

Оригинальная статья

УДК 691.175:533.9

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-37-45

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО
НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

© 2024 г. А. Э. Юницкий, М. И. Цырлин

ЗАО «Струнные технологии» (Республика Беларусь, 220089, Минск, ул. Железнодорожная, 33)

Аннотация. В работе предложена концепция комплексного моделирования плазменного напыления покрытий на основе порошковых полимерных материалов. Представлено физико-математическое описание процесса путем разбивки его на несколько основных стадий, комплексного моделирования всех стадий плазменного напыления со сквозной передачей данных с одной стадии на другую. Процесс плазменного напыления был разбит на следующие стадии: генерация плазменной струи; ввод распыляемого порошка в плазменную струю, его нагрев и ускорение; взаимодействие плазменной струи и расплавленных частиц порошка с основанием. Температурное распределение открытой плазменной струи получено аппроксимацией экспериментальных данных для различных типов плазменных установок, конструкций плазмотронов и режимов их работы. Скорость частиц порошка определялась с учетом закона Ньютона. Прогрев, плавление полимерных частиц при движении в высокотемпературной газовой струе было сведено к решению дифференциального уравнения теплопроводности Фурье-Кирхгофа в сферических координатах. Формирование полимерного слоя при плазменном осаждении представлено с помощью выражения Мадежски. Результатом моделирования плазменного процесса является информация о характере деформирования расплавленных частиц порошка при соударении с основанием, толщине осажденного покрытия, его пористости, прочности адгезионного соединения и др. Разработанная компьютерная модель позволяет проводить оптимизацию технологических режимов нанесения плазменных полимерных покрытий. Программно-математический комплекс применен для исследования и оптимизации процесса напыления эпоксидных покрытий. При сравнении расчетных и экспериментальных данных сделан вывод об адекватности разработанной математической модели. Технология плазменного напыления порошковых полимерных покрытий предлагается для окраски крупногабаритных транспортных средств, в том числе струнного транспорта (юнимобилей), что невозможно традиционными методами порошкового напыления.

Ключевые слова: порошковые полимерные материалы, плазменные покрытия, математическое моделирование, стадии плазменного процесса, компьютерная модель

Для цитирования: Юницкий А.Э., Цырлин М.И. Математическое моделирование процесса плазменного напыления покрытий на основе порошковых полимерных материалов. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;(4(50)):37–45. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-37-45](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-37-45)

Original article

**MATH MODELING OF PROCESS OF PLASMA SPRAYING OF COATINGS BASED ON
POWDER POLYMER MATERIALS**

© 2024 A. E. Unitsky, M. I. Tsyrlin

Unitsky String Technologies, Inc. (33 Zheleznodorozhnaya St., Minsk, 220089, Republic of Belarus)

Abstract. The paper proposes the concept of complex modeling of plasma spraying of coatings based on powdered polymer materials. A physical and mathematical description of the process is presented by dividing it into several main stages, complex modeling of all stages of plasma spraying with end-to-end data transmission from one stage to another. The plasma spraying process was divided into the following stages: generation of a plasma jet; introduction of the sprayed powder into the plasma jet, its heating and acceleration; interaction of the plasma jet and molten powder particles with the base. The temperature distribution of the open plasma jet is obtained by approximating experimental data for various types of plasma installations, plasma torch designs and their operating modes. The velocity of the powder particles was determined taking into account Newton's law. The heating and melting of polymer particles during movement in a high-temperature gas jet was reduced to solving the Fourier-Kirchhoff differential equation of thermal conductivity in spherical coordinates. The formation of a polymer layer during plasma deposition is represented using the Madezhsky expression. The result of modeling the plasma process is information about the nature of deformation of molten powder particles upon impact with the base, the thickness of the deposited coating, its porosity, the strength of the adhesive compound, etc. The developed computer model makes it possible to optimize the technological modes of applying plasma polymer coatings. The software and mathematical complex is used to study and optimize the spraying process of epoxy coatings. When comparing the calculated and experimental data, a conclusion is made about the adequacy of the developed mathematical model. The technology of plasma spraying of powder polymer coatings is proposed for painting large-sized vehicles, including SkyWay transport (unimobiles), which is impossible by traditional powder spraying methods.

Keywords: powder polymer materials, plasma coatings, math modeling, plasma process stages, computer model

For citation: Unitsky A.E., Tsyrlin M.I. Math modeling of process of plasma spraying of coatings based on powder polymer materials. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;(4(50)):37–45. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-37-45](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-37-45)

Введение

Плазменная технология – одна из перспективных технологий нанесения покрытий. Возможность одновременного раздельного и совместного, в том числе последовательного осаждения компонентов различной природы в плазменной струе – эффективный способ создания материалов и покрытий с уникальными свойствами [1; 2].

Получение высококачественных плазменных полимерных покрытий (рис. 1) с заданными свойствами связано с оптимизацией технологии напыления, которая, в основном, осуществляется чисто экспериментальным путем. Из-за сложности и многочисленности физико-химических, механических и других процессов, протекающих в системе плазматрон – плазма – полимер – основа, из-за их тесной взаимозависимости приобретает важное значение разработка математической модели процесса плазменного напыления порошковых полимерных материалов с программной реализацией.

Отсутствие данных о воздействии плазменной струи на процессы структурирования и термоокислительной деструкции полимеров, о влиянии компонентного состава и технологических параметров плазменного процесса на эксплуатационные свойства покрытий ограничивает их практическое использование. В связи с этим проведение исследований в данном направлении является актуальным; полученные результаты позволят совершенствовать технологию форми-

рования плазменных покрытий на основе дисперсных полимеров.

Имеется значительное количество работ, посвященных исследованию взаимодействия дисперсных материалов с плазменными струями, но эти работы либо касаются неорганических материалов [3 – 5], либо ограничиваются решением задач моделирования только отдельных стадий процесса плазменной переработки полимерных материалов с чисто математическим их описанием без конкретной программной реализации [6 – 8].

Целью настоящей работы являлась разработка компьютерной модели плазменного процесса формирования покрытий из дисперсных полимеров с компьютерной реализацией.

Концепция комплексного моделирования процесса плазменного напыления покрытий из порошковых полимерных материалов

В основу разработки математической модели положены:

- разбивка плазменного процесса на несколько основных стадий;
- комплексное моделирование всех стадий плазменного напыления со сквозной передачей данных с одной стадии на другую;
- математическое описание явлений, связанных с генерацией плазмы, струйным течением, взаимодействием дисперсного материала с потоком высокотемпературного газа и плазмы, уда-

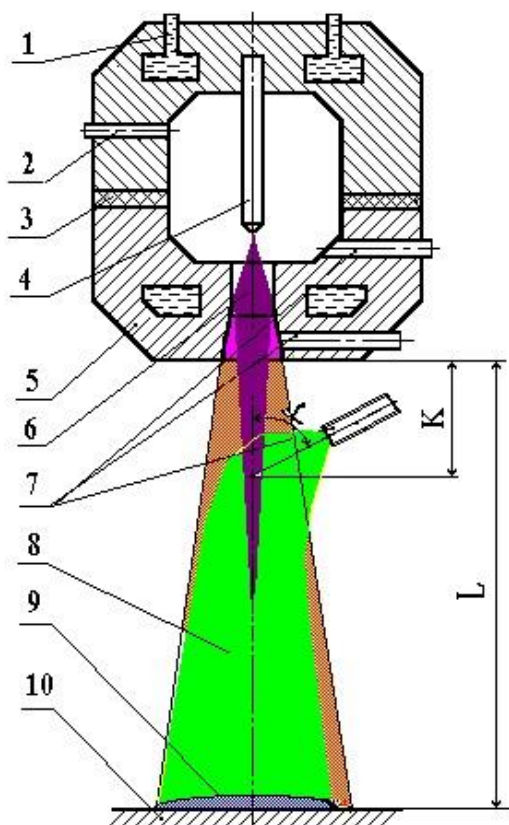


Рис. 1. Схема плазменного процесса нанесения полимерных покрытий:

1 – водяное охлаждение; 2 – ввод плазмообразующего газа; 3 – электронизоляционный блок; 4 – катод плазмотрона; 5 – анод плазмотрона; 6 – плазменная струя; 7 – ввод напыляемого порошка; 8 – плазменная струя с нагретым порошком; 9 – покрытие; 10 – напыляемое изделие (основание); К – дистанция ввода полимера в плазменную струю; L – дистанция напыления; α – угол ввода полимерных частиц в плазменную струю

Fig. 1. Scheme of the plasma process for applying polymer coatings:

1 – water cooling; 2 – input of plasma-forming gas; 3 – electrical insulating block; 4 – plasmatron cathode; 5 – plasma torch anode; 6 – plasma jet; 7 – input of sprayed powder; 8 – plasma jet with heated powder; 9 – coating; 10 – sprayed product (base); K – distance where the polymer is introduced into the plasma jet; L – spraying distance; α – angle of introduction of polymer particles into the plasma jet

ром индивидуальных частиц с основой, формированием из них осажденного слоя;

- учет при моделировании температурных зависимостей свойств плазмообразующих газов и материала покрытий;

- интеграция в состав модели баз данных свойств веществ, участвующих в процессе напыления, технологических режимов, параметров оборудования и другой информации, необходимой для комплексного моделирования;

- введение в состав модели элементов экспертных систем для анализа результатов исследований и выбора наиболее оптимальных режимов изучаемых процессов.

Функционально процесс плазменного напыления (согласно технологическим особенностям) может быть разбит на следующие стадии:

- генерация плазменной струи;
- ввод распыляемого порошка в плазменную струю, его нагрев и ускорение;
- взаимодействие плазменной струи и расплавленных частиц порошка с основанием (рис. 2).

Предпосылками для комплексного моделирования указанных процессов является обеспечение возможности сквозной передачи данных с одной стадии на другую и общность их структуры. Исходя из этого, входными данными для 1-ой стадии процесса взяты: тип установки, энергетические параметры, конструкция плазмотрона, состав, температура и расход плазмообразующего газа на входе в плазмотрон; на выходе стадии генерации – распределение температур и скорости струи на участке от среза плазмотрона до основания.

Данные о температуре, скорости плазменной струи вместе с информацией о природе осаждаемых частиц, их дисперсности и расходе, дистанции ввода и напыления – входные для 2-ой стадии процесса. На выходе этой стадии – массив данных о распределении во времени и пространстве температур, скорости частиц и плазмообразующего газа.

Входные данные для 3-ей стадии процесса: материал основания и его свойства, длительность осаждения и скорость или закон перемещения плазмотрона, а также выходные данные 2-ой стадии процесса. Результатом моделирования плазменного процесса является информация о характере деформирования расплавленных частиц порошка при соударении с основанием, толщине осажденного покрытия, его пористости, прочности адгезионного соединения и др.

При такой схеме реализуется сквозная передача данных от одной стадии процесса к другой и их динамическое изменение при вычислениях. Информация, общая для всех стадий моделирования, включается в базу данных и используется каждой моделью по необходимости. В базе данных могут находиться также результаты промежуточных расчетов всех стадий процесса, что позволит при необходимости осуществлять независимое исследование какой-то отдельной стадии с использованием данных предыдущих расчетов, хранимых в базе данных.

Физико-математическое описание основных стадий процесса

Генерация плазменной струи. Температурное распределение открытой плазменной струи получено аппроксимацией экспериментальных данных для различных типов плазменных установок, конструкций плазмотронов и режимов их работы.



Рис. 2. Схема интегрированной математической модели процесса плазменного напыления покрытий из порошковых полимерных материалов

Fig. 2. Scheme of the integrated mathematical model of the process of plasma spraying of coatings from powder polymer materials

Осевая температура T_g плазменной струи на расстояниях более трех калибров определяется зависимостью

$$T_g = az^b, \quad (1)$$

где z – осевая координата; a, b – коэффициенты, зависящие от режимов работы установки (см. таблицу).

Радиальное распределение температуры на выходе из плазматрона определяется по выражению [9]:

$$\frac{T_g(z, r)}{T_g(z, 0)} = \exp \left[-\ln 2 \left(\frac{r}{R_T} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где r – радиальная координата; R_T – коэффициент, определяемый на основе экспериментальных данных (для установки УПУ-3Д $R_T = z/3,38$, для СВЧ “Фиалка” $R_T = z/3,53$).

Скорость незагруженной плазменной струи составляет

$$w_g = w_{go} \frac{T_g}{T_{go}}, \quad (3)$$

где w_{go} – скорость газа в сечении ввода порошка в поток; T_{go} – температура газа в сечении ввода порошка в поток.

Ввод частиц порошка в плазменную струю, их ускорение и нагрев. Частица материала, попадая в поток газа, движется под действием на нее ряда сил. В общем виде уравнение движения частицы с учетом закона Ньютона имеет следующий вид [10]:

$$m_p \frac{dw_p}{dt} = F_a + F_p + F_g + F_v + F_T + F_m + F_{\mu} + F_B, \quad (4)$$

Значения температурных коэффициентов a и b Values of temperature coefficients a and b

Тип установки	Конструкция плазмотрона	Плазмообразующий газ	a	b
УПУ-3Д	ПП-25	азот	$492,5 + 2,57 \cdot I$	$-0,445 + 7,0 \cdot 10^{-5} \cdot I$
УПУ-3Д	модерниз.	азот	$1074 + 2,07 \cdot I$	$-0,314 - 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot I$
УПУ-3Д	ПП-25	аргон	$219 + 0,34 \cdot I$	$-0,619 - 9 \cdot 10^{-4} \cdot I$
УПУ-3Д	модерниз.	аргон	$284 + 1,94 \cdot I$	$-0,655 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot I$
СВЧ "Фиалка", $N_e = 5$ кВт	—	воздух	$84,21 + 5,41 \cdot 10^5 \cdot G_g$	$-0,79 + 540 \cdot G_g$
СВЧ "Фиалка", $N_e = 5$ кВт	—	азот	$117,5 + 5,62 \cdot 10^5 \cdot G_g$	$-0,75 + 502 \cdot G_g$
СВЧ "Фиалка", $N_e = 10$ кВт	—	воздух	$288,8 + 6,58 \cdot 10^5 \cdot G_g$	$-0,65 + 388 \cdot G_g$
СВЧ "Фиалка", $N_e = 10$ кВт	—	азот	$327,5 + 6,72 \cdot 10^5 \cdot G_g$	$-0,629 + 367 \cdot G_g$
Примечание: N_e – мощность установки; I – ток дуги плазмотрона; G_g – расход плазмообразующего газа.				

где m_p и w_p – масса и скорость частицы порошка; F_a – сила аэродинамического сопротивления; F_p – сила, обусловленная градиентом давления в потоке; F_g – сила тяжести; F_v – сила, обусловленная инерцией вытесненного частицей объема газа; F_T – сила термофореза, обусловленная наличием температурного градиента в потоке; F_m – сила, отражающая ускорение прилегающих к поверхности частицы слоев газа; F_{ω} – сила, обусловленная вращением частицы из-за градиента скорости обтекающего потока; F_B – сила, обусловленная нестационарностью процесса.

Основной из сил, действующих на частицу, является сила аэродинамического сопротивления

$$F_a = 0,5 C_D \ddot{S}_p \rho_g |w_g - w_p| (w_g - w_p), \quad (5)$$

где C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления; $\ddot{S}_p$ – площадь сечения частиц порошка; w_p – скорость частиц порошка; ρ_g – плотность газа.

С учетом выражений (4) и (5) определяется скорость частиц и загруженного газового потока

$$w_p = w_g \sqrt{\frac{3 \rho_g C_D}{2 \rho_p d_p}}; \quad (6)$$

$$w_g' = \exp \left\{ -\frac{G_g}{G_p} \sqrt{\frac{3 \rho_g C_D z}{2 \rho_p d_p}} \right\} w_{g0}, \quad (7)$$

где G_g – расход газа; G_p – расход частиц порошка; ρ_p – плотность частиц порошка.

Основными целевыми процессами, происходящими с напыляемым материалом в потоке при плазменном напылении, являются нагрев и при-

дание направленного движения. Кроме того, при напылении частицы дисперсной фазы активно взаимодействуют с окружающей средой. Теплообмен между частицей и несущим потоком газа осуществляется теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Исследование прогрева, плавления сферической частицы при ее движении в высокотемпературной газовой струе с известным полем скоростей и температур было сведено к решению дифференциального уравнения теплопроводности Фурье-Кирхгофа в сферических координатах:

$$\frac{\partial T_p(r, \tau)}{\partial \tau} = a_p \left(\frac{\partial^2 T_p(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_p(r, \tau)}{\partial r} \right); \quad (8)$$

здесь a_p – коэффициент температуропроводности частицы; r – текущий радиус частицы; τ – время; T_p – температура частицы при начальных и граничных условиях

$$\begin{cases} T_p(r, 0) = T_0; \\ T_p(0, \tau) \neq \infty; \\ \frac{\partial T_p(0, \tau)}{\partial r} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

В этом случае имеем

$$-\frac{\partial T_p(r_p, \tau)}{\partial r} + \frac{q}{\lambda_p} = 0, \quad (10)$$

где r_p – радиус частицы; $q = q_k + q_l$ – тепловой поток к частице за счет конвекции и лучистой энергии; λ_p – теплопроводность частиц порошка.

Величину конвективной составляющей полного теплового потока можно определить как

$$q_k = \alpha(T_g - T_p), \quad (11)$$

где α – коэффициент теплообмена.

Лучистый тепловой поток, действующий на поверхность частицы от источника высокой энергии за счет рассеяния излучения на частицах, подаваемых в поток с начальной температурой T_0 , определяется зависимостью [12]

$$q_l = \frac{Q_{\text{погл}}}{N_p F_p}, \quad (12)$$

где $Q_{\text{погл}}$ – количество поглощенной лучистой энергии; N_p – количество частиц в потоке; F_p – площадь поглощающей поверхности частицы.

Взаимодействие расплавленных частиц с основанием, формирование структуры покрытия. Формирование полимерного слоя при плазменном осаждении происходит в вязкотекучем состоянии путем наложения отдельных частично или полностью расплавленных частиц друг на друга. Взаимодействие двухфазного потока частиц и нагретого газа с основанием и поверхностью формируемого материала сопровождается ударом, деформацией, растеканием, слиянием частиц и монолитизацией слоя.

Процесс формирования покрытия зависит от природы полимера, степени дисперсности, температуры, скорости, агрегатного состояния частиц при соударении, а также структуры и состава материала основы, состояния ее поверхности.

Растекание полимерных частиц наиболее полно описывается с помощью выражения Мадежски [13]

$$\frac{3\xi}{We} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\xi}{1,29} \right)^2 = 1, \quad (13)$$

где $\xi = \frac{D}{d_p} = 0,613We^{0,39}$ – степень деформации частиц; D – диаметр диска после завершения деформации расплавленной частицы (сферы); d_p – диаметр частицы до удара; $We = \rho_p w_p^2 d_p / \sigma$ – критерий Вебера; w_p – скорость частицы в момент удара; σ – поверхностное натяжение материала частицы в расплавленном состоянии; $Re = \rho_p w_p d_p / \mu$ – критерий Рейнольдса; ρ_p – плотность материала частиц; μ – динамическая вязкость расплава, зависящая от многих факторов (от температуры расплава и основы, шеро-

ховатости основы, присутствия добавок в полимерной смеси и др.).

С учетом выражений для критериев We и Re имеем

$$\frac{3\xi\sigma}{\rho_p w_p^2 d_p} + \frac{\mu}{\rho_p w_p d_p} \left(\frac{\xi}{1,29} \right)^2 = 1. \quad (14)$$

Программная реализация модели плазменного напыления полимерных покрытий

Представленное выше физико-математическое описание теплофизических и газодинамических процессов, имеющих место при плазменном напылении порошковых полимерных материалов, практически реализовано в программно-математическом комплексе Plasma Spraying Process of Polymeric Materials (рис. 3). Он разработан с использованием объемно-ориентированной технологии программирования и состоит из нескольких модулей расчетов, в которых реализованы математические описания определенных стадий плазменного напыления.

Задача математического описания 1-ой стадии процесса напыления по определению температуры вдоль струи в работе решена с применением аппроксимации экспериментальных данных для различных типов установок, конструкций плазмотронов и режимов их работы.

Скорость частиц при движении в плазменной струе рассчитывалась с использованием уравнения (4), описывающего взаимодействие высокоскоростной плазменной струи с вводимыми в нее частицами порошка.

С учетом текущей координаты частиц и имеющегося в базе данных двумерного распределения скорости и температуры в незагруженной плазменной струе решалась задача нагрева порошка из условий конвективного и лучистого теплообмена с использованием дифференциального уравнения теплопроводности (8).

Поскольку прямой учет температурной зависимости свойств плазмообразующих газов, материалов покрытий аналитическим способом в качестве переменных при решении уравнений теплопроводности практически невозможен из-за резкого усложнения математической задачи, то эта проблема в модели была решена комплексным численно-аналитическим решением уравнений, описывающих процессы теплообмена и движения частиц порошка. Для этого траектория полета частиц разбивалась во времени или пространстве на n участков, где имеется незначительное изменение температуры. На каждом из участков осуществлялось аналитическое или численное решение уравнений при условии постоянства теплофизических свойств. Протяжен-

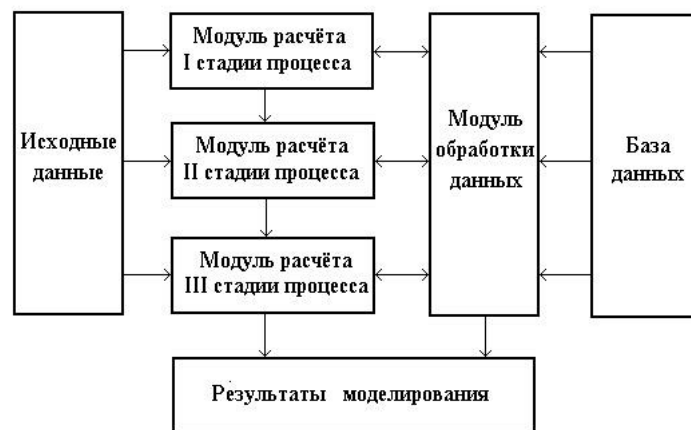


Рис. 3. Структурная схема программно-математического комплекса моделирования плазменного напыления порошковых полимерных материалов

Fig. 3. Block diagram of the software-mathematical complex for modeling plasma spraying of powder polymer materials

ность участков выбиралась в зависимости от градиента температуры. Расчеты осуществлялись пошагово. При этом в качестве начальных условий и входных параметров расчета на участке $n + 1$ использовались результаты расчета на участке n . В результате расчетов 2-ой стадии процесса напыления определялась координата попадания каждой частицы на основание, ее температура и скорость в момент столкновения.

Считая, что частицы перед попаданием на основание имеют шарообразную форму и находятся в жидком или размягченном состоянии, устанавливалась взаимосвязь между их начальной формой и формой после попадания на поверхность с использованием выражения (13). В модели, описывающей 3-ю стадию процесса, осуществляется также геометрическое описание наложения частиц друг на друга при столкновении с основанием, образование пор, формирование рельефа поверхности покрытия с расчетом пористости. С включением ряда экспериментальных зависимостей возможна оценка физико-механических, защитных и других свойств покрытий.

Для подготовки аппроксимационных зависимостей использован пакет программ Statgraph. Программное описание процесса плазменного напыления разработано в среде Foxpro.

В состав компьютерной модели входят базы данных свойств различных веществ, которые могут быть использованы при моделировании разных вариантов процесса напыления (плазмообразующие газы, материалы покрытий, оснований), и их температурные зависимости в виде аппроксимационных уравнений. Эти данные при необходимости подключаются к моделям расчетов.

Программно-математический комплекс применен для исследования и оптимизации процесса нанесения плазменных эпоксидных покрытий. Установлен немонотонный характер зави-

симости пористости эпоксидных покрытий от технологических режимов напыления. При сравнении расчетных и экспериментальных данных (рис. 4 и 5) сделан вывод об адекватности разработанной математической модели плазменного процесса формирования покрытий из дисперсных полимеров.

Технология плазменного напыления порошковых эпоксидных покрытий предлагается для окраски крупногабаритных транспортных средств, в том числе струнного транспорта (юнимобилей), что невозможно традиционными методами порошкового напыления [14 – 16].

Выводы

В работе было составлено физико-математическое описание процесса плазменного напы-

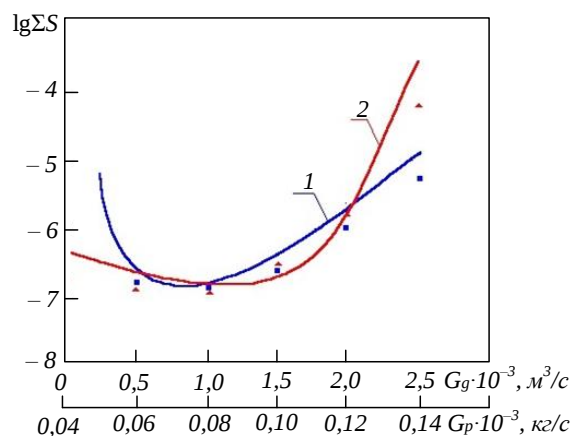


Рис. 4. Зависимость пористости эпоксидного покрытия от расхода плазмообразующего газа (1, ■) и порошка (2, ▲): ———— — результаты моделирования; ■, ▲ — эксперимент
Fig. 4. Dependence of the porosity of the epoxy coating on the consumption of plasma-forming gas (1, ■) and powder (2, ▲): ———— — simulation results; ■, ▲ — experiment

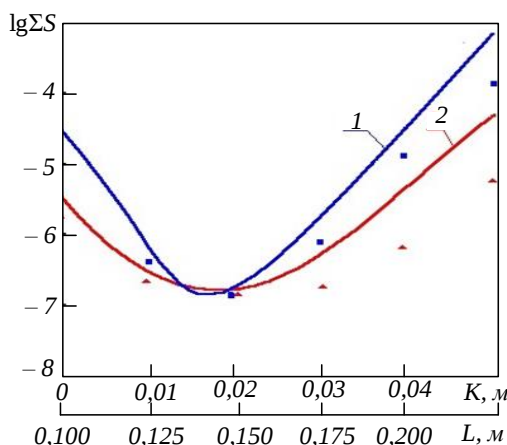


Рис. 5. Зависимость пористости эпоксидного покрытия от дистанции ввода полимера в плазменную струю (1, ■) и дистанции напыления (2, ▲):
— результаты моделирования; ■, ▲ — эксперимент

Fig. 5. Dependence of the porosity of the epoxy coating on the distance of introduction of the polymer into the plasma jet (1, ■) and the spraying distance (2, ▲):
— simulation results; ■, ▲ — experiment

ления покрытий на основе порошковых полимерных материалов путем разбивки плазменного процесса на несколько основных стадий; комплексного моделирования всех стадий плазменного напыления со сквозной передачей данных с одной стадии на другую; математического описания явлений, связанных с генерацией плазмы, струйным течением, взаимодействием дисперсного материала с потоком высокотемпературного газа и плазмы, ударом индивидуальных частиц с основанием и формированием из них осажденного слоя. С учетом выполненного описания разработана компьютерная модель, позволяющая проводить оптимизацию технологических режимов нанесения плазменных полимерных покрытий. Программно-математический комплекс применен для исследования и оптимизации процесса напыления эпоксидных покрытий. Установлен немонотонный характер зависимости пористости эпоксидных покрытий от технологических режимов напыления. При сравнении расчетных и экспериментальных данных сделан вывод об адекватности разработанной математической модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудин, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко и др. Москва: Наука, 1990:408.
2. Лясников В.Н., Лясникова А.В., Дударева О.А. Плазменное напыление. Саратов: Изд-во СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2016:620.
3. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008:320.
4. Ильюшенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громыко Г.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. Минск: Беларуская навука, 2011:357.
5. Meghwal A., Anupam A., Murty B.S., Berndt C.C., Kottada R.S., Fng A.S.M. Thermal spray high-entropy alloy coatings: a review. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2020;29:857–893.
6. Гильман А.Б. Воздействие низкотемпературной плазмы как эффективный метод модификации поверхности полимерных материалов. *Химия высоких энергий*. 2003;1:20–26.
7. Цырлин М.И., Родченко Д.А. Формирование сетчатой структуры термоотверждаемого полимера при плазменном осаждении. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук*. 1998;4:132–136.
8. Цырлин М.И. Математическое моделирование процесса нагрева полимерных частиц при плазменном напылении покрытий. В кн.: *Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственной деятельности, разработку экономических и экологически чистых технологий: Тез. докл. 54 межд. научно-техн. конф.* 21-24 ноября 2000. Минск: БГПА; 2000:136.
9. Жуков М.Ф., Коротеев А.С. Теория термической электродуговой плазмы. Ч. 1. Методы математического исследования плазмы. Новосибирск: Наука, 1987:278.
10. Цветков Ю.В., Панфилов С.А. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. Москва: Наука, 1980:359.
11. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Москва: Высшая школа, 1967:599.
12. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, 1970:659.
13. Madejsky J. Solidification of droplets on a cold surface. *Intern. J. Heat and Mass Transfer*. 1976;19:1009–1013.
14. Grover E. *Statistical methods for graphs*. 2017:29.
15. Цырлин М.И., Юницкий А.Э. Отверждение термореактивных порошковых материалов с использованием низкотемпературной плазмы. В кн.: *Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Сб. научных трудов. В 2 кн. Кн. 1. Материаловедение*. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2022:268–275.
16. Spyrou E. Powder Coatings. *Chemistry and Technology*. Vincentz Network, 2012:380.
17. Kiil S. Anticorrosive Coatings. *Coat. Technol*. 2009;6:135–176.

REFERENCES

1. *Plasma coated application* / V.V. Kudinov, P.Yu. Pekshev, V. E. Belashchenko, etc. Moscow: Nauka, 1990:408. (In Russ.).
2. Lyasnikov V.N., Lyasnikova A.V., Dudareva O.A. *Plasma spraying*. Saratov: Izd-vo SGTU im. Gagarina Yu.A. 2016:620. (In Russ.).
3. Puzryakov A.F. *Theoretical foundations of plasma spraying technology*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.Eh. Bauman, 2008:320. (In Russ.).
4. Il'yushenko A.F., Shevtsov A.I., Okovityi V.A., Gromyko G.F. *Processes of formation of gas-thermal coatings and their modeling*. Minsk: Belaruskaya navuka, 2011:357. (In Russ.).
5. Meghwal A., Anupam A., Murty B.S., Berndt C.C., Kottada R.S., Fng A.S.M. Thermal spray high-entropy alloy coatings: a review. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2020;29:857–893.
6. Gil'man A.B. Low-temperature plasma exposure as an effective method for modifying the surface of polymeric materials. *Khimiya vysokikh energii*. 2003;1:20–26. (In Russ.).
7. Tsyrlin M.I., Rodchenko D.A. Formation of a network structure of a thermosetting polymer by plasma deposition. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk*. 1998;4:132–136. (In Russ.).
8. Tsyrlin M.I. Mathematical modeling of the heating process of polymer particles during plasma spraying of coatings. In: *The contribution of university science to the development of priority areas of industrial and economic activity, the development of economical and environmentally friendly technologies: Thesis. doc. 54 international scientific and technical Conf. November 21 – 24, 2000*. Minsk: BGPA; 2000:136. (In Russ.).
9. Zhukov M.F., Koroteev A.S. *Theory of thermal electric arc plasma. Part 1. Methods of mathematical study of plasma*. Novosibirsk: Nauka, 1987:278. (In Russ.).
10. Tsvetkov Yu.V., Panfilov S.A. *Low-temperature plasma in recovery processes*. Moscow: Nauka, 1980:359. (In Russ.).
11. Lykov A.V. *Theory of thermal conductivity*. Moscow: Vysshaya shkola, 1967:599. (In Russ.).
12. Kutateladze S.S. *Fundamentals of heat transfer theory*. Novosibirsk: Nauka, 1970:659. (In Russ.).
13. Madejsky J. Solidification of droplets on a cold surface. *Intern. J. Heat and Mass Transfer*. 1976;19:1009–1013.
14. Tsyrlin M.I., Unitsky A.E. Curing of thermosetting powder materials using low-temperature plasma. *Modern methods and technologies for developing and processing of materials: coll. of scientific apers*. In 2 vol. V. 1. Materials Science. Minsk: FTI NAN Belarusi, 2022:268–275. (In Russ.).
15. Spyrou E. Powder Coatings. Chemistry and Technology. Vincentz Network, 2012:380.
16. Kiil S. *Anticorrosive Coatings*. Coat. Technol. 2009;6:135–176.

Сведения об авторах

Анатолий Эдуардович Юницкий, PhD in Transport, генеральный конструктор, Закрытое акционерное общество «Струнные технологии»

E-mail: a@unitsky.com

ORCID: 0000-0003-1574-3539

Михаил Иосифович Цырлин, к.т.н., ведущий специалист научно-исследовательского отдела, Закрытое акционерное общество «Струнные технологии»

Email: m.tsirlin@unitsky.com

ORCID: 0000-0002-2983-3255

Information about the authors

Anatoli E. Unitsky, PhD in Transport, General Designer, Unitsky String Technologies, Inc.

E-mail: a@unitsky.com

ORCID: 0000-0003-1574-3539

Mikhail I. Tsyrlin, Cand. of Tech. Sci. (Eng.), Leading Specialist of the Research Department, Unitsky String Technologies, Inc.

Email: m.tsirlin@unitsky.com

ORCID: 0000-0002-2983-3255

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 14.10.2024

После доработки 30.10.2024

Принята к публикации 01.11.2024

Received 14.10.2024

Revised 30.10.2024

Accepted 01.11.2024