

УДК 621.7937

DOI: 10.30838/P.CMM.2415.200418.82.12

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ПОЛУЧАЕМЫХ ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

ВАШКЕВИЧ Ф.Ф.¹, к.т.н, доцент,
СПИЛЬНЫК А.Я.², к.т.н, доцент,
ЗАГОРОДНИЙ А.Б.³, ассистент,
ЖУРАВЕЛЬ В.И.⁴, ст.н.с.

¹Кафедра материаловедения и обработки материалов, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0003-0962-0890.

² Кафедра материаловедения и обработки материалов, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (056) 778-99-14, e-mail: anatolyspl@gmail.com., ORCID ID: 0000-0002-4931-9675.

³ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740.

⁴ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-82, e-mail: Zhuravel39@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-9501-5106.

Аннотация. *Цель.* Целью исследований было разработка порошков керамических материалов на основе $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ с определением их физико-механических свойств, а также свойств покрытий из этих порошков полученных плазменным напылением. *Методика.* Физико-механические свойства порошков определяли по общепринятым методикам: форма и размеры частиц, распределение по крупности, плотность, предел прочности при изгибе, модуль упругости, коэффициент линейного теплового расширения. *Результаты.* На основе проведенных исследований получен высокотемпературный защитный материал типа $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ и КСШ, изготовлены образцы покрытий из этих материалов. *Научная новизна.* Разработаны новые термозащитные композиционные материалы для получения покрытий камер сгорания газотурбинных двигателей и определены их физико-механические свойства. *Практическая значимость.* Разработанные новые термозащитные композиционные материалы использованы для формирования корковых деталей плазменным напылением при изготовлении жаровых труб ГТД, детали проходят промышленные испытания в условиях ОАО «Мотор Сич».

Ключевые слова: керамический композитный материал, плазменное напыление, теплозащитное покрытие, камера сгорания, газотурбинный двигатель.

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ І ПОКРИТТІВ ОТРИМАНИХ ПЛАЗМЕННИМ НАПИЛЕННЯМ

ВАШКЕВИЧ Ф.Ф.¹, к.т.н, доцент,
СПІЛЬНИК А.Я.^{2*}, к.т.н, доцент,
ЗАГОРОДНИЙ О.Б.³, асистент.,
ЖУРАВЕЛЬ В.І.⁴, ст.н.с.

¹Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0003-0962-0890.

² Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 778-99-14, e-mail: anatolyspl@gmail.com., ORCID ID: 0000-0002-4931-9675.

³ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740.

⁴ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-82, e-mail: Zhuravel39@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-9501-5106.

Анотація. *Мета.* Метою досліджень було розробка порошків керамічних матеріалів на основі $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ з визначенням їх фізико-механічних властивостей, а також властивостей покриттів із цих порошків отриманих плазменним напиленням. *Методика.* Фізико-механічні властивості порошків визначали по загальновідомим методикам: форма та розміри часток, розподілення по крупності, щільність, границя міцності при згині, модуль пружності, коефіцієнт лінійного теплового розширення. *Результати.* На основі проведених досліджень отримано високотемпературний захисний матеріал

типу $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ та КСШ, виготовлені зразки покриттів із цих матеріалів. **Наукова новизна.** Розроблено нові термозахисні композиційні матеріали для отримання покриттів камер згоряння газотурбінних двигунів та визначені їх фізико-механічні властивості. **Практична значимість** Розроблені нові термозахисні композиційні матеріали використані для формування коркових деталей плазменним напыленням при виготовленні жарових труб ГТД, деталі проходять промислові випробовування в умовах ВАТ «Мотор Січ».

Ключові слова: керамічний композитний матеріал, плазменне напылення, теплозахисне покриття, камера згоряння, газотурбінний двигун.

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CERAMIC MATERIALS AND COATINGS OBTAINED BY PLASMA SPRAYING

VASHEKEVICH F.F.¹, *Ph.D., Associate Professor*,
SPILNIK A.Y., *Ph.D.², Associate Professor*,
ZAGORODNY O.B.³, *Assistant*,
ZURAVEL V.I.⁴, *Ph.D.⁴, Associate Professor*.

¹Department of Materials and Materials Processing, Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevsky st., 24a, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: : 0000-0003-0962-0890.

². Department of Materials and Materials Processing, Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevsky st., 24a, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 778-99-14, e-mail: anatoyspl@gmail.com., ORCID ID:; 0000-0002-4931-9675..

³. Department of Materials and Materials Processing, Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevsky st., 24a, 49600, Dnipro, Ukraine, tel +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740.

⁴. Department of Materials and Materials Processing, Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevsky st., 24a, 49600, Dnipro, Ukraine, tel.+38 (0562) 46-98-82, e-mail: Zhuravel,39@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-9501-5106.

Abstract. Purpose. The purpose of the research was the development of powders of ceramic materials based on $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ with the determination of their physical and mechanical properties, as well as the properties of coatings from these powders obtained by plasma spraying. **Method.** Physical and mechanical properties of powders were determined according to well-known methods: particle shape and dimensions, distribution by size, density, bending strength, elasticity modulus, and coefficient of linear thermal expansion. **Results.** Based on the conducted researches a high-temperature protective material of type $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ and CAS has been received, samples of coatings from these materials are made. **Scientific novelty.** New thermo-protective composite materials for the coating of combustion chambers of gas turbine engines have been developed and their physical and mechanical properties have been determined. **The practical significance.** The new thermo-protective composite materials have been developed for the formation of cortical parts by plasma spraying in the manufacture of flame tubes of GTE, the parts undergo industrial tests in the conditions of OJSC “Motor Sich”.

Key words: ceramic composite material, plasma spraying, heat-shielding coating, combustion chamber, gas turbine engine.

Введение

Жаровые трубы газотурбинных двигателей работают в условиях высоких температур 800-1800 °C, а также при высокой скорости газовых потоков до 50 м/с. Такие условия требуют создания новых материалов способных сохранять работоспособность при высоких температурах и скоростях газовых потоков и иметь также повышенные физико-механические свойства. В настоящее время это керамические композитные материалы. [1-12].

Цель

Основной целью исследований было разработка порошков керамических материалов на основе $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ с определением их физико-механических свойств, а также свойств покрытий из этих порошков полученных плазменным напылением.

Методика

К физическим свойствам композиционных порошков относятся: форма частиц, размеры, распределение по крупности, плотность, текучесть. Форму частиц порошка определяли методами оптической и электронно-лучевой микроскопии при оценке проекций. За характеристику принимали фактор формы – фактор неравноосности частиц, т.е. отношение максимального (l_{\max}) и минимального (l_{\min}) наблюдаемых размеров частиц (l_{\max}/l_{\min}).

Гранулометрический состав порошков определяли: ситовым и микроскопическим методами. Ситовым методом определяли крупность порошка путем отсева, т.е. механического разделения навески порошка (100 г) через требуемый набор сит, располагаемых одно над другим. Фракции крупностью меньше 125 мкм определяли микроскопическим анализом в проходящем и

отраженном свете с использованием окуляра микроскопа, снабженного линейной шкалой. Насыпную плотность определяли по ГОСТ 19440-74, используя мерную ёмкость с прямой высыпкой порошка через воронку с выходным отверстием диаметром 5 мм.

Механические характеристики покрытий из керамического материала (предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, модуль упругости «Е», коэффициент линейного расширения « α ») определяли по ДСТУ 3716-98 «Керамика. Метод определения прочности при изгибе». По указанному стандарту применяли схему трёхточечного изгиба образца по схеме (Б), который свободно лежит на 2-х опорах, силой, которая действует на образец посередине между опорами (рис 1). Машина для испытаний по ГОСТ 28840 типа Ynstron-TTDM-L.

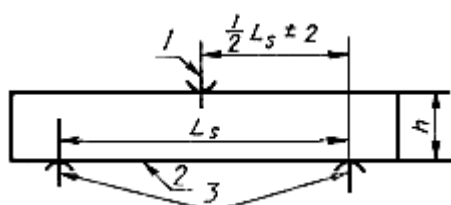


Рис 1. Схема трёхточечного изгиба образца (Б). 1-опора для приложения нагрузки (нажимная); 2-поверхность образца, работающая на растяжение; 3-опоры, поддерживающие образец. /

Fig.1. Three-point bending pattern of sample (Б) 1-load bearing support (pressure); 2-surface of the sample, which is working on stretching; 3-pillar that support the sample.

Параметры схемы нагружения приведены в табл. 1

Таблица 1.

Параметры схемы нагружения образца при изгибе / Parameters of the sample loading pattern when bending.

Вариант схемы нагружения	Расстояние между опорными роликами, L, мм	Расстояние между нагружающими роликами, L/2 мм
Б	40	20

Размеры образцов приведены в табл.2. Модуль упругости определяли по ГОСТ 25503-97.

Таблица 2.

Размеры образцов для испытания / Sample sizes for test.

Вариант размеров образцов	Ширина, образцов, мм	Толщина, мм	Длина, мм
σ при изгибе	4,0	3,0	50
I тип при определении модуля упругости	10	10	30

Испытание образцов на изгиб проводили с использованием приспособления, обеспечивающего минимальный эксцентриситет приложения нагрузки и безопасность проведения эксперимента. Механические характеристики E^c , $\sigma_{пц}^c$, σ_T^c определяли по записанной испытательной машиной автодиаграмме в координатах: усилие- абсолютная деформация (P- Δh) с учетом масштаба записи. Определение коэффициентов теплового расширения покрытий из экспериментальных составов шпинели $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ проводилась в интервале температур от 100°C до 1000°C с шагом 100°C. Работа выполнялась на dilatометре МД-83 по методике ИЧМ НАН Украины. Изменение длины образца записывались на двухкоординатном потенциометре ПДП4-002, а температура образца регистрировалась на потенциометре КСП4. Расчет коэффициента теплового расширения выполнен по dilatограмме с учётом коэффициента теплового расширения кварцевой системы. Порошки для плазменного напыления получены золь-гель процессом.

Результаты

Форма частиц. Измерения показали, что фактор неравноосности для порошка $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ составляет 1,0 – 1,2 и форма частиц – сферическая. Для композиционного порошка КСП (кобальтовый сплав + шпинель) характерный фактор неравноосности составляет 2–5 и форма частиц – осколочная (Рис. 2, Рис 3).

Форма частиц порошков оказывает определяющее влияние на их технологические свойства (подача порошка в плазменную горелку), а также плотность, проницаемость, прочность.

Размер частиц. Композиционные порошки представляют собой полидисперсные системы, состоящие из частиц различной крупности. В зависимости от набора размеров частиц порошок характеризуется гранулометрическим (фракционным) составом.



Рис.2. Общий вид частиц порошка шпинели $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ x100. / Fig.2. General appearance of particles of spinel powder $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ x100.

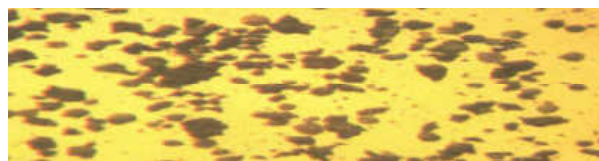


Рис.3. Общий вид частиц порошка КСП (кобальтовый сплав + шпинель), x100. / Fig.3. General appearance of particles of CAS (cobalt alloy+spinel), x100.

Таким образом, проведенные исследования по композиционным порошкам $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ и КСШ (кобальтовый сплав + шпинель) показали, что порошки имеют различную геометрическую форму: шаровидная форма характерна для композита $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$, а осколочная – для композита КСШ. Результаты измерения размеров частиц порошка шпинели и КСШ, их распределение по крупности представлены на рис. 4, рис.5.

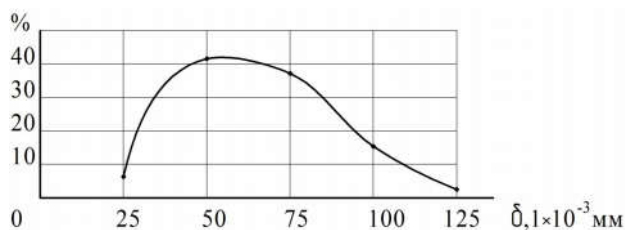


Рис. 4 График распределения частиц по крупности для порошков шпинели $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$, δ – размер частиц в мкм. / Fig.4. Graph of particle size distribution for spinel powders $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$, δ – partial size in mkm.

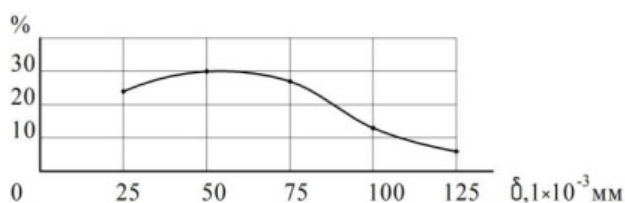


Рис. 5 График распределения частиц по крупности для порошков КСШ (кобальтовый сплав + шпинель), δ – размер частиц в мкм. / Fig.5. Graph of particle size distribution for spinel powders CAS (cobalt alloy+spinel) δ – partial size in mkm.

Крупность частиц порошков в основном лежит в пределах 25 – до 75 мкм. Такая крупность обеспечивает подачу этих порошков в плазменную струю и формирование покрытий.

Проведенные исследования по насыпной плотности и текучести порошков из шпинели $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$, а также из композита ПЦПК 63-Н10 показывают широкие возможности по транспортированию их от дозатора к плазменной горелке.

Физико-механические свойства покрытий из исследуемых материалов приведены в табл. 3.

Композит КСШ по механическим характеристикам выше остальных композиций. Коэффициент линейного теплового расширения « α » у композиции ПЦПК 63-Н10 самый высокий.

Из данных таблицы 3 следует, что проведение отжига материалов повышает прочностные характеристики композитов в 2-3 раза, для композиции ПЦПК 63-Н10 только в 1,3 раза.

Таблица 3

Физико-механические свойства напыленных материалов / Physical and mechanical properties of sprayed materials

№ п / п	Свойства	Наименование материалов		
		Шпинель $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$	Композит КСШ	Композит ПЦПК 63-Н10
1	Предел прочности при изгибе, $\sigma_{изг}$, МПа	50/185*1	62,1/195*1	41/110*1
2	Мод.упр. E, МПа	150/344*1	161/360*1	60/81,4*1
3	Коэффициент линейного теплового расширения « α » $\cdot 10^{-6}$, 1/°C	8,2*2	9,8*3	10,1*4

Примечания к табл. 3:

*1- после отжига при 1000°C в течении 5 часов в знаменателе, в числителе – до отжига;

*2- исходный состав: 80% Al_2O_3 +20% Cr_2O_3 измерение в интервале 20 →1000°C;

*3- в температурном интервале 20 →1000 °C, напыление;

*4- в температурном интервале 20 →1000 °C ; после отжига при 1000°C, 5 часов.

Научная новизна

Разработан новый термозащитный композиционный материал для получения покрытий камер сгорания газотурбинных двигателей и определены его физико-механические свойства.

Практическая значимость

Разработанные новые термозащитные композиционные материалы использованы для формирования корковых деталей плазменным напылением при изготовлении жаровых труб ГТД, детали проходят промышленные испытания в условиях ОАО «Мотор Сич».

Выводы

1. Исследования физико-механических свойств разработанных порошков $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ и КСШ показали возможность использования их при формировании плазменных покрытий. Форма и крупность частиц соответствуют техническим требованиям.

2. Плазменные покрытия из порошков $Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ и КСШ обладают высокой прочностью на изгиб, а коэффициент линейного теплового расширения приближающийся к основному материалу, позволяет увеличить работоспособность при знакопеременных нагрузках.

3. Керамический материал на основе шпинели и КСШ можно рекомендовать для деталей жаровой трубы камер сгорания ГТД.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Керамические композиционные материалы для работы при высоких температурах// В.И.Большаков, В.И.Харченко и др. Сб. научн. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение. Вып. 58, 2011., с.351-352.
2. Патент РФ № 2261334 С1 «Многослойное высокотемпературное теплозащитное керамическое покрытие». 2003.
3. А.Хасуй. Техника напыления. Пер. с японского. М.: Машиностроение, 1975, 288 с. илл.
4. А.Хасуй, О.Моригаки. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 237с. илл.
5. Патент РФ № 2280095 С2 «Способ нанесения покрытий», 2004.
6. Патент РФ № 2021388 «Способ плазменного напыления керамического покрытия», 1994.
7. Температурные изменения. Справочник. К.: Наукова думка, 1989, с.252-261, 351-357.
8. Ю.С.Борисов, Ю.А.Харламов, С.Л.Сидоренко, Е.Н.Ардатовская «Газотермические покрытия из порошковых материалов». Справочник. К.: Наукова думка, 1987.
9. Тезисы докладов Всероссийской конференции «Керамика и композиционные материалы». Сыктывкар, 2004, с.236.
10. Патент № 09/626981 General Electric Co «Армированный волокнами композиционный материал». Оpubл. 17.01.2006.
11. Libert C.H. Tests of NASA ceramic thermal barrier coating for gas turbine engines.//Thin Solid Films.- 1979. - 64, №2-P. 329-333.
12. Mc Kee D.W., Siemers P.A. Resistance of thermal barrier ceramic coating to hot salt corrosion. Thin Solid Films.- 1980. -73, №2-P.439-445.

REFERENCES

1. Keramicheskiye kompozitsionnye materialy dlia raboty pry vysokikh temperaturakh// V.Y.Bolshakov, V.Y.Kharchenko y dr. Sb. nauchn. trudov «Stroytelstvo, materialovedeniye, mashynostroeniye. Vyp. 58, 2011., s.351-352.
2. Patent RF № 2261334 S1 «Mnogosloinoe vysokotemperaturnoe teplozashchytное keramicheskoe pokrytiye». 2003.
3. A.Khasui. Tekhnika napyleniya. Per. s yaponskoho. M.: Mashynostroeniye, 1975, 288 s. yll.
4. A.Khasui, O.Moryhaky. Naplavka y napyleniye.M.:Mashynostroeniye, 1985. 237s. yll.
5. Patent RF № 2280095 S2 «Sposob naneseniya pokrytiy», 2004.
6. Patent RF № 2021388 «Sposob plazmennogo napyleniya keramicheskogo pokrytiya», 1994.
7. Temperaturnye yzmeneniya. Spravochnyk. K.: Naukova dumka, 1989, s.252-261, 351-357.
8. Yu.S.Borysov, Yu.A.Kharlamov, S.L.Sydorenko, E.N.Ardatovskaia «Gazotermicheskiye pokrytiya yz poroshkovykh materialov». Spravochnyk. K.: Naukova dumka, 1987.
9. Tezysy dokladov Vserossyiskoi konferentsyy «Keramyka y kompozitsionnye materialy». Syktyvkar, 2004, s.236.
10. Patent № 09/626981 General Electric Co «Armyrovanniy voloknamy kompozitsionnyi material». Opubl. 17.01.2006.
11. Libert C.H. Tests of NASA ceramic thermal barrier coating for gas turbine engines.//Thin Solid Films.- 1979. - 64, №2-P. 329-333.
12. Mc Kee D.W., Siemers P.A. Resistance of thermal barrier ceramic coating to hot salt corrosion. Thin Solid Films.- 1980. -73, №2-P.439-445.

Статья рекомендована к публикации д-ром.техн.наук, проф. Г. Г. Шломчаком (Украина); д-ром.техн.наук, проф. Г.Д. Сухомлиним (Украина)