

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 24343

(13) С1

(45) 2024.08.05

(51) МПК

C 04B 35/106 (2006.01)

C 04B 35/46 (2006.01)

C 04B 35/626 (2006.01)

(54) СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

(21) Номер заявки: а 20230098

(22) 2023.04.14

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

(72) Авторы: Оковитый Вячеслав Александрович; Пантелеенко Федор Иванович; Девойно Олег Георгиевич; Литвинко Артем Анатольевич (ВУ)

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

(56) ВУ 23783 С1, 2022.

RU 2287503 С1, 2006.

RU 2662520 С1, 2018.

ВУ 23555 С1, 2021.

(57)

Способ получения композиционного керамического материала, при котором смешивают порошок $Al_2O_3-TiO_2-(MoS_2 + Ni) + 40\% (Ni-Cr-Al-Y-Ta)$ с 15 % порошка диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, вводят в полученную шихту 5 мас. % легкоиспаряющегося связующего, осуществляют гранулирование при скорости вращения барабана ротационного гранулятора 48 об/мин и угле наклона барабана $40-50^\circ$ в течение 2,5-3 ч, удаляют связующее при температуре $100-150^\circ C$ в течение 1-1,25 ч, полученный материал спекают, дробят, рассеивают с выделением порошка фракции 40-63 мкм, который подвергают сфероидизации в потоке аргона плазменным распылителем с мощностью 50 кВт.

Изобретение относится к области порошковой металлургии, в частности к способам получения композиционных керамических материалов.

Известен способ получения композиционного керамического материала [1] для плазменного напыления, включающий механическое смешивание компонентов. Покрытия из таких порошков отличаются более высокой износостойкостью, но низкой адгезионной прочностью с материалом основы. Недостатками являются сегрегация частиц составляющих компонентов по плотности и размерам, расслоение механической смеси и раздельное движением компонентов с их сепарацией в плазменной струе из-за разной плотности и аэродинамического сопротивления частиц компонентов, что приводит к неоднородности химического состава и строения покрытия и появлению в структуре слоев с различными технологическими характеристиками, а следовательно, к ухудшению эксплуатационных характеристик. Для устранения описанных недостатков вместо механических смесей применяют конгломерированные порошки, конгломератная частица сформирована из множества исходных частиц нескольких материалов.

ВУ 24343 С1 2024.08.05

Известен способ получения композиционного керамического материала методом конгломерирования, с применением органических связок получены порошки для напыления системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ [2]. Недостатками порошковых материалов, получаемых по данному способу, являются их высокая гигроскопичность, сложная форма и рельеф, приводящие к образованию комков, крупных конгломератных частиц в процессе напыления, что снижает "текучесть" и тем самым ухудшает технологические характеристики порошковых материалов, поскольку крупные конгломератные частицы в процессе напыления могут не полностью расплавиться и имеют температуру ниже оптимальной при попадании на подложку.

В качестве прототипа выбран способ [3] получения композиционного керамического материала, при котором смешивают порошок $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-(MoS}_2 + \text{Ni)}$ с 40 мас. % порошка Ni-Cr-Al-Y-Ta , вводят в полученную шихту 7-10 мас. % легкоиспаряющегося связующего, осуществляют гранулирование при скорости вращения барабана ротационного гранулятора 60 об/мин и угле наклона барабана $40\text{-}50^\circ$ в течение 1,5-2,0 ч, удаляют связующее при температуре $100\text{-}150^\circ\text{C}$ в течение 1-1,25 ч, полученный материал спекают, дробят, рассеивают с выделением порошка фракции 40-63 мкм, который подвергают сфероидизации в потоке аргона плазменным распылителем с мощностью 30 кВт.

Недостатками покрытий, получаемых из диоксида титана-оксида алюминия-плакированная никелем твердая смазка - никель-хром-алюминий - иттрий-тантал, изготавливаемых по данному способу, являются невысокая износостойкость и твердость в условиях трения при высоких температурах, невысокая гетерогенность покрытий, связанная с неоптимальным соотношением мягкой и твердой составляющих в покрытии.

Техническая задача, которую решает предлагаемое изобретение, заключается в создании композиционного керамического материала на основе композиции диоксид титана-оксид алюминия и никель-хром-алюминий – иттрий-тантал с добавлением в композицию диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, обладающего хорошими технологическими характеристиками при высоких температурах, устойчивому к поддержанию химического состава в процессе газотермического напыления и способному формировать плазменные покрытия с высокой износостойкостью, определенной степенью гетерогенности (получение оптимальных соотношений мягкой и твердой составляющих в покрытии), с высокой твердостью, износостойкостью, обрабатываемостью.

Поставленная техническая задача достигается тем, что в способе получения композиционного керамического материала, при котором смешивают порошок $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-(MoS}_2 + \text{Ni)}$ + 40 % (Ni-Cr-Al-Y-Ta) с 15 % порошка диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, вводят в полученную шихту 5 мас. % легкоиспаряющегося связующего, осуществляют гранулирование при скорости вращения барабана ротационного гранулятора 48 об/мин и угле наклона барабана $40\text{-}50^\circ$ в течение 2,5-3 ч, удаляют связующее при температуре $100\text{-}150^\circ\text{C}$ в течение 1-1,25 ч, полученный материал спекают, дробят, рассеивают с выделением порошка фракции 40-63 мкм, который подвергают сфероидизации в потоке аргона плазменным распылителем с мощностью 50 кВт.

Сущность изобретения поясняется фигурами, где на фиг. 1-3 приведено влияние времени процесса гранулирования на содержание различных фракций в продуктах обработки при введении связующего вещества: 1 - фракция 0-40 мкм; 2 - фракция 40-63 мкм; 3 - фракция 63-80 мкм; 4 - фракция 80-100 мкм. На фиг. 1 при введении связующего вещества в количестве 2 мас. %, на фиг. 2 - в количестве 5 мас. %, а фиг. 3 - в количестве 7 мас. %. На фиг. 4. показана морфология частиц порошка - 85 % $\text{(Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-(MoS}_2 + \text{Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta)}$ -15 $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}$ после гранулирования, предлагаемое изобретение ($\times 500$). На фиг. 5 показана зависимость изменения форм-фактора агломератов от мощности плазматрона. На фиг. 6 показана морфология частиц 85 % $\text{(Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-(MoS}_2 + \text{Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta)}$ -15 $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}$ после сфероидизации ($\times 500$).

Разработка и создание композиционных керамических материалов обусловлены необходимостью улучшения свойств износостойких плазменных покрытий при высоких температурах, так как в отличие от механических смесей порошков только в композиционных порошках могут одновременно находиться в заданном состоянии разнородные по физическому и химическому составу вещества, элементы, соединения, что дает возможность достигать новых эффектов при использовании таких материалов для нанесения покрытий.

В общем случае плазменные покрытия представляют собой многослойные системы, включающие металлический подслоя, внешние слои с требуемыми технологическими характеристиками и, как правило, ряд переходных слоев для выравнивания свойств рабочего слоя и подслоя. Основной причиной разрушения плазменных покрытий являются термомеханические напряжения, возникающие в период эксплуатации, они также усугубляются действием остаточных напряжений, возникающих в покрытии при напылении, и ослабляются эффектами пластичности и ползучести, реализующимися в металлическом подслое. Действия указанных полей напряжений усугубляется неравномерностью их распределения, вызванной дефектами в покрытии - трещинами, дефектами межчастичных контактов, порами и т. д. Моделирование и управление остаточными напряжениями в значительной мере являются задачей технологии нанесения покрытия. В то же время напряжения могут быть в значительной степени снижены правильным выбором материалов. Попытки рассчитать напряжение в плазменных покрытиях без учета их релаксации приводят к неправдоподобно высоким величинам, превышающим прочность покрытий. В качестве материалов для керамического слоя плазменных покрытий, работающих в условиях высоких температур и интенсивного износа, наибольшее применение в настоящее время получили композиции на основе частичного стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦД). Это обусловлено рядом его свойств: низким коэффициентом теплопроводности $\lambda(0,6-1,3 \text{ Втм}^{-1}\text{К}^{-1})$ и сравнительно высоким коэффициентом линейного термического расширения $\alpha(6-13 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1})$, соизмеримым с коэффициентами для жаропрочных сплавов на основе Ni и Co ($15-17 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$), возможностью обеспечения высоких механических свойств упрочненной керамики. В частности, циркон и цирконаты щелочноземельных металлов имеют близкие с ЧСЦД физические свойства, однако их применение ограничено недостаточно высокими механическими свойствами. В ряду стабилизаторов CaO, MgO, Y₂O₃ наиболее стабильными и долговечными являются Y₂O₃ - ЧСЦД-покрытия при термоциклировании в условиях нагрева выше 1240 К. Максимальное сопротивление термоусталости достигается при 6...8 % Y₂O₃. В случае формирования таких материалов спеканием оптимальное содержание стабилизатора в исходных порошках превышает концентрацию, которая требуется для фиксирования равновесной тетрагональной фазы ZrO₂. При этом тем не менее в покрытии обязательно присутствует моноклинная и кубическая фазы. 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. Наряду с выделениями богатых стабилизатором фаз типа Zr₃Y₄O₁₂ в покрытии формируются зерна тетрагональной фазы состава ZrO₂-8,3 % Y₂O₃ и превращенные в моноклинную фазу зерна состава ZrO₂-1,6 % Y₂O₃. Сегрегация стабилизатора в покрытии особенно заметно усиливается при его термообработке либо термоциклировании в случае стабилизации оксида циркония, что еще более усугубляет фазовую неоднородность покрытия. По указанным причинам достижение равномерного химического и фазового состава по сечению исходных порошков и покрытия является одной из основных задач техники плазменного напыления ТЗП. Во-вторых, в результате быстрого охлаждения частиц при плазменном напылении формируется неравновесная фаза тетрагонального ZrO₂→t' ("непревращаемая"), пересыщенная стабилизатором по отношению к равновесной t-фазе ZrO₂. Очевидно, неравновесная t'-фаза ZrO₂ играет наиболее важную роль при получении покрытий с высоким сопротивлением термической

усталости. Стабильность t' -фазы во многом зависит от размера зерна фазовых включений, заметно повышаясь при размере зерна менее 1 мкм. Таким образом, достижение необходимого размера фазовых включений является задачей оптимизации технологии плазменного напыления покрытий на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия.

Применяемая технология изготовления композиционного порошка должна обеспечивать придание частицам свойств, способствующих формированию заданной структуры покрытий. Оценивая состояние вопроса и эффективность способов получения композиционных керамических (оксидных) порошков для плазменного напыления, можно сделать вывод, что одним из наименее сложных и наиболее технологических методов получения композиционных оксидных порошков является метод агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием. Такой процесс изготовления композиционных порошков позволяет обеспечить следующие преимущества при плазменном напылении:

более равномерное распределение компонентов в покрытии по сравнению с использованием механических смесей из-за отсутствия сегрегации;

повышение температуры частиц вследствие интенсификации процессов теплообмена в плазменной струе;

повышение скорости частиц вследствие интенсифицирования ускорения частиц в плазменной струе.

Исследования триботехнических свойств гетерогенных износостойких покрытий, получаемых методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием, позволяют констатировать, что износостойкость их может быть максимальной только при определенной степени гетерогенности. Получается, что каждым конкретным условиям работы соответствуют определенные оптимальные соотношения мягкой и твердой составляющих в покрытии, что дает возможность получить покрытие с необходимой твердостью, износостойкостью, обрабатываемостью.

Для изготовления агломерированных композиционных керамических порошков системы никель-хром-алюминий-итрий-тантал-оксид титана-оксид алюминия-лакированная никелем твердая смазка (дисульфид молибдена)-ди-оксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия, была разработана технология, включающая следующие стадии.

На первой стадии проводится взвешивание (дозировка) компонентов шихты и связующего. На второй стадии изготавливается шихта и связующее вещество. Затем связующее вводится в шихту и осуществляется гранулирование шихты. После операции гранулирования проводится удаление легкоиспаряемого компонента связующего вещества и спекание - для повышения прочности агломератов. Спеченный материал поступает на размол с последующим просеиванием. Порошок размером 40-63 мкм представляет собой готовый продукт, остальной порошок поступает на повторную обработку. Эта фракция наиболее часто используется для напыления плазменных покрытий, узкий фракционный состав позволяет легко транспортировать порошок в струе к подложке, кроме этого, фракцию 40-63 мкм позволяет получать плотные и неокисленные покрытия.

Полученные после агломерирования порошки характеризуются сложной геометрической формой и развитым поверхностным рельефом частиц. Размеры частиц при свободной насыпке и диспергировании ультразвуком соответственно находятся в пределах: композиция $(Al_2O_3-TiO_2-(MoS_2 + Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta - ZrO_2 - Y_2O_3-10-240$ мкм, 0-63 мкм.

Результаты испытаний порошковых составов для газотермического напыления

Состав смеси, масс %	Твердость HRC	Пористость, %	Прочность сцепления, МПа	Износ покр., (трение со смазкой), мкм
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -(MoS ₂ -Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta	49-51	9-11	46-43	5,2-5,6
95 % (Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -(MoS ₂ -Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta)- 5ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	47-49	10-12	49-51	4,7-4,9
90 % (Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -(MoS ₂ -Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta)- 10ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	50-54	11-12	50-53	4,0-4,4
85 % (Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -(MoS ₂ -Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta)- 15ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	54-58	12-13	53-57	3,4-3,6
80 % (Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -(MoS ₂ -Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta)- 20ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	51-53	13-15	49-50	4,0-4,3
75 % (Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -(MoS ₂ -Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta)- 25ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	48-50	13-17	43-45	5,0-5,3

Заметное отличие размеров композиционных частиц при свободной насыпке порошков приводит 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 газотермическом напылении покрытий. Поэтому для улучшения технологических параметров порошков была осуществлена их сфероидизация посредством введения частиц порошка в струю плазменного распылителя и распылением в среде аргона. Процентное соотношение порошков в смеси подбиралось на основании экспериментов (табл. 1). Анализируя результаты испытаний, приведенные в табл. 1, выбираем следующее процентное соотношение в смеси порошков - 85 % (Al₂O₃-TiO₂-(MoS₂ + Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta)-15%(ZrO₂-Y₂O₃). Увеличение количества ZrO₂-Y₂O₃ выше заявляемого ведет к тому, что его не хватает для образования устойчивой химической связи в композиционном материале и получения высоких значений адгезии и твердости покрытия. Уменьшение содержания ниже заявляемого снижает твердость покрытия, что приводит к снижению износостойкости. При данном процентном соотношении характеристики полученных износостойких покрытий соответствуют или превышают аналог.

Пример.

Получали композицию 85 % (Al₂O₃-TiO₂-(MoS₂ + Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta)-15%ZrO₂-Y₂O₃. Смешивание мелкодисперсных компонентов шихты проводили в баночном смесителе модели 022. Затем навески шихты помещали в барабаны модернизированного ротационного гранулятора марки 03-03-01 с возможностью изменения скорости вращения барабана ротационного гранулятора. Вводили связующее (раствор в дистиллированной воде жидкого натриевосиликатного стекла) и проводили операцию гранулирования.

Гранулирование порошковой шихты проводили на оптимальных режимах работы ротационного гранулятора, которые обеспечивают наибольший выход мелкодисперсных порошковых фракций: количество шихты в барабане - 250; скорости вращения барабана - 36; 48; 60 об/мин; угол наклона барабана - 40-50°.

Для дальнейшего исследования влияния связующего вещества и времени гранулирования на скорость формирования агломератов через 0,5 во временном интервале 2-6 ч после начала гранулирования порошка забирали пробы материала, которые после цикла операций отжига, спекания, дробления и последующего отсева подвергались исследованиям. Технологические режимы всех операций во всех опытах поддерживались постоянными. В табл. 2 приведено влияние скорости вращения барабана ротационного гранулятора на содержание различных фракций в порошке. На основании полученных результатов

можно констатировать, что наибольший выход необходимой фракции порошкового материала размером менее 63 мкм достигается при введении в шихту 5 мас. % жидкого стекла и времени гранулирования 2,5-3 ч. Затем полученные конгломераты помещали в алундовые лодочки ПД-КВПТ, которые устанавливали в сушильном шкафу СНОЛ 3,5/300. Последующий отжиг проводился при температуре 150 °С в течение 1,5 ч, а спекание - при температуре 1100 °С в течение 4 ч в камерной печи СНОЛ 1,6.2,5.1/И-И2. Операция измельчения спека проводилась в шаровой мельнице МБЛ-1 стальными шарами диаметром 15 мм при скорости вращения барабана 48 об/мин и соотношении веса порошка и веса шаров - 1:3. При определении оптимального диапазона скоростей вращения барабана ротационного гранулятора установлено, что скорости ниже 48 об/мин ведут к комкованию смеси, неравномерному распределению Мо в основной массе порошка и на выходе получается большее количество крупных фракций (табл. 2). На более высоких скоростях (более 48 об/мин) происходит повторное дробление конгломератов вследствие действия центробежных сил и на выходе увеличивается количество мелких фракций. Выход годной фракции в любом варианте равняется или выше прототипа.

Таблица 2

Влияние скорости вращения барабана ротационного гранулятора на содержание различных фракций в порошке

Способ гранулирования порошка	Процентное соотношение фракционный состав порошка; после гранулирования, мкм			
	0-40	40-63	63-80	80-100
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -(MoS ₂ -Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta: 7-10 мас. % легкоиспаряющегося связующего, гранулирование при скорости вращения барабана ротационного гранулятора 36 об/мин и угле наклона 40-50° в течение 22,5 ч	8	48	20	24
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -(MoS ₂ -Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta-ZrO ₂ -Y ₂ O: 5 мас. % легкоиспаряющегося связующего, гранулирование при скорости вращения барабана ротационного гранулятора 36 об/мин и угле наклона 40-50° в течение 2,5-3 ч	6	51	22	21
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -(MoS ₂ -Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta- ZrO ₂ -Y ₂ O: 5 мас. % легкоиспаряющегося связующего, гранулирование при скорости вращения барабана ротационного гранулятора 48 об/мин и угле наклона 40-50° в течение 2,5-3 ч	2	65	15	18
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -(MoS ₂ +Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta-ZrO ₂ -Y ₂ O: 5 мас. % легкоиспаряющегося связующего, гранулирование при скорости вращения барабана ротационного гранулятора 60 об/мин и угле наклона 40-50° в течение 2,5-3ч	14	48	22	16

Операцию отсева проводили с использованием воздушного классификатора для выделения фракции от 40 до 63 мкм. После отсева порошок фракцией от 40 до 63 мкм вводили в струю плазменного распылителя (плазмотрон F4 фирмы Плазма-Техник, Швейцария) мощностью 50 кВт и производили их распыление в стальной цилиндр длиной 1 м, заполненный аргоном. Степень сфероидизации определяли по форм-фактору частиц (степень несферичности, значение 1 - соответствует сфере) методом оптической металлографии. Мощность плазменной струи изменяли от 10 до 70 кВт (фиг. 5).

Оптимальный форм-фактор - 0,91 (более 65 %) частиц получается при мощности плазменной струи 50 кВт. При мощности плазменной струи менее 50 кВт частицы имеют форм фактор 0,20-0,80. При повышении мощности плазменной струи свыше 50 кВт значения форм-фактора уменьшаются из-за переплавления частиц. На фиг. 6 показана морфология частиц 85 % (Al₂O₃-TiO₂-(MoS₂+Ni))-15%ZrO₂-Y₂O после сфероидизации. Анализ

размеров частиц, формы и рельефа поверхности композиционных порошков осуществляли с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Препарирование порошков для исследований в СЭМ проводилось двумя способами: свободной насыпкой и диспергированием в ультразвуке. Изучение структуры частиц композиционных порошков осуществляли путем металлофизического анализа шлифов их поперечного сечения. Для этого использовали микроскопы Unimet (Япония) и MeF-3 (Австрия). Строение разработанных порошков создает предпосылки получения из них износостойких покрытий, которые эффективны при молекулярно-механическом и абразивном изнашивании в неблагоприятных условиях трения (граничная смазка или отсутствие смазочного материала, повышенные температурные воздействия). Для процесса напыления покрытия используется следующее оборудование: установка плазменного напыления фирмы Плазма-Техник (Швейцария), укомплектованная плазмотроном F4; порошковый питатель TWIN-10; установка дробеструйной обработки.

Нанесение покрытия производили на следующих режимах работы оборудования: напыление подслоя покрытия (порошок Mo) толщиной 0,05-0,1 мм: расход водорода 8 л/мин; расход аргона - 40 л/мин; ток электрической дуги - 400-450 А; мощность электрической дуги - 40 кВт; расход порошка - 4 кг/ч, дистанция напыления - 110 мм;

напыление износостойкого слоя из порошка $Al_2O_3-TiO_2-(MoS_2+Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta$ (изготовлен по технологии прототипа) и $Al_2O_3-TiO_2-(MoS_2+Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta-ZrO_2-Y_2O$ (изготовлен по технологии предлагаемого изобретения) толщиной 0,3-0,5 мм: расход водорода 8 л/мин; расход аргона - 50 л/мин; ток электрической дуги 550-600 А; мощность электрической дуги - 50 кВт; расход порошка 2,5-3,0 кг/ч, дистанция напыления - 100 мм.

Триботехнические испытания проводились в условиях трения со смазкой и при отсутствии смазочного материала при нагрузке в паре трения 5 МПа в течении 10 ч, имитирующих условия работы изнашиваемых деталей двигателей внутреннего сгорания. Условия испытания (газ 1 % SO_2 - 76 % O_2 - N_2 ; соль Na_2SO_4 - 3,6 % $PbSO_4$ - 5 мг·см⁻², T = 650 °C) соответствовали составу продуктов сгорания двигателей автотракторной техники. Данные параметров трения и износа покрытий из порошков, полученных по прототипу и заявленному изобретению, приведены в табл. 3.

Установлено, что введение оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия в исходный порошок целенаправленно изменило комплекс их физико-механических и триботехнических характеристик, в первую очередь, увеличило адгезию в 1,33 раза при снижении пористости в 1,3 раза и интенсивности износа в 1,9-2,0 раза. Таким образом предложенный способ получения композиционного материала позволяет повысить износостойкость покрытий в условиях высокотемпературной коррозии.

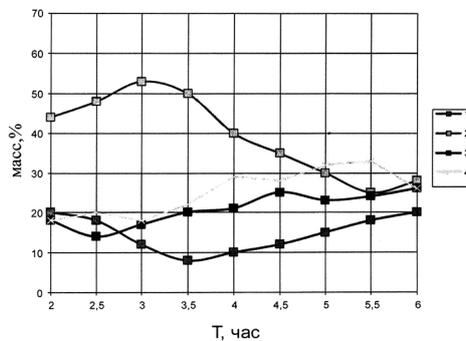
Таблица 3

Данные параметров трения и износа покрытий из порошков, полученных по прототипу и заявленному изобретению

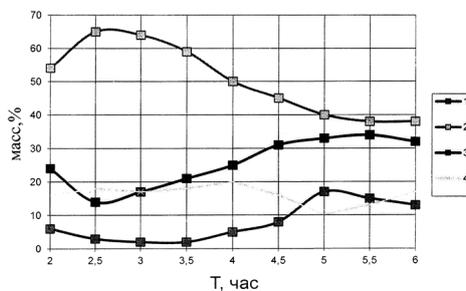
Способ получения материала	Трение по Ст 45 (условия испытания - газ 1 % SO_2 - 76 % O_2 - N_2 ; соль Na_2SO_4 - 3,6 % $PbSO_4$ - 5 мг·см ⁻² , T = 650 °C)			
	Трение со смазкой		Сухое трение	
	Износ покр., мкм	Коэф. трения	Износ покр., мкм	Нагрузка задира, кг
Прототип $Al_2O_3-TiO_2-(MoS_2+Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta$	6,6	0,090	14,0	5,9
Предлагаемый способ $Al_2O_3-TiO_2-(MoS_2+Ni)-Ni-Cr-Al-Y-Ta-ZrO_2-Y_2O$	3,4	0,046	6,7	9,1

Источники информации:

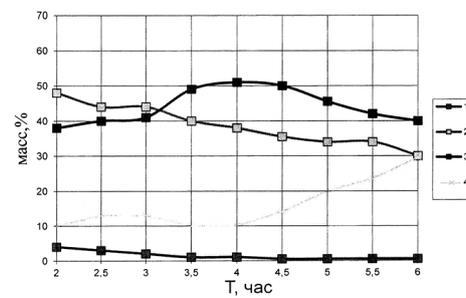
1. SU 1528810, 1989.
2. SU 1686030, 1991.
3. BY 23783, 2022.



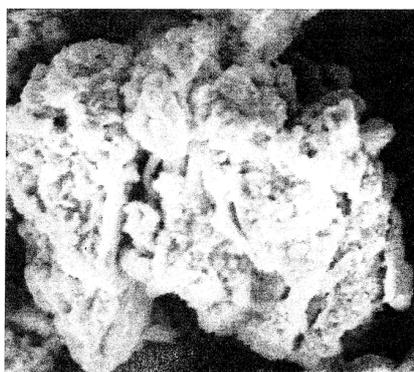
Фиг. 1



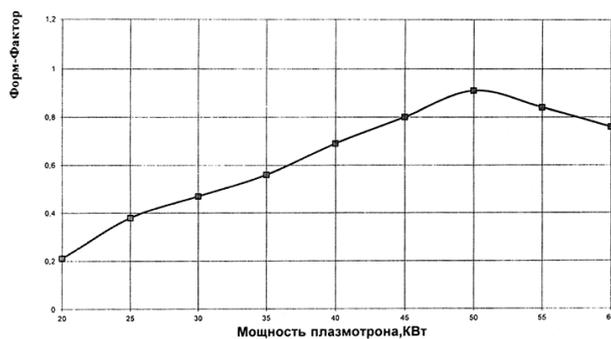
Фиг. 2



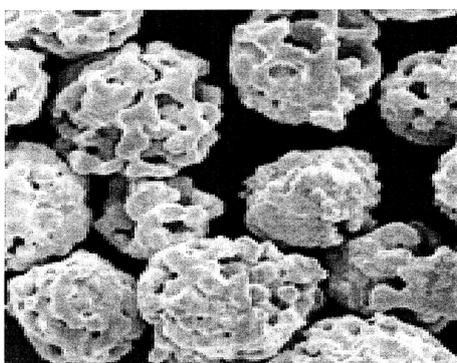
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6