

## Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.923.4

doi: 10.30987/2782-5957-2023-8-4-10

### ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ ДЛЯ ШЛИФОВАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ВОЛЬФРАМ-КАРБИДНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ВКНА И ВК-20КС НА ДЕТАЛЯХ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Владимир Федорович Макаров<sup>1</sup>, Михаил Владимирович Песин<sup>2</sup>, Роман Владимирович Сычев<sup>3</sup>✉

<sup>1,2,3</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>1</sup> makarovv@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0383-0208>

<sup>2</sup> crv10010@gmail.com, m.pesin@mail.ru

<sup>3</sup> makarovv@pstu.ru

#### Аннотация

Рассматриваются результаты исследования шлифованием поверхностей ремонтных деталей газотурбинных двигателей из жаропрочной нержавеющей стали ЭП-517Ш с напыленными высокопрочными износостойкими покрытиями ВКНА и ВК-20КС с целью выбора наиболее эффективных абразивных инструментов. Проведена оценка эффективности по результатам сравнительных исследований параметров качества поверхностного слоя: шероховатости, трещинообразования, прижогов,

шелушения покрытия, порообразования, а также температуры обработки при использовании шлифовальных кругов из электрокорунда белого с пропиткой дисульфидом молибдена и без пропитки, из карбида кремния зеленого и эльбора. В результате исследования установлено, что наилучшее качество обработки деталей с покрытием ВКНА и ВК-20КС достигается при использовании кругов из эльбора.

**Ключевые слова:** шлифование, покрытие, электрокорунд, карбид кремния, эльбор.

Ссылка для цитирования:

Макаров В.Ф. Выбор рациональных характеристик абразивных кругов для шлифования высокопрочных вольфрам-карбидных износостойких покрытий ВКНА и ВК-20КС на деталях из жаропрочных сталей / В.Ф. Макаров, М.В. Песин, Р.В. Сычев // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 08. – С. 4-10. doi: 10.30987/2782-5957-2023-8-4-10.

Original article

Open Access Article

### SELECTION OF RATIONAL CHARACTERISTICS OF ABRASIVE WHEELS FOR GRINDING HIGH-STRENGTH WEAR-RESISTANT TUNGSTEN-CARBIDE BKHA AND BK-20KC COVERINGS ON THE PARTS MADE OF HEAT-RESISTANT STEELS

Vladimir Fedorovich Makarov<sup>1</sup>, Mikhail Vladimirovich Pesin<sup>2</sup>, Roman Vladimirovich Sychev<sup>3</sup>✉

<sup>1,2,3</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

<sup>1</sup> makarovv@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0383-0208>

<sup>2</sup> crv10010@gmail.com, m.pesin@mail.ru

<sup>3</sup> makarovv@pstu.ru

## Abstract

The study results of grinding the surfaces of gas turbine engine repair parts made of heat-resistant stainless steel ЭП-517Ш with sprayed high-strength wear-resistant ВКНА and ВК-20КС coatings are considered in order to select the most effective abrasive tools. The effectiveness was evaluated based on the results of comparative studies of the quality parameters of the surface layer: roughness, cracking, tempering, peeling of the coating, pore formation, as well as the machining

temperature when using grinding wheels made of fused alumina impregnated with molybdenum disulfide and without impregnation, made of green silicon carbide and el'bor borazon material. As a result of the study, it is found that the best quality of machining parts coated with ВКНА and ВК-20КС is achieved by using el'bor borazon circles.

**Keywords:** grinding, coating, fused alumina, silicon carbide, el'bor borazon.

## Reference for citing:

Makarov VF, Pesin MV, Sychev RV. Selection of rational characteristics of abrasive wheels for grinding high-strength wear-resistant tungsten-carbide ВКНА and ВК-20КС coverings on the parts made of heat-resistant steels. *Transport Engineering*. 2023; 8: 4-10. doi: 10.30987/2782-5957-2023-8-4-10.

## Введение

В настоящее время на ОДК «Пермские моторы» широко применяются процессы восстановления ремонтных деталей газотурбинных двигателей с помощью детонационного напыления различных видов износостойких покрытий по изношенным поверхностям деталей из различных марок сталей и сплавов. Механическая обработка таких поверхностей вызывает затруднения, так как покрытие обычно имеет более высокие физико-механические свойства (прочность, твердость, износостойкость, хрупкость, относительное удлинение при разогреве и т. д.), чем основной металл детали [1]. При обработке этих покрытий, особенно нанесенных методом детонационного напыления, часто возникают дефекты в виде трещин, сколов и отслоения покрытия [2].

Основной причиной возникновения дефектов, как правило, является резкий рост температуры в зоне резания из-за неправильно подобранных характеристик абразивного инструмента, нерациональных режимов шлифования и СОЖ. Часто при обработке используются круги, имеющиеся в наличии на складе и не имеющие необходимых режущих свойств. В то же время научно обоснованные рекомендации по обработке износостойких покрытий, проверенные на практике, отсутствуют.

С целью устранения образовавшихся дефектов поверхностного слоя после операции шлифования и последующего восстановления деталей приходится напыленный слой полностью удалять и повторять как напыление, так и шлифование. Это

значительно повышает трудоемкость выполнения операции ремонта деталей.

Одними из таких твердых износостойких покрытий являются нанесенные методом детонационного напыления вольфрам-кабидные покрытия ВКНА (никель-алюминий) и ВК-20КС (Вольфрам-кобальт). Оба покрытия обладают весьма высокой твердостью, что делает их стойкими к износу и повреждениям. При шлифовании необходимо выбирать абразивный материал с достаточной твердостью, чтобы эффективно обрабатывать эти покрытия. Если абразивный материал менее твердый, он может быть недостаточно эффективным или даже привести к повреждению покрытия [3, 4]. ВКНА и ВК-20КС обладают хорошей адгезией к основе детали благодаря содержанию никеля в покрытии. ВКНА и ВК-20КС могут быть хрупкими, особенно при больших толщинах покрытия. Поэтому следует принять меры предосторожности, чтобы избежать образования трещин или отслаивания покрытия, так как при шлифовании данных покрытий на обрабатываемых поверхностях очень часто возникают сколы, трещины и отслоения [5].

Цель настоящего исследования состоит в определении рациональных характеристик абразивного круга и режимов шлифования для достижения наиболее качественной обработки поверхностей с напыленным износостойким покрытием.

Экспериментальные исследования проведены совместно с лабораторией резания ПНИПУ и лабораторией шлифования ОДК «Пермские моторы», г. Пермь.

## Методика экспериментального исследования

С целью определения рациональных характеристик шлифовальных кругов и рациональных режимов шлифования в лабораторных условиях проведена отработка характеристики абразивного инструмента и режимов шлифования на образцах с нанесенным покрытием. Основной материал образца – ЭП-517Ш. Выбор материала ЭП-517Ш для исследования износостойких покрытий обусловлен его широкой применимостью, известными свойствами, наличием данных по обрабатываемости и практической релевантностью для различных отраслей промышленности. Нержавеющая жаропрочная сталь мартенситного класса ЭП-517Ш является широко используемым инженерным материалом с хорошей износостойкостью. Эта сталь имеет хорошую термическую стойкость, высокую твердость и стойкость к износу. Эти свойства делают его наиболее подходящим для исследования и тестирования различных износостойких покрытий, таких как ВКНА и ВК-20КС. Жаропрочная сталь

ЭП-517Ш является хорошо изученным материалом, для которого имеется обширная база данных о его свойствах, механическом поведении и процессах обработки. Это облегчает сравнение результатов исследования с предыдущими исследованиями и обеспечивает более надежную оценку эффективности износостойких покрытий.

Толщина слоя нанесенного детонационным методом покрытия на предприятии обычно составляет 0,4-0,8мм. Исследование процесса шлифования проводили на плоскошлифовальном станке 3Г71 с применением 3,5% СОЖ-«Велс 1М» [6]. Расход СОЖ не менее 30 л/мин. Съем припуска составил 0,2...0,4мм. Для правки кругов использовали алмазный карандаш 3908-0068. Для проведения правки шлифовальных кругов при шлифования образцов с нанесенным износостойким покрытием выбраны следующие режимы правки [7] (табл. 1).

Таблица 1

Режимы правки шлифовальных кругов

Table 1

### *Grinding wheel editing modes*

Скорость шлифовального круга, м/сек	30
Скорость подачи при правке, м/мин	0,5
Глубина правки, мм/дв.х	0,02-0,03

Для обеспечения эффективного шлифования износостойких покрытий необходимо чтобы микротвердость абразивного материала была выше микротвердости покрытия не менее двух раз:

$$K_H = H_{\mu.a} / H_{\mu.m} \geq 2,$$

где  $H_{\mu.a}$  и  $H_{\mu.m}$  выражают микротвердость абразива и покрытия образца материала соответственно.

Микротвердость [8] покрытий ВКНА и ВК-20КС  $H_{\mu} = 500-600$  кгс/мм<sup>2</sup> (по Бригеллю). Исходя из заданной микротвердости покрытия, микротвердость абразива должна быть не менее  $600 \text{ кгс/мм}^2 \times 2 = 1200 \text{ кгс/мм}^2$ .

По этому параметру подобраны шлифовальные круги из трех наиболее

распространенных материалов: электрокорунд белый ( $Al_2O_3$ ) (от 2000 кгс/мм<sup>2</sup> до 2100 кгс/мм<sup>2</sup>), карбид кремния (SiC) (от 3000 кгс/мм<sup>2</sup> до 3200 кгс/мм<sup>2</sup>) и эльбор (кубический нитрида бора) (от 8000 кгс/мм<sup>2</sup> до 9000 кгс/мм<sup>2</sup>).

В результате анализа литературы установлено, что для обработки деталей с плазменным и детонационным износостойким покрытием чаще всего рекомендуется применение эльборовых шлифовальных кругов [9]. Однако стоимость таких кругов намного выше применяемых кругов на производстве. Однако в рассмотренных научных работах не рассматривалось применение различных кругов при обработке деталей с покрытием из вольфрам-карбидных соединений. Поэто-

му при данных экспериментальных исследованиях рассматривались круги из различных материалов: из электрокорунда белого, из карбида кремния зеленого и из эльбора.

Процесс обработки исследовался с использованием двух типов связок: органической и керамической. Изучались пока-

### Результаты и обсуждение

Результаты исследования влияния режимов шлифования и характеристик абразивных кругов на шероховатость по-

затели шероховатости обработанной поверхности, износ (засаливание) кругов [10], режущей способности инструмента, шелушения покрытия, порообразования, трещинообразования, прижогов (цвета побежалости обработанной поверхности), а также температуры в зоне шлифования.

верхности образцов, напыленных сплавом ВКНА, приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Результаты исследования шероховатости при шлифовании образцов из ЭП-517Ш с нанесенным износостойким покрытием ВКНА

Table 2

*Results of the study of roughness during grinding of samples from EP-517SH with the applied wear-resistant coating of VKNA*

№ образца	Характеристика инструмента	Режим шлифования			Ra, мкм	Ra среднее, мкм
		V, м/с	S, м/ мин	t, мм/ дв.х		
1	1 350×40×127	30	3-5	0,005	0,47 0,53 0,49	0,54
2	25A F40 L 6 V				0,56 0,59 0,52	
3	50м/с 2кл.				0,56 0,58 0,57	
4	1 350×40×127	28	3-5	0,003	0,56 0,68 0,77	0,68
5	63С F40 М 6 V				0,86 0,67 0,57	
6	35м/с 2кл.				0,63 0,67 0,77	
7	1 350×40×127 25A	30	3-5	0,005	0,58 0,68 0,57	0,62
8	F60 J(пропитан до				0,64 0,68 0,57	
9	К) 7 V 35м/с 2кл.				0,67 0,68 0,50	
10	1A1 350×16×127×5	34,0	3-5	0,005	0,46 0,46 0,43	0,42
11	ЛКВ40 В151 100 К				0,32 0,40,42	
12	V 35м/с				0,42 0,43 0,48	
13	1A1 350×16×127×5	33	3-5	0,005	0,27 0,27 0,32	0,29
14	ЛКВ40 В126 100 К				0,30 0,32 0,30	
15	В2-01 35м/с				0,26 0,24 0,28	

После обработки все образцы из ВКНА проверены на ЛЮМ-контроле. Трещины и сколы на образцах не обнаружены. На образцах, прошлифованных кругами из карбида зеленого, на поверхности образовалось шелушение покрытия.

При анализе результатов шлифования покрытия ВКНА установлено:

1. Наилучшие результаты по качеству обрабатываемой поверхности Ra = 0,29 мкм и по режущей способности ин-

струмента получены при применении кругов из эльбора (ЛКВ40) как на органической, так и на керамической связках. Однако процесс профилирования (правки) эльборовых кругов на органической связке более трудоемкий.

2. Хорошие результаты получены при обработке кругами из электрокорунда белого, электрокорунда белого со спецпропиткой на основе дисульфида молибдена Ra = 0,54...0,62 мкм.

3. Худшие показатели по шероховатости  $Ra = 0,68$  мкм и обрабатываемости показал круг из карбида кремния зеленого. На поверхности покрытия вскрылось много пор, образовалось шелушение покрытия, круг быстро «засалился».

Результаты исследования влияния режимов шлифования и характеристик абразивных кругов на шероховатость поверхности образцов, напыленных сплавом ВК-20КС, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты исследования шероховатости образцов с покрытием ВК20-КС, нанесенного методом детонационного напыления

Table 3

*The results of the study of the roughness of samples coated with VK20-KS, applied by detonation spraying*

№ образца	Характеристика инструмента	Режим шлифования			Ra, мкм	Ra среднее, мкм
		V, м/с	S, м/ мин	t, мм/ дв.х		
1	1 350×40×127	30	3-5	0,005	1,1 0,8 1,0	0,91
2	25A F40 L 6 V				0,8 1,1 0,85	
3	50м/с 2кл.				0,75 0,9 0,95	
4	1 350×40×127	30	3-5	0,005	0,7 0,6 0,6	0,74
5	63C F40 M 6 V				0,7 0,62 0,67	
6	35м/с 2 кл				1,1 0,8 0,87	
7	1 350×40×127 25A	30	3-5	0,005	0,9 0,8 1,0	0,87
8	F60 J(пропитан до				0,8 0,93 0,85	
9	K) 7 V 35м/с 2кл.				0,75 0,9 0,95	
10	1A1 350×16×127×5	34	3-5	0,01	0,47 0,53 0,49	0,54
11	ЛКВ40 В151 100 К				0,56 0,59 0,52	
12	V 35м/с				0,56 0,58 0,57	
13	1A1 350×16×127×5	33	3-5	0,01	0,36 0,36 0,39	0,36
14	ЛКВ40 В126 100 К				0,32 0,4 0,37	
15	В2-01 35м/с				0,33 0,33 0,35	

При анализе результатов шлифования покрытия ВК20-КС установлено:

1. Наилучшие результаты по качеству обрабатываемой поверхности  $Ra = 0,36$  мкм и по режущей способности инструмента, получены при применении кругов из эльбора (ЛКВ40) на керамической связке. Однако следует иметь в виду, что процесс профилирования (правки) эльборовых кругов на органической связке также затруднен.

### Выводы

1. Полученные данные подтверждают выводы о наибольшей эффективности применения абразивных кругов из эльбора для шлифования деталей с напыленным износостойким покрытием. Наилучшие результаты получены при обработке эльборовыми кругами напыленных покрытий

2. Удовлетворительные результаты получены при обработке кругом из карбида кремния зеленого  $Ra = 74$  мкм (при этом на поверхности вскрылось много пор, образовалось шелушение покрытия).

3. Круги из электрокорунда белого и электрокорунда белого со специальной пропиткой дисульфида молибдена показали худшие показатели по шероховатости  $Ra = 0,87...0,91$  мкм и по обрабатываемости.

ВК-20КС и ВКНА, как по качеству обрабатываемой поверхности, так и по режущей способности инструмента. Результаты обработки напыленного покрытия кругами из эльбора (ЛКВ40) как на органической, так и на керамической связках, показывают, что при шлифовании обработанная по-

верхность образцов светлая. Это указывает на то, что температура шлифования в зоне резания кругами из эльбора более низкая, чем кругами других характеристик.

2. Применение кругов из электрокорунда белого и кругов из электрокорунда белого со спецпропиткой на основе дисульфида молибдена MoS<sub>2</sub> показало удовлетворительные результаты. Все круги, кроме эльборовых, быстро засаливаются, поверхность образцов более темная, следовательно, при шлифовании

этим кругами температура резания в зоне шлифования более высокая.

4. Применение кругов из карбида кремния зеленого показало наихудшие показатели по обрабатываемости, круги быстро «засаливаются», поверхность образцов имеет самый более темный цвет. Следовательно, при шлифовании покрытия ВКНА кругами из 63С образуются самые высокие температуры в зоне шлифования.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Черноиванов В.И., Лялякин В.П. Организация и технология восстановления деталей машин. 2-е изд., доп. и перераб. М.: ГосНИТИ, 2003. 488 с.
2. Кашчев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение, 1978. 214 с.
3. Suresh Babu, P. (2011). The influence of erodent hardness on the erosion behavior of detonation sprayed WC-12Co coatings. // *Wear*. 270(11-12). – pp. 903–913. doi:10.1016/j.wear.2011.02.019
4. Макаров В.Ф., Юрова Г.П. Шлифование износостойких покрытий // Шлифабразив-2005: сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. (г. Волжский, 12-14 сент. 2005 г.). Волжский, 2005. С. 5-7.
5. Колачев Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учеб-

- ник / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов // М.: МИСИС. 1999. – 416 с.
6. Алексеев Н.С. Эффективность шлифования микропористых покрытий с применением СОЖ. // *Обработка металлов*. 2(67). Новосибирск: НГТУ. 2015. С. 6-16.
7. Киселев Е.С. Теплофизика правки шлифовальных кругов с применением СОЖ. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2001. – 184 с.
8. Золотаревский, В. С. Механические свойства металлов. М.: МИСИС, 1998. – 400 с.
9. Kremen, Z.I. Highly efficient grinding of wear resistant coatings with CBN wheels. // *Industrial Diamond Review*. 67. 2007. – pp. 44-48.
10. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / под ред. Л.В. Худобина. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2007. – 298 с.

## REFERENCES

1. Chernoiivanov VI, Lyalyakin VP. Organization and technology of restoring machine parts. 2nd ed. Moscow: GosNITI; 2003.
2. Kashcheev VN. Processes in the zone of friction contact of metals. Moscow: Mashinostroenie; 1978.
3. Suresh Babu P. The influence of erodent hardness on the erosion behavior of detonation sprayed WC-12Co coatings. *Wear*. 2011;270(11-12):903–913. doi:10.1016/j.wear.2011.02.019
4. Makarov VF, Yurova GP. Grinding of wear-resistant coatings. Collection of Reports of the International Scientific and Technical Conference, Sept 12-14, 2005: Shlifabraziv-2005; Volzhsky; 2005. p. 5-7.
5. Kolachev BA, Elagin VI, Livanov VA. Physical metallurgy and heat treatment of non-ferrous

- metals and alloys: textbook. Moscow: MISIS; 1999.
6. Alekseev NS. Efficiency of grinding of microporous coatings with the use of coolant. *Obrabotka Metallov*. 2015;2(67):6-16.
7. Kiselev ES. Thermophysics of straightening grinding wheels with the use of coolant. Ulyanovsk: Publishing house of UISTU; 2001.
8. Zolotarevsky VS. Mechanical properties of metals. Moscow: MISIS; 1998.
9. Kremen ZI. Highly efficient grinding of wear resistant coatings with CBN wheels. *Industrial Diamond Review*. 2007;67:44-48.
10. Khudobin LV, Unyanin AN. Minimization of grinding wheels salting. Ulyanovsk: Publishing house of UISTU; 2007.

## Информация об авторах:

**Макаров Владимир Федорович** – профессор, доктор техн. наук, зам. зав. кафедрой «Инноваци-

онные технологии машиностроения» Пермского национального исследовательского политехниче-

ского университета, академик РАН, тел. 89124915014.

**Песин Михаил Владимирович** – профессор, доктор техн. наук, декан механико-технологического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета, член-корреспондент РАН, тел. 89124855505.

**Makarov Vladimir Fedorovich** – Professor, Doctor of Engineering, sciences, deputy head Department of the Department of Innovative Engineering Technologies at Perm National Research Polytechnic University, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, phone: 89124915014.

**Pesin Mikhail Vladimirovich** – Professor, Doctor of Engineering, Sciences, Dean of the Faculty of Mechan-

**Сычев Роман Владимирович** – аспирант кафедры «Инновационные технологии машиностроения» Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: makarovv@pstu.ru.

ics and Technology at Perm National Research Polytechnic University, Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, phone: 89124855505.

**Sychev Roman Vladimirovich** – post-graduate student of the Department of Innovative Engineering Technologies at Perm National Research Polytechnic University, e-mail: makarovv@pstu.ru.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**

**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 10.07.2023; одобрена после рецензирования 18.07.2023; принята к публикации 27.07.2023. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 10.07.2023; approved after review on 18.07.2023; accepted for publication on 27.07.2023. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**