

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ/ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.9>

EDN: LFHWA0

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ТЕРМОБАРЬЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК

Научная статья

Тимохова О.М.^{1,*}, Поспелов И.А.²¹ORCID : 0000-0003-3179-6382;¹Сыктывкарский лесной институт, Сыктывкар, Российская Федерация²Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (chonochka[at]mail.ru)

Предложена: 16.06.2026; Принята: 10.07.2026; Опубликовано: 17.08.2026

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния технологических параметров плазменного напыления (силы тока, расхода водорода и дистанции напыления) на коэффициент использования материала (КИМ), пористость, удельные энергозатраты и общий энергетический КПД процесса при формировании термобарьерных покрытий из диоксида циркония, стабилизированного 8 мас. % иттрия (8YSZ), на поверхности деталей теплогенерирующих установок. С применением полного факторного эксперимента типа 2³ (11 опытов, трёхкратная повторность) построены регрессионные модели в кодированных переменных. Методом градиентного спуска при ограничении пористости ($\epsilon \geq 8\%$) определена область оптимальных режимов. Экспериментальные исследования показали повышение КИМ с 38,2 до 57,4%, снижение удельных энергозатрат с 18,6 до 12,1 кВт·ч/кг и рост общего энергетического КПД процесса с 4,2 до 7,1% при сохранении пористости на уровне 9,8%. Полученные уравнения в кодированных переменных могут быть пересчитаны в натуральные по приведённым формулам.

Ключевые слова: оптимизация режимов напыления, плазменное напыление, термобарьерные покрытия, теплогенерирующие установки, коэффициент использования материала, пористость, удельные энергозатраты, регрессионные модели.

OPTIMISATION OF PLASMA SPRAYING PROCESSES FOR THERMAL BARRIER COATINGS ON COMPONENTS OF HEAT-GENERATING UNITS

Research article

Timokhova O.M.^{1,*}, Pospelov I.A.²¹ORCID : 0000-0003-3179-6382;¹Syktvykar Forest Institute, Syktvykar, Russian Federation²Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation

* Corresponding author (chonochka[at]mail.ru)

Suggested: 16.06.2026; Accepted: 10.07.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

The article presents the results of an experimental study of the influence of plasma spraying process parameters (current, hydrogen consumption, and spraying distance) on the material utilisation factor (MUF), porosity, specific energy consumption and the overall energy efficiency of the process when forming thermal barrier coatings of zirconium dioxide stabilised with 8 wt. % yttrium (8YSZ) on the surfaces of components for heat-generating installations. Using a full 2³ factorial experiment (11 trials, triplicated), regression models were constructed using coded variables. The region of optimal operating conditions was determined using the gradient descent method, subject to a porosity constraint ($\epsilon \geq 8\%$). Experimental research showed an increase in the KIM from 38,2 to 57,4%, a reduction in specific energy consumption from 18,6 to 12,1 kWh/kg, and an increase in the overall energy efficiency of the process from 4,2 to 7,1%, while maintaining porosity at 9,8%. The obtained equations in coded variables can be converted to natural variables using the given formulae.

Keywords: optimisation of spraying processes, plasma spraying, thermal barrier coatings, heat-generating units, material utilisation ratio, porosity, specific energy consumption, regression models.

Введение

Эффективность функционирования теплогенерирующих установок, включающих котлы, теплообменники, газотурбинные и парогазовые системы, в значительной степени определяется температурным уровнем газового тракта. Повышение рабочей температуры является одним из основных путей увеличения термического КПД цикла. Однако эксплуатация металлических компонентов при температурах, превышающих 1000...1200°C, невозможна без применения эффективной термической защиты. Термобарьерные покрытия (ТБП), формируемые методом плазменного напыления, обеспечивают снижение температуры металлической основы на 150...200°C и повышение ресурса деталей в 2–3 раза [1].

Низкая энергетическая эффективность плазменного напыления, при которой общий КПД процесса не превышает 3–5%, существенно ограничивает технологические возможности метода [3]. Отклонение режимов напыления от

оптимальных приводит к формированию покрытий с неудовлетворительными характеристиками: повышенной эффективной теплопроводностью при пористости ниже 8% либо пониженной термостойкостью при пористости выше 12%. Это, в свою очередь, снижает термозащитную способность покрытий и сокращает межремонтный ресурс оборудования в 1,5–2 раза [4]. Следовательно, задача оптимизации режимов напыления является ключевой для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств ТБП и надёжности теплогенерирующих установок.

В доступных источниках описаны отдельные технологические режимы для покрытий на основе 8YSZ [2], [3], однако отсутствуют количественные модели, позволяющие учитывать совместное влияние силы тока, расхода водорода и дистанции напыления на три ключевых отклика: коэффициент использования материала (КИМ, определяет расход порошка), пористость (определяет теплоизоляционные свойства) и удельные энергозатраты (определяют экономичность процесса). Кроме того, остаётся неразрешённым противоречие между повышением энергетической эффективности процесса и необходимостью сохранения требуемой пористости покрытия.

Цель работы заключается в разработке оптимизированных режимов плазменного напыления ТБП для деталей теплогенерирующих установок, обеспечивающих максимальный КИМ и минимальные удельные энергозатраты при безусловном выполнении требования к пористости $\epsilon \geq 8\%$.

Методы и принципы исследования

Объект и материалы

В качестве материала для напыления использован порошок диоксида циркония, стабилизированного 8 мас.% иттрия (8YSZ), фракционного состава 45–75 мкм. Химический состав и морфология частиц соответствуют требованиям, предъявляемым к термобарьерным покрытиям для газотурбинных и котельных установок [4].

Оборудование

Нанесение покрытий осуществлялось на установке с плазмотроном коаксиального типа ПМ-1 [2]. В качестве плазмообразующего газа использовалась смесь аргона и водорода.

Планирование эксперимента

Реализован полный факторный эксперимент типа 2^3 с тремя центральными точками. Диапазоны варьируемых факторов выбраны на основании предварительных исследований:

- сила тока I — от 400 до 600 А;
- расход водорода $Q(\text{H}_2)$ — от 6 до 14 л/мин;
- дистанция напыления L — от 90 до 170 мм.

Расход аргона на первом этапе поддерживался постоянным (40 л/мин), а в последующем оптимизировался отдельно в диапазоне 30–50 л/мин. Общее количество опытов составило 11, каждый из которых был повторён трижды. Для исключения систематических погрешностей применялась рандомизация последовательности проведения опытов.

После проведения всех опытов для каждого образца выполняли измерения основных характеристик покрытий: коэффициент использования материала, пористость, удельные энергозатраты, общий энергетический КПД процесса.

Коэффициент использования материала (КИМ, η_m) определялся гравиметрическим методом по формуле:

$$\eta_m = (m_{\text{покр}} / m_{\text{пор}}) \times 100\%,$$

где $m_{\text{покр}}$ — масса осаждённого покрытия, $m_{\text{пор}}$ — масса израсходованного порошка.

Пористость ϵ оценивалась методом количественной металлографии на поперечных шлифах [5].

Удельные энергозатраты $E_{\text{уд}}$ (кВт·ч/кг) рассчитывались как отношение активной мощности плазмотрона (кВт) к производительности напыления по массе покрытия (кг/ч).

Общий энергетический КПД процесса $\eta_{\text{оэ}}$ определялся по методике [3] как отношение теплоты, переданной нагреваемым частицам, к полной электрической мощности плазмотрона.

Основные результаты

Обработка экспериментальных данных выполнена с использованием методов регрессионного анализа. Уравнения регрессии строились в кодированных переменных, определённых следующим образом:

$$x_1 = (I - 500) / 100, x_2 = (Q(\text{H}_2) - 10) / 4, x_3 = (L - 130) / 40.$$

Проверка значимости коэффициентов регрессии осуществлялась по t-критерию Стьюдента при доверительной вероятности 0,95. Адекватность построенных моделей оценивалась по F-критерию Фишера ($\alpha = 0,05$).

Для каждого из четырёх откликов были получены регрессионные модели. Статистически значимыми ($p < 0,05$) признаны линейные коэффициенты, а также коэффициент парного взаимодействия между силой тока и расходом водорода ($x_1 \cdot x_2$). Квадратичные эффекты и остальные парные взаимодействия в изученном диапазоне факторов не проявили статистической значимости. Значения коэффициентов регрессии представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Коэффициенты регрессионных моделей

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.9.1>

Отклик	b_0	$b_1 (I)$	$b_2 (H_2)$	$b_3 (L)$	$b_{12} (I \cdot H_2)$
КИМ, %	45,2	+9,3	+6,7	-4,8	+3,2
Пористость ϵ , %	10,1	-1,4	-0,9	+1,2	-0,5
Удельные энергозатраты $E_{\text{уд}}$, кВт·ч/кг	15,3	-2,5	-1,8	+1,2	-0,6

Отклик	b ₀	b ₁ (I)	b ₂ (H ₂)	b ₃ (L)	b ₁₂ (I·H ₂)
Общий энергетический КПД $\eta_{OЭ}$, %	5,09	+2,72	+2,32	-1,08	+1,28

Модели в кодированных переменных имеют вид:

$$\begin{aligned}\eta_M &= 45,2 + 9,3x_1 + 6,7x_2 - 4,8x_3 + 3,2x_1x_2, \\ \varepsilon &= 10,1 - 1,4x_1 - 0,9x_2 + 1,2x_3 - 0,5x_1x_2, \\ E_{уд} &= 15,3 - 2,5x_1 - 1,8x_2 + 1,2x_3 - 0,6x_1x_2, \\ \eta_{OЭ} &= 5,09 + 2,72x_1 + 2,32x_2 - 1,08x_3 + 1,28x_1x_2.\end{aligned}$$

Для совместной оптимизации четырёх целевых функций – общего энергетического КПД $\eta_{OЭ}$, коэффициента использования материала η_M , удельных энергозатрат $E_{уд}$ и пористости ε – использован обобщённый критерий Φ вида:

$$\Phi = w_1 \cdot \eta_{OЭ} + w_2 \cdot \eta_M - w_3 \cdot (E_{уд} / E_{уд}^0) - w_4 \cdot |(\varepsilon - \varepsilon_{треб}) / \varepsilon_{треб}|,$$

где $\eta_{OЭ}$ — общий энергетический КПД процесса, рассчитанный по методике [3]; $E_{уд}^0 = 18,6$ кВт·ч/кг — базовое значение удельных энергозатрат для традиционного режима ($I = 550$ А, $Ar = 40$ л/мин, $H_2 = 8$ л/мин, $L = 150$ мм); $\varepsilon_{треб} = 8\%$ — минимально допустимый уровень пористости, обеспечивающий теплоизоляционные свойства ТБП [4]; весовые коэффициенты $w_1=0,3$, $w_2=0,3$, $w_3=0,25$, $w_4=0,15$ подобраны экспертным методом исходя из равнозначности энергетической эффективности при выполнении требования к пористости.

Максимизация Φ при ограничении $\varepsilon \geq 8\%$ выполнялась методом градиентного спуска в пространстве кодированных переменных.

Наложение ограничения $\varepsilon \geq 8\%$ и максимизация Φ позволили выделить область оптимальных режимов. Дополнительная серия опытов с варьированием расхода аргона в интервале 30–50 л/мин показала, что минимальные флуктуации дугового разряда и максимальная стабильность процессов тепломассопереноса достигаются при $Q(Ar) = 38...42$ л/мин.

Определён следующий оптимальный диапазон параметров напыления:

- 1) расход аргона: 38...42 л/мин;
- 2) расход водорода: 10...12 л/мин;
- 3) сила тока: 480...520 А;
- 4) дистанция напыления: 110...130 мм.

В качестве базового для сравнения был выбран режим, рекомендованный в типовых технологических инструкциях [4] ($I = 550$ А, $Ar = 40$ л/мин, $H_2 = 8$ л/мин, $L = 150$ мм). Для подтверждения эффективности оптимизации был принят режим со следующими значениями: $I = 500$ А, $Ar = 40$ л/мин, $H_2 = 11$ л/мин, $L = 120$ мм. Результаты подтверждающего эксперимента обобщены в таблице 2.

Таблица 2 - Сравнительная характеристика базового и оптимизированного режимов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.9.2>

Показатель	Базовый режим	Оптимизированный режим
КИМ, %	38,2	57,4
Пористость, %	11,5	9,8
Удельные энергозатраты, кВт·ч/кг	18,6	12,1
Общий энергетический КПД, %	4,2	7,1

Из таблицы 2 видно, что оптимизированный режим напыления повышает КИМ в 1,5 раза, снижает удельные энергозатраты на 35%, увеличивает общий энергетический КПД с 4,2 до 7,1% при всем этом сохраняет пористость (9,8%) на уровне, превышающем минимально допустимую величину 8%.

Границы применимости полученных линейных регрессионных моделей ограничены факторным пространством, заданным условиями планирования эксперимента: сила тока $I \in [400; 600]$ А, расход водорода $Q(H_2) \in [6; 14]$ л/мин, дистанция напыления $L \in [90; 170]$ мм. Экстраполяция зависимостей за пределы указанных интервалов не рекомендуется ввиду возможной нелинейности процессов тепломассопереноса в плазменной струе, а также экспоненциального характера эрозии катода при превышении верхней границы по току и расходу водорода.

Обсуждение

Разработанные оптимальные режимы были апробированы при напылении экранных труб водогрейного котла КВ-ГМ-10 и лопаток газовой турбины ГТ-009. В ходе термоциклических испытаний, которые включали в себя 50 циклов нагрева и охлаждения, нагрев до 1100°C и охлаждение водой, отслаиваний покрытия не зафиксировано. Тепловые испытания на макете теплообменника показали снижение температуры металлической основы на 160–180°C, что соответствует целевым показателям.

Следует отметить, что дальнейшее увеличение силы тока свыше 520 А или расхода водорода более 12 л/мин приводит к экспоненциальному росту эрозии вольфрамового катода (явление фиксировалось визуально после каждого опыта). Физическое обоснование данного явления заключается в том, что при превышении указанных пороговых

значений возрастает удельная тепловая нагрузка на катодное пятно дуги. Это приводит к локальному перегреву вольфрамового электрода и экспоненциальному росту скорости его испарения (сублимации) в соответствии с температурной зависимостью давления насыщенных паров тугоплавких металлов. Дополнительно высокая концентрация атомарного водорода в плазменной струе увеличивает термическую эрозию катода. Таким образом, предложенный оптимальный режим является граничным с точки зрения стойкости электродного узла.

Полученные уравнения в кодированных переменных могут быть использованы для прогнозирования свойств покрытий в изученном диапазоне факторов. Это позволит оперативно настраивать технологический режим под конкретные требования к пористости и энергоэффективности.

Заключение

По результатам полного факторного эксперимента получены статистически значимые регрессионные модели в кодированных переменных, описывающие зависимости коэффициента использования материала, пористости, удельных энергозатрат и общего энергетического КПД процесса от силы тока, расхода водорода и дистанции напыления при плазменном формировании ТБП из 8YSZ. Установлено, что увеличение силы тока и расхода водорода приводит к росту коэффициента использования материала и общего энергетического КПД и снижению удельных энергозатрат, однако сопровождается уменьшением пористости, что обуславливает потребность в оптимизации режимов с учетом критериев. Определена область оптимальных параметров: сила тока 480...520 А, расход аргона 38...42 л/мин, расход водорода 10...12 л/мин, дистанция напыления 110...130 мм. Экспериментально подтверждено, что переход от базового режима к оптимизированному обеспечивает снижение удельных энергозатрат на 35%, повышение КИМ на 50% и увеличение общего энергетического КПД с 4,2 до 7,1% при сохранении пористости на уровне 9,8%.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Тамов В.А. Теплообменные аппараты энергосистем / В.А. Тамов. — Москва : Энергоатомиздат, 2020. — 312 с.
2. Михеев А.Е. Напыление покрытий плазмотроном с подачей порошка спутно плазменному потоку / А.Е. Михеев, А.В. Гири, И.О. Якубович [и др.] // Сибирский аэрокосмический журнал. — 2021. — Т. 22. — № 1. — С. 194–200.
3. Кадырметов А.М. Обзор путей повышения тепловой эффективности плазмотронов для процессов плазменного нанесения покрытий / А.М. Кадырметов, И.Г. Дроздов, Г.А. Сухочев [и др.] // Воронежский научно-технический Вестник. — 2025. — Т. 4. — № 4 (54). — С. 12–45. — DOI: 10.34220/2311-8873-2025-12-45. — EDN TWICKS.
4. Харламов М.Ю. Термобарьерные покрытия для газотурбинных установок / М.Ю. Харламов. — Санкт-Петербург : Наука, 2022. — 248 с.
5. ГОСТ Р 58456–2019. Покрытия термобарьерные плазменные. Методы контроля пористости. — Москва : Стандартинформ, 2019. — 12 с.
6. Панков В.П. Исследования комбинированных жаростойких покрытий лопаток турбин газотурбинных двигателей / В.П. Панков // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2016. — № 3 (135). — С. 26–30. — EDN VPWPDN.
7. Волощенко А.П. Термостойкость лопаток газовых турбин с защитными покрытиями / А.П. Волощенко, Г.Н. Третьяченко, Л.Б. Гецов [и др.] // Проблемы прочности. — 1986. — № 5. — С. 45–50. — EDN SIWQJB.
8. Медников А.Ф. Обзор современных способов формирования термобарьерных покрытий / А.Ф. Медников, К.С. Медведев, Г.В. Качалин [и др.] // Глобальная энергия. — 2023. — Т. 29. — № 4. — С. 132–148. — DOI: 10.18721/JEST.29409. — EDN JJRYIA.
9. Быстрицкий Г.Ф. Теплотехника и энергосиловое оборудование промышленных предприятий / Г.Ф. Быстрицкий. — Москва : Юрайт, 2020. — 416 с.
10. Fu Y.Y. Progress in the Deposition Mechanisms and Key Performance Evaluation of Thermal Barrier Coatings for Turbine Blades: A Review / Y.Y. Fu, Z.H. Yao, Y. Chen [et al.] // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). — 2024. — Vol. 38. — № 12. — P. 177–204.
11. Mehta A. Processing and Advancements in the Development of Thermal Barrier Coatings: A Review / A. Mehta, H. Vasudev, S. Singh [et al.] // Coatings. — 2022. — Vol. 12. — № 9. — DOI: 10.3390/coatings12091318.
12. Amano R. Thermal Engineering in Power Systems / R. Amano, B. Sundén. — Southampton : WIT Press, 2008. — 391 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Tamov V.A. Teploobmennyye apparaty ehnergosistem [Heat exchangers of power systems] / V.A. Tamov. — Moscow : Energoatomizdat, 2020. — 312 p. [in Russian]



2. Mikheev A.E. Napylenie pokrytij plazmotronom s podachej poroshka sputno plazmennomu potoku [Spraying plasmatron coatings with powder supply to plasma flow] / A.E. Mikheev, A.V. Giri, I.O. Yakubovich [et al.] // Sibirskij ajerokosmicheskij zhurnal [Siberian Aerospace Journal]. — 2021. — Vol. 22. — № 1. — P. 194–200. [in Russian]
3. Kadyrmetov A.M. Obzor putej povysheniya teplovoj ehffektivnosti plazmotronov dlya processov plazmennogo naneseniya pokrytij [Overview of ways to increase the thermal efficiency of plasma torches for plasma coating processes] / A.M. Kadyrmetov, I.G. Drozdov, G.A. Sukhochev [et al.] // Voronezhskij nauchno-tehnicheskij Vestnik [Voronezh Scientific and Technical Bulletin]. — 2025. — Vol. 4. — № 4 (54). — P. 12–45. — DOI: 10.34220/2311-8873-2025-12-45. — EDN TWICSK. [in Russian]
4. Kharlamov M.Yu. Termobar'ernye pokrytiya dlya gazoturbinnnykh ustanovok [Thermal barrier coatings for gas turbine units] / M.Yu. Kharlamov. — Saint Petersburg : Nauka, 2022. — 248 p. [in Russian]
5. GOST R 58456–2019. Pokrytiya termobar'ernye plazmennye. Metody kontrolya poristosti [Plasma thermal barrier coatings. Porosity control methods]. — Moscow : Standartinform, 2019. — 12 p. [in Russian]
6. Pankov V.P. Issledovaniya kombinirovannykh zharostojkikh pokrytij lopatok turbin gazoturbinnnykh dvigatelej [Probes of the combined heat-resistant coverings of shovels of turbines of gas-turbine engines] / V.P. Pankov // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya [Strengthening Technologies and Coatings]. — 2016. — № 3 (135). — P. 26–30. — EDN VPWPDN. [in Russian]
7. Voloshchenko A.P. Termostojkost' lopatok gazovykh turbin s zashchitnymi pokrytiyami [Heat resistance of gas turbine blades with protective coatings] / A.P. Voloshchenko, G.N. Tretyachenko, L.B. Getsov [et al.] // Problemy prochnosti [Problems of Strength]. — 1986. — № 5. — P. 45–50. — EDN SIWQJB. [in Russian]
8. Mednikov A.F. Obzor sovremennykh sposobov formirovaniya termobar'ernykh pokrytij [Modern methods of forming thermal barrier coatings: a review] / A.F. Mednikov, K.S. Medvedev, G.V. Kachalin [et al.] // Global'naya ehnergiya [Global Energy]. — 2023. — Vol. 29. — № 4. — P. 132–148. — DOI: 10.18721/JEST.29409. — EDN JJRYIA. [in Russian]
9. Bystritsky G.F. Teploekhnika i ehnergosilovoe oborudovanie promyshlennykh predpriyatij [Heat engineering and power equipment of industrial enterprises] / G.F. Bystritsky. — Moscow : Yurayt, 2020. — 416 p. [in Russian]
10. Fu Y.Y. Progress in the Deposition Mechanisms and Key Performance Evaluation of Thermal Barrier Coatings for Turbine Blades: A Review / Y.Y. Fu, Z.H. Yao, Y. Chen [et al.] // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). — 2024. — Vol. 38. — № 12. — P. 177–204.
11. Mehta A. Processing and Advancements in the Development of Thermal Barrier Coatings: A Review / A. Mehta, H. Vasudev, S. Singh [et al.] // Coatings. — 2022. — Vol. 12. — № 9. — DOI: 10.3390/coatings12091318.
12. Amano R. Thermal Engineering in Power Systems / R. Amano, B.Sundén. — Southampton : WIT Press, 2008. — 391 p.