
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.793

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

© 2021 г. А. А. Ковалев^{1,*}, А. С. Краско^{1,**}

¹ *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

**e-mail: kovalevarta@gmail.com*

***e-mail: krasko_as@mail.ru*

Поступила в редакцию 07.12.2020 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

В статье рассматриваются влияния основных параметров газотермического напыления на прочность сцепления покрытия с поверхностью основы. На этапах нагрева, ускорения, переноса и контакта частиц раскрываются взаимосвязи параметров процесса напыления и факторов, определяющих прочность сцепления напыляемого материала с поверхностью основы. Формализованы зависимости прочности сцепления от технологических параметров и режимов напыления на операциях нанесения и механической обработки функциональных стойких покрытий.

Ключевые слова: функциональные стойкие покрытия, газотермическое напыление, прочность сцепления, адгезия, технологические режимы, технологический процесс, направленное формирование показателей качества

DOI: 10.31857/S0235711921030081

В настоящее время возрастает актуальность проблемы обеспечения заданных эксплуатационных свойств изделий современного машиностроения, работающих в условиях многофакторных воздействий. В процессе эксплуатации такие изделия подвержены значительным тепловым и силовым факторам, а также интенсивному изнашиванию. Рассматривая условия работы ответственных изделий авиа- и двигателестроения (сопла, лопатки, валы, корпуса камер сгорания, детали гидравлики и газотурбинных двигателей), нефтегазовой промышленности (детали установок погружных электроцентробежных насосов, детали различных уплотнений, запорной арматуры) можно выделить основные виды изнашивания их поверхностей: абразивное, гидроабразивное, гидроэрозионное, коррозионное и усталостное изнашивание.

Повышение требований к износостойкости рассматриваемых изделий приводит к усложнению их конструкции и применению труднообрабатываемых материалов высокой стоимости. С целью сокращения производственных затрат целесообразно применение ресурсосберегающих технологий, базирующихся на рациональном использовании и наилучшем сочетании ресурсов производства.

К таким технологиям относится нанесение функциональных покрытий для обеспечения заданных показателей качества поверхностей деталей. Наиболее перспективным методом нанесения функциональных стойких покрытий в условиях современного мелкосерийного производства является газотермическое напыление и, в особенности, его разновидность, плазменное напыление [1, 2]. Однако получение заданных эксплуатационных свойств рассматриваемых деталей усложняется отсутствием обоб-

ценных достоверных данных по нанесению стойких покрытий и недостатком времени на отработку технологии в условиях мелкосерийного производства.

Стабильности получаемых эксплуатационных свойств можно достигнуть за счет направленного формирования показателей качества изделий в процессе их изготовления [3–5]. На основании анализа работ [6–22] в случае применения газотермических покрытий одним из определяющих и комплексных показателей качества предлагается рассмотреть прочность сцепления покрытия с основой σ_s . Поэтому задача исследования влияния параметров газотермического напыления на прочность сцепления функциональных стойких покрытий является актуальной.

На основании работ [3–5] сформулируем определение термина “направленное формирование эксплуатационных свойств изделий” – стратегия разработки технологического процесса (операции), направленная на достижение заданных свойств изделий с максимальной производительностью и минимальными затратами, посредством учета взаимосвязей формируемых показателей качества с параметрами процесса обработки.

Формирование множества значений показателей качества на j -й операции (этапе) технологического процесса, согласно теории наследственности, представляют уравнением [3]

$$\{P_i\}_j = \{S_i\}_j \{P_i\}_{j-1} + \sum_l \{k_{il}\}_j \{P_{ul}\}_l, \quad (1)$$

где $\{P_{ij}\}$, $\{P_{ij-1}\}$ – множества значений показателей качества, характеризующее состояние детали после выполнения технологических операций (этапов) j и $(j-1)$; $i = 1, \dots, n$; $\{S_i\}_j$ – множество коэффициентов трансформации, определяющих изменение показателей качества детали вследствие прямого технологического воздействия на j -м этапе (уровень операции или этапа); $\{k_{il}\}_j$ – множество коэффициентов, характеризующих влияние показателей качества, формируемых на предыдущих этапах (операциях) технологического процесса, $1 \leq l \leq (j-1)$; $\{P_{ul}\}_l$ – множество u -х показателей качества, сформированных на l -м этапе технологического процесса и оказывающих влияние на i -й показатель качества на j -м этапе.

Основной задачей при исследовании закономерностей направленного формирования показателей качества является определение коэффициентов трансформации, которые позволяют установить значение изменений свойств изделий в ходе технологического процесса.

Коэффициент трансформации зависит от технологических режимов, условий реализации метода воздействия (обработки) и случайных воздействий

$$(S_i)_j = f[\{Z_i\}_j, \{K_2\}_j, \{K_3\}_j], \quad (2)$$

где $\{Z_i\}_j$ – множество технологических параметров и режимов j -го этапа технологического процесса; $\{K_2\}_j$ – условия реализации метода воздействия (обработки) j -го этапа технологического процесса; $\{K_3\}_j$ – воздействия случайного характера j -го этапа технологического процесса.

Для вновь создаваемого показателя качества зависимость (1) с учетом (2) следует записывать в функциональном виде

$$(P_i)_j = f[(P_i)_{j-1}, \{P_{ul}\}_l, \{Z_i\}_j, \{K_2\}_j, \{K_3\}_j], \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, n, \quad u = 1, \dots, (n-1), \quad 1 \leq l \leq (j-1),$$

где $(P_i)_j$ – i -й показатель качества, формируемый на j -м этапе технологического процесса; $(P_i)_{j-1}$ – i -й показатель качества, полученный на предыдущей операции (этапе) технологического процесса; n – число показателей качества.

Для реализации стратегии направленного формирования показателей качества изделия необходимо определить, какие технологические параметры и режимы $\{Z\}$, являются основными факторами и должны учитываться одновременно в зависимостях (1) и (2) или только в (3).

Адгезия покрытия с основой или когезия слоя покрытия с промежуточными слоями определяются механической и химической связями, которые зависят от температуры Θ_c , давления p_c , времени контакта τ_c частиц с поверхностью напыления, а также показателями качества поверхности основы P_b [8, 15, 19, 20]. Помимо этого, указанные параметры влияют на остаточные напряжения, возникающие в покрытии $\sigma_{r,c}$ [8]. Таким образом, прочность сцепления можно представить соотношением

$$\sigma_s(\sigma_a, \sigma_k, \sigma_{r,c}) \approx f(\Theta_c, p_c, \tau_c, P_b),$$

где σ_a – прочность адгезии покрытия с основой, МПа; σ_k – когезионная прочность, МПа; $\sigma_{r,c}$ – остаточные напряжения первого рода в покрытии, МПа; Θ_c – температура контакта частицы с поверхностью напыления, К; p_c – давление на контакте частицы с поверхностью напыления, МПа; τ_c – время контакта частицы с поверхностью напыления, с; P_b – показатели качества поверхности основы.

Температура контакта частиц с поверхностью напыления зависит от этапов нагрева, ускорения и переноса частиц (рис. 1) и ее можно представить выражением

$$\Theta_c = \Theta_{p,c} + \Theta_e + \Theta_b = \Theta_{p,h} - \Delta\Theta_{p,f} + \Theta_e + \Theta_b,$$

где $\Theta_{p,c}$ – температура частиц в момент контакта с поверхностью напыления, К; $\Theta_{p,h}$ – температура частиц на выходе из зоны нагрева, К; $\Delta\Theta_{p,f}$ – разность температуры частиц на выходе из зоны нагрева и температуры частиц в момент контакта с поверхностью напыления, К; Θ_e – температура, возникающая на контакте, вызванная переходом кинетической энергии частиц в тепловую, К; Θ_b – температура поверхности напыления, К.

Анализ процесса газотермического напыления в работах [7–12, 17, 18] позволяет сделать вывод о том, что температура $\Theta_{p,h}$ зависит от интенсивности нагрева и времени нахождения частиц в зоне нагрева, а также от эффективного коэффициента полезного действия (КПД) нагрева частиц

$$\begin{aligned} \Theta_{p,h} &\approx f(i_1, \tau_1, \eta_e), & i_1 &\approx f(\Theta_h, \alpha_\Theta, v_{j,h}, s, K_m), \\ \Theta_h &\approx f(N_q, K_h, K_g, G_g, G_m), & v_{j,h} &\approx f(G_g, K_g, K_n), \\ \tau_1 &= l_h/v_{p,h}, & l_h &\approx f(K_g, l_a), & v_{p,h} &\approx f(v_{j,h}), \\ l_a &\approx f(N_q, G_g, K_g), & \eta_e &= \Delta H_p/N_q, & N_q &= \eta_s N_s, \end{aligned}$$

где i_1 – интенсивность нагрева частиц на участке нагрева, К/с; τ_1 – время нахождения частиц на участке нагрева, с; η_e – эффективный КПД нагрева частиц, $\eta_e = 0.05$ – 0.9 [8]; Θ_h – температура среды на участке нагрева, К; α_Θ – коэффициент теплоотдачи горючего газа, Вт/(м² К); $v_{j,h}$ – средняя скорость струи на участке нагрева, м/с; s – характерный размер частиц, мкм; K_m – химический состав и теплофизические свойства материала напыляемых частиц; N_q – тепловая мощность источника нагрева, кВт; K_h – тип и характеристика источника нагрева; G_g – скорость подачи (расход) распыляющего газа, л/мин; G_m – скорость подачи (расход) распыляемого материала, кг/мин; η_s – коэффициент полезного действия распылителя, $\eta_s = 0.3$ – 0.9 [7]; N_s – мощность, подводимая к распылителю, кВт; ΔH_p – энтальпия частиц распыляемого материала, Дж; K_g – теплофизические свойства распыляющего (горючего) газа; K_n – конструктивные параметры зоны ускорения (сопла), к которым относится диаметр d и длина l сопла, а также его профиль P_n ; l_h – средний путь частиц на участке нагрева, м; $v_{p,h}$ – средняя

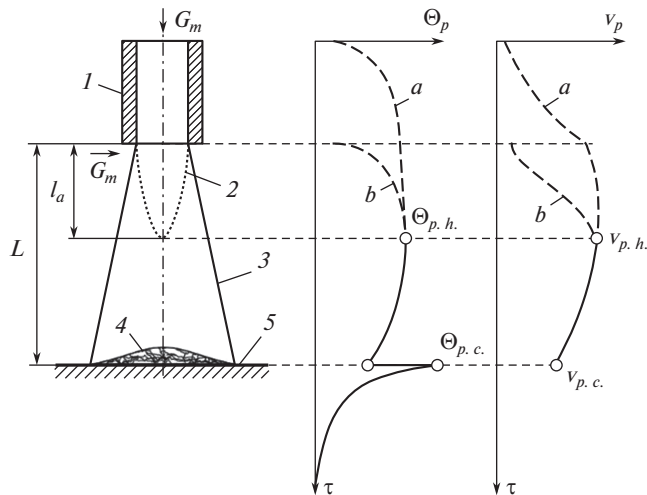


Рис. 1. Изменение температуры (Θ_p) и скорости (v_p) частиц напыляемого материала от времени (τ): 1 – зона нагрева, диспергирования и ускорения частиц напыляемого материала (распылитель); 2 – активный участок струи; 3 – основной участок струи; 4 – формируемое газотермическое покрытие; 5 – поверхность основы; a – кривые роста температуры и скорости частиц при осевой подаче распыляемого материала; b – кривые роста температуры и скорости частиц при радиальной подаче распыляемого материала за срезом сопла.

скорость частиц на участке нагрева, м/с; l_a – средняя длина начального (активного) участка струи, мм.

На основании анализа параметров процесса напыления в работах [7–9, 11, 22], разность температуры частиц на выходе из зоны нагрева и температуры частиц в момент контакта с поверхностью напыления ($\Delta\Theta_{p,j}$) зависит от интенсивности и времени охлаждения частиц, находящейся в основном участке струи

$$\Delta\Theta_{p,j} \approx f(i_2, \tau_2), \quad i_2 \approx f(\Theta_j, v_p, F, K_m, K_j),$$

$$\Theta_j \approx f(N_q, G_g, K_j), \quad K_j \approx f(K_g, K_a),$$

$$v_p \approx f(v_j), \quad \tau_2 = (L - l_a)/v_p, \quad v_j \approx f(v_{p,h}, K_j, L, K_a),$$

где i_1 – интенсивность охлаждения частиц на основном участке струи, К/с; τ_2 – время охлаждения частиц на основном участке струи, с; Θ_j – средняя температура основного участка струи, К; v_p – средняя скорость частиц в основном участке струи, м/с; F – средняя площадь поверхности частицы, мм²; K_j – теплофизические свойства струи; K_a – свойства окружающей среды (атмосферы); v_j – средняя скорость струи на основном участке, м/с; L – дистанция напыления, мм.

С учетом взаимосвязей параметров процесса напыления, рассмотренных в работах [9, 14, 17], температура, возникающая на контакте и вызванная переходом кинетической энергии частицы в тепловую (Θ_e) зависит от

$$\Theta_e \approx f(E_k, \Delta H_p), \quad E_k = (m \cdot v_{p,c}^2)/2,$$

$$v_{p,c} = v_{p,h} - \Delta v_p, \quad \Delta v_p = f(v_p),$$

где E_k – кинетическая энергия частицы в струе, Дж; m – средняя масса частицы, г; $v_{p,c}$ – скорость частицы в момент контакта с поверхностью напыления, м/с; Δv_p – разность скорости частицы на выходе из зоны ускорения и скорости частицы в момент контакта с поверхностью напыления, м/с.

Давление на контакте частицы с поверхностью напыления p_c состоит из двух составляющих, ударного и напорного давления [8, 15]

$$p_c = p_s + p_h, \quad p_s = \mu / (2\rho v_s v_{p,c}), \quad p_h = \rho_p v_{p,c}^2,$$

где p_s – ударное давление, МПа; p_h – напорное давление, МПа; μ – коэффициент жесткости частицы; ρ – плотность жидкости (частицы), г/см³; v_s – скорость звука в жидкости (частицы), м/с; ρ_p – плотность материала частицы, г/см³.

Представив связь рассмотренных факторов в виде схемы (рис. 2), можно выделить наиболее важные факторы, влияющие на температуру и давление на контакте частиц с поверхностью напыления. Схема разбита на четыре блока. В первые три блока объединены управляемые параметры процесса напыления покрытия, в четвертом блоке – управляющие параметры. Блок 1 – технологические параметры зоны нагрева, диспергирования и ускорения частиц напыляемого материала. Блок 2 – технологические параметры зоны переноса частиц до поверхности напыления (струя). Блок 3 – параметры зоны контакта частиц с поверхностью основы. Блок 4 – технологические параметры и режимы газотермического напыления покрытия.

Исключив промежуточные зависимости, получим, что на температуру и давление контакта частиц с поверхностью напыления оказывают прямое воздействие следующие технологические параметры и режимы:

$$\Theta_c \approx f(\eta_s, N_s, K_h, K_n, G_m, K_m, s, m, F, \Delta H_p, G_g, K_g, \alpha_\Theta, K_a, K_j, L, \Theta_b);$$

$$p_c \approx f(\mu, \rho, v_s, G_g, K_g, K_n, K_j, L, K_a, \rho_p).$$

Рассмотренные основные параметры и режимы напыления можно объединить в пять групп:

1. Параметры поверхности напыления, Θ_b ;
2. Параметры напыляемого материала:
 - 2.1. Размерно-массовые параметры напыляемого материала: s, F, m ;
 - 2.2. Химический состав и теплофизические свойства материала напыляемых частиц (K_m): $\Delta H_p, \mu, \rho, v_s, \rho_p$;
3. Конструктивные параметры зоны нагрева и сопла:
 - 3.1. Тип и характеристики зоны нагрева (K_h): N_q, η_s ;
 - 3.2. Конструктивные параметры зоны ускорения (K_n): d, l, P_n ;
4. Параметры горючего газа, струи и атмосферы: $K_j, K_a, K_g, \alpha_\Theta$;
5. Технологические режимы напыления: N_s, G_g, G_m, L .

Время контакта частицы с поверхностью напыления τ_c составляет порядка 10^{-5} – 10^{-9} с [7, 8]. Это означает, что τ_c можно принять как константу и считать, что контакт происходит мгновенно.

Под характерным размером частицы s примем наименьший линейный размер, на который необходимо прогреть частицу. Для частиц различных видов характерные размеры показаны на рис. 3.

В качестве напыляемого материала применяются порошки в виде частиц сферической формы, а также прутки и стержни, диспергируемые в процессе напыления в виде частиц (рис. 3а), при этом $s = D/2$, где D – диаметр частицы. При напылении тугоплавких материалов используются плакированные порошки в виде частиц, состоящих из “ядра” тугоплавкого материала 1 и “оболочки” легкоплавкого материала 2 (рис. 3б), а

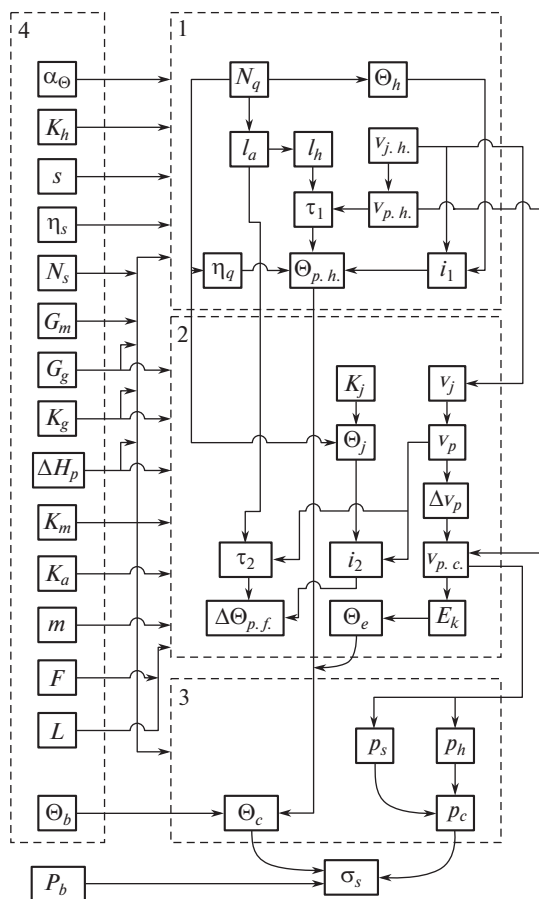


Рис. 2. Схема влияния технологических параметров и режимов газотермического напыления на прочность сцепления покрытия с поверхностью основы: 1 – параметры зоны нагрева, диспергирования и ускорения частиц напыляемого материала; 2 – параметры зоны переноса частиц до поверхности напыления (струя); 3 – параметры зоны контакта частиц с поверхностью основы; 4 – управляющие параметры напыления покрытия.

также порошки, состоящие из частиц в виде пластинок (рис. 3в). В случае плакированных частиц $s = (D - d)/2$, где d – диаметр ядра частицы, и для частиц в виде пластинок $s = H/2$, где H – толщина пластинки.

Операции изготовления деталей с газотермическими покрытиями можно разделить на три этапа: 1) подготовка поверхности основы под напыление (очистка и активация); 2) напыление покрытия; 3) обработка покрытия (изменение свойств, в частности, термообработка, механическая обработка, пропитка, для получения заданных показателей качества поверхности покрытия).

Исходя из проведенного исследования запишем технологические параметры и режимы этапа напыления покрытия $\{Z\}_2$, влияющие на прочность сцепления σ_s

$$\{Z\}_2 = \{N_s, K_h, K_n, K_a, K_g, G_g, K_m, G_m, s, L, \Theta_b\}_2. \quad (4)$$

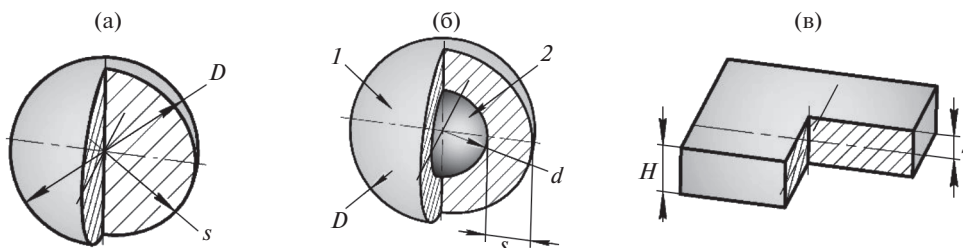


Рис. 3. Характерные размеры сферических (а), планированных (б) и пластинчатых (в) частиц.

Параметры, приведенные в (4), следует уточнять для конкретных способов газотермического напыления (плазменного, детонационного, газопламенного напыления и электродуговой металлизации). В настоящее время наиболее перспективными способами газотермического напыления являются разновидности плазменного напыления, в частности, на воздухе (APS), в условиях динамического вакуума (VPS) и низкого давления (LPPS), сверхзвуковое (SST) и микроплазменное (MPS), позволяющие наносить функциональные стойкие покрытия из широкой номенклатуры материалов, в том числе наноструктурированных [1, 7, 16, 26, 27]. В этой связи, уточним параметры и режимы, указанные в зависимости (4), для плазменного напыления.

Источником нагрева напыляемого материала является плазменная струя, получаемая при прохождении плазмообразующего газа (аргона, водорода, гелия, азота или их смеси, воздуха) через электрическую дугу [12]. Тепловая мощность источника нагрева (дуги) N_q определяется мощностью, подводимой к плазмотрону N_s и коэффициентом его полезного действия, $\eta_s = 0.4-0.75$ [12]. Подводимая мощность определяется силой тока I и напряжением U . Напряжение дуги U_d существенно зависит от длины дуги l_d , которая в свою очередь определяется конструктивными параметрами плазмотрона – длиной l_c и диаметром d_c канала [23].

При плазменном напылении применяются сменные сопла-аноды, которые характеризуются размерами профиля продольного сечения P_n , диаметром d и длиной сопла l [9].

При плазменном напылении наиболее часто применяются материалы в виде порошков, состоящих из частиц сферической формы, поэтому, в качестве размерного параметра выделим диаметр частиц D .

Таким образом, уточним зависимость (4) для плазменного напыления

$$\{Z\}_2 = \{I, U, l_c, d_c, P_n, d, l, K_a, K_g, G_g, K_m, G_m, D, L, \Theta_b\}_2.$$

С учетом взаимосвязей параметров плазменного напыления, конструктивных параметров плазмотронов и показателей качества формируемых покрытий, изложенных в экспериментальных исследованиях и имитационном моделировании процесса плазменного напыления [12, 14, 24, 25], выберем основные технологические параметры и режимы в наибольшей степени влияющие на формируемый показатель прочности сцепления

$$\{Z\}_2 = \{I, U, P_n, d, K_a, K_g, G_g, K_m, G_m, D, L, \Theta_b\}_2. \quad (5)$$

На основании анализа работ [10–12, 15] выделим основные показатели качества поверхности основы

$$P_b = (Ra, S, \sigma_{r,b}), \quad (6)$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля поверхности, мкм; S – степень очистки поверхности от загрязнений (по ISO 8501); $\sigma_{r,b}$ – остаточные напряжения первого рода в поверхностном слое основы, МПа.

На этапе напыления покрытия формируется показатель прочности сцепления, поэтому с учетом (5), (6) запишем зависимость (3) для операции плазменного напыления

$$(\sigma_s(\sigma_a, \sigma_r, \sigma_k))_2 = f\{(Ra, S, \sigma_{r,b})_1, (Z)_2, (K_2)_2, (K_3)_2\}, \quad (7)$$

На третьем этапе показатель прочности сцепления изменяется вследствие влияния технологических параметров и режимов обработки покрытия, а также показателей качества, сформированных на предыдущих операциях (этапе) технологического процесса. Таким образом, зависимость (1) запишем в виде

$$(\sigma_s(\sigma_a, \sigma_r, \sigma_k))_3 = \begin{cases} [\sigma_a]_3 = [S_{\sigma_a}]_3 \cdot [\sigma_a]_2 + k_{I6h7} [P]_2 + k_{o6h7} [T_d]_2, \\ [\sigma_r]_3 = [S_{\sigma_r}]_3 \cdot [\sigma_r]_2 + k_{f5i7} [h]_2 + k_{I6i7} [P]_2, \\ [\sigma_k]_3 = [S_{\sigma_k}]_3 \cdot [\sigma_k]_2 + k_{I6n7} [P]_2 + k_{m6n7} [H_\mu]_2, \end{cases} \quad (8)$$

где P – пористость покрытия, %; T_d – плотность дислокаций, см^{-2} ; h – толщина покрытия, мкм; H_μ – поверхностная микротвердость, МПа.

Полученные формализованные зависимости (7), (8) показателя прочности сцепления от технологических параметров и режимов операций подготовки, напыления и обработки газотермических покрытий дают возможность реализовать направленное формирование показателей качества деталей в процессе их изготовления.

Это позволит повысить стабильность формирования эксплуатационных свойств деталей с функциональными стойкими покрытиями в условиях мелкосерийного производства при частой смене обрабатываемых изделий, напыляемых материалов и недостаточном времени на отработку технологии.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробов Ю.С. Международная конференция-выставка по термическому напылению ITSC 2010: Обзор и анализ // Материалы международного научно-практического семинара (28–29 октября 2010 г.). Термическое напыление. Современное состояние. 2010. С. 4.
2. Абагачиев А.Ю., Ставровский М.Е., Сидоров М.И. Типологические противоизносные покрытия // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 1. С. 73.
3. Васильев А.С. и др. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / Под ред. А.И. Кондакова М.: Машиностроение, 2005. 352 с.
4. Дальский А.М., Базров Б.М., Васильев А.С. и др. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / Под ред. А.М. Дальского. М.: Изд-во МАИ, 2000. 364 с.
5. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. Минск: “Наука и техника”, 1977. 256 с.
6. Воронин Н.А. Эффективная и истинная адгезионная прочность тонких защитных покрытий // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 4. С. 45.
7. Калита В.И., Комлев Д.И. Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой. М.: “Лидер М”, 2008. 388 с.
8. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
9. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.

10. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. пособие по курсу “Технология конструкционных материалов”. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 360 с.
11. Балдаев Л.Х., Борисов В.Н., Вахалин В.А. и др. Газотермическое напыление: учеб. пособие / Под ред. Л.Х. Балдаева М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
12. Ильюшенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А. и др. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. Минск: Беларус. навука, 2011. 356 с.
13. Ярославцев В.М. Обработка газотермических покрытий резанием: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 89 с.
14. Кузьмин В.И., Голубев М.П., Тырышкин П.А., Долматов А.В. Визуализация газодинамической структуры плазменных потоков напылительного плазматрона “ПНК-50” теневым методом // Вестник Югорского государственного университета. 2018. № 4 (51). С. 61.
15. Tillmann W., Hagen L., Schaak C., Liß J., Schaper M., Hoyer K.-P., Aydinöz M.E., Garthe K.-U. Adhesion of HVOF-sprayed WC-Co coatings on 316L substrates processed by SLM // J. of thermal spray technology. 2020. № 29. P. 1396.
16. Ashok Meghwal, Ameer Anupam, Murty B.S., Christopher C. Berndt, Ravi Sankar Kottada, Andrew Siao Ming Ang. Thermal spray high-entropy alloy coatings: a review // J. of thermal spray technology. 2020. № 29. P. 857.
17. Mauer G., Vaßen R., Stöver D. Plasma and particle temperature measurements in thermal spray: approaches and applications // J. of thermal spray technology. 2011. № 3 (20). P. 391.
18. Jing Xue, Min Huang. Optimization of plasma spray process VIA orthogonal test design method, SVM, and improved PSO // International journal of materials, mechanics and manufacturing. 2017. № 3 (5). P. 153.
19. Lyphout C., Nysten P., Östergren L.G. Adhesion strength of HVOF sprayed IN718 coatings // J. of thermal spray technology. 2012. № 21. P. 86.
20. Yongjing Cui, Mengqiu Guo, Changliang Wang & Zhihui Tang. Adhesion enhancement of a metallic coating fabricated by detonation gun spray on a modified polymer matrix composite // J. of thermal spray technology. 2019. № 28. P. 1730.
21. Vignesh S., Shanmugam K., Balasubramanian V., Sridhar K. Identifying the optimal HVOF spray parameters to attain minimum porosity and maximum hardness in iron based amorphous metallic coatings // Defence Technology. 2017. № 13. P. 101.
22. Pulido-Gonzalez N., Garcia-Rodriguez S., Campo M., Rams J., Torres B. Application of DOE and ANOVA in optimization of HVOF spraying parameters in the development of new Ti coatings // J. of thermal spray technology. 2020. № 29. P. 384.
23. Клименко Г.К., Ляпин А.А. Генераторы плазмы: метод. указания к выполнению курсового проекта. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 62 с.
24. Ramachandran C.S., Balasubramanian V., Ananthapadmanabhan P.V. Multiobjective optimization of atmospheric plasma spray process parameters to deposit yttria-stabilized zirconia coatings using response surface methodology // J. of thermal spray technology. 2011. № 20. P. 590.
25. Nylé P., Hansbo A., Friis M., Pejryd L. Investigation of particle in-flight characteristics during atmospheric plasma spraying of yttria stabilized ZrO₂: Part 2. Modeling // J. of thermal spray technology. 2001. № 10. P. 359.
26. Оковитый В.А., Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.В., Асташинский В.М. Плазматрон для нанесения покрытий // Наука и техника. 2019. № 18 (1). С. 5.
27. Кравченко И.Н., Карелина М.Ю., Зубрилина Е.М., Коломейченко А.А. Ресурсосберегающие технологии получения функциональных наноструктурированных покрытий высокоскоростными методами нанесения // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. № 3 (82). С. 19.