

УДК 621.793.7+620.187

DOI:10.30838/J.PMNTM.2413.240418.43.104

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КЕРАМИЧЕСКОГО ЖАРОСТОЙКОГО ГАЗОПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ МЕТОДАМИ СВЕТОВОЙ И РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

БОЛЬШАКОВ В. И.¹, *д. т. н, проф.*,
СУХОМЛИН Г. Д.², *д. т. н, проф.*,
ВАШКЕВИЧ Ф. Ф.³, *к. т. н, доц.*,
СПИЛЬНИК А. Я.^{4*}, *к. т. н, доц.*,
ЗАГОРОДНИЙ А. Б.⁵, *асс.*,
ЖУРАВЕЛЬ В. И.⁶, *ст. н. с.*

¹Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (056) 745-23-72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-2624-4666

²Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (050) 867-30-97, e-mail: g_suhomlin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

³Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0003-0962-0890

^{4*} Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (050) 910-49-47, +38 (098) 600-32-58, e-mail: anatolyspl@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4931-9675

⁵ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-82, e-mail: zagorodniy.a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740

⁶ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-82, e-mail: zhuravel.39@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9501-5106

Аннотация. *Цель исследования* – установление сущности и последовательности развития основных процессов, ответственных за формирование теплоизоляционного слоя, закономерности явлений и результатов их влияния на свойства газоплазменного керамического покрытия. *Методика.* Структуру покрытия изучали методами световой металлографии и сканирующей электронной микроскопии. Коэффициент ориентации частиц определяли с использованием метода секущих. *Результаты.* Исследована структура керамического жаростойкого газоплазменного покрытия, установлено, что она состоит из наномерных частиц двух типов: плоские лепестки толщиной 200...950 нм и дисперсные сферические частицы диаметром 100...800 нм. Многочисленные щелевидные пустоты толщиной до 300 нм между лепестками и наносферами придают покрытию высокие теплоизоляционные свойства. *Научная новизна.* Впервые предложена схема образования слоистых структур при растекании капель расплавленного материала шпинели. *Практическая значимость.* Установленные закономерности явлений, ответственных за формирование теплоизоляционного слоя, позволяют влиять на свойства керамического покрытия, а также способствуют совершенствованию технологического процесса плазменного напыления деталей камеры сгорания газотурбинных двигателей (ГТД).

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

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ КЕРАМІЧНОГО ЖАРОСТІЙКОГО ГАЗОПЛАЗМОВОГО ПОКРИТТЯ МЕТОДАМИ СВІТЛОВОЇ ТА РАСТРОВОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ

БОЛЬШАКОВ В. И.¹, *д. т. н, проф.*,
СУХОМЛИН Г. Д.², *д. т. н, проф.*,
ВАШКЕВИЧ Ф. Ф.³, *к. т. н., доц.*,
СПИЛЬНИК А. Я.^{4*}, *к. т. н, доц.*,
ЗАГОРОДНИЙ О. Б.⁵, *ас.*,

ЖУРАВЕЛЬ В. І.⁶, *ст. н. с.*

¹Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (056) 745-23-72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-2624-4666

²Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (050) 867-30-97, e-mail: g_suhomlin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

³Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0003-0962-0890

^{4*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (050) 910-49-47, +38 (098) 600-32-58, e-mail: anatolyspl@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4931-9675

⁵ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-82, e-mail: zagorodny.a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740

⁶ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-82, e-mail: zhuravel.39@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9501-5106

Анотація. Мета дослідження – встановлення сутності і послідовності розвитку основних процесів, відповідальних за формування теплоізоляційного шару, закономірності явищ і результатів їх впливу на властивості керамічного покриття. **Методика.** Структуру напиленого газоплазмового покриття вивчали методами світлової металографії і сканувальної електронної мікроскопії. Коefіцієнт орієнтації частинок визначали методом січних. **Результати.** Досліджено структуру керамічного жаростійкого покриття, встановлено, що вона складається з наномірних частинок двох типів: плоских пелюсток товщиною 200...950 нм та дисперсних сферичних частинок діаметром 100...800 нм. Численні порожнини товщиною до 300 нм між пелюстками і наносферами надають покриттю високих теплоізоляційних властивостей. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано схему утворення прошаркових структур під час розтікання крапель напиленого розплавленого матеріалу – шпінелі. **Практична значимість.** Установлені закономірності явищ, відповідальних за формування теплоізоляційного шару, дозволяють впливати на властивості керамічного покриття, а також сприяють удосконаленню технологічного процесу плазмового напилення деталей камери згоряння газотурбінних двигунів (ГТД).

Ключові слова: керамічний композитний матеріал; плазмове напилення; теплозахисне покриття; камера згоряння; газотурбінний двигун

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF CERAMIC GAS-RESISTANT GAS-PLASMA COATING BY METHODS OF LIGHT AND STROKE ELECTRONIC MICROSCOPY

BOL'SHAKOV V.I.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

SUKHOMLYN G.D.² *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

VASHEKEVICH F.F.³, *Ph. D., Ass. Prof.*,

SPILNİK A.Ya., Ph.D.^{4*}, *Ass. Prof.*,

ZAGORODNY O.B.⁵, *Ass.*,

ZURAVEL V.I.⁶, *Sen. Res.*

¹Department of materials science and materials processing, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 745-23-72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-2624-4666

² Department of materials science and materials processing, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 867-30-97, e-mail: g_suhomlin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

³Department of materials science and materials processing, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0003-0962-0890

^{4*} Department of materials science and materials processing, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 910-49-47, +38 (098) 600-32-58, e-mail: anatolyspl@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4931-9675

⁵ Department of materials science and materials processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel +38 (0562) 46-98-82, e-mail: zagorodniy.a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740

⁶ Department of materials science and materials processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel.+38 (0562) 46-98-82, e-mail: zhuravel.39@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9501-5106

Abstract. Purpose. The main goal of the research was to establish the essence and sequence of development of the main processes responsible for the formation of the thermal insulation layer, the regularities of the phenomena and the results of their influence on the properties of the ceramic coating. **Methodology.** The structure of the sprayed ceramic heat-resistant gas-flame coating was studied by metallographic methods and scanning electron microscopy. The particle orientation coefficient was determined by the secant method. **Results.** The structure of a ceramic heat-resistant gas-plasma coating was studied, it was established that it consists of two types of nanoscale particles: plane lobes 200-950 nm in thickness and dispersed spherical particles with a diameter of up to 800 nm. Numerous voids up to 300 nm thick between the petals and nanospheres impart high thermal insulation properties to the coating. **Scientific novelty.** The scheme of the formation of layered structures for the spreading of drops of sputtered molten spinel material was proposed for the first time. **Practical significance.** The established regularities of the phenomena responsible for the formation of the heat-insulating layer allow to influence on the properties of the ceramic coating, and also contribute to the improvement of the technological process of plasma spraying the parts of the combustion chamber of the gas turbine engine.

Keywords: ceramic composite material; plasma spraying; thermal protective coating; combustion chamber; gas turbine engine

Введение

Получение покрытий плазменным напылением выгодно отличается от других способов создания поверхностных слоёв любой конфигурации тем, что наносимый материал проходит стадию воздействия высокой температуры (3 000...6 000 °С), при которой все известные химические элементы и их соединения переходят в другое агрегатное (жидкое или газообразное) состояние. При охлаждении происходит обратный процесс, который сравнительно легко поддаётся управлению в смысле формирования требуемой структуры и свойств поверхностных слоёв напыляемых изделий [1–4].

Для керамических материалов это тоже справедливо и можно полагать, что в потоке плазмы исходные порошковые материалы переходят в жидкое состояние, а затем при соударении с поверхностью детали растекаются по ней, кристаллизуются и формируют своеобразный многослойный материал, обладающий высокими физико-механическими свойствами, жаростойкостью и теплоизоляционной способностью. Это подтверждается при исследовании структуры напыленных слоёв, состоящих из окислов алюминия и металлического хрома (табл. 1), а также продуктов их взаимодействия при плавлении и последующей кристаллизации [5].

Таблица 1

Химический состав шпинели $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ / Chemical composition of spinel $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$

$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ плакирован и спечен	Al_2O_3	Cr_2O_3	Na_2O	SiO_2	Fe_2O_3
	90,13	9,50	0,31	0,02	0,04

Цель работы

Целью исследования было:

а) установить сущность и последовательность развития основных процессов, ответственных за

формирование теплоизоляционного слоя и характер их влияния на свойства керамического покрытия (табл. 2).

б) определить структурные признаки покрытий как в поперечном сечении, так и в нормальном к свободной поверхности.

Методика

Структуру напыленного керамического жаростойкого газопламенного покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ изучали методами: металлографии (микроскоп «Неофот–21») и сканирующей электронной микроскопии (РЭМ102И). Изображения фиксировали цифровой камерой «Olympus–350». Коэффициент ориентации частиц определяли методом секущих.

Таблица 2

Физико-механические свойства напыленного материала (шпинели $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) / Physical and mechanical properties of the sprayed material (of spinel $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$)

Предел прочности при изгибе, $\sigma_{\text{изг}}$, МПа	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент линейного теплового расширения « α » $\cdot 10^{-6}$, 1/°С
50/185 ^{*1}	150/344 ^{*1}	8,2 ^{*2}

*¹ – после отжига при 1 000 °С в течение 5 часов в знаменателе, в числителе – до отжига;

*² – исходный состав: 80 % Al_2O_3 + 20 % Cr_2O_3 измерение в интервале 20 – 1 000 °С.

Результаты

Структура покрытия в поперечном сечении

На рисунке 1 показана структура керамического теплоизоляционного слоя, полученного газоплазменным напылением.

Шлиф получен по сечению, перпендикулярному напыляемой поверхности. Направление напыляемого материала показано стрелкой на рисунках 1 а, б.

Слоистость, перпендикулярная потоку частиц, проявляется благодаря существованию тончайших прослоек между отдельными лепестками растёкшихся по поверхности и затвердевших капель расплавленных окислов (керамики).

Под световым микроскопом структура выявляется с ограниченным разрешением, поэтому исследование проводили также с применением растровой электронной микроскопии.

На рисунке 2 приведены электронно-микроскопические снимки при увеличениях, сравнимых со снимками, полученными на световом микроскопе (рис. 2а), а также при повышенных до 3 000 увеличений (фактическое увеличение на рис. 2б составляет $\times 4\,000$).

На рисунках 2а и 2б видны подробности, которые, с одной стороны, подтверждают слоистое строение керамического жаростойкого покрытия, а с другой – не выявляют существенно важных сведений о морфологии продуктов, формирующих структуру и свойства керамики.

Это связано со спецификой приготовления шлифов, которая построена на явлении квазихрупкого разрушения, поэтому не выявляет реального структурного состояния керамического покрытия.

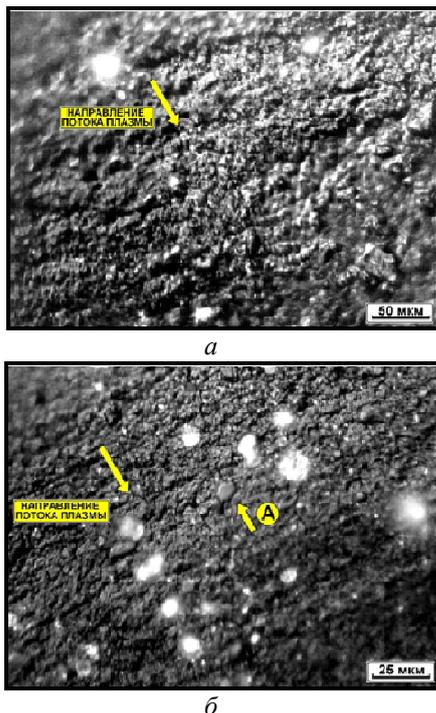


Рис. 1. Структура керамического жаростойкого покрытия. Шлиф расположен параллельно направлению потока плазмы. Белые частицы – продукты абразивного разрушения материала композита (метилметакрилат) / Fig. 1. Structure of ceramic heat-resistant coating. The grate is parallel to the direction of the plasma flow. White particles are products of abrasive destruction of the compound material (methylmethacrylate)

Поэтому дальнейшее изучение деталей строения слоёв плазменного защитного покрытия проведено методом растровой электронной микроскопии во вторичных электронах, что позволяет изучать особенности структуры в широком диапазоне увеличений при большой глубине резкости, которая свойственна этому методу.

Объектами исследований служили свободная поверхность керамического покрытия и поверхность хрупкого разрушения.

На втором этапе исследовали свободную поверхность последнего слоя, который зафиксировал момент окончания напыления покрытия и поэтому отражает реальное строение поверхностного рельефа защитного слоя.

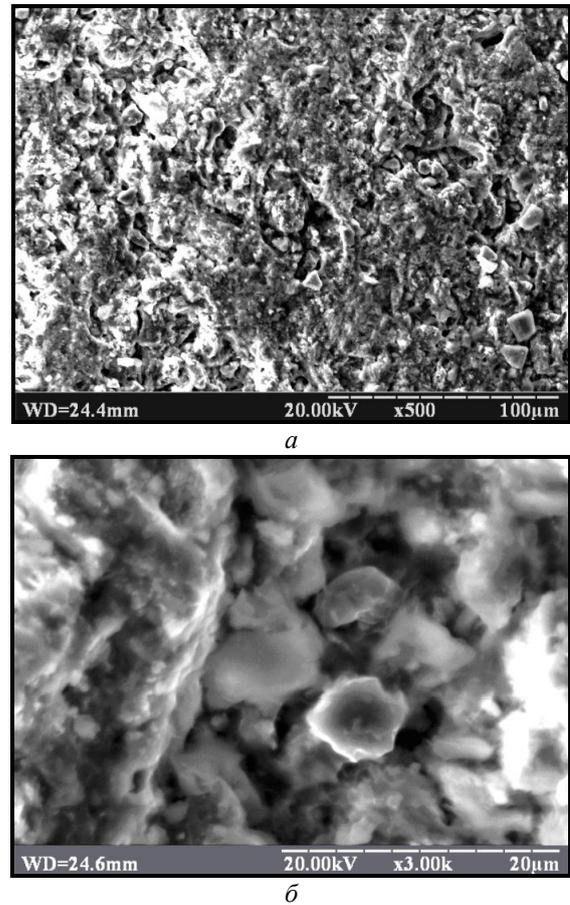
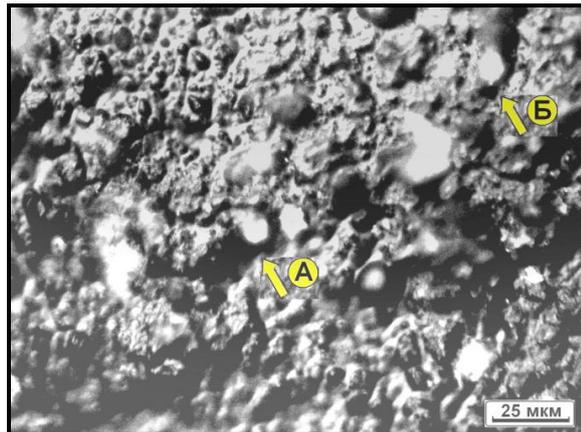


Рис. 2. Структура керамического жаропрочного покрытия. Растровая электронная микроскопия. Шлиф расположен параллельно направлению потока частиц. Увеличение на снимке 2а сопоставимо с увеличением на рисунке 1а. Видны отдельные частицы с элементами кристаллической огранки / Fig. 2. Structure of ceramic heat-resistant coating. Raster electron microscopy. The coil is parallel to the direction of the particle flow. The magnification in picture 2а is comparable with the increase in figure 1а. Single particles with elements of crystal faceting are visible

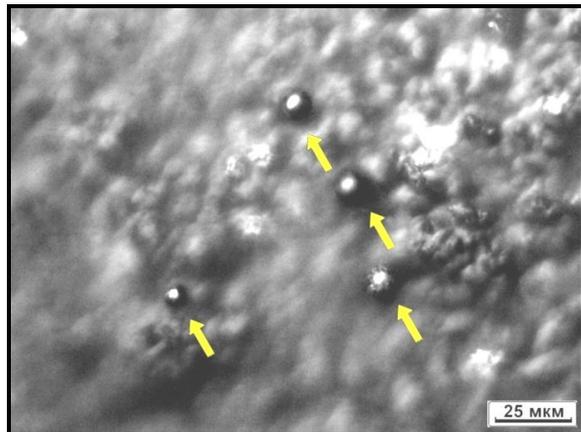
Структура покрытия со стороны свободной поверхности

Под световым микроскопом выявляется бесформенная структура расплывшихся капель, накладывающихся друг на друга (рис. 3а).

В некоторых случаях жидкая капля в процессе полёта к поверхности успевает закристаллизоваться и приобретает форму куба, октаэдра, плоского шестигранника, которые удерживаются на поверхности силами сцепления (показаны на рисунке 3а стрелками «А» и «Б»).



а



б (b)

Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя керамического жаропрочного покрытия со стороны свободной поверхности. Световой микроскоп.

Снимки сделаны с одного и того же места:

а – фокусировка на впадины; б – фокусировка на вершины рельефа / Fig. 3. Microstructure of the surface layer of the ceramic heat-resistant coating on the free surface side. Light microscope. Pictures are taken from one place: a – focus on the cavities; b – focusing on the tops of the relief

Если по каким-то причинам скорость охлаждения возрастала, капли жидкой керамики затвердевали в виде мелких сфер, размеры которых достигали 8...15 мкм. Они лежат, как правило, на самых «низиных» местах напыленного слоя и выявляются при различных вариантах фокусировки объектива (на рисунке 3б показаны стрелками).

Так как не все частицы достигают поверхности в жидком состоянии, некоторые из них успевают охладиться и закристаллизоваться в полёте, поэтому они видны в некоторых случаях в виде округлых или остроконечных частиц, вкрапленных в тонкослойную матрицу (стрелка «А» на рисунке 1б). Обычно они наблюдаются на поверхности покрытия, где они сохраняют чёткую огранку в виде шестигранников, лежащих на различных уровнях поверхностного слоя керамики (стрелки на рис. 1а, б).

Электронномикроскопические снимки фиксируют более мелкие детали различной морфологии. В частности, установлено, что сферическая форма застывших (затвердевших) частиц является тем многочисленнее, чем они мельче. Как показано на рисунке 4а, частицы редко бывают крупнее 1 мкм (стрелка «А»), а некоторые из них имеют диаметр около 500 нм (стрелки «Б» и «В» на рис. 4а и стрелки на рис. 4б). Кроме того, существуют ещё более мелкие сферические наноразмерные частицы, размеры которых не превышают 200 нм (стрелка «В» на рис. 4а) и стрелка «А» на рисунке 4б.

Эти наблюдения позволяют предположить, что сферические частицы имеют два источника формирования. Сравнительно крупные частицы (5...15 мкм) образуются из жидких капель, охлаждающихся и твердеющих в свободном полёте прежде чем столкнутся с мишенью. Более мелкие сферические частицы (100...500 нм) являются вторичным продуктом – результатом разбрызгивания мелких капель при соударении с подложкой, состоящей из уже затвердевших лепестков. Предполагаемая схема образования таких дисперсных частиц представлена на рисунке 5. Проведенный статистический анализ показывает, что их плотность в плоскостях напыления (рис. 4а, б) и разрушения (рис. 6а, б) составляет $2...4 \cdot 10^5 \text{ мм}^{-2}$ или в единице объёма $\approx 10^9 \text{ мм}^{-3}$.

В пользу такого предположения говорит также тот факт, что исходный порошок состоит из фракций, которые на 96 % состоят из частиц размерами крупнее 25 мкм и не содержат фракций $d \leq 5 \text{ мкм}$.

Такое дробление исходных частиц напыляемого материала на высокодисперсные наночастицы в процессе нанесения способствует измельчению кристаллов керамики, повышению пористости, снижению теплопроводности покрытия, его прочности, теплостойкости и жаростойкости.

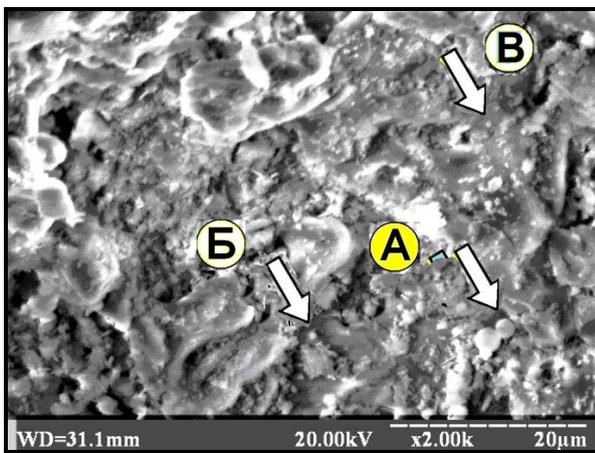
Структура поверхности разрушения покрытия (излома)

Поверхность разрушения получена путём приложения ударной нагрузки на отслоившийся участок керамического покрытия. Взаимную ориентацию образца и направление приложения ударной нагрузки выбирали таким образом, чтобы поверхность разрушения оказалась почти перпендикулярной поверхности напыленного слоя.

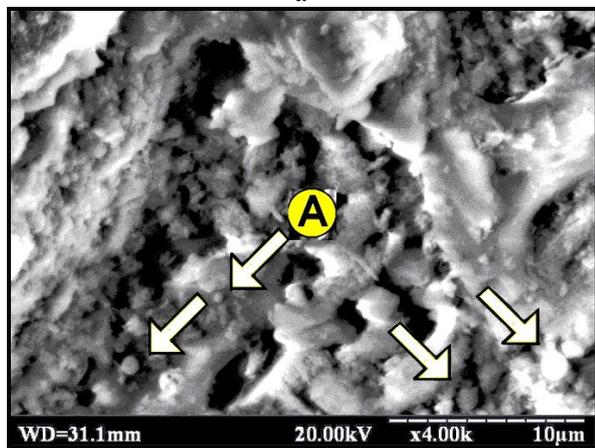
Структуру поверхню розрушення изучали с помощью растровой электронной микроскопии, так как при исследовании под световым металлографическим микроскопом значительные колебания высоты рельефа препятствуют получению качественного, сфокусированного изображения.

На рисунке 6а показана структура поверхности излома керамического жаропрочного покрытия в непосредственной близости к свободной поверхности. Из-за высокой дисперсности продуктов наложения текстура материала выражена слабо.

После интенсивного контрастирования изображения отдельных вытянутых частиц и пустот между ними становятся видимыми отчётливо, их размеры и направленность можно надёжно определить на увеличенных отпечатках структуры.



а



б

Рис. 4. Структура поверхностного слоя керамического жаропрочного покрытия со стороны свободной поверхности. Растровая электронная микроскопия / Fig. 4. Structure of the surface layer of the ceramic heat-resistant coating on the free surface side. Scanning electron microscopy

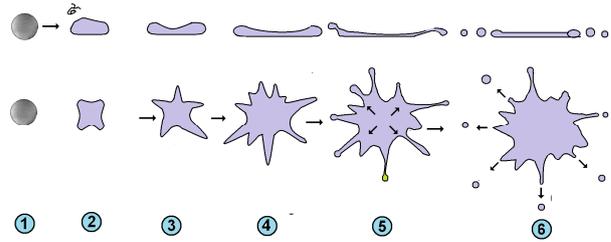
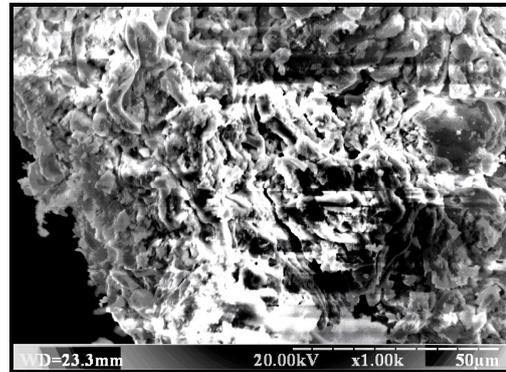
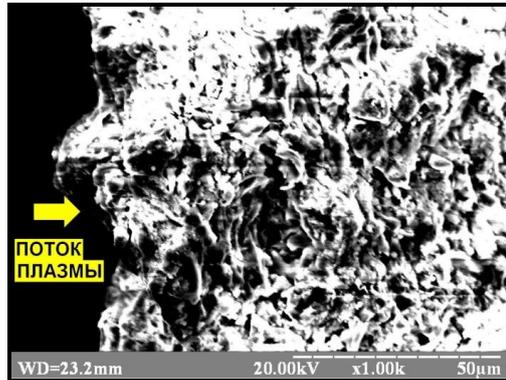


Рис 5. Образование мелких шариков при соударении крупной капли жидкой керамики с мишенью: «1»...«5» – последовательные стадии процесса / Fig. 5. The formation of small balls in the impact of a large drop of liquid ceramic with a target: "1"..."5" – consecutive stages of the process

Толщина лепестков пластинчатых частиц колеблется в пределах 200...950 нм, а размеры шелей между ними не превышают 100...300 нм. Между лепестками часто располагаются сферообразные частицы диаметром 250...1000 нм, почти полностью окружённые нанопустотами.



а



б (b)

Рис. 6. Структура поверхности излома керамического жаропрочного покрытия в непосредственной близости к свободной поверхности (слева), РЭМ: а – изображение во вторичных электронах; б – изображение с повышенным контрастом для оценки слоистости / Fig. 6. The surface structure of the fracture of the ceramic heat-resistant coating in the immediate vicinity of the free surface (left), SEM: а – the image in the secondary electrons; б – an image with increased contrast for estimating the stratification

Коэффициент ориентации частиц определяли с использованием метода секущих как отношение количества частиц, длинный размер которых лежит в плоскости, перпендикулярной направлению потока плазмы в пределах $\pm 45^\circ$, к общему количеству частиц, пересечённых произвольной секущей.

Количество частиц при подсчёте составляло не менее 820 единиц. В результате коэффициент ориентации частиц в напыленном слое составил: $K_{OP} = 78\%$, что указывает на существование значительного количества щелеобразных пустот и зазоров, лежащих почти перпендикулярно тепловому потоку, источником которого является газовая среда работающего двигателя.

Такие щели, пустоты, каналы придают материалу высокие теплоизоляционные свойства, необходимые для эффективной работы газотурбинных авиационных двигателей.

Научная новизна

Впервые предложена схема образования слоистых структур при растекании капель напыленного расплавленного материала шпинели.

Практическая значимость

Установленные закономерности явлений, ответственных за формирование структуры теплоизоляционного слоя, позволяют влиять на свойства керамического покрытия, а также способствуют совершенствованию технологического процесса плазменного напыления деталей камеры сгорания газотурбинного двигателя.

Выводы

На основе исследования структуры керамического жаростойкого покрытия, полученного газоплазменным напылением, установлено следующее:

1. Покрытие состоит из наноразмерных частиц двух типов: плоских лепестков толщиной 200...950 нм и дисперсных округлых шарообразных равноосных частиц диаметром 100...800 нм.

2. Коэффициент ориентации частиц в напыленном слое составляет $K_{OP} = 78\%$.

3. Образующиеся в процессе напыления многочисленные щелеобразные пустоты толщиной до 300 нм между лепестками и наносферами придают высокие теплоизоляционные свойства керамическому покрытию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кудинов В. В. Плазменные покрытия : монография / В. В. Кудинов. – Москва : Наука, 1977. – 135 с.
2. Демиденко Л. М. Высокоогнеупорные композиционные покрытия : монография / Л. М. Демиденко. – Москва : Металлургия, 1979. – 246 с.
3. Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник / [Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская]. – Киев : Наукова думка, 1987. – 176 с.
4. Хасуй А. Техника напыления : монография / А. Хасуй. – Москва : Машиностроение, 1975. – 211 с.
5. Большаков В. И. Особенности применения световой и электронной микроскопии при изучении структурообразования покрытий / В. И. Большаков, А. В. Зайцев, Г. Д. Сухомлин, Ф. Ф. Вашкевич // Металлознавство та термічна обробка металів. – № 1. – 2007. – С. 7–12.

REFERENCES

1. Kudynov V.V. *Plazmennye pokrytyia* [Plasma coatings]. Moscow : Nauka Publ., 1977, 135 p. (in Russian).
2. Demydenko L.M. *Vysokoohneupornye kompozitsionnye pokrytyia* [Highly refractory composite coatings]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1979, 246 p. (in Russian).
3. Borysov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sydorenko S.L. and Ardatovskaya E.N. *Hazotermicheskiye pokrytyia iz poroshkovykh materialov: spravochnik* [Gas thermal coatings from powder materials: a reference book]. Kyiv : Naukova dumka Publ., 1987, 176 p. (in Russian).
4. Khasui A. *Tekhnika napyleniya* [Sputtering technique]. Moscow : Mashynostroenye Publ., 1975, 211 p. (in Russian).
5. Bolshakov V.I., Zaitsev A.V., Sukhomlin H.D. and Vashkevich F.F. *Osobennosti prymeneniya svetovoi y elektronnoi mykroskopyu pry yzuchenyy strukturoobrazovaniya pokrytyi* [Features of the application of light and electron microscopy in the study of the structure of coatings]. *Metalloznnavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2007, no. 1, pp. 7–12. (in Russian).

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. Г. Г. Шломчаком (Украина); д-ром техн. наук, проф. В. С. Вахрушиевой (Украина).

Поступила в редакцию 23.03.2018

Принята к печати 27.03.2018