

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 1 (175). С. 19-27.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 1 (175). P. 19-27.

Научная статья  
УДК 621.793.74:62-408  
doi: 10.30987/2223-4608-2026-1-19-27

## Оптимизация параметров газотермического напыления термобарьерного покрытия на основе стратегии минимального риска

Михаил Евгеньевич Соловьев<sup>1</sup>, д.ф-м.н.

Сергей Львович Балдаев<sup>2</sup>, к.т.н.

Лев Христофорович Балдаев<sup>3</sup>, д.т.н.

Антон Александрович Савватеев<sup>4</sup>, аспирант

<sup>1,4</sup> Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

<sup>2,3</sup> ООО «Технологические системы защитных покрытий», Москва, Россия

<sup>1</sup> me\_s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8840-248X>

<sup>2</sup> s.baldaev@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>3</sup> l.baldaev@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>4</sup> a.a.savvateev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Рассмотрена задача оптимизации технологических параметров плазменного напыления термобарьерных покрытий на детали газотурбинных двигателей с использованием стратегии минимального риска. Отмечается, что традиционный подход к оптимизации технологических процессов, в основном ориентированный на экстремум одного из показателей качества при жестких ограничениях на остальные, сталкивается с трудностями из-за сложности зависимости свойств покрытия от параметров процесса и необходимости учета стохастической природы явлений. В ответ на это предложена новая методика, позволяющая формулировать задачу оптимизации на основе функции совокупных потерь от рисков событий и затрат на управление ими, с учетом вероятности выхода параметров качества за допустимые пределы. В ходе работы построены регрессионные модели для двух главных характеристик покрытия – адгезионной прочности и пористости – на основе экспериментальных данных, что позволило количественно учесть вариации этих характеристик при изменении управляющих параметров процесса (ток дуги плазматрона, дистанция напыления, расход водорода). При этом вероятности неблагоприятных событий оценивались статистически, через функции нормального распределения. Численное решение задачи проводилось с использованием метода последовательного квадратичного программирования SLSQP для поиска условного минимума целевой функции при заданных ограничениях по бюджету, уровню риска и диапазонам управляющих воздействий. Проведенный анализ показал, что предложенная методика представляет значительную гибкость в учете производственных ограничений и требований к качеству, а также позволяет более эффективно балансировать риск и затраты. Результаты оптимизации демонстрируют, что изменение весовых коэффициентов затрат и ограничений на показатели качества позволяет добиваться оптимальных технологических режимов в зависимости от стратегических приоритетов производства. Такой подход перспективен для повышения эффективности и надежности технологических процессов напыления термобарьерных покрытий в машиностроении.

**Ключевые слова:** термобарьерные покрытия, плазменное напыление, пористость, адгезионная прочность, оптимизация

**Для цитирования:** Соловьев М.Е., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х., Савватеев А.А. Оптимизация параметров газотермического напыления термобарьерного покрытия на основе стратегии минимального риска // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 1 (175). С. 19–27. doi: 10.30987/2223-4608-2026-1-19-27

## Parameter optimization for gas thermal spraying in thermal barrier coating according to a minimum risk strategy

Mikhail E. Soloviev<sup>1</sup>, Dr. Sci. in Physics and Mathematics

Sergey L. Baldaev<sup>2</sup>, PhD. Eng.

Lev Kh. Baldaev<sup>3</sup>, D. Eng.

Anton A. Savvateev<sup>4</sup>, PhD student

<sup>1,4</sup> Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

<sup>2,3</sup> Technological Systems of Protective Coatings LLC, Moscow, Russia

<sup>1</sup> me\_s@mail.ru

<sup>2</sup> s.baldaev@tspc.ru

<sup>3</sup> l.baldaev@tspc.ru

<sup>4</sup> a.a.savvateev@gmail.com

**Abstract.** The problem of process parameter optimization for plasma spraying of thermal barrier coatings on gas turbine engine parts using a minimum risk strategy is viewed. It is noted that the traditional approach to flow process optimization used as reference an extremum of just one of the quality indicators while all the rest were restricted stiffly. But this faces difficulties due to the complexity of the dependence of coating properties on process parameters and the need to take into account the stochastic nature of phenomena. In response, a new procedure has been proposed that makes it possible to formulate an optimization problem based on the function of cumulative losses from risk events and the cost of managing them, taking into account the likelihood that quality parameters will exceed acceptable limits. In the course of the work, regression models were built for the two main characteristics of the coating – adhesive strength and porosity – based on experimental data, enabling us to quantify variations in these characteristics when changing the control parameters of the process (plasma torch arc current, spray distance, and hydrogen consumption). At the same time, the probabilities for undesired events were assessed statistically through normal distribution functions. The numerical solution of the problem was carried out using the sequential quadratic programming method SLSQP to find the conditional minimum of the objective function under specified constraints on budget, risk level and ranges of control actions. The analysis showed that the proposed approach provides significant flexibility in accounting for production constraints and quality requirements, as well as allows for a more effective balancing of risk and cost. The optimization results prove that changing the severity and quality constraints makes it possible to achieve optimal technological modes depending on the strategic priorities of production. This approach is promising for improving the efficiency and reliability of technological processes for spraying thermal barrier coatings in mechanical engineering.

**Keywords:** thermal barrier coatings, plasma spraying, porosity, adhesive strength, optimization

**For citation:** Soloviev M.E., Baldaev S.L., Baldaev L.Kh., Savvateev A.A. Parameter optimization for gas thermal spraying in thermal barrier coating according to a minimum risk strategy / Science intensive technology in mechanical engineering. 2026. № 1 (175). P. 19–27. doi: 10.30987/2223-4608-2026-1-19-27

### Введение

Газотермическое напыление порошковых материалов широко используется для создания специальных покрытий на различные детали в машиностроении, в том числе, создания термобарьерных покрытий на детали газотурбинных двигателей, эксплуатация которых проходит в условиях высоких температур и других агрессивных воздействий [1 – 5]. Ранее в работах [6, 7] было исследовано влияние параметров плазменного напыления порошка оксида алюминия на металлическую поверхность на различные свойства формирующегося покрытия, в том числе, прочность адгезионной связи с основной детали и пористость. Пористость покрытия уменьшает коэффициент теплопроводности, что обеспечивает теплозащитные свойства [8],

но при слишком высокой пористости снижается прочность покрытия, в том числе адгезионная прочность связи с основной детали.

Таким образом, для определения рациональных технологических параметров плазменного напыления порошка необходима постановка и решение задачи оптимизации. Однако в классическом варианте постановка такой задачи, состоящая в выборе в качестве целевой функции одного из показателей качества покрытия и наложения ограничений на значения другого в данном случае затруднительна с одной стороны в связи со сложностью зависимостей характеристик покрытия от параметров технологического процесса, а с другой в связи с необходимостью учета стохастического характера рассматриваемого процесса. В этой связи в настоящей работе предложена методика

решения задачи оптимизации технологических параметров процесса плазменного напыления покрытия на основе стратегии минимального риска.

Риск – это количественная мера возможности наступления неблагоприятного события, выражаемая через вероятность данного события и ожидаемый ущерб от его последствий, что можно представить в виде простой формулы [9, 10]

$$R = P \cdot D, \quad (1)$$

где  $R$  – величина риска;  $P$  – вероятность наступления неблагоприятного события;  $D$  – величина ожидаемого ущерба.

Существует достаточно много различных подходов к управлению рисками [9 – 16], реализованных, главным образом, в финансово-экономической области [11, 12, 15]. Управление рисками в случае сложной технической системы имеет ряд особенностей [14], таких как интервальная неопределенность информации о значениях параметров и фазовом пространстве, что приводит к необходимости учета стохастических характеристик системы.

Целью настоящей работы явилось создание методики оптимизации сложного технического процесса, каким является газотермическое напыление термобарьерных покрытий, основанное на стратегии минимального риска.

### Результаты и обсуждение

В настоящей работе предлагается в качестве целевой функции использовать функцию суммарных потерь от реализации рисков событий и затрат на управление рисками, для которой необходимо найти условный минимум, при соответствующих ограничениях на параметры:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n p_i(x) \cdot W_i + C(x) \rightarrow \min \quad (2)$$

где  $x$  – вектор управляющих воздействий;  $n$  – количество рассматриваемых рисков;  $p_i(x)$  – вероятность реализации риска при управляющем воздействии  $x$ ;  $W_i$  – величина

потерь при реализации риска;  $C(x)$  – затраты на реализацию управляющих воздействий  $x$ .

При решении задачи (2) вводятся следующие ограничения:

1. Бюджетное ограничение:

$$C(x) \leq B, \quad (3)$$

где  $B$  – максимально допустимый бюджет на управление рисками.

2. Ограничение на допустимый уровень риска:

$$R(x) = \sum_{i=1}^n p_i(x) \cdot W_i \leq R_{\max}, \quad (4)$$

где  $R_{\max}$  – максимально допустимый уровень риска.

3. Ограничения на управляющие воздействия:

$$x_j^{\min} \leq x_j \leq x_j^{\max}, j = 1, \dots, m, \quad (5)$$

где  $m$  – количество управляющих воздействий.

Таким образом, задача управления рисками сводится к нахождению оптимального вектора управляющих воздействий  $x^*$ , минимизирующего целевую функцию  $F(x)$  при заданных ограничениях (3) – (5). В решаемой задаче  $m = 3, n = 2$  и специфика состоит в выборе функций для вычисления вероятностей  $p_i(x)$  и функции затрат  $C(x)$ . При решении задачи управления риском для процесса нанесения теплозащитного покрытия на детали газотурбинных двигателей, вероятности  $i$ -го риска  $p_i(x)$  могут быть вычислены следующим образом:

1. Для риска, связанного с прочностью адгезионной связи ( $y_1$ ):

$$p_1(x) = P(y_1(x) < Y1), \quad (6)$$

где  $Y1$  – заданное предельное значение для адгезионной прочности.

Эта вероятность может быть оценена с использованием нормального распределения:

$$p_1(x) = \Phi((Y1 - y_1(x))/\sigma_1), \quad (7)$$

где  $\Phi$  – функция стандартного нормального распределения;  $\sigma_1$  – среднеквадратическое

отклонение  $y_1$ ; оцененное по дисперсии воспроизводимости.

2. Для риска, связанного с пористостью ( $y_2$ ):

$$p_2(x) = P(y_2(x) < Y21) + P(y_2(x) > Y22), (8)$$

где  $Y21$  и  $Y22$  – соответственно, заданные верхнее и нижнее предельные значения пористости.

Эта вероятность также может быть оценена с использованием нормального распределения:

$$p_2(x) = \Phi((Y21 - y_2(x))/\sigma_2) + (1 - \Phi((Y22 - y_2(x))/\sigma_2)) \quad (8)$$

где  $\sigma_2$  – среднеквадратическое отклонение  $y_2$ ; оцененное по дисперсии воспроизводимости.

В обоих случаях  $y_j(x)$  вычисляются по регрессионным моделям, полученным в работах [6, 7]

$$y_i = b_0 + \sum_{j=1}^3 b_{1j}x_j + \sum_{j=2}^3 b_{1j}x_1x_j + b_{23}x_2x_3 + \sum_{j=1}^3 b_{22j}x_i^2 + b_{123}x_1x_2x_3, i = 1, 2, \quad (9)$$

где  $B = (b_0, b_{1i}, b_{22i}, b_{123})^T$ ;  $j = 1, 2, 3$  – вектор коэффициентов регрессии. Аргументами функций являются следующие нормированные значения технологических параметров процесса напыления:  $x_1$  – ток дуги плазматрона ( $x_1^0 = 550A$ ,  $\Delta x_1 = 25A$ );  $x_2$  – дистанция напыления ( $x_2^0 = 105\text{мм}$ ,  $\Delta x_2 = 15\text{мм}$ );  $x_3$  – подача водорода ( $x_3^0 = 7 \text{ л/мин}$ ,  $\Delta x_3 = 1 \text{ л/мин}$ ).

Вычисленные на основании экспериментальных данных значения коэффициентов регрессии для прочности адгезионной связи и пористости из работ приведены в табл. 1 [6, 7].

### 1. Коэффициенты уравнений регрессии (9) для адгезионной прочности покрытия $y_1$ и пористости $y_2$

### 1. Coefficients of regression equations (9) for the adhesive strength of the coating $y_1$ and porosity $y_2$

| Коэффициент | $y_1, \text{МПа}_1$ | $y_2, \%$ |
|-------------|---------------------|-----------|
| $b_0$       | 21,5383             | 26,2389   |
| $b_1$       | - 1,1931            | - 0,3670  |
| $b_2$       | - 1,1144            | 0,4587    |
| $b_3$       | 0,2406              | - 0,7330  |
| $b_{12}$    | 0,2342              | 0,0427    |
| $b_{13}$    | - 2,2742            | - 0,3578  |
| $b_{23}$    | - 0,2175            | - 0,4527  |
| $b_{221}$   | - 0,0231            | - 0,9420  |
| $b_{222}$   | - 0,8181            | - 0,5599  |
| $b_{223}$   | 1,5369              | - 4,5512  |
| $b_{123}$   | 4,0438              | 0,5199    |
| $\sigma$    | 2,111               | 1,639     |

В работах [6, 7] задача оптимизации не ставилась, был проведен только приближенный анализ характера поверхностей, описываемых регрессионными моделями (9), без учета члена тройного взаимодействия факторов, характеризуемого коэффициентом  $b_{123}$ , то есть в линейном приближении системы уравнений для критической точки поверхности отклика.

Поскольку целью настоящей работы являлось решение задачи оптимизации, представляло интерес провести более точный поиск критических точек и определение характера гиперповерхностей, описываемых уравнениями (9) с коэффициентами из табл. 1.

Критические точки поверхностей регрессии могут быть найдены из решения систем уравнений для каждой функции отклика

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_j} = 0, i = 1, 2; j = 1, 2, 3. \quad (10)$$

Если учитывать в уравнениях регрессии (9) эффект тройного взаимодействия факторов  $b_{123}x_1x_2x_3$ , то системы уравнений (10) получаются нелинейными и решать их можно только численно. В настоящей работе численное решение данных систем проводили методом Ньютона-Крылова, проводя поиск несколько раз из разных начальных точек гиперкуба (5) при  $x_j^{\min} = -1,5, x_j^{\max} = 1,5$ . Из найденных точек оставлялись только те, которые удовлетворяли неравенствам (5), определяющим область допустимых значений для нормированных независимых переменных уравнений регрессии (9). В результате для поверхности  $y_1(x_1, x_2, x_3)$  были найдены две критические точки с координатами в нормированной единицах (- 0,1112; - 0,5802; - 0,2865) и (- 0,5470; - 0,0194; - 0,4983). Собственные значения матрицы Гессе для первой критической точки составили (- 3,9294; - 1,0692; 6,3903), что говорит о том, что данная точка является седловой. Для второй критической точки собственные значения матрицы Гессе составили (- 4,3009; 1,0232; 4,6693), что говорит о том, что и эта точка также является седловой. В качестве иллюстрации на рис. 1 – 3 приведены сечения данной гиперповерхности при значениях  $x_3 = -1; 0; 1$ .

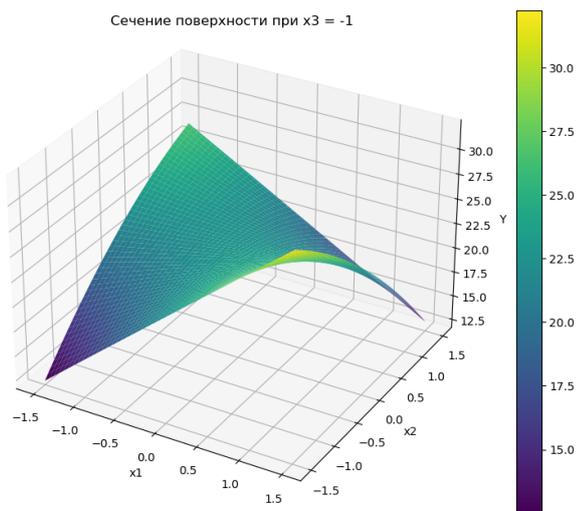


Рис. 1. Вид сечения поверхности отклика  $y_1(x_1, x_2, -1)$

Fig. 1. Cross-section view of the response surface  $y_1(x_1, x_2, -1)$

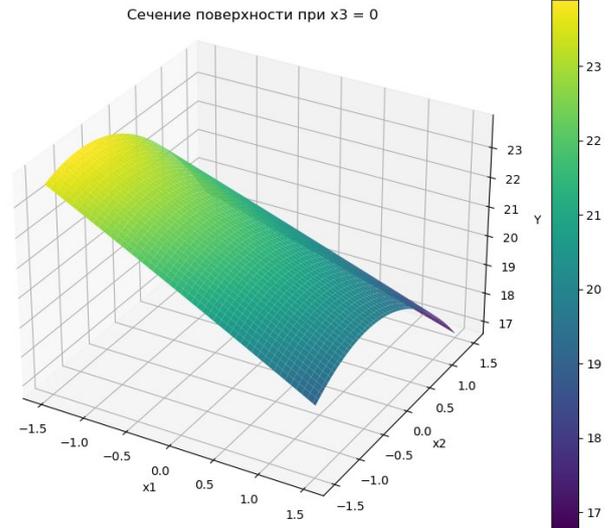


Рис. 2. Вид сечения поверхности отклика  $y_1(x_1, x_2, 0)$

Fig. 2. Cross-section view of the response surface  $y_1(x_1, x_2, 0)$

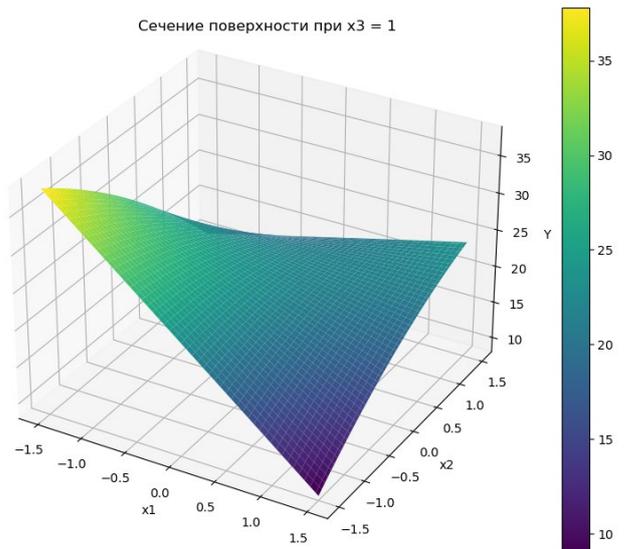


Рис. 3. Вид сечения поверхности отклика  $y_1(x_1, x_2, 1)$

Fig. 3. Cross-section view of the response surface  $y_1(x_1, x_2, 1)$

Для поверхности  $y_2(x_1, x_2, x_3)$  найдена только одна критическая точка с координатами (- 0,1776; 0,4526; - 0,1007). Собственные значения матрицы Гессе в этой точке составили (- 1,8847; - 1,0798; - 9,1412), что свидетельствует о том, что данная точка является точкой максимума функции. Это иллюстрируют графики сечений данной поверхности на рис. 4 – 6.

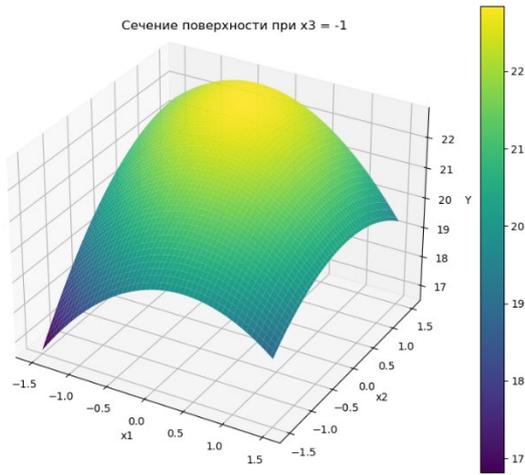


Рис. 4. Вид сечения поверхности отклика  $y_2(x_1, x_2, -1)$

Fig. 4. Cross-section view of the response surface  $y_2(x_1, x_2, -1)$

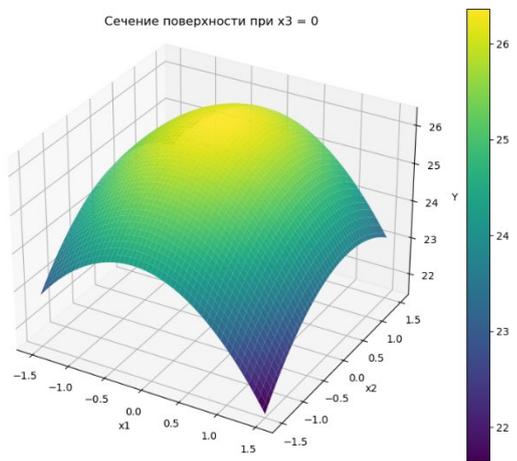


Рис. 5. Вид сечения поверхности отклика  $y_2(x_1, x_2, 0)$

Fig. 5. Cross-section view of the response surface  $y_2(x_1, x_2, 0)$

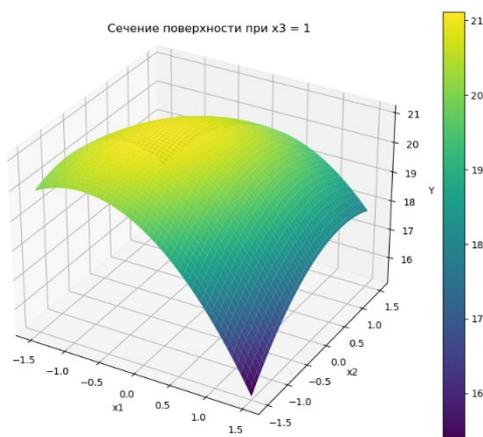


Рис. 6. Вид сечения поверхности отклика  $y_2(x_1, x_2, 1)$

Fig. 6. Cross-section view of the response surface  $y_2(x_1, x_2, 1)$

Проведенный анализ демонстрирует сложность постановки классической задачи оптимизации для изучаемого процесса, что и послужило причиной постановки задачи оптимизации на основе функции управления рисками (2), позволяющей с помощью варьирования ограничений оценивать оптимальные решения с точки зрения как показателей качества покрытия, так и с точки зрения затрат. В силу линейности зависимостей затрат на проведение процесса от технологических параметров функция затрат  $C(x)$  в настоящей работе была принята в виде линейной формы

$$C(x) = \sum_{j=1}^3 c_j x_j, \quad (11)$$

где  $c_j$  – коэффициенты, характеризующие вклад изменений фактора  $x_j$  в общие затраты на проведение технологического процесса.

Численное решение задачи нелинейной оптимизации (2) с ограничениями (3) – (8) и функциями регрессии (9) проводили методом последовательного квадратичного программирования SLSQP (Sequential Least Squares Programming), позволяющим работать со сложными линейными и нелинейными ограничениями [17].

Примеры решения задачи оптимизации для различных предельных значений показателей качества технологического процесса и уровня затрат в табл. 2. При решении неизменными были следующие значения параметров:  $W = [0,5; 0,5]$ ;  $B = 10$ ;  $R_{\max} = 5$ , что отвечает равным весовым коэффициентам для обоих показателей качества и слабым ограничениям по максимальному бюджету и максимально допустимому уровню риска. Значения остальных ограничений приведены в первом столбце табл. 2. Первые три строки отвечают отсутствию ограничений на затраты на реализацию управляющих воздействий: все коэффициенты  $c_i = 0$ . При этом изменялись

ограничения на показатели качества покрытия  $Y_1, Y_{21}, Y_{22}$ . Как видно, минимальное значение целевой функции, достигаемое при оптимальном векторе управляющих воздействий меняется незначительно, хотя сами координаты вектора  $x^*$  изменяются, оставаясь при этом в пределах заданных ограничений на управляющие воздействия  $x_j^{\min} = -1,5, x_j^{\max} = 1,5$ . Это говорит о том, что при отсутствии ограничений на затраты приблизительно одинакового уровня риска можно достичь при различных значениях ограничений на показатели качества покрытия путем варьирования технологических параметров процесса. В последней строке таблицы ограничения на затраты на реализацию управляющих воздействий присутствуют. Значения коэффициентов  $c_i$  отражают следующее соотношение затрат на

управляющие воздействия: коэффициент  $c_1$  наибольший, что отвечает наибольшим затратам на увеличение параметра  $x_1$  (ток плазмотрона), коэффициент  $c_2$  равен нулю, что соответствует практическому отсутствию затрат на изменение данного параметра (дистанция до поверхности напыления), коэффициент  $c_3$  положительный, но существенно меньший по сравнению с коэффициентом  $c_1$ , что отвечает меньшим затратам на изменение данного параметра (расход водорода). Как видно из решения для данных параметров, функция риска весьма чувствительна к затратам, так что оптимальное значение параметра  $x_1$  оказалось на его нижнем пределе. Логически это объясняется необходимостью снижать значение параметра  $x_1$  при высоких затратах на его реализацию.

## 2. Результаты решения задачи условной оптимизации

### 2. Results of solving the conditional optimization problem

| Параметры   | Оптимальные управляющие воздействия, $x^*$ | Минимальное значение целевой функции |
|---|--|--------------------------------------|
| $Y_1 = 20; Y_{21},$<br>$Y_{22} = 20, 25;$<br>$c = [0; 0; 0]$        | (- 1,0785; - 0,7210; 0,8417)               | 0,028049                             |
| $Y_1 = 15; Y_{21},$<br>$Y_{22} = 20, 25;$<br>$c = [0; 0; 0]$        | (- 0,1705; - 0,6076; 0,8703)               | 0,02805                              |
| $Y_1 = 20; Y_{21},$<br>$Y_{22} = 15, 20;$<br>$c = [0; 0; 0]$        | (- 0,4579; - 0,6215; 1,3647)               | 0,028053                             |
| $Y_1 = 20; Y_{21},$<br>$Y_{22} = 20, 25;$<br>$c = [0,01; 0; 0,001]$ | (- 1,5; - 0,7173; 0,7497)                  | 0,01379                              |

### Заключение

В данной работе предложена методика оптимизации технологического процесса плазменного напыления термобарьерного

покрытия на детали газотурбинных двигателей, основанная на стратегии минимального риска. В отличие от традиционного подхода к оптимизации параметров технологических процессов,

основанной на выборе критерия в виде одного из показателей качества покрытия при ограничениях на другие, предлагаемая методика обеспечивает большую гибкость при формулировке задачи оптимизации, а также учитывает стохастический характер технологического процесса, что обеспечивается использованием при постановке задачи оптимизации не только средних значений показателей качества но и их статистической вариации.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Хасуй 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.
2. **Кудинов В.В., Бобров Г.В.** Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
3. **Газотермическое напыление** / под общей ред. Л.Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
4. **Davis J.R.** Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004. 338 p.
5. **Пузряков А.Ф.** Теоретические основы технологии плазменного напыления. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2008. 360 с.
6. **Балдаев С.Л., Соловьев М.Е., Раухваргер А.Б., Балдаев Л.Х., Мищенко В.И.** Влияние параметров плазменного напыления порошка оксида алюминия на адгезионную прочность керамических покрытий термонапряженных узлов газотурбинных двигателей // Вестник МЭИ. 2024. № 1. С. 93–102. DOI: 10.24160/1993-6982-2024-1-93-102.
7. **Соловьев М.Е., Раухваргер А.Б., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х., Мищенко В.И.** Влияние условий плазменного напыления порошка оксида алюминия на пористость и электрическое сопротивление покрытия // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 22–32.
8. **Раухваргер А.Б., Соловьев М.Е., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х.** Об определении эффективных параметров теплопередачи пористых слоев по фрагментам фотографий срезов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 4 (2023). С. 5–15 DOI: 10.15593/2224-9877/2023.4.01
9. **Елохин А.Н.** Анализ и управление риском: Теория и практика. М.: Лукойл, 2000. 185 с.
10. **Оценка** и управление природными рисками / Материалы общероссийской конференции «Риск 2000». М.: Анкил, 2000. 478 с.

11. **Чистяков М.И.** Метод оценки кредитного риска // Системный анализ в науке и образовании. 2012. № 4. 10 с.
12. **Тайшин А.А.** Применение модели KMV для оценки кредитного риска индивидуальных предпринимателей // Вестник НГУ. Серия: Социально-экономические науки. 2014. Т. 14. № 3. С. 22–32
13. **Reilly J.J., Moergeli A., Sander P.** Risk-based, probabilistic cost estimating methods // ITA 2015, World Tunnel Conference, Cost-Risk Paper, 2015. ITA WTC: Dubrovnik. 17 p.
14. **Kalashnikov P.V.** Mathematical model of risk control arising from the functioning of complex technical systems for critical purposes in conditions of uncertainty of information about the values of parameters and the phase state // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies, 2022. Vol. 12. No 3. P.22–39
15. **Рогонов С.А., Солдатенко И.С., Язенин А. В.** Квазиэффективная граница портфеля минимального риска в условиях гибридной неопределенности // Вестник ВГУ, Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2023. № 4. С. 92–103
16. **Воробьев И.А.** Методы машинного обучения в задаче оценки риска мошенничества в автостраховании // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика, 2024. Т. 24. №. 4. С. 619–628
17. **Kraft D.** Algorithm 733: TOMP Fortran modules for optimal control calculations // ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), 1994. V. 20 (3). P. 262–281.

### REFERENCES

1. Hasui A., Morigaki O. Surfacing and Spraying / in Russian, translated from Japanese by V. N. Popov. Eds. V. S. Stepin, N. G. Shesterkin, Mashinostroenie, Moscow (1985), 240 p.
2. Kudinov V.V., Bobrov G.V. Coating by spraying. Theory, technology and equipment. Moscow: Metallurgiya, 1992. 432 p.
3. Gas thermal spraying / under the general editorship of L.H. Baldaev. Moscow: Market DS, 2007, 344 p.
4. Davis J.R. Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004. 338 p.
5. Puzryakov A.F. Theoretical foundations of the technology of plasma sputtering. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2008, 360 p.
6. Baldaev S.L., Solovyov M.E., Raikhvarger A.B., Baldaev L.Kh., Mishchenko V.I. The Influence of aluminum oxide powder plasma spraying parameters on the adhesive strength of ceramic coatings applied to the gas turbine engine thermally stressed components // Bulletin of the MEI. 2024, no. 1, pp. 93–102. DOI: 10.24160/1993-6982-2024-1-93-102.

7. Soloviev M.E., Raukhvarger A.B., Baldaev S.L., Baldaev L.Kh., Mishchenko V.I. Influence of conditions of plasma spraying of aluminum oxide powder on the porosity and electrical resistance of a coating // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2023, no. 5 (143), pp. 22–32.
8. Raukhvarger A.B., Solovyov M.E., Baldaev S.L., Baldaev L.H. About the determination of the effective parameters of heat transfer of porous layer from fragments of photographs of sections // Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science. 4 (2023), pp. 5–15. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.4.01
9. Elokhin A.N. Analysis and risk management: Theory and practice. Moscow: Lukoil, 2000, 185 p.
10. Assessment and management of natural risks / Proceedings of the All-Russian conference "Risk 2000". Moscow: Ankil, 2000, 478 p.
11. Chistyakov M.I. Method of the assessment of credit risk // System analysis in science and education. 2012, no. 4, 10 p.
12. Taishin A.A. Application of KMV model to assess the credit risk of individual entrepreneurs // Bulletin of the NSU. Series: Socio-economic sciences. 2014, vol. 14, no. 3, pp. 22–32
13. Reilly J.J., Moergeli A., Sander P. Risk-based, probabilistic cost estimating methods // ITA 2015, World Tunnel Conference, Cost-Risk Paper, 2015. ITA WTC: Dubrovnik. 17 p.
14. Kalashnikov P.V. Mathematical model of risk control arising from the functioning of complex technical systems for critical purposes in conditions of uncertainty of information about the values of parameters and the phase state // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies, 2022. Vol. 12. No 3. P.22–39
15. Rogonov S.A., Soldatenko I.S., Yazenin A.V. Quasi-efficient frontier of minimum risk portfolio under hybrid uncertainty // VSU Bulletin, Series: System Analysis and Information Technologies. 2023, no. 4, pp. 92–103
16. Vorobyov I.A. Machine learning methods in the task of assessing the risk of fraud in auto insurance // Proceedings of the Saratov University. A new series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 619–628
17. Kraft D. Algorithm 733: TOMP Fortran modules for optimal control calculations // ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), 1994. V. 20 (3). P. 262–281.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.07.2025; одобрена после рецензирования 30.11.2025; принята к публикации 30.11.2025.

The article was submitted 03.07.2025; approved after reviewing 30.11.2025; accepted for publication 30.11.2025.