

**ОТЗЫВ
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

Кузнецова Вячеслава Геннадьевича

на диссертационную работу Митрофанова Андрея Леонидовича
«Исследование свойств и структурно-фазовых характеристик многокомпонентных оксидных порошков на основе системы $ZrO_2-Al_2O_3$ и $Yb_2Si_2O_7$ и порошковых плазменных покрытий на их основе» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5. «Порошковая металлургия и композиционные материалы» (технические науки)

Актуальность темы диссертации

Постоянно растущие требования к температурным режимам работы узлов машин в аэрокосмической отрасли и энергетике, в том числе, при производстве газотурбинных двигателей, напрямую связаны с ростом коэффициента полезного действия силовых установок. В настоящее время происходит изучение процесса замены суперсплавов, традиционно применяемых при изготовлении деталей, работающих в экстремальных условиях, различными керамиками или металлокерамическими композитами, способными выдерживать более высокие температуры эксплуатации. В то же время применение суперсплавов для определенного интервала температур пока широко используется. Для повышения служебных характеристик деталей из обоих указанных классов материалов используются защитные жаростойкие покрытия, совершенствование которых является важнейшей задачей. При этом весьма важным при их разработке является обоснованный выбор, как составов, так и метода нанесения покрытий. Исследования по этому направлению в разных странах ведутся весьма интенсивно.

В этой связи диссертационная работа Митрофанова А.Л., посвященная разработке новых оксидных материалов и методов получения из них порошков и покрытий, безусловно, актуальна.

Общая характеристика работы

В работе представлена разработка комплексной технологии формирования термобарьерных покрытий, состоящей из высокочастотного переплава в холодном тигле оксидов тугоплавких и керамических материалов и последующего их размола и рассеяния для изготовления порошков требуемого состава с фракцией необходимого размера. Для получения порошков в работе использовали в качестве исходных оксиды циркония, алюминия, кальция, иттербия и кремния. Среди

преимуществ данной технологии следует отметить получение порошков с равномерным распределением элементов по объему. При этом двукратное применение технологии высокочастотного переплава – для изготовления стабилизированного оксидом кальция диоксида циркония и для получения порошков для напыления, обеспечило высокую чистоту состава покрытий. В работе при изготовлении порошков и покрытий из них исследовали 2 вида оксидных материалов – на основе системы $ZrO_2-Al_2O_3$ с различным соотношением компонентов и редкоземельный силикат высокой чистоты (100 %-ный дисиликат иттербия – $Yb_2Si_2O_7$). Нанесение всех покрытий в работе проводили атмосферным плазменным напылением. Использовали подложки из следующих материалов: муллит, сплав X20H80, ВТ6, ситалл СТ-32-11.

Для получения качественных покрытий нужна высокая фазовая стабильность. Поэтому на протяжении всей работы автор проводил исследования структурно-фазовых превращений получаемых материалов и покрытий. Так в работе были исследованы структурно-фазовые превращения и эксплуатационные характеристики покрытий, полученных методом атмосферного плазменного напыления порошков на основе системы $ZrO_2-Al_2O_3$, такие как адгезионная прочность, жаростойкость, термостойкость и обнаружены существенные фазовые изменения по сравнению с исходными порошками систем с частично стабилизированным оксидом циркония (PSZ/Al 30/70, 80/20 и 18,5Zr/5Ca/76,5Al). Покрытия обладают удовлетворительной адгезионной прочностью, однако при испытаниях на жаростойкость наблюдалось отслаивание от подложек. При испытаниях на термостойкость при 1000 °С кратковременным воздействием плазменной струи на покрытие отслоения покрытий от подложек не наблюдалось. Для покрытия с полностью стабилизированным оксидом циркония (30FSZ/70Al) наблюдалась высокая фазовая стабильность.

Результаты исследования фазового состава образцов покрытий $Yb_2Si_2O_7$ на подложках из ВТ6, полученных после напыления при разных режимах, показывают наличие в каждом из них кристаллической фазы β - $Yb_2Si_2O_7$, которая составляет от 75 до 84 % от всего объема, и аморфной фазы в виде оксида кремния (SiO_2), которая составляет от 16 до 25 %. Покрытие обладает низкой адгезионной прочностью, при испытаниях на жаростойкость наблюдаются отслаивания от

подложек. При кратковременном воздействии плазменной струи на покрытие при испытаниях на термостойкость при 1000 °С отслоения покрытий от подложек не наблюдалось.

Для исследования влияния температуры на структуру и фазовый состав покрытия $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ проводили высокотемпературную рентгеновскую съемку при 200 – 1000 °С шагом 100°, которая показала полную кристаллизацию аморфной фазы в интервале температур 900 – 1000 °С. В целом в работе установлено, что с увеличением мощности напыления увеличивается доля аморфной фазы и повышается температура ее кристаллизации.

Научная новизна представленной работы заключается в том, что:

- благодаря использованию метода индукционного переплава в «холодном» тигле впервые удалось понизить минимальное значение содержания CaO в ZrO_2 –CaO, необходимое для полной стабилизации ZrO_2 , от 7,5 до 7,1 вес. %;
- установлено, что при нанесении методом атмосферного плазменного напыления покрытий системы PSZ/Al обнаружены существенные изменения фазового состава;
- показано, что после испытаний на жаростойкость при температуре 1200 °С происходит изменение фазового и химического состава покрытий систем PSZ/Al и FSZ/Al;
- впервые методом высокотемпературной рентгенографии исследованы фазовые превращения на интервале температур от 200 до 1000 °С в покрытии на основе дисиликата иттербия и установлено, что в интервале температур 900 – 1000 °С происходит полная кристаллизация аморфной фазы покрытия $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ с образованием моноклинной фазы $\beta\text{-Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$.

Работа имеет большую **практическую значимость**. В частности, разработана технологическая схема выплавки керамических материалов с их последующим размолотом для производства порошков; получены данные по структурно-фазовым превращениям в порошках и покрытиях на основе системы ZrO_2 – Al_2O_3 и $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$, что позволит более эффективно проектировать многослойные покрытия из разнородных материалов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается необходимым объемом экспериментальных исследований, применением комплекса современных

методов исследования, использованием сертифицированного оборудования, воспроизводимостью результатов измерений.

Соответствие автореферата диссертации

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации. Автореферат дает правильное и всестороннее представление о проделанной работе, содержит в кратком виде необходимую информацию, характеризующую полученные результаты, основные положения и выводы диссертации.

Диссертационная работа характеризуется внутренним единством структуры, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 144 наименований и приложения. Работа содержит 160 страниц машинописного текста, 81 рисунок и 41 таблицу.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 6-ти Международных и Всероссийских научно-технических конференциях, опубликованы в 19 печатных изданиях, из которых 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК и 2 – Scopus.

Замечания по диссертационной работе

К содержанию диссертационной работы и представлению результатов имеются следующие замечания:

1. В главе 2 указан выбор лишь двух материалов подложек, хотя в работе использовали четыре материала.
2. Влияние мощности плазматрона и расхода водорода на состав и структуру покрытия приведено в диссертации только для $Yb_2Si_2O_7$.
3. В диссертации не приведены результаты испытаний на жаростойкость покрытия 30FSZ/70Al.
4. В диссертации отсутствуют сведения об испытаниях на жаростойкость покрытий $Yb_2Si_2O_7$.
5. Результаты исследований на термостойкость в плазменной струе покрытий 18,5Zr/5Ca/76,5Al в диссертации отсутствуют.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки выполненной работы.

В целом представленная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические решения по нанесению атмосферным плазменным напылением теплозащитных покрытий из порошков, полученных методом высокочастотного переплава в холодном тигле с последующим размолотом оксидных материалов на основе системы $ZrO_2-Al_2O_3$ с различным соотношением компонентов и редкоземельного силиката $Yb_2Si_2O_7$.

Диссертационная работа «Исследование свойств и структурно-фазовых характеристик многокомпонентных оксидных порошков на основе системы $ZrO_2-Al_2O_3$ и $Yb_2Si_2O_7$ и порошковых плазменных покрытий на их основе» удовлетворяет требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Митрофанов Андрей Леонидович, заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5. «Порошковая металлургия и композиционные материалы» (технические науки).

Официальный оппонент,

Главный научный сотрудник, заведующий лабораторией модифицирования поверхностей материалов ФГБУН Институт проблем машиноведения РАН, доктор технических наук, с.н.с., лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники

Кузнецов
Вячеслав Геннадьевич

Подпись Кузнецова Вячеслава Геннадьевича удостоверяю,


Н.А. Ковальчик ОК ИПМаш РАН

(должность)



(подпись)

Е.А. Толмачева

ФИО

24.11.2025 г.

199178, Санкт-Петербург, В.О., Большой пр., 61
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук
e-mail: kvg-ipme@gmail.com
Телефон: +79500034597