

## ОТЗЫВ

научного руководителя, д.т.н., профессора Лозована Александра Александровича о диссертационной работе 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», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности

### 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы

Диссертационная работа Митрофанова А. Л. посвящена решению актуальной задачи – получению и исследованию свойств и структурно-фазовых характеристик многокомпонентных оксидных порошков на основе системы  $ZrO_2-Al_2O_3$  и редкоземельного силиката  $Yb_2Si_2O_7$ , изготовленных размолом слитка высокочастотного переплава в холодном контейнере, и покрытий из них.

В качестве объекта исследования были выбраны порошки оксидов на основе системы  $ZrO_2-Al_2O_3$  и редкоземельного силиката  $Yb_2Si_2O_7$  и плазменно-напыленные покрытия того же состава.

На основе анализа методов получения порошков керамических материалов, их основных преимуществ и недостатков применительно к получению порошков для напыления термобарьерных покрытий (ТБП) показано, что наиболее перспективным для получения различных тугоплавких материалов различного назначения является метод высокочастотного переплава (ВЧ) в холодном тигле. Метод обеспечивает сохранность состава исходных материалов в слитке и равномерное распределение компонентов по его объему.

В работе исследовали в качестве перспективных для ТБП были выбраны материалы порошков на основе систем  $ZrO_2-Al_2O_3$  и  $Yb_2O_3-SiO_2$ , а именно:  $30ZrO_2 + 70Al_2O_3$  вес. %;  $80ZrO_2 + 20Al_2O_3$  вес. %;  $18,5ZrO_2 + 5CaO + 76,5Al_2O_3$  вес. %;  $Yb_2Si_2O_7$ . Для приготовления многокомпонентных материалов порошков методом ВЧ переплава использовали промышленную установку для выращивания монокристаллов оксидов методом направленной кристаллизации. Для изготовления порошков методами дробления и измельчения использовали технологическую цепочку из 8-ми переделов.

Проведено изучение температурной зависимости структуры, морфологии, ТКЛР, элементного и фазового состава оксидных порошков и покрытий системы  $ZrO_2-Al_2O_3$  и  $Yb_2Si_2O_7$ . Исследовано влияние соотношения компонентов системы  $ZrO_2-Al_2O_3$  на химический и фазовый состав и стабилизацию структуры порошков для атмосферного плазменного напыления. Показан многофазный характер и фазовую нестабильность порошков системы  $ZrO_2-Al_2O_3$  при нагреве до  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , в то время как порошок дисиликата  $Yb_2Si_2O_7$  показал фазовую стабильность.

Были получены в высокотемпературной камере при температурах  $200 - 1000\text{ }^\circ\text{C}$  рентгенограммы покрытия  $Y_2Si_2O_7$  с шагом  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . При температурах  $200 - 900\text{ }^\circ\text{C}$  рентгенограммы практически идентичны и содержат дифракционные линии от кристаллической  $Yb_2Si_2O_7$  фазы и гало, свидетельствующее о наличии аморфной фазы. При  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  аморфное гало отсутствует, при этом интенсивности дифракционных линий существенно увеличиваются, что свидетельствует о том, что температура кристаллизации аморфной фазы находится в интервале  $900 - 1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Зависимости от температуры высокотемпературной съемки периодов решетки фазы  $Yb_2Si_2O_7$  показывают резкое отклонение хода этих зависимостей от линейного при температуре  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Это обусловлено отрывом покрытия от подложки.

Далее проведены испытания покрытий на термостойкость в плазменной струе. Согласно проведенным испытаниям покрытий в плазменной струе при температуре  $T = 1000 \pm 50\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 2000 секунд все типы покрытий отстояли без изменения массы, что говорит об их работоспособности. При  $T = 1400 \pm 50\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 120 секунд у образца 30PSZ/70Al образовались трещины и при остывании произошло отслоение покрытия, потери массы после

испытаний составили 2,79 %. При  $T = 1400 \pm 50$  °C в течение 120 секунд образец 80PSZ/20Al прошел испытания без изменения массы.

При выполнении диссертационной работы Митрофанов А. Л. проявил себя как грамотный специалист, способный решать комплексные задачи технологического и материаловедческого характера применительно к процессам порошков для плазменных ТБП. Соискателем получен ряд значимых результатов, научная новизна, достоверность и объективность которых не вызывает сомнения. Разработанные технологии, технологические принципы и рекомендации востребованы современной промышленностью, о чём свидетельствуют прилагаемые акты изготовления и испытаний в промышленности.

Результаты, полученные в ходе диссертационных исследований Митрофанова А. Л., используются в учебном процессе МАИ, являясь составной частью оригинальных лекционных курсов для проведения практических и лабораторных занятий со студентами. Он активно участвует в научных мероприятиях различного уровня.

В целом соискателем успешно решены поставленные перед ним задачи, в полной мере реализованы планы исследований, что очевидным образом отражает содержание автореферата и диссертационной работы.

Результаты работы достаточно полно опубликовано в 19 научных работах, из них 2 в изданиях, входящих в перечень ВАК, переводные версии которых опубликованы в журнале, включенном в международные системы цитирования, доложены на 6 всероссийских и международных научных конференциях.

Считаю, что диссертация Митрофанова Андрея Леонидовича выполнена на актуальную тему, представляет собой законченную работу, обладающую несомненной научной новизной, практической значимостью и внутренней целостностью, удовлетворяет требованиям ВАК, а диссертант является сложившимся научным исследователем и заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы.

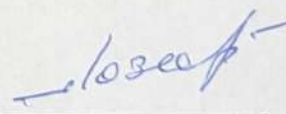
Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, профессор  
Образовательного центра Института № 11 ФГБОУ ВО  
«Московский авиационный институт (Национальный  
исследовательский университет)»

125993 г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

+7-916-198-4763

e-mail: loz-plasma@yandex.ru



Лозован Александр  
Александрович

24.09.2025

Подпись А.А. Лозована удостоверяю:

Заместитель начальника  
отдела кадров МАИ



Иванов М.А.