

REFERENCES

1. **Leonovich, I. I.**, & Kotlobai, A. Ya. (2005) *Machines for Highway Construction, Repair and Maintenance*. Minsk: BNTU. 552 p. (in Russian).
2. **Rannev, A. V.**, Korelin, V. F., Zhavoronkov, A. V., Shloido, G. A., Makushkin, D. O., Timofeev, V. A., Telushkin, A. V., Erofeev, L. V., Viazovikin, V. N., Zaitsev, L. V., Nevzorov, L. A., & Kuzin, E. N. (1991) *Construction Machines: Reference Book: in 2 Volumes. Vol. 1: Machines for Construction of Industrial and Civil Buildings and Highways*. 5th Revised Edition. Moscow, Mashinostroenie. 496 p. (in Russian).
3. **Kotlobai, A. Ya.**, Kotlobai, A. A., & Tamelo, V. F. (2013) Determinations of Directions Pertaining to Modernization of Earth-Digging Machines. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 5, 54–59 (in Russian).
4. **Kotlobai, A. Ya.**, Kotlobai, A. A., Shliakhtun, V. Iu., & Tamelo, V. F. (2014) Analysis of Directions and Possibilities for Modernization of Engineering Equipment of the Armed Forces. *Nauka i Voennaya Bezopasnost* [Science and Military Safety], 1, 27–30 (in Russian).
5. **Korobkin, V. A.**, Kotlobai, A. Ya., & Kotlobai, A. A. (2010) Digital Units for Hydraulic Drives of Construction and Road-Making Machines. *Stroitelnye i Dorozhnye Mashiny* [Construction and Road-Making Machines], 5, 43–46 (in Russian).
6. **Korobkin, V. A.**, Kotlobai, A. Ya., Kotlobai, A. A., & Tamelo, V. F. (2012) On Prospective Directions for Development of Hydraulic Drive Units in Construction and Road-Making Machines. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 6, 71–76 (in Russian).
7. **Vavilov, A. V.**, Kotlobai, A. Ya., & Kotlobai, A. A. (2014) Development of Equipment Drives for Construction and Road-Making Machines. *Stroitelnye i Dorozhnye Mashiny* [Construction and Road-Making Machines], 9, 35–41 (in Russian).
8. **Olshansky, A. V.**, Fedotov, N. F., Borodin, N. G., Trjanin, V. P., Gel'farb, A. I., Rzhetskij, V. A., Potapov, P. A., & Karavaenko, A. N. (1986) *Machines of Engineering Armament. Part I. General Description. Machines for Passing Through Demolitions and Mechanization of Earth Works*. Moscow, Military Publishing House. 422 p. (in Russian).
9. **Olshansky, A. V.** (1986) *Machines of Engineering Armament. Part I. General Description. Machines for Passing Through Demolitions and Mechanization of Earth Works*. Moscow, Military Publishing House. 422 p. (in Russian).
9. **Platonov, V. F.**, Korobkin, V. A., Kozhevnikov, V. S., & Platonov, S. V. (1998) *Multi-Purpose Tracked Chassis*. Moscow, Mashinostroenie. 342 p. (in Russian).
10. **Kotlobai, A. Ya.**, Kotlobai, A. A., Tamelo, V. F., Sukharev, D. V., & Zozulia, I. V. (2014) *Hydraulic Operating Drive System of Engineering Obstacle-Clearing Vehicle*. Patent Republic of Belarus No 10143 (in Russian).
11. **Karavaev, V. A.** (2000) JSC “Pnevmostroimashina” is a Leading Russian Enterprise on Designing, Manufacturing and Sale of Axial-Piston Hydraulic Machines. *Stroitelnye i Dorozhnye Mashiny* [Construction and Road-Making Machines], 6, 5–8 (in Russian).
12. **Kotlobai, A. Ya.**, Kotlobai, A. A., Tamelo, V. F., & Grigorenko, S. V. (2013) *Hydraulic System for Operating Equipment of Excavation Machine*. Patent Republic of Belarus No 9664 (in Russian).

Поступила 24.12.2014

УДК 621.793.71

ВЫБОР ОКСИДОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Асп. ОКОВИТЫЙ В. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: vasil_oka@inbox.ru

В статье проанализирован выбор оксидов и подробно описаны большинство оксидных систем, пригодных для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий с максимальным количеством тетрагональной фазы. Методика исследования основана на проведении обзора аналитической информации по современному состоянию теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидами редкоземельных металлов. Основным методом, используемым для нанесения теплозащитных покрытий из диоксида циркония, является плазменное напыление. Положительные результаты получены также при электронно-лучевом и ионно-плазменном напылениях, магнетронном распылении. Тем не менее преимущественное распространение плазменного напыления теплозащитных покрытий сохраняется прежде всего вследствие его высокой производительности и универсальности, позволяющей наносить металлические и керамические материалы заданного химического и фазового состава.

Отмечено, что качественные теплозащитные покрытия необходимо формировать из материалов с равномерным химическим и фазовым составом по сечению исходных порошков, максимальным количеством тетрагональной фазы и минимальным размером зерна фазовых включений, минимальным содержанием межкристаллитной влаги, со строго определенным размером и морфологией частиц исходного порошка. В качестве оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий выбраны оксиды иттербия и церия, а также рассмотрена оксидная система диоксида циркония «оксид гафния – оксид иттрия», которая представляет собой структуру, похожую на диоксид циркония.

Ключевые слова: диоксид циркония, теплозащитное покрытие, стабилизация, тетрагональная фаза.

Ил. 5. Библиогр.: 12 назв.

SELECTION OF OXIDES FOR STABILIZATION OF ZIRCONIUM DIOXIDE WHILE OBTAINING THERMAL BARRIER COATINGS

OKOVITY V. V.

Belarusian National Technical University

The paper analyzes selection of oxides and describes in details a majority of oxide systems which are applicable for stabilization of zirconium dioxide while obtaining thermal barrier coatings with maximum amount of tetragonal phase. Methodology of investigation is based on a review of analytical information on the current state of thermal barrier coatings on the basis of zirconium dioxide stabilized by oxides of rare-earth metals. The method used for application of zirconium dioxide thermal barrier coatings is plasma spraying. Positive results have been also obtained while applying e-beam sputtering, ion-plasma deposition and magnetron sputtering. Nevertheless preferred plasma spraying application for thermal barrier coatings still continues due to its high productivity and versatility that permits to deposit metallic and ceramic materials of the ordered chemical and phase composition.

Ytterbium and cerium oxides have been selected as oxides for stabilization of zirconium dioxide in order to obtain thermal barrier coatings. The paper also considers an oxide system of zirconium dioxide: "hafnium oxide – yttrium oxide", representing in itself the structure which is similar to zirconium dioxide.

Keywords: zirconium dioxide, thermal barrier coating, stabilization, tetragonal phase.

Fig. 5. Ref.: 12 titles.

Введение. Рабочая температура деталей и узлов газотурбинных двигателей последнее десятилетие характеризуется тенденцией роста (более 1150 °С), что, в свою очередь, позволяет повысить мощность установок и коэффициент полезного действия. В качестве материалов для керамического слоя теплозащитных покрытий (ТЗП) наибольшее применение в настоящее время получили композиции на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидами редкоземельных металлов (ЧСЦД) [1–6]. Это обусловлено рядом его свойств: низким коэффициентом теплопроводности λ (0,6–1,3 Вт/(м · К)) и сравнительно высоким коэффициентом термического линейного расширения α ($(6–13) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹), соизмеримым с коэффициентами для жаропрочных сплавов на основе Ni и Co ($(15–17) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹), возможностью обеспечения высоких механических свойств упрочненной керамики. В частности, цирконий и цирконаты щелочноземельных металлов имеют близкие с ЧСЦД физические свойства, однако их применение ограничено недостаточно высокими механическими свой-

ствами. Основным методом, используемым для нанесения теплозащитных покрытий из диоксида циркония, является плазменное напыление (до 90 % разработок) [2–4]. Положительные результаты получены также при электронно-лучевом и ионно-плазменном напылениях, магнетронном распылении. Тем не менее преимущественное распространение плазменного напыления ТЗП сохраняется, прежде всего, вследствие его высокой производительности и универсальности, позволяющей наносить металлические и керамические материалы заданного химического и фазового состава. В общем случае ТЗП представляет собой многослойную систему, включающую металлический подслой, внешний керамический слой и переходные керамические слои [2–5]. Основной причиной разрушения плазменных ТЗП являются термомеханические напряжения, возникающие при теплосменах в двигателях вследствие рассогласования термического расширения металла основы и керамического слоя, а также неравномерности распределения температурного поля в покрытии. Термомеханические напряжения

усугубляются действием остаточных напряжений, возникающих в покрытии при напылении, и ослабляются эффектами пластичности и ползучести, реализующимися в металлическом подслое. Значительная структурная чувствительность свойств покрытий на основе диоксида циркония требует строгой воспроизводимости результатов. Это накладывает особо жесткие ограничения на качество используемых материалов и точность поддержания технологических режимов нанесения покрытия. Улучшение свойств теплозащитных покрытий осуществляется также и посредством изменения структуры керамического слоя теплозащитного покрытия, создания градиентных слоев. Градиентные слои совмещают термостойкость керамики с пластичностью металлов. Постепенное изменение микроструктуры без резких границ раздела, плавное изменение микротвердости и сближение модулей упругости керамического и металлического слоев приводят к увеличению прочности ТЗП и его долговечности.

Оксиды для стабилизации диоксида циркония и оксида гафния при получении теплозащитных покрытий. В чистом виде диоксид циркония ZrO_2 существует в трех модификациях: кубической (высокотемпературная), тетрагональной (промежуточная) и моноклинной (низкотемпературная). При нагревании до 1220–1470 К начинается переход моноклинной формы в тетрагональную. При охлаждении наблюдается гистерезис, обусловленный тем, что моноклинная форма (m) проявляется лишь при 1240 К, а тетрагональная (t) исчезает при 1020 К [1–6]. Переход тетрагональной модификации чистого диоксида циркония в кубическую происходит при 2570–2640 К. Кубический ZrO_2 стабилен до точки плавления, равной 2870 К. Кубический ZrO_2 имеет гранецен-

трированную решетку флюорита, в которой каждый ион Zr^{4+} окружен восемью ионами кислорода, образующими два одинаковых четырехугольника (рис. 1). В тетрагональной модификации ион Zr^{4+} также имеет координационное число 8, однако четыре иона кислорода, находящиеся на расстоянии 2,065 Å от иона циркония, образуют правильный четырехугольник, а четыре (на расстоянии 2,455 Å) – правильный четырехугольник, повернутый под углом 90° по отношению к первому (рис. 2) [7–9]. В моноклинной модификации ион Zr^{4+} имеет координационное число 7, а ионы кислорода расположены в одной плоскости. Четыре из них находятся на расстоянии 2,21 Å, а три – на 2,07 Å от иона Zr^{4+} . Один из углов кристаллической подрешетки, образуемый ионами циркония, существенно отличается от прямого (рис. 3): угол $\beta + 81,22^\circ$ (при 1220 К). Описанные типы решеток диоксида циркония полностью не исчерпывают возможные изменения его структуры. Известно, в частности, о существовании при высоких давлениях орторомбической модификации (рис. 4), а также о модификациях тетрагональной высокобарной фазы (рис. 5) [9, 10]. Диоксиду циркония свойственно фазовое мартенситное превращение тетрагональной модификации в моноклинную и обратно ($t - m$). Мартенситное ($t - m$)-превращение происходит в интервале температур 1170–1420 К и сопровождается увеличением объема на 3–7 % в зависимости от содержания примесей и методов получения исходного материала. В ряде случаев, например при использовании материалов на основе диоксида циркония для создания термобарьерных слоев, особенности фазового перехода ($t - m$) применяются для повышения термической стабильности и стойкости к термоциклированию.

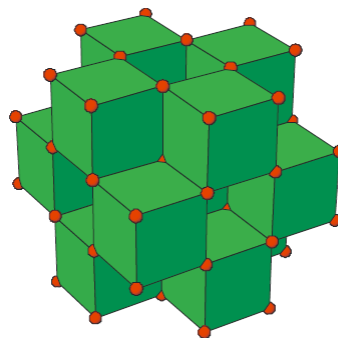
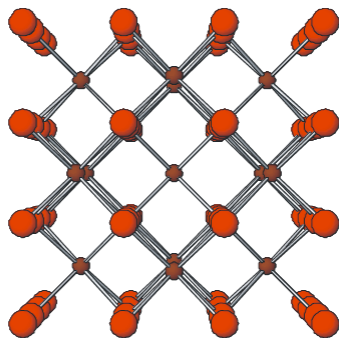


Рис. 1. Структура решетки кубической модификации ZrO_2

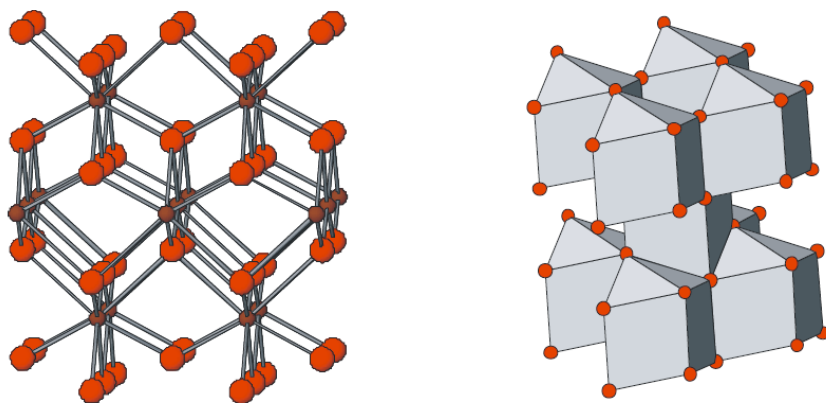


Рис. 2. Строение решетки тетрагональной модификации ZrO_2

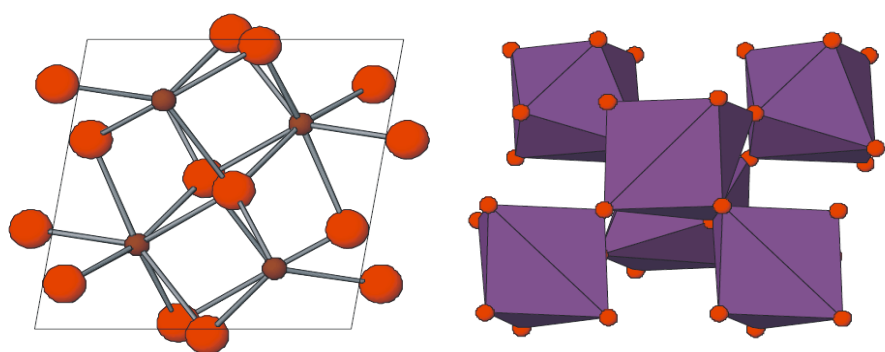


Рис. 3. Строение решетки моноклинной модификации ZrO_2

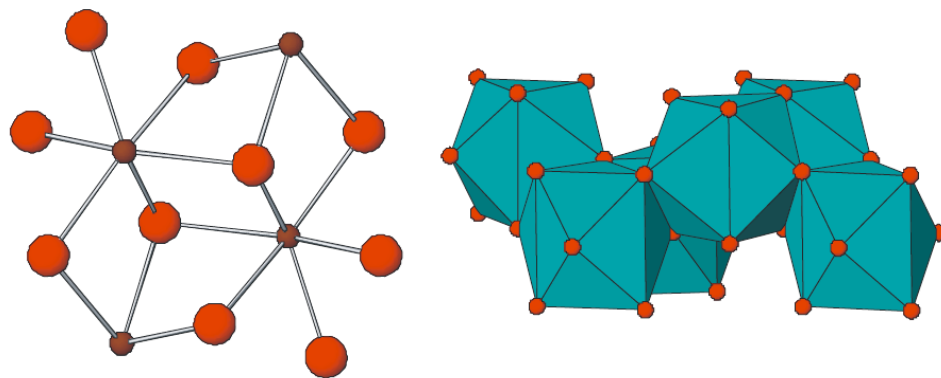


Рис. 4. Строение решетки орторомбической модификации ZrO_2

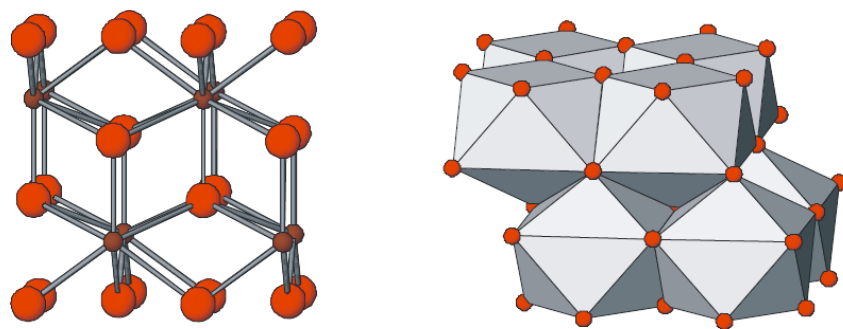


Рис. 5. Строение решетки тетрагональной высокобарной модификации ZrO_2

Добавление к ZrO_2 стабилизирующих кубическую решетку оксидов MgO , CaO , Y_2O_3 , Yb_2O_3 , CeO_2 , HfO_2 расширяет область стабильности кубической кристаллографической формы оксида циркония от точки плавления до комнатной температуры. Это позволяет избежать изменений объема, связанного с фазовыми превращениями. Следует заметить, что для стабилизации диоксида циркония легирующий оксид должен не только иметь соответствующий размер иона металла, но и образовывать твердый раствор с диоксидом циркония. Это условие резко ограничивает число возможных стабилизаторов. Фактически такая стабилизация возможна только оксидами редкоземельных металлов (Y_2O_3 , Yb_2O_3 , CeO_2 , HfO_2) [10–12]. Отрицательное влияние повышенного содержания стабилизаторов в исходном порошке на долговечность покрытий объясняется несколькими причинами. Во-первых, исходные порошки имеют, как правило, неравномерное распределение стабилизатора по сечению, что наследуется в структуре покрытия. Во-вторых, наряду с выделениями богатых стабилизатором фаз типа $Zr_3Y_4O_{12}$, $Zr_3Yb_4O_{12}$ в покрытии формируются зерна тетрагональной фазы составов $ZrO_2 - 8,3\% Y_2O_3$, $ZrO_2 - 12,3\% Yb_2O_3$ и превращенные в моноклинную фазу зерна составов $ZrO_2 - 1,6\% Y_2O_3$, $ZrO_2 - 6,2\% Yb_2O_3$. Сегрегация стабилизатора в покрытии особенно заметно усиливается при его термообработке либо термоциклировании в случае стабилизации оксида циркония, что еще более усугубляет фазовую неоднородность покрытия. В-третьих, стабильность тетрагональной фазы во многом зависит от размера зерна фазовых включений, повышаясь с их уменьшением, что особенно заметно при размере зерна менее 1 мкм, поэтому достижение необходимого размера фазовых включений является задачей оптимизации технологии получения керамических порошков для теплозащитных покрытий.

По указанным причинам достижение равномерного химического и фазового состава по сечению исходных порошков и покрытия с максимальным количеством тетрагональной фазы и минимальным размером зерна фазовых включений является одной из основных задач техники плазменного напыления ТЗП. Характеристики плазменных ТЗП зависят как от вида

и состояния исходного порошка, так и, собственно, от технологических параметров напыления. В большинстве исследований влияния технологии плазменного напыления на долговечность покрытия отмечается, что вид и состояние исходного порошка для напыления оказывают решающее воздействие на качество напыленных покрытий из ЧСДЦ. Важное значение для получения качественных ТЗП имеет химическая чистота применяемых материалов. Известно, в частности, что оксид кремния SiO_2 дестабилизирует высокотемпературные фазы ZrO_2 . Учитывая неизбежную сегрегацию более легкоплавкого оксида кремния по границам зерен и на поверхности частиц порошка ZrO_2 , SiO_2 следует рассматривать как весьма нежелательную примесь. Термическая стабильность тетрагональной фазы ZrO_2 снижается с увеличением содержания межкристаллитной влаги в порошке. Кроме того, присутствие влаги ухудшает нагрев порошка в плазменной струе и делает его неоднородным. Существенное влияние на долговечность покрытий оказывает размер частиц исходного порошка. С одной стороны, увеличение среднего размера частиц порошка вызывает рост пористости покрытия и соответственно увеличивает сопротивление термоудару. Формирующиеся крупные поры приводят к торможению движения трещин. С другой стороны, крупные частицы хуже проплавляются в плазменной струе, что ведет к неравномерности фазового состава и снижению прочности межчастичных контактов в покрытии. Важным параметром является также форма частиц порошка. В частности, применение сферических порошков более предпочтительно, так как в покрытии формируются главным образом округлые поры, а прогрев порошка осуществляется более равномерно, что особенно важно для материалов с низкой теплопроводностью. Кроме того, с развитой поверхности порошков хуже абсорбируется влага, что отрицательно влияет на качество ТЗП.

Диоксид циркония, частично стабилизированный оксидом иттербия, был выбран для использования в качестве порошка для теплозащитных покрытий вместо диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия по следующей причине. У иттербия тривалентный ионный радиус (0,858 Å) значительно

меньше, чем тривалентный ионный радиус иттрия (0,893 Å), и более приближен к тривалентному ионному радиусу циркония. Известно, что большие катионы вносят большие искажения в решетку ZrO_2 и требуют большего количества вакансий и более высокой температуры для образования тетрагональной фазы ZrO_2 , которая оказывает основное влияние на теплозащитные свойства. Следовательно, в системе ZrO_2 – Yb_2O_3 должен быть меньший уровень внутренних напряжений по сравнению с любыми другими системами ZrO_2 – R_2O_3 (где R – редкоземельный элемент). Вследствие вышеизложенного сделано предположение, что использование оксида иттербия Yb_2O_3 в порошках частично стабилизированного диоксида циркония позволит получать ТЗП с ресурсом, превышающим ресурс ZrO_2 – Y_2O_3 покрытия. Теплозащитное покрытие ZrO_2 – Yb_2O_3 показало превосходные теплозащитные свойства при температурах до 1100 °С. Однако при более высоких температурах эти сплавы характеризуются относительно низкой стойкостью к коррозионному воздействию продуктов сгорания топлива и высокотемпературному окислению в условиях повышенных рабочих температур. Поэтому необходимо исследовать другие оксиды редкоземельных элементов, отличных от оксида иттербия, для получения ТЗП, работающих при температурах выше 1150 °С в условиях горячей коррозии или в присутствии солей ванадия. В ряду стабилизаторов SeO_2 , HfO_2 , Yb_2O_3 , Y_2O_3 наиболее стабильным и долговечным является оксид церия SeO_2 – ЧСДЦ покрытия при термоциклировании в условиях нагрева выше 1150 °С. Максимальное сопротивление термоусталости достигается при 22–24 % SeO_2 . В случае формирования таких материалов спеканием оптимальное содержание стабилизатора в исходных порошках превышает концентрацию, которая требуется для фиксации равновесной тетрагональной фазы ZrO_2 , играющей наиболее важную роль при получении ТЗП с высоким сопротивлением термической усталости. Кроме того, теплозащитные покрытия ZrO_2 – SeO_2 по сравнению с ТЗП на основе ZrO_2 – Yb_2O_3 и ZrO_2 – Y_2O_3 обладают повышенной температурной стабильностью, вязкостью разрушения и лучшей тепловой изоляцией.

Оксид гафния HfO_2 был выбран для использования в качестве порошка для теплозащитных покрытий наряду с диоксидом циркония ввиду их сходства в структурной модификации, решетке, химических и физических свойствах и его повышенной температуры структурных преобразований. Сходство Hf^{+4} - и Zr^{+4} -катионов приводит к образованию одинаковых метастабильных фаз при быстрой закалке. Отличия кристаллических решеток ZrO_2 и HfO_2 очень малы в связи с эквивалентной валентной зоной и почти эквивалентными ионными радиусами Zr^{+4} и Hf^{+4} . По этой причине в системе ZrO_2 – HfO_2 могут образовываться непрерывные растворы замещения, и можно выделить рентгеновские дифракционные картины ZrO_2 , HfO_2 в твердых растворах только с помощью чрезвычайно высокого разрешения рентгеновского дифракционного метода. Сходство между ZrO_2 – Y_2O_3 и HfO_2 – Y_2O_3 в равновесных фазовых диаграммах распространяется также на образование неравновесных фаз. Все рассмотренные составы диоксида гафния, частично стабилизированные оксидом иттрия, при быстром охлаждении показывают одну метастабильную t' -фазу с микроструктурой, эквивалентной чистой t' -фазе. Кроме этого, температура фазового превращения при переходе тетрагональной фазы в моноклинную с увеличением концентрации Y_2O_3 уменьшается, а при увеличении концентрации HfO_2 – увеличивается, что делает систему HfO_2 – Y_2O_3 перспективной для получения ТЗП с заданными свойствами.

ВЫВОД

На основании проведенных исследований сделан вывод о том, что качественные теплозащитные покрытия необходимо формировать из материалов с равномерным химическим и фазовым составом по сечению исходных порошков, максимальным количеством тетрагональной фазы и минимальным размером зерна фазовых включений, минимальным содержанием межкристаллитной влаги, со строго определенным размером и морфологией частиц исходного порошка. В качестве оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий выбраны оксиды

иттербия и церия, а также рассмотрена оксидная система «диоксид циркония – оксид гафния – оксид иттрия», которая представляет собой структуру, похожую на диоксид циркония.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Влияние** метода синтеза на свойства порошков частично стабилизированного диоксида циркония / В. А. Дубок [и др.] // Порошковая металлургия. – 1998. – № 8. – С. 56–60.
2. **Khor, K. A.** Properties of Plasma Sprayed Functionally Graded YSZ / NiCoCr AlY Composite Coatings / K. A. Khor, Y. W. Gu, Z. L. Dong // Proceedings of the International Thermal Spray Conference. Thermal Spray Surface Engineering via Applied Research: Proceedings of the 1st International Thermal Spray Conference. – Montreal, QUE, 2000. – P. 1241–1248.
3. **Porter, D. L.** Mechanisms of Toughening Partially Stabilized Zirconia (PS2) / D. L. Porter, A. H. Heuer // Journal of the American Ceramic Society. – 2006. – Vol. 6, No 3. – P. 183–184.
4. **Singheiser, L.** The Performance of High Temperature Corrosion Resistant Coatings on Superalloys Nuclear Extended Laboratory Tests / L. Singheiser // 1st Plasma Technic. Symposium Lucerne. – 1998. – Vol. 2. – P. 164–173.
5. **Robert, M.** Mikrostructural Evolution in Co-P37 and the Room Temperature Instability of Tetragonal ZrO₂ / M. Robert // The American Ceramic Society. – 1997. – Vol. 10, No 4. – P. 214–220.
6. **Оковитый, В. А.** Влияние технологических параметров керамического слоя теплозащитного покрытия на стойкость к термоциклированию / В. А. Оковитый // Порошковая металлургия. – 1998. – Вып. 21. – С. 101–105.
7. **Оковитый, В. А.** Разработка теплозащитных плазменных покрытий / В. А. Оковитый // Сварка и родственные технологии. – 2005. – Вып. 7. – С. 80–82.
8. **Оковитый, В. А.** Оптимизация процесса нанесения ZrO₂-Y₂O₃ / В. А. Оковитый // Порошковая металлургия. – 2007. – Вып. 30. – С. 245–249.
9. **Математическая** модель тепловых процессов, происходящих при формировании покрытий на основе ZrO₂ / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия. – 2009. – Вып. 32. – С. 9–20.
10. **Моделирование** порообразования при формировании теплозащитных плазменных покрытий на основе диоксида циркония / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия. – 2011. – Вып. 34. – С. 36–40.
11. **Создание** градиентных плазменных покрытий на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттербия / В. А. Оковитый [и др.] // Вестник БНТУ. – 2011. – Вып. 6. – С. 5–9.
12. **Теплозащитные** покрытия на основе ZrO₂ / А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Ремика, 1998. – 128 с.

REFERENCES

1. **Dubok, V. A., Kabanova, M. I., Nedil'ko, S. A., & Panchenko, G. V.** (1998) Influence of Synthesis Method on Pow-

der Properties Of Partially Stabilized Zirconium Dioxide. *Poroshkovaya Metallurgiya* [Powder Metallurgy], 8, 56–60 (in Russian).

2. **Khor, K. A., Gu, Y. W., & Dong, Z. L.** (2000) Properties of Plasma Sprayed Functionally Graded YSZ / NiCoCr AlY Composite Coatings. *Proceedings of the International Thermal Spray Conference. Thermal Spray Surface Engineering via Applied Research: Proceedings of the 1st International Thermal Spray Conference.* Montreal, QUE, 1241–1248.
3. **Porter, D. L., & Heuer, H. A.** (2006) Mechanisms of Toughening Partially Stabilized Zirconia (PS2). *Journal of the American Ceramic Society*, 6 (3), 183–184. Doi: 10.1111/j.1151-2916.1977.tb15509.x.
4. **Singheiser, L.** (1998) The Performance of High Temperature Corrosion Resistant Coatings on Superalloys Nuclear Extended Laboratory Tests. *1st Plasma Technic. Symposium Lucerne*, 2, 164–173.
5. **Robert, M.** (1997) Microstructural Evolution in Co-P37 and the Room Temperature Instability of Tetragonal ZrO₂. *The American Ceramic Society*, 10 (4), 214–220.
6. **Okovity, V. A.** (1998) Influence of Technological Parameters of TBC Ceramic Layer on Resistance to Thermal Cycling. *Poroshkovaya Metallurgiya. Respublikanskii Mezhdomstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, 21, 101–105 (in Russian).
7. **Okovity, V. A.** (2005) Development of Thermal Barrier Plasma Coatings. *Svarka i Rodstvennye Tekhnologii* [Welding and Related Technologies], 7, 80–82 (in Russian).
8. **Okovity, V. A.** (2007) Optimization of ZrO₂-Y₂O₃ Depositing Process. *Poroshkovaya Metallurgiya. Respublikanskii Mezhdomstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, 30, 245–249 (in Russian).
9. **Il'iushchenko, A. F., Okovity, V. A., Gromyko, G. F., Shevtsov, A. I., Panteleenko, F. I., Matsuka, N. P., & Okovity, V. V.** (2009) Mathematical Model of Thermal Processes Occurring During Formation of ZrO₂-Based Coatings. *Poroshkovaya Metallurgiya. Respublikanskii Mezhdomstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, 32, 9–20 (in Russian).
10. **Il'iushchenko, A. F., Kusun, R. A., Cherniak, I. N., Kusun, A. R., Zhegzdrin', D. I., Manoilo, E. D., & Kaptsevich, V. M.** (2011) Simulation of Pore Formation While Developing Thermal Barrier Coatings on the Basis of Zirconium Dioxide. *Poroshkovaya Metallurgiya. Respublikanskii Mezhdomstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, 34, 36–40 (in Russian).
11. **Okovity, V. A., Panteleenko, F. I., Devoino, O. G., Okovity, V. V., Sobolevsky, S. B., & Shevtsov, A. I.** (2011) Development of Gradient Plasma Coatings on the Basis of Zirconium Dioxide Stabilized with Yttrium Oxide. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], 6, 5–9.
12. **Il'iushchenko, A. F., Ivashko, V. S., Okovity, V. A., & Sobolevsky, S. B.** (1998) *Thermal Barrier Coatings on ZrO₂-Basis.* Minsk, Remika, 128 p. (in Russian).

Поступила 14.10.2014