

5. Sadov V.V., Sorokin S.A. Issledovanie traektorii dvizheniia zernovogo materiala pri skhode s lopatok razlichnoi krivizny // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2019. – No. 7 (177). – S. 152-158.

6. Bosoi, B.S. Teoriia, konstruktsiia i raschet selskokhoziaistvennykh mashin / B.S. Bosoi, O.V. Verniaev, I.I. Smirnov. – Moskva: Mashinostroenie, 1978. – 567 s.

7. Dolgov, I.A. Uborochnye selskokhoziaistvennye mashiny / I.A. Dolgov. – Krasnoiar. sk: Izd-vo KrasGAU, 2004. – 725 s.

8. Vishniakov, A.S. Obosnovanie tekhnologicheskikh parametrov rabochikh organov zernoochistitelnykh mashin: ucheb.posobie / A.S. Vishniakov, M.V. Boginia, O.V. Lisunov; Krasnoiar. gos. agrar. un-t. – Krasnoiar. sk, 2017. – 100 s.



УДК 621.922.02

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-214-8-95-101

Н.С. Алексеев, А.С. Шевченко, С.В. Иванов

N.S. Alekseev, A.S. Shevchenko, S.V. Ivanov

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШЛИФОВАНИЯ МИКРОПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ ПО КРИТЕРИЮ ШЕРОХОВАТОСТИ

### DETERMINING OPTIMAL PARAMETERS FOR GRINDING OF MICROPOROUS COATINGS IN TERMS OF ROUGHNESS INDEX

**Ключевые слова:** микропористые покрытия, абразивная обработка, шлифовальный круг, шероховатость, режимы резания, оптимизация, математическая модель.

При круглом наружном шлифовании шеек валов автомобилей, тракторов, сельскохозяйственной и дорожно-строительной техники, восстановленных различными способами газотермического напыления, возникают проблемы, связанные с интенсивным засаливанием и низкой стойкостью кругов, а также резким ухудшением шероховатости обработанной поверхности. Основная причина этих тенденций кроется в особенностях физико-механических свойств покрытий – высокая пористость, наличие оксидов и шлаков, повышенная адгезионная и химическая активность и т.д. В статье отмечается, что одним из направлений повышения эффективности врезного шлифования покрытий и достижения высоких технико-экономических показателей является оптимизация абразивной обработки. В работе приведены результаты оптимизации процесса круглого врез-

ного шлифования микропористых покрытий на никелевой основе. Сформирован комплекс параметров, необходимых для решения задачи оптимизации шлифовальной операции по критерию шероховатости. Разработана система технических ограничений для оптимизации режимов резания и элементов характеристики абразивных кругов. Рассмотрены вопросы достижения минимальной шероховатости обработанных поверхностей при обеспечении заданных технологических параметров шлифования. Разработана математическая модель процесса абразивной обработки как неотъемлемая часть оптимизационной задачи. Оптимизация целевой функции (шероховатости поверхности) осуществлялась при помощи метода линейного программирования. Определены оптимальные марки по зернистости и твердости шлифовальных кругов, обеспечивающие наименьшую шероховатость обработанной поверхности. Предлагаемая методика может использоваться для определения оптимальных параметров при шлифовании микропористых покрытий различных восстанавливаемых деталей, например, шеек коленчатых

и распределительных валов ДВС. Учёт совокупности факторов, влияющих на процесс, позволяет надёжно получать минимальную шероховатость при врезном шлифовании микропористых газотермических покрытий.

**Keywords:** *microporous coatings, abrasive treatment, grinding wheel, roughness, cutting modes, optimization, mathematical model.*

During external cylindrical grinding of shaft journals of automobiles, tractors, agricultural and road construction equipment restored by various methods of thermal sputtering, there appear problems associated with intense clogging and low durability of grinding wheels as well as a dramatic deterioration in the roughness of the treated surface. The main reason for these trends lies in the nature of physical and mechanical properties of the coating - high porosity, the presence of oxides and slags, increased adhesive and chemical activity, etc. The paper points out that one of the ways to improve the efficiency of plunge grinding of coatings so as to achieve high technical and economic indices is the optimization of abrasive treatment. The paper

discusses the results of optimizing the process of cylindrical plunge grinding of microporous nickel-based coatings. A set of parameters necessary for solving the problem of optimizing a grinding operation related to the roughness index was formed. A system of technical restrictions was developed to optimize cutting conditions and characteristics of abrasive wheels. The paper deals with the issues of achieving the minimum roughness of the treated surfaces while providing the specified technological parameters of grinding. A mathematical model of the abrasive treatment process was also developed as an integral part of the optimization problem. The optimization of the objective function (surface roughness) was carried out using the linear programming method. The optimal grades for the grain size and hardness of the grinding wheels which provided the lowest roughness of a machined surface were determined. The proposed method may be used to determine the optimal parameters for grinding microporous coatings of various parts to be restored, for example, crankshaft and camshaft journals of internal combustion engines. Taking into account a set of factors influencing the process makes it possible to reliably obtain the minimum roughness during plunge grinding of microporous gas-thermal coatings.

**Алексеев Николай Сергеевич**, к.т.н., доцент, Рубцовский индустриальный институт (филиал), ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Рубцовск, Алтайский край, Российская Федерация, e-mail: tm@rubinst.ru.

**Шевченко Алеся Сергеевна**, к.ф.-м.н., доцент, доцент, Рубцовский индустриальный институт (филиал), ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Рубцовск, Алтайский край, Российская Федерация, e-mail: ibragimova.a.s.@mail.ru.

**Иванов Сергей Владимирович**, инженер, доцент, Рубцовский индустриальный институт (филиал), ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Рубцовск, Алтайский край, Российская Федерация, e-mail: vitsal\_72@mail.ru.

**Alekseev Nikolay Sergeevich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Rubtsovsk Industrial Institute (Branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Rubtsovsk, Russian Federation, e-mail: tm@rubinst.ru.

**Shevchenko Alesya Sergeevna**, Cand. Phys.-Math. Sci., Assoc. Prof., Rubtsovsk Industrial Institute (Branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Rubtsovsk, Russian Federation, e-mail: ibragimova.a.s.@mail.ru.

**Ivanov Sergey Vladimirovich**, Engineer, Rubtsovsk Industrial Institute (Branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Rubtsovsk, Russian Federation, e-mail: vitsal\_72@mail.ru.

### Введение

В повышении эффективности ремонта тракторов, автомобилей и сельскохозяйственной техники большое значение имеет вопрос качественного восстановления изношенных деталей [1, 2].

Наибольшее распространение в последние годы при восстановлении деталей машин получили различные способы газотермического напыления микропористых покрытий на никелевой основе (далее просто покрытий) с твёрдостью до 55HRC: электродуговая металлизация, газопламенное, детонационное и плазменное напыление.

Для наращивания покрытий чаще всего используются шейки коленчатых и распределительных валов автотракторных двигателей [2]. Эти шейки имеют малую длину, а поэтому их размерная обработка обычно производится методом врезного шлифования, при котором, как правило, окончательно формируется качество обрабатываемой поверхности. Одной из характеристик качества шлифуемой поверхности является шероховатость.

Опыт обработки покрытий показал, что применение к таким материалам значений режимов резания для сталей, выбранных по Общемашиностроительным нормативам [3], приводит к ин-

тенсивному засаливанию и низкой стойкости шлифовальных кругов (ШК), а также резкому ухудшению шероховатости обработанной поверхности. Это объясняется различиями в структурах стали и покрытий [2].

Основными факторами, определяющими шероховатость, являются режимы обработки и характеристика ШК (материал абразива, зернистость, твердость и т.д.) [4]. Следовательно, для получения заданных значений шероховатости необходимо подобрать такие режимы и характеристику инструмента, которые бы гарантировали получение требуемых значений высоты микронеровностей. В связи с этим изыскание оптимальных технологических факторов при шлифовании покрытий, обеспечивающих высокое качество обработанной поверхности, является актуальной задачей.

**Цель** исследования – определение оптимальных элементов режима резания и характеристики ШК при обработке газотермических микропористых покрытий на никелевой основе, обеспечивающих наименьшую высоту микронеровностей шлифованной поверхности.

#### Методика исследований

Неотъемлемой частью задачи оптимизации является математическая модель процесса абразивной обработки [4, 5]. Для разработки математической модели необходимо прежде всего выбрать параметры абразивного инструмента (АИ) и режимы резания, а также показатели работоспособности ШК. Для круглого врезного шлифования режимы резания и характеристика кругов определяются следующими параметрами (технологическими факторами) [4]: скоростью резания  $V_p$ , м/с; скоростью вращения детали  $V_d$ , м/мин.; скоростью радиальной подачи  $S_{рад}$ , мм/мин.; размером зернистости абразивного инструмента  $N_z$ , мкм и степенью его твердости  $N_T$ , оцениваемой глубиной лунки, мм.

Исходя из специфики процесса врезного шлифования был разработан [6-9] комплекс показателей работоспособности АИ, включающий в себя: стойкость кругов  $T$ , мин.; удельную производительность (отношение объема сошлифованного металла к объему израсходованного абразива)  $q$ , мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>; радиальную  $P_y$  и тангенциальную  $P_z$  составляющие силы резания, Н; коэффициент режущей способности  $K_p$ ,

мм<sup>3</sup>/мин·Н; удельную мощность шлифования  $N_{уд}$ , Вт·мин/мм<sup>3</sup>.

В общем случае задача оптимизации шлифовальной операции записывается в виде целевой функции и системы ограничений, накладываемых на режимы резания и характеристику кругов требованиями, предъявляемыми к шероховатости шлифуемых поверхностей, и условиями выполнения операций.

В качестве оценочной (целевой) функции при определении оптимальных элементов характеристики кругов и режима резания принята шероховатость (высота микронеровностей) по параметру  $R_a$ , мкм.

Для решения задачи оптимизации требовалось определить математическое выражение для целевой функции, а также установить зависимости, отражающие влияние технологических факторов на показатели работоспособности ШК (ограничения задачи).

Из-за отсутствия в технической литературе подробных сведений по физико-механическим свойствам покрытий, таких как модуль упругости, предел прочности при растяжении и др., аналитически определить значения величин  $T$ ,  $q$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ,  $K_p$ ,  $N_{уд}$ ,  $R_a$  в зависимости от технологических факторов не представлялось возможным, поэтому все указанные показатели работоспособности ШК определялись экспериментально.

Для установления этих зависимостей был спланирован и реализован дробный факторный эксперимент (ДФЭ) по плану  $2^{5-2}$  [6-9]. При реализации ДФЭ диапазоны варьирования переменных факторов устанавливались экспериментально, а также с учётом известных рекомендаций по шлифованию компактных материалов [4].

Эксперименты проводились при круглом наружном врезном шлифовании плазменно-напыленного покрытия из никель-алюминиевого порошка ПВ-Н85Ю15. Полученное покрытие имело следующий химический состав, мас. %: Ni – 55,7; Al – 15,3; O – 16,0; C – 13,0; твердость – 25-30 HRC; пористость – 8-10%.

Образцы с этими покрытиями были изготовлены в виде втулок с наружным диаметром 60 и высотой 32 мм. Длительность каждого опыта равнялась периоду стойкости круга. В качестве критерия стойкости ШК принято время обработки до появления вибраций, вызванных увеличением силы  $P_y$  на 30-40% по сравнению с силой

при относительно стабильном периоде шлифования.

Во всех экспериментах применялись ШК из белого электрокорунда марки 24А 6-й структуры на керамической связке. Высокие режущие свойства этих кругов были выявлены при проведении предварительных опытов. Более подробно методика проведения данных экспериментов изложена в работах [6-9].

### Результаты и их обсуждение

В результате реализации ДФЭ типа 2<sup>5-2</sup> были получены [6-9] эмпирические зависимости шероховатости поверхности Ra (целевой функции) и показателей режущей способности ШК ( $T$ ,  $q$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ,  $K_p$ ,  $N_{y\partial}$ ) от режима шлифования ( $V_p$ ,  $V_{\partial}$ ,  $S_{рад}$ ) и элементов характеристики кругов ( $N_3$ ,  $N_T$ ), которые в совокупности и составили систему линейных уравнений:

$$Ra = 0,28 - 0,5 \cdot 10^{-2} V_p + 0,34 S_{рад} + 0,1 \cdot 10^{-3} N_3; \quad (1)$$

$$T = 4,24 - 0,03 V_p + 0,01 V_{\partial} - 8,72 S_{рад} - 0,4 \cdot 10^{-3} N_3 + 0,31 N_T; \quad (2)$$

$$q = 5,82 - 0,03 V_p + 0,01 V_{\partial} - 0,5 \cdot 10^{-2} N_3 + 0,14 N_m; \quad (3)$$

$$P_y = 3,44 - 0,75 V_{\partial} + 763,02 S_{рад} - 0,04 N_3; \quad (4)$$

$$P_z = 45,71 - 0,88 V_p + 442,55 S_{рад} - 6,12 N_m; \quad (5)$$

$$K_p = 24,31 - 0,23 V_p + 0,18 V_{\partial} - 67,4 S_{рад} + 2,34 N_T; \quad (6)$$

$$N_{y\partial} = 13,19 + 0,72 V_p - 0,15 V_{\partial} - 0,12 N_3. \quad (7)$$

Зависимости (1)-(7) довольно просты и могут использоваться в практике процесса шлифования при определении оптимальных условий обработки.

Разработанная система линейных уравнений (1)-(7) применялась для установления оптимальных параметров круглого врезного шлифования покрытий с учётом требуемых технических ограничений №: 1-16, обоснование числовых значений которых приведено ниже.

**Ограничение 1.** Связано с максимально достижимой стойкостью абразивного инструмента  $T_{max}$ . Требовалось выполнение условия  $T \geq T_{max}$ . В данных технологических условиях экспериментально установлено, что  $T_{max}=4,0$  мин. [7].

**Ограничение 2.** Связано с достижением приемлемых технико-экономических показателей шлифования. Требуется выполнение условия  $q \geq q_{доп}$ . Экспериментально установлено [7], что приемлемой удельной производительностью считается величина  $q_{доп} = 4,5$  мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>.

**Ограничение 3.** Связано с деформацией технологической системы, её влиянием на фактический съём металла и погрешность обработки. В данных исследованиях требовалось выполнение условия  $P_y \leq P_{y_{доп}}$ . Эмпирическим путём установлено [8], что предельно допустимое значение радиальной составляющей силы резания  $P_{y_{доп}} = 130$  Н.

**Ограничение 4.** Связано с предельно допустимой тангенциальной составляющей силы резания  $P_{z_{доп}}$ . Требуется выполнение условия  $P_z \leq P_{z_{доп}}$ . Экспериментально установлено [8], что значение  $P_{z_{доп}} = 50$  Н.

**Ограничение 5.** Связано с достижением приемлемой режущей способности ШК. Требуется выполнение условия  $K_p \geq K_{p_{доп}}$ . Экспериментально удалось установить [9], что приемлемым значением коэффициента режущей способности считается величина  $K_{p_{доп}} = 20$  мм<sup>3</sup>/мин·Н.

**Ограничение 6.** Связано с обеспечением минимальных энергозатрат на процесс шлифования исследуемого покрытия. Требовалось выполнить условие  $N_{y\partial} \leq N_{y\partial_{доп}}$ . Экспериментами установлено [9], что приемлемой удельной мощностью шлифования можно считать  $N_{y\partial_{доп}} = 30$  Вт·мин/мм<sup>3</sup>.

**Ограничения 7, 8.** Связаны с обеспечением максимальной  $V_{p_{max}}$  и минимальной  $V_{p_{min}}$  скоростей резания на круглошлифовальном станке.

Требуется выполнение условий  $V_p \leq V_{p_{max}}$  и  $V_p \geq V_{p_{min}}$ . В наших исследованиях принимались максимальная и минимальная скорости резания, равные  $V_{p_{max}} = 50$  м/с и  $V_{p_{min}} = 10$  м/с.

**Ограничения 9, 10.** Связаны с обеспечением максимальной  $V_{\partial_{max}}$  и минимальной  $V_{\partial_{min}}$  скоростей вращения детали. Требуется выполнение условий  $V_{\partial} \leq V_{\partial_{max}}$  и  $V_{\partial} \geq V_{\partial_{min}}$ . Наши исследования проводились при максимальной и минимальной скоростях вращения детали, равных  $V_{\partial_{max}} = 40$  м/мин. и  $V_{\partial_{min}} = 10$  м/мин.

**Ограничения 11, 12.** Связаны с обеспечением максимальной и минимальной скоростей ра-

диальной подачи. Требовалось обеспечить условия  $S_{рад} \leq S_{рад_{max}}$  и  $S_{рад} \geq S_{рад_{min}}$ . В наших опытах принимались максимальная и минимальная скорости радиальной подачи, равные  $S_{рад_{max}} = 0,24$  мм/мин. и  $S_{рад_{min}} = 0,12$  мм/мин.

**Ограничения 13, 14.** Связаны с обеспечением максимального  $N_{з_{max}}$  и минимального  $N_{з_{min}}$  размера зернистости ШК. Требуется выполнение условий  $N_з \leq N_{з_{max}}$  и  $N_з \geq N_{з_{min}}$ . В наших исследованиях принималась максимальная и минимальная зернистость ШК, равная  $N_{з_{max}} = 500$  мкм и  $N_{з_{min}} = 160$  мкм.

**Ограничения 15, 16.** Связаны с обеспечением максимальной и минимальной степени твердости ШК, выраженной глубиной лунки. Требовалось обеспечить условия  $N_T \leq N_{T_{max}}$  и  $N_T \geq N_{T_{min}}$ . В наших исследованиях принимались максимальная и минимальная глубина лунки, равная  $N_{T_{max}} = 4,55$  мм и  $N_{T_{min}} = 1,75$  мм.

Полученная система уравнений (2-7), технические ограничения (С) и целевая функция (Z) при  $Ra \rightarrow min$  (1) в совокупности и составят математическую модель для установления оптимальных параметров режимов резания и харак-

теристики кругов методом линейного программирования:

$$\begin{aligned} & 4,24 - 0,03V_p + 0,01V_d - 8,72S_{рад} - 0,4 \cdot 10^{-3}N_з + \\ & \quad + 0,31N_T \geq 4,0; \\ & 5,82 - 0,03V_p + 0,01V_d - 0,5 \cdot 10^{-2}N_з + 0,14N_T \geq 4,5; \\ & 3,44 - 0,75V_d + 763,02S_{рад} - 0,04N_з \leq 130; \\ & 45,71 - 0,88V_p + 442,55S_{рад} - 6,12N_T \leq 50; \\ & 24,31 - 0,23V_p + 0,18V_d - 67,4S_{рад} + 2,34N_T \geq 20; \\ & 13,19 + 0,72V_p - 0,15V_d - 0,12N_з \leq 30. \\ & V_p \leq 50, V_p \geq 10; \\ & V_d \leq 40, V_d \geq 10; \\ & S_{рад} \leq 0,24, S_{рад} \geq 0,12; \\ & N_з \leq 500, N_з \geq 160; \\ & N_T \leq 4,55, N_T \geq 1,75. \end{aligned}$$

$$Z = 0,28 - 0,5 \cdot 10^{-2}V_p + 0,34S_{рад} + 0,1 \cdot 10^{-3}N_з \rightarrow min.$$

Поиск оптимального решения задачи был найден на этой модели с помощью системы компьютерной алгебры (математического пакета) Maple [10].

Для этого действуем по следующему алгоритму:

1. Подключаем пакет *simplex*, предназначенный для решения задач оптимизации:
  - > *restart, with(simplex)* ;
2. Задаем целевую функцию:

$$\begin{aligned} & > Z := 0.28 - evalf(0.5 \cdot 10^{-2}, 1) \cdot V[p] + 0.34 \cdot S[рад] + evalf(0.1 \cdot 10^{-3}, 1) \cdot N[z]; \\ & \quad Z := 0.28 - 0.005 V_p + 0.34 S_{рад} + 0.0001 N_з \end{aligned}$$

3. Задаем систему ограничений:

$$\begin{aligned} & > C := \{4.24 - 0.03 \cdot V[p] + 0.01 \cdot V[d] - 8.72 \cdot S[рад] - 0.4 \cdot 10^{-3} \cdot N[z] + 0.31 \\ & \quad \cdot N[T] \geq 4.0, 5.82 - 0.03 \cdot V[p] + 0.01 \cdot V[d] - 0.5 \cdot 10^{-2} \cdot N[z] + 0.14 \cdot N[T] \\ & \quad \geq 4.5, 3.44 - 0.75 \cdot V[d] + 763.02 \cdot S[рад] - 0.04 \cdot N[z] \leq 130, 45.71 \\ & \quad - 0.88 \cdot V[p] + 442.55 \cdot S[рад] - 6.12 \cdot N[T] \leq 50, 24.31 - 0.23 \cdot V[p] + 0.18 \\ & \quad \cdot V[d] - 67.4 \cdot S[рад] + 2.34 \cdot N[T] \geq 20, 13.19 + 0.72 \cdot V[p] - 0.15 \cdot V[d] \\ & \quad - 0.12 \cdot N[z] \leq 30, V[p] \geq 10, V[p] \leq 50, V[d] \leq 40, V[d] \geq 10, S[рад] \\ & \quad \leq 0.24, S[рад] \geq 0.12, N[z] \leq 500, N[z] \geq 160, N[T] \leq 4.55, N[T] \geq 1.75 \}; \end{aligned}$$

4. Находим оптимальное решение с помощью функции *minimize*:

$$\begin{aligned} & > X := minimize(Z, C, NONNEGATIVE) : evalf(X, 3); \\ & \quad \{N_T = 4.55, N_з = 160., S_{рад} = 0.120, V_d = 40.0, V_p = 31.3\} \end{aligned}$$

5. Находим минимальное значение функции Z в найденных оптимальных точках:

$$\begin{aligned} & > Z[\mathbf{min}] := evalf(subs(X, Z), 2); \\ & \quad Z_{\mathbf{min}} := 0.18 \end{aligned}$$

Результаты расчётов представлены в таблице.

## Результаты расчётов

Скорость резания $V_{P_{онн}}$ , м/с	Скорость вращения детали $V_{\omega_{онн}}$ , м/мин.	Скорость радиальной подачи $S_{рад_{онн}}$ , мм/мин.	Размер зернистости $N_{\varepsilon_{онн}}$ , мкм	Степень твердости $N_{T_{онн}}$ , мм
31,3	40	0,12	160	4,55

При шлифовании покрытий на оптимальных параметрах, приведённых в таблице, можно достигать минимальной шероховатости шлифованных поверхностей  $Ra_{min} = 0,18$  мкм, что соответствует техническим требованиям, предъявляемым к качеству поверхностного слоя коренных и шатунных шеек коленчатых валов автотракторных двигателей.

Размеру зернистости, равной 160 мкм по ГОСТ Р 52381-2005, соответствует обозначение F90, а степени твёрдости с глубиной лунки, равной 4,55 мм по ГОСТ Р 52587-2006, – средняя мягкая твёрдость с обозначением L.

## Выводы

1. При абразивной обработке газотермических покрытий на никелевой основе с твёрдостью до HRC 55 для обеспечения минимальной шероховатости обработанной поверхности следует применять шлифовальный круг 6-й структуры на керамической связке (V) с характеристикой 24AF90L6V.

2. С целью снижения высоты микронеровностей шлифованной поверхности целесообразно рекомендовать ремонтному производству изменить режимы резания и характеристику кругов на операциях действующего производства в соответствии с таблицей.

3. Полученные эмпирические зависимости (1-7) показателей процесса шлифования покрытий от зернистости и твёрдости круга и элементов режима резания можно рекомендовать для оптимального управления процессом шлифования микропористых покрытий на никелевой основе.

## Библиографический список

1. Иванов, В. П. Технология и оборудование восстановления деталей машин: учебник / В. П. Иванов. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 458 с. – Текст: непосредственный.
2. Черноиванов, В. И. Организация и технология восстановления деталей машин / В. И. Черноиванов, В. П. Лялякин. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва: ГОСНИТИ, 2003. – 488 с. – Текст: непосредственный.
3. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках: в 3 частях. – Москва: ЦБНТ, 1978. – Ч. 3. – С. 105-360. – Текст: непосредственный.
4. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / под редакцией А. Н. Резникова. – Москва: Машиностроение, 1977. – 392 с. – Текст: непосредственный.
5. Гордеев, А. В. Оптимизация характеристик шлифовальных кругов на базе математической модели / А. В. Гордеев, Н. А. Костин, Д.В. Вострокнутов. – Текст: непосредственный // Автоматизация технологических процессов и производственный контроль: сборник докладов Международной научно-технической конференции (г. Тольятти, 23-25 мая 2005 г.). – Тольятти: ТолГУ, 2006. – Ч. 1. – С. 127.
6. Шероховатость поверхности при шлифовании микропористого покрытия / Н. С. Алексеев, А. В. Шашок, В. А. Капорин, С. В. Иванов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2019. – № 9. – С. 44-48.

7. Влияние условий обработки на эффективность шлифования микропористого покрытия / Н. С. Алексеев, А. В. Шашок, В. А. Капорин, С. В. Иванов. – Текст: непосредственный // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2019. – № 2. – С. 89-94.

8. Иванов, С. В. Влияние режимов шлифования и характеристик абразивного инструмента на составляющие силы резания микропористого покрытия восстановленной детали / С. В. Иванов, Н. С. Алексеев, В. А. Капорин. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 9 (179). – С. 149-156.

9. Алексеев, Н. С. Влияние технологических факторов на режущую способность кругов и энергозатраты при шлифовании микропористого покрытия / Н. С. Алексеев, В. А. Капорин, С. В. Иванов. – Текст: непосредственный // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2020. – № 4 (84). – С. 132-137.

10. Шевченко, А. С. Использование систем компьютерной алгебры для повышения эффективности образовательного процесса при изучении математических дисциплин / А.С. Шевченко. – Текст: непосредственный // Математики – Алтайскому краю: сборник трудов Всероссийской конференции по математике. – Барнаул: Изд-во Алтайского государственного университета, 2017. – С. 287-291.

### References

1. Ivanov V.P. Tekhnologiya i oborudovanie vosstanovleniya detalei mashin: uchebnik / V.P. Ivanov. – Minsk: Izd-vo Tekhnoperspektiva, 2007. – 458 s.

2. Chernouvanov V.I., Organizatsiya i tekhnologiya vosstanovleniya detalei mashin / V.P. Lialiakin. – 2-e izd., dop. i pererab. – Moskva: GOSNITI, 2003. – 488 s.

3. Obshchemashinostroitelnye normativy rezhimov rezaniia dlia tekhnicheskogo normirovaniia rabot na metallovezhushchikh stankakh. V 3 chas-

tiakh. Chast 3. – Moskva: TsBNT, 1978. – S. 105-360.

4. Abrzivnaia i almaznaia obrabotka materialov. Spravochnik / pod red. A.N. Reznikova. – Moskva: Mashinostroenie, 1977. – 392 s.

5. Gordeev A.V. Optimizatsiya kharakteristik shlifovalnykh krugov na baze matematicheskoi modeli / A.V. Gordeev, N.A. Kostin, D.V. Vostroknu-tov // Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstvennyi kontrol: Sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Toliatti, 23-25 maia 2005 g. Ch.1. – Toliatti: TolGU, 2006. – S. 127.

6. Alekseev N.S. Sherokhovatost poverkhnosti pri shlifovanii mikroporistogo pokrytiia / N.S. Alekseev, A.V. Shashok, V.A. Kaparin, S. V. Ivanov // Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya. – 2019. – No. 9. – S. 44-48.

7. Alekseev N.S. Vliianie uslovii obrabotki na effektivnost shlifovaniia mikroporistogo pokrytiia / N.S. Alekseev, A.V. Shashok, V.A. Kaparin, S. V. Ivanov // Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2019. – No. 2. – S. 89-94.

8. Ivanov S.V. Vliianie rezhimov shlifovaniia i kharakteristik abrazivnogo instrumenta na sostavliaiushchie sily rezaniia mikroporistogo pokrytiia vosstanovlennoi detali / S.V. Ivanov, N.S. Alekseev, V.A. Kaparin // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2019. – No. 9 (179). – S. 149-156.

9. Alekseev N.S. Vliianie tekhnologicheskikh faktorov na rezhushchuiu sposobnost krugov i energozatraty pri shlifovanii mikroporistogo pokrytiia / N.S. Alekseev, V.A. Kaparin, S.V. Ivanov // Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2020. – No. 4 (84). – S. 132-137.

10. Shevchenko A.S. Ispolzovaniia sistem kompiuternoi algebry dlia povysheniia effektivnosti obrazovatel'nogo protsessa pri izuchenii matematicheskikh distsiplin / A.S. Shevchenko // Sbornik trudov Vserossiiskoi konferentsii po matematike «Matematiki – Altaiskomu kraiu». – Barnaul: Izd-vo Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta, 2017. – S. 287-291.

