

УДК 621.81:621.337.

DOI: 10.30838/P.CMM.2415.200418.188.28

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ НАПЫЛЕНИИ

МАРКАШОВА Л. И.<sup>1</sup> *д.т.н., проф.*,  
ТЮРИН Ю. Н.<sup>1</sup> *д.т.н.*,  
БЕРДНИКОВА Е. Н.<sup>1</sup> *к.т.н.*,  
КОЛИСНИЧЕНКО О. В.<sup>1</sup> *к.т.н.*,  
ПОЛОВЕЦКИЙ Е. В.<sup>1</sup> *к.т.н.*,  
ТИТКОВ Е. П.<sup>1</sup> *асп.*

<sup>1</sup> Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, 03650, Киев, Украина, тел. +38 (044) 205-21-61, e-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua) ORCID ID: 0000-0066-0317-7332

<sup>1</sup> Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, 03650, Киев, Украина, тел. +38 (044) 205-20-34, e-mail: [yntyurin9@gmail.com](mailto:yntyurin9@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7901-7395

<sup>1</sup> Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, 03650, Киев, Украина, тел. +38 (044) 205-25-63, e-mail: [omberdnikova@gmail.com](mailto:omberdnikova@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-9754-9478

<sup>1</sup> Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, 03650, Киев, Украина, тел. +38 (044) 205-24-16, e-mail: [okolis@i.ua](mailto:okolis@i.ua), ORCID ID: 0000-0003-4507-9050

<sup>1</sup> Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, 03650, Киев, Украина, тел. +38 (044) 205-25-63, e-mail: [poloveckiy@gmail.com](mailto:poloveckiy@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-8113-0434

<sup>1</sup> Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, 03650, Киев, Украина, тел. +38 (044) 205-25-63, e-mail: [tito@ukr.net](mailto:tito@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-2735-6923

**Аннотация.** *Цель.* Актуальной задачей является повышение надежности и долговечности изделий, эксплуатационные характеристики которых определяются свойствами их рабочих поверхностей. Один из наиболее перспективных способов повышения эксплуатационных свойств и долговечности изделий – нанесение на их поверхности функциональных покрытий с применением различных технологий напыления. Обработка поверхностей различных металлов методом многокамерного детонационного напыления покрытий позволяет получать поверхностные слои с высокими механическими свойствами. Целью настоящей работы было исследование структурно-фазовых особенностей и оценка их влияния на трещиностойкость металлокерамических покрытий, полученных методом многокамерного детонационного напыления. **Методика.** Исследования выполнялись на покрытиях полученных с использованием циркониевой керамики  $ZrSiO_4$  и порошков оксида алюминия  $Al_2O_3$  (Amperit 740.0) с добавками чистых Al и Ti. Структурно-фазовые изменения в материале покрытий изучали методами оптической металлографии (микроскопы Versamet-2, Neophot-32), аналитической растровой электронной микроскопии (сканирующий микроскоп SEM-515 фирмы PHILIPS, Нидерланды) и просвечивающей микродифракционной электронной микроскопии (JEM-200CX с ускоряющим напряжением 200кВ). **Результаты.** На основе экспериментальных данных, полученных на различных структурных уровнях, выполнены аналитические оценки влияния конкретных структурных параметров (фазового состава, зеренной, субзеренной и дислокационной структур) на механические свойства и трещиностойкость исследуемых покрытий. **Научная новизна.** Определены структурные факторы, влияющие на характер и распределение локальных внутренних напряжений, которые являются потенциальными источниками зарождения трещин в структурных микрообластях. **Практическая значимость.** Полученные результаты показали перспективность применения многокамерного детонационного напыления, при котором обеспечивается необходимый комплекс механических свойств покрытий путем формирования наиболее благоприятной структуры.

**Ключевые слова:** металлокерамические покрытия, многокамерное детонационное напыление, оксид алюминия, циркониевая керамика, структура, фазовый состав, плотность дислокаций, упрочнение, локальные внутренние напряжения, трещиностойкость

## ВПЛИВ СТРУКТУРИ НА ТРИЩИНСТІЙКІСТЬ МЕТАЛОКЕРАМІЧНИХ ПОКРИТТІВ ПРИ ДЕТОНАЦІЙНОМУ НАПИЛЕННІ

МАРКАШОВА Л. І.<sup>1</sup> *д.т.н., проф.*,  
ТЮРИН Ю. М.<sup>1</sup> *д.т.н.*,  
БЕРДНІКОВА О. М.<sup>1</sup> *к.т.н.*,

КОЛІСНІЧЕНКО О. В.<sup>1</sup>, *к.т.н.*,  
ПОЛОВЕЦЬКИЙ Є. В.<sup>1</sup>, *к.т.н.*,  
ТІТКОВ Є. П.<sup>1</sup>, *асп.*

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, 03650, Київ, Україна, тел. +38 (044) 205-21-61, e-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua), ORCID ID: 0000-0066-0317-7332

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, 03650, Київ, Україна, тел. +38 (044) 205-20-34, e-mail: [yntyurin9@gmail.com](mailto:yntyurin9@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7901-7395

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, 03650, Київ, Україна, тел. +38 (044) 205-25-63, e-mail: [omberdnikova@gmail.com](mailto:omberdnikova@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-9754-9478

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, 03650, Київ, Україна, тел. +38 (044) 205-24-16, e-mail: [okolis@i.ua](mailto:okolis@i.ua), ORCID ID: 0000-0003-4507-9050

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, 03650, Київ, Україна, тел. +38 (044) 205-25-63, e-mail: [poloveckiy@gmail.com](mailto:poloveckiy@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-8113-0434

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, 03650, Київ, Україна, тел. +38 (044) 205-25-63, e-mail: [tito@ukr.net](mailto:tito@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-2735-6923

**Анотація. Мета.** Актуальним завданням являється підвищення надійності та довговічності виробів, експлуатаційні характеристики яких визначаються властивостями їх робочих поверхонь. Один з найбільш перспективних способів підвищення експлуатаційних властивостей та довговічності виробів – нанесення на їх поверхні функціональних покриттів з використанням різних технологій напilenня. Обробка поверхонь різних металів методом багатокамерного детонаційного напilenня покриттів дозволяє отримувати поверхневі шари з високими механічними властивостями. Метою даної роботи було дослідження структурно-фазових особливостей та оцінювання їх впливу на тріщиностійкість металокерамічних покриттів, що були отримані методом багатокамерного детонаційного напilenня. **Методика.** Дослідження виконувались на покриттях, що були отримані з використанням цирконієвої кераміки  $ZrSiO_4$  та порошків оксиду алюмінію  $Al_2O_3$  (Amperit 740.0) з добавками чистих Al та Ti. Структурно-фазові зміни у матеріалі покриттів вивчали методами оптичної металографії (мікроскопи Versamet-2, Neophot-32), аналітичної растрової електронної мікроскопії (скануючий мікроскоп SEM-515 фірми PHILIPS, Нідерланди) та просвічуючої електронної мікроскопії (JEM-200CX з прискорюючою напругою 200кВ). **Результати.** На основі експериментальних даних, отриманих на різних структурних рівнях, виконані аналітичні оцінки впливу конкретних структурних параметрів (фазового складу, зеренної, субзеренної структур та дислокаційної щільності) на механічні властивості та тріщиностійкість досліджуваних покриттів. **Наукова новизна.** Визначено структурні фактори, що впливають на характер та розподілення локальних внутрішніх напружень, які являються потенційними джерелами зародження тріщин в структурних мікрообластях. **Практичне значення.** Отримані результати показали перспективність застосування багатокамерного детонаційного напilenня, при якому забезпечується необхідний комплекс механічних властивостей покриттів шляхом формування найбільш сприятливої структури.

**Ключові слова:** металокерамічні покриття, багатокамерне детонаційне напilenня, оксид алюмінію, цирконієва кераміка, структура, фазовий склад, щільність дислокацій, зміцнення, локальні внутрішні напруження, тріщиностійкість.

## INFLUENCE OF STRUCTURE ON THE CRACK RESISTANCE OF DETONATION SPRAYED CERMET COATINGS

MARKASHOVA L. I.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
TYURIN YU. N.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.)*,  
BERDNIKOVA O. M.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Tech.)*,  
KOLISNICHENKO O.V.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Tech.)*,  
POLOVETSKYI I. V.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Tech.)*,  
TITKOV YE. P.<sup>1</sup>, *PhD student.*

<sup>1</sup> Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazimira Malevicha str, 11, 03650, Kyiv, Ukraine, +38 (044) 205-21-61, e-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua), ORCID ID: 0000-0066-0317-7332

<sup>1</sup> Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazimira Malevicha str, 11, 03650, Kyiv, Ukraine, +38 (044) 205-20-34, e-mail: [yntyurin9@gmail.com](mailto:yntyurin9@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7901-7395

<sup>1</sup> Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazimira Malevicha str, 11, 03650, Kyiv, Ukraine, +38 (044) 205-25-63, e-mail: [omberdnikova@gmail.com](mailto:omberdnikova@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-9754-9478

<sup>1</sup> Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazimira Malevicha str, 11, 03650, Kyiv, Ukraine, +38 (044) 205-24-16, e-mail: [okolis@i.ua](mailto:okolis@i.ua), ORCID ID: 0000-0003-4507-9050

<sup>1</sup> Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazimira Malevicha str, 11, 03650, Kyiv, Ukraine, +38 (044) 205-25-63, e-mail: [poloveckiy@gmail.com](mailto:poloveckiy@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-8113-0434

<sup>1</sup> Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazimira Malevicha str, 11, 03650, Kyiv, Ukraine, +38 (044) 205-25-63, e-mail: [tito@ukr.net](mailto:tito@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-2735-6923

**Annotation. Purpose.** The topical problem is to increase the reliability and durability of products whose operational characteristics are determined by the properties of their working surfaces. One of the most promising ways to improve the operational properties and durability of products is the cladding of functional coatings on their surface using a variety of spraying technologies. Treatment of different metal surface by the use of multi-chamber detonation sprayer allows obtaining composite surface layers with high mechanical properties. The purpose of this work was to study the structural and phase features and to evaluate their effect on the crack resistance of cermet coatings obtained by the multi-chamber detonation spray method. **Techniques.** The investigations were carried out on coatings obtained with the use of zirconium ceramics  $ZrSiO_4$  and alumina powders  $Al_2O_3$  (Amperit 740.0) with additives of pure Al and Ti. Structural-phase and concentration changes in chemical elements in the sprayed and substrate materials were studied by methods of optical microscopy (Versamet-2, Neophot-32), scanning electron microscopy (Philips SEM-515) and transmission electron microscopy (JEOL JEM-200CX). **Results.** Based on obtained experimental data on different structural levels, analytical estimates were made that show the effect of the concrete structural parameters (phase composition, grain and subgrain structure) on the mechanical properties and the crack resistance of the sprayed coatings. **Scientific novelty.** Structural factors influencing the character and distribution of local internal stresses, which are potential sources of crack initiation, are determined. **Practical significance.** The obtained results showed the prospects of using multi-chamber detonation sprayer, which ensures the necessary complex of mechanical properties of coatings by forming the most favorable structure.

**Key words:** cermet coatings, multi-chamber detonation spraying, aluminium oxide, zirconium ceramics, structure, phase composition, dislocation density, local inner stress, crack resistance

### Введение

Актуальной задачей является повышение надежности и долговечности изделий, эксплуатационные характеристики которых определяются свойствами их рабочих поверхностей. Один из наиболее перспективных способов улучшения эксплуатационных свойств и повышения долговечности изделий – нанесение на их поверхности функциональных покрытий с применением различных технологий напыления [1 - 2].

В Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины разработаны технология и оборудование для многокамерного детонационного напыления, с помощью которых формируются высококачественные покрытия с высокими производительностью и коэффициентом использования материала [3 - 4]. Востребованным направлением применения метода многокамерного детонационного напыления является напыление порошков различных систем: Ni-Cr-Si;  $Cr_3C_2$ -NiCr;  $Cr_3C_2$ -TaC-NiCr; WC-Co-Cr;  $Al_2O_3$ ;  $ZrSiO_4$  и др. для получения функциональных покрытий, работающих в экстремальных условиях (высокие температура и давление, интенсивный износ трением, знакопеременные нагрузки и т.д.).

### Цель

Целью настоящей работы было исследование структурно-фазовых особенностей и оценка их влияния на трещиностойкость металлокерамических покрытий полученных методом многокамерного детонационного напыления.

### Материал

Для напыления покрытий применяли порошки циркониевой керамики  $ZrSiO_4$  (№ 1; № 2) фракционного состава  $d_{фр} = 7...60\text{мкм}$  с подслоем

Co-Cr-Al-Y (№2) и механические смеси исходного порошка оксида алюминия  $Al_2O_3$  (фирмы Н. С. Starck: AMPERIT® 740,0,  $d_{фр} = 5...22\text{мкм}$ ) с добавками (5 %) чистых порошков Al или Ti.

### Методика и результаты

Режим детонационного напыления: частота детонации 20 Гц; расстояние до образца 55 мм; скорость перемещения 1500 мм/мин с одинаковым количеством проходов; соотношение длина (l)/диаметр (d) ствола пушки  $l/d = 500/16\text{мм}$  и горючего газа к окислителю  $\beta = 5,0; 5,4$  ( $ZrSiO_4$ ) и  $\beta = 5,0; 5,8$  ( $Al_2O_3$ ). Размер образцов  $15 \times 10 \times 3\text{мм}$ .

Структурно-фазовое состояние покрытий: толщина ( $\delta$ ), микротвердость (HV), объемная доля пор, фазовый состав, распределение дисперсных фаз, характер зеренной, субзеренной и дислокационной структур и др. исследовалось с применением комплексного подхода, включающего оптическую металлографию (Versamet-2, Япония; Leco-M400, США), рентгеноструктурный фазовый анализ (ДРОН-УМ1), аналитическую растровую (SEM-515 фирмы Phillips, Нидерланды), а также просвечивающую микродифракционную электронную микроскопию (JEM-200CX фирмы JEOL с ускоряющим напряжением 200кВ, Япония). Результаты экспериментальных исследований на всех структурных уровнях (от зеренного до дислокационного) стали основой для аналитических оценок вклада различных структурно-фазовых составляющих, формирующих в исследуемых покрытиях, в изменение упрочнения (по известным зависимостям Холла–Петча, Орована и др. [3-4]). Также были определены структурные факторы, влияющие на характер и распределение локальных внутренних напряжений в структурных микрообластях, которые могут являться источниками зарождения трещин.

Таблица 1

## Результаты исследований структуры покрытий/

№	Порошок	$\delta$ , мкм	HV <sub>0.3</sub> , МПа	Фазовый состав
1	ZrSiO <sub>4</sub>	300	<u>5270</u> 7360	53.44% ZrO <sub>2</sub> <sup>(T)</sup> 10.12% ZrO <sub>2</sub> <sup>(M)</sup> 33.0 % SiO <sub>2</sub> <sup>(A)</sup> 3.35 % ZrSiO <sub>4</sub> <sup>(T)</sup>
2	ZrSiO <sub>4</sub> (Co-Cr-Al-Y*)	160 120*	<u>7100</u> 8560 <u>5790*</u> 6180*	49.3% ZrO <sub>2</sub> <sup>(T)</sup> 11.7% ZrO <sub>2</sub> <sup>(M)</sup> 33.0 % SiO <sub>2</sub> <sup>(A)</sup> 5.8 % ZrSiO <sub>4</sub> <sup>(T)</sup>
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +5% Ti	230	<u>9660</u> 13770	67.0 % Al <sub>2.66</sub> O <sub>4</sub> <sup>(K)</sup> 18.0 % $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>(R)</sup> 15.0 % AlTi <sub>3</sub> <sup>(H)</sup>
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +5% Al	225	<u>7900</u> 10250	69.0 % Al <sub>2.66</sub> O <sub>4</sub> <sup>(K)</sup> 15.2 % $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>(R)</sup> 15.8 % Al <sup>(K)</sup>

\* – подслой; <sup>(K)</sup> – кубическая решетка; <sup>(R)</sup> – ромбоэдрическая решетка; <sup>(H)</sup> – гексагональная решетка; <sup>(T)</sup> – тетрагональная решетка; <sup>(M)</sup> – моноклинная решетка; <sup>(A)</sup> – аморфно-нанокристаллический

С помощью электронно-микроскопических исследований на просвет были определены особенности тонкой структуры покрытий: изменение и характер распределения плотности дислокаций ( $\rho$ ) во внутренних объемах и вдоль структурных границ; параметры формирующейся субструктуры (размер субзерна), размеры частиц фазовых выделений и расстояния между ними (рис. 1, стрелками обозначены дисперсные частицы фаз в матрице материала покрытий).

Установлено, что в случае использования порошка ZrSiO<sub>4</sub> размер частиц наноразмерных фазовых выделений (10...50 нм) в поверхностных слоях покрытий №2 (рис. 1, b) уменьшается в 2 раза по сравнению с №1 (рис. 1, a), а в материале подслоя такой же (20...100 нм). Расстояние между формирующимися дисперсными фазами (ZrO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>) практически одинаковое (10...50 нм), что характеризует равномерное распределение образующихся фаз в матрице покрытий. Плотность дислокаций на внешней поверхности покрытий:  $\rho = (5...9) \times 10^9 \text{ см}^{-2}$  (№1) и  $\rho = 6 \times 10^9...10^{10} \text{ см}^{-2}$  (№2). При этом в материале основы у границы  $\rho = (2...4) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (№1) и  $\rho = (4...6) \times 10^9 \text{ см}^{-2}$  (№2).

В случае использования порошка Amperit 740.0 +5% Ti (№ 3, рис. 1, c), размер частиц фазовых выделений (10...100 нм) в поверхностных слоях покрытий уменьшается в 2 раза по сравнению с покрытиями Amperit 740.0 +5% Al (№ 4, рис. 1, d). Также, в 2...2,3 раза уменьшается и расстояние между формирующимися дисперсными фазами (до 10...30 нм), что характеризует повышение объемной доли в матрице образующихся фаз. Наблюдается измельчение (в 1,4 раза) субструктуры (0,1...0,4 мкм)

при повышении плотности дислокаций на внешней поверхности покрытий: от  $\rho = (2...3) \times 10^9 \text{ см}^{-2}$  (№4) до  $\rho = (3...5) \times 10^9 \text{ см}^{-2}$  (№1). При этом в покрытиях у границы раздела плотность дислокаций составляет:  $\rho = (5...6) \times 10^9 \text{ см}^{-2}$  и  $\rho = (6...7) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , соответственно.

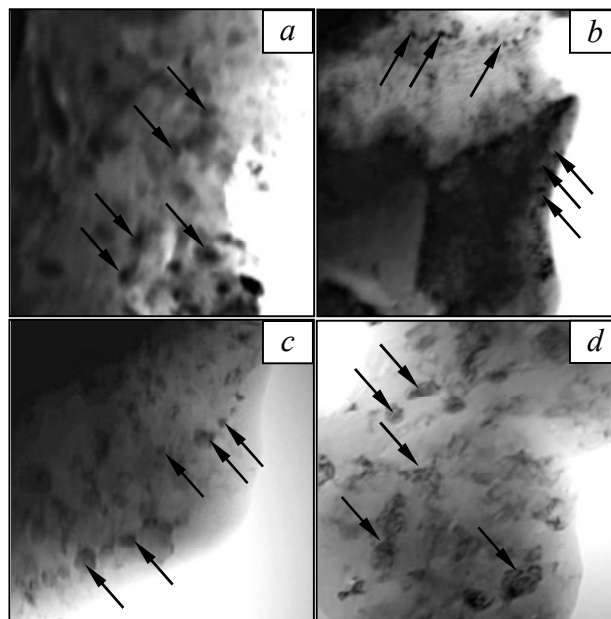


Рис. 1. Тонкая структура покрытий ZrSiO<sub>4</sub> (a - № 1; b - №2; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti/Al (c - №3; d - №4),  $\times 35000$  / Fine structure of the ZrSiO<sub>4</sub> coatings (a - № 1; b - №2; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti/Al (c - №3; d - №4),  $\times 35000$ .

Аналитические оценки эксплуатационных свойств покрытий показали следующее [5-7]. В случае использования порошков Amperit 740.0 +5% Ti (№3) и Amperit 740.0 +5% Al (№4) максимальный вклад (до 56%) в упрочнение вносит упрочнение матрицы покрытий за счет дисперсных нано-частиц фазовых выделений (дисперсионное упрочнение по Оровану): 1334 МПа (№3) и 1070 МПа (№4). В случае использования порошка ZrSiO<sub>4</sub>, максимальный вклад в суммарное значение упрочнения дисперсными частицами фазовых выделений составляет до 44%.

Расчетно-аналитические методики определения уровня локальных внутренних напряжений позволили оценить трещиностойкость покрытий. При этом учитывался характер дислокационной структуры при исследованиях тонкой структуры на просвет (с использованием методики ионного утонения тонких фольг). Из анализа различных подходов к определению механизмов зарождения трещин и разрушения материалов была выбрана оценка уровня локальных внутренних напряжений на базе дислокационной теории кристаллических твердых тел, связывающей процессы формирования внутренних напряжений с зарождением и перестройкой дислокационной структуры [7].

Установлено, что при исследуемых вариантах напыления покрытий наблюдается низкий уровень

локальных внутренних напряжений. Максимальные внутренние напряжения формируются в зоне границы раздела покрытие-подложка в покрытии №1. Однако их уровень не превышает 960 МПа (или 0,22 от уровня теоретической прочности материала на сдвиг). Это обеспечивает получение качественных покрытий с высокой трещиностойкостью.

В результате комплексных исследований на различных структурных уровнях (зеренном, субзеренном, дислокационном) металлокерамических покрытий ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti/Al}$ ;  $\text{ZrSiO}_4$ ), полученных многокамерным детонационным напылением, установлено, что наибольшее влияние на их прочность и трещиностойкость оказывают: равномерное распределение формирующихся упрочняющих дисперсных фаз, формирование субзеренной структуры, отсутствие протяженных и плотных дислокационных скоплений – концентраторов локальных внутренних напряжений.

### Результаты

На основе экспериментальных данных, полученных на различных структурных уровнях, выполнены аналитические оценки влияния конкретных структурных параметров (фазового состава, зеренной, субзеренной и дислокационной структур) на механические свойства и трещиностойкость исследуемых покрытий.

### Научная новизна и практическая ценность

Определены структурные факторы, влияющие на характер и распределение локальных внутренних напряжений, которые являются потенциальными источниками зарождения трещин в структурных микрообластях. Полученные результаты показали перспективность применения многокамерного детонационного напыления, при котором обеспечивается необходимый комплекс

механических свойств покрытий путем формирования наиболее благоприятной структуры.

### Выводы.

1. При напылении  $\text{ZrSiO}_4$  на различные основы (титановую и алюминиевую) фазовый состав покрытий одинаковый ( $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ , остаточный  $\text{ZrSiO}_4$ ), соотношение фазовых составляющих практически не изменяется; уменьшается в 1,2 раза размер зеренной структуры при увеличении микротвердости в среднем на 24% (покрытие №2 – основа Al); размер частиц фазовых выделений ( $\text{ZrO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ ) составляет 20...100 нм при равномерном их распределении в матрице; формирующиеся градиенты дислокационной плотности незначительные (от  $\rho = 5...6 \times 10^9 \text{см}^{-2}$  до  $\rho = 4 \times 10^{10} \text{см}^{-2}$ ).
2. В покрытиях исходного порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с добавками (5 %) Ti или Al, напыленных на различные основы (титановую и алюминиевую) содержание основных фазовых составляющих:  $\gamma$ -67...69 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 18...15 %  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (остальное  $\text{AlTi}_3$  и Al, соответственно). Добавка 5 % Ti способствует образованию интерметаллидной фазы  $\text{AlTi}_3$  (18%);
3. Покрытия  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5 \text{ \% Ti}$  (основа Ti) характеризуются наибольшими (в 1,2...1,3 раза) значениями интегральной микротвердости ( $\text{HV}_{0,3} = 9660...13770 \text{ МПа}$ ), измельчением (на 10...15 %) зеренной, субзеренной структуры и размера (в 2 раза) частиц фазовых выделений, градиенты по дислокационной плотности практически отсутствуют;
4. Аналитическими оценками показано, что наиболее значимый вклад в эксплуатационные свойства исследуемых покрытий вносят: равномерное распределение формирующихся упрочняющих фаз дисперсных размеров, измельчение зеренной и субзеренной структур при отсутствии протяженных и плотных дислокационных скоплений – концентраторов локальных внутренних напряжений.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A. Ya. Kulik, Yu. S. Borisov, A. S. Mnushin, M. D. Nikitin. Gas Thermal Spraying of Composite Powders. Leningrad, Mashinostroenie, 1985, 199pp. (Rus.)
2. Yu. S. Borisov, A. L. Borisova. Plasma Powder Coatings. Kiev, Tekhnika, 1986, 223pp. (Rus.)
3. Yu. Tyurin, A. Pogrebnyak, O. Kolisnichenko, I. Duda. Comparative Analysis of Cumulative-Detonation and HVOF Equipment for Thermal Spray Coatings. The hardening technology, 2009, 5, 27-33.
4. Yu. Tyurin, O. Kolisnichenko, M. Poleshuk. Cumulatively-detonation Device for Thermal Spray Coatings. Microstructural Characteristics of High Velocity Oxygen, 2009, 44, 7.
5. L. Markashova, Yu. Tyurin, O. Kolisnichenko, et al. Structural-phase State of Ni-Cr Protective Coatings Deposited by Method of Cumulative-Detonation Spraying. Proceedings of the Sixth International Conference "Laser Technologies in Welding and Materials Processing", 2013, 60.
6. L. Markashova, Yu. Tyurin, O. Kolisnichenko, et al. Structure-phase Condition of Wear-resistant Composite Coatings of  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  System, Deposited using Multi-Chamber Detonation Installation. Proceedings of Seventh International Conference "Mathematical Modelling and Information Technologies in Welding and Related Processes", 2014, 37.
7. L. Markashova, Yu. Tyurin, O. Kolisnichenko, et al. New composite Coatings, their Structure and Properties. 4th International Conference "Nanotechnologies", October 24 – 27, 2016, Tbilisi, Georgia Nano – 2016, p. 143.

## REFERENCES

1. A. Ya. Kulik, Yu. S. Borisov, A. S. Mnushin, M. D. Nikitin. Gas Thermal Spraying of Composite Powders. Leningrad, Mashinostroenie, 1985, 199pp. (Rus.)
2. Yu. S. Borisov, A. L. Borisova. Plasma Powder Coatings. Kiev, Tekhnika, 1986, 223pp. (Rus.)
3. Yu. Tyurin, A. Pogrebnyak, O. Kolisnichenko, I. Duda. Comparative Analysis of Cumulative-Detonation and HVOF Equipment for Thermal Spray Coatings. The hardening technology, 2009, 5, 27-33.
4. Yu. Tyurin, O. Kolisnichenko, M. Poleshuk. Cumulatively-detonation Device for Thermal Spray Coatings. Microstructural Characteristics of High Velocity Oxygen, 2009, 44, 7.
5. L. Markashova, Yu. Tyurin, O. Kolisnichenko, et al. Structural-phase State of Ni-Cr Protective Coatings Deposited by Method of Cumulative-Detonation Spraying. Proceedings of the Sixth International Conference "Laser Technologies in Welding and Materials Processing", 2013, 60.
6. L. Markashova, Yu. Tyurin, O. Kolisnichenko, et al. Structure-phase Condition of Wear-resistant Composite Coatings of  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr System, Deposited using Multi-Chamber Detonation Installation. Proceedings of Seventh International Conference "Mathematical Modelling and Information Technologies in Welding and Related Processes", 2014, 37.
7. L. Markashova, Yu. Tyurin, O. Kolisnichenko, et al. New composite Coatings, their Structure and Properties. 4th International Conference "Nanotechnologies", October 24 – 27, 2016, Tbilisi, Georgia Nano – 2016, p. 143.

*Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. Д.В. Лаухіним (Україна), д-ром. техн. наук, проф. В.І. Большаковим (Україна)*