно растущий интерес для современного машиностроения. Это обусловлено их применением в трибомеханических системах и узлах, в том числе в качестве поверхностного слоя контртел пар трения при сухом и высокоскоростном трении,

способного эффективно работать при повышенных температурах. Применение технологий плазменного напыления металлокерамических покрытий из СВС-металлокерамических порошковых материалов на основе карбида титана с жаростойким металлическим связующим и последующей высокоэнергетической обработки покрытий позволяет получать металлокерамические покрытия с высоким ресурсом работы, характеризующиеся более низкой по сравнению с традиционными покрытиями стоимостью.

На диссертационную работу получен отзыв от ОАО «Новосибирский инструментальный завод» за подписью технического директора И.А. Квактуна, в котором отмечено, что особый интерес представляет применение технологии плазменного напыления металлокерамических порошковых материалов с последующей высокоэнергетической обработкой их поверхности для профилировочных валков ковочных вальцев и прокатного инструмента станов поперечной-клиновой прокатки без дополнительной обработки формообразующих поверхностей, а также для упрочнения рабочих элементов дробемётных машин. Данная технология позволит в значительной мере увеличить долговечность данных элементов.

#### **Замечания к диссертационной работе.**

1. В основе диссертационной работы лежит исследование процессов формирования и модификации структурно-фазового состояния на всех стадиях получения металлокерамического покрытия – от стадии синтеза металлокерамического компакта и получения металлокерамических порошков, до стадии плазменного и детонационного напыления покрытий с последующей импульсной электронно-пучковой обработкой. Однако в работе практически отсутствуют данные рентгенофазового анализа, как получаемых порошковых материалов, так и напыленных металлокерамических покрытий. Отсутствие таких данных делает затруднительным оптимизацию режимов различных стадий технологической цепочки для получения максимально возможных значений эксплуатационных свойств конечного продукта.

2. В диссертационной работе отсутствует информация о соотношении объемных долей керамической и металлической компонент в синтезированных металлокерамических порошках. Также отсутствуют данные об изменении этого соотношения в результате их плазменного/детонационного напыления и после высокоэнергетической обработки покрытий. Между тем указанное соотношение, наряду с дисперсностью керамической компоненты, в значительной мере определяет прочность и износостойкость покрытий.

3. Необходимо отметить, что понятие «трибологические свойства» относится не только к стойкости к абразивному износу материала, но, в первую очередь, к величине коэффициента трения по поверхности покрытия. Исчерпывающие сведения о величине коэффициента трения в работе отсутствуют.

#### **Выводы.**

Диссертация Чеснокова Антона Евгеньевича «Влияние высокоэнергетических воздействий на микроструктуру СВС металлокерамических порошков и газотермических покрытий «карбид титана – нихром» посвящена детальному исследованию возможностей целенаправленного получения металлокерамических порошковых материалов заданного фазового состава и структуры с последующим получением и модифицированием структуры и свойств металлокерамических покрытий.

Диссертация Чеснокова А.Е. имеет внутреннее единство и является завершённой практически важной научно-квалификационной работой, в которой на основании

выполненных автором исследований изложены научно обоснованные технологические разработки, имеющие существенное значение для проектирования и создания новых технологий получения высокоресурсных металлокерамических покрытий, предназначенных, в том числе, для экстремальных условий эксплуатации.

Диссертация соответствует критериям, установленным п.9 "Положения о порядке присуждения учёных степеней" постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842), а её автор Чесноков Антон Евгеньевич достоин присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Отзыв на диссертацию и автореферат рассмотрен и одобрен на заседании лаборатории композиционных материалов ИФПМ СО РАН 12 октября 2016 г., протокол № 4.

Ведущий научный сотрудник

Лаборатории компьютерного конструирования материалов

ИФПМ СО РАН

доктор физико-математических наук



Шилько Евгений Викторович

18.10.2016