

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Макаров В.Ф., Песин М.В., Сычев Р.В. Исследование обрабатываемости шлифованием износостойких покрытий деталей газотурбинных двигателей // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 95–102. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.3.10

Please cite this article in English as:

Makarov V.F., Pesin M.V., Sychev R.V. A study of grinding workability of wear-resistant coatings of gas turbine engine parts. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2023, vol. 25, no. 3, pp. 95-102. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.3.10

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 25, № 3, 2023
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2023.3.10

УДК 621.923.4

В.Ф. Макаров, М.В. Песин, Р.В. Сычев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ШЛИФОВАНИЕМ
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассматривается проблема обрабатываемости шлифованием поверхностей ремонтных деталей газотурбинных двигателей из жаропрочной нержавеющей стали ЭП-517Ш с напыленными высокопрочными износостойкими покрытиями ВКНА и ВК-20КС. Проведены сравнительные исследования 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.

Полученные данные подтверждают выводы о наибольшей эффективности применения абразивных кругов из эльбора для механической обработки деталей с напыленным износостойким покрытием. Наилучшие результаты получены при обработке напыленных покрытий 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 такой обработке обработанная поверхность образцов светлая. Это указывает, что температура шлифования в зоне резания кругами из эльбора более низкая, чем кругами с другими характеристиками.

Применение кругов из электрокорунда белого и кругов из электрокорунда белого со спецпропиткой на основе дисульфида молибдена MoS₂ показало удовлетворительные результаты. Все круги, кроме эльборовых, быстро засаливаются, поверхность образцов более темная, следовательно, при шлифовании этими кругами температура резания в зоне шлифования более высокая.

Применение кругов из карбида кремния зеленого выявило 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.

Ключевые слова: шлифование износостойких покрытий, вольфрам-карбидные износостойкие покрытия, электрокорунд, карбид кремния, эльбор.

V.F. Makarov, M.V. Pesin, R.V. Sychev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

A STUDY OF GRINDING WORKABILITY OF WEAR-RESISTANT COATINGS OF GAS TURBINE ENGINE PARTS

The paper considers the problem of machinability by grinding the surfaces of repair parts of gas turbine engines made of heat-resistant stainless steel EP-517Sh with sprayed high-strength wear-resistant coatings VKNA (Ni3Al) and VK-20KS (W-Co). Comparative studies of the quality parameters of the surface layer – roughness, cracking, burns, peeling of the coating, pore formation, as well as processing temperature when using grinding wheels from white electrocorundum impregnated with molybdenum disulfide and without impregnation, from green silicon carbide and elbor (cubic boron nitride) were carried out. As a result of the study, it was found that the best quality of machining parts coated with VKNA and VK-20KS is achieved when using CBN (elbor) wheels.

The data obtained confirm the conclusions about the highest efficiency of using CBN abrasive wheels for machining parts with a sprayed wear-resistant coating. The best results were obtained when processing sprayed coatings VK-20KS and VKNA, both in terms of the quality of the treated surface and the cutting ability of the tool. The results of processing the sprayed coating with elbor (LKV40) wheels both on organic and ceramic binders show that the treated surface of the samples is light during such processing. This indicates that the grinding temperature in the cutting zone with CBN wheels is lower than with wheels of other characteristics.

The use of circles of white electrocorundum and circles of white electrocorundum with special impregnation based on molybdenum disulfide MoS₂ showed satisfactory results. All wheels, except for elbor ones, quickly become clogged, the surface of the samples is darker, therefore, when grinding with these wheels, the cutting temperature in the grinding zone is higher.

The use of green silicon carbide wheels showed the worst performance in terms of machinability, the wheels are quickly "loaded", the surface of the samples has the darkest color. Consequently, when grinding the VKNA coating with 63C wheels, the highest temperatures are formed in the grinding zone.

Keywords: machining of surfaces, grinding of wear-resistant coatings, tungsten-carbide wear-resistant coatings, electrocorundum, silicon carbide, elbor.

Введение

В настоящее время на АО «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.

В связи с тем, что покрытие имеет более высокие физико-механические свойства (прочность, твердость, износостойкость, хрупкость, относительное удлинение при разогреве и т.д.), чем основной металл детали, механическая обработка данных поверхностей вызывает затруднения [1]. Отмечено, что основными дефектами после обработки этих покрытий, получаемых методом детонационного напыления, являются трещины, сколы и отслоения [2].

Установлено, что одной из основных причин возникновения дефектов является резкий рост температуры в зоне резания из-за неправильно подобранных характеристик абразивного инструмента, нерациональных режимов шлифования и СОЖ. Часто при механической обработке применяются 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.

Для удаления образовавшихся дефектов поверхностного слоя после операции шлифования и последующего восстановления деталей приходится

напыленный слой полностью удалять и повторять как напыление, так и шлифование. Выполнение данных работ существенно повышает трудоемкость выполнения ремонта деталей.

Одними из таких покрытий являются нанесенные методом детонационного напыления покрытия ВКНА (никель-алюминий) и ВК-20КС (вольфрам-кобальт). Оба покрытия обладают высокой твердостью, что делает их стойкими к износу и повреждениям. При шлифовке 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 оптимальных характеристик абразивного круга и режимов шлифования для достижения наиболее качественной обработки поверхностей с напыленным износостойким покрытием.

Экспериментальные исследования проведены совместно с лабораторией резания кафедры «Инновационные технологии машиностроения» механико-технологического факультета Пермского на-

ционального исследовательского политехнического университета и лабораторией шлифования АО «ОДК-Пермские моторы», г. Пермь.

1. Методика экспериментального исследования

В лабораторных условиях проведена отработка характеристики абразивного инструмента и режимов шлифования на образцах с нанесенным покрытием с целью выявления оптимальных характеристик шлифовальных кругов и рациональных режимов шлифования. В экспериментальных исследованиях основным материалом образца являлся 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...0,8 мм. Исследование процесса шлифования проводили на плоскошлифовальном станке 3Г71 с применением 3,5% СОЖ «Велс 1М» [6]. Расход СОЖ не менее 30 л/мин. Съём припуска составил 0,2–0,4 мм. 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

| Режим правки | Величина |
|-----------------------------------|-------------|
| Скорость шлифовального круга, м/с | 30 |
| Скорость правки, м/мин | 0,5 |
| Глубина правки, мм/дв.х | 0,02...0,03 |

Для обеспечения эффективного шлифования износостойких покрытий необходимо чтобы мик-

ротвердость 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 $H_{\mu} = 500\text{--}600$ кгс/мм² (по Бринеллю); (55–60 HRC по Роквеллу). Исходя из заданной микротвердости покрытия, микротвердость абразива должна быть не менее $600 \text{ кгс/мм}^2 \cdot 2 = 1200 \text{ кгс/мм}^2$.

По этому параметру подобраны шлифовальные круги из трех наиболее распространенных материалов: электрокорунд белый (Al_2O_3) (от 2000 до 2100 кгс/мм²), карбид кремния (SiC) (от 3000 до 3200 кгс/мм²) и эльбор (кубический нитрида бора) (от 8000 до 9000 кгс/мм²).

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

В настоящем исследовании рассматриваются вопросы применения кругов из электрокорунда белого, из электрокорунда белого с пропиткой дисульфидом молибдена, из карбида кремния зеленого и из эльбора для обработки деталей с покрытием из более прочных и более износостойких материалов ВКНА и ВК-20КС.

Процесс обработки исследовался с использованием двух типов связей: органической и керамической [10–15]. Изучались показатели шероховатости обработанной поверхности, износ (засаливание) кругов [11–19], режущей способности инструмента, шелушения покрытия, порообразования, трещинообразования, прижогов (цвета обработанной поверхности), а также температуры в зоне шлифования [20–25].

2. Результаты и их обсуждение

Результаты исследования влияния режимов шлифования и характеристик абразивных кругов на шероховатость поверхности образцов, напыленных сплавом ВКНА, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты шлифования образцов из ЭП-517Ш с нанесенным износостойким покрытием

| № 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 | 63C F40 M 6 V 35м/с 2кл. | | | | 0,86 0,67 0,57 | |
| 6 | | | | | 0,63 0,67 0,77 | |
| 7 | 1 350×40×127 25A F60 J (пропитан до К) 7 V 35м/с 2кл. | 30 | 3–5 | 0,005 | 0,58 0,68 0,57 | 0,62 |
| 8 | | | | | 0,64 0,68 0,57 | |
| 9 | | | | | 0,67 0,68 0,50 | |
| 10 | 1A1 350×16×127×5 ЛКВ40 | 34,0 | 3–5 | 0,005 | 0,46 0,46 0,43 | 0,42 |
| 11 | B151 100 К V 35м/с | | | | 0,32 0,40,42 | |
| 12 | | | | | 0,42 0,43 0,48 | |
| 13 | 1A1 350×16×127×5 ЛКВ40 | 33 | 3–5 | 0,005 | 0,27 0,27 0,32 | 0,29 |
| 14 | B126 100 К В2-01 35м/с | | | | 0,30 0,32 0,30 | |
| 15 | | | | | 0,26 0,24 0,28 | |

После проведенных исследований на ОАО «Пермский моторный завод» широко внедрено восстановление поверхностей деталей различными труднообрабатываемыми покрытиями, а использование кругов из СТМ, соответствующих режимов шлифования и СОЖ позволило обеспечить бездефектную обработку восстановленных деталей. Полностью исключена дефектность по прижогам, растрескиванию и отслоению напыленного слоя. За счет устранения перенапыления обрабатываемых деталей снижена себестоимость обработки.

Кроме того, на предприятии при изготовлении деталей ГТД традиционно широко используются закаленные до $HRC > 62 \dots 66$ стали и сплавы, материалы с термохимическим упрочнением поверхностного слоя методом азотирования, цементирования, цианирования и хромирования.

Микротвердость таких поверхностей также соизмерима с микротвердостью традиционно применяемого абразивного инструмента из электрокорунда белого и карбида кремния зеленого.

Поэтому при шлифовании обычными электрокорундовыми и карборундовыми кругами возникают высокие силовые нагрузки, быстрое «засаливание» режущей поверхности инструмента, что, в свою очередь, вызывает резкое усиление теплонапряженности процесса и приводит к появлению прижогов, трещин, сколов, выкрашиваний и др. дефектов.

В то же время проведенные в лаборатории шлифования ОАО «Пермский моторный завод» исследования и существующий опыт обрабатываемости таких поверхностей на ряде отечественных и зарубежных предприятий показывают, что наиболее целесообразно для шлифования этих поверхностей применение кругов из СТМ (эльбор,

гексанит, алмаз) обладающих высокой режущей способностью, высокой стойкостью за счет более высокой прочности зерен круга. В этом случае также обеспечиваются низкие силы и температуры резания при шлифовании.

Применение кругов из СТМ при шлифовании постоянных магнитотвердых материалов типа ЮН14ДК24 позволило повысить производительность труда в 2 раза, а также исключить дефектность деталей по сколам и трещинам.

При шлифовании пружинных сталей типа 50ХФА внедрение кругов из СГА позволило устранить прижоги, а при шлифовании хромированных торцов чугунных уплотнительных колец повысить производительность труда до двух раз. Примеры эффективного использования кругов из СТМ приведены в табл. 3.

Экономические расчеты показали, что, несмотря на высокую стоимость кругов из СТМ по сравнению с кругами из электрокорунда и карбида кремния, применение их наиболее эффективно именно при шлифовании труднообрабатываемых и закаленных сталей, жаропрочных сплавов и твердых напыленных и наплавленных покрытий поверхностей деталей ГТД, так как стабильно обеспечивает высокое качество обрабатываемых поверхностей при существенном росте производительности труда, сокращении расхода инструментов и снижении себестоимости обработки.

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 исследования покрытия ВКНА можно сделать следующие выводы:

Таблица 3

Примеры эффективного применения кругов из СТМ при шлифовании твердых покрытий

| Вид покрытия | Наименование деталей | Материал подложки | Рекомендованные круги | Режимы шлифования | | | | | | Эффективность кругов из СТМ |
|---|---|--|--|---|-----------------|---------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|---|
| | | | | $V_{кр}$, м/с | $V_{д}$, м/мин | $S_{прод}$, мм/мин | $S_{поп}$, мм/дв.ход | $t_{шл}$, мм/дв.ход | $t_{пр}$, мм/мин | |
| ВКНА-детонационное напыление | Втулка цапфа цапфа дефлектор штуцер заслонка др. дет. ГТД круглое и плоское шл. | ЭП698ВД X18H10T BT8 ЭИ698ВД ЭП698 ВД ВЖЛ14 Н ЭИ437 БУВД ЭИ961Ш ВТ3-1 | ЛО, ЛП, ЛКВ 160/125...50/40 СМ1...СМ2 К27 или АС4 160/125...125/100 СМ2...С1 В2-01 | 25–35 | 10–15 | 0,1–0,5 | 2–3 | 0,005–0,03 | 0,05–0,2 | Исключение трещин, прижогов, скалывания, рисок. Повышение стойкости кругов в 10 раз и производительности в 2–3 раза |
| | | | | Режимы правки алмазным карандашом 3908-0092 | | | | | | |
| ВКНА-плазменное напыление | Поршни сфера | 40ХНМА-нар. диаметр ЭИ961Ш-внутр. диаметр | СОЖ – ВЭЛС-1-1,5–3 % 20-30 л/мин | | | | | | | |
| ВК 20-детонационное напыление | Водило редуктора шестерни лопатки вентилятора, кругл. шлифованное | 12Х2Н4А | ЛО, ЛП, ЛКВ | 25–35 | 15–20 | | | 0,003–0,005 | 0,003–0,005 | Исключение трещин |
| | | 12Х2Н4А ВТ3-1 | 125/100 СМ1...СМ2 К СОЖ | 25–35 | 0,2–0,3 | | | 0,01–0,02 | | |
| СНГН-детонационное напыление (Ni + Cr + V + Si)-2мм | Распределители, детали ГТД | 40ХНМА | ЛО250/200...160/125 СМ2...С1 К СОЖ | 25–30 | | 2–3 | | 0,1–0,2 | | Восстановление износостойкого покрытия, увеличение ресурса |
| Cr ₃ C ₂ + NiCr-детонационное напыление | Лопатки турбин (ремонт) | ЖС6УВИ-полки | ЛО100/80...160/125 СМ1...С1 К | 30 | | 1,5–4,5 | | 0,2–0,3 | | Ликвидирован брак до 50 % по трещинам и сколам |
| Хром-гальваника | Валы шестерни втулки кольца сфера крыльчатка | Ст38ХНМ-Ш 20Х13Ш Чугун СЧ 513Л, 12Х2Н4А 40ХНМА АЛ4 | ЛО100/80...160/125 СМ2...С1 К +63С 5 М3 К для Ra=0,2-0,3 | 30–35 | 25–30 | 3–5 0,15–0,25 | 0,3–0,7 шир. круга | 0,03–0,05 | | Исключен брак по скалыванию 10 %, стойкость кругов в 10 раз выше, производительность в 2–4 раза выше |
| Резьбошлифовка закаленных сталей | Кронштейн втулка футорка М24х1.5-6е М8х1.25-6е l=10-104мм | 95Х18Ш Ст45 HRC≥40, 13Х14Н3 В2Р 40ХН2М А ВЖЛ14Н-ВИ | ЛО 63/50 СТ1 8...10 К СОЖ-МР99(60 %)+ И20(40 %) | 30–35 | | 0,1–0,3 | | | | Исключены прижоги, увеличена производительность |

Поставщики: «СТМ – Ильич», Томилино, Белгород, и группа посредников

1. Наилучшие результаты по качеству обрабатываемой поверхности и по режущей способности инструмента получены при применении кругов из эльбора (ЛКВ40) как на органической, так и на керамической связках. Однако процесс профилирования (правки) эльборовых кругов на органической связке затруднен.

2. Хорошие результаты получены при обработке кругами из электрокорунда белого, электро-

корунда белого со специальной пропиткой на основе дисульфида молибдена.

3. Наихудшие показатели по обрабатываемости показал круг из карбида кремния зеленого (вскрылось много пор, на поверхности образовалось шелушение покрытия), круг быстро «засалился».

Результаты исследования обработки образцов с покрытием ВК20-КС приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты обработки образцов с покрытием ВК-20КС, нанесенного методом детонационного напыления

| № 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 | 50 м/с 2 кл. | | | | 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 35 м/с 2 кл | | | | 0,7 0,62 0,67 | |
| 6 | | | | | 1,1 0,8 0,87 | |
| 7 | 1 350×40×127 25A F60 | 30 | 3–5 | 0,005 | 0,9 0,8 1,0 | 0,87 |
| 8 | J(пропитан до K) 7 V | | | | 0,8 0,93 0,85 | |
| 9 | 35 м/с 2 кл. | | | | 0,75 0,9 0,95 | |
| 10 | 1A1 350×16×127×5 ЛКВ40 | 34 | 3–5 | 0,01 | 0,47 0,53 0,49 | 0,54 |
| 11 | B151 100 K V 35 м/с | | | | 0,56 0,59 0,52 | |
| 12 | | | | | 0,56 0,58 0,57 | |
| 13 | 1A1 350×16×127×5 ЛКВ40 | 33 | 3–5 | 0,01 | 0,36 0,36 0,39 | 0,36 |
| 14 | B126 100 K B2-01 35 м/с | | | | 0,32 0,4 0,37 | |
| 15 | | | | | 0,33 0,33 0,35 | |

Анализ результатов исследования покрытия ВК20-КС привел к следующим выводам:

1. Применение абразивных кругов из эльбора (ЛКВ40) как на органической, так и на керамической связках показало наилучшие результаты по качеству обработанной поверхности и по режущей способности инструмента. Однако следует иметь в виду, что процесс профилирования (правки) эльборовых кругов на органической связке затруднен.

2. Обработка кругом из карбида кремния зеленого (вскрыла много пор, на поверхности образовалось шелушение покрытия) это свидетельствует об удовлетворительных результатах обработки.

3. Использование кругов из электрокорунда белого и электрокорунда белого со специальной пропиткой дисульфида молибдена показало наилучшие результаты по обрабатываемости покрытия.

Заключение

1. Полученные данные подтверждают выводы о наибольшей эффективности применения абразивных кругов из эльбора для механической обработки деталей с напыленным износостойким покрытием. Наилучшие результаты получены при обработке напыленных покрытий 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 такой обработке обработанная поверхность образцов светлая. Это указывает, 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 спец-

пропиткой на основе дисульфида молибдена MoS₂ показало удовлетворительные результаты. Все круги, кроме эльборовых, быстро засаливаются, поверхность образцов более темная, следовательно, при шлифовании этими кругами температура резания в зоне шлифования более высокая.

3. 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.

Библиографический список

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. Кашеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 214 с.
3. Suresh Babu P. The influence of erodent hardness on the erosion behavior of detonation sprayed WC-12Co coatings // Wear. 270(11-12). – (2011). – P. 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., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник. – М.: МИСИС, 1999. – 416 с.
6. Алексеев Н.С. Эффективность шлифования микропористых покрытий с применением СОЖ // Обработка металлов. – Новосибирск: НГТУ. 2015. – № 2(67). – 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*. – 2007. – № 67. – P. 44–48.
10. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация закаливания шлифовальных кругов / под ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2007. – 298 с.
11. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. – Пермь, 2006. – 1195 с.
12. Козлов Д.А. ПД-14 создается практически всеми авиадвигателестроителями России [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.aviaport.ru/news/2012/04/16/233024.html> (дата обращения: 15.10.2014).
13. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. – Пермь, 2006. – 1195 с.
14. Нихамкин М.А., Зальцман М.М. Конструкция основных узлов двигателя ПС-90А: учеб. пособие – 2-е изд., испр. и доп. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2002. – 108 с.
15. Макаров В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки труднообрабатываемых материалов. – Пермь: ПНИПУ, 2013. – 359 с.
16. Полетаев В.А., Волков Д.И. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2009. – 272 с.
17. Макаров В.Ф., Туранский Р.А., Григорьева А.В. Повышение точности проходного сечения сопловых лопаток турбин // *Материалы науч.-практ. конф.* – Брянск, 2015. – С. 291–293.
18. Макаров В.Ф., Норин А.О. Автоматизированный расчет величины смещений сопловых лопаток турбины с обеспечением заданного проходного сечения соплового аппарата // *Материалы XV Всерос. НТК «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации-2014» 4–6 июня 2015.* – Пермь: ПНИПУ. – С. 25–29.
19. Макаров В.Ф., Норин А.О., Туранский Р.А. Разработка метода корректирующего управления процессом глубинного шлифования базовых поверхностей сопловых лопаток на многоосевом станке с ЧПУ // *МНТК «Современные высокоэффективные технологии и оборудование в машиностроении (МТЕТ-2016)» 6-8 октября 2016.* – СПб.: СПб. гос. политех. ун-т Петра Великого, 2016. – С. 23–27.
20. Макаров В.Ф., Никитин С.П., Норин А.О. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток // *Научные технологии в машиностроении.* – 2016. – № 5(59). – С. 29–31.
21. Особенности технологического обеспечения проходного сечения лопаток турбин при глубинном многоосевом шлифовании на станке с ЧПУ / В.Ф. Макаров, А.О. Норин, С.П. Никитин, Р.А. Туранский // *Сб.тр. XXIII МНТК «Машиностроение и техносфера XXI века», Т. 2; 12-18 сентября 2016 в г. Севастополь.* – Донецк, 2016. – С. 127–128.
22. Макаров В.Ф., Норин А.О. Автоматизированный расчет величины смещений сопловых лопаток турбины с обеспечением заданного проходного сечения соплового аппарата // *Материалы VIII МНТК «Научные технологии на современном этапе развития машиностроения», 19–21 мая.* – М., МАДИ, 2016.
23. ГП «Ивченко-Прогресс»: Обработка лопаток на профилешлифовальном станке фирмы Mägerle // *Промышленность в фокусе.* – 2013. – № 1.
24. Информация о системе ЧПУ Siemens Sinumerik: портал [Электронный ресурс]. – URL: http://iadt.siemens.ru/products/motors_drives/sinumerik/CNC_controls/840d_sl/ (дата обращения: 20.03.2015).
26. ОАО «Авиадвигатель»: портал [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.avid.ru/> (дата обращения: 20.03.2015).

References

1. Chernouvanov V.I., Lialiakin V.P. Organizatsiia i tekhnologii vosstanovleniia detalei mashin [Organization and technology of restoration of machine parts]. 2nd. Moscow: GosNITI, 2003, 488 p.
2. Kashcheev V.N. Protsessy v zone friktsionnogo kontakta metallov [Processes in the frictional contact zone of metals.]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 214 p.
3. Suresh Babu P. The influence of erodent hardness on the erosion behavior of detonation sprayed WC-12Co coatings. *Wear.*, 2011, 270(11-12), pp. 903–913. DOI: 10.1016/j.wear.2011.02.019
4. Makarov V.F., Iurova G.P. Shlifovanie iznosostoikikh pokrytii [Grinding of wear-resistant coatings]. Shlifabraziv-2005: *sbornik dokladov mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Volzhskii, 12–14 sent. 2005 g.)*. Volzhskii, 2005, pp. 5–7.
5. Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka tsvetnykh metallov i splavov: uchebnik [Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys: textbook]. Moscow: MISIS, 1999, 416 p.
6. Alekseev N.S. Effektivnost' shlifovaniia mikroporistykh pokrytii s primeneniem SOZh [Efficiency of grinding of microporous coatings with the use of coolant]. *Obrabotka metallov*, Novosibirsk: NGTU, 2015, no. 2(67), pp. 6–16.
7. Kiselev E.S. Teplofizika pravki shlifo-val'nykh krugov s primeneniem SOZh [Thermal physics of grinding wheel dressing with coolant application]. Ul'ianovsk: Izdatelstvo UIGTU, 2001, 184 p.
8. Zolotarevskii, V. S. Mekhanicheskie svoistva metallov [Mechanical properties of metals]. Moscow: MISIS, 1998, 400 p.
9. Kremen Z.I. Highly efficient grinding of wear resistant coatings with CBN wheels. *Industrial Diamond Review*, 2007, no. 67, pp. 44–48.
10. Khudobin L.V., Unianin A.N. Minimizatsiia zasalivaniia shlifoval'nykh krugov [Minimization of grinding wheel soiling]. Ed. L.V. Khudobina. Ul'ianovsk: Izdatelstvo UIGTU, 2007, 298 p.
11. Inozemtsev A.A., Sandratskii V.L. Gazoturbinnye dvigateli [Gas turbine engines]. Perm', 2006, 1195 p.
12. Kozlov D.A. PD-14 sozdaetsia prakticheski vsemi aviadvigatelistroiteliami Rossii [PD-14 is created by almost all aircraft engine manufacturers in Russia]. URL: <http://www.aviaport.ru/news/2012/04/16/233024.html> (data available 15.10.2014).
13. Inozemtsev A.A., Sandratskii V.L. Gazoturbinnye dvigateli [Gas turbine engines]. Perm', 2006, 1195 p.

14. Nikhamkin M.A., Zal'tsman M.M. Konstruk-tsiia osnovnykh uzlov dvigatelya PS-90A: uchebnoe posobie [Design of main units of PS-90A engine: textbook]. 2nd. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2002. 108 s.

15. Makarov V.F. Sovremennye metody vysoko-effektivnoi abrazivnoi obrabotki trudnoobrabatyvaemykh materialov [Modern methods of high-performance abrasive machining of difficult-to-machine materials]. Perm': PNIPU, 2013, 359 p.

16. Poletaev V.A., Volkov D.I. Glubinnoe shlifovanie lopatok turbin: biblioteka tekhnologa [Deep grinding of turbine blades: technologist's library]. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 272 p.

17. Makarov V.F., Turanskii R.A., Grigor'eva A.V. Povyshenie tochnosti prokhodnogo secheniia soplovykh lopatok turbin [Increasing the accuracy of turbine nozzle blade cross-sectional accuracy]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konf. Briansk*, 2015, pp. 291–293.

18. Makarov V.F., Norin A.O. Avtomatiziro-vanniy raschet velichiny smeshchenii soplovykh lopatok turbiny s obespecheniem zadannogo prokhodnogo secheniia soploвого аппарата [Automated calculation of displacements of turbine nozzle blades with provision of a given passage section of the nozzle apparatus]. *Materialy XV Vseros. NTK «Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i inovatsii-2014» 4–6 iyunia 2015*. Perm': PNIPU, pp. 25–29.

19. Makarov V.F., Norin A.O., Turanskii R.A. Razrabotka metoda korrektruiushchego upravleniia protsessom glubinnogo shlifovaniia bazovykh poverkhnostei soplovykh lopatok na mnogoosovom stanke s ChPU [Development of the method of corrective control of pro-process of depth grinding of nozzle blade base surfaces on a multi-axis CNC machine]. *MNTK «Sovremennye vysokoeffektivnye tekhnologii i oborudovanie v mashinostroenii (MTET-2016)» 6-8 oktiabria 2016*. Saint-Petersburg, 2016, pp. 23–27.

20. Makarov V.F., Nikitin S.P., Norin A.O. Povyshenie kachestva i proizvoditel'nosti pri pro-fil'nom glubinnom shlifovanii turbinnnykh lopatok [Improvement of quality and productivity at pro-profile depth grinding of turbine blades]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2016, no. 5(59), pp. 29–31.

21. Makarov V.F., Norin A.O., Nikitin S.P., Turanskii R.A. Osobennosti tekhnologicheskogo obespecheniia prokhodnogo secheniia lopatok turbin pri glubinnom mnogoosovom shlifovanii na stanke s ChPU [Peculiarities of technological support of turbine blades passing section at depth multiaxial grinding on CNC machine tool]. *Sbornik trudov XXIII MNTK «Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka», T. 2; 12-18 sentiabria 2016 v g. Sevastopol'*. Donetsk, 2016, pp. 127–128.

22. Makarov V.F., Norin A.O. Avtomatiziro-vanniy raschet velichin smeshchenii soplovykh lopatok turbiny s obespecheniem zadannogo prokhodnogo secheniia soploвого аппарата [Automated calculation of displacement values of turbine nozzle blades with provision of a given passage section of the nozzle apparatus]. *Materialy VIII MNTK «Nauko-emkie tekhnologii na sovremennom etape razvitiia ma-shinostroeniia», 19–21 maia*. Moscow, MADI, 2016.

23. GP «Ivchenko-Progress»: Obrabotka lopatok na profileshlifoval'nom stanke firmy Mägerle [Ivchenko-Progress SE: Blade machining on Mägerle profile grinding machine]. *Promyshlennost' v fokuse*, 2013, no. 1.

24. Informatsiia o sisteme ChPU Siemens Sinumerik: portal [Elektronnyi resurs]. URL: http://iadt.siemens.ru/products/motors_drives/sinumerik/CNC_controls/840d_sl/ (data available 20.03.2015).

25. ОАО «Aviadvigatel'»: portal [JSC Aviadvigatel' portal]. URL: <http://www.avid.ru/> (data available 20.03.2015).

Поступила: 27.06.2023

Одобрена: 30.08.2023

Принята к публикации: 01.09.2023

Об авторе

Макаров Владимир Федорович (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения» механико-технологического факультета ФГБОУ ВПО ПНИПУ (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: makarovv@pstu.ru).

Сычев Роман Владимирович (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры ИТМ механико-технологического факультета ПНИПУ (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29).

Песин Михаил Владимирович (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор, декан механико-технологического факультета ПНИПУ (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: m.pesin@mail.ru).

About the author

Vladimir F. Makarov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor department of «Innovation technologies in mechanical engineering», Faculty of Mechanics and Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: makarovv@pstu.ru).

Mikhail V. Pesin (Perm, Russian Federation) – Dr. Sci. Tech., the professor, The dean of mechanical technological faculty, Faculty of Mechanics and Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomol av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: m.pesin@mail.ru).

Roman V. Sychev (Perm, Russian Federation) – Post-graduate student of the Department of «Innovation technologies in mechanical engineering», Faculty of Mechanics and Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomol av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: crv10010@gmail.com).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Макаров В.Ф. – идея, разработка методики исследования, научное редактирование текста. Песин М.В. – обработка экспериментальных данных, поиск и анализ литературных источников, редактирование материала. Сычев Р.В. – сбор и обработка материала, проведение экспериментальных работ, написание текста статьи.