

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-69-80

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАНЕСЕНИЯ
КЕРАМИЧЕСКОГО СЛОЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ
ZrO₂-7 % Y₂O₃ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ
НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

Н.И. Артеменко¹, С.В. Татарников¹, О.Н. Доронин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

***Аннотация.** Получена зависимость коэффициента использования керамического порошкового материала от параметров нанесения покрытия методом плазменного напыления. Установлены зависимости коэффициента использования материала и тока дуги, соотношения расходов аргона и азота, суммарного расхода плазмообразующих газов от дистанции напыления и фракционного состава порошкового материала. Описаны естественные ограничения вариативности этих параметров. Установлена зависимость коэффициента использования материала от среднего значения диапазона фракции.*

***Ключевые слова:** теплозащитное покрытие, керамический слой, плазменное напыление, коэффициент использования материала, плазма, плазмотрон, дуговой разряд*

Для цитирования: Артеменко Н.И., Татарников С.В., Доронин О.Н. Исследование влияния параметров нанесения керамического слоя теплозащитного покрытия ZrO₂-7 % Y₂O₃ методом плазменного напыления на производительность технологического процесса // Труды ВИАМ. 2023. № 4 (122). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-69-80.

Scientific article

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS
OF APPLYING THE CERAMIC LAYER OF THE ZrO₂-7 % Y₂O₃
HEAT-SHIELDING COATING BY PLASMA SPRAYING
ON THE PRODUCTIVITY OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS**

N.I. Artemenko¹, S.V. Tatarnikov¹, O.N. Doronin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

***Abstract.** The dependence of the coefficient of use of ceramic powder material on the parameters of coating by the plasma spraying method was obtained in the work. The dependences of the material utilization factor and arc current, the ratio of argon and nitrogen consumption, the total consumption of plasma gases, the spraying distance and the fractional composition of the powder material are established, and the natural limitations of the variability of these parameters are described. The dependence of the material utilization factor on the average value of the fraction range has been established.*

***Keywords:** thermal barrier coating, ceramic layer, plasma spray, material utilisation rate, plasma, plasma torch, arc discharge*

For citation: Artemenko N.I., Tatarnikov S.V., Doronin O.N. Investigation of the influence of the parameters of applying the ceramic layer of the ZrO₂-7 % Y₂O₃ heat-shielding coating by plasma spraying on the productivity of the technological process. *Trudy VIAM*, 2023, no. 4 (122), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-69-80.

Введение

Наиболее эффективным методом нанесения теплозащитных покрытий (ТЗП), в составе которых, как правило, присутствуют системы на основе оксидных керамик (например, ZrO_2 –(7–8 % (по массе)) Y_2O_3), является газоплазменное напыление. Этот вид газотермического напыления предполагает формирование жидкой фазы наносимого покрытия (как правило, непроводящей керамики) за счет нагрева плазмообразующей смеси газов энергией плазмы дугового разряда в виде малых капель-частиц с последующим их переносом на подложку потоком плазмообразующего газа при атмосферном давлении. Эффективность и технологичность метода, выгодно отличающегося от других видов плазменного распыления непроводящих материалов, заключается в том, что керамический порошковый материал подается в зону термализации в виде порошка, а размеры и форма покрываемых изделий, по сути, ограничены лишь сложностью привода плазмотрона, который обеспечивает полное покрытие обрабатываемой поверхности. Помимо этого, метод обладает высокой скоростью нанесения покрытия и высоким коэффициентом использования материала (КИМ). В то время как для альтернативных плазменных технологий (электронно-лучевой и магнетронной) при нанесении непроводящих покрытий КИМ в лучшем случае составляет 20–30 %, скорость напыления – на порядок меньше. Для двух последних способов следует учитывать необходимость поддержания высокого вакуума и ограниченность габаритов обрабатываемых деталей вместимостью вакуумной камеры. Более технологичным в газоплазменном напылении можно считать использование порошкового распыляемого материала вместо отливок катодов и штабиков аналогичного химического состава.

Принципиальное устройство плазмотрона проиллюстрировано на рис. 1.

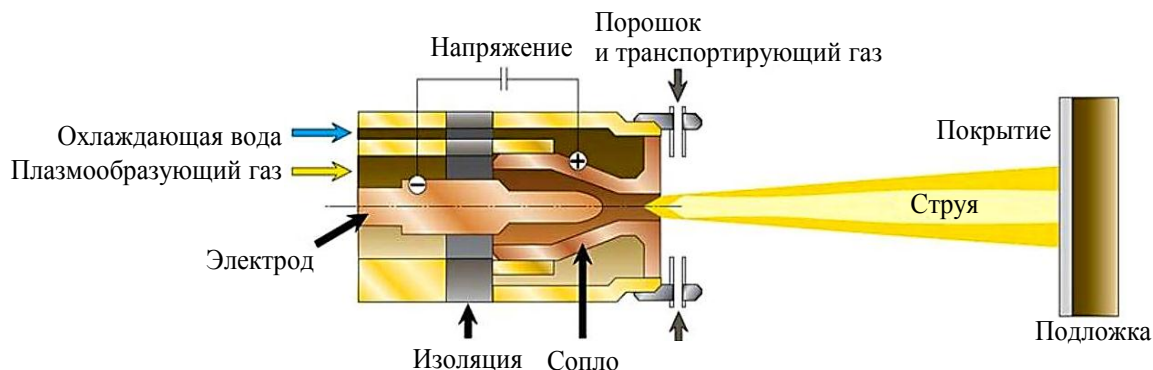


Рис. 1. Принципиальная схема плазмотрона

Проходя через зону дугового разряда между вольфрамовым катодом и вольфрамовой вставкой медного анода, плазмообразующий газ нагревается, частично ионизируется и истекает из сопла со скоростью до 200–300 м/с. В результате в зоне выходной апертуры сопла-анода формируется плазменный факел, распределение температуры которого приближенно представлено на рис. 2 [1].

Порошок наносимого материала поступает в струю на срезе сопла и, расплавляясь, вместе с плазмообразующим газом транспортируется к подложке. Регулировкой температуры и скорости плазменной струи достигаются оптимальные режимы напыления различных материалов в широком диапазоне варьируемых параметров (ток дуги, расход рабочего тела и т. п.).

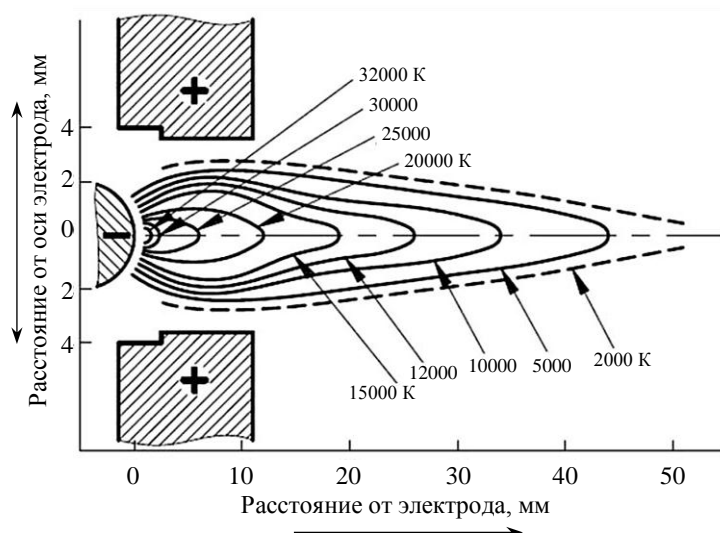


Рис. 2. Распределение температур в плазменной струе в зависимости от расстояния от среза сопла

В настоящее время перед авиадвигателестроительной отраслью стоит задача дальнейшего увеличения ресурса авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Вместе с тем повышаются требования и к жаропрочности деталей горячего тракта ГТД – необходимо увеличение его рабочей температуры с 1200 до 1300–1350 °С и более [2, 3]. Экономически целесообразным методом решения проблем жаропрочности и ресурса является применение теплозащитных покрытий, которые создают барьер разрушающему воздействию высокоэнергетичных потоков рабочих газов. Принцип действия теплозащитных покрытий заключается в снижении теплового потока (~(1–2) МВт/м²), проходящего по толщине детали между ее рабочей и внутренней (принудительно вентилируемой) поверхностями. Достигается это за счет покрытия рабочей поверхности изделия тонким слоем термоизолирующей керамики определенного химического состава.

Основными материалами лопаток ГТД являются жаропрочные никелевые сплавы с коэффициентом теплопроводности $\lambda \geq 18\text{--}20$ Вт/(м·К) [4, 5]. Это накладывает определенные ограничения на химический состав и структуру теплозащитных покрытий.

Например, для теплозащитных покрытий на основе керамик типа $\text{ZrO}_2\text{--}(7\text{--}8\% \text{ (по массе)}) \text{Y}_2\text{O}_3$ с подслоем из MCrAlY (где М: Ni, Ni–Co) коэффициенту теплопроводности $\lambda = 1,95\text{--}2,44$ Вт/(м·К) [6–8] в рабочем диапазоне температур 1200–1250 °С соответствует коэффициент линейного теплового расширения $\alpha = (8\text{--}10)10^{-6}$ К⁻¹ [9], что сопоставимо с аналогичной характеристикой материала подложки. При этом данная керамическая система стабильна как по своей структуре, так и по фазовому составу, что позволяет на практике при толщине теплозащитного слоя 70–200 мкм гарантированно получать градиент температуры по толщине керамического слоя до 50–150 °С [10]. Но при превышении порога температуры в 1250 °С данная керамика склонна к фазовым переходам, спеканию и изменению объема, что в свою очередь приводит к увеличению вероятности скола из-за роста термостимулированной оксидной зоны.

В данной работе проведено исследование влияния параметров нанесения керамического слоя теплозащитного покрытия на КИМ.

Материалы и методы

При нанесении керамического слоя теплозащитного покрытия в процессе напыления на производительность технологического процесса оказывают влияние как режим нанесения покрытия, так и технологические свойства порошкового материала.

К режиму напыления покрытия на плазмотроне типа F4, т. е. режиму работы технологического оборудования, относят следующие параметры: I – ток дуги, А; Q_{Ar} и Q_N – расход аргона и азота соответственно, л/мин; $Q_{тр}$ – расход транспортирующего газа, л/мин; $Q_{пор}$ – расход порошка, г/мин, а также параметры перемещения плазмотрона (v – скорость перемещения, мм/с; ΔS – шаг смещения плазмотрона, мм; h – дистанция напыления, мм) [11–16]. К основным технологическим параметрам порошкового материала при напылении относят гранулометрический состав и степень сферичности. Физико-химические свойства порошкового материала, такие как химический состав, коэффициент температуропроводности, температуры плавления и кипения, являются индивидуальными и неизменяемыми для вещества, из которого изготовлен порошковый материал [17].

При нанесении покрытия методом плазменного напыления часть порошкового материала после подачи из порошкового питателя покидает плазменную струю по различным причинам – широкого диапазона гранулометрического состава, неоптимального расхода транспортирующего газа. Иногда у части порошка отсутствует адгезионная связь с материалом подложки из-за неоптимальных тока дуги, расхода плазмообразующих и транспортирующего газов, а также непопадания расплавленного порошка на деталь по причине маскировки или выхода струи за пределы проекции детали. В связи с этим КИМ (отношение массы затраченного порошкового материала к привесу на материале основы в виде покрытия) всегда будет не более единицы, причем при соблюдении оптимальных параметров нанесения показатель КИМ тем выше, чем больше габариты обрабатываемой детали. В общем случае КИМ описывается формулой

$$\eta = \Delta M / M_{пор},$$

где ΔM – привес на детали в виде покрытия; $M_{пор}$ – количество израсходованного порошкового материала.

При нанесении покрытия методом плазменного напыления на плоские поверхности траектория перемещения плазмотрона представляет собой «лабиринт» с отстоящими друг от друга на расстояние шага смещения ΔS элементами траектории, как показано на рис. 3. На практике величина шага смещения не превышает $2/3$ от диаметра пятна от расплавленного потока частиц на поверхности обрабатываемой детали.

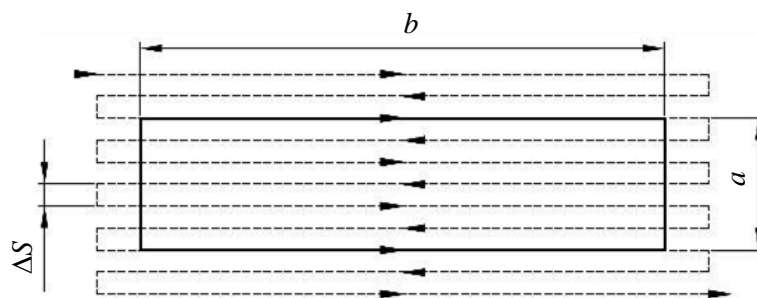


Рис. 3. Траектория перемещения среза сопла плазмотрона при напылении на плоскость

На рис. 3 также схематично изображен обрабатываемый плоский образец с размерами сторон $a \times b$ и площадью F . При нанесении покрытия на образец количество израсходованного порошкового материала составит

$$M_{пор} = Q_{пор} \cdot \tau,$$

где τ – время «сканирования» образца проекцией сопла плазмотрона, с.

В свою очередь

$$\tau = \frac{L}{v} \cdot N,$$

где L – длина пути «сканирования» образца проекцией сопла плазмотрона, мм; N – количество слоев покрытия.

Длина пути «сканирования» рассчитывается как количество длин b , пройденных проекцией сопла плазмотрона $a/\Delta S$ раз:

$$L = b \cdot \frac{a}{\Delta S}.$$

С учетом размерности расхода порошка (г/мин) после преобразований получаем формулу расчета КИМ при нанесении покрытия на плоскость методом плазменного напыления:

$$\eta = \frac{60 \cdot \Delta M \cdot \Delta S \cdot v}{N \cdot F \cdot Q_{\text{пор}}}.$$

Форма экспериментального образца в конечном итоге не имеет значения, так как любую геометрическую фигуру можно представить в виде суммы бесконечно малых прямоугольников, а следовательно, площадь проекции образца F вычисляется в соответствии с его геометрическими характеристиками.

Для исследования влияния параметров процесса напыления использовали керамический порошковый материал марки Z7Y 45-140S состава $ZrO_2-7\%$ (по массе) Y_2O_3 производства ООО «Т:СП» фракцией 45–140 мкм. Порошковый материал изготовлен методом агломерирования и спекания, в связи с чем частицы имеют сферическую форму. Изображение частиц порошка представлено на рис. 4.

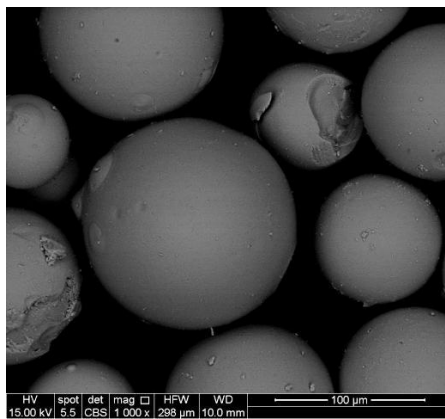


Рис. 4. Порошковый материал марки Z7Y 45-140S

Для исследования влияния параметров напыления фиксировали также значения расхода порошка $Q_{\text{пор}}$, скорость перемещения среза сопла плазмотрона v , шаг смещения среза сопла плазмотрона ΔS и количество слоев покрытия N . Для начала исследования выбран базовый режим напыления с параметрами: ток дуги I_0 , расход аргона Q_{Ar0} и азота Q_{N0} , расход транспортирующего газа Q_{Tr0} и дистанция напыления h_0 .

При исследовании проводили измерение массы образцов до и после нанесения покрытия с точностью до 0,0001 г с целью вычисления КИМ. Съёмку микроструктуры получаемого покрытия производили методом оптической микроскопии, получение изображения частиц порошкового материала – методом растровой электронной микроскопии.

Результаты и обсуждение

В ходе исследования в первой итерации проводили варьирование значений тока дуги в диапазоне $(0,8-1,2) \cdot I_0$ и расхода аргона в диапазоне $(1,0-1,66) \cdot Q_{Ar0}$, все остальные параметры фиксировали в соответствии с их базовыми значениями. Результаты представлены в табл. 1 и 2 и на рис. 5.

Таблица 1

Привес на образцах в первой итерации при базовом расходе азота Q_{N0}

Ток дуги I , А	Привес на образцах, г, при расходе аргона Q_{Ar} , л/мин		
	$1,0 \cdot Q_{Ar0}$	$1,33 \cdot Q_{Ar0}$	$1,66 \cdot Q_{Ar0}$
$0,8 \cdot I_0$	0,0467	0,0182	0,0010
$1,0 \cdot I_0$	0,1028	0,0467	0,0145
$1,2 \cdot I_0$	0,1628	0,0979	0,0476

Таблица 2

Коэффициент использования материала в первой итерации при базовом расходе азота Q_{N0}

Ток дуги I , А	Коэффициент использования материала, %, при расходе аргона Q_{Ar} , л/мин		
	$1,0 \cdot Q_{Ar0}$	$1,33 \cdot Q_{Ar0}$	$1,66 \cdot Q_{Ar0}$
$0,8 \cdot I_0$	3,53	1,37	0,08
$1,0 \cdot I_0$	7,76	3,53	1,09
$1,2 \cdot I_0$	12,29	7,39	3,59

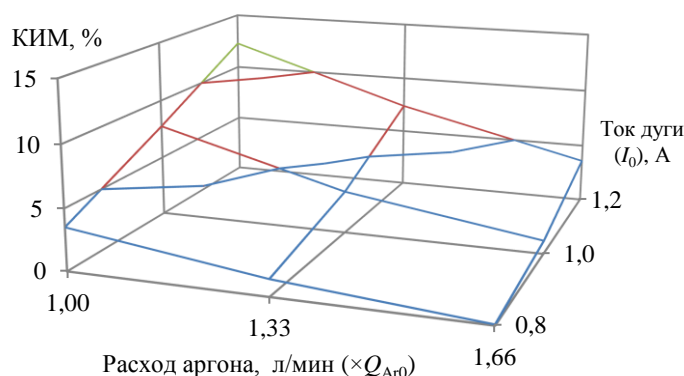


Рис. 5. Коэффициент использования материала (КИМ) в первой итерации

В результате варьирования значений тока дуги и расхода аргона при фиксации остальных параметров напыления на уровне базовых значений установлено, что при увеличении тока дуги происходит повышение значений КИМ материала, а при увеличении соотношения расходов аргона и азота – уменьшение значений КИМ. Для второй итерации варьирования параметров напыления выбрано соотношение $Q_N/Q_{Ar} = Q_{N0}/Q_{Ar0}$.

В ходе исследования во второй итерации проводили варьирование значений тока дуги в диапазоне $(0,8-1,2) \cdot I_0$, расход азота (Q_{N0}) и аргона (Q_{Ar0}) в одинаковом диапазоне $1,0-1,33$ при соблюдении строгого соотношения между плазмообразующими газами $Q_N/Q_{Ar} = Q_{N0}/Q_{Ar0}$. Остальные параметры фиксировали в соответствии со своими базовыми значениями. Результаты представлены в табл. 3 и 4 и на рис. 6.

Таблица 3

Привес на образцах во второй итерации при строгом соотношении плазмообразующих газов

Ток дуги I , А	Привес на образцах, г, при суммарном расходе плазмообразующих газов, л/мин		
	$1,0 \cdot (Q_{Ar0} + Q_{N0})$	$1,17 \cdot (Q_{Ar0} + Q_{N0})$	$1,33 \cdot (Q_{Ar0} + Q_{N0})$
$0,8 \cdot I_0$	0,0467	0,0210	0,0083
$1,0 \cdot I_0$	0,1028	0,0754	0,0585
$1,2 \cdot I_0$	0,1628	0,1451	0,1089

Таблица 4

Коэффициент использования материала во второй итерации при строгом соотношении плазмообразующих газов

Ток дуги I , А	Коэффициент использования материала, %, при суммарном расходе плазмообразующих газов, л/мин		
	$1,0 \cdot (Q_{Ar0} + Q_{N0})$	$1,17 \cdot (Q_{Ar0} + Q_{N0})$	$1,33 \cdot (Q_{Ar0} + Q_{N0})$
$0,8 \cdot I_0$	3,53	1,59	0,63
$1,0 \cdot I_0$	7,76	5,69	4,42
$1,2 \cdot I_0$	12,29	10,95	8,22

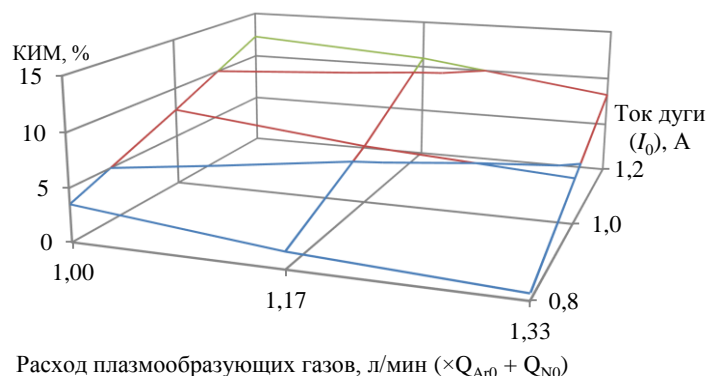


Рис. 6. Коэффициент использования материала (КИМ) во второй итерации

В результате варьирования значений тока дуги и суммарного расхода плазмообразующих газов в определенном соотношении при фиксации остальных параметров напыления на уровне базовых значений установлено, что при увеличении суммарного расхода плазмообразующих газов происходит уменьшение КИМ.

Таким образом, для дальнейших исследований базовое значение тока дуги фиксируется на уровне $1,2 \cdot I_0$, а остальные параметры остаются без изменений.

В ходе исследования в третьей итерации проводили варьирование значений дистанции напыления в диапазоне $(0,83-1,17)h_0$ и расхода транспортирующего газа в диапазоне $(0,75-1,25)Q_{тр0}$, все остальные параметры фиксировали в соответствии с их базовыми значениями. Результаты представлены в табл. 5 и 6 и на рис. 7.

Таблица 5

Привес на образцах в третьей итерации при изменении дистанции напыления и расхода транспортирующего газа

Дистанция напыления h , мм	Привес на образцах, г, при расходе транспортирующего газа $Q_{тр}$, л/мин		
	$0,75 \cdot Q_{тр0}$	$1,0 \cdot Q_{тр0}$	$1,25 \cdot Q_{тр0}$
$0,83 \cdot h_0$	0,1682	0,1931	0,1699
$1,0 \cdot h_0$	0,1186	0,1467	0,1389
$1,17 \cdot h_0$	0,1140	0,1292	0,1151

Таблица 6

Коэффициент использования материала в третьей итерации при изменении дистанции напыления и расхода транспортирующего газа

Дистанция напыления h , мм	Коэффициент использования материала, %, при расходе транспортирующего газа $Q_{тр}$, л/мин		
	$0,75 \cdot Q_{тр0}$	$1,0 \cdot Q_{тр0}$	$1,25 \cdot Q_{тр0}$
$0,83 \cdot h_0$	12,70	14,58	12,83
$1,0 \cdot h_0$	8,95	11,07	10,49
$1,17 \cdot h_0$	8,61	9,75	8,69

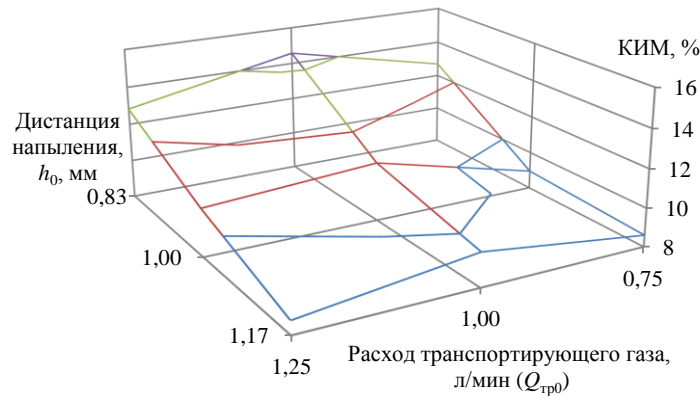


Рис. 7. Коэффициент использования материала (КИМ) в третьей итерации

В результате варьирования значений дистанции напыления и расхода транспортирующего газа при фиксации остальных параметров напыления на уровне базовых значений установлено, что при уменьшении дистанции напыления повышается КИМ, в то время как при изменении значений расхода транспортирующего газа в диапазоне варьирования наблюдаются локальные экстремумы, т. е. оптимальные значения расхода газа.

Таким образом, для дальнейших исследований базовое значение дистанции напыления фиксируется на уровне $0,83h_0$, прочие параметры остаются без изменений.

В целом следует отметить, что выявленные тенденции влияния параметров напыления могут иметь некоторые ограничения:

- увеличение тока дуги ограничивается возможностями источника питания и ограничением энергетики процесса из-за недопустимости перегрева напыляемой детали;
- уменьшение соотношения расходов плазмообразующих газов аргона и азота ограничивается возможностью выхода из строя плазмотрона при недостатке основного плазмообразующего газа аргона ввиду его склонности «укорачивать» длину электрической дуги между электродом и соплом;
- уменьшение суммарного расхода плазмообразующих газов аргона и азота ограничивается возможностью выхода из строя плазмотрона за счет перегрева газовой смеси;
- уменьшение дистанции напыления ограничивается процессом перемещения плазмотрона (взаимное расположение детали и плазмотрона, геометрическая форма поверхности напыляемой детали) и возможностью перегрева напыляемой детали из-за воздействия плазменной струи.

Проведены исследования влияния технологических свойств порошкового материала на процесс его нанесения методом плазменного напыления. С этой целью проведено разделение исходного порошкового материала на пять более узких фракций в соответствии со стандартными размерами ячеек сеток для просеивания по ГОСТ 6613–86, мкм: 50–63, 63–80, 80–100, 100–125, 125–140. Проведен процесс нанесения керамического слоя покрытия состава $ZrO_2-7\%$ (по массе) Y_2O_3 из порошковых материалов узких фракций по скорректированным базовым режимам. Результаты расчета КИМ представлены в табл. 7.

Таблица 7

Коэффициент использования материала (КИМ) для разного диапазона фракций

Диапазон фракции, мкм	Среднее значение диапазона фракции, мкм	КИМ, %
50–63	56,5	28,75
63–80	71,5	16,61
80–100	90	10,20
100–125	112,5	7,62
125–140	132,5	4,92

В результате исследования показано, что КИМ при нанесении покрытия методом плазменного напыления тем выше, чем меньше фракция используемого порошкового материала. С целью анализа полученных результатов проведена их аппроксимация методом наименьших квадратов [18]. Предположим, что функция зависимости КИМ (η) от среднего значения диапазона фракции (D) имеет вид $\eta(D) = a \cdot D^b$, после чего логарифмированием приводится к виду $y(x) = ax + b$:

$$\ln(\eta(D)) = b \cdot \ln D + \ln a.$$

Далее коэффициенты a и b вычисляются по формулам [16]

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2},$$

$$a = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i}{n} \right),$$

где $x_i = \ln D_i$, $y_i = \ln \eta_i$.

Достоверность аппроксимации определяется коэффициентом детерминации R^2 , который в свою очередь является квадратом коэффициента корреляции r :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta(D_i))^2}{\sum_{i=1}^n \left(\eta_i - \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i}{n} \right)^2},$$

$$r = \sqrt{R^2},$$

где $\eta(D_i)$ – значение функции аппроксимирующей зависимости в точке D_i .

Коэффициент корреляции r характеризует тесноту связи экспериментальных параметров с уравнением регрессии. По шкале Чеддока значения $0,7 \leq r \leq 0,9$ соответствуют высокой корреляционной связи, при $0,9 \leq r \leq 0,99$ – очень высокой.

В результате вычислений аппроксимирующая зависимость КИМ от среднего значения диапазона фракции имеет вид $\eta(D) = 86366,7 \cdot D^{-1,995}$ при $R^2 = 0,993$, $r = 0,996$.

Графический результат вычислений представлен на рис. 8.

При проведении практического эксперимента и его аналитической обработке установлено, что с очень высокой точностью коэффициент использования керамического порошкового материала при плазменном напылении обратно пропорционален квадрату среднего значения диапазона фракции в пределах от 50 до 150 мкм. При этом речь идет о порошковом материале, изготовленном одним методом, имеющим одинаковый химический состав и форму частиц.

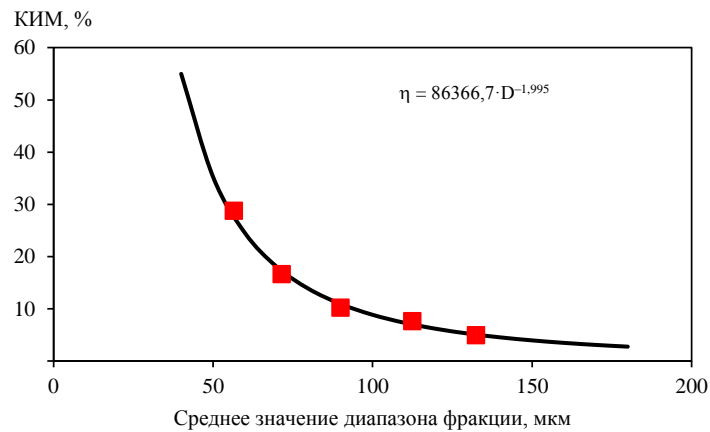


Рис. 8. Зависимость коэффициента использования материалов (КИМ) от среднего значения диапазона фракции

Заключения

При проведении исследований влияния параметров нанесения керамического слоя теплозащитного покрытия состава $ZrO_2-7\%$ (по массе) Y_2O_3 методом плазменного напыления на производительность технологического процесса получена зависимость КИМ от параметров напыления. Установлено, что к повышению значений КИМ при плазменном напылении приводит:

- увеличение тока дуги, однако его увеличение ограничивается возможностями источника питания и ограничением энергетике процесса из-за недопустимости перегрева напыляемой детали;
- уменьшение соотношения расходов плазмообразующих газов аргона и азота, однако его уменьшение ограничивается возможностью выхода из строя плазматрона при недостатке основного плазмообразующего газа аргона ввиду его склонности «укорачивать» длину электрической дуги между электродом и соплом;
- уменьшение суммарного расхода плазмообразующих газов аргона и азота, однако его уменьшение ограничивается возможностью выхода из строя плазматрона вследствие перегрева газовой смеси;
- уменьшение дистанции напыления, однако ее уменьшение ограничивается процессом перемещения плазматрона (взаимное расположение детали и плазматрона, геометрической формы поверхности напыляемой детали) и возможностью перегрева напыляемой детали из-за воздействия плазменной струи;
- уменьшение фракционного состава порошкового материала. С очень высокой точностью коэффициент использования керамического порошкового материала при плазменном напылении обратно пропорционален квадрату среднего значения диапазона фракции в пределах от 50 до 150 мкм. При этом речь идет о порошковом материале, изготовленном одним методом, имеющим одинаковый химический состав и форму частиц.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологии нанесения керамических слоев теплозащитных покрытий методом плазменного напыления.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Хасуй А. Техника напыления / пер. с яп. С.Л. Масленникова; под ред. В.С. Блохина, Е.В. Мельникова. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.

2. Гречанюк Н.И., Кучеренко П.П., Гречанюк И.Н. и др. Современные теплозащитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей и оборудование для их получения // Наукові нотатки. 2011. № 31. С. 92.
3. Gurrappa I., Sambasiva Rao A. Thermal barrier coatings for enhanced efficiency of gas turbine engines // Surface Coatings Technol. 2006. No. 201. P. 3016. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.06.026.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Высокоэффективное охлаждение лопаток горячего тракта ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 (47). С. 3–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14.
5. Тренингов И.А., Заводов А.В., Петрушин Н.В. Исследование кристаллической структуры и микроструктуры жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ, синтезированного методом селективного лазерного сплавления, после высокотемпературных механических испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-57-65.
6. Лощинин Ю.В., Будиновский С.А., Размахов М.Г. Теплопроводность теплозащитных легированных оксидами РЗМ покрытий $ZrO_2-Y_2O_3$, полученных магнетронным нанесением // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 42–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-42-49.
7. Доронин О.Н., Артеменко Н.И., Стехов П.А., Воронов В.А. Нанесение керамических слоев теплозащитных покрытий на основе систем $Gd_2O_3-ZrO_2-HfO_2$ и $Sm_2O_3-Y_2O_3-HfO_2$ // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.11.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
8. Самсонов Г.В., Борисова А.Л., Жидкова Т.Г. и др. Физико-химические свойства окислов: справочник. М.: Металлургия, 1978. 472 с.
9. Kablov E.N., Karachevtsev F.N. Vaporization and thermodynamics of ceramics based on the $La_2O_3-Y_2O_3-HfO_2$ system studied by the high-temperature mass spectrometric method // Rapid Communications in Mass Spectrometry. 2018. Vol. 32. No. 9. P. 686–694.
10. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Горлов Д.С., Журавлева П.Л. Исследование влияния подготовки поверхности и ассистированного осаждения на структуру и свойства эрозионно-стойкого ионно-плазменного покрытия // Труды ВИАМ. 2018. № 10 (70). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.11.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-62-73.
11. Matsumoto K., Itoh Y., Kameda T. EB-PVD process and thermal properties of hafnia-based thermal barrier coating // Science and Technology of Advanced Materials. 2003. No. 4. P. 153. DOI: 10.1016/S1468-6996(03)00009-3.
12. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2013. 406 с.
13. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление / пер. с яп. В.Н. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
14. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. 184 с.
15. Газотермическое напыление: учеб. пособие / под общ. ред. Л.Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
16. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование: учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
17. Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. М.: Машиностроение, 1987. 192 с.
18. Кибзун А.И., Горянова Е.Р., Наумов А.В., Сиротин А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика. Базовый курс с примерами и задачами. М.: Физматлит, 2002. 224 с.

References

1. Hasui A. *Spraying technique*. Ed. V.S. Blokhin, E.V. Melnikov. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 288 p.
2. Grechanyuk N.I., Kucherenko P.P., Grechanyuk I.N. et al. Modern heat-shielding coatings for gas turbine engine blades and equipment for their production. *Naukovi notatki*, 2011, no. 31, p. 92.

3. Gurrappa I., Sambasiva Rao A. Thermal barrier coatings for enhanced efficiency of gas turbine engines. *Surface Coatings Technol.*, 2006, no. 201, pp. 3016. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.06.026.
4. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Svetlov I.L. Highly efficient cooling of GTE hot section blades. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 3–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14.
5. Treninkov I.A., Zavodov A.V., Petrushin N.V. Research of crystal structure and microstructure of the ZhS32-VI nickel-base superalloy synthesized by selective laser fusion method, after high-temperature mechanical tests. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-57-65.
6. Loshchinin Yu.V., Budinovskiy S.A., Razmakhov M.G. Heat conductivity of heat-protective coatings ZrO_2 – Y_2O_3 alloyed by REM oxides obtained by magnetron application. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 42–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-42-49.
7. Doronin O.N., Artemenko N.I., Stekhov P.A., Voronov V.A. Deposition of ceramic layers of heat protection coatings based on the system Gd_2O_3 – ZrO_2 – HfO_2 and Sm_2O_3 – Y_2O_3 – HfO_2 . *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 24, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-129-142.
8. Samsonov G.V., Borisova A.L., Zhidkova T.G. et al. *Physical and chemical properties of oxides: a reference book*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 472 p.
9. Kablov E.N., Karachevtsev F.N. Vaporization and thermodynamics of ceramics based on the La_2O_3 – Y_2O_3 – HfO_2 system studied by the high-temperature mass spectrometric method. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2018, vol. 32, no. 9, pp. 686–694.
10. Aleksandrov D.A., Muboyadzhyan S.A., Zhuravleva P.L., Gorlov D.S. Investigation of the effect of surface preparation and ion-assisted deposition on the structure and properties of erosion-resistant ion-plasma coating. *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 25, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-62-73.
11. Matsumoto K., Itoh Y., Kameda T. EB-PVD process and thermal properties of hafnia-based thermal barrier coating. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2003, no. 4, pp. 153. DOI: 10.1016/S1468-6996(03)00009-3.
12. Sosnin N.A., Ermakov S.A., Topolyansky P.A. *Plasma technologies. Guide for engineers*. St. Petersburg: Publishing house of Polytech. Univ., 2013, 406 p.
13. Hasui A., Morigaki O. *Surfacing and spraying*. Trans. from Japanese. Ed. V.S. Stepin, N.G. Shesterkin. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 240 p.
14. Kudinov V.V. *Plasma coatings*. Moscow: Nauka, 1977, 184 p.
15. *Thermal spraying: textbook*. Ed. L.H. Baldaev. Moscow: Market DS, 2007, 344 p.
16. Kudinov V.V., Bobrov G.V. *Spray coating. Theory, technology and equipment: textbook for universities*. Moscow: Metallurgiya, 1992, 432 p.
17. Sidorov A.I. *Restoration of machine parts by spraying and welding*. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 192 p.
18. Kibzun A.I., Goryanova E.R., Naumov A.V., Sirotin A.N. *Theory of Probability and Mathematical Statistics. Basic course with examples and tasks*. Moscow: Fizmatlit, 2002, 224 p.

Информация об авторах

Артемченко Никита Игоревич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Татарников Сергей Владимирович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Доронин Олег Николаевич, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Nikita I. Artemenko, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey V. Tatarnikov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Oleg N. Doronin, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 05.12.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.12.2022.

The article was submitted 05.12.2022; approved and accepted for publication after reviewing 12.12.2022.