



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
(ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»)

Вадковский пер., д. 1, Москва, 127055. Тел.: (499) 973-30-76. Факс: (499) 973-38-85

E-mail: rector@stankin.ru

№ _____

«УТВЕРЖДАЮ»

и.о. проректора по научной работе
ФГАОУ ВО «Московский
государственный технологический
университет «СТАНКИН»

Капитанов А. В.

«24» _____ 2025г.
МП

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального Государственного Автономного Образовательного Учреждения Высшего Образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» 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», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5. «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Актуальность темы диссертации

Постоянный рост нагрузок в узлах тепловых машин и изделий аэрокосмической и энергетической отраслей приводит к необходимости разработки новых, более совершенных термобарьерных покрытий. Однако несмотря на то, что в настоящее время происходит интенсивное изучение процесса замены суперсплавов, традиционно применяемых при изготовлении деталей, работающих в экстремальных условиях, различными керамиками или

металлокерамическими композитами, способными выдерживать более высокие температуры эксплуатации, применение суперсплавов для определенного интервала температур пока еще широко используется. Для повышения служебных характеристик деталей из обоих указанных классов материалов используются защитные жаростойкие покрытия, попытки совершенствования которых постоянно предпринимаются. Перспективными для этого являются материалы на основе системы $ZrO_2-Al_2O_3$ и редкоземельных силикатов на основе Yb_2O_3 . При разработке технологий получения покрытий наряду с оптимальным выбором их составов важнейшим является выбор эффективного метода нанесения покрытий. В настоящее время наиболее широко для нанесения термобарьерных покрытий используется метод атмосферного плазменного напыления порошковых материалов. При этом известно, что получаемые покрытия существенно зависят от состава, размера и формы частиц порошка. На основании изложенного следует заключить, что тема диссертации, посвященная получению и исследованию свойств и структурно-фазовых характеристик многокомпонентных оксидных порошков и покрытий системы $ZrO_2-Al_2O_3$ и редкоземельного силиката $Yb_2Si_2O_7$, безусловно актуальна.

Общая характеристика работы

В аналитическом обзоре автором критически рассмотрены основные применяемые и перспективные составы ТБП. Особое внимание уделено покрытиям на основе диоксида циркония (ZrO_2), уже нашедшего применение в различных отраслях промышленности. Рассмотрено возможное повышение характеристик покрытий на основе ZrO_2 путем допирования оксидами редкоземельных металлов (РЗМ) для улучшения фазовой стабильности и снижения теплопроводности диоксида циркония. Рассмотрены перспективы улучшения ТБП применением композиционных материалов системы $ZrO_2-Al_2O_3$. Путем сравнения методов получения порошков керамических материалов показано, что наиболее перспективным для получения тугоплавких материалов различного назначения является метод высокочастотного переплава (ВЧ) в холодном тигле. На основе анализа литературных данных поставлена цель работы и сформулированы конкретные задачи исследований.

Для повышения рабочих температур и термоциклических характеристик покрытий в работе предложено использовать гибридный состав на основе системы $ZrO_2-Al_2O_3$ со стабилизированным ZrO_2 . Важной задачей задачей при этом является исследование влияния соотношения компонентов системы $ZrO_2-Al_2O_3$ на фазовый состав и стабилизацию структуры порошков. Второй класс из исследуемых в работе материалов представляют силикаты на основе Yb_2O_3 , которые могут использоваться как жаростойкое покрытие и как градиентный

подслой для связки основного рабочего слоя с материалом деталей или связки слоев.

Автором разработана технологическая схема получения порошков выбранных составов, обеспечивающая их характеристики для метода атмосферного плазменного напыления. При получении порошков дисиликата иттербия $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ автор предотвратил частичное выкипание SiO_2 путем увеличения размеров порошка так, чтобы время их нагрева до температуры кипения совпало с временем достижения Yb_2O_3 температуры плавления.

Полученные в работе результаты исследования фазового состава покрытий с составами на основе системы $\text{ZrO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ после напыления говорят о фазовых переходах в покрытиях. С помощью высокотемпературной рентгеновской съемке установлено значительное влияние температуры на структуру и фазовый состав покрытия $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$.

Проведенные испытания покрытий в плазменной струе при температуре 1000 °С в течение 2000 секунд показали, что все типы покрытий отстояли без изменения массы, что говорит об их работоспособности. При 1400 °С образец 80PSZ/20Al прошел испытания без изменения массы в течение 120 секунд.

Научная новизна диссертационной работы Митрофанова А. Л. заключается следующем:

1. Благодаря использованию метода индукционного переплава в «холодном» тигле впервые удалось понизить минимальное значение содержания CaO в $\text{ZrO}_2\text{--CaO}$, необходимое для полной стабилизации ZrO_2 .

2. При нанесении методом атмосферного плазменного напыления покрытий в покрытие состава 30PSZ/70Al наблюдается увеличение содержания $t\text{-ZrO}_2$ и $m\text{-ZrO}_2$, а также появление фазы $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, в покрытиях 80PSZ/20Al и 18,5Zr/5Ca/76,5Al наблюдаются распад $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ на $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и CaO , а также стабилизация ZrO_2 с увеличением содержания фаз $t\text{-ZrO}_2$, $c\text{-ZrO}_2$ и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

3. Установлено, что после испытаний на жаростойкость при температуре 1200 °С в покрытии 30PSZ/70Al происходит растворение фазы $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, а в покрытиях 30FSZ/70Al, 80PSZ/20Al и 18,5Zr/5Ca/76,5Al фазовый состав не изменяется, но изменяется их химический состав.

4. Методом высокотемпературной рентгеновской съемки показано, что покрытия, полученные атмосферным напылением порошка $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ на подложки из сплава X20H80 и ситалла, имеют в интервале температур 200 – 900 °С идентичный фазовый состав: кристаллическую β -фазу и аморфную компоненту.

5. 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

β -фазы.

Практическая значимость работы

1. Получены температурные зависимости структуры, морфологии, ТКЛР, элементного и фазового состава оксидных порошков и покрытий системы $ZrO_2-Al_2O_3$ и $Yb_2Si_2O_7$.
2. Разработана технологическая схема высокочастотного переплава в холодном тигле оксидов тугоплавких и керамических материалов, которая может быть использована для производства многокомпонентных порошков.
3. Полученные данные по структурно-фазовым характеристикам покрытий на основе диоксида циркония и дисиликата иттербия могут быть использованы при конструировании новых многокомпонентных защитных покрытий.

Достоверность полученных результатов обеспечивается необходимым объемом экспериментальных исследований, применением комплекса современных методов исследования поверхности материалов, использованием сертифицированного оборудования, воспроизводимостью результатов измерений.

По работе имеются следующие замечания и вопросы

1. Нет обоснования использования подложек из муллита и ВТ6.
2. Интересным было бы прямое сравнение двух методов изготовления порошков: используя стабилизированный оксидом кальция диоксид циркония и полученный синтезом системы $ZrO_2-CaO-Al_2O_3$.
3. Нет заключения о специфике применения покрытий 30FSZ/Al.
4. Не ясно, почему оценки изменения фазового и химического состава при осаждении в зависимости от мощности плазматрона проводили только при напылении $Yb_2Si_2O_7$ на подложку ВТ6.
5. В диссертации представлены результаты испытаний на жаростойкость не всех исследуемых покрытий.

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертации и общей высокой оценки 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 синтезу теплозащитных покрытий из порошков, полученных по технологии высокочастотного переплава в холодном

тигле с последующим размолом оксидных материалов на основе системы $ZrO_2-Al_2O_3$ и редкоземельного силиката $Yb_2Si_2O_7$.

Результаты диссертационной работы прошли апробацию на 6 Международных научно-технических конференциях, опубликованы в 19 печатных работах, в том числе в 2 статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в Scopus.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в авиакосмической технике, энергомашиностроении и других отраслях промышленности.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Митрофанов Андрей Леонидович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5. «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Диссертационная работа и отзыв рассмотрены на заседании «Центра новых материалов и технологий», протокол № 6 от 19 ноября 2025 года. На заседании присутствовало 12 членов из 15. Результаты голосования: «за» 12, против – нет, воздержавшихся – нет.

Председатель заседания
Директор центра
доктор технических наук,
профессор

Суминов Игорь Вячеславович

Адрес организации: 127994, Москва, ГСП-4, Вадковский пер., д. 1

Наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Электронный адрес: rector@stankin.ru

Телефон: Тел.: (499) 973-30-76.