

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Кинжебаева Г.М., Чернов А.А., Коробов Ю.С., Худорожкова Ю.В., Пантелеенко Ф.И. Разработка порошков NiCrAlY+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для напыления жаростойких покрытий // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 37–47. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.3.04

Please cite this article in English as:

Kinzhebaeva G.M., Chernov A.A., Korobov Yu.S., Khudorozhkova Yu.V., Panteleenko F.I. Development of NiCrAlY+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders for spraying heat-resistant coatings. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2023, vol. 25, no. 3, pp. 37-47. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.3.04

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 25, № 3, 2023**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2023.3.04

УДК 621.793

**Г.М. Кинжебаева<sup>1,2</sup>, А.А.Чернов<sup>1,2</sup>, Ю.С. Коробов<sup>1,2</sup>,  
Ю.В. Худорожкова<sup>3</sup>, Ф.И. Пантелеенко<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>4</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

**РАЗРАБОТКА ПОРОШКОВ NiCrAlY+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ  
ЖАРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ**

Показана актуальность применения порошков вида NiCrAlY+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для жаростойких применений в металлургии, авиационной и также нефтегазовой отраслях промышленности. Эти покрытия должны решать множество задач, поставленных современными условиями: повышение надежности, экономичность, использование при значительно более высоких температурах, по сравнению с металлом без данных покрытий. Так как подавляющее большинство физико-механических свойств определяются состоянием поверхностного слоя и для того, чтобы данные показатели удовлетворяли нашим запросам, приходится использовать дефицитные и дорогие материалы (отметим, что изготавливать детали полностью из них совершенно нецелесообразно и иногда невозможно).

Существует много коррозионно-устойчивых сплавов на основе никеля, содержащих хром и другие элементы, выбранные для того, чтобы обеспечить коррозионную устойчивость, особенно в агрессивных средах. Некоторые сплавы, которые обладают отличной коррозионной устойчивостью, являются трудноформируемыми и трудносвариваемыми. Поэтому в области металлургии непрерывно совершенствуются сплавы, которые сочетают коррозионную устойчивость и способность поддаваться обработке, обеспечивая сплавам легкость формовки в емкости, трубы и другие формы, которые имеют длительный срок службы. Приведены результаты изучения порошков вида NiCrAlY+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, изготовленных в России по разработанной технологии и выполнено сравнение с аналогичными материалами, изготавливаемыми в России и за рубежом. Также представлены особенности покрытий, полученных плазменным напылением из разработанных порошков. Морфология полученного порошка, фракция 40...125 м, сферическая форма обеспечивают его высокую технологичность при напылении. Возможность варьирования массовой долей оксида в интервале 5...10 % позволяет получать градиентные покрытия.

**Ключевые слова:** термобарьерные покрытия, порошки NiCrAlY +Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, плазменное напыление, микрорентгеноспектральный анализ, износостойкие покрытия, коррозионностойкие покрытия, высокотвердые оксиды Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, никелевая матрица, интерметаллид, градиентные покрытия, жаростойкость, пластичность.

G.M. Kinzhebaeva<sup>1,2</sup>, A.A. Chernov<sup>1</sup>, Yu.S. Korobov<sup>1,2</sup>,  
Yu.V. Khudorozhkova<sup>3</sup>, F.I. Panteleenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>M.N. Mikheev Institute of Metal Physics UB RAS, Yecaterinburg, Russian Federation

<sup>2</sup>Ural Federal University, Yecaterinburg, Russian Federation

<sup>3</sup>E.S. Gorkunov Institute of Machine Science UB RAS, Yecaterinburg, Russian Federation

<sup>4</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

## DEVELOPMENT OF NICRALY+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> POWDERS FOR SPRAYING HEAT-RESISTANT COATINGS

The relevance of using powders of the NiCrAlY+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> type for heat-resistant applications in metallurgy, aviation and oil and gas industries is shown. These coatings must solve many tasks set by modern conditions: increasing reliability, efficiency, and use at significantly higher temperatures compared to a metal without these coatings. Since the vast majority of physical and mechanical properties are determined by the state of the surface layer, and in order for these indicators to satisfy our needs, we have to use scarce and expensive materials, we note that it is completely impractical to manufacture parts completely from them, and sometimes impossible.

There are many corrosion-resistant nickel-based alloys containing chromium and other elements selected to provide corrosion resistance, especially in aggressive environments. Some joints that have excellent corrosion resistance are difficult to form and difficult to weld. Therefore, alloys that combine corrosion resistance and the ability to be processed are continuously being improved in the field of metallurgy, providing alloys with ease of forming into containers, pipes and other forms that have a long service life. The results of the study of powders of the type NiCrAlY+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, manufactured in Russia according to the developed technology, are presented and compared with similar materials manufactured in Russia and abroad. The features of coatings obtained by plasma spraying from the developed powders are also presented. The morphology of the resulting powder, a fraction of 40...125 m, spherical shape, ensures its high manufacturability during spraying. The possibility of varying the mass fraction of the oxide, in the range of 5... 10 %, allows to obtain gradient coatings.

**Keywords:** thermal barrier coatings, NiCrAlY + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders, plasma spraying, X-ray microanalysis, wear-resistant coatings, corrosion-resistant coatings, high-hard oxides of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nickel matrix, in-termetallide, gradient coatings, heat resistance, plasticity.

### Введение

Для защиты деталей, работающих при температурах выше 700 °С, используют термобарьерные покрытия. Характерные детали этого класса присутствуют в изделиях авиационно-космической техники, энергетических и газоперекачивающих установок (жаровые трубы, лопатки газовых турбин) [1–3], металлургического оборудования (печные ролики) [4].

Компоненты газовой турбины должны выдерживать высокие термические и механические нагрузки из-за сгорания топлива при высоких температурах. Детали двигателя из суперсплавов обеспечивают широкий диапазон рабочих температур и возможности нагрузки [5]. Однако в таких областях, как камера сгорания или лопатки первой ступени и лопастей, температура газа намного выше пределов эксплуатации жаропрочных сплавов на основе никеля (т.е. >1000°С) [6]. Для расширения диапазона температур использования суперсплавов на детали наносят теплозащитные покрытия из оксида циркония, стабилизированные оксидом иттрия (YSZ), который является базовым материалом для этого применения [7; 8]. YSZ отличается низкой теплопроводностью, высоким коэффициентом теплового расширения, хорошей технологичностью. В качестве подслоя, обеспечивающего адгезионную прочность и защиту материала подложки от окисления, в настоящее время широко распространены материалы вида MCrAlY, где M означает Co или Ni. Этот материал также отлича-

ется хорошей когезией с YSZ-покрытием, поскольку у последнего хорошая совместимость с оксидом алюминия, растущим на MCrAlY-слое [9; 10].

На последних ступенях газовой турбины, где лопатки взаимодействуют с газами при более низких температурах, около 750 °С, тепловые нагрузки ниже, поэтому керамический верхний слой покрытия можно исключить. Для этих лопаток обычно используют другие износ- и коррозионно-стойкие покрытия [11]. Износостойкость особенно важна на кромке лопатки, которая контактирует с истираемым слоем на внутреннем кожухе турбины для герметизации. Износ кромки может происходить из-за твердых керамических фаз, содержащихся в истираемом слое, и/или из-за инородных частиц, попадающих между кромкой и кожухом. Это могут быть, например, частицы газообразной среды, поступающей в газовую турбину или отслоившиеся частицы термобарьерного покрытия [12].

Другие детали, требующие защиты от износа при высокой температуре в газовой турбине, включают безмасляные подшипники скольжения, работающие при температуре порядка 500 °С [13]. Также в газовой турбине подвержены высокотемпературному износу и другие детали, например, регулируемые входные направляющие лопатки и штоки клапанов управления технологическим процессом [14].

Перспективными материалами покрытий для защиты деталей газовых турбин, подверженных износу, являются композиции MCrAlY с равномерно распределенными в ней высокотвердыми окси-

дами, например,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Постоянное воспроизведение данного слоя при работе в условиях трения создает нужный эффект самосмазываемости, что обеспечивает их высокую износостойкость [15]. Также эти материалы сочетают повышенную стойкость против окисления [16–20] и эрозионную стойкость [21]. У покрытий с NiCrAlY-матрицей, упрочненных оксидами и нитридами, потери на износ при скольжении в испытаниях «шар – диск» при 700 °С приблизились к значениям, полученным высокоскоростным кислородно-топливным распылением (HVOF) порошка  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  [22; 23]. При этом матрица NiCrAlY также имеет преимущества перед  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  с точки зрения лучшей жаропрочности и стойкости против окисления [24; 25].

Еще одной областью применения материалов вида MCrAlY+оксид является металлургия. В частности, их перспективно использовать против образования наростов, возникающих при контакте ленты металла, проходящей отжиг при 750...900 °С, с транспортирующими роликами [26].

MCrAlY-матрица и оксиды различаются по температуре плавления, что мешает получать исходный материал распылением расплава. Для их получения применяют термохимические методы [27], механическое смешение [15], гибридное плазменное напыление с одновременной подачей в зону факела порошка MCrAlY и водные суспензии оксида субмикрометрического размера [22; 23]. Порошки вида MCrAlY сферической формы, предназначенные для газотермического напыления, отечественные производители начинают осваивать [28], однако композиции вида MCrAlY +  $\text{Y}_2\text{O}_3$  сферической формы в России в настоящее время не производятся.

Основным методом нанесения покрытий из материалов, содержащих оксиды, является плазменное напыление. Применение HVOF-процесса ограничено, поскольку требуются ультрадисперсные порошки, что вызывает сложности с их подачей. Химическое и физическое осаждение из газовой фазы (CVD, PVD) позволяет получать покрытия толщиной до 10 мкм, которые могут растрескиваться от проминания в условиях воздействия абразивных частиц.

Ниже представлены результаты предварительных исследований модельного порошка NiCrAlY+ $\text{Y}_2\text{O}_3$ , изготовленного по разработанной технологии, включающей диспергирование рас-

плава с последующей термохимической обработкой, а также газотермического покрытия из него.

### Материалы и методы

Было выполнено нанесение покрытий методом плазменного напыления в ООО НПП ТСП, Екатеринбург. Распыляющий газ  $\text{Ar}+5\% \text{H}_2$ , ток 400 А, напряжение 80 В, дистанция напыления 140 мм, расход порошка 2 кг/ч. Характеристики использованных порошков приведены в табл. 1, химический состав приведен по данным микрорентгеноспектрального анализа.

Для оптической микроскопии использовали микроскоп NEOPHOT-21 (Karl Zeiss, Jena, Германия). Определение параметров шероховатости и топографии поверхности образцов проводили на оптическом профилометре Optical profiling system Veeco WYKO NT1100 (Veeco, Horsham, США), на случайно выбранных участках размером 0,119×0,09 мм (3D) и размером 0,5×0,5 мм (2D). Определяли среднеарифметическое отклонение профиля  $R_a$ , и максимальную высоту профиля  $R_t$  (максимальная высота от пика выступа до пика впадины). Приведены средние значения по трем измерениям 3D-топографического изображения поверхности исследованных участков образцов 1 и 2. Проведен микрорентгеноспектральный анализ исходных порошков и исследуемых образцов методом растровой электронной микроскопии на микроскопе TESCAN VEGA II XMU с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450 (TESCAN, Brno – Kohoutovice, Czech Republic).

### Результаты и их обсуждение

По технологиям газового распыления расплава и термохимического осаждения получены порошки NiCrAlY с добавлением  $\text{Y}_2\text{O}_3$  в интервале (0...10) мас. % (см. табл. 1). Морфология и химический состав порошка NiCrAlY оценены микрорентгеноспектральным анализом с поверхности (рис. 1, табл. 2). Частицы имеют стабильно сферическую форму, их размер составляет 20...43 мкм. Это обуславливает хорошую текучесть порошка, 20 с, определенную с помощью калиброванной воронки по ГОСТ 20899-98. Морфология типична для порошков, полученных газовым распылением, например Amdry 962 [30].

Таблица 1

Характеристики использованных порошков

№ порошка	Химический состав	Метод изготовления
1	NiCrAlY	Газовое распыление расплава (ГР)
2	NiCrAlY+10 мас. % $\text{Y}_2\text{O}_3$	ГР NiCrAlY +термохимическое осаждение $\text{Y}_2\text{O}_3$
3	NiCrAlY+5 мас. % $\text{Y}_2\text{O}_3$	ГР NiCrAlY +термохимическое осаждение $\text{Y}_2\text{O}_3$

Таблица 2

Химический состав порошка NiCrAlY, мас. %

Спектр	C	O	Al	P	S	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Y	Mo
1	1,13		7,75	0,05	0	23,47	0,22	0,08	0,22	66,76	0,16	0,17
2	0,36	0,66	9,86	0	0,18	19,61	0,22	0,22	0	68,7	0,11	0
3	0,18	0,14	3,22	0	0,11	21,79	0,16	0,1	0,02	74,22	0,06	0
4	0,11	0,18	11,69	0	0,05	17,59	0,15	0	0,02	69,6	0,13	0
5	0	0	9,05	0,05	0,07	68,64	0	0,19	0,02	21,67	0,29	0
6	0,46	0,18	5,82	0,02	0,08	20,97	0,09	0,2	0,06	71,95	0,07	0
7	0,34		13,98	0,03	0	60,68	0	0,38	0	20,21	0,25	0
8	0,54	0,37	8,78	0,07	0,02	21,13	0,18	0,11	0,02	68,42	0,46	0
9	0,28	0,4	7,93	0	0	20,97	0,1	0,26	0,04	69,75	0,15	0,13
10	0,05	0,15	3,98	0	0	22,37	0,22	0,16	0	72,86	0	0,14

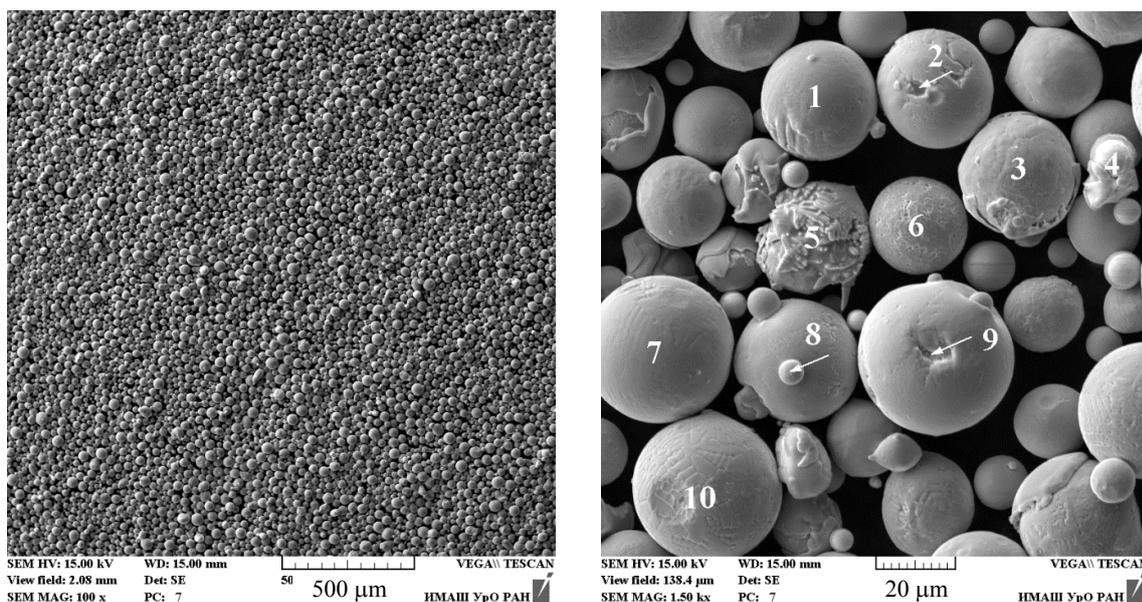


Рис. 1. Участки микроанализа порошка NiCrAlY, химический состав отмеченных участков приведен в табл. 2

Композиционные порошки с различным массовым содержанием  $Y_2O_3$  также имеют сферическую форму, их размер составляет 40...125  $\mu m$  (см. рис. 2). Такая морфология порошков обуславливает их равномерную подачу и прогрев частиц при напылении. Варьирование содержания оксида в порошке в интервале 5...10 мас.% позволяет создавать градиентные покрытия, используемые на лопатках турбин, в которых по высоте меняются жаростойкость и пластичность [4].

При напылении покрытий отмечена равномерная подача, коэффициент использования материала составил  $\sim 65\%$ . Рельеф поверхности и шероховатость меняются в зависимости от материала покрытий. На трехмерном топографическом изображении видно, что поверхности покрытий 1 и 2 имеют небольшие острые холмы, которые равномерно распределены по всей поверхности (рис. 3, табл. 3) Шероховатость поверхности покрытий

( $Ra$  4,4...6,29) типична для газотермических покрытий высокого качества, получаемых способами плазменного и сверхзвукового напыления [31]. Пики и впадины на поверхности могут быть объяснены выплеском полностью расплавленных частиц вследствие их перегрева. На покрытии NiCrAlY+ $Y_2O_3$  таких участков меньше, также у них ниже уровень значений шероховатости. Вероятно, это связано с более высокой интегральной температурой плавления частиц из-за наличия в ней оксидов. Такое соотношение шероховатости этих покрытий благоприятно для работоспособности изделий. NiCrAlY используют в качестве подслоя, поэтому увеличенная шероховатость способствует увеличению когезии основного слоя покрытия. NiCrAlY+ $Y_2O_3$  предназначено для получения поверхностного слоя, и снижение его шероховатости способствует снижению диффузионного проникновения окружающих газов в покрытие.

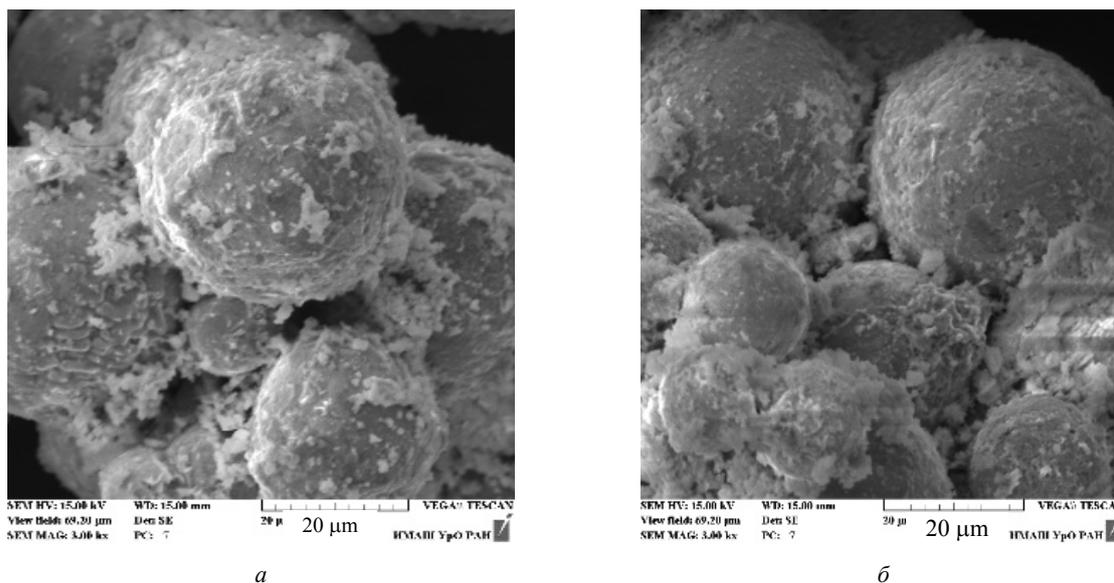


Рис. 2. Участки микрорентгеноспектрального анализа образцов: *a* – NiCrAlY + 5 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; *б* – NiCrAlY + 10 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

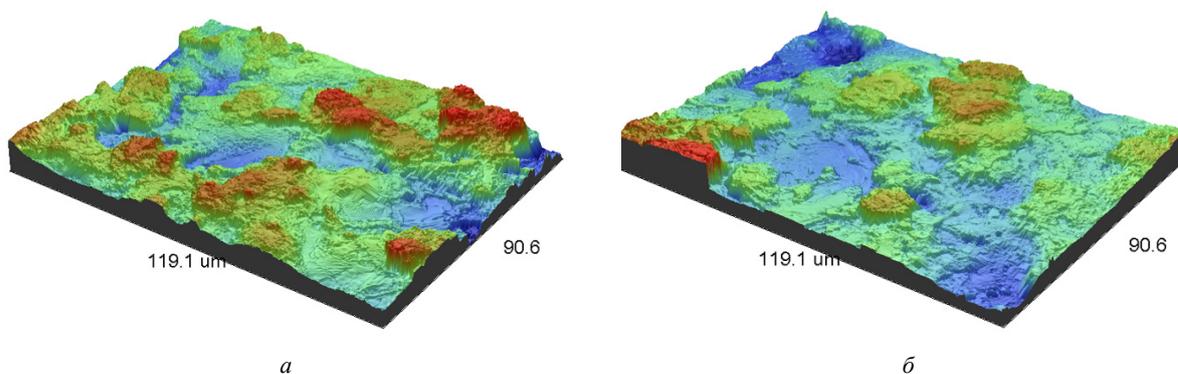


Рис. 3. Топография поверхности: *a* – NiCrAlY; *б* – NiCrAlY + 10 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Таблица 3

Шероховатость поверхности покрытий (обозначения согласно табл. 1)

Показатели шероховатости	NiCrAlY				NiCrAlY + 10 % Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
	Номер измерения			Среднее	Номер измерения			Среднее
	1	2	3		1	2	3	
<i>Ra</i> , мкм	4,4	5,09	6,39	5,29	5,66	5,45	4,43	5,18
<i>Rt</i> , мкм	36,82	34,48	57,89	43,06	40,56	52,11	35,47	42,71

Поверхность напыленного покрытия NiCrAlY более дисперсная, что соответствует меньшему исходному размеру частиц в сравнении с порошком NiCrAlY + 10 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 4). Здесь также более заметны выплески металла частиц, что подтверждает анализ данных профилометрии. Химический состав покрытий показывает сильное выгорание Ni в случае NiCrAlY (табл. 4).

Сильный выплеск металла частиц в сочетании с заметным выгоранием никеля позволяет дать технологическую рекомендацию о необходимости напыления NiCrAlY на пониженном токе в сравнении с NiCrAlY + 10 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Изучение поперечного сечения покрытий показало следующее: по результатам оптической микроскопии видно, что толщина покрытия NiCrAlY составляет (170...220) мкм, а покрытия NiCrAlY + 10 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (150...190) мкм. В покрытия NiCrAlY меньше оксидов (рис. 5).

Сравнивая химический состав NiCrAlY-покрытия и исходного порошка, представленного в табл. 5, можно увидеть, что количество алюминия и никеля уменьшается, возможно, из-за испарения этих элементов во время процесса плазменного напыления. Кроме того, алюминий и иттрий защищают частицы от окисления в процессе напыления.

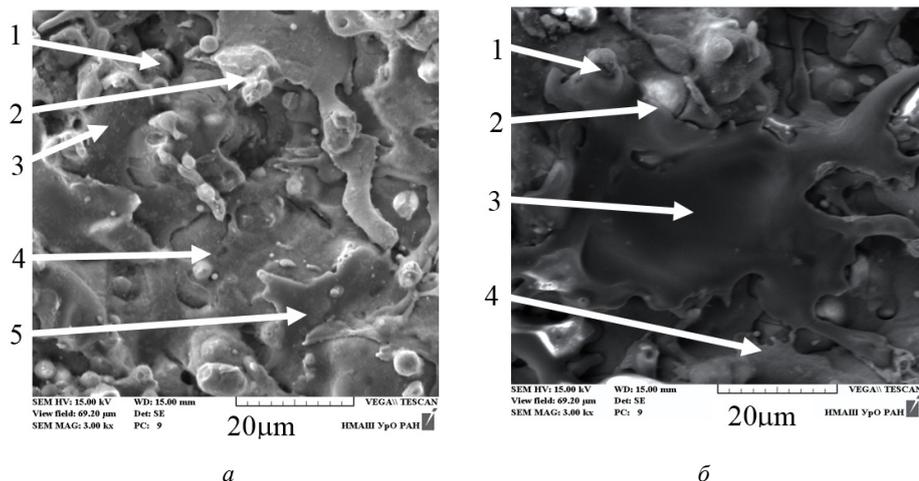


Рис. 4. Микроструктура поверхности: а – NiCrAlY; б – NiCrAlY +10 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Таблица 4

Химический состав участков поверхности покрытий

NiCrAlY						NiCrAlY +10 % Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					
Спектр	O	Al	Cr	Ni	Y	Спектр	O	Al	Cr	Ni	Y
1	15,91	25,44	14,78	42,83	0,21	1	3,64	5,69	46,04	43,51	1,12
2	38,68	43,5	5,44	10,84	0,03	2	12,38	7,01	9,44	67,33	3,84
3	23,24	30,26	10,77	34,71	0,1	3	31,25	17,88	5,62	3,62	41,63
4	40,11	42,59	5,81	10,76	0	4	4,96	12,41	22,57	57,86	2,21
5	15,56	18,6	14,01	50,74	0,12						

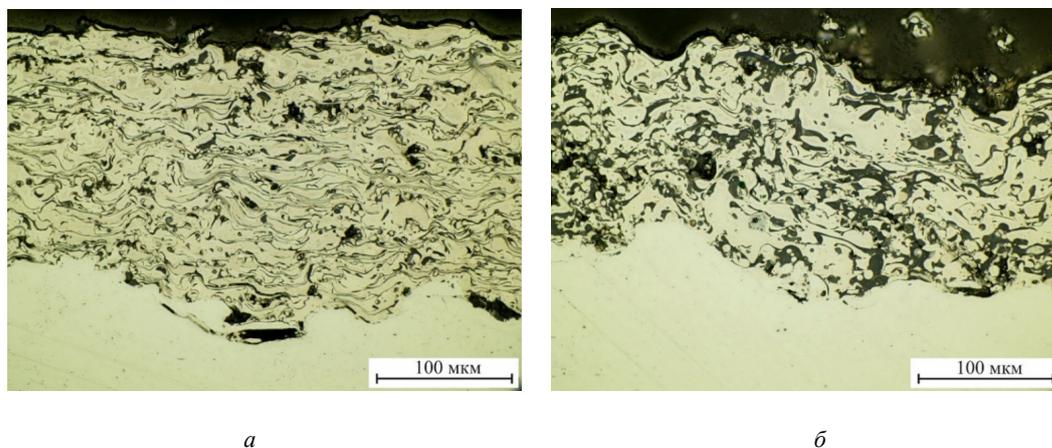


Рис. 5. Структура поперечного сечения покрытий: а – NiCrAlY; б – NiCrAlY +10 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Таблица 5

Химический состав участков покрытий в поперечном сечении

NiCrAlY						NiCrAlY +10 % Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					
спектр	O	Al	Cr	Ni	Y	спектр	O	Al	Cr	Ni	Y
1	6,44	15,45	19,79	58,32	–	1	6,11	9,5	40,4	39,98	4,0
2	1,12	13,02	21,57	64,3	–	2	6,72	12,75	27,03	51,02	2,48
3	19,16	30,17	12,02	38,66	–	3	10,49	15,08	12,05	45,87	16,51
4	3,91	15,76	19,48	60,85	–	4	5,46	10,69	17,65	62,94	3,25
5	16,12	25,42	12,17	44,29	–	5	7,46	3,99	10,56	49,06	28,92
6	0,9	14,16	15,81	69,14	–	6	1,25	8,76	18,98	70,92	0,08
7	0,43	6,53	17,36	75,68	–	7	13,45	18,09	14,78	46,91	6,77

Согласно рис. 6, *a*, и результатам химического анализа (см. табл. 5), в основной части структуры покрытия участок 7 светлого цвета, содержание кислорода менее 0, 5 %. Здесь никелевая матрица обогащена растворенным алюминием и хромом.

Прослойки 6 с повышенным содержанием алюминия и отсутствием кислорода представляют собой выделения интерметаллидов вида  $Ni_3Al$ . В участках 1, 3, 5 с повышенным содержанием кислорода присутствует оксид алюминия  $Al_2O_3$ .

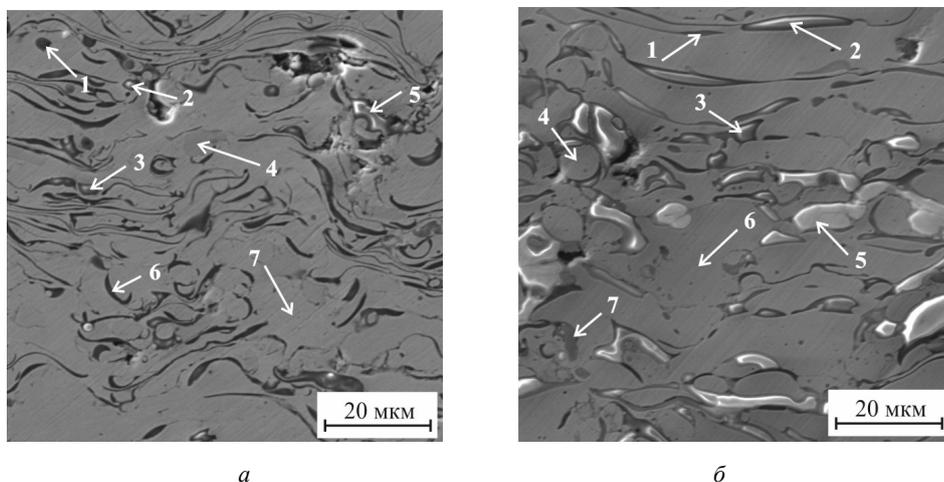


Рис. 6. Структура покрытий с участками микроанализа: *a* – NiCrAlY; *б* – NiCrAlY + 10 %  $Y_2O_3$

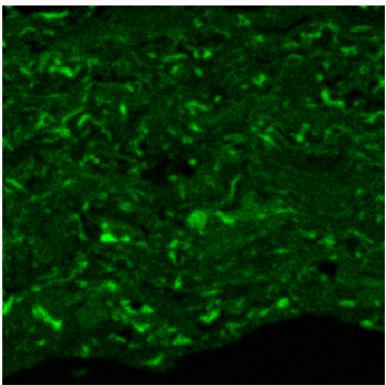
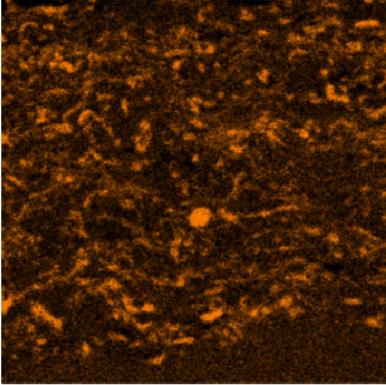
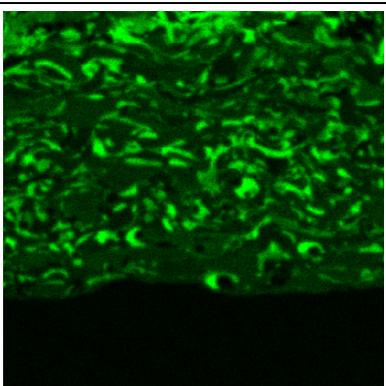
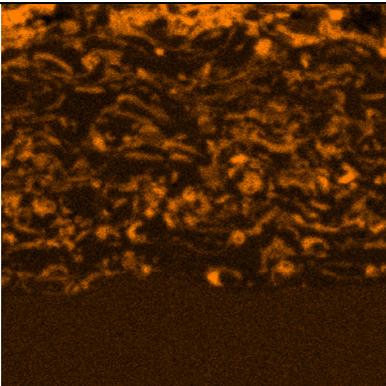
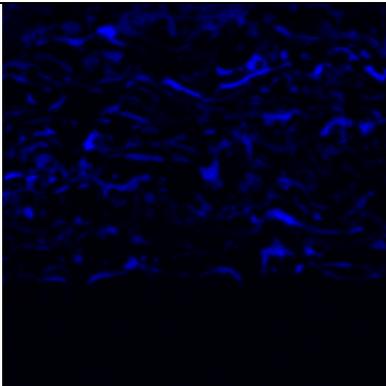
NiCrAlY		
		
NiCrAlY + 10 % $Y_2O_3$		
		
Алюминий	Кислород	Иттрий

Рис. 7. Характер распределения химических элементов в покрытиях

Из-за очень быстрого охлаждения расплавленных частиц порошка NiCrAlY представленная микроструктура покрытия, образующегося при напылении, является термодинамически неравновесной. Во время высокотемпературной эксплуатации будет происходить образование защитных пленок на основе  $Al_2O_3$  и  $Cr_2O_3$  [9; 25; 26].

В микроструктуре покрытия NiCrAlY +10 %  $Y_2O_3$  в большом количестве присутствуют шпинели на основе Al, Cr, Y в виде прослоек (рис. 6, б). Такое заключение соответствует результатам исследований плазменных покрытий NiCrAlY, упрочненных дисперсными оксидами [15; 20]. Размер прослоек значительно больше, чем в покрытии NiCrAlY, на границах «прослойки – матрица» трещин не отмечено.

Картирование показывает большее количество оксидов в поверхностных слоях покрытия NiCrAlY +10 %  $Y_2O_3$ , однако в обоих видах покрытий оксиды присутствуют по всему сечению (рис. 7).

В целом представленные порошки NiCrAlY и NiCrAlY +10 %  $Y_2O_3$  и плазменные покрытия из них аналогичны материалам зарубежных производителей и могут быть использованы для высокотемпературных применений.

#### Заключение

1. Разработана технология изготовления порошков NiCrAlY + $Y_2O_3$ , применение которых актуально в металлургии, авиационной и нефтегазовой отраслях промышленности в качестве жаростойких покрытий.

2. Морфология полученного порошка, фракция 40...125  $\mu m$ , сферическая форма, обеспечивает его высокую технологичность при напылении. Возможность варьирования массовой доли оксида в интервале 5...10 % позволяет получать градиентные покрытия.

3. Параметры напыленного покрытия типичны для плазменного напыления.

#### Библиографический список

1. A Perspective on Thermally Sprayed Thermal Barrier Coatings / R. Vaßen, E. Bakan, D. Emil Mack, O. Guillon // *J Therm Spray Tech.* – 2022. – Vol. 31. – P. 685–698.
2. Барвинок В.А. Высокоэффективные технологические процессы в производстве лопаток турбин и камер сгорания ГТД. – М.: Наука и технологии, 2004. – 640 с.
3. Срабатываемые, износостойкие и теплозащитные покрытия для деталей газового тракта турбины, компрессора и камеры сгорания ГТД / В.А. Барвинок, И.Л. Шитарев, В.И. Богданович, И.А. Докукина, В.М. Карасев // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета.* – 2009. – № 3(19). – С. 11–28.

4. Fukubayashi H.H. Present Furnace and Pot Roll Coatings and Future Development // *Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Application*, ASM International, May 10-12, 2004 (Osaka, Japan). – ASM International, 2004. – P. 125–131.

5. Tin S., Pollock T.M. Nickel-Based Superalloys // Shih T.I.-P., Yang V. (Eds.), *Turbine Aerodyn. Heat Transf. // Mater. Mech.*, American Institute of Aeronautics and Astronautics. – Inc., Reston, VA, 2014. – P. 423–466. doi:10.2514/5.9781624102660.0423.0466.

6. Pollock T.M., Tin S. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties // *J. Propuls. Power.* – 2006. – Vol. 22. – P. 361–374. DOI: 10.2514/1.18239

7. Bose S. *High Temperature Coatings.* – Elsevier, Oxford, UK, 2018. DOI: 10.1016/C2015-0-01316-8

8. Dorfman M.R., Sporer D., Meyer P. Thermal Spray Technology Growth in Gas Turbine Applications, in: R.C. Tucker Jr. (Ed.), *ASM Handb.* – Vol. 5A Therm. Spray Technol., ASM International, Materials Park. – OH, USA, 2013. – P. 280–286. DOI: 10.31399/asm.hb.v05a.a0005737

9. Overview on Recent Developments of Bondcoats for Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings / D. Naumenko [et al.] // *J. Therm. Spray Technol.* – 2017. – Vol. 26(8). – P. 1743–1757.

10. Development of NiCrAlY Alloys for Corrosion resistant Coatings and Thermal Barrier Coatings of Gas Turbine Components / H. Nickel [et al.] // *J Pressure Vessel Technol-Trans Asme.* – 1999. – Vol. 121(4). – P. 384–387.

11. Rhys-Jones T.N. Coatings for blade and vane applications in gas turbines // *Corros. Sci.* – 1989. – Vol. 29. – P. 623–646. DOI: 10.1016/0010-938X(89)90104-2

12. Solid particle erosion of standard and advanced thermal barrier coatings / F. Cernuschi, C. Guardamagna, S. Capelli, L. Lorenzoni, D.E. Mack, A. Moscatelli // *Wear.* – 2016. – Vol. 348(349). – P. 43–51. DOI: 10.1016/j.wear.2015.10.021

13. Lubell D., DellaCorte C., Stanford M. Test Evolution and Oil-Free Engine Experience of a High Temperature Foil Air Bearing Coating // Vol. 5 *Mar. Microturbines Small Turbomachinery; Oil Gas Appl. Struct. Dyn. Parts A B.* – ASME, 2006. – P. 1245–1249. DOI: 10.1115/GT2006-90572

14. Radil K., DellaCorte C. The Performance of PS400 Subjected to Sliding Contact at Temperatures from 260 to 927°C // *Tribol. Trans.* – 2017. – Vol. 60. – P. 957–964.

15. Современное применение металлокерамических покрытий на основе систем металл-хром-алюминий – иттрий (М-кролей) / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый, О.Г. Девойно, А.С.Володько, В.А. Сидоров, В.В. Оковитый, В.М. Асташинский // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения.* – 2021. – Т. 3(74). – С. 72–81.

16. Superior cyclic life of thermal barrier coatings with advanced bond coats on single-crystal superalloys / C. Vorkötter, D.E. Mack, O. Guillon, R. Vaßen // *Surf. Coatings Technol.* – 2019. – Vol. 361. – P. 15–158. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.01.001

17. Effect of test atmosphere composition on high-temperature oxidation behaviour of CoNiCrAlY coatings produced from conventional and ODS powders / T. Huang, J. Bergholz, G. Mauer, R. Vassen, D. Naumenko,

W.J. Quadackers // Mater. High Temp. – 2018. – Vol. 35. – P. 97–107. DOI: 10.1080/09603409.2017.1389422

18. Oxide Dispersion Strengthened Bond Coats with Higher Alumina Content: Oxidation Resistance and Influence on Thermal Barrier Coating Lifetime / C. Vorkötter, S.P. Hagen, G. Pintsuk, D.E. Mack, S. Virtanen, O. Guillon, R. Vaßen // Oxid. Met. – 2019. – Vol. 92. – P. 167–194. DOI: 10.1007/s11085-019-09931-z

19. Fabrication of Oxide Dispersion Strengthened Bond Coats with Low Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Content / J. Bergholz, B.A. Pint, K.A. Unocic, R. Vaßen // J. Therm. Spray Technol. – 2017. – Vol. 26. – P. 868–879. DOI: 10.1007/s11666-017-0550-9

20. Performance of wear resistant MCrAlY coatings with oxide dispersion strengthening / G. Bolelli, C. Vorkötter, L. Lusvarghi, S. Morelli, V. Testa, R. Vaßen // Wear. – 2020. – Vol. 203116. – P. 444–445.

21. High temperature behavior of newly developed oxide dispersion strengthened NiCoCrAlY coatings / K. Bobzin, T. Schläfer, K. Rlchardt, M. Brühl // B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.-C. Lau, C.-J. Li, R.S. Lima, G. Montavon (Eds.), Expand. Therm. Spray Perform. to New Mark. Appl. Proc. Int. Therm. Spray Conf., ASM International, Materials Park. – OH, USA, 2009. – P. 1030–1035. DOI: 10.1361/cp2009itsc1030

22. Tribology of NiCrAlY+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings by plasma spraying with hybrid feeding of dry powder+suspension / G. Bolelli, A. Candeli, L. Lusvarghi, A. Ravau, K. Cazes, A. Denoirjean, S. Valette, C. Chazelas, E. Meillot, L. Bianchi // Wear. – 2015. – Vol. 344(345). – P. 69–85. DOI: 10.1016/j.wear.2015.10.014

23. Hybrid plasma spraying of NiCrAlY+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+h-BN composite coatings for sliding wear applications / G. Bolelli, A. Candeli, L. Lusvarghi, T. Manfredini, A. Denoirjean, S. Valette, A. Ravau, E. Meillot // Wear. – 2017. – Vol. 378(379). – P. 68–81. DOI: 10.1016/j.wear.2017.02.027

24. Sims C.T., Stoloff, N.S., Hagel W.C. Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power. – John Wiley and Sons: New York, NY, USA, 1987.

25. Гольдштейн М.И., С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.

26. Applications and Developments of Thermal Spray Coatings for the Iron and Steel Industry / S. Singh, C.C. Berndt, R.K. Singh Raman, H. Singh, A.S.M. Ang // Materials. – 2023. – Vol. 16. – P. 516.

27. Аксенов Г.И. Основы порошковой металлургии. – Куйбышев, 1962. – 190 с.

28. АО «ПОЛЕМА» – Жаростойкие сплавы на основе никеля и железа для покрытий [Электронный ресурс]. – URL: <https://mbipc.com/products/poroshki/poroshok-pn75u23v/> (дата обращения: 10.01.2023).

29. Columnar Thermal Barrier Coatings Produced by Different Thermal Spray Processes / N. Kumar [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2021. – Vol. 30. – P. 1437–1452.

30. DSM-0248.3 – NiCrAlY and NiCoCrAlY Powders. – Oerlikon Metco, 2021.

31. Microstructural evaluation of YSZ/NiCrAlCoY<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings after isothermal oxidation at 1050 °C / A.G. González-Hernández [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. – 2018. – P. 1119–012017.

32. Development of bondcoats for high lifetime suspension plasma sprayed thermal barrier coatings / M. Gupta, N. Markocsan, X.-H. Li, B. Kjellman // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 371(15). – P. 366–377.

## References

1. Vaßen R., Bakan E., Emil Mack D., Guillon O. A Perspective on Thermally Sprayed Thermal Barrier Coatings. *Journal Therm Spray Tech.*, 2022, vol. 31, pp. 685–698.

2. Barvinok V.A. Vysokoeffektivnye tekhnologicheskie protsessy v proizvodstve lopatok turbin i kamer sgoraniia GTD [Highly efficient technological processes in the production of turbine blades and combustion chambers of GTEs]. Moscow: Nauka i tekhnologii, 2004, 640 p.

3. Barvinok V.A., Shitarev I.L., Bogdanovich V.I., Dokukina I.A., Karasev V.M. Srabatyvaemye, iznosostoikie i teplozashchitnye pokrytiia dlia detalei gazovogo trakta turbiny, kompressora i kamery sgoraniia GTD [Serviceable, wear-resistant and heat-protective coatings for parts of gas path of turbine, compressor and combustion chamber of GTEs]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2009, no. 3(19), pp. 11–28.

4. Fukubayashi H.H. Present Furnace and Pot Roll Coatings and Future Development. *Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Application, ASM International, May 10-12, 2004 (Osaka, Japan)*. ASM International, 2004, pp. 125–131.

5. Tin S., Pollock T.M. Nickel-Based Superalloys. Turbine Aerodyn. Heat Transf. *Mater. Mech., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston, VA*, 2014, pp. 423–466. doi:10.2514/5.9781624102660.0423.0466.

6. Pollock T.M., Tin S. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties. *Journal Propuls. Power*, 2006, vol. 22, pp. 361–374. DOI: 10.2514/1.18239

7. Bose S. High Temperature Coatings. *Elsevier, Oxford, UK*, 2018. DOI: 10.1016/C2015-0-01316-8

8. Dorfman M.R., Sporer D., Meyer P. Thermal Spray Technology Growth in Gas Turbine Applications, in: R.C. Tucker Jr. (Ed.), *ASM Handb. Vol. 5A Therm. Spray Technol.*, ASM International, Materials Park. OH, USA, 2013, pp. 280–286. DOI: 10.31399/asm.hb.v05a.a0005737

9. Naumenko D. et al. Overview on Recent Developments of Bondcoats for Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings. *Journal Therm. Spray Technol.*, 2017, vol. 26(8), pp. 1743–1757.

10. Nickel H. et al. Development of NiCrAlY Alloys for Corrosion resistant Coatings and Thermal Barrier Coatings of Gas Turbine Components. *Journal Pressure Vessel Technol-Trans Asme.*, 1999, vol. 121(4), pp. 384–387.

11. Rhys-Jones T.N. Coatings for blade and vane applications in gas turbines. *Corros. Sci.*, 1989, vol. 29, pp. 623–646. DOI: 10.1016/0010-938X(89)90104-2

12. Cernuschi F., Guardamagna C., Capelli S., Lorenzoni L., Mack D.E., Moscatelli A. Solid particle erosion of standard and advanced thermal barrier coatings. *Wear.*, 2016, vol. 348(349), pp. 43–51. DOI: 10.1016/j.wear.2015.10.021

13. Lubell D., DellaCorte C., Stanford M. Test Evolution and Oil-Free Engine Experience of a High Temperature Foil Air Bearing Coating. *Vol. 5 Mar. Microturbines Small*

*Turbomachinery; Oil Gas Appl. Struct. Dyn. Parts A B. ASME*, 2006, pp. 1245–1249. DOI: 10.1115/GT2006-90572

14. Radil K., DellaCorte C. The Performance of PS400 Subjected to Sliding Contact at Temperatures from 260 to 927°C. *Tribol. Trans.*, 2017, vol. 60, pp. 957–964.

15. Panteleenko F.I., Okovityi V.A., Devoino O.G., Volod'ko A.S., Sidorov V.A., Okovityi V.V., Astashinskiy V.M. Sovremennoe primeneniye metallokeramicheskikh pokrytii na osnove sistem metall-khrom-aliuminii-ittrii (M-krolei) [Modern application of metal-ceramic coatings based on metal-chromium-aluminum-yttrium (M-crolei) systems]. *Progres-sivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniia*, 2021, vol. 3(74), pp. 72–81.

16. Vorkötter C., Mack D.E., Guillon O., Vaßen R. Superior cyclic life of thermal barrier coatings with advanced bond coats on single-crystal superalloys. *Surf. Coatings Technol.*, 2019, vol. 361, pp. 15–158. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.01.001

17. Huang T., Bergholz J., Mauer G., Vassen R., Naumenko D., Quadackers W.J. Effect of test atmosphere composition on high-temperature oxidation behaviour of CoNiCrAlY coatings produced from conventional and ODS powders. *Mater. High Temp.*, 2018, vol. 35, pp. 97–107. DOI: 10.1080/09603409.2017.1389422

18. Vorkötter C., Hagen S.P., Pintsuk G., Mack D.E., Vir-tanen S., Guillon O., Vaßen R. Oxide Dispersion Strengthened Bond Coats with Higher Alumina Content: Oxidation Resistance and Influence on Thermal Barrier Coating Lifetime. *Oxid. Met.*, 2019, vol. 92, pp. 167–194. DOI: 10.1007/s11085-019-09931-z

19. Bergholz J., Pint B.A., Unocic K.A., Vaßen R. Fabrication of Oxide Dispersion Strengthened Bond Coats with Low Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Content. *Journal Therm. Spray Technol.*, 2017, vol. 26, pp. 868–879. DOI: 10.1007/s11666-017-0550-9

20. Bolelli G., Vorkötter C., Lusvarghi L., Morelli S., Testa V., Vaßen R. Performance of wear resistant MCrAlY coatings with oxide dispersion strengthening. *Wear.*, 2020, vol. 203116, pp. 444–445.

21. Bobzin K., Schäfer T., Rlhardt K., Brühl M. High temperature behavior of newly developed oxide dispersion strengthened NiCoCrAlY coatings. *Expand. Therm. Spray Perform. to New Mark. Appl. Proc. Int. Therm. Spray Conf., ASM International, Materials Park. OH, USA*, 2009, pp. 1030–1035. DOI: 10.1361/cp2009itsc1030

22. Bolelli G., Candeli A., Lusvarghi L., Ravaux A., Cazes K., Denoirjean A., Valette S., Chazelas C., Meillot E., Bianchi L. Tribology of NiCrAlY+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings by plasma spraying with hybrid feeding of dry powder+suspension. *Wear.*, 2015, vol. 344(345), pp. 69–85. DOI: 10.1016/j.wear.2015.10.014

23. Bolelli G., Candeli A., Lusvarghi L., Manfredini T., Denoirjean A., Valette S., Ravaux A., Meillot E. Hybrid plasma spraying of NiCrAlY+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+h-BN composite coatings for sliding wear applications. *Wear.*, 2017, vol. 378(379), pp. 68–81. DOI: 10.1016/j.wear.2017.02.027

24. Sims C.T., Stoloff, N.S., Hagel W.C. Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power. John Wiley and Sons: New York, NY, USA, 1987.

25. Gol'dshtein M.I., S.V., Veksler Iu.G. Spetsial'nye stali: uchebnik dlia vuzov [Special steels: textbook for universities]. Moscow: Metallurgiiia, 1985, 408 p.

26. Singh S., Berndt C.C., Singh Raman R.K., Singh H., A.S.M. Ang Applications and Developments of Thermal Spray Coatings for the Iron and Steel Industry. *Materials*, 2023, vol. 16, p. 516.

27. Aksenov G.I. Osnovy poroshkovoi metallurgii [Fundamentals of powder metallurgy]. Kuibyshev, 1962, 190 p.

28. АО «POLEMA» – Zharostoikiye splavy na osnove nikelia i zheleza dlia pokrytii [Elektronnyi resurs]. URL: <https://mbipc.com/products/poroshki/poroshok-pn75u23v/> (data available 10.01.2023).

29. Kumar N. et al. Columnar Thermal Barrier Coatings Produced by Different Thermal Spray Processes. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2021, vol. 30, pp. 1437–1452.

30. DSM-0248.3 – NiCrAlY and NiCoCrAlY Powders. Oerlikon Metco, 2021.

31. González-Hernández A.G. et al. Microstructural evaluation of YSZ/NiCrAlCo-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings after isothermal oxidation at 1050 °C. *Journal Phys. Conf. Ser.*, 2018, pp. 1119–012017.

32. Gupta M., Markocsan N., Li X.-H., Kjellman B. Development of bondcoats for high lifetime suspension plasma sprayed thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 371(15), pp. 366–377.

Поступила: 16.05.2023

Одобрена: 23.06.2023

Принята к публикации: 01.09.2023

#### Об авторах

**Кинжебаева Галия Маратовна** (Екатеринбург, Российская Федерация) – лаборант в лаборатории лазерной и плазменной обработки, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, студент, Уральский Федеральный университет (Российская Федерация, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: Kinzhebaeva\_g@imp.uran.ru).

**Чернов Алексей Анатольевич** (Екатеринбург, Российская Федерация) – младший научный сотрудник лаборатории лазерной и плазменной обработки, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН (Российская Федерация, 620049, г. Екатеринбург, ул. Первомайская, 91, e-mail: chernov\_aa@imp.uran.ru).

**Коробов Юрий Станиславович** (Екатеринбург, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией лазерной и плазменной обработки, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Уральский Федеральный университет (Российская Федерация, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: yukorobov@imp.uran.ru).

**Худорожкова Юлия Викторовна** (Екатеринбург, Российская Федерация) – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН (Российская Федерация, 620049, г. Екатеринбург, ул. Первомайская, 91, e-mail: khjv@mail.ru).

**Пантелеенко Федор Иванович** (Минск, Республика Беларусь) – член-корреспондент НАН Беларуси, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, д.т.н.,

профессор, Белорусский национальный технический университет (Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65, e-mail: panteleyenkofi@bntu.by).

#### **About the authors**

**Galiya M. Kinzhebaeva** (Yekaterinburg, Russian Federation) – laboratory assistant in the Laboratory of Laser and Plasma Processing, Institute of Metal Physics named after M.N. Mikheev, IMP UB RAS, student, Ural Federal University (19 Str. Mira, Yekaterinburg, 620002, Russian Federation, e-mail: Kinzhebaeva\_g@imp.uran.ru).

**Alexey A. Chernov** (Yekaterinburg, Russian Federation) – Junior Researcher at the Laboratory of Laser and Plasma Processing, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, IMP UB RAS (91 Str. Pervomaiskaya, Yekaterinburg, 620049, Russian Federation, e-mail: chernov\_aa@imp.uran.ru).

**Yuri S. Korobov** (Yekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Laser and Plasma Processing, IMP UB RAS, Ural Federal University (19 Str. Mira, Yekaterinburg, 620002, Russian Federation, e-mail: yukorobov@imp.uran.ru).

**Julia V. Khudorozhkova** (Yekaterinburg, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Researcher, E.S. Gorkunov Institute of Machine Science UB RAS (91 Str. Pervomaiskaya, Yekaterinburg, 620049, Russian Federation, e-mail: khjv@mail.ru).

**Fyodor I. Panteleenko** (Minsk, Republic of Belarus) – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Honored Scientist of the Republic of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., e-mail: panteleyenkofi@bntu.by).

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Структура» № 122021000033-2). При проведении исследований использовано оборудование ЦКП «Пластометрия».

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценен.