

УДК 621.793.7

К. А. ДАНЬКО<sup>1</sup>, А. И. ДОЛМАТОВ<sup>1</sup>, В. Н. ЛОПАТА<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина*<sup>2</sup> *Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев, Украина*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ СВЕРХЗВУКОВЫМ ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХКАМЕРНОЙ ГОРЕЛКИ

*Приведены результаты исследований структуры и физико-механических свойств покрытий, полученных двухкамерной горелкой для сверхзвукового газопламенного напыления (ГПН). В качестве компонентов топлива использовались МАФ-газ и кислород. Полученные результаты показали, что благодаря оригинальной конструкции горелки удалось получить покрытия с пористостью менее 5% и адгезионной прочностью сцепления до 100 МПа за счет управления скоростью и температурой частиц напыляемого материала в тракте двухкамерной горелки для сверхзвукового газопламенного напыления и дистанции от среза камеры смешения горелки до подложки; более эффективного ускорения частиц напыляемого материала и существенного улучшения условий для тепловой релаксации напыляемого материала, при этом, не увеличивая габаритных размеров горелки и исключая сужающиеся участки газового тракта по мере движения расплавленных частиц.*

**Ключевые слова:** *сверхзвуковое газопламенное напыление (ГПН), двухкамерная горелка, покрытия, карбид хрома, Инконель, микротвердость, пористость, микроструктура*

### Введение

С развитием техники и технологии возрастает потребность в многофункциональных покрытиях, которые позволяют решать задачи по продлению жизненного цикла ответственных нагруженных деталей за счет снижения коррозионного, эрозийного и абразивного износа новых и восстановления изношенных деталей; сохранению их прочности, твердости и износостойкости в условиях высоких рабочих температур, за счет нанесения термобарьерных покрытий; снижения их стоимости за счет использования более дешевых материалов подложки с высококачественным функциональным покрытием [1...3].

На сегодняшний день, производство современного авиационного двигателя, отвечающего постоянно растущим требованиям, эксплуатацию тяжело нагруженного металлургического оборудования, оборудования химической промышленности и автомобилестроения сложно представить без технологии газопламенного напыления (ГПН) многофункциональных порошковых покрытий. Сверхзвуковое газопламенное напыление порошковых покрытий занимает ведущую роль в семействе методов газотермического напыления (ГТН) благодаря широкой номенклатуре материалов покрытий и высоким

эксплуатационным характеристикам напыленных деталей.

### Постановка задачи

Одним из направлений улучшения качества газопламенных покрытий (ГПН-покрытий) является усовершенствование способа ГПН и оборудования для его реализации. Для процессов ГПН, наиболее ответственным компонентом, с точки зрения обеспечения показателей качества и экономичности, является аппарат для напыления (горелка), в которой происходят процессы нагрева и ускорения частиц напыляемого материала. На сегодняшний день существует большое разнообразие конструкций горелок для ГПН и высокоскоростного газопламенного напыления [4...6].

Несмотря на большое количество опубликованных исследований [4...9] по влиянию конструкции существующих горелок и параметров процесса ГПН на свойства напыленных покрытий, в настоящее время не проводились исследования и не опубликованы их результаты по оценке свойств покрытий, полученных ГПН двухкамерной горелкой [10,11]. В связи с этим, такие исследования актуальны. Таким образом, научной задачей является исследование влияния конструкции двухкамерной

горелки, состава предлагаемой горючей смеси напыляемого материала при сверхзвуковом ГПН этой горелкой на свойства получаемых покрытий.

Целью работы является исследование свойств покрытий, полученных сверхзвуковым газопламенным напылением двухкамерной горелкой оригинальной конструкции [10].

## 1. Содержание эксперимента

Описание исходных данных. В своих исследованиях мы использовали в качестве материала основы никель-хромовый сплав Inconel 718, предназначенный для работы при температурах до 980°C [12, 13]. При нагреве Инконель формирует тонкую стабильную пассивирующую оксидную пленку, предохраняющую поверхность от дальнейшего разрушения. Inconel 718 – жаропрочный сплав, разработан и запатентован в США Айзелштайном (патент США № 3046108 от 24.07.1963) [12]. Inconel 718 – один из наиболее распространенных сплавов семейства Инконель. В сплаве доминирует никель, второй элемент – хром. Химический состав сплава Inconel 718: элементы в процентах, %: 52,5Ni; 19,0Cr; 3,0Mo; 0,5Al; 0,90Ti; 5,1Nb; C менее 0,08; В менее 0,06; Fe остальные 18,86 [12]. Упрочнение сплава достигается за счёт медленного выделения интерметаллидного соединения никеля с титаном и ниобием. Этот сплав стоек к окислению и коррозии, сохраняет прочность в широком промежутке температур. Inconel 718 легко обрабатывается давлением и хорошо сваривается [12]. Обрабатывают сплав

Инконель 718 на невысоких скоростях и с большой глубиной резания, с использованием твердосплавного инструмента. Механические свойства приведены в таблице 1.

Сплав применяется как обшивочный материал для сверхзвуковых самолётов [12] и как защитное покрытие аппаратов химической промышленности; используется для изготовления деталей, работающих в экстремальных условиях – деталей газотурбинных двигателей, компрессоров, химических аппаратов, пароперегревателей.

В проведенных исследованиях были использованы в качестве материала покрытия:

1) композиции карбид хрома-никель в разном процентном соотношении в виде механической смеси порошков (70-90% Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> + 10-30% Ni) дисперсностью 40мкм;

2) композиционные материалы КХН 15 (85 % Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> + 15 % Ni) и КХН 30 (70 % Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> + 30 % Ni) в виде порошка дисперсностью 40-100 мкм.

В качестве подслоя и кислородного барьера для керамики применяли нихром (Ni-Cr 80/20). Нихром пригоден для защиты от окисления для деталей, работающих в перегретом паре, сопротивляется окислению при температурах до 1200 С<sup>0</sup> и имеет хорошую стойкость к истиранию, обеспечивает высокое качество поверхности. Нихром наносится на детали, которые непосредственно после нанесения покрытия должны быть механически обработаны.

Напыление осуществлялось двухкамерной горелкой. Горелка состоит из двух сопел (внутреннее

Таблица 1

Механические свойства сплава Инконель 718

Обработка	t <sub>исп.</sub> , °С	Предел прочности σ <sub>b</sub> , кГ/мм <sup>2</sup>	Предел текучести σ <sub>0,2</sub> , кГ/мм <sup>2</sup>	Удлинение δ, %	Длительная прочность σ <sub>1000</sub> , кГ/мм <sup>2</sup>
Наклёп и старение при 720°C, 8 часов. Охлаждение в печи до 620°C, 10 часов. Охлаждение на воздухе	20	153	145	9,5	130
	426				88
	538				31
Нагрев при 950°C и старение при 720°C, 8 часов Охлаждение в печи до 620°C, 10 часов Охлаждение на воздухе	20	145	122	17,3	120
	426				102
	538				38
Нагрев при 1065°C и старение при 720°C, 8 ч., охлаждение печи до 620°C, 12 ч., охлаждение на воздухе	20	143	124	20,5	112
	426				95
	538				53
	648t				

с двумя форсунками и наружное), и эжектора с выходной камерой без диффузора. Описание конструкции и принципа работы горелки представлены в работах [10, 11]. При напылении использовали МАФ-газ и кислород, которые подавались на вход в горелку. Анализ доступных источников [14, 15] дает точное процентное содержание компонент МАФ газа: (метилацетилен - 45%, пропан - 25,7%, пропилен - 2,1%, аллен - 25,6%, бутилен - 0,3%, дивинил - 0,2%). Кроме того, в [14] различают две марки (А и Б) МАФ газа. При исследовании было принято решение рассматривать МАФ газ как следующую смесь углеводородов (указаны массовые доли): 40% - метил-ацетилен (пропан,  $\text{CH}_3\text{-C}\equiv\text{CH}$ ); 35% - аллен (пропадиен,  $\text{CH}_2=\text{C}=\text{CH}_2$ ); 20% - пропан ( $\text{H}_3\text{C-H}_2\text{C-CH}_3$ ); 5% - пропилен ( $\text{H}_3\text{C-CH}=\text{CH}_2$ ).

Исследовалось влияние термодинамических параметров процесса напыления и химических параметров горючего газа (МАФ) и окислителя (кислорода) на свойства получаемых покрытий. В качестве термодинамических параметров процесса ГПН использовались температуры МАФ газа и кислорода, давления в камерах сгорания, давление окружающей среды на выходе из горелки, начальная скорость подачи материала частиц во внутреннюю камеру.

Режимы напыления:

- давление в камерах сгорания (КС):

1) в наружной камере сгорания (КС тарельчатого сопла со свободным внутренним расширением)  $P_{\text{нар.}} = 0,5 \text{ МПа}$ ;

2) во внутренней камере сгорания (КС сопла, в котором происходит нагрев частиц напыляемого порошка)  $P_{\text{внутр.}} = 0,3 \text{ МПа}$ ;

- коэффициент избытка окислителя ( $\alpha$ ):

1) для наружной камеры сгорания  $\alpha_{\text{нар.}} = 0,538$  – обеспечивает максимальную скорость истечения продуктов сгорания через тарельчатое сопло;

2) для внутренней камеры сгорания  $\alpha_{\text{внутр.}} = 0,765$  – обеспечивает максимальную температуру сгорания компонентов топлива во внутреннем сопле.

После нанесения покрытия были исследованы: микроструктура системы основа (Inconel 718) – покрытие (композиционный порошок КХН-30 (70% карбид хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  и 30% нихром (Ni-Cr 80/20)), распределение легирующих элементов в этой системе, микротвердость и пористость полученных покрытий.

Результаты исследований. Для исследования свойств покрытий, полученных сверхзвуковым ГПН двухкамерной горелкой были изготовлены образцы (рис. 1) из никель-хромового суперсплава Инконель 718 с износостойким покрытием из композиционного порошка КХН-30 (70% карбид хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  и 30% нихром (Ni-Cr 80/20)).



а



б

Рис. 1. Экспериментальные образцы из никель-хромового суперсплава Инконель 718 с износостойким покрытием из композиционного порошка КХН-30 (70% карбид хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  и 30% нихром (Ni-Cr 80/20)): а – образец №1; б – образец № 2

Подготовка образцов к металлографическому исследованию осуществлялась при использовании отрезных станках «Discotom», «Accutom» фирмы «Struers» (Дания) с применением вулканитовых кругов и алмазных дисков (по ГОСТ 21963-82), СТ СЭВ 562-77 и СТ563-77). Шлифование и полирование осуществлялось на станках типа «Neris», а также «Ecomet-II» фирмы «Buehler-Met» (Швейцария). Для удобства приготовления шлифов образцы запрессовывались в бакелитовую пластмассу на специальном прессе «Prontopress». Абразивная обработка шлифов проводили в несколько стадий, постоянно уменьшая крупность частиц абразивных материалов. В качестве абразивных материалов использовали порошки карбида кремния, алмаза. При подготовке шлифа абразивным методом шлифование проводилось в 4 – 5 переходов на шлифовальной бумаге № M63, M50, M28, M20, M10. Остатки абразива со шлифа удаляли с применением ультразвуковой очистки в спирте. После шлифования шлиф промывали водой и просушивали фильтровальной бумагой. Чтобы окончательно выровнять поверхность, шлиф полировали до зеркального блеска.

ска на таких же станках, на которых производилось шлифование. Для полирования применяли алмазные пасты по ГОСТ 25593-83 и оксид алюминия согласно ГОСТ 2912-73. Алмазное полирование выполняли в 3 – 4 ступени на пастах в следующей последовательности: АСМ 14/10, 10/7, 7/5, 2/1. Окончательную операцию полирования проводили с применением оксида алюминия зернистостью 1 мкм.

Исследование микроструктуры проводилось на нетравленных и травленных шлифах на световом микроскопе «MeF-3» фирмы "Reichert" (Австрия) при увеличении  $\times 100$ ,  $\times 200$ ,  $\times 500$  Фотографии микроструктур представлены на рис. 2.

При исследовании использовался метод сканирующей электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализатора. Исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе "Cam Scan" ("Oxford Instruments", Англия) с рентгеновским энергодисперсионным анализатором. Для

исследования распределения элементов применяли съемку в характеристическом рентгеновском излучении по программе «Smart map», имеющей два режима. В первом случае на экране дисплея получали картину распределения одного из элементов. Во втором случае получали распределение трех и более элементов одновременно. Применение этой программы исследований дает хорошие результаты для понятия механизмов диффузионных процессов. Применяли два типа исследований: спектр с поверхности шлифа и структура поверхности в сочетании с Y-модуляцией, т.е. - медленное сканирование электронного пучка вдоль линии с регистрацией рентгеновского излучения по каждому элементу с и построением концентрационных кривых распределения. Кроме того, проводился точечный микрорентгеноспектральный анализ по программе количественного анализа. Результаты исследований представлены в таблицах 2 и 3.

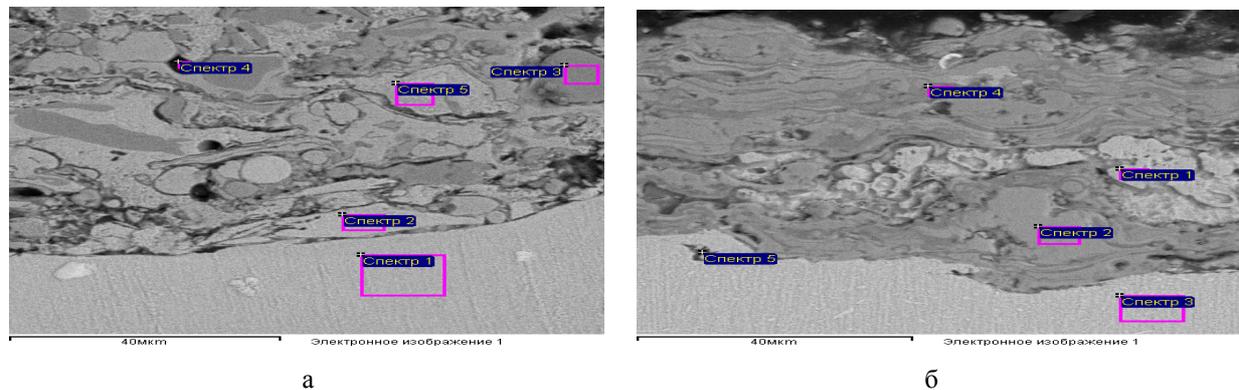


Рис. 2. Результаты исследования образцов из никель-хромового суперсплава Инконель 718 с покрытием из композиционного порошка КХН-30 (70% карбид хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  и 30% нихром (Ni-Cr 80/20)): а – образец №1; б – образец № 2

Таблица 2

Распределение легирующих элементов (образец № 1)

Спектр	Al	Ti	Mo	Cr	Fe	Ni	Nb
Спектр 1	0,4	0,9	2,9	17,5	18,2	49,0	5,1
Спектр 2	0,5	0,8	2,5	17,7	18,0	50,5	4,9
Спектр 3	0,3	0,7	2,7	18,4	17,9	49,9	4,7
Спектр 4	0,4	0,8	2,8	18,6	17,5	51,1	5,0
Спектр 5	0,3	0,7	2,6	18,9	18,7	48,9	4,8

Таблица 3

Распределение легирующих элементов (образец № 2)

Спектр	Al	Ti	Mo	Cr	Fe	Ni	Nb
Спектр 1	0,36	0,90	2,99	18,23	17,9	51,8	4,87
Спектр 2	0,47	0,89	2,91	18,49	18,06	50,63	4,91
Спектр 3	0,50	0,76	2,87	18,99	17,89	50,92	5,09
Спектр 4	0,40	0,84	2,92	18,03	18,57	51,15	4,97
Спектр 5	0,49	0,77	2,85	17,81	18,12	50,74	5,03

Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере "Micromet-II" с нагрузкой 100 г. по ГОСТ 9450-76 от края поверхности покрытия к основе с захватом переходной зоны. Результаты измерения микротвердости представлены в таблице 4.

Количественный стереологический анализ образцов проводился на аттестованном автоматическом анализаторе изображения «Mini-Magiscan» фирмы "Jouze Loebel", Англия, по программе «Genias 26». Эта программа позволяет проводить количественный стереологический анализ пористости. Основными этапами анализа изображения являются: калибровка изображения, фиксация изображения, сегментирование, пористость. Калибровка изображения производится для задания масштаба. В программе «Genias 26» калибровка осуществляется по размеру  $\mu$ -штриха на электронном изображении. Отмечая начальную и конечную длину, получаем масштабный коэффициент для данного изображения. Фиксация изображения заключается в его преобразовании в электрический сигнал с целью цифровой обработки и запоминания. Сегментирование «отделяет» исследуемые объекты (поры) от фона. В результате формируется двоичное изображение, каждый элемент которого может находиться только

в одном состоянии - исследуемое или фоновое. Для дополнительной корректировки изображения в ручном режиме используется операция редактирования.

Обработка результатов анализа изображения проводится по программе «Results», которая дает возможность статистического анализа результатов по любому из заданных измерений. При получении статистических данных в анализаторе изображения по программе «Results» применяли формулы математической статистики:

- математическое ожидание (среднее арифметическое)  $x = \Sigma x/n$ ;
- среднее геометрическое  $G = (\pi x)^{1/n}$ ;
- среднее гармоническое  $H = 1/(\Sigma(1/x)/n)$ ;
- дисперсия (вариация) выборки  
 $S^2 = (\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2/n)/n$ ;
- среднее квадратичное отклонение (стандартное отклонение) выборки  $S = \sqrt{S^2}$ ;
- дисперсия совокупности  
 $\sigma^2 = (\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2/n) / (n - 1)$ ;
- среднее квадратичное отклонение совокупности  $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$ ;
- стандартное отклонение от среднего  
 $\sigma_x = S/\sqrt{n}$ ;

Таблица 4

Распределение микротвердости в покрытии из композиционного порошка КХН-30

Образец № 1		Образец № 2	
Расстояние от края, мкм	Микротвердость, кгс/мм <sup>2</sup>	Расстояние от края, мкм	Микротвердость, кгс/мм <sup>2</sup>
30	634,1	50	824,1
80	1080,5	100	706,6
180	681,1	200	672,9
280	1114,3	350	973,7
380	1331,7	450	835,2
480	657,0	600	715,4
580	1426,0	750	1478,2
680	1532,5	950	762,0
800	366,3	1100	869,9
930	338,6	1250	752,3
1030	664,9	1400	585,2
1130	335,8	1600	681,1
1330	321,9	1800	553,7
1530	1560,7	2000	689,4
1730	332,9	2200	733,5
1930	356,7	2400	824,1
2130	327,4	2550	1452,2
2330	280,7	2700	536,0
2380	330,1	2850	634,1
2430	256,3	2950	314,0
2480	245,2	3000	258,2
2580	228,3	3200	1032,7
2680	223,6	3350	268,1
2880	220,5	3450	238,2

- относительная ошибка  $\sigma_x/x$ ;
- асимметрия  $(\Sigma x^3 - 3x\Sigma x^2 + 2x^3n)/n$ ;
- эксцесс  $(\Sigma x^4 - 4x\Sigma x^3 + 6x^2\Sigma x^2 - 3x^4n)/n$ .

Методика определения и размера пор состоит из следующих этапов:

1) обсчет пор с фотографий, полученных на световом микроскопе MeF-3» фирмы "Reichert" (Австрия);

2) представление результатов количественного анализа по программе «Results». Программа «Results» дает возможность построения гистограмм по любому из измеренных параметров с желаемым шагом.

В таблицах 5-6 и на рисунках 3-4 представлена средняя пористость и гистограммы распределения пористости в покрытии из композиционного порошка КХН-30.

Информация о площадях образца №1:

- увеличение  $\times 200$ ;
- количество обработанных изображений – 1;
- классифицированная площадь – 6455383,69 мкм<sup>2</sup>;
- процент отношения площадей – 1%;
- количество классов – 2.

Распределение пористости по классам показано в таблице 5.

Таблица 5  
Распределение пористости по классам

Цвет	Класс	Описание	% площади
	1	Поры	3,19%
	2	Основа	96,81%
	-	Прочее	0%



Рис. 3. Гистограмма классов

Информация о площадях, образец №2:

- увеличение  $\times 100$ ;
- количество обработанных изображений – 2;
- полная обработанная площадь – 12910767,4 мкм<sup>2</sup>;
- классифицированная площадь – 12910767,4 мкм<sup>2</sup>;
- процент отношения площадей – 1%;
- количество классов – 2.

Таблица 6  
Распределение пористости по классам

Цвет	Класс	Описание	% площади
	1	Поры	4,31%
	2	Основа	95,69%
	-	Прочее	0%



Рис. 4. Гистограмма классов

Важным фактором при решении задач эффективного использования покрытий является соотношение между прочностью сцепления покрытия с основой и когезионной прочностью покрытия [16, 17]. Адгезионная и когезионная прочность – это основные характеристики составных частей композиции «основа-покрытие», соотношение между которыми во многом определяет работоспособность композиции [16]. Необходимость их определения возникает как на этапе разработки технологии нанесения покрытий, так и при контроле качества готовой продукции. Разница состоит лишь в том, что в первом случае адгезионная и когезионная прочности являются параметрами оптимизации, а во втором – параметрами контроля [16]. Адгезионная прочность системы характеризуется максимальными касательными напряжениями на границе основа-покрытие, а также максимальными нормальными напряжениями в покрытии, достигнутые к моменту регистрации разрушения композиции (когезионная прочность покрытий). Согласно [18], прочность сцепления (покрытия с основой) (Нд адгезионная прочность) – условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей отделению покрытия от основы. Высокая адгезионная и когезионная прочность покрытия достигается путем ограничения нормальных напряжений в покрытии и касательных в плоскости адгезионного контакта покрытия с основой. Эти параметры выбирали исходя из физико-механических свойств компонентов покрытия и режимов его напыления.

В литературе, посвященной вопросам исследования когезионной и адгезионной прочности газотермических покрытий, основное внимание уделено последней [16-19]. Это, очевидно, связано с тем, что при эксплуатации газотермических покрытий имеет

место отслоения покрытий от материала основы и потому сформировалось мнение, что адгезионная прочность для газотермических покрытий является лимитирующим параметром. Однако, в работах [16, 17, 19] показано, что адгезионная и когезионная прочности – характеристики взаимосвязанные и на основании информации об одной из них невозможно судить о равнопрочности композиции «основа-покрытие» в целом [17]:

$$\frac{\tau_{\text{СЦ}}(z=1)}{\sigma_{\text{П}}(z=0)} = h k \theta (k \ell). \quad (1)$$

Из уравнения (1) видно, что, изменяя толщину покрытия, можно изменять соотношение между напряжениями в покрытии и плоскостью адгезионного контакта, и тем самым изменить характер разрушения с адгезионного на когезионный, или наоборот [17]. Адгезионная и когезионная прочность системы «покрытие-основа» и ее связь с механическими свойствами оценивались при помощи расчетно-экспериментальной методики [19] и с использованием образцов одной формы и в результате одного испытания на установке СИИТ – 3, которая разработана в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины.

Сочетание теоретического и экспериментального подхода при анализе процессов формирования адгезионной связи между покрытием и подложкой открывает новые возможности на пути совершенствования технологических процессов получения защитных покрытий и повышения их физико-механических и эксплуатационных характеристик [16-17, 19].

### Заключение

Предложенный метод нанесения композиционных порошковых покрытий из карбида хрома сверхзвуковым газопламенным напылением двухкамерной горелкой позволяет получать покрытия с пористостью менее 5%, адгезионной прочностью 70-80 МПа, когезионной – 70-100 МПа, сохраняя при этом микротвердость материала покрытия и его исходный состав.

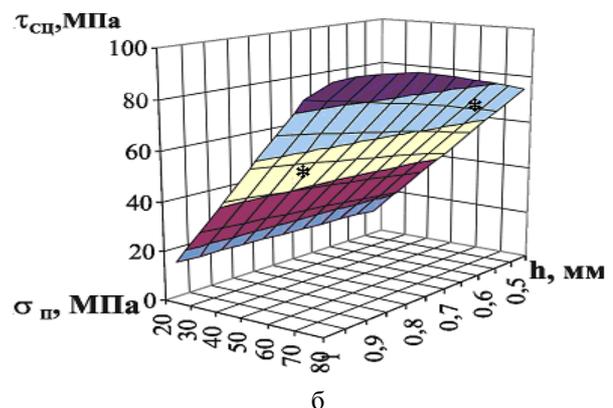
В основе спроектированной технологии получения композиционных порошковых покрытий сверхзвуковым газопламенным напылением двухкамерной горелкой лежит целенаправленное управление конструктивными параметрами и режимами работы горелки, характеристиками горючего газа и составом материала покрытия, что обеспечивает комплексное улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий.

Полученные результаты проведенных исследований представляют большой интерес с точки зрения прогнозирования важных для эксплуатации деталей с напыленным композиционных порошковых покрытием параметров, таких как микротвердость, пористость, адгезия и когезия, получаемых с использованием двухкамерной горелки. Результаты исследований предполагают дальнейшее изучение физико-механических свойств этих покрытий, полученных сверхзвуковым газопламенным напылением двухкамерной горелкой и их использование для повышения эксплуатационных свойств деталей современных авиационных газотурбинных двигателей за счет:

- использования в качестве материала деталей супер никель-хромовых сплавов типа Инконель;
- разработки технологических рекомендаций по нанесению упрочняющих покрытий на супер никель-хромовых сплавах типа Инконель с повышенными характеристиками прочности в условиях высоких температур.



а



б

Рис. 5. Установка для определения адгезионной и когезионной прочности покрытий и результаты исследований покрытий из композиционного порошка КХН-30, полученного сверхзвуковым газопламенным напылением двухкамерной горелкой при разных толщинах

## Литература

1. Fauchais, L. Pierre *Thermal spray fundamentals. From powder to part* [Text] / Pierre L. Fauchais, Joachim V. R. Herberlein, Maher I. Boulos. – New York : Springer, 2014. – 1566 p.

2. *The 2016 Thermal Spray Roadmap* [Text] / Armelle Vardelle, Christian Moreau, Jun Akedo et al. // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2016. – Vol. 25 (8). – P. 1376–1440.

3. Соколов, И. О. *Технология упрочнения тяжело нагруженных деталей газотермическим напылением* [Текст] : монография / И. О. Соколов, Н. В. Спиридонов, М. В. Нерода. – Барановичи : РИО БарГУ, 2012. – 184 с.

4. *Горелочное устройство двухкаскадной конфигурации для высокоскоростного воздушно-топливного напыления на жидком топливе* [Текст] / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, Г. А. Фролов и др. // *Вестник двигателестроения*. – 2015. – № 2. – С. 143-148.

5. Пат. DE 102009051948 A1, МПК В05В 7/20, С23С 4/12. *Verfahren und Brenner zur Erzeugung von Beschichtungen* [Text] : Matthäus Götz ; Заявитель Thermico GmbH & Co. KG (DE). – № DE200910051948 ; заявл. 04.11.2009, опубл. 05.05.2011.

6. Евдокименко, Ю. И. *Энергетическая эффективность горелок для высокоскоростного газопламенного напыления* [Текст] / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, Г. А. Фролов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 7 (84). – С. 12–17.

7. Korobov, Yu. S. *Deposition of protective coatings by means of supersonic flame spraying* [Text] / Yu. S. Korobov // *Thermal engineering*. – 2009. – Vol 56, № 2. – P. 142-146.

8. Евдокименко, Ю. И. *Исследование газодинамических трактов генераторов двухфазных потоков с расходным управлением их параметрами* [Текст] / Ю.И. Евдокименко, В. М. Кисель, В. И. Тимошенко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2003. – № 6 (41). – С. 83–87.

9. Вопнерук, А. А. *Совершенствование технологии высокоскоростного газопламенного напыления износостойких покрытий со структурой метастабильного аустенита* [Текст] : дис.... канд. техн. наук : 05.02.10 : защищена 30.06.2011 / Вопнерук Александр Александрович ; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург. – 2011. – 178 с.

10. Пат. Украины 90044, МПК (2006) В05В 7/00. *Газополуменевий пальник для надзвукового напылення покриттів* [Текст] / Долматов А. И., Зорик И. В., Данько К. А. ; Заявитель и патентообладатель Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». – № а200809654 ; заявл. 25.01.2010 ; опубл. 25.03.2010, Бюл. № 6. – 6 с.

11. Зорик, И. В. *Газопламенная горелка для сверхзвукового напыления покрытий* [Текст] / И. В. Зорик, К. А. Данько // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 1 (68). – С. 11–15.

12. Decker, R. F. *Evolution of Wrought Age-Hardenable Super alloys* [Text] / R. F. Decker // *The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. – 2006. – Vol. 58, № 9. – P. 32–36.

13. Химушин, Ф. Ф. *Жаропрочные стали и сплавы* [Текст] / Ф. Ф. Химушкин. – М. : *Металлургия*, 1969. – 488 с.

14. *Метилацетилен-алленовая фракция (МАФ)* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://tgko.ru/spravka/gaz/metilacetilen\\_allenovaya\\_frakciya\\_maf/](https://tgko.ru/spravka/gaz/metilacetilen_allenovaya_frakciya_maf/). – 10.03.2017.

15. *Обоснование максимальной разовой ПДК метилацетилен-алленовой фракции (МАФ) и метода определения в атмосферном воздухе* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gazmaf.by/media/48600/pdk-maf.doc>. – 10.03.2017.

16. *Механические характеристики композиций металл-напыляемое покрытие* [Текст] / Б. А. Ляшенко, С. Ю. Шаривкер, О. В. Цыгулев и др. // *Проблемы прочности*. – 1989. – № 8. – С. 47-49.

17. Ляшенко, Б. А. *О критериях адгезионно-когезионной равнопрочности и термостойкости защитных покрытий* [Текст] / Б. А. Ляшенко // *Проблемы прочности*. – 1980. – № 10. – С. 114-117.

18. ДСТУ 3761.1-98 – ДСТУ 3761.5-98 *Зварювання та споріднені процеси : Терміни та визначення* [Текст]. – Введ. 1999.07.01. – Офіц. вид. – К. : *Держстандарт України*, 1999. – 176 с.

19. Дмитриев, Ю. В. *Методологический подход к исследованию механических характеристик материалов с покрытиями* [Текст] : дис. ...канд. техн. наук : 05.02.09 / Дмитриев Ю. В. – К., 1990. – С. 61-92.

## References

1. Pierre L., Fauchais, Joachim, V. R. Herberlein, Maher I. Boulos. *Thermal spray fundamentals. From powder to part*. New York, Springer Publ., 2014. 1566 p.

2. Armelle Vardelle, Christian Moreau, Jun Akedo *The 2016 Thermal Spray Roadmap. Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, vol. 25 (8), pp. 1376–1440.

3. Sokorov, I. O., Spiridonov, N. V., Neroda, M. V. *Tehnologija uprochnenija tjazhelonagruzhennyh detalej gazotermicheskim napyleniem* [Technology of heavily loaded parts hardening by thermal spraying]. Baranovich, RIO BarGU, 2012. 184 p.

4. Evdokimenko, Ju. I., Kisel', V. M., Frolov, G. A., Buchakov, S. V. *Gorelochnoe ustrojstvo dvuhkaskadnoj konfiguracii dlja vysokoskorostnogo vozdušno-toplivnogo napylenija na zhidkom toplive* [Two-stage burner configuration for high-speed air-fuel

spraying with liquid fuel]. *Vestnik dvigatelestroenija*, 2015, no. 2, pp. 143-148.

5. Götz, Matthäus. *Verfahren und Brenner zur Erzeugung von Beschichtungen*, Patent DE, № 200910051948, 2011.

6. Evdokimenko, Ju., Kisel', V. M., Frolov, G. A. I. Jenergeticheskaja jeffektivnost' gorelok dlja vysokoskorostnogo gazoplamnogo napylenija [Energy efficiency of burners for high-velocity gas-flame spraying]. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2011, no. 7 (84), pp. 12–17.

7. Korobov, Yu. S. Deposition of protective coatings by means of supersonic flame spraying. *Thermal engineering*, vol. 56, 2009, no. 2, pp. 142-146.

8. Evdokimenko, Ju. I., Kisel', V. M., Timoshenko, V. I. Issledovanie gazodinamicheskikh traktov generatorov dvuhfaznyh potokov s rashodnym upravleniem ih parametrami [Investigation of gas-dynamic tracts of generators of two-phase flows with flow control of their parameters]. *Aviacionno-kosmichna tehnika i tehnologija*, 2003, no. 6 (41), pp. 83–87.

9. Vopneruk, A. A. *Sovershenstvovanie tehnologii vysokoskorostnogo gazoplamnogo napylenija iznosostojkikh pokrytij so strukturoj metastabil'nogo austenita Dis. kand. tehn. nauk* [Perfection of high-speed gas-flame spraying technology of wear-resistant coatings with the structure of metastable austenite. PhD Thesis]. Ekaterinburg, 2011. 178 p.

10. Dolmatov, A. I., Zorik, I. V., Dan'ko, K. A. Gazopolumenevij pal'nik dlja nadzvukovogo napilennja pokrytij [Gas flame burner for supersonic deposition of coatings]. Patent UA, № a200809654, 2010.

11. Zorik, I. V., Dan'ko, K. A. Gazoplamnaja gorelka dlja sverhzvukovogo napylenija pokrytij [Gas flame torch for supersonic spraying of coatings]. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2010, no. 1 (68), pp. 11–15.

12. Decker, R. F. Evolution of Wrought Age-Hardenable Super alloys, *The Journal of the Minerals. Metals and Materials Society*, 2006, vol. 58, no. 9, pp. 32-36.

13. Himushin, F. F. *Zharoprochnye stali I splavy* [Heat-resistant steels and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1969. 488 p.

14. *Metilacetilen-allenovaja frakcija* [Methylacetylene-allene fraction]. Available at: [https://tgko.ru/spravka/gaz/metilacetilen\\_allenovaya\\_frakciya\\_maf/](https://tgko.ru/spravka/gaz/metilacetilen_allenovaya_frakciya_maf/) (accessed 10.03.2017).

15. *Obosnovanie maksimal'noj razvoj PDK metilacetilen-allenovej frakcii (MAF) i metoda opredelenija v atmosfěrnem vozduhe* [The rationale for the maximum single MRL of the methylacetylene-allene fraction (MAF) and the method of determination in atmospheric air]. Available at: <http://gazmaf.by/media/48600/pdk-maf.doc> (accessed 10.03.2017).

16. Ljashenko, B. A., Sharivker, S. Ju., Cygulev, O. V., Veremchuk, V. S., Dement'ev, A. I. Mehanicheskie harakteristiki kompozicij metall-napyljaemoe pokrytie [Mechanical characteristics of metal-sprayed coatings]. *Problemy Prochnosti*, 1989, no. 8, pp. 47-49.

17. Ljashenko, B. A. O Kriterijah adgezionno-kogezionnoj ravnoprochnosti i termostojkosti zashhitnyh pokrytij [On the criteria of adhesion-cohesive strength and heat resistance of protective coatings]. *Problemy Prochnosti*, 1980, no. 10, pp. 114-117.

18. *DSTU 3761.1-98 – DSTU 3761.5-98 Zvarjuvannja ta sporidneni procesi : Termini ta viznachennja* [State Standard 3761.1 – 98 – State Standard 3761.5 – 98 Welding and Related Processes: Terms and Definitions]. Kyiv, Derzhstandart Ukraïni Publ., 1999. 176 p.

19. Dmitriev, Ju. V. *Metodologicheskij podhod k issledovaniju mehanicheskikh harakteristik materialov s pokrytijami. PhD Diss.* [Methodological approach to the study of the mechanical characteristics of materials with coatings. PhD Diss.]. Kiev, 1990. 192 p.

*Поступила в редакцию 18.04.2017, рассмотрена на редколлегии 9.06.2017*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., декан факультета самолётостроения С. И. Планковский, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ НАДЗВУКОВИМ ГАЗОПОЛУМЕНЕВИМ НАПИЛЕННЯМ З ВИКОРИСТАННЯМ ДВОКАМЕРНОГО ПАЛЬНИКА

*К. А. Данько, А. І. Долматов, В. М. Лопата*

Наведено результати дослідження структури та фізико-механічних властивостей покриттів, отриманих двокамерним пальником для надзвуків газополуменевого напилення (ГПН). В якості компонентів палива використовувались МАФ-газ та кисень. Отримані результати показали, що завдяки оригінальній конструкції пальника вдалось отримати покриття із пористістю не більше 5% і адгезійною міцністю зчеплення з підкладкою до 100 МПа за рахунок: управління швидкістю та температурою частинок напилюваного матеріалу в тракці двокамерного пальника для надзвуків газополуменевого напилення і дистанції від зрізу камери змищення пальника до підкладки; більш ефективного прискорення частинок напилюваного матеріалу і значного покращення умов для теплової релаксації частинок напилюваного матеріалу, при цьому, не збільшуючи габаритних розмірів пальника та виключаючи на шляху руху розплавлених частинок ділянки газового тракту, що звужуються.

**Ключові слова:** надзвукове газополуменеве напилення (ГПН), двокамерний пальник, покриття, карбід хрому, Інконель, мікротвердість, пористість, мікроструктура

**STUDY OF THE PROPERTIES OF COATINGS RECEIVED BY HIGH VELOCITY OXY-FUEL SPRAYING BY TWO-CHAMBER BURNER*****K. A. Danko, A. I. Dolmatov, V. M. Lopata***

The results of investigations of the structure, physical and mechanical properties of coatings obtained by a two-chamber burner for high velocity oxy-fuel spraying (HVOF) are presented. As components of the fuel, MAF-gas and oxygen were used. The obtained results showed that thanks to the innovative design of the burner, it was possible to obtain coatings with a porosity of not more than 5% and adhesion strength up to 100 MPa due to: controlling the velocity and temperature of the particles of the sprayed material in the path of a two-chamber HVOF burner and the distance from the burner mixing chamber exit to the substrate; more effective acceleration of the particles and a significant improvement in the conditions for the thermal relaxation of the sprayed material, while not increasing the overall dimensions of the burner and excluding the narrowing sections of the gas path as the molten particles move.

**Keywords:** high velocity oxy-fuel spraying (HVOF), two-chamber burner, coatings, chromium carbide, Inconel, microhardness, porosity, microstructure.

**Данько Константин Анатольевич** – ст. преп. каф. Технологий производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: kostiantyn.a.danko@gmail.com.

**Долматов Анатолий Иванович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. Технологий производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: a.dolmatov@khai.edu.

**Лопата Виталий Николаевич** – канд. техн. наук, доц. каф. Инженерии поверхности, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина, e-mail: gazoterm@ukr.net.

**Danko Kostiantyn Anatoliiovych** – senior lecturer of “Technologies of aircraft engines manufacturing” department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: kostiantyn.a.danko@gmail.com.

**Dolmatov Anatolii Ivanovych** – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Dept. of “Technologies of aircraft engines manufacturing” department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: a.dolmatov@khai.edu.

**Lopata Vitalii Mykolaiovych** – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of “Surface engineering”, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: gazoterm@ukr.net.