

Научная статья

УДК 621.785.5:621.793.6

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185682>

EDN: <https://www.elibrary.ru/KPSPZZ>



Определение припуска на шлифование износостойких газотермических покрытий на внутренних сложнопрофильных поверхностях деталей авиационных двигателей

Николай Вадимович Рогов

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,

Москва, Российская Федерация

nikolayrogov_24@mail.ru, ORCID 0009-0009-2608-8913

Аннотация. Выявлена взаимосвязь между микротвердостью и износостойкостью покрытий, сформированных высокоскоростным напылением в среде кислорода на внутренних сложнопрофильных поверхностях авиационных деталей. Обоснована необходимость минимизации разброса микротвердости вдоль поверхности в целях улучшения равномерности изнашивания (или же процесса износа). Приведено описание целевой функции, отражающей критерий равномерности микротвердости после шлифования. Установлено влияние термосилового воздействия и накопления дефектов в поверхностном слое на изменение микротвердости при шлифровании. Приведены зависимости, позволяющие определить параметры шлифования, обеспечивающие минимизацию термосилового воздействия на поверхностный слой покрытия. Обоснован подход к определению оптимального припуска на шлифование как результат решения уравнения с заданной целевой функцией.

Показана применимость разработанной методики при проектировании технологических процессов механической обработки деталей авиационных двигателей с износостойкими покрытиями. Обоснована перспективность использования результатов работы для повышения безотказности функционирования авиационных изделий.

Ключевые слова: оптимизация припуска на шлифование, шлифование газотермических покрытий, высокоскоростное газопламенное напыление, статор роторно-поршневого двигателя, внутренние сложнопрофильные поверхности, микротвердость износостойкого покрытия, распределение микротвердости по глубине покрытия, равномерность изнашивания газотермического покрытия, безотказность статора роторно-поршневого двигателя с износостойким газотермическим покрытием

Для цитирования: Рогов Н.В. Определение припуска на шлифование износостойких газотермических покрытий на внутренних сложнопрофильных поверхностях деталей авиационных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 3. С. 221–231. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185682>

Original article

Allowance Determining for Wear-Resistant Gas-Thermal Coatings Grinding on Figurine-Shaped Surfaces of Aircraft Engines Parts

Nikolai V. Rogov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

nikolayrogov_24@mail.ru, ORCID 0009-0009-2608-8913

© Рогов Н.В., 2025

Abstract

The article deals with the technique development for the optimal grinding allowance determining of wear-resistant coatings applied by the high-speed flame spraying on the internal composite surfaces of the aircraft parts. The main attention is being paid to the working surfaces of the rotary piston engine stator, which geometry is set by the epitrochoid. The shape deviations and uneven microhardness after grinding reduce the engine reliability, especially when part of the single-engine unmanned aerial vehicles.

The author analyzed the two well-known approaches to the allowances assigning. They are the computational-and-analytical approach and the one based on technological heredity. It was found that these approaches are insufficient when processing the coatings formed by the high-speed flame spraying on complex surfaces, since they do not account for the patterns of microhardness distribution over the coating depth, the thermal force action from the cutting tool and the defective surface layer of the coating.

The article formulates a model of the microhardness changing by the coating thickness prior and after grinding. Three zones are marked out prior to grinding, namely reduced and stable microhardness, as well as a transition layer. After grinding, a decrease in microhardness is being observed in the surface layer with a depth of Q . This zone is modeled discretely as a function of cutting depth and grinding parameters (speed, feed, abrasive disc grit). An optimization objective function, which reflects the integral difference in microhardness between the sections with the minimum and maximum initial coating thickness, is proposed. The optimal allowance is being defined as the point of this function minimum, which ensures uniform wear and increases the part reliability.

The author developed a technique for the optimal allowance computing in the form of a block diagram, which includes the coating profile plotting, the microhardness reduction zones determining, grinding modes selecting, modeling, and the target function construction and optimization. The said technique may be applied in the automated systems for technological processes designing for parts manufacturing at the aircraft engines production. The practical significance consists in the grinding precision increasing, the main processing time reducing, as well as the time for the cutting modes debugging. The model validation requires accelerated tests to the wear resistance determining, as well as semi-natural tests of the stator as a part of the engine.

Keywords: optimization of grinding allowance, grinding of thermal spray coatings, high-speed flame spraying, stator of a rotary piston engine, internal composite surfaces, microhardness of a wear-resistant coating, microhardness distribution over coating depth, uniformity of wear of a thermal spray coating, reliability of the stator of a rotary piston engine with a wear-resistant thermal spray coating

For citation: Rogov N.V. Allowance Determining for Wear-Resistant Gas-Thermal Coatings Grinding on Figurine-Shaped Surfaces of Aircraft Engines Parts. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(3):221-231. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185682>

List of Figures

Fig. 1. Sketch of the rotary-piston engine stator: 1 – sprayed surface (cross-section in the shape of an epitrochoid);

2 – pin holes (main design reference of the part)

Fig. 2. Wear non-uniformity $\Delta u(T)$ determining) scheme: 1 – initial coating surface before the wear commence (at $T = 0$);

2 – worn coating surface (at time T)

Fig. 3. Scheme of coating microhardness distribution prior to grinding: 1 – reduced microhardness zone;

2 – of stable microhardness zone HV_{const} ; 3 – transition layer

Fig. 4. Scheme of coating microhardness reduction after grinding: 1 – the coating microhardness distribution

prior to grinding (see Fig. 3); 2 – the coating microhardness distribution after grinding

Fig. 5. The coating surface profile after spraying: 1 – substrate surface prior to coating; 2 – coating surface

Fig. 6. Coating microhardness distribution $HV_{init}(h)$ by depth at critical points: a – section A–A; b – section B–B

Fig. 7. Relationships between $h_{снж}$ and S_{surf} : 1 and 2 – HV_{init} and HV_{grind} curves, respectively;

a – $S_{surf\ min} \leq h_{reduced}$ and $S_{surf\ max} \leq h_{reduced}$; b – $S_{surf\ min} \leq h_{reduced}$ and $S_{surf\ max} > h_{reduced}$;

c – $S_{surf\ min} > h_{reduced}$ and $S_{surf\ max} \leq h_{reduced}$

Fig. 8. Objective function determining for the grinding allowance optimizing S_{surf} :

1 – coating coating microhardness distribution in the section A–A, $HV_{grind.A-A}(h_1)$;

2 – microhardness distribution of the in the section B–B, $HV_{grind.B-B}(h_1)$;

3 – graphical representation of the integral of microhardness difference between the sections B–B and A–A

Fig. 9. Diagram of the microhardness reduction mechanism after grinding

Fig. 10. Block diagram of the algorithm for the coating microhardness reduction model while grinding

Fig. 11. Block diagram of the generalized method for the optimal grinding allowance assigning

Введение

Обеспечение эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ) двигателя — одна из главных задач в авиационном машиностроении. Наряду с мощностью, КПД, пусковыми характеристиками одной из ключевых ЭТХ является надежность. Для одномоторных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) гражданского назначения наиболее важная группа показателей надежности — показатели безотказности, так как в случае, если они не будут обеспечены, отказ двигателя приведет к невыполнению полетного задания [1, 2]. Перспективны БПЛА с роторно-поршневым двигателем (РПД), поскольку эти двигатели имеют более высокую удельную мощность (в 2–3 раза) в сравнении с другими видами двигателей внутреннего сгорания [3–5], что позволяет увеличить полезную нагрузку на БПЛА.

В обеспечении показателей безотказности ключевую роль играет упрочнение рабочей поверхности статора РПД, которая относится к классу цилиндрических поверхностей, а ее направляющая линия представлена эпитрохоидой [6]. Один из эффективных способов упрочнения рабочей поверхности статора — нанесение износостойких покрытий методом высокоскоростного напыления в среде кислорода [7, 8].

Существенную роль в обеспечении безотказности статора РПД с износостойким газотермическим покрытием играет его последующее шлифование. На этом этапе обеспечиваются заданные в конструкторской документации требования к шероховатости и точности формы поверхности, от которых в значительной степени зависит возможность достижения РПД расчетных технических характеристик. Точность формы рабочей поверхности статора должна оставаться стабильной также и в процессе эксплуатации двигателя [9, 10]. При формировании газотермических покрытий на внутренних сложнопрофильных поверхностях выявлены технологические задачи, связанные с обеспечением равномерной толщины покрытия и стабильности глубины зоны пониженной микротвердости в приповерхностной области. Установлено несоответствие кинематики напыления и последующего шлифования, способствующее неравномерности распределения микротвердости вдоль поверхности после чистовой обработки покрытия. В настоящий момент нет общего подхода к назначению припуска на шлифование износостойких материалов покрытий, нанесенных на внутренние сложнопрофильные поверхности. Таким образом, целью данного исследования является разработка методики, позволяющей определить такой припуск на шлифование рабочей поверхности статора РПД, при котором будут соблюдены требования к обе-

спечению точности формы рабочей поверхности статора как после обработки покрытия, так и в течение процесса эксплуатации с учетом распределения микротвердости покрытия по глубине и обеспечения требуемой шероховатости.

Определение взаимосвязей между технологическими параметрами операции шлифования и показателями качества поверхностного слоя

В настоящее время наибольшее распространение при назначении припуска на механическую обработку получили два подхода: расчетно-аналитический метод и метод, основанный на принципе технологической наследственности. Расчетно-аналитический метод предполагает пооперационное нормирование припуска на основе анализа отклонений формы и размеров, допускаемой шероховатости и погрешностей, возникающих в процессе механической обработки. Теория технологической наследственности базируется на последовательной передаче показателей качества от предшествующей операции к следующей, включая показатели точности, а также шероховатость, остаточные напряжения и другие характеристики поверхностного слоя.

Приведенные подходы нуждаются в конкретизации и уточнении при их применении к обработке сложнопрофильных поверхностей с износостойкими покрытиями, нанесенными методом высокоскоростного газопламенного напыления, в связи с рядом специфических особенностей данного процесса. На рис. 1 показан эскиз статора РПД, на рабочую поверхность которого предполагается нанесение покрытия. Данная поверхность характеризуется габаритными размерами $L_{\min}$ и $L_{\max}$ (в этих точках наблюдается соответственно минимальная и максимальная дистанции напыления).

В частности, формирование приповерхностного дефектного слоя, наличие неравномерной микротвердости по глубине, а также тенденция к снижению микротвердости в поверхностной зоне после

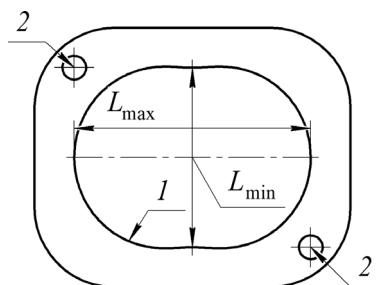


Рис. 1. Эскиз статора РПД:

- 1 — напыляемая поверхность (сечение в форме эпитрохоиды);
- 2 — штифтовые отверстия (основная конструкторская база детали)

шлифования [11, 12] ограничивают эффективность традиционных методик назначения припуска. Дополнительные требования к точности профиля и стабильности формы, обусловленные условиями эксплуатации деталей, являются дополнительным аргументом в пользу разработки специализированного подхода к обоснованию припуска, учитывающего физико-механическое состояние покрытия как до, так и после шлифования.

Обеспечение требований к точности формы статора в процессе эксплуатации сводится к выполнению неравенства:

$$\Delta u(T) \leq \Delta u_{\max}, \quad (1)$$

где $\Delta u(T)$ – неравномерность износа и покрытия рабочей поверхности статора РПД, полученная в течение времени T ;

$\Delta u_{\max}$ – максимально допустимая неравномерность износа.

Определение $\Delta u(T)$ проводится по формуле (2) в соответствии со схемой, представленной на рис. 2:

$$\Delta u(t) = u_{\max}(T) - u_{\min}(t), \quad (2)$$

где $u_{\min}(T)$ и $u_{\max}(T)$ – соответственно минимальный и максимальный износ покрытия к моменту времени T .

Согласно работам [13–15] верно соотношение:

$$u \propto \frac{1}{HV}, \quad (3)$$

где HV – микротвердость покрытия на поверхности.

Из данной зависимости следует соотношение:

$$\Delta HV_{\text{пов}} = HV_{\max} - HV_{\min}, \quad (4)$$

где $\Delta HV_{\text{пов}}$ – неравномерность микротвердости поверхности покрытия; $HV_{\min}$ и $HV_{\max}$ – соответственно минимальная и максимальная микротвердость поверхности покрытия.

Микротвердость напыленного покрытия (до шлифования) согласно работам [11, 16–19] рас-

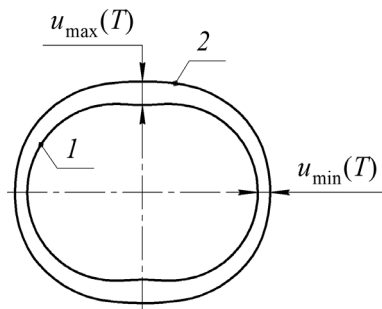


Рис. 2. Схема определения неравномерности износа $\Delta u(T)$:

- 1 – исходная поверхность покрытия до начала изнашивания (при $T = 0$);
- 2 – изношенная поверхность покрытия (в момент времени T)

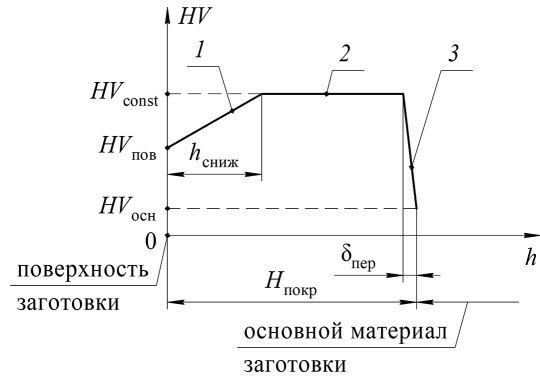


Рис. 3. Схема распределения микротвердости покрытия до шлифования:

- 1 – зона пониженной микротвердости;
- 2 – зона стабильной микротвердости HV_{const} ;
- 3 – переходной слой

пределена по толщине покрытия в соответствии со схемой, представленной на рис. 3.

Приведенный график является обобщенной аппроксимацией. Напыленный слой покрытия имеет толщину $H_{\text{покр}}$, и его микротвердость может быть представлена как три участка. В приповерхностном слое (участок 1) наблюдается зона пониженной микротвердости толщиной $h_{\text{сниз}}$, причем на участке $h \in [0; h_{\text{сниз}}]$ HV линейно возрастает согласно зависимости (5) (индекс «исх» указывает на то, что рассматривается исходная микротвердость покрытия до шлифования):

$$HV_{\text{исх}}(h) = k_1 \cdot h + HV_{\text{пов}}, \quad (5)$$

где h – координата, определяющая глубину рассматриваемого слоя покрытия до шлифования;

k_1 – коэффициент пропорциональности линейной аппроксимации участка 1:

$$k_1 = \frac{HV_{\text{const}} - HV_{\text{пов}}}{h_{\text{сниз}}}, \quad (6)$$

где HV_{const} – значение микротвердости покрытия в зоне стабильной микротвердости; $HV_{\text{пов}}$ – значение микротвердости покрытия на поверхности до шлифования.

На участке 2 $h \in (h_{\text{сниз}}, H_{\text{покр}} - \delta_{\text{пер}}]$ (где $\delta_{\text{пер}}$ – толщина переходного слоя между покрытием и основным материалом заготовки) микротвердость покрытия может быть аппроксимирована функцией $HV_{\text{исх}}(h) = HV_{\text{const}}$, соответствующей прямой, параллельной оси h (т.е. микротвердость на этом участке стабильна). На участке 3 $h \in (H_{\text{покр}} - \delta_{\text{пер}}, H_{\text{покр}}]$, соответствующем переходному слою между покрытием и основным материалом заготовки, микротвердость снижается согласно зависимости:

$$HV_{\text{исх}}(h) = -k_3 \cdot \left(h - (H_{\text{покр}} - \delta_{\text{пер}}) \right) + HV_{\text{const}}, \quad (7)$$

где k_3 — коэффициент пропорциональности линейной аппроксимации участка 3:

$$k_3 = \frac{HV_{const} - HV_{осн}}{\delta_{пер}}, \quad (8)$$

где $HV_{осн}$ — микротвердость основного материала заготовки.

Таким образом, микротвердость покрытия до шлифования описывается в соответствии с системой уравнений:

$$HV_{исх}(h) = \begin{cases} k_1 \cdot h + HV_{пов}, & h \in [0; h_{снж}]; \\ HV_{const}, & h \in (h_{снж}, H_{покр} - \delta_{пер}]; \\ -k_3 \cdot (h - (H_{покр} - \delta_{пер})) + HV_{const}, & h \in (H_{покр} - \delta_{пер}; H_{покр}]. \end{cases} \quad (9)$$

После шлифования вследствие термического и силового воздействия на приповерхностные слои покрытия наблюдается снижение его микротвердости. Схематично результат снижения микротвердости после шлифования представлен на рис. 4.

С целью улучшения наглядности графического представления на схеме не приведены параметры, которые ранее были показаны на рис. 3. Для описания изменения микротвердости покрытия по глубине после шлифования вводится система координат с началом в точке 01. В ранее введенной системе координат $0hHV$ точка 01 имеет координаты $(0; S_{п})$, где $S_{п}$ — удаляемый в процессе шлифования припуск. Новая система координат — $0_1h_1HV_1$. Ее ось абсцисс h_1 сонаправлена с осью h . В расчетах будет использоваться соотношение (10):

$$h_1 = h - S_{п}. \quad (10)$$

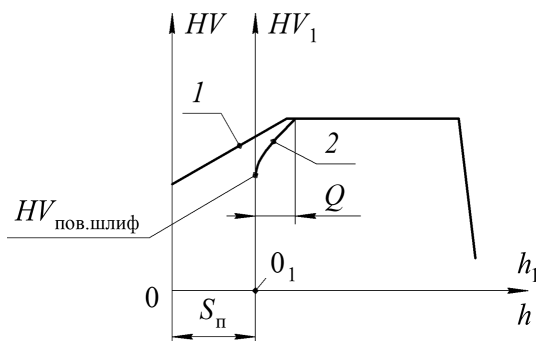


Рис. 4. Схема снижения микротвердости покрытия после шлифования:

- 1 — распределение микротвердости покрытия до шлифования (см. рис. 3);
- 2 — распределение микротвердости покрытия после шлифования

Величина Q — зона влияния процессов шлифования, на которой наблюдается снижение микротвердости. Пусть кривая 2 задана как функция $HV_{шлиф}(h_1)$. Тогда Q определяется согласно уравнению:

$$Q = \max \left(h_1 \mid HV_{исх}(h_1 + S_{п}) - HV_{шлиф}(h_1) > 0, h_1 \in [0; H_{покр} - S_{п}] \right). \quad (11)$$

Таким образом, микротвердость покрытия после шлифования описывается в соответствии с системой уравнений:

$$HV_{шлиф}(h_1) = \begin{cases} HV_{шлиф}(h_1), & h_1 \in [0; Q]; \\ HV_{исх}(h_1 + S_{п}), & h_1 \in (Q; H_{покр} - S_{п}]. \end{cases} \quad (12)$$

Первое уравнение системы (12) будет определено далее через функцию снижения микротвердости.

С учетом введенных обозначений величина $HV_{пов.шлиф}$, представленная на схеме на рис. 4, удовлетворяет уравнению:

$$HV_{пов.шлиф} = HV_{шлиф}(0). \quad (13)$$

В дальнейшем для наглядности на схемах ось HV_1 показываться не будет.

После нанесения покрытия на сложнопрофильную рабочую поверхность статора с направляющей, представленной эпитрохоидой, наблюдается неравномерная толщина покрытия [20, 21], что схематично представлено на рис. 5.

Неравномерность толщины покрытия после напыления до шлифования Δr_h определяется согласно зависимости:

$$\Delta r_h = H_{покр.маx} - H_{покр.мин}, \quad (14)$$

где $H_{покр.мин}$ и $H_{покр.маx}$ — соответственно минимальная и максимальная толщины покрытия (в сечениях А—А и Б—Б соответственно).

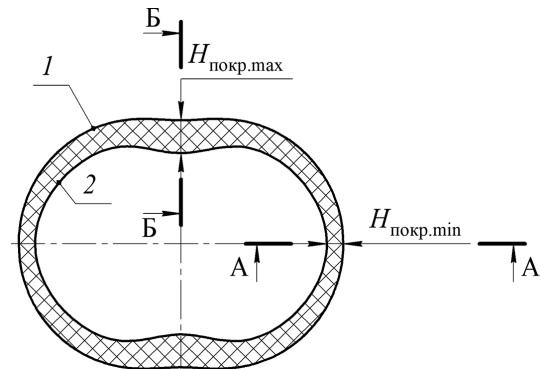


Рис. 5. Изображение профиля поверхности покрытия после напыления:

- 1 — поверхность заготовки до покрытия;
- 2 — поверхность покрытия

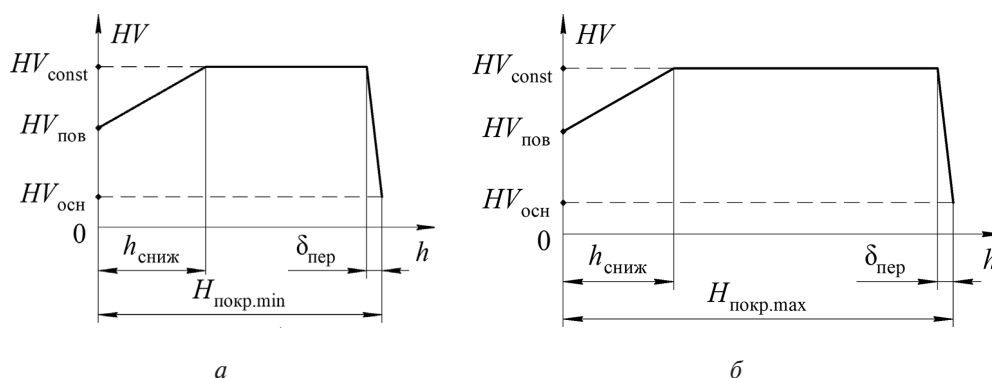


Рис. 6. Распределение микротвердости покрытия по глубине $HV_{исх}(h)$ в критических точках: а – сечение А–А; б – сечение Б–Б

Согласно [22, 23] такой параметр, как дистанция напыления, не оказывает существенного влияния на глубину слоя пониженной микротвердости формируемого покрытия, в связи с чем при напылении на рассматриваемую поверхность в сечениях А–А и Б–Б будет выполняться условие $h_{снж} = const$. С учетом этого соотношение распределения микротвердости в сечениях А–А и Б–Б приведено на рис. 6.

Ввиду того, что после шлифования покрытия его толщина должна быть равномерной вдоль всей эпитрохида (в связи с чем кривая 1 на рис. 5 является эквидистантой к чистовому профилю покрытия), величина припуска S_p в различных точках обрабатываемой поверхности будет отличаться, причем в сечении А–А будет минимальный припуск $S_{п.min}$, а в сечении Б–Б – максимальный $S_{п.max}$. Соотношение между этими двумя величинами описывается зависимостью:

$$S_{п.max} = S_{п.min} + \Delta r_h. \quad (15)$$

При определении $S_{п.min}$ требуется проведение экспериментальных исследований глубины дефектного слоя покрытия, подлежащего удалению в процессе последующего шлифования. На рис. 7 схематично представлены различные варианты соотношений между значениями $h_{снж}$ и S_p (с целью лучшей наглядности участок, соответствующий переходному слою между покрытием и основным материалом заготовки, на схеме не показан).

Соотношение между $HV_{исх}$ и $HV_{шлиф}$ может быть представлено как функция ΔHV и найдено по формуле:

$$\Delta HV(h_1) = HV_{исх}(h_1 + S_p) - HV_{шлиф}(h_1). \quad (16)$$

В общем виде формула (16) также может рассматриваться как функция параметров шлифования. То же касается и значения шероховатости после шлифования $Ra_{шлиф}$. Таким образом, показатели качества, формируемые после шлифования, могут

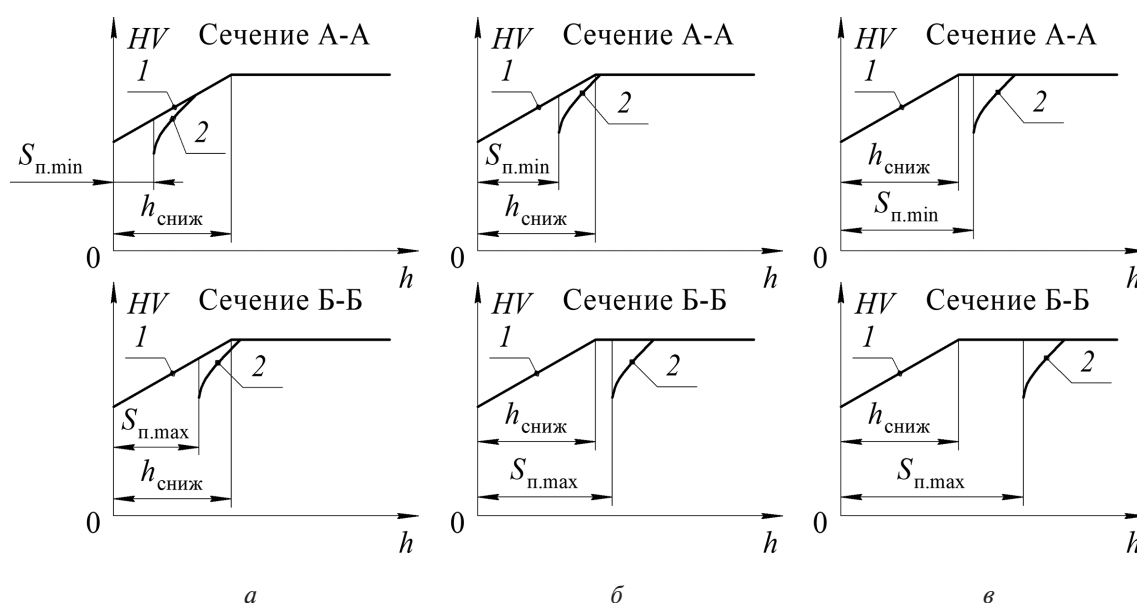


Рис. 7. Соотношения между $h_{снж}$ и S_p : 1 и 2 – кривые $HV_{исх}$ и $HV_{шлиф}$ соответственно; а – $S_{п.min} \leq h_{снж}$ и $S_{п.max} \leq h_{снж}$; б – $S_{п.min} \leq h_{снж}$ и $S_{п.max} > h_{снж}$; в – $S_{п.min} > h_{снж}$ и $S_{п.max} > h_{снж}$

быть записаны как система уравнений:

$$\begin{cases} HV_{\text{шлиф}}(h_1, t, v, z, S_{\text{п}}) = HV_{\text{исх}}(h_1 + S_{\text{п}}) - \\ - \Delta HV(h_1, t, v, z, S_{\text{п}}); \\ \Delta HV = f(h_1, t, v, z, S_{\text{п}}); \\ Ra_{\text{шлиф}} = g(t, v, z, S_{\text{п}}), \end{cases} \quad (17)$$

где t – глубина шлифования;

v – скорость шлифования;

z – зернистость шлифовального круга.

С учетом приведенных соотношений толщин покрытия в различных сечениях, а также закономерностей распределения микротвердости по глубине покрытия можно утверждать, что наибольшая разность микротвердости наблюдается между сечениями А–А и Б–Б покрытия. В связи с этим на основании зависимостей (2), (3) и (4) может быть определено, что наиболее равномерный процесс изнашивания будет наблюдаться в том случае, когда интегральное отличие между микротвердостью в сечениях А–А и Б–Б минимально, что графически показано на рис. 8.

Целевая функция, на основании которой проводится оптимизация припуска, представлена соотношением:

$$\int_0^{H_{\text{покр. min}} - S_{\text{п. min}}} (HV_{\text{шлиф. Б-Б}}(h_1) - HV_{\text{шлиф. А-А}}(h_1)) dh_1 \rightarrow \min. \quad (18)$$

Формирование моделей и методик

Для проведения оптимизации необходимо определить закономерность, согласно которой происхо-

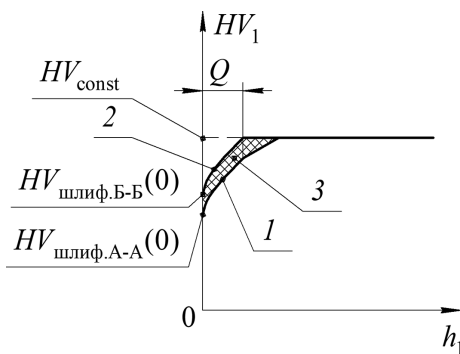


Рис. 8. Определение целевой функции оптимизации величины припуска $S_{\text{п}}$:

- 1 – распределение микротвердости покрытия в сечении А–А $HV_{\text{шлиф. А-А}}(h_1)$;
- 2 – распределение микротвердости покрытия в сечении Б–Б $HV_{\text{шлиф. Б-Б}}(h_1)$;
- 3 – графическое представление интеграла разности микротвердости в сечении Б–Б и А–А

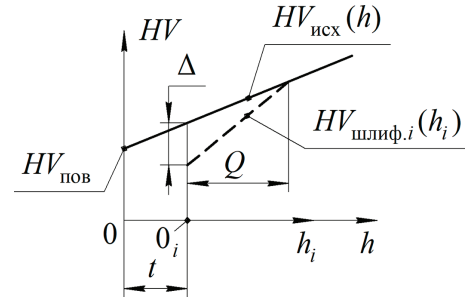


Рис. 9. Схема механизма снижения микротвердости после шлифования

дит падение микротвердости после шлифования в приповерхностном слое покрытия. Схема механизма снижения микротвердости после шлифования приведена на рис. 9.

Так, после одного прохода с глубиной шлифования t происходит падение микротвердости от исходного значения $HV_{\text{исх}}(h)$ до $HV_{\text{шлиф. i}}(h_i)$, причем снижение наблюдается на глубине Q относительно вновь сформированной поверхности, а максимум снижения достигается непосредственно у поверхности и равен Δ . Функционально величина снижения микротвердости $\Delta HV(h_i)$ после одного прохода записывается формулой:

$$\Delta HV(h_i) = \frac{\Delta}{Q} \cdot (Q - h_i), h_i \in [0; Q]. \quad (19)$$

В процессе последующих проходов снижение микротвердости происходит на величину, описываемую формулой (19), но уже относительно сформированной микротвердости $HV_{\text{шлиф. i}}$. При этом величины Δ и Q являются функциями (см. формулы (20) и (21)):

$$\Delta = f_1(t, v, z); \quad (20)$$

$$Q = f_2(t, v, z). \quad (21)$$

Эти два параметра не зависят от $S_{\text{п}}$, так как эта величина косвенно учитывается через число проходов $N = [S_{\text{п}}/t]$ и влияет на суммарную величину снижения микротвердости (чем меньше $S_{\text{п}}$, тем менее выражено снижение HV). Оптимальные параметры процесса шлифования t, v, z находятся исходя из минимизации Δ и Q как целевых функций.

Блок-схема алгоритма модели снижения микротвердости покрытия в процессе шлифования приведена на рис. 10.

С учетом всех вышеприведенных соотношений формируется обобщенная методика назначения оптимального припуска на шлифование. Данная методика представлена на рис. 11 в виде блок-схемы.

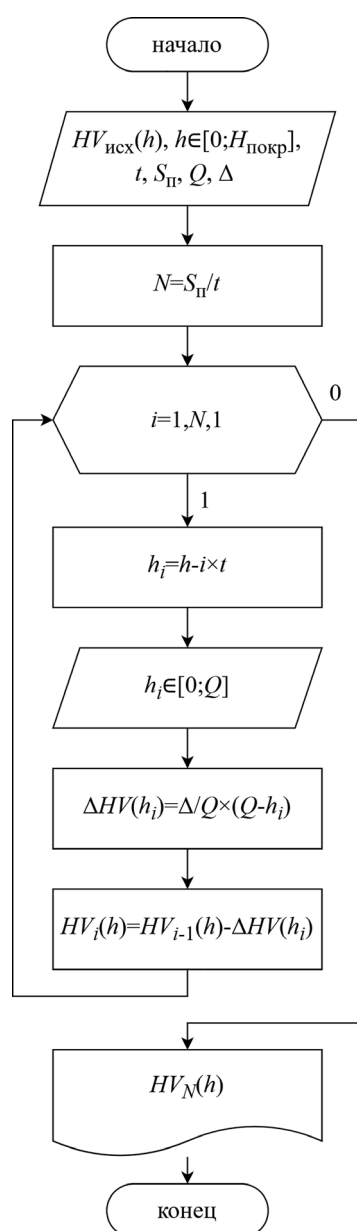


Рис. 10. Блок-схема алгоритма модели снижения микротвердости покрытия в процессе шлифования

Выводы

Проведенные исследования позволили обоснованно выделить ключевые ограничения традиционных подходов к назначению припуска на шлифование в случае износостойких покрытий, сформированных методом высокоскоростного газопламенного напыления на сложнопрофильных поверхностях. В частности, показано, что ни расчетно-аналитический метод, ни теория технологической наследственности не учитывают изменение микротвердости покрытия по глубине и ее последующее снижение в результате термосилового воздействия, однако учет этих факторов критически

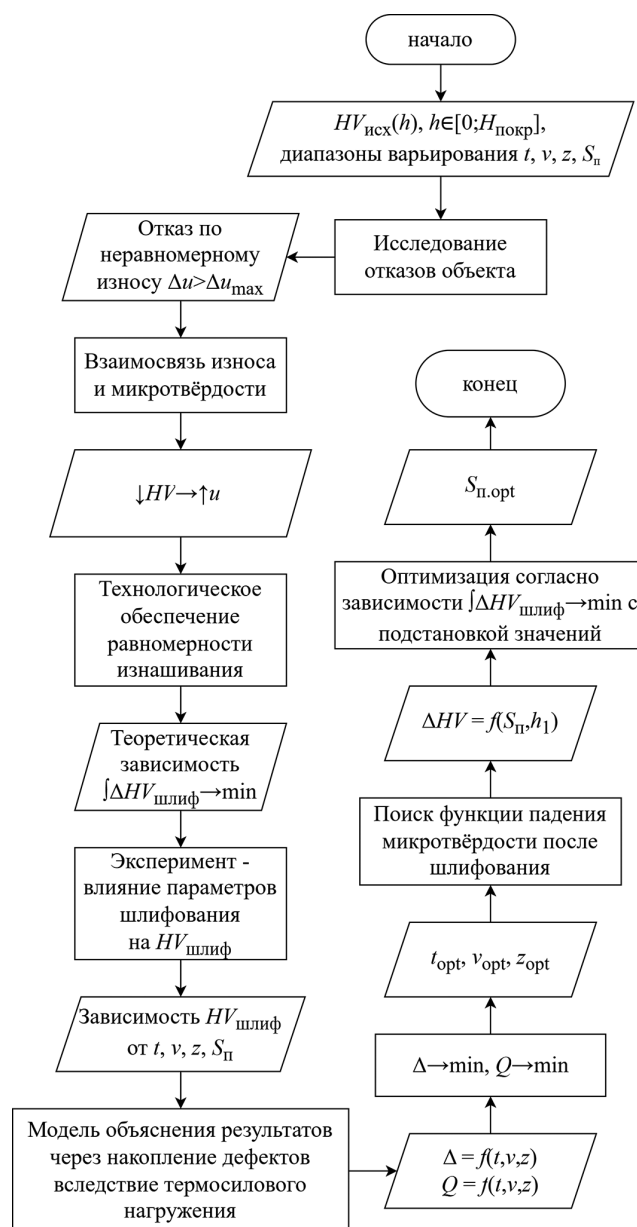


Рис. 11. Блок-схема обобщенной методики назначения оптимального припуска на шлифование

важен для отделочной обработки ответственных деталей, таких как статор РПД.

Полученные результаты демонстрируют, что равномерность износа покрытия в процессе эксплуатации связана со стабильностью значений микротвердости вдоль эпитрохоиды после шлифования рабочей поверхности статора РПД. Определена целевая функция, позволяющая проводить оптимизацию припуска с учетом неравномерности микротвердости после шлифования между зонами с различной исходной толщиной покрытия. Такой подход позволяет повысить эксплуатационные характеристики узлов РПД.

Разработанная дискретная математическая модель позволяет учитывать не только начальное распределение микротвердости, но и закономерности ее снижения после каждого прохода шлифования, что обеспечивает более точное моделирование изменения микротвердости износостойкого газотермического покрытия. Это отличает предложенный подход от существующих эмпирических методов, где влияние параметров шлифования описывается упрощенно или не учитывается вовсе.

Практическая применимость методики подтверждается ее адаптивностью к различным режимам шлифования и геометрическим конфигурациям. Возможность интеграции алгоритма расчета в автоматизированные системы проектирования обеспечивает дополнительную ценность для технологической подготовки производства. Предложенный подход может быть использован при проектировании операций шлифования.

В перспективе требуется проведение экспериментальной валидации модели на реальных образцах, включая индентирование и фрикционные испытания. Эти данные позволят уточнить параметры моделей и оценить пределы применимости методики. Кроме того, возможна адаптация подхода для других типов износостойких покрытий и профилей напыляемых поверхностей.

Таким образом, полученные результаты формируют научную и технологическую основу для обоснованного выбора припуска на шлифование, учитывающего закономерности изменения физико-механических свойств покрытия под нагрузкой и позволяющего повысить безотказность ответственных деталей авиационных двигателей.

Список источников

1. Балык В.М., Гайдаров Д.Д., Соцков И.А. Многокритериальный выбор рациональных обливочных характеристик беспилотного летательного аппарата при многоимпульсном режиме движения // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 3. С. 59–68. URL <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=176875>
2. Зиненков Ю.В., Луковников А.В. Особенности расчета летно-технических характеристик электрической силовой установки беспилотного летательного аппарата самолетного типа с помощью математического моделирования // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 85–94. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180651>
3. Тремкина О.В., Аденан Х., Шихалев В.И. и др. Расчетное исследование гибридной криогенной силовой установки для БПЛА с подводом теплоты от двигателя внутреннего сгорания // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 3. С. 155–162. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=176931>
4. Vorraro G., Turner J. Testing of a Modern Wankel Rotary Engine — Part IV: Overall Mechanical and Thermal Balance // SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility. 2022. Vol. 5. No. 3, pp. 1243–1255. DOI: 10.4271/2022-01-1001
5. Ötkür M. Altitude Performance and Fuel Consumption Modelling of Aircraft Piston Engine Rotax 912 S/ULS // Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology. 2021. Vol. 23. No. 1, pp. 18–25. DOI: 10.37934/araset.23.1.1825
6. Вайсенбургер Д.А., Черноусанов В.В. Эпитрохоида роторно-поршневого двигателя: ее свойства и построение // Техника и технологии строительства. 2017. № 2(10). С. 5–11.
7. Албагачиев А.Ю., Ковалев А.А., Краско А.С. Выбор метода упрочняющей обработки деталей машин в условиях автоматизированного мелкосерийного производства // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2021. № 2. С. 4–12. DOI 10.52261/02346206_2021_2_4
8. Krasko A.S., Kovalev A.A., Kudinov S.A., et al. Ensuring the Quality of Machine Tool Parts with Wear-Resistant Coatings during Manufacturing // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2024. Vol. 53, pp. 738–747. DOI: 10.1134/S1052618824700651
9. Kim Y.-J., Park T.-J., Yang J.-H., et al. Optimal Design for New Rotary Engine with Geometric Shape Functions on Combustion Chamber and Ports // Energies. 2024. Vol. 7. No. 7: 1754. DOI: 10.3390/en17071754
10. Chen A., Vorraro G., Turner M., et al. Control-Oriented Modelling of a Wankel Rotary Engine: A Synthesis Approach of State Space and Neural Networks. SAE Technical Paper 2020-01-0253, 2020. DOI: 10.4271/2020-01-0253
11. Kovalev A.A., Rogov N.V. Ensuring Uniform Hardness Distribution in Coatings Produced by HVOF Method After Their Spraying and Subsequent Grinding // In: Evgrafov A.N. (ed) Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2025, pp. 327–334. DOI: 10.1007/978-3-031-82083-0_30
12. Иванова Т.Н. Физическая сущность деформаций деталей под действием остаточных напряжений при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2008. № 2(39). С. 28–31. URL: <https://journals.nstu.ru/files/numbers/flash/1702/index.html>
13. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках (Обзор) // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. № 12. С. 2113–2142. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/2862>
14. Князева Ж.В., Андриянов Д.И., Юдин П.Е. и др. Исследования износостойкости и механизма абразивного износа газотермических металлизационных покрытий, используемых для защиты ПЭД // Нефте-

- газовое дело. 2023. Т. 21. № 1. С. 90–102. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-1-90-102
15. Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. О прогнозировании ресурса узлов трения по критерию допустимого износа // Вестник ТвГТУ. Серия Технические науки. 2022. № 4(16). С. 5–17. DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-5-17
 16. Mariani F.E., Picone C.A., Casteletti L.C. Characterization of Coatings Produced by Thermal Spray and Hard Chrome // Research & Development in Material Science. 2024. Vol. 20. No. 3, pp. 2379–2384. DOI: 10.31031/RDMS.2024.20.000986
 17. Kovalev A.A., Krasko A.S. Effect of the Thermal Sputtering Parameters on the Cohesive Strength of Functional Resistant Coatings // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2021. Vol. 50, pp. 208–215. DOI: 10.3103/S1052618821030080
 18. Kovalev A.A., Krasko A.S. Study of the Influence of Thermal Spray Parameters on the Adhesive Strength of Functional Resistant Coatings // Steel in Translation. 2023. Vol. 53, pp. 220–226. DOI: 10.3103/S0967091223030087
 19. Ковалев А.А., Краско А.С., Сидоров П.А. Моделирование ударного взаимодействия напыляемых частиц с поверхностью детали при формировании плазменных покрытий // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 257–266. DOI: 10.34759/vst-2021-4-257-266
 20. Kovalev A.A., Rogov N.V. Mathematical Modeling of Coatings Thermal Spraying Kinematics on Complex-Profile Internal Surfaces of Parts // In: Evgrafov A.N. (ed) Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2024, pp. 216–224. DOI: 10.1007/978-3-031-48851-1_21
 21. Pulsford J., Venturi F., Pala Z., et al. Application of HVOF WC-Co-Cr Coatings on the Internal Surface of Small Cylinders: Effect of Internal Diameter on the Wear Resistance // Wear. 2019. Vol. 432–433: 202965. DOI: 10.1016/j.wear.2019.202965
 22. Katranidis V., Kamnis S., Allcock B., et al. Effects and Interplays of Spray Angle and Stand-off Distance on the Sliding Wear Behavior of HVOF WC-17Co Coatings // Journal of Thermal Spray Technology. 2019. Vol. 28, pp. 514–534. DOI: 10.1007/s11666-019-00831-x
 23. Raoelison R.N. Role of the Magnus effect in additive manufacturing at the scale of the micron-sized powders within the supersonic gas flow of cold spraying // Additive Manufacturing. 2025. Vol. 97: 104610. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104610

References

1. Balyk VM, Gaidarov DD, Sotskov IA. Multi-criteria selection of unmanned aerial vehicle rational layout characteristics at multi-impulse mode of motion. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(3):59–68. (In Russ.). URL <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=176875>
2. Zinenkov YV, Lukovnikov AV. Computational Specifics of Electric Power Plant Performance Characteristics of an Airplane-Type Unmanned Aerial Vehicle by Mathematical Modeling. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(2):85–94. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=180651>
3. Tremkina OV, Adenane H, Shikhalev VI, et al. Computational study of a hybrid cryogenic power plant for the UAV with heat supply from the internal combustion engine. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(3):155–162. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=176931>
4. Vorraro G, Turner J. Testing of a Modern Wankel Rotary Engine – Part IV: Overall Mechanical and Thermal Balance. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*. 2022;5(3):1243–1255. DOI: 10.4271/2022-01-1001
5. Ötkür M. Altitude Performance and Fuel Consumption Modelling of Aircraft Piston Engine Rotax 912 S/ULS. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2021;23(1):18–25. DOI: 10.37934/araset.23.1.1825
6. Waysenburger DA, Chernousanov VV. Epitrohoide of a rotary piston engine: its properties and construction. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*. 2017(2):5–11. (In Russ.).
7. Albagachiev AY, Kovalev AA, Krasko AS. Selection of a method for strengthening treatment of machine parts in the conditions of automated small-batch production. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*. 2021(2):4–12. (In Russ.). DOI 10.52261/02346206_2021_2_4
8. Krasko AS, Kovalev AA, Kudinov SA, et al. Ensuring the Quality of Machine Tool Parts with Wear-Resistant Coatings during Manufacturing. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024;53:738–747. DOI: 10.1134/S1052618824700651
9. Kim YJ, Park TJ, Yang JH, et al. Optimal Design for New Rotary Engine with Geometric Shape Functions on Combustion Chamber and Ports. *Energies*. 2024;7(7):1754. DOI: 10.3390/en17071754
10. Chen A, Vorraro G, Turner M, et al. *Control-Oriented Modelling of a Wankel Rotary Engine: A Synthesis Approach of State Space and Neural Networks*. SAE Technical Paper 2020-01-0253; 2020. DOI: 10.4271/2020-01-0253
11. Kovalev AA, Rogov NV. Ensuring Uniform Hardness Distribution in Coatings Produced by HVOF Method After Their Spraying and Subsequent Grinding. In: Evgrafov AN. (ed) *Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham; 2025. p. 327–334. DOI: 10.1007/978-3-031-82083-0_30
12. Ivanova TN. The physical nature of deformations of parts under the influence of residual stresses during grinding. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*. 2008(2):28–31. (In Russ.). URL: <https://journals.nstu.ru/files/numbers/flash/1702/index.html>

13. Golovin YuI. Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicro-volumes, thin near-surface layers and films (Review). *Fizika tverdogo tela*. 2008;50(12):2113–2142. (In Russ.). URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/2862>
14. Knyazeva ZhV, Andriyanov DI, Yudin PE, et al. Research of wear resistance and mechanism of abrasive wear of gas thermal metallized coatings used for sem protection. *Petroleum engineering*. 2023;21(1):90–102. (In Russ.). DOI: 10.17122/ngdelo-2023-1-90-102
15. Izmailov VV, Afanasieva LE, Novoselova MV. On forecasting the life of friction units according to the criterion of approved wear. *Vestnik TvGTU. Seriya Tekhnicheskie nauki*. 2022(4):5–17. (In Russ.). DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-5-17
16. Mariani FE, Picone CA, Casteletti LC. Characterization of Coatings Produced by Thermal Spray and Hard Chrome. *Research & Development in Material Science*. 2024;20(3):2379–2384. DOI: 10.31031/RDMS.2024.20.000986
17. Kovalev AA, Krasko AS. Effect of the Thermal Sputtering Parameters on the Cohesive Strength of Functional Resistant Coatings. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021;50:208–215. DOI: 10.3103/S1052618821030080
18. Kovalev AA, Krasko AS. Study of the Influence of Thermal Spray Parameters on the Adhesive Strength of Functional Resistant Coatings. *Steel in Translation*. 2023;53:220–226. DOI: 10.3103/S0967091223030087
19. Kovalev AA, Krasko AS, Sidorov PA. Shock interaction simulation of sprayed particles with the part surface while plasma coatings forming. *Aerospace MAI Journal*. 2021;28(4):257–266. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2021-4-257-266
20. Kovalev AA, Rogov NV. Mathematical Modeling of Coatings Thermal Spraying Kinematics on Complex-Profile Internal Surfaces of Parts. In: *Evgrafov A.N. (ed) Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham; 2024. p. 216–224. DOI: 10.1007/978-3-031-48851-1_21
21. Pulsford J, Venturi F, Pala Z, et al. Application of HVOF WC-Co-Cr Coatings on the Internal Surface of Small Cylinders: Effect of Internal Diameter on the Wear Resistance. *Wear*. 2019;432–433:202965. DOI: 10.1016/j.wear.2019.202965
22. Katranidis V, Kamnis S, Allcock B, et al. Effects and Interplays of Spray Angle and Stand-off Distance on the Sliding Wear Behavior of HVOF WC-17Co Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2019;28:514–534. DOI: 10.1007/s11666-019-00831-x
23. Raoelison RN. Role of the Magnus effect in additive manufacturing at the scale of the micron-sized powders within the supersonic gas flow of cold spraying. *Additive Manufacturing*. 2025;97:104610. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104610

Статья поступила в редакцию / Received 15.06.2025
Одобрена после рецензирования / Revised 25.06.2025
Принята к публикации / Accepted 27.06.2025