

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-20-34](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-20-34)



УДК 621.793

UDC 621.793

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ КРИТЕРИЮ

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE GAS THERMAL SPRAYING PROCESS WITH OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL MODES ACCORDING TO THE TEMPERATURE CRITERION

Кадырметов Анвар Минирович

д.т.н., профессор кафедры машиностроительных технологий Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова (РФ)

Kadyrmetov Anvar Minirovich

doc. of Tech. Sc., Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies of the Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (Russian Federation)

✉¹**Симонова Юлия Эдуардовна**

к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета),
e-mail: jsim2@bk.ru

✉¹**Simonova Julia Eduardovna**

cand. of Tech. Sc. Associate Professor of the Department of mechanical engineering technology of the Voronezh State Technical University
e-mail: jsim2@bk.ru

Черных Дмитрий Михайлович

старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета (РФ)

Chernykh Dmitry Mikhailovich

researcher of the Department of mechanical engineering technology of the Voronezh State Technical University (RF)

Попов Дмитрий Анатольевич

к.т.н., доцент кафедры машиностроительных технологий Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова (РФ)

Popov Dmitry Anatolyevich

cand. of Tech. Sc. Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies of the Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov (RF)

Аннотация. Рассмотрен процесс моделирования и оптимизации технологических параметров при газопламенном напылении порошком Inconel 718 на конструкционную легированную сталь марки 18ХГТ для обеспечения качественных характеристик покрытия.

Annotation. The process of modeling and optimization of technological parameters during flame spraying with Inconel 718 powder on structural reinforced steel grade 18HGT to ensure the quality characteristics of the coating is considered.

Ключевые слова: ГАЗОПЛАМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ

Keywords: FLAME SPRAYING, OPTIMIZATION OF MODES

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Надежность деталей в значительной степени определяется качеством их рабочих поверхностей, обеспечивающих сопротивление разрушению деталей вследствие усталостных, изнашивающих и коррозионных эксплуатационных воздействий [1-3]. К одному из эффективных подходов создания поверхностных слоев относится нанесение покрытий с помощью прогрессивных газотермических методов напыления (ГТН), включающих плазменное, детонационное и газопламенное напыление, электродуговую металлизацию, высокоскоростное газопламенное напыление (HVOF) [4, 5]. Важным в использовании ГТН является возможность оптимизации параметров процессов нанесения и упрочнения покрытий (рисунок 1). Комплексная реализация данных подходов обеспечивает актуальность рассматриваемой задачи с целью получения качественного покрытия. Решение данной задачи предусматривает прежде всего моделирование процесса нанесения покрытия и оптимизацию параметров его режимов.

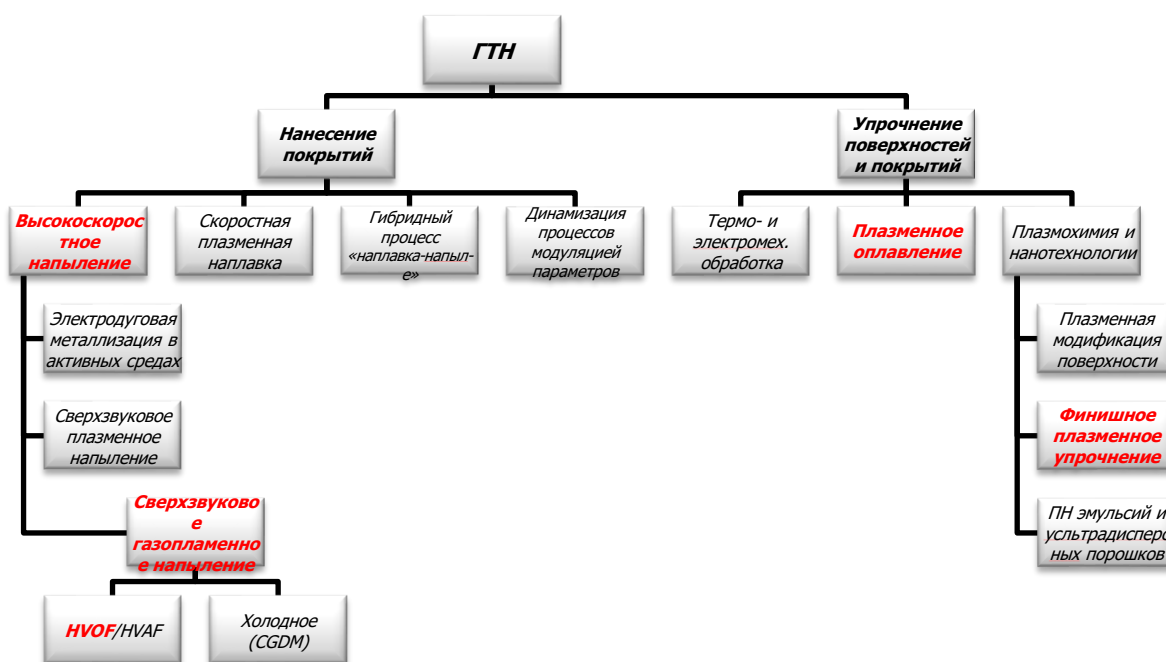


Рисунок 1 – Классификация прогрессивных газотермических и плазменных технологий

Актуальность повышения ресурса и необходимость восстановления ответственных деталей обусловлена причинами их интенсивного износа. Это особенно важно для станков, изнашивание ответственных элементов которых приводит к нарушению точности изготовления деталей, а величина износа доходит до 100 % за срок эксплуатации [6]. Известно, что за срок эксплуатации 6-8 лет универсальные металлорежущие станки величина износа и повреждений зубчатых колёс составляет 10 %, шпиндельных подшипников – 80 %, подшипников промежуточных валов – 15 %. При этом с каждым годом эксплуатации станка влияние износа ответственных деталей увеличивает перенос величины износа на точность и качество обработки изделий. Одной из таких деталей является шпиндель металлорежущего станка, величину износа которого условно можно разделить на диапазоны до 0,05 мм на сторону и выше. Так, одним из способов ремонта изношенной поверхности как компенсации размера

с величиной износа до 0,05 мм на сторону является применение тонкостенных компенсационных втулок и колец. При выработке шеек шпинделя до значения 0,005-0,01 мм на сторону ремонт осуществляют притиркой. Другим вариантом восстановления поверхности, при возможности внесения изменений в конструкцию диаметральных размеров отверстий в подшипниках или сопрягающихся со шпинделем деталей, и достижения размера износа шеек свыше 0,01 мм на сторону является шлифование с последующей притиркой или шлифование с последующим хромированием изношенной поверхности. В случае износа, превышающего 0,05 мм на сторону, поверхность шпинделя подвергают наращиванию металлом с последующей механической обработкой. Вместе с тем, к шпинделям металлорежущих станков предъявляют высокие требования по точности, когда отклонение от формы и размеров допускается в узком диапазоне. Так, например, допусковое отклонение от соосности и цилиндричности посадочных шеек должно быть менее 0,005 мм, а переднее и заднее конические отверстия должны быть концентричны посадочным шейкам с допусковым биением $0,01 \div 0,02$ мм на 300 мм длины [7, 8]

2 Материалы и методы

Одним из распространённых материалов изготовления шпинделей токарных и фрезерных станков является конструкционная легированная сталь марки 18ХГТ. Рассматривая вариант износа шейки шпинделя, достигающего величины свыше 0,05 мм на сторону следует подобрать материал восстановления из условия повышенного требования по износостойкости. К линейке таких порошков относят материалы, содержащие никель и хром. В зависимости от процентного соотношения входящих компонентов его можно применять для создания износостойких покрытий, подверженных абразивному, газо- и гидроабразивному износам, механическому, усталостному разрушению, износу в парах скольжения, для создания покрытий, защищающих от разрушения при высоких температурах в окислительных и других агрессивных средах [9, 10, 11]. К таким материалам относят Inconel 718. Его химический состав представлен в табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав Inconel 718, %

Al	C	Co	Cr	Fe	Mn	Mo	Nb	Ni	S	Si	Ta	Ti	V	W	Zr
0,49	0,02	0,05	17,96	16,67	0,05	2,64	4,59	56,52	0,06	0,02	0,02	0,87	0,01	0,01	0,02

На рисунке 2 представлен график зависимости теплопроводности порошка Inconel 718 от температуры.

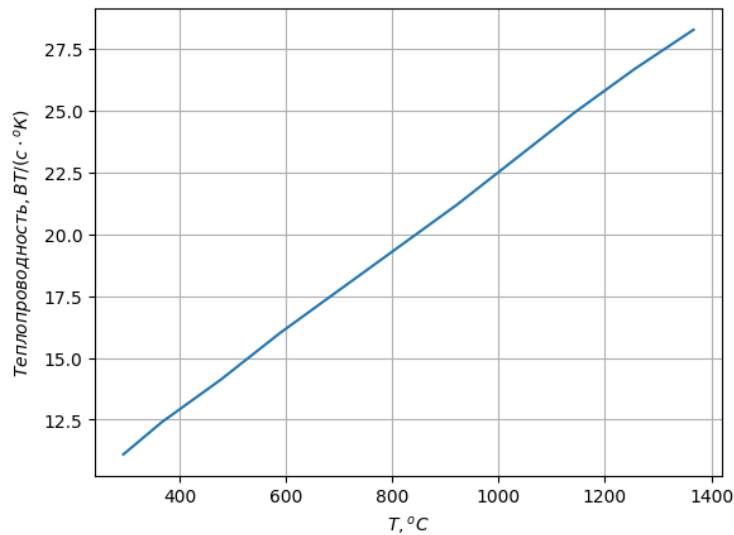


Рисунок 2 – Зависимость теплопроводности Inconel 718 от температуры

Управление эффективностью газодинамических процессов напыления в общем случае сводится к характеристикам качества нанесенного покрытия и определяется процессами формирования адгезионной и когезионной прочности, уровнем остаточных напряжений, износостойкостью [12]. Известно [12, 13], что при газопламенном напылении прочность соединения покрытия с основой растет с увеличением скорости $V_{\text{ч}}$ и температуры $T_{\text{ч}}$ напыляемых частиц, а для предупреждения нарушения целостности частиц их скорость не должна превосходить 350-400 м/с [14]. При моделировании процесса газопламенного напыления были приняты результаты расчетов параметров несущего газового потока внутри сопла газопламенной сверхзвуковой горелки [12], представленной на рисунке 3.

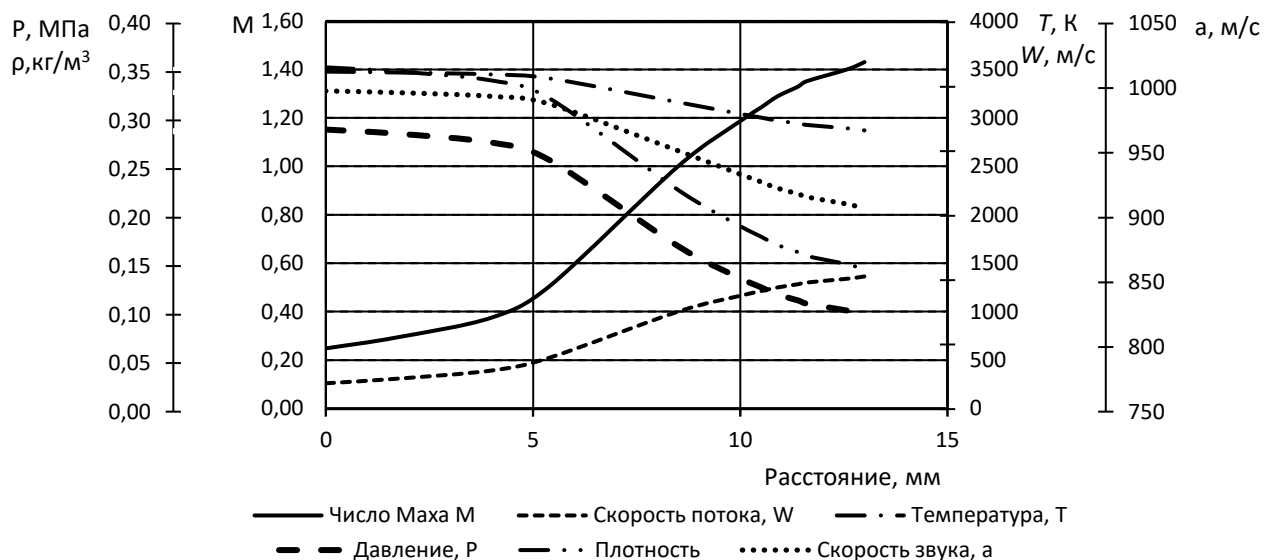


Рисунок 3 – Распределение параметров несущего газового потока по длине в камере сгорания и сверхзвуковом сопле газовой горелки

Определение оптимальных параметров газопламенного напыления, обеспечивающих качественные характеристики покрытия, производился на основе известных расчетных зави-

симостей параметров гетерогенной двухфазной (ацетилен и кислород) сверхзвуковой струи [12]. Минимальная теплотворная способность составила 51297 кДж/кг, которая обеспечила мощность тепловыделения в пятне напыления – 30,7 кВт. Для фракции порошка 30-50 мкм при дистанции напыления 130-140 мм скорость движения частиц составила 350-400 м/с.

Для прогнозирования характеристик качества нанесенного покрытия и соответствующего для этого определения рациональных технологических параметров и режимов была разработана математическая модель, реализованная численным методом конечных элементов (МКЭ). Моделирование распределения температурных полей в процессе нанесения покрытия осуществлялось с помощью специализированного программного обеспечения в заданном диапазоне параметров. Моделирование процесса нанесения покрытия можно включало два этапа – моделирование поведения двухфазной газовой струи с частицами наносимого покрытия в ней и взаимодействие их с подложкой.

Условия моделирования включали: двухфазная газовая струя рассматривалась в виде теплового потока с заданными параметрами; анализу подлежит локальная часть нанесенного покрытия в изделии; в процессе напыления тепловой поток перемещается по винтовой линии, а деталь неподвижна; начальная температура системы 20 °С [15, 16]; режимы нанесения покрытия принимались в соответствии со значениями, представленными в таблице 2.

Таблица 2 – Технологические параметры нанесения покрытия

Параметр	Величина
Мощность источника тепла, кВт	37,5
Диаметр сопла, мм	3,8
Расстояние от источника тепла, мм	140
Диаметр пятна напыления, мм	13,3
Скорость перемещения источника тепла, м/с	0,3
Шаг, мм	10
Толщина наносимого покрытия, мм	0,25

Имитации эффекта поверхностного нагрева определялись известными выражениями [17, 18, 19], где учитывался трехмерный конический источник тепла и параметры расплавленных частиц на поверхности изделия. Модель основана на базовых уравнениях классической термодинамики. При этом сложность задачи преодолевается использованием дискретизации пространства (и соответственно ориентацией на численные методы расчета), а также использованием алгоритмизации и программирования для учета сложных внешних условий [20, 21]. В трехмерном случае распространение тепла описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial t} T(\vec{r}, t) = (\nabla, \chi(\vec{r}, t) \nabla T(\vec{r}, t)) + Q(\vec{r}, t), \quad (1)$$

где $T(\vec{r}, t)$ – распределение температуры в пространстве и его изменение с течением времени; \vec{r} – радиус вектор исследуемой точки пространства; t – время; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$ – дифференциальный оператор набла; x, y, z – декартовы координаты исследуемой точки пространства; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы в декартовом пространстве; (\cdot, \cdot) – скалярное произведение; $\chi(\vec{r}, t)$ – коэффициент теплопроводности вещества (в общем случае зависит

от положения в пространстве и времени); $Q(r, t)$ – изменяющееся с течением времени тепловое поле от источников нагрева и охлаждения в данной схеме нанесения покрытия. Коэффициент температуропроводности может быть выражен через коэффициенты теплопроводности κ , теплоемкости c и плотность вещества ρ следующим образом: $\chi = \kappa / (c \cdot \rho)$ [20].

Для моделирования процесса предлагалось рассмотреть часть изделия, представленного на рисунке 4, а. Поверхность напыления ограничивалась меньшей цилиндрической наружной поверхностью на длине 40 мм, ограниченной торцем большего диаметра.

Для рационального создания сетки модель детали была разделена на несколько частей (рис. 4, б). Для части изделия, на которое не наносится покрытие, использовалась гексаэдральная сетка СНЕХА (8) с размером элемента 5 мм, для наружной цилиндрической поверхности – 2 мм, внутренней цилиндрической поверхности – 0,4 мм. Количество элементов и вершин сетки представлено в таблице 3.

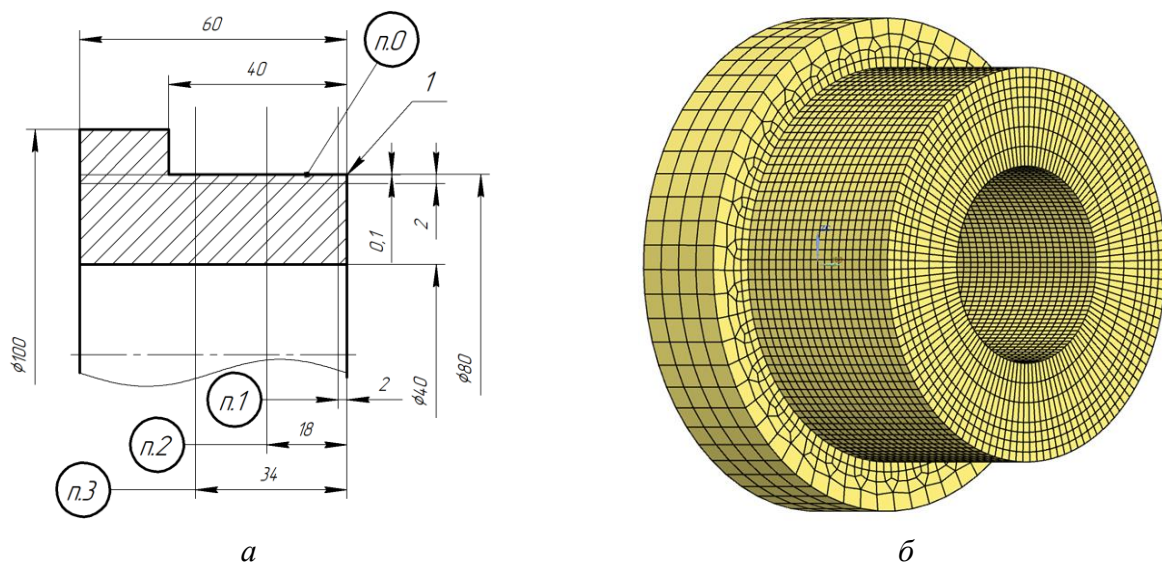


Рисунок 4 – Результат создания сетки конечно-элементной модели

Таблица 3 – Характеристики сетки

	Поверхностная модель		Объемная модель	
	Вершины	Элементы	Вершины	Элементы
Изделие	8239	8240	26635	22424
Покрытие	19092	19092	19092	9288

Распределение температуры на поверхности покрытия, нанесенного на меньшую диаметральною поверхность изделия (рис. 4, а), в результате моделирования показало максимальное значение на границе прохода (до уровня ~ 1300 °С) и меньшего уровня в трех сечениях (до 1100 °С), зависящих от шага напыления (рис. 5).

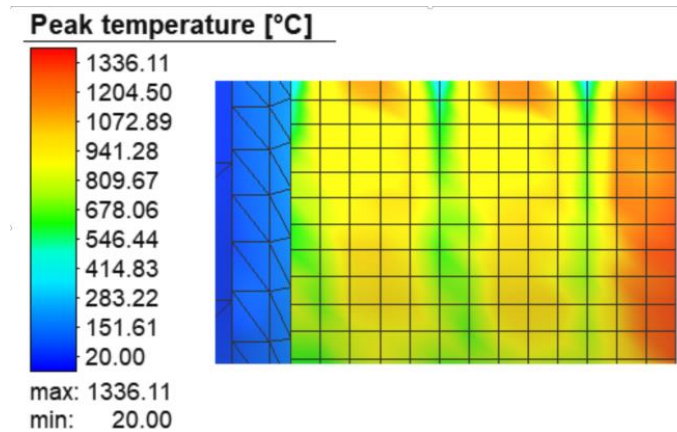


Рисунок 5 – Распределение максимальных значений температурных полей в нанесенном покрытии

На рисунке 6 представлено распределение максимальных температур и аппроксимирующая показательная функция по глубине детали в сечении, приближенном к центру прохода напыления.

Наблюдается влияние перегрева кромки (рисунок 5, 7), расположенной на пересечении торцевой (рис. 4, а, п.1) и цилиндрической поверхности, перераспределение температур в объеме материала и циклическое влияние проходов источника тепла. Рассматриваемые точки термоцикла наносимого слоя покрытия находились в плоскостях, смещенных относительно торца цилиндрической поверхности на расстояниях 2, 18, 34 мм в сечениях п.1, п.2, п.3 (рис. 4, а).

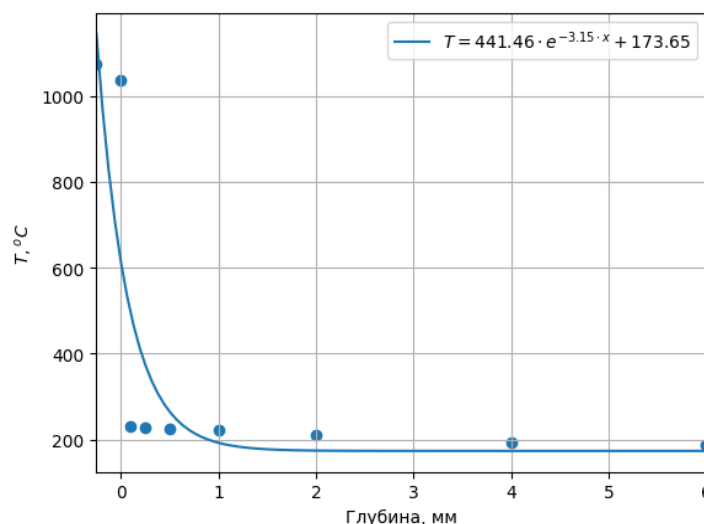
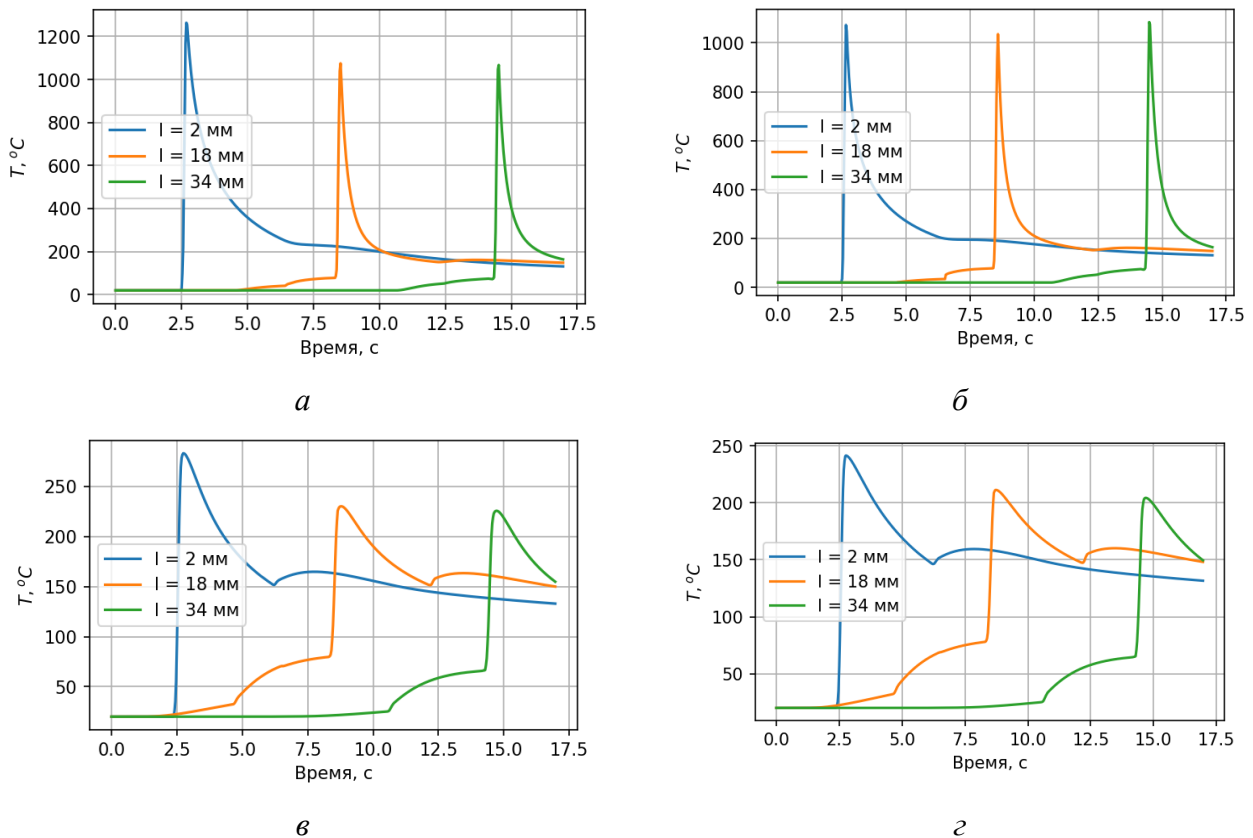


Рисунок 6 - Распределение максимальных значений температурных полей по глубине детали

Изменение температур в поверхностном слое покрытия в данных сечениях во времени представлено на рисунке 7, а. Аналогичное изменение температур в указанных сечениях на глубине детали 0,1, 1,0 и 2,0 мм относительно поверхности п.0 (рис. 4, а) представлено на рисунках 7, б, в и г соответственно.



а - в покрытии; *б*, *в*, *г* - на глубине детали 0,1 мм, 1,0 мм и 2,0 мм соответственно

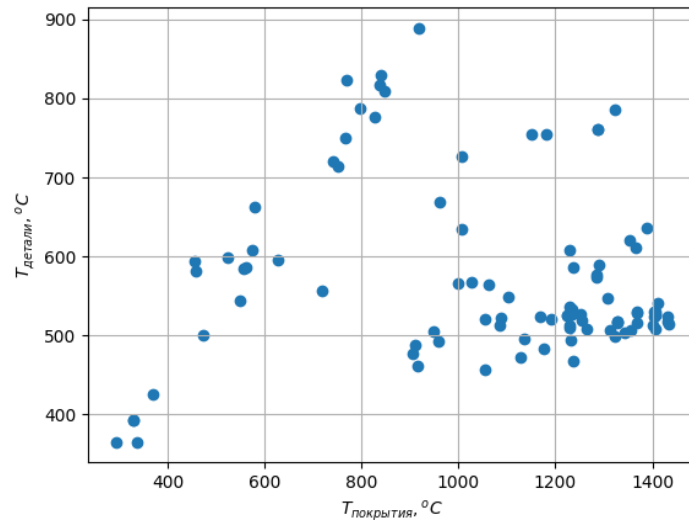
Рисунок 7 - График изменения температуры по времени в покрытии

Для получения качественного покрытия проведен корреляционно-регрессионный анализ и создана математическая модель, позволяющая получать оптимальные параметры режимов. Для этого определены функции отклика: максимальная температура покрытия y_1 [22]; температура подложки y_2 . Принятые факторы: мощность источника тепла x_1 , скорость его перемещения x_2 , температура предварительного нагрева детали x_3 , отклонение угла вектора теплового воздействия источника тепла x_4 от нормали к поверхности, на которую наносится покрытие. В таблице 4 представлены исходные значения факторов и интервалы их варьирования.

Оптимизация проводилась на основе алгоритма SHERPA. Для создания модели было проведено 150 итераций расчетов в специализированном программном обеспечении. На рисунке 8 представлены результаты распределения значений максимальных температур в покрытии и на поверхности детали в зависимости от факторов.

Таблица 4 – Исходные значения факторов и интервалы их варьирования

Параметр	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
Мощность (x_1), Вт	30000	37500	45000	15000
Скорость (x_2), м/с	0,1	0,3	0,5	0,4
Предварительный нагрев (x_3), °К	293	443	593	300
Отклонение угла наклона источника тепла от нормали к поверхности (x_4), °	0	22,5	45	45



$$y_1 \in [293.15, 1433.56] \text{ } ^\circ\text{C}, y_2 \in [365, 889.124] \text{ } ^\circ\text{C}, \\ x_1 \in [30000, 45000] \text{ Вт}, x_2 \in [0.1, 0.5] \text{ м/с}, x_3 \in [293, 593] \text{ } ^\circ\text{C}, x_4 \in [0, 45] \text{ град.}$$

Рисунок 8 – Распределение значений функций отклика

Результат расчетов коэффициентов корреляции Пирсона (рис. 9), находящегося в диапазоне от -1 до 1, позволил определить степень влияния факторов на результирующую функцию. Значения, близкие к 1 (близость к насыщенному красному цвету), указывают на увеличение положительного влияния параметра, а значения, близкие к -1 (близость к насыщенному синему цвету), - на увеличение отрицательного влияния параметра. Значение 0 (насыщенный зеленый цвет) указывает на отсутствие корреляции.

На основании результатов имитационного моделирования были получены регрессионные уравнения зависимости температуры покрытия (6) и поверхности детали (7), статистическая оценка которых представлена на рисунке 10 и в таблице 5. Оценка достоверности результатов показала их значимость.

Для определения коэффициентов полиномиальных уравнений регрессии использовался метод наименьших квадратов.

Для нормализации факторов использовались следующие формулы:

$$[x_{np}] = ([x] - [x_{off}]) \cdot [x_{scale}]^{-1}, \quad (2)$$

где x_{off} – коэффициенты смещения,

x_{scale} - коэффициенты масштабирования.

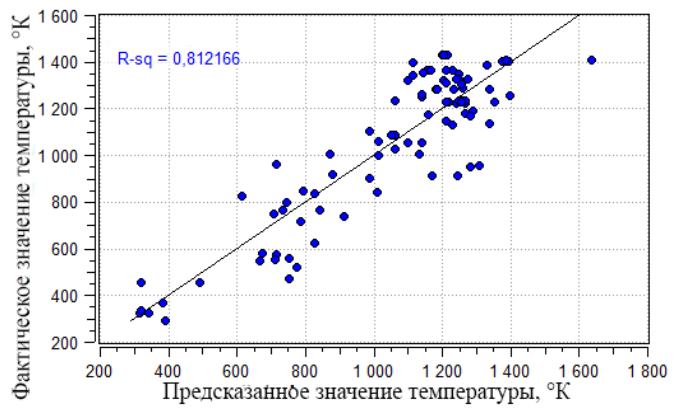
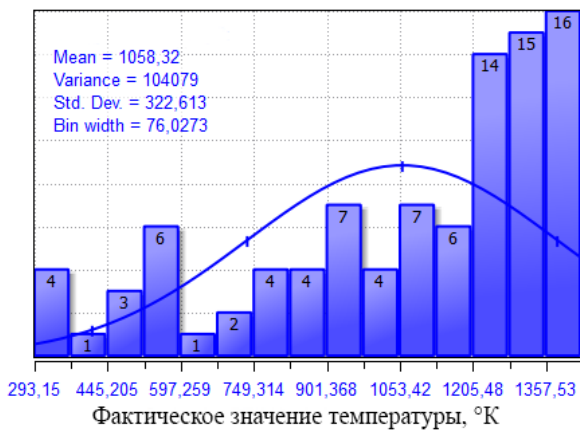
$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$x_{off} = \begin{bmatrix} 37500.000 \\ 0.3 \\ 443.000 \\ 22.500 \end{bmatrix} \quad (4)$$

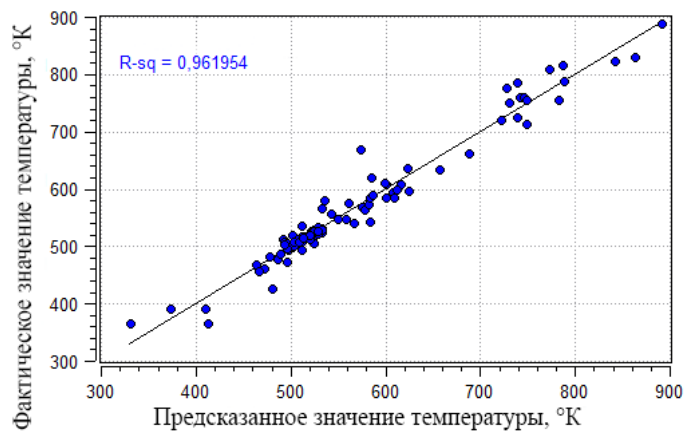
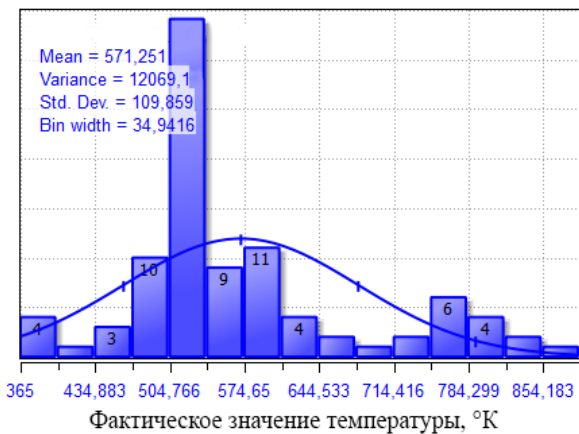
$$x_{scale} = \begin{bmatrix} 7500.000 \\ 0.2 \\ 150.000 \\ 22.500 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 y_1 = & 743.914 - 75.943x_{\text{пр1}} - 836.655x_{\text{пр2}} - 455.107x_{\text{пр3}} - 8.233x_{\text{пр4}} - 137.889x_{\text{пр1}}^2 \\
 & + 180.188x_{\text{пр1}}x_{\text{пр2}} + 154.057x_{\text{пр1}}x_{\text{пр3}} - 82.806x_{\text{пр1}}x_{\text{пр4}} + 634.094x_{\text{пр2}}^2 \\
 & + 458.403x_{\text{пр2}}x_{\text{пр3}} - 923.044x_{\text{пр1}}x_{\text{пр3}} + 119.117x_{\text{пр3}}^2 - 597.762x_{\text{пр3}}x_{\text{пр4}} \\
 & + 521.911x_{\text{пр4}}^2
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 y_2 = & 731.521 + 86.429x_{\text{пр1}} - 234.569x_{\text{пр2}} - 38.799x_{\text{пр3}} + 82.826x_{\text{пр4}} - 32.062x_{\text{пр1}}^2 \\
 & + 49.138x_{\text{пр1}}x_{\text{пр2}} + 67.489x_{\text{пр1}}x_{\text{пр3}} + 71.667x_{\text{пр1}}x_{\text{пр4}} + 58.694x_{\text{пр2}}^2 \\
 & + 119.916x_{\text{пр2}}x_{\text{пр3}} - 284.753x_{\text{пр1}}x_{\text{пр3}} + 77.057x_{\text{пр3}}^2 - 219.447x_{\text{пр3}}x_{\text{пр4}} \\
 & - 57.080x_{\text{пр4}}^2
 \end{aligned}
 \tag{7}$$



a



б

a, б - температура покрытия и поверхности детали соответственно

Рисунок 10 – Статистические оценки данных по результатам имитационного моделирования

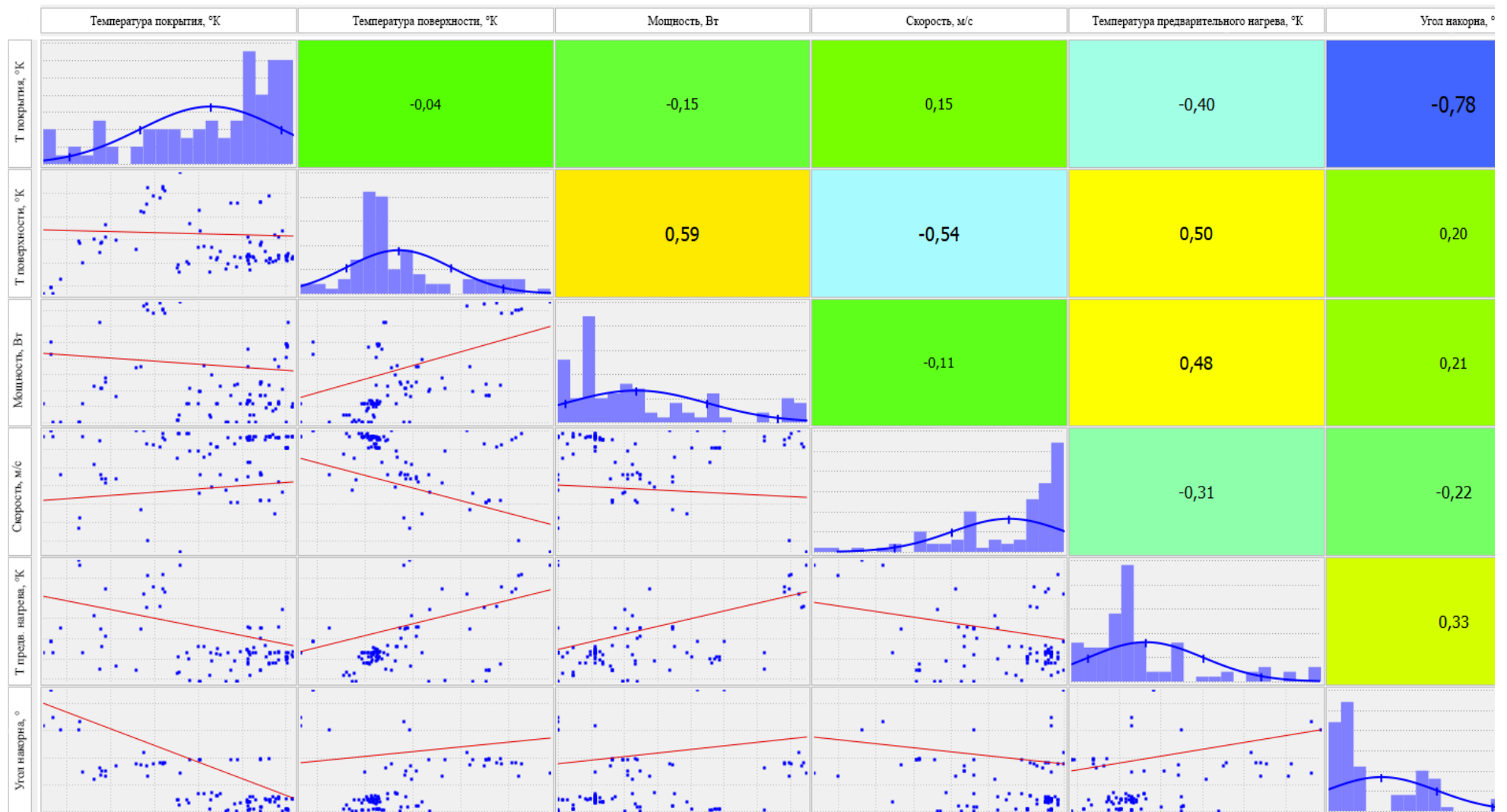


Рисунок 9 - Корреляционные зависимости между используемыми факторами и откликом

Таблица 5 – Критерии оценки качества регрессионной модели [23]

Функция отклика	R^2	R^2_{adj}	R^2_{pred}	Средняя квадратичная ошибка	Кроссвалидация	Сумма квадратов ошибок прогнозирования
Температура покрытия (y_1)	0,812	0,779	0,736	139	172	165
Температура на поверхности детали (y_2)	0,962	0,955	0,915	21,3	48,5	31,8

4 Обсуждение и заключение

Результаты оптимизации полученных уравнений регрессии представлены в таблице 6.

Данные результаты показали, что:

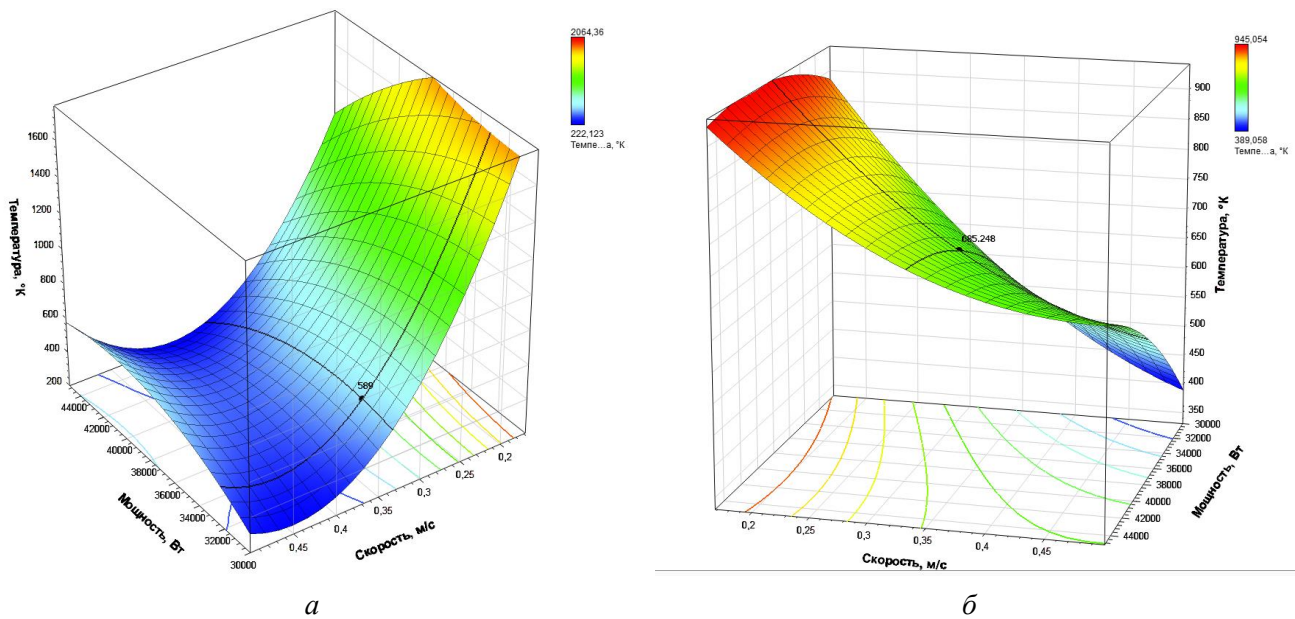
- оптимальные значения параметров режима напыления позволяют снизить температуру поверхности детали до 527 °К;
- повышение скорости перемещения источника тепла дает возможность повысить производительность процесса и уменьшить перегрев в критических зонах.

Таблица 6 – Значения температуры покрытия и поверхности детали, а также значения факторов, полученные в ходе оптимизации.

Параметр	Величина	Изменение по отношению к основному уровню
Температура покрытия, °К	1367,09	-25%
Температура поверхности детали, °К	527,476	-43%
Мощность, Вт	32250	-14%
Скорость, м/с	0,48	60%
Предварительный нагрев, °К	365	25%
Отклонение угла наклона источника тепла от нормали к поверхности, °	5,4	-73%

Полученные поверхности отклика температуры покрытия и поверхности детали от мощности источника тепла и скорости его перемещения представлены на рисунке 11. Результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В дальнейшем для повышения точности расчета температуры в зоне нанесения покрытия следует рассмотреть возможность усложнения модели процесса с учётом газодинамических явлений в зоне нанесения покрытия и других нерассмотренных технологических факторов.



а - покрытие; б - поверхность детали

Рисунок 11 – Поверхность отклика температуры в зависимости от мощности и скорости источника тепла

Список литературы

- 1 Суслов, А. Г. Инженерия поверхности деталей / А. Г. Суслов, В. Ф. Безъязычный, Ю. В. Панфилов и др. М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
- 2 Сарбучев, С. Н. Практические применения газотермических технологий нанесения защитных покрытий. Руководство для инженеров [Эл/ ресурс]: компания компании "Термал-Спрей-Тек". М.: 2009.
- 3 Балдаев, Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. Москва, Изд-во «КХТ», 2004. – 134 с.
- 4 Кадырметов, А. М. Современные технологии плазменных и газотермических процессов нанесения покрытий в открытой атмосфере / А. М. Кадырметов, Ю. Э. Симонова, А. А. Плахотин, Д. В. Колмаков // Современные материалы, техника и технология: сборник научных статей 9-й Международной научно-практической конференции (28 декабря 2019 года) / Юго-Зап. гос. ун-т.; в 2-х томах. Том 1. – Курск: Юго-Зап. гос.ун-т, 2019. – С. 226-238.
- 5 Кравченко, И. Н. Разработка технологии нанесения плазменных покрытий многофункционального назначения / И. Н. Кравченко, М. А. Глинский, Ю. А. Шамарин, Т. А. Чеха // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». 2017. №6(82). – С. 63-71.
- 6 Каминская, В.В. Станины и корпусные детали металлорежущих станков / В.В. Каминская, З. М. Левина, Д. Н. Решетов. - М.: МАШГИЗ, 1960., 365с.
- 7 Схиртладзе, А. Г. Технология ремонта шпинделей // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – №. 4. – С. 8.
- 8 Пекелис Г.Д. Технология ремонта металлорежущих станков / Г.Д. Пекелис, Б. Т. Гельберг. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с
- 9 Nowotnik, A.; Pedrak, P.; Sieniawski, J.; Goral, M.: Mechanical properties of hot deformed Inconel 718 and X750. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Vol. 50 Issue 2 February 2012 . 74-80.

- 10 Белый, А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоёв / А. В. Белый, Г. Д. Карпенко, Н. К. Мышкин. - М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
- 11 Толстов, И. А. Износостойкие наплавочные материалы и высокопроизводительные методы их обработки/ И.А. Толстов, М.Н. Семиколенных, Л.В. Баскаков, В.А. Коротков. М., «Машиностроение», 1992, с
- 12 Кадырметов, А. М. Управление эффективностью газодинамических процессов газопламенного напыления / А. М. Кадырметов, Ю. Э. Симонова, Е. В. Снятков, А. А. Плахотин // В сборнике: Инновационные технологии в транспортном и химическом машиностроении. Материалы XII Международной научно-технической конференции Ассоциации технологов-машиностроителей. 2020. – С. 45-56.
- 13 Кудинов, В. В. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белашенко и др. – М.: Наука, 1990. – 408 с. – ISBN 5-02-006040-2.
- 14 Петров, С. В. Плазменное газозоооздушное напыление / С. В. Петров, И. Н. Карп. – Киев: Наукова думка. – 1993. – 495 с.
- 15 Investigation of Droplet Atomization and Evaporation in Solution Precursor Plasma Spray Coating
- 16 Винокуров, В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В. А. Винокуров, А.Г. Григорьянц // М.: Машиностроение, 1984.– 280 с.
- 17 Moradi V., Adamian A., Arab N. B. Investigating of EBW Process Weldment Connections Stresses in ILSF 100 MHz Cavity by Simufact. Welding Software. – 2021.
- 18 Куземко Р. Д., Наумов В. А., Хоан Х. В. Распределение параметров в турбулентной струе при газовом распылении сплавов //Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 1997. – №. 3. – С. 41-49.
- 19 Хасуй А., Моригаки О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
- 20 Полянин А. Д. Линейные задачи тепло- и массопереноса: Общие формулы и результаты // Теоретические основы химической технологии. -2000. Т. 34. - №6. - С. 563-574.
- 21 К проблеме неизотермического массопереноса в пористых средах / Н. Н. Гринчик, П. В. Акулич, П. С. Куц, Н. В. Павлюкевич, В. И. Терехов // Инженерно-физический журнал. 2003. - Т. 76. - №6. - С. 129-142.
- 22 Nguyen Q. B. et al. Characteristics of Inconel powders for powder-bed additive manufacturing, Engineering, 3 (2017) 695–700. DOI: 10. 1016 //J. ENG. – 2017. – Т. 12
- 23 Ершов Э. Б. Распространение коэффициента детерминации на общий случай линейной регрессии, оцениваемой с помощью различных версий метода наименьших квадратов // Экономика и математические методы. – 2002. – Т. 38. – №. 3. – С. 107-120.

References

- 1 A.G. Suslov, V.F. Bezyazychnyy, Yu.V. Panfilov et al., Part Surface Engineering, М.: Mashinostroyeniye, 2008.
- 2 S. N. Sarbucheв. Practical applications of gas-thermal technologies for applying protective coatings. Manual for Engineers [Online Resource]: Thermal-Spray-Tech - М. –2009
- 3 L.H. Baldaev. Renovation and hardening of machine parts by methods of thermal spraying, М.: КНТ 2004, 134 p.
- 4 А.М. Кадырметов. Modern technologies of plasma and gas thermal coating processes in an open atmosphere / А.М. Кадырметов, Yu.E. Simonova, А.А. Plakhotin, D.V. Kolmakov // Modern materials, equipment and technologies: collection of scientific articles of the 9th International Scientific and Practical Conference (December 28, 2019) / Yugo-Zapad. gos. un.; in 2 volumes. Volume 1. -Kursk: SWSU State University, 2019. – pp. 226-238.
- 5 I. N. Kravchenko Development of technology for applying plasma coatings for multifunctional purposes / I. N. Kravchenko, М. А. Glinsky, Yu. А. Shamarin, Т. А. Cheka // Bulletin of the

Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "V. P. Goryachkin Moscow State Agroengineering University". 2017. No.6(82). pp. 63-71.

6 V.V. Kaminskaya Bed frames and body parts of metal-cutting machines/ V.V. Kaminskaya, Z.M. Levina, D.N. Reshetov. - M.: MASHGIZ, 1960., 365p.

7 A. G. Skhirtladze Spindle repair technology //Repair, restoration, modernization. - 2002. – No. 4. – p. 8.

8 G.D. Pekelis Technology of repair of metal-cutting machines / G.D. Pekelis, B.T. Gelberg. - M.: Mashinostroyeniye, 1984. 240p.

9 Nowotnik, A.; Pedrak, P.; Sieniawski, J.; Goral, M.: Mechanical properties of hot deformed Inconel 718 and X750. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Vol. 50 Issue 2 February 2012, 74-80.

10 A.V. Belyi Structure and methods of formation of wear-resistant surface layers / A.V. Belyi, G. D. Karpenko, N. K. Myshkin. – M.: Mashinostroyeniye, 1991. - 208 p.

11 I.A. Tolstov Wear-resistant surfacing materials and high-performance methods of their processing/ I.A. Tolstov, M.N. Semikolennykh, L.V. Baskakov, V.A. Korotkov. M., " Mashinostroyeniye", 1992

12 A.M. Kadyrmetov Efficiency management of gas-dynamic processes of flame spraying / A.M. Kadyrmetov, Yu. E. Simonova, E. V. Snyatkov, A. A. Plakhotin // In the collection: Innovative technologies in transport and chemical engineering. Materials of the XII International Scientific and Technical Conference of the Association of Engineering Technologists. 2020. pp. 45-56.

13 V. V. Kudinov Plasma coating / V. V. Kudinov, P. Yu. Pekshev, V. E. Belashchenko et al. – M.: Nauka, 1990. – 408 p. – ISBN 5-02-006040-2.

14 S. V. Petrov, Plasma gas-air spraying / S. V. Petrov, I. N. Karp. - Kiev: Naukova dumka. - 1993. – 495 p.

15 Xiong, H.; Sun, W. Investigation of Droplet Atomization and Evaporation in Solution Precursor Plasma Spray Coating. Coatings 2017, 7, 207.

16 V.A. Vinokurov Theory of welding deformations and stresses / V.A.Vinokurov, A.G. Grigoryants // Moscow: Mashinostroyeniye, 1984.– 280 p.

17 Moradi V., Adamian A., Arab N. B. Investigating of EBW Process Weldment Connections Stresses in ILSF 100 MHz Cavity by Simufact. Welding Software. – 2021.

18 Kuzemko R. D., Naumov V. A., Hoan H. V. Distribution of parameters in a turbulent jet during gas atomization of alloys //Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences. - 1997. – No. 3. – pp. 41-49.

19 Hasui A., Morigaki O. Surfacing and spraying. M.: Mechanical Engineering, 1985. 240 p.

20 Polyanin A. D. Linear tasks of heat and mass-transmission: General formulas and results // Theoretical foundations of chemical technology. -2000. T. 34. - No. 6. - S. 563-574.

21 To the problem of the non-subservative mass in the porous media / N. N. Grinchik, P.V. Akulich, P. S. Kutz, N. V. Pavlyukevich, V. I. Terekhov // Engineering and Physical Journal. 2003. - T. 76. - No. 6. - S. 129-142.

22 Nguyen Q. B. et al. Characteristics of Inconel powders for powder-bed additive manufacturing, Engineering, 3 (2017) 695–700. DOI: 10. 1016 //J. ENG. – 2017. – T. 12

23 E. B. Ershov. Extension of the coefficient of determination to the general case of linear regression estimated using different versions of the least squares method //Economics and mathematical methods. - 2002. – Vol. 38. – No. 3. – pp. 107-120.

© Кадырметов А. М., Симонова Ю. Э., Черных Д.М., Попов Д.А. 2023 г.