

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **19752**

(13) **С1**

(46) **2015.12.30**

(51) МПК

С 04В 35/48 (2006.01)

В 22F 9/02 (2006.01)

(54) **СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ПОРОШКА**

(21) Номер заявки: а 20130174

(22) 2013.02.12

(43) 2014.10.30

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Авторы: Оковитый Василий Вячеславович; Девойно Олег Георгиевич; Оковитый Вячеслав Александрович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) ВУ 15871 С1, 2012.

ВУ 13736 С1, 2010.

ОКОВИТЫЙ В.А. Порошковая металлургия, 1998. - Вып. 21. - С. 101-105.

RU 2009127876 А, 2011.

(57)

Способ получения керамического порошка, включающий перемешивание основного оксида и стабилизирующего оксида, введение 8 мас. % легкоиспаряющегося связующего, гранулирование при скорости вращения барабана ротационного гранулятора 30 об/мин и угле наклона 40°, сушку при температуре 125 °С для удаления связующего, спекание, дробление, рассев порошка, распыление порошка в плазме, закалку расплавленного порошка в 4-11 %-ном водном растворе соляной кислоты при температуре раствора 70-100 °С и отжиг порошка с последующим охлаждением, причем распыление порошка в плазме и закалку проводят в заполненной аргоном камере при атмосферном давлении, **отличающийся** тем, что в качестве основного оксида используют оксид гафния, а в качестве стабилизирующего оксида используют оксид иттрия, гранулирование порошка производят в течение 1-2 ч, отжиг порошка проводят при температуре 2000-2100 °С в течение 4-6 ч с последующим охлаждением до 1000 °С со скоростью 200-250 °С/мин, а мощность плазменного распылителя составляет 50 кВт.

Изобретение относится к области порошковой металлургии, в частности к способам получения керамических порошков, которые могут быть использованы для получения газотермических теплозащитных покрытий.

Известен способ получения керамических порошков для теплозащитных покрытий [1], включающий перемешивание исходных компонентов, введение 8 мас. % легкоиспаряющегося связующего, гранулирование при скорости вращения барабана ротационного гранулятора 30 об/мин и угле наклона 40° в течение 1,1 ч, сушку при температуре 125 °С до удаления связующего, спекание, дробление, рассев порошка, после отсева порошок фракции 20-30 мкм распыляют в плазме и проводят закалку расплавленного порошка в 4-11 %-ном водном растворе при 70-100 °С, затем проводят отжиг порошка при 1100-1300 °С в течение 2-4 ч с последующим охлаждением до 800 °С со скоростью 150-200 °С/мин.

Недостатком покрытий, получаемых из частично стабилизированного оксидом иттрия диоксида циркония, изготавливаемых по данному способу, является невысокая термиче-

BY 19752 C1 2015.12.30

ская усталость теплозащитных покрытий при температурах, превышающих 1000 °С. К тому же такие покрытия не обладают хорошим сопротивлением в условиях горячей коррозии или в присутствии солей ванадия.

Известен способ получения керамического порошка [2], включающий перемешивание диоксида циркония и стабилизирующего оксида, введение 8 мас. % легкоиспаряющегося связующего, гранулирование при скорости вращения барабана ротационного гранулятора 30 об/мин и угле наклона 40°, сушку при температуре 125 °С для удаления связующего, спекание, дробление, рассев порошка, распыление порошка в плазме, закалку расплавленного порошка в 4-11 % водном растворе соляной кислоты при температуре раствора 70-100 °С и отжиг порошка с последующим охлаждением, в качестве стабилизирующего оксида используют оксид иттербия, гранулирование порошка производят в течение 2-2,5 ч, распыление порошка в плазме и закалку проводят в заполненной аргоном камере при атмосферном давлении, а отжиг порошка проводят при температуре 1400-1600 °С в течение 6-8 ч с последующим охлаждением до 700 °С со скоростью 200-250 °С/мин.

Недостатком покрытий, получаемых из частично стабилизированного оксидом иттербия диоксида циркония, изготавливаемых по данному способу, является невысокая термическая усталость теплозащитных покрытий при температурах, превышающих 1150 °С.

В качестве прототипа выбран способ получения керамического порошка [3], включающий перемешивание диоксида циркония и стабилизирующего оксида, введение 8 мас. % легкоиспаряющегося связующего, гранулирование при скорости вращения барабана ротационного гранулятора 30 об/мин и угле наклона 40°, сушку при температуре 125 °С для удаления связующего, спекание, дробление, рассев порошка, распыление порошка в плазме с мощностью плазменного распылителя 40 кВт, закалку расплавленного порошка в 4-11 % водном растворе соляной кислоты при температуре раствора 70-100 °С и отжиг порошка с последующим охлаждением, гранулирование порошка производят в течение 2-2,5 ч, распыление порошка в плазме и закалку проводят в заполненной аргоном камере при атмосферном давлении, в качестве стабилизирующего оксида используют оксид церия, отжиг порошка проводят при температуре 1500-1700 °С в течение 8-10 ч с последующим охлаждением до 700 °С со скоростью 250-300 °С/мин.

Недостатком покрытий, получаемых из частично стабилизированного оксидом церия диоксида циркония, изготавливаемых по данному способу, является невысокая термическая усталость теплозащитных покрытий при температурах, превышающих 1250 °С.

Техническая задача, решаемая изобретением, - повышение стойкости покрытия к термоциклированию при температурах, превышающих 1250 °С, из-за использования в качестве керамического материала диоксида гафния, частично стабилизированного оксидом иттрия, и изменения технологии получения порошка с целью сохранения в материале максимального количества тетрагональной фазы с минимальным размером зерна фазовых включений.

Поставленная задача достигается тем, что в способе получения керамического порошка, включающем перемешивание основного оксида и стабилизирующего оксида, введение 8 мас. % легкоиспаряющегося связующего, гранулирование при скорости вращения барабана ротационного гранулятора 30 об/мин и угле наклона 40°, сушку при температуре 125 °С для удаления связующего, спекание, дробление, рассев порошка, распыление порошка в плазме, закалку расплавленного порошка в 4-11 %-ном водном растворе соляной кислоты при температуре раствора 70-100 °С и отжиг порошка с последующим охлаждением, причем распыление порошка в плазме и закалку проводят в заполненной аргоном камере при атмосферном давлении, в качестве основного оксида используют оксид гафния, а в качестве стабилизирующего оксида используют оксид иттрия, гранулирование порошка производят в течение 1-2 ч, отжиг порошка проводят при температуре 2000-2100 °С в течение 4-6 ч с последующим охлаждением до 1000 °С со скоростью 200-250 °С/мин, а мощность плазменного распылителя составляет 50 кВт.

Сущность изобретения заключается в следующем. В качестве материалов для керамического слоя теплозащитных покрытий (ТЗП) наибольшее применение в настоящее время получили композиции на основе частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦД). Широкое применение ZrO_2 в ТЗП обусловлено его низкой теплопроводностью, высоким коэффициентом термического расширения и, главное, возможностью обеспечения высоких механических свойств упрочненной керамики. Основное влияние на теплозащитные свойства ТЗП оказывает стабильность тетрагональных фаз t' и t ZrO_2 . На практике, однако, использование ТЗП на основе диоксида циркония ограничивается температурой ниже $1200\text{ }^\circ\text{C}$ по нескольким причинам, одной из которых является отсутствие неизменной (длительной по времени эксплуатации) керамической микроструктуры.

1. Оксид гафния был выбран для использования в качестве порошка для теплозащитных покрытий вместо диоксида 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 распространяются 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 очень перспективной для получения ТЗП с заданными свойствами.

Вследствие вышеизложенного было сделано предположение, что использование HfO_2 - Y_2O_3 позволит получать ТЗП с ресурсом, превышающим ресурс ZrO_2 - CeO_2 покрытия.

2. Гранулирование порошка оксида гафния производят в течение 1,5-2 ч для максимального выхода порошка фракции 20-50 мкм.

На основании литературных данных известно, что наилучшее качество ТЗП на основе частично стабилизированного диоксида циркония достигается при использовании мелких фракций порошков (до 50 мкм). По результатам проведенных исследований по напылению ТЗП системы ZrO_2 -7 % Y_2O_3 -NiCrAlY термоусталость уменьшается в 1,5 раза при использовании для напыления порошков фракции 50-63 мкм, в 4,5 раза при использовании для напыления порошков фракции 63-80 мкм и в 7 раз при использовании фракции 80-100 мкм. Такой значительный эффект обусловлен ухудшением проплавления порошков в плазменной струе, следствием чего является крупнозернистость структуры покрытия и невысокое содержание в покрытии тетрагональной фазы.

3. Полученные после гранулирования, сушки, спекания и дробления порошки характеризуются сложной геометрической формой и развитым поверхностным рельефом частиц. Размеры частиц при свободной насыпке и диспергировании ультразвуком соответственно находятся в пределах: HfO_2 - 12 мас. % Y_2O_3 - 10-220 мкм, 0-63 мкм. Заметное отличие размеров композиционных частиц при свободной насыпке и диспергировании ультразвуком свидетельствует о склонности порошков к образованию комков. Это связано с гигроскопичностью порошков, их сложной формой и рельефом. Склонность к образованию комков снижает "текучесть" порошковых материалов и их технологичность при плазменном напылении покрытий. Поэтому для улучшения технологических параметров порошков было осуществлено их распыление плазменным распылителем в среде аргона для сфероидизации частиц порошка.

BY 19752 C1 2015.12.30

4. Отжиг порошка оксида гафния проводят при температуре 2000-2100 °С в течение 4-6 ч с последующим охлаждением до 1000 °С со скоростью 250 °С/мин.

Отжиг при температуре 2000-2100 °С в течение 4-6 ч проводят для удаления межкристаллитной влаги, трансформации моноклинной фазы в тетрагональную и стабилизации тетрагональной фазы. При отжиге в течение времени менее 4 ч и при температуре ниже 2000 °С происходит неполный переход моноклинной фазы в тетрагональную, а при отжиге в течение более 6 ч при температуре более 2100 °С происходит рост и укрупнение кристаллов тетрагональной фазы оксида гафния, что снижает их стабильность и приводит к распаду на моноклинную и кубическую фазы при охлаждении покрытий. Это приводит к уменьшению термической усталости покрытий. Охлаждение порошка после отжига до температуры 1000 °С со скоростью 200-250 °/мин проводят с целью сохранения структуры и фазового состава порошков оксида гафния, получаемых при отжиге, что достигается быстрым, в течение 1-1,5 мин, прохождением температурного диапазона, в котором возможен обратный переход из тетрагональной в моноклинную фазу.

При охлаждении со скоростью выше, чем 250 °/мин, образуемое количество моноклинной фазы не уменьшается, а при охлаждении со скоростью ниже, чем 200 °/мин количество моноклинной фазы увеличивается, что снижает термическую усталость покрытий на основе оксида гафния.

Пример.

Получали порошки оксида гафния, частично стабилизированного оксидом иттрия, следующих составов (химический состав приведен в табл. 1):

HfO₂ - 8 мас. % Y₂O₃; - HfO₂ - 12 мас. % Y₂O₃; HfO₂ - 15 мас. % Y₂O₃; - HfO₂ - 25 мас. % Y₂O₃.

Таблица 1

Содержание элементов в частицах порошка HfO₂-Y₂O₃

Состав порошков	Содержание элементов, вес. %							
	Zr	Y	Al	Ca	FeO	Hf	Si	Ti
HfO ₂ - 8 % Y ₂ O ₃	2,2	8,4	1,14	0,07	0,52	основа	0,57	0,11
HfO ₂ - 12 % Y ₂ O ₃	2,5	11,9	1,14	0,06	0,54	основа	0,59	0,12
HfO ₂ - 15 % Y ₂ O ₃	2,3	15,6	1,13	0,05	0,46	основа	0,54	0,13
HfO ₂ - 25 % Y ₂ O ₃	1,8	25,2	1,11	0,03	0,58	основа	0,74	0,13

Исходные материалы размером менее 5 мкм, взятые в весовых пропорциях, приведенных выше, загружали в фарфоровый барабан и перемешивали в течение 2 ч при скорости вращения 40 об/мин. Затем навески шихты в количестве 200 г с добавлением 8 % связующего компонента - спирта этилового марки А (ГОСТ 17299-78), помещали в барабаны гранулятора марки 03-03-01. Гранулирование проводили в течение 1,5 ч со скоростью вращения барабанов 30 об/мин, при угле наклона барабана 40°. В табл. 2 и на фиг. 1 приведен фракционный состав порошка HfO₂-15 % Y₂O₃ после гранулирования.

Таблица 2

Фракционный состав порошка HfO₂-12 % Y₂O₃ после гранулирования

Способ гранулирования порошка при скорости вращения барабана ротационного гранулятора 30 об/мин и угле наклона 40°	Процентное соотношение фракционный состав порошка - ZrO ₂ -15 % Y ₂ O ₃ после гранулирования, мкм				
	0-20	20-50	50-63	63-80	80-100
в течение 0,5 ч	30	26	36	3	5
в течение 1ч	12	35	30	14	9
в течение 1,5 ч	3	52	35	4	7
в течение 2 ч	1	65	30	4	-
в течение 2,5 ч	3	46	36	10	5
в течение 3 ч	8	26	43	11	12

BY 19752 C1 2015.12.30

На фиг. 1 приведено влияние времени процесса гранулирования на содержание различных фракций в продуктах обработки порошка $\text{HfO}_2\text{-}12\% \text{ Y}_2\text{O}_3$: 1 - фракция 0-20 мкм; 2 - фракция 20-50 мкм; 3 - фракция 50-63 мкм; 4 - фракция 63-80 мкм; 5 - фракция 80-100 мкм.

На фиг. 2 приведена морфология частиц порошка $\text{HfO}_2\text{-}15\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ после гранулирования ($\times 300$).

Затем полученные конгломераты помещали в алундовые лодочки, которые устанавливали в сушильном шкафу СНОЛ 3,5/300. Сушку связующего проводили при температуре $125\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1,1 ч. Операцию спекания проводили при $1300\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 6 ч. Морфология порошка после операции отжига приведена на фиг. 3.

На фиг. 3 приведена морфология частиц порошка $\text{HfO}_2\text{-}15\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ после операции спекания ($\times 300$).

После проведения операции спекания проводили дробление материала. Дробление материала осуществляли на шаровой мельнице МБЛ-1 с использованием в качестве размольных тел стальных шаров. Операцию отсева проводили с использованием воздушного классификатора для выделения фракции $-20 + 45$ мкм (от 20 до 45 мкм). После отсева порошок фракцией от 20 до 63 мкм вводили в струю плазменного распылителя (плазматрон F4 фирмы Плазма-Техник, Швейцария) и производили распыление в стальной цилиндр длиной 1 м в камере установки VPS (вакуумного напыления), заполненный аргоном. Порошок закалялся из расплавленного состояния в 5-10 %-ном водном растворе соляной кислоты при температуре раствора $80\text{-}100\text{ }^\circ\text{C}$. Мощность плазменной струи изменяли от 25 до 55 кВт (фиг. 2). Степень сфероидизации определяли по форм-фактору частиц (степень несферичности, значение 1 соответствует сфере) методом оптической металлографии. Максимальная степень сфероидизации соответствует мощности плазменной струи 50 кВт (фиг. 4). Повышение равномерности распределения легирующего оксида в матрице из оксида гафния после пропускания через плазму подтверждается результатами табл. 3, фиг. 5 и 6. Морфология порошка $\text{HfO}_2\text{-}15\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ после пропускания через плазму - фиг. 7.

На фиг. 4 показана зависимость изменения форм-фактора порошка $\text{HfO}_2\text{-}15\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ в зависимости от мощности плазматрона.

На фиг. 5 показаны точки проведения микрорентгеноспектрального анализа порошка $\text{HfO}_2\text{-}15\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ до пропускания через плазменную струю ($\times 1000$).

На фиг. 6 показаны точки проведения микрорентгеноспектрального анализа порошка $\text{HfO}_2\text{-}15\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ после пропускания через плазменную струю ($\times 1000$).

На фиг. 7 приведена морфология частиц порошка $\text{HfO}_2\text{-}15\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ после пропускания через плазму ($\times 500$).

Таблица 3

Результаты микрорентгеноспектрального анализа порошка $\text{HfO}_2\text{-}15\% \text{ Y}_2\text{O}_3$

Элемент		Y	Hf	O	Y_2O_3	HfO_2
обр.	Точки	%	%	%	%	%
	A1*	14,4	78,2	7,4	14,9	85,1
	A2*	12,8	69,0	18,2	21,2	78,8
	A3*	13,6	70,9	15,5	9,4	90,6
	A4*	7,2	80,1	12,7	10,9	89,1
	A5*	7,9	76,6	15,5	8,6	91,4
	A6	10,4	75,2	14,4	12,9	87,1
	A7	9,8	73,2	17,0	14,2	85,8
	A8	9,6	74,0	16,4	11,6	88,4
	A9	10,1	74,8	15,1	13,2	86,8

* - до пропускания порошка через плазменную струю.

Затем порошок помещали в алундовые тигли марки ПД-КВПТ и проводили отжиг в печи фирмы "Набер" (ФРГ) в течение 4-6 ч при температуре 2000-2100 °С. После окончания операции отжига нагревательные элементы печи отключались и в рабочее пространство печи подавали аргон марки А комнатной температуры, в количестве, обеспечивающем снижение температуры до 1000 °С со скоростью от 200 до 250 °/мин. При достижении температуры 1000 °С подачу газа прекращали и охлаждение порошка дальше до комнатной температуры происходило вместе с печью. Фазовый состав порошков после операции отжига приведен в табл. 4. Из порошков каждого состава наносились покрытия на 5 групп по 5 образцов в каждой. Для получения сравнительных данных параллельно проводили нанесение покрытий из порошка, полученного по способу, описанному в прототипе. Фазовый состав порошков и покрытий определялся методом рентгеноструктурного анализа на рентгенографическом дифрактометре ДРОН-3. Количественное содержание фаз определяли на сканирующем электронном микроскопе "Nanolab-7".

Таблица 4

Фазовый состав порошков частично стабилизированного оксида гафния и плазменных покрытий из них

Состав материала	Способ получения	Содержание фаз, мас. %		
		моноклинная	тетрагональная	кубическая
ZrO ₂ -25 мас. % CeO ₂	прототип	-/-	100,0/98,9	-/1,1
HfO ₂ -8 мас. % Y ₂ O ₃	предлагаемое изобретение	9,6/3,4	88,6/82,6	1,8/4,0
HfO ₂ -12 мас. % Y ₂ O ₃	-	4,9/2,2	93,9/94,8	1,2/3,0
HfO ₂ -15 мас. % Y ₂ O ₃	-	1,4/-	98,6/99,1	-/0,9
HfO ₂ -25 мас. % Y ₂ O ₃	-	3,6/-	93,3/90,4	3,1/9,6

* - фазовый состав порошков/плазменных покрытий из них.

Прочность сцепления определяли на отрывной машине "Instron". Количественные оценки параметров определялись как усредненные по пяти измерениям. Покрытия подвергались циклическому тестированию в печи при температуре 1300 °С. Температура в печи замерялась платиновой термопарой и поддерживалась в пределах 1300±10 °С. Цикл состоял из нагрева в течение 10 мин, выдержке при 1300 °С в течение 60 мин и 60- минутном охлаждении до 300 °С. В течение каждых 10 циклов образцы извлекались из печи для проверки, когда температура опускалась до 300 °С. Испытания продолжались до разрушения керамического покрытия, за которое принимали формирование трещины, видимой невооруженным взглядом. Данные по термостойкости и прочности сцепления покрытий, полученные по прототипу и предлагаемому изобретению, приведены в табл. 5.

Нанесение покрытий проводили на комплексе оборудования плазменного напыления покрытий фирмы "Плазма-Техник", включающем компьютерный пульт управления режимами нанесения покрытий, роботом для перемещения плазмотрона, столом для крепления напыляемых образцов.

Покрытия наносили на торцевую поверхность дисковых образцов из сплава ЖС-32 диаметром 30 мм и толщиной 10 мм. Перед нанесением слоя керамического покрытия толщиной 0,30-0,40 мм наносили подслой толщиной 0,10 мм методом плазменного напыления в динамическом вакууме из порошка состава: для прототипа - NiCrAlCe и NiCrAlY по предлагаемому способу. Слой керамического покрытия из частично стабилизированного диоксида циркония наносили на режиме: напряжение дуги - 70 В, ток дуги - 550 А, дистанция напыления - 100 мм, расход аргона - 40 л/мин, расход водорода - 8 л/мин, расход порошка - 2 кг/ч, расход транспортирующего газа (аргона) - 8 л/мин. Слой керамического покрытия из частично стабилизированного оксида гафния наносили на режиме: напряжение дуги - 70 В, ток дуги - 750 А, дистанция напыления, 110 мм, расход аргона -

40 л/мин, расход водорода – 9 л/мин, расход порошка 2,5 кг/ч, расход транспортирующего газа (аргона) - 8 л/мин. После нанесения покрытий проводили испытания на стойкость к термоциклированию и на прочностные характеристики. Сравнительные данные испытаний покрытий, полученных по прототипу и предлагаемому способу, приведены в табл. 5.

Таблица 5

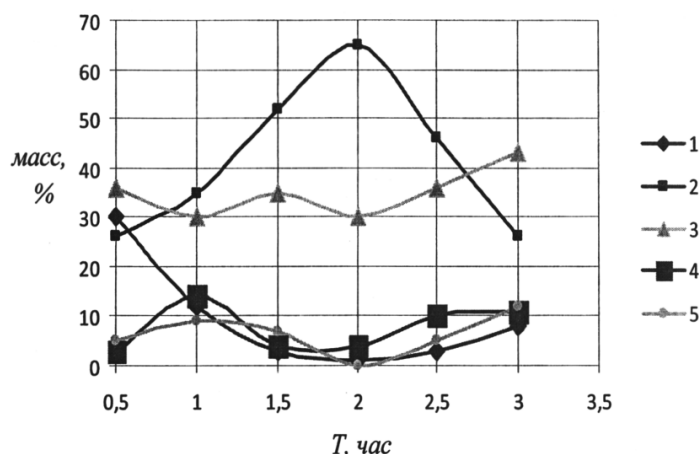
Влияние химического состава частично стабилизированного оксида гафния на стойкость к термоциклированию и на прочностные характеристики

Химический состав материала	Метод получения порошка	Количество термоциклов	Прочность сцепления, МПа
ZrO ₂ -25 мас. % CeO ₂	прототип	712	28,3
HfO ₂ -8 мас. % Y ₂ O ₃	предлагаемое изобр.	640	27,3
HfO ₂ -12 мас. % Y ₂ O ₃	-	860	28,9
HfO ₂ -15 мас. % Y ₂ O ₃	-	1170	34,1
HfO ₂ -25 мас. % Y ₂ O ₃	-	960	31,4

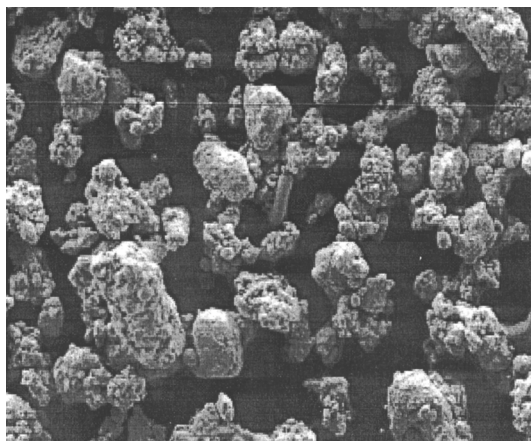
Как видно из табл. 5, покрытие, полученное из порошка HfO₂-15 % Y₂O₃, изготовленное по предлагаемому способу, выдерживает в 1,6 раза больше циклов нагрев-охлаждение (циклическому тестированию в печи при температуре 1300 °С), чем покрытие, полученное из порошка ZrC - 2-25 мас. % CeO₂, изготовленное согласно технологии прототипа, при этом прочность сцепления покрытий возрастает в 1,2 раза. Таким образом, предложенный способ позволяет повысить термостойкость теплозащитных покрытий и обеспечивает повышенную прочность сцепления, что приводит к более длительной защите подложки от воздействий высоких температур.

Источники информации:

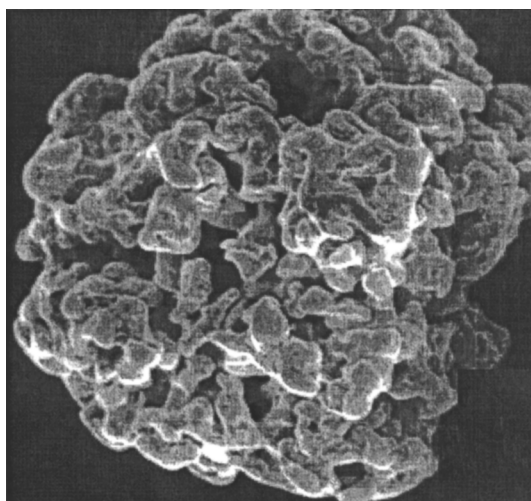
1. Оковитый В.А. Влияние технологических параметров керамического слоя теплозащитного покрытия на стойкость к термоциклированию. Порошковая металлургия. - Гомель: ИММС НАНБ, 1998. - Вып. 21. - С. 101-105.
2. Патент BY 13736, МПК С 04В 35/48, 2010.
3. Патент BY 15871, МПК С 04В 35/48; В 22F 9/02, 2012.



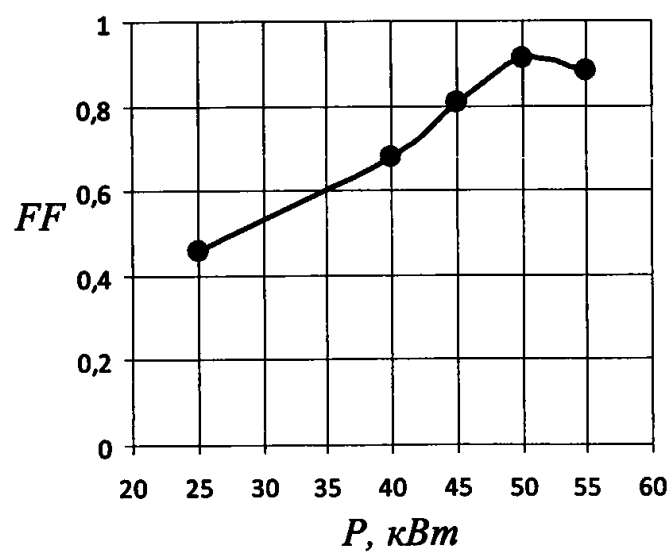
Фиг. 1



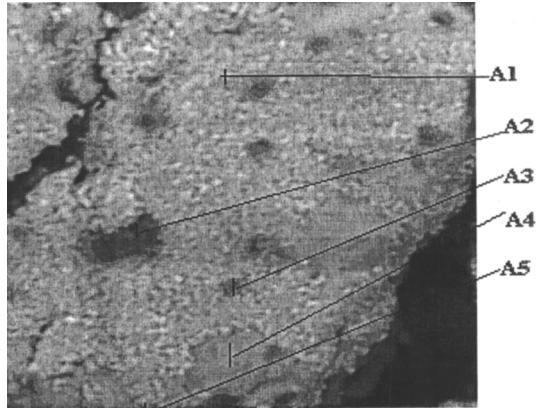
Фиг. 2



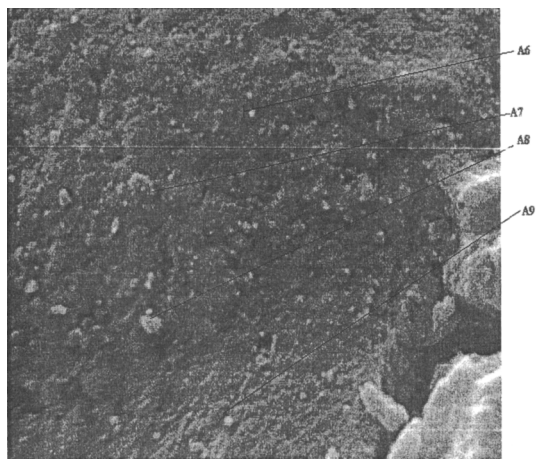
Фиг. 3



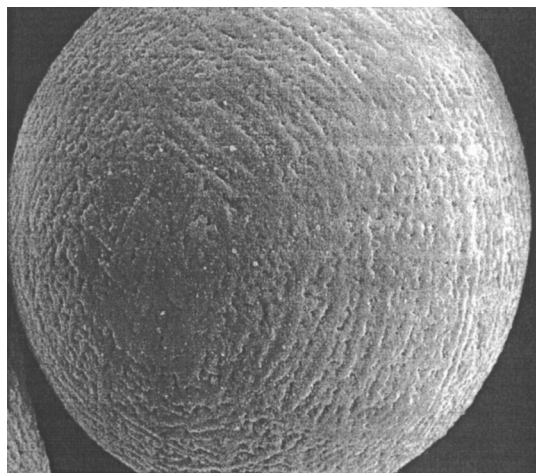
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7