

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЁРДОСТИ В ПОКРЫТИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ГАЗОПЛАМЕННЫМ МЕТОДОМ, ПОСЛЕ ИХ НАПЫЛЕНИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ШЛИФОВАНИЯ



<sup>1</sup>Артем Александрович Ковалев,  
Московский государственный технический университет им.  
Н.Э. Баумана  
Россия, Москва  
Тел.: (910)445-0210, E-mail: [kovalevartem@bmstu.ru](mailto:kovalevartem@bmstu.ru).



<sup>2</sup>Николай Вадимович Рогов,  
Московский государственный технический университет им.  
Н.Э. Баумана  
Россия, Москва  
Тел.: (968)852-6721, E-mail: [rogovnv@student.bmstu.ru](mailto:rogovnv@student.bmstu.ru).

### Аннотация

В работе рассмотрены вопросы обеспечения равномерности твёрдости покрытий, напылённых высокоскоростным газопламенным методом на сложнопрофильные поверхности деталей с последующим их шлифованием. Предложена формула, на основании которой оценивается взаимосвязь режимов шлифования с окончательной твёрдостью покрытий. Проведены экспериментальные исследования с целью подтверждения предложенной теоретической зависимости. По результатам исследований определены режимы шлифования, обеспечивающие наибольшую равномерность окончательной твёрдости покрытия.

*Ключевые слова:* высокоскоростное газопламенное напыление, шлифование, сложнопрофильная рабочая поверхность детали, износостойкое покрытие, твёрдость.

## Введение

При производстве деталей со сложнопрофильными внутренними поверхностями, к которым предъявляются повышенные требования по износостойкости, возникает задача упрочнения таких поверхностей. Примером такой детали является статор роторно-поршневого двигателя. Одним из перспективных методов упрочнения сложнопрофильных поверхностей является нанесение на них газотермических покрытий, в частности, высокоскоростным газопламенным напылением.

Данный метод напыления позволяет получать высокую износостойкость, которая зависит от широкого перечня показателей качества поверхности, в том числе и от твёрдости, определяющей одну из основных эксплуатационно-технических характеристик статора, в частности, глубину истирания с течением времени. Сформированные газотермические покрытия на сложнопрофильных поверхностях характеризуются анизотропией свойств, в результате которой проявляется неравномерность распределения твёрдости как вдоль поверхности, так и по толщине покрытия [1, 2]. Последующая механическая обработка покрытий, в частности, координатное шлифование также оказывает влияние на изменение величины твёрдости поверхности [3-6].

Таким образом, является актуальным исследование твёрдости газотермических покрытий на этапе технологической подготовки производства и последующего её контроля после шлифования, необходимые для выбора технологических режимов обработки покрытий, обеспечивающих гарантированное удаление дефектного слоя и формирование результирующей равномерной твёрдости [7-10].

Целью исследования является выбор оптимальных технологических режимов шлифования покрытий, формирующих бездефектный слой с равномерной результирующей твёрдостью, обеспечивающей необходимую износостойкость поверхности на заданную глубину.

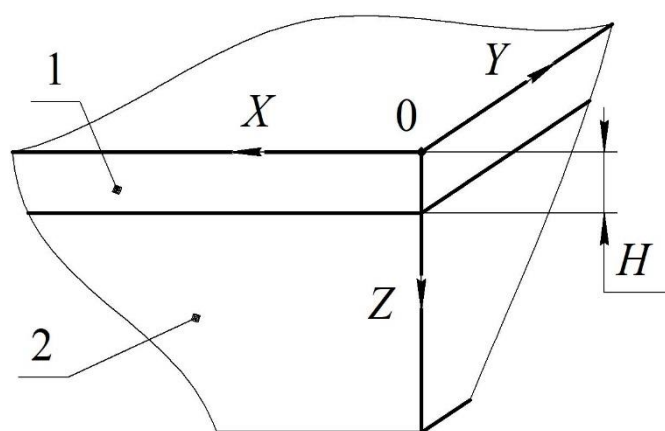
Задачи:

1. Выявить взаимосвязь между технологическими параметрами шлифования и результирующей твёрдостью покрытий, полученных высокоскоростным газопламенным напылением.
2. Определить перечень технологических режимов координатного шлифования и диапазон их варьирования.
3. Составить план экспериментов и провести исследования согласно данному плану.
4. Определить режимы шлифования, обеспечивающие наименьшую неравномерность распределения твёрдости покрытия, а также наибольшие абсолютные её значения.

## Методы

Нанесение покрытия на сложнопрофильные поверхности деталей характеризуется неравномерностью толщины покрытия [11, 12]. В связи с этим при последующем координатном шлифовании заготовок с покрытиями в различных точках поверхностей происходит удаление разной величины припуска. Распределение твёрдости покрытия по глубине зависит как от исходной его твёрдости после напыления, так и от последующего шлифования.

На рис. 1 показана обобщённая схема образца для оценки твёрдости покрытия.

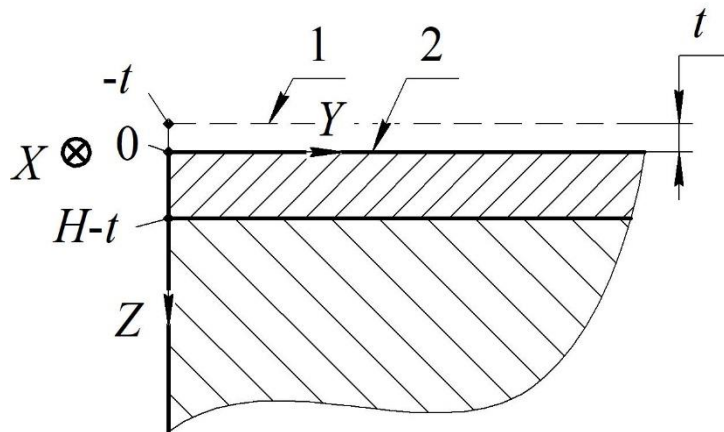


**Рис. 1.** Образец для оценки твёрдости покрытия  
1 – покрытие; 2 – основной материал образца

На рис. 1  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – обозначения координатных осей, относительно которых проводятся измерения,  $H$  – исходная толщина покрытия с учётом дефектного слоя, сформированного на этапе напыления.

На рис. 2 показана схема поперечного сечения образца детали после шлифования с припуском  $t$ . Величина  $t$  должна быть больше либо равна величине дефектного слоя покрытия.

Изображённая на рис. 2 плоскость  $XU$  сместилась относительно первоначального положения (рис. 1) и совпадает с поверхностью образца после шлифования.



**Рис. 2.** Схема поперечного сечения образца  
 1 – исходная поверхность образца (до шлифования); 2 – поверхность образца после шлифования с припуском  $t$

Взаимосвязь, позволяющая определить твёрдость  $HV(Z)$  на глубине  $Z$  после шлифования, имеет вид:

$$HV(Z) = HV_{исх}(Z) - f(r_1, r_2, \dots, r_l, \dots, r_m, Z), \quad (1)$$

где  $HV_{исх}(Z)$  – исходная твёрдость покрытия на глубине  $Z$  после напыления;

$f(r_1, r_2, \dots, r_l, \dots, r_m, Z)$  – функция, значение которой равно снижению твёрдости  $\Delta HV$  после шлифования на глубине  $Z$ ;

$r_1, r_2, \dots, r_l, \dots, r_m$  – параметры операции шлифования.

Исследования закономерности распределения твёрдости покрытия по его толщине целесообразно проводить с использованием плоских образцов с покрытием. Изменяемыми параметрами в рамках данного эксперимента будут скорость шлифования  $v$  и зернистость шлифовального круга  $z$ . Припуск на шлифование не является изменяемым параметром в рамках данного эксперимента, т.к. на формирование напряжённо-деформированного состояния наибольшее влияние оказывает величина съёма материала за один проход, и этот параметр рекомендуется использовать как неизменный [13].

При координатном шлифовании наибольший вклад в напряжённо-деформированное состояние поверхностного слоя детали вносит скорость вращения круга. По сравнению с этой составляющей скорости резания прочие компоненты (скорость осцилляционного движения, скорость движения шпинделя вдоль обрабатываемой поверхности) незначительны – они составляют менее 1% от скорости вращения круга [14-16]. В связи с этим при исследовании твёрдости покрытия допустимо использование образцов для плоского шлифования при условии, что скорость плоского

шлифования будет равна скорости вращения круга при координатном шлифовании.

Исходя из выбранной схемы шлифования необходимо проведение двухфакторного эксперимента. Тем самым снижается количество исследуемых факторов по сравнению с координатным шлифованием. Пусть  $A$  – скорость шлифования  $v$ ,  $B$  – зернистость шлифовального круга  $z$ , Изменение факторов  $A$  и  $B$  проводится на двух уровнях.

Таким образом, для проводимого эксперимента формула (1) преобразуется в следующий вид:

$$HV(Z) = HV_{исх}(Z) - f(v, z, Z). \quad (2)$$

До шлифования толщины покрытий на образцах составляли 0,43 мм. На рис. 3 представлено фото образца.

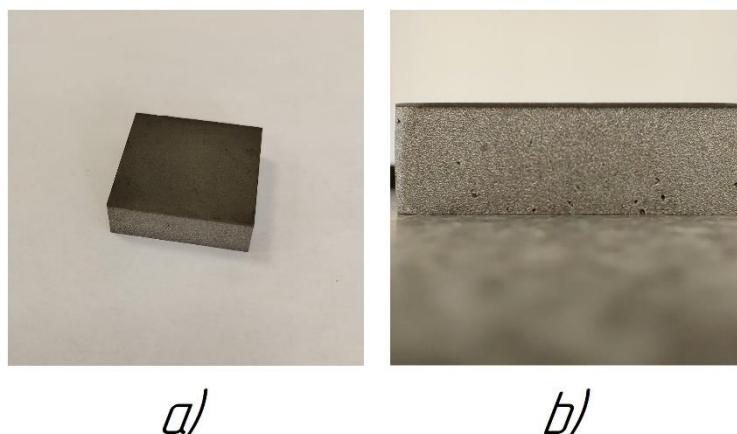
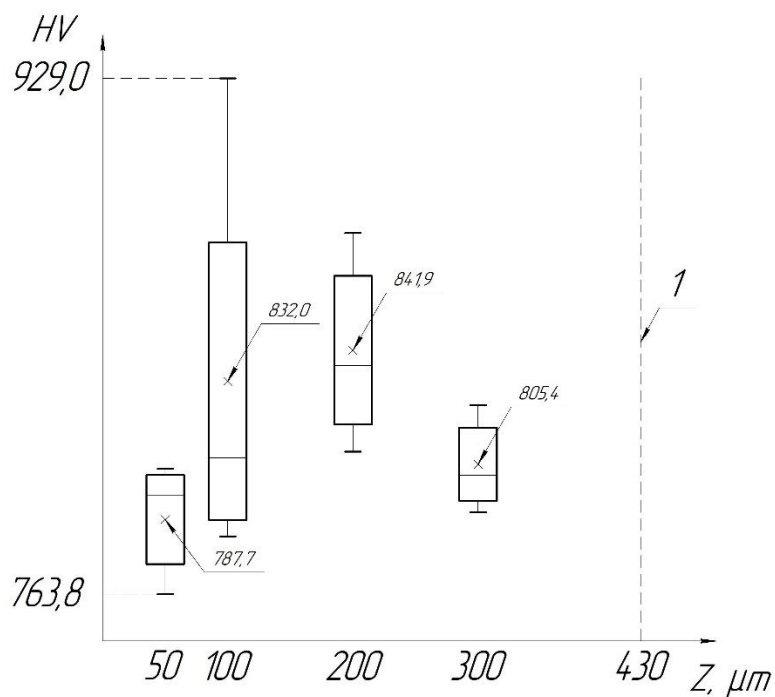


Рис. 3. Фото образца: *a)* общий вид; *b)* поперечное сечение

В процессе шлифования был удалён припуск толщиной 0,06 мм. Диаграмма изменения твёрдости покрытия по его толщине до шлифования приведена на рис. 4. Измерения твёрдости покрытия до и после шлифования проводились по шкале Виккерса при нагрузке 9,8 Н с выдержкой в течение 15 с.



**Рис. 4.** Распределение твёрдости покрытия по толщине после напыления  
1 – граница раздела «покрытие-основа»

В таблице 1 приведены соответствия условных обозначений уровня каждого из факторов их реальным значениям.

**Таблица 1.** Условные обозначения факторов

| Условное обозначение | $v$ , м/с ( $A$ ) | $z$ , мкм ( $B$ ) |
|----------------------|-------------------|-------------------|
| -1                   | 3,18              | 46 (P320)         |
| +1                   | 4,24              | 58 (P240)         |

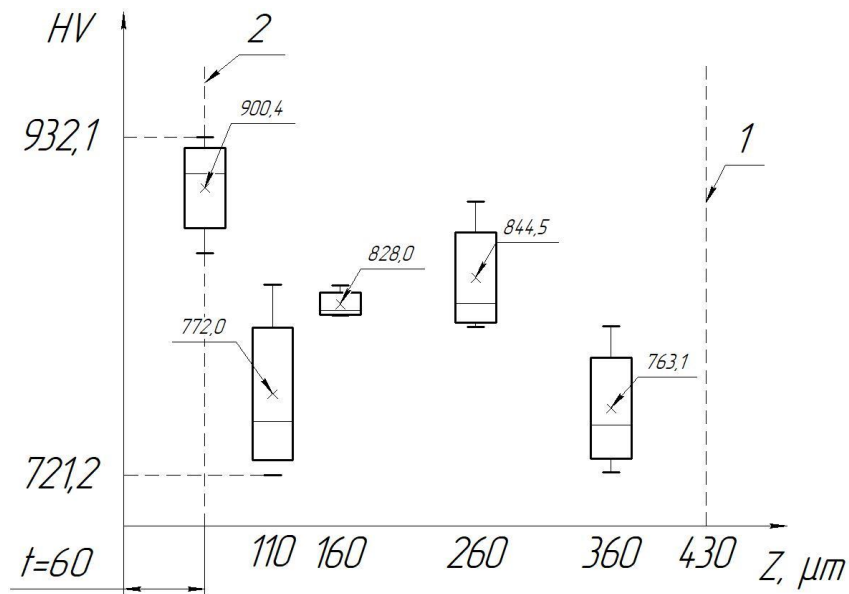
В таблице 2 приведены сведения о параметрах проведения каждого из экспериментов.

**Таблица 2.** Параметры проведения эксперимента

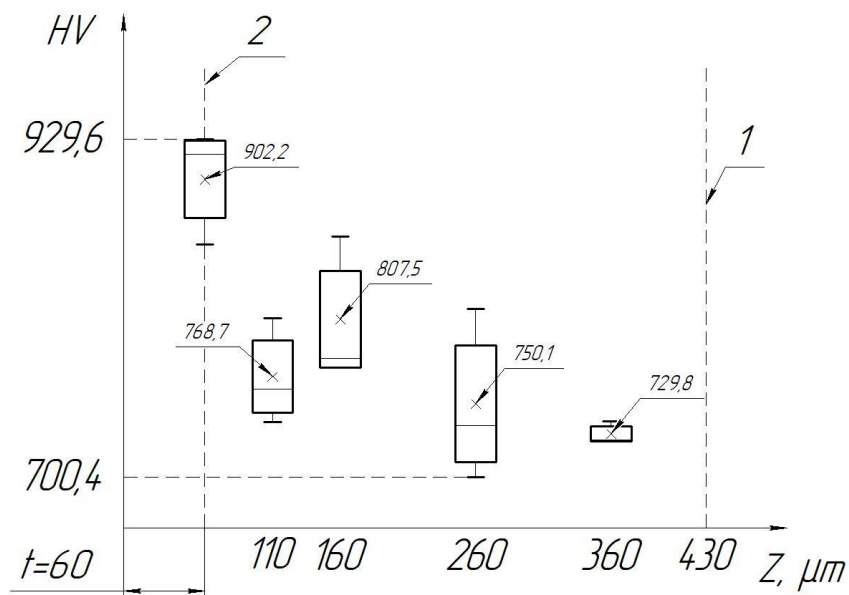
| $n$ | $A$ | $B$ |
|-----|-----|-----|
| 1   | -1  | -1  |
| 2   | -1  | +1  |
| 3   | +1  | -1  |
| 4   | +1  | +1  |

## Результаты

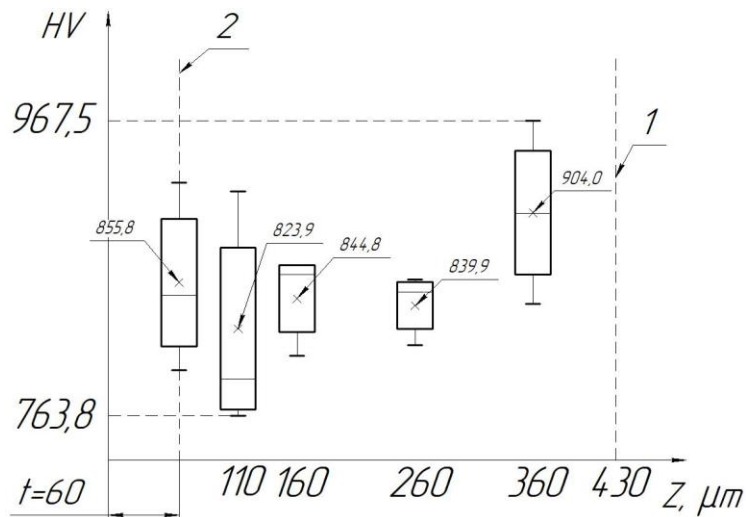
По результатам проведения шлифования в соответствии с матрицей эксперимента (таблица 2) были построены диаграммы на основании экспериментальных данных (рис. 5-7).



**Рис. 5.** Распределение твёрдости покрытия по толщине после эксперимента  $n = 1$   
 1 – граница раздела «покрытие-основа»; 2 – поверхность покрытия после шлифования



**Рис. 6.** Распределение твёрдости покрытия по толщине после напыления  $n = 2$   
 1 – граница раздела «покрытие-основа»; 2 – поверхность покрытия после шлифования



**Рис. 7.** Распределение твёрдости покрытия по толщине после напыления  $n = 3$   
 1 – граница раздела «покрытие-основа»; 2 – поверхность покрытия после шлифования

### Обсуждение

Согласно данным, представленным на диаграммах (рис.5-7), после шлифования покрытия твёрдость поверхности изменяется. В зависимости от выбранных режимов шлифования величина изменения твёрдости покрытия различается. На основании кубической интерполяции средних арифметических значений твёрдости по глубине, приведённых на рис. 5-7, построена таблица 3, в которой приведены данные об изменении твёрдости относительно исходной (до шлифования покрытия) в зависимости от координаты  $Z$ .

**Таблица 3.** Изменение твёрдости покрытия  $\Delta HV$

| $Z$ , мкм | 110   | 160   | 260   | 300   |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| $n = 1$   | -63,3 | -15,2 | +22,7 | +13,6 |
| $n = 2$   | -66,3 | -35,3 | -72,2 | -66,9 |
| $n = 3$   | -11,3 | +1,8  | +17,9 | +55,7 |

Таким образом, наибольшая твёрдость наблюдается в эксперименте  $n = 3$  (рис. 7). Её максимальное снижение составило 11,3  $HV$ , а наибольшее увеличение – 55,7  $HV$ . Больше всего твёрдость снижается при шлифовании покрытия с режимами, соответствующими эксперименту  $n = 2$  (рис. 6) – величина наибольшего снижения составила 72,2  $HV$ . Исходя из этого для получения наибольшей твёрдости покрытия после шлифования следует обрабатывать его с наибольшей скоростью  $v = 4,24$  м/с шлифовальным кругом с мелким зерном  $z = 46$  мкм при условии отсутствия прижогов на поверхности.



В таблице 4 приведены данные по минимальному и максимальному значениям твёрдости покрытия.

**Таблица 4.** Твёрдость покрытия

|               | Минимум | Максимум | Разность |
|---------------|---------|----------|----------|
| До шлифования | 787,7   | 841,9    | 54,2     |
| $n = 1$       | 763,1   | 844,5    | 81,4     |
| $n = 2$       | 729,8   | 807,5    | 77,7     |
| $n = 3$       | 823,9   | 904,0    | 80,1     |

Наиболее равномерная твёрдость достигается при проведении шлифования с режимами, соответствующими эксперименту  $n = 2$ , т.к. разность между максимальным и минимальным значениями твёрдости наименьшая, однако ранее было показано, что в этом случае наблюдалось наибольшее падение твёрдости относительно исходной. В результате проведения шлифования с режимами  $n = 1$  и  $n = 3$  получена практически одинаковая равномерность распределения твёрдости, кроме того, она незначительно отличается от равномерности распределения твёрдости при  $n = 2$ . Таким образом, шлифование с режимом, соответствующим эксперименту  $n = 3$ , следует считать оптимальным, т.к. обеспечивается максимальная абсолютная величина твёрдости и минимальная из отобранных вариантов неравномерность твёрдости.

### **Заключение**

По результатам проведённого исследования сделаны следующие выводы.

1. Взаимосвязь между результирующей твёрдостью напылённого покрытия и технологическими параметрами шлифования в общем виде выражается формулой (1).

2. Было установлено, что скорость вращения шлифовального круга  $v$  является параметром координатного шлифования, вносящим наибольший вклад в изменение напряжённо-деформированного состояния обрабатываемой поверхности. Кроме того, к параметрам, которые необходимо учитывать при экспериментальных исследованиях изменения твёрдости покрытия в процессе шлифования, относится зернистость шлифовального круга  $z$ .

3. В целях минимизации числа экспериментов с координатным шлифованием было проведено исследование влияния режимов шлифования на распределение твёрдости покрытия посредством плоских образцов. В ходе проведения экспериментов было установлено, что при максимальном значении зернистости  $z = 58$  мкм происходит снижение твёрдости покрытия, достигающее  $72,2 HV$ . С увеличением скорости шлифования до

$v = 4,24$  м/с величина твёрдости повышается на величину, достигающую 55,7 HV.

4. В результате шлифования с режимом  $v = 4,24$  м/с и  $z = 46$  мкм получена минимальная из отобранных вариантов неравномерность твёрдости покрытия.

Дальнейшие исследования равномерности распределения твёрдости покрытий, полученных высокоскоростным газопламенным напылением, целесообразно провести с увеличением числа факторов, соответствующих технологическим параметрам операции шлифования (глубина резания, подача и др.), для уточнения закономерностей распределения твёрдости по глубине. На основании полноценных подобных исследований будет возможно принятие обоснованных решений о выборе режимов координатного шлифования покрытий, полученных на сложнопрофильных рабочих поверхностях деталей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kovalev, A.A. Effect of the Thermal Sputtering Parameters on the Cohesive Strength of Functional Resistant Coatings / A.A. Kovalev, A.S. Krasko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2021. – Vol. 50, No. 3. – P. 208-215.
- [2] Kovalev A.A. Mathematical Modeling of Coatings Thermal Spraying Kinematics on Complex-Profile Internal Surfaces of Parts / A.A. Kovalev & N.V. Rogov // Advances in Mechanical Engineering (MMESE 2023). – 2023. – P. 216-224.
- [3] Zhang Y. Effect of process parameters on hardness and microstructure of 18CrNiMo7-6 carburized steel in high-speed cylindrical grinding / Y. Zhang, Sh. Yuan, X. Yang & D. Wang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 124. – P. 3137-3147.
- [4] Zabolotnyi O. Investigation of the Surface Layer Hardness When Grinding Sintered Porous Workpieces / O. Zabolotnyi, T. Bozhko, T. Halchuk, O. Zaleta & D. Cagaňová // Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. – 2022. – P. 355-364.
- [5] Li B. Prediction and analysis of grinding force on grinding heads based on grain measurement statistics and single-grain grinding simulation / B. Li, X. Li, Sh. Hou, Sh. Yang, Zhi Li, J. Qian & Zh. He // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 132. – P. 513-532.
- [6] Zhang Ch. Radial deformation and stress distribution of grinding wheel on surface grinding / Ch. Zhang, Y. Li, Q. Zou, W. Luo, L. Dai, J. Lv & K. Li // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 129. – P. 771-782.

- [7] Шкурин, И. Г. Формирование износостойкого покрытия на поверхности рабочих органов газотермическим напылением / И. Г. Шкурин, Ю. А. Шкурина // Научный журнал молодых ученых. – 2018. – № 3(12). – С. 42-45.
- [8] Гусев, В. М. Структура и свойства износостойких покрытий, получаемых методами газотермического напыления / В. М. Гусев, А. В. Бурякин, В. Б. Мордынский // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 113. – С. 326-329.
- [9] Chen X. HVOF Spray Performance Optimization Analysis and Experimental Research of WC–12Co Coating on Ti Alloy / X. Chen, Ch. Li, S. Li, X. Han, H. Jiang & X. Zhao // Metals and Materials International. – 2023. – Vol. 29. – P. 3548-3565.
- [10] Syundyukov, I.S., Ryabikin, A.Y., Ivanova, G.V., Skotnikova, M.A. (2023). Increasing the Wear Resistance of Crankshafts by the Plasma Spraying Method. In: Evgrafov, A.N. (eds) Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp 142–152. Springer, Cham.
- [11] Erdogan A. Enhancing of Tribological, Mechanical and Microstructural Properties of HVOF Coated AISI 316 Steel by Boriding / A. Erdogan, A. Günen, Y. Yaralı Özbek & M. Sabri Gök // JOM. – 2024. – Vol. 76. – P. 277-290.
- [12] Yuan J. Properties of Al-Based Amorphous Coatings Prepared by Low-temperature HVOF Spraying / J. Yuan, Y. Cheng, Zh. Jing, L. Xu, J. Mao, W. Lu, Zh. Zhang & X. Liang // Journal of Thermal Spray Technology. – 2023. – Vol. 32. – P. 1338-1349.
- [13] Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. Под ред. д-ра техн. наук проф. А.Н. Резникова. М.: Машиностроение, 1977. 391 с.
- [14] Имитационная динамическая модель процесса шлифования сложнопрофильных деталей. Расчет сил шлифования и моделирование динамики обработки / И. А. Киселев, С. А. Воронов, А. А. Ширшов, И. И. Иванов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 10. – С. 47-64.
- [15] Полканов, Е. Г. Шлифование инструментальных материалов высокопористыми абразивными кругами / Е. Г. Полканов, Б. Е. Пини // Известия МГТУ МАМИ. – 2010. – № 2(10). – С. 135-141.
- [16] Mao C. Prediction of Grinding Force by an Electroplated Grinding Wheel with Orderly-Micro-Grooves / C. Mao, J. Wang, M. Zhang, X. Wang, Yu. Luo, W. Tang, K. Tang, Zh. Bi, Y. Hu & Zh. Lin // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 36. – No. 16.

## **ENSURING UNIFORM HARDNESS DISTRIBUTION IN COATINGS PRODUCED BY HVOF METHOD AFTER THEIR SPRAYING AND SUBSEQUENT GRINDING**

Bauman Moscow State Technical University, Russia

### **Abstract**

The work examines the issues of ensuring uniform hardness of coatings sprayed by a HVOF method onto parts complex-profile surfaces with their subsequent grinding. A formula is proposed on the basis of which the relationship between grinding modes and the final coatings hardness is assessed. Experimental studies were carried out to confirm the proposed theoretical relationship. Based on the research results, grinding modes were determined that ensure the coating final hardness greatest uniformity.

*Key words:* HVOF, grinding, complex-profile working surface of a part, wear-resistant coating, hardness

### **REFERENCES**

- [1] Kovalev, A.A. Effect of the Thermal Sputtering Parameters on the Cohesive Strength of Functional Resistant Coatings / A.A. Kovalev, A.S. Krasko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2021. – Vol. 50, No. 3. – P. 208-215.
- [2] Kovalev A.A. Mathematical Modeling of Coatings Thermal Spraying Kinematics on Complex-Profile Internal Surfaces of Parts / A.A. Kovalev & N.V. Rogov // Advances in Mechanical Engineering (MMESE 2023). – 2023. – P. 216-224.
- [3] Zhang Y. Effect of process parameters on hardness and microstructure of 18CrNiMo7-6 carburized steel in high-speed cylindrical grinding / Y. Zhang, Sh. Yuan, X. Yang & D. Wang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 124. – P. 3137-3147.
- [4] Zabolotnyi O. Investigation of the Surface Layer Hardness When Grinding Sintered Porous Workpieces / O. Zabolotnyi, T. Bozhko, T. Halchuk, O. Zaleta & D. Cagánová // Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. – 2022. – P. 355-364.
- [5] Li B. Prediction and analysis of grinding force on grinding heads based on grain measurement statistics and single-grain grinding simulation / B. Li, X. Li, Sh. Hou, Sh. Yang, Zhi Li, J. Qian & Zh. He // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 132. – P. 513-532.
- [6] Zhang Ch. Radial deformation and stress distribution of grinding wheel on surface grinding / Ch. Zhang, Y. Li, Q. Zou, W. Luo, L. Dai, J. Lv & K. Li

- // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 129. – P. 771-782.
- [7] Shkurin, I. G. Formation of a wear-resistant coating on the surface of working parts by thermal spraying / I. G. Shkurin, Yu. A. Shkurina // Scientific journal of young scientists. – 2018. – No. 3(12). – P. 42-45. (rus.)
- [8] Gusev, V. M. Structure and properties of wear-resistant coatings obtained by thermal spraying methods / V. M. Gusev, A. V. Buryakin, V. B. Mordynsky // Proceedings of GOSNITI. – 2013. – T. 113. – P. 326-329. (rus.)
- [9] Chen X. HVOF Spray Performance Optimization Analysis and Experimental Research of WC–12Co Coating on Ti Alloy / X. Chen, Ch. Li, S. Li, X. Han, H. Jiang & X. Zhao // Metals and Materials International. – 2023. – Vol. 29. – P. 3548-3565.
- [10] Syundyukov, I.S., Ryabikin, A.Y., Ivanova, G.V., Skotnikova, M.A. (2023). Increasing the Wear Resistance of Crankshafts by the Plasma Spraying Method. In: Evgrafov, A.N. (eds) Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp 142–152. Springer, Cham.
- [11] Erdogan A. Enhancing of Tribological, Mechanical and Microstructural Properties of HVOF Coated AISI 316 Steel by Boriding / A. Erdogan, A. Günen, Y. Yaralı Özbek & M. Sabri Gök // JOM. – 2024. – Vol. 76. – P. 277-290.
- [12] Yuan J. Properties of Al-Based Amorphous Coatings Prepared by Low-temperature HVOF Spraying / J. Yuan, Y. Cheng, Zh. Jing, L. Xu, J. Mao, W. Lu, Zh. Zhang & X. Liang // Journal of Thermal Spray Technology. – 2023. – Vol. 32. – P. 1338-1349.
- [13] Abrasive and diamond processing of materials. Directory. Ed. Dr. Tech. science prof. A.N. Reznikova. M.: Mechanical Engineering, 1977. 391 p. (rus.)
- [14] Simulation dynamic model of the grinding process of complex-profile parts. Calculation of grinding forces and modeling of processing dynamics / I. A. Kiselev, S. A. Voronov, A. A. Shirshov, I. I. Ivanov // Science and education: scientific publication of MSTU. N.E. Bauman. – 2015. – No. 10. – P. 47-64. (rus.)
- [15] Polkanov, E. G. Grinding of tool materials with highly porous abrasive wheels / E. G. Polkanov, B. E. Pini // Proceedings of MSTU MAMI. – 2010. – No. 2(10). – pp. 135-141. (rus.)
- [16] Mao C. Prediction of Grinding Force by an Electroplated Grinding Wheel with Orderly-Micro-Grooves / C. Mao, J. Wang, M. Zhang, X. Wang, Yu. Luo, W. Tang, K. Tang, Zh. Bi, Y. Hu & Zh. Lin // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 36. – No. 16.