

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА УПРАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЕМ ОРИЕНТИРОВАННЫХ АБРАЗИВСОДЕРЖАЩИХ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЭЛАСТИЧНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ

А. С. Кириенко¹, С. Э. Завистовский², В. Э. Завистовский³

¹ К. т. н., доцент кафедры технологии и методики преподавания

УО «Полоцкий государственный университет имени Ефросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: a.kirienko@psu.by

² К. т. н., доцент, доцент кафедры технологии и методики преподавания

УО «Полоцкий государственный университет имени Ефросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: s.zavistovsky@psu.by

³ К. т. н., доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта

УО «Полоцкий государственный университет имени Ефросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: v.zavistovsky@psu.by

Реферат

Авторами статьи представлены результаты теоретических исследований разработки математического аппарата получения ленточного шлифовального инструмента с управляемым ориентированием абразивных зерен в электростатическом поле, что позволяет повысить производительность отделочной обработки поверхностей деталей машин. В статье также приводятся результаты исследований, направленных на определение оптимального изменения угла ориентирования зерен электрокорунда 14А в рабочем слое на 120–140° относительно тканевой основы, что способствует повышению режущей способности и стойкости инструмента в 1,3–1,5 раза, в сравнении с известными однослойными шлифовальными инструментами на гибкой основе. Это решает важные для промышленного производства задачи по снижению материалоемкости продукции и повышению эффективности металлообработки.

Ключевые слова: шлифовальный инструмент, поверхностный слой, ориентированность зерен абразива, электростатическое поле, производительность.

THEORY AND PRACTICE OF CONTROL FOR THE FORMATION OF ORIENTED ABRASIVES CONTAINING WORKING SURFACES IN ELASTIC GRINDING TOOLS

A. S. Kiryienka, S. E. Zavistovsky, V. E. Zavistovsky

Abstract

The authors of the article present the results of theoretical studies on the development of a mathematical apparatus for obtaining a belt grinding tool with controlled orientation of abrasive grains in an electrostatic field, which makes it possible to increase the productivity of finishing surface treatment of machine parts. The article also presents the results of studies aimed at determining the optimal change in the grain orientation angle of electrocorundum 14A in the working layer by 120–140° relative to the fabric base, which contributes to an increase in cutting ability and tool life by 1.3–1.5 times, in comparison with known single-layer grinding tools on a flexible basis. This solves the tasks that are important for industrial production in terms of reducing the material consumption of products and increasing the efficiency of metalworking.

Keywords: grinding tool, surface layer, orientation of abrasive grains, electrostatic field, productivity.

Введение

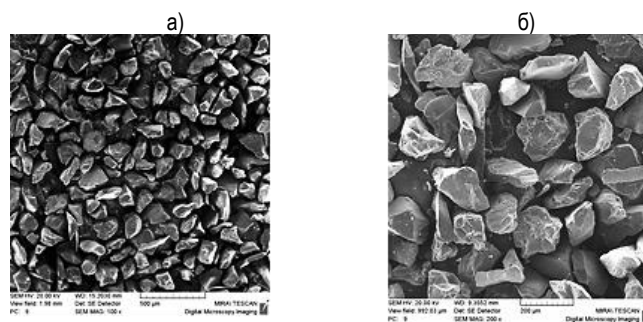
В настоящее время наибольший интерес в производственной деятельности для членов Всемирной организации безопасности абразивных материалов OSA и Европейской федерации производителей абразивных товаров (FEPA) представляет возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик шлифовальных инструментов на стадии проектирования и достижения необходимых параметров при изготовлении и последующей эксплуатации [1].

Для получения высоких показателей производительности отделочной обработки необходимо стабилизировать условия резания в контакте поверхности детали и зерна абразива. Рационально ориентированные зерна абразива обладают повышенной режущей способностью, поскольку резание материала происходит по изученным законам лезвийной обработки. Для решения этой задачи возникла потребность в исследовании, разработке и технологическом обеспечении процесса ориентации зерен абразива в электростатическом поле. При моделировании эксплуатационных характеристик ленточного шлифовального инструмента необходимо выявить влияние формы геометрии и направленной ориентации абразивных зерен в рабочем слое на работоспособность инструмента и эффективность шлифования. По сравнению с другими инструментами форма и геометрия режущей части которых определена и известна, геометрия и форма вершин зерен традиционного абразивного инструмента неопределенна [2].

Известна зависимость между определенным образом сориентированными структурами рабочих слоев шлифовальных инструмен-

тов, геометрия которых влияет на напряженно-деформированное состояние абразивных зерен при шлифовании и эксплуатационными характеристиками самого инструмента.

Предлагается повысить производительность отделочной обработки ленточным инструментом путем образования наиболее рациональной ориентации зерен абразива в рабочем поверхностном слое, как показано на рисунке 1.



а) увеличение $\times 100$;

б) увеличение $\times 200$

Рисунок 1 – Образцы однослойной рабочей поверхности с ориентированными зёрнами абразива ленточного шлифовального инструмента, полученного электростатическим нанесением абразива с углом ориентированности зерен абразива $\beta = 0^\circ$

Однако не были известны научно обоснованные и экспериментально подтвержденные способы технологического обеспечения получения ориентированных ленточных шлифовальных инструментов и значений углов ориентирования абразива в рабочих слоях инструментов, используемых для шлифования конкретных конструкционных материалов. В связи с чем указанная проблема является актуальной для изучения с целью управления поведением зерен абразива при формировании рабочего слоя инструмента для регулирования его эксплуатационных характеристик за счет реализации электростатического нанесения рабочего слоя из абразивных материалов [2–4].

Для достижения поставленной цели использовали анализ теоретических и практических знаний, закономерностей и факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики ленточных шлифовальных инструментов. Практические исследования базировались на методике комплексной оценки механических и эксплуатационных характеристик, включающей: отбор абразивных материалов для получения шлифовального инструмента методом электростатического нанесения рабочего слоя по размерам, форме и восприимчивости абразивов к воздействию электростатического поля; исследование технологических параметров электростатического нанесения рабочего слоя из электрокорунда; исследование характера расположения зерен абразива относительно поверхности тканевой основы и вектора направления движения резания; исследование эксплуатационных характеристик ленточного шлифовального инструмента с ориентированными зёрнами электрокорунда; статистическую обработку результатов исследований получения ленточного шлифовального инструмента методом электростатического нанесения рабочего слоя из ориентированных зерен электрокорунда.

Формирование ориентированных абразив содержащих рабочих поверхностей с использованием электростатического поля

Процесс нанесения рабочего слоя инструмента под действием электростатического поля, схематично представленный на рисунке 2, описывается тремя последовательно протекающими стадиями: заряджение частицы, образование заряженного диполя с последующей его ориентацией в направлении действия электростатического поля; отрыв от поверхности электрода и полет заряженного диполя под действием электростатического поля; контакт и проникновение движущейся частицы в вязкую основу.

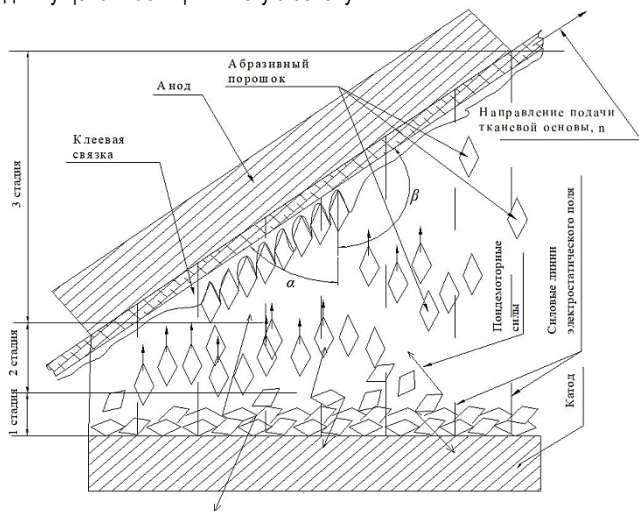


Рисунок 2 – Стадии процесса получения рабочего слоя ленточного шлифовального инструмента в электростатическом поле

В соответствии с требованиями неравносности формы абразивных зерен принята физическая модель зерна абразива с соотношением сторон 4 к 1 в виде цилиндра с коническими концами и углом конусности 2γ . Для адекватного описания эффективного формирования рабочего слоя инструмента из зерен, ориентированных в электростатическом поле, разработана математическая модель, включающая:

- зависимость, определяющую размеры зерен абразива от условий электростатического поля:

$$a \leq \frac{27\varepsilon_0 \varepsilon}{4g\rho(\varepsilon + 2\varepsilon_0)} E^2, \tag{1}$$

- где a – размер абразивного материала, м;
- E – напряженность электростатического поля, кВ/м;
- ρ – плотность абразивного материала, кг/м³,
- ε – относительная диэлектрическая проницаемость частицы;
- ε_0 – диэлектрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м = $8,85 \cdot 10^{-12}$ М⁻³·Кг⁻¹·с⁴·А²;
- g – ускорение свободного падения, м/с²;

- зависимость, определяющую оптимальную дистанцию перемещения абразива при его нанесении на тканевую основу от размеров зерна, скорости и условий электростатического поля:

$$L = \frac{\pi a^3 \rho}{2} \frac{V^2}{9\varepsilon \Theta E^2 - 4\rho a g}, \tag{2}$$

- где $\Theta = \frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2\varepsilon_0}$ – относительная качественная характеристика электростатического поля;

L – оптимальное расстояние нанесения абразива на проклеенную основу, м; V – максимальная скорость абразивного зерна, м/с;

- зависимость, определяющую скорость проникновения абразива v_0 , м/с в клеевую среду основы от размеров абразивного материала, действующих сил сопротивления при величине угла проникновения γ :

$$v_0 = \sqrt{-\frac{2}{5} b H_{\max}^{5/2} F\left(-\frac{\alpha}{3\lambda}, \frac{5}{6}; \frac{11}{6}; -\lambda H_{\max}^3\right)} \tag{3}$$

при угле атаки $\alpha = const$, $\lambda = const$, $\lambda \neq 0$, комплексном параметре

$b = -2 \frac{\beta v_0^2}{m}$ гипергеометрической функции F и максимальной глубине проникновения абразива в клеевую среду $H_{\max} = 2a$, м;

- зависимость, определяющую оптимальное расстояние перемещения абразива при его нанесении на тканевую основу от технологических параметров напряженности электростатического поля, марки и размера абразива, глубины и углов проникновения абразива, учитывая, что $V=v_0$:

$$L = \frac{\pi a^3 \rho b H_{\max}^2 F\left(-\frac{\alpha}{3\lambda}, \frac{5}{6}; \frac{11}{6}; -\lambda H_{\max}^3\right)}{5(9\varepsilon \Theta E^2 - 4\rho a g)}. \tag{4}$$

Математическая модель является основой для определения технологических параметров формирования рабочего слоя нанесением абразива в электростатическом поле. При получении инструмента важно обеспечить ориентированность абразивного зерна относительно эластичной основы на оптимальный угол. Попытки связать те или иные преимущества абразивного материала с различной формой и геометрией зерен не учитывают взаимное расположение зерен в рабочем слое инструмента, характер и степень перекрытия траекторий зерен в процессе движения, условия взаимодействия материала абразивного зерна с обрабатываемым материалом и образовавшейся стружкой, т. е. кинематические и динамические условия процесса шлифования. Различие в форме и геометрии ориентированных зерен не только не объясняет, а, наоборот, вуалирует приобретаемые в связи с их ориентированностью преимущества. Поэтому для анализа работы ориентированных зерен требуется заменить «неопределенные» зерна зернами эквивалентной формы, поддающимися математическому описанию. Такая операция связана с упрощением геометрических параметров и утратой некоторых физических свойств реальных зерен, однако позволяет определить влияние ориентированности абразивных зерен в рабочем слое на работоспособность инструмента и эффективность шлифования. В работах П. И. Ящерицына и А. Г. Зайцева, В. Н. Бакуля, А. В. Королева, М. Мацуи, Сато Седзаки при моделировании встречаются следующие допущения: 1) абразивные зерна приводят к форме шара одного радиуса r_0 ; 2) абразивные зерна заменяют цилиндром или

эллипсоидом вращения с постоянным соотношением полуосей; 3) режущие вершины зерен заменяют эквивалентным конусом или пирамидой, имеющими угол при вершине, равный некоторой постоянной величине 2γ , т. е. не эквивалент зерна, а модель его режущей части. Рассмотрим взаимодействие абразивного зерна и обрабатываемой поверхности заготовки при шлифовании. При врезании абразивного зерна в металл в нем возникают зоны текучести [6]. Удельная мощность взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого металла при шлифовании определили из зависимости:

$$N_{y\delta} = K_{pV} \cdot \sigma_B \cdot \sin \Delta\beta \cdot V, \quad (5)$$

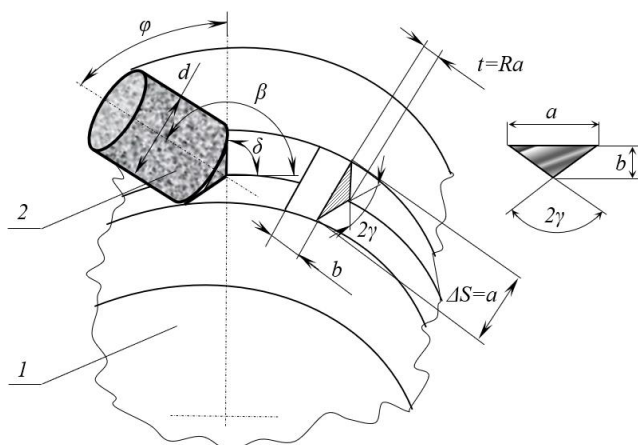
где K_{pV} – коэффициент, учитывающий рост давления в контакте «зерно – металл»;

σ_B – временное сопротивление разрушению обрабатываемого металла;

$\Delta\beta$ – угол наклона контакта абразивного зерна к поверхности заготовки;

V – скорость резания.

При ударном взаимодействии абразивного зерна и заготовки, в поверхностном слое которой образуются зоны текучести, возникает неустойчивость и локализация пластической деформации. Из [6] известно, что засаливание абразивного зерна снижается по мере роста глубины внедрения абразивного зерна, что приводит к росту объема застойной зоны у передней поверхности, формированию ударной волны, приводящей к переводу металла в пластическое состояние. Соответственно, для повышения удельной мощности взаимодействия абразивных зерен и обрабатываемого металла при прочих равных условиях необходимо сориентировать абразивные зерна в рабочем слое инструмента. В связи с этим представим геометрию резания ориентированным абразивным зерном в соответствии с рисунком 3.



1 – обрабатываемая заготовка, 2 – абразивное зерно

Рисунок 3 – Схема резания ориентированным абразивным зерном

При исследовании процесса шлифования поверхности заготовки одиночным зерном абразива учтено, что величина глубины резания t и ширина срезаемого слоя b находятся в прямой зависимости от размеров и геометрии абразивного зерна. Режущую способность ленточного шлифовального инструмента с направленной ориентацией абразивных зерен в рабочем слое определили соотношением объема сошлифованного материала $V_{общ}$ с заготовки за единицу времени t по формуле

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \cdot \sin \beta_i}{4\tau} \cdot n_i \cdot \pi D \cdot l \cdot n_{об} \quad (6)$$

где β – угол ориентированности абразивного зерна к тканевой основе;

n_i – скорость движения абразивной ленты, м/с;

$n_{об}$ – частота вращения заготовки, об/мин;

D – диаметр заготовки, мм;

l – длина ошлифованного участка, равного ширине шлифовальной ленты, мм.

Исходя из того, что при традиционной схеме хаотического расположения абразива в шлифовальных инструментах примерно 78 % зерен являются не режущими, 12 % – давящими и только 10% – режущими, можно предположить, что у инструмента с ориентированными зернами все зерна являются режущими [2]. Следовательно, можно допустить, что шлифовальный инструмент с ориентированными зернами абразива в рабочем слое имеет максимальную режущую способность Q_{max} , а инструмент с хаотическим расположением зерен минимальную Q_{min} . В соответствии с проведенными расчетами выявлено, что при ориентировании зерен абразива в рабочем слое ленточного шлифовального инструмента его режущая способность может изменяться в диапазоне от $q_{min} = 0,5k/0,75k = 0,66k$ до $q_{max} = k/0,75k = 1,33k$ раз, поскольку номинальное увеличение режущей способности $q_{nom} = 1,33k/0,66k = 2$ раза. В соответствии с выражением (6) определены расчетные значения режущей способности Q ленточного шлифовального инструмента при углах ориентированности β зерен абразива зернистостью, равной 0,10 мм, 0,16 мм и 0,20 мм (рисунок 4) [3]. В соответствии с данными расчетов для всех зернистостей абразивных зерен максимальное значение режущей способности Q_{max} достигается при угле ориентированности абразива относительно основы $\beta = 90^\circ$. Например, для абразивных зерен зернистости $a = 0,1$ мм режущая способность $Q_{max} = 255$ мм³/мин. Оптимальные значения углов ориентированности β для исследуемых зернистостей абразива установили в соответствии со статистическим методом графического определения оптимальных границ, проведя биссектрису на рисунке 4.

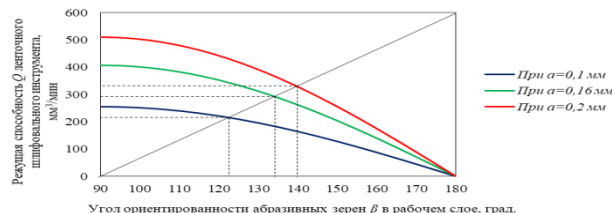


Рисунок 4 – Зависимость режущей способности Q ленточного шлифовального инструмента от угла ориентированности абразивных зерен β

В результате для зерен размером $a = 0,1$ мм оптимальное значение угла ориентированности $\beta = 123^\circ$, при котором режущая способность $Q = 214$ мм³/мин, что согласуется с алгебраическими расчетами. Для зерен размером $a = 0,16$ мм $\beta = 135^\circ$, а $Q = 288,98$ мм³/мин. Для зерен размером $a = 0,2$ мм $\beta = 140^\circ$, а $Q = 328,46$ мм³/мин [5].

При целенаправленном ориентировании зерен абразива размером $a = 0,1$ мм под углом $\beta = 123^\circ$ режущая способность инструмента увеличится в $q = 214/165 = 1,3$ раза. При ориентировании зерен абразива размером $a = 0,16$ мм под углом $\beta = 135^\circ$ режущая способность инструмента увеличится в $q = 288,98/200 = 1,4$ раза, а при ориентировании зерен абразива размером $a = 0,2$ мм под углом $\beta = 140^\circ$ режущая способность инструмента увеличится в $q = 328,46/216 = 1,5$ раза, что соответствует прогнозируемому [7, 8].

Заключение

Значительное влияние на режущую способность и стойкость абразивного зерна оказывает его ориентированность относительно движения резания, и изменение угла ориентирования зерен абразива в рабочем слое на $120-140^\circ$ относительно основы должно приводить к увеличению производительности примерно в 1,5 раза, что является весьма ощутимым резервом использования абразивных материалов в шлифовании. Повышению долговечности инструмента будет способствовать применение эластичных связок, обладающих высокой адгезионной способностью к наполнителю, способных выдерживать без разрушения перемещение абразивного зерна до половины его размера. Расположение зерен абразива под углом β к эластичной основе требует применения связок, исключающих возможность образования пор при отверждении. Благодаря наличию растягивающих напряжений в прилегающих к режущей кромке областях и периодическому разрушению кромок при резании ориентированным абразивом обеспечивается его самозатачивание.

Список цитированных источников

1. Malkin, S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives / S. Malkin, Ch. Guo // NewYork :Industrial Press Inc. – 2008. – 372 p.
2. Никифоров, И. П. Состояние и перспективы производства абразивных материалов / И. П. Никифоров // Труды ППИ. Сер. Машиностроение. Электротехника. – 2012 – № 15(3). – С. 265–270.
3. Кириенко, А. С. Влияние технологических параметров формирования рабочего слоя инструмента с ориентированными зёрнами на его эксплуатационные характеристики / А.С. Кириенко // Порошковая металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр./ редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2018. – Вып. 41. – С. 257–262.
4. Кириенко, А. С. Инновационные решения в области изготовления эластичных шлифовальных инструментов / А. С. Кириенко, С. Э. Завистовский // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : материалы Международной научно-технической конференции, Брест, 27–28 мая 2019 года / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет ; редкол.: М. В. Нерода [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2019. – С. 83–85.
5. Кириенко, А. С. Ленточный шлифовальный инструмент с ориентированным рельефом абразивосодержащего поверхностного слоя / А. С. Кириенко // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. – 2018. – № 6. – С. 90–95.
6. Никифоров, И. П. Роль внешнего и внутреннего трения в процессе микрорезания абразивным зерном / И. П. Никифоров, П. Н. Мальцев // Вестник Псковского государственного университета. Сер. Экономические и технические науки. – 2012. – № 1. – С. 116–123.
7. Кириенко, А. С. Оптимизация расположения зёрен абразива при электростатическом нанесении рабочих слоёв эластичного инструмента с управляемой режущей способностью / А. С. Кириенко, С. Э. Завистовский // Инновационные технологии в машиностроении : сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 21–22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т ; под. ред. чл.-корр., д-ра техн. наук, проф. В. К. Шелега; д-ра техн. наук, проф. Н. Н. Попок. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – С. 136–141.
8. Кириенко, А. С. Реализация технологии управления образованием ориентированных структур в гибких абразивных инструментах / А. С. Кириенко, С. Э. Завистовский, В. Э. Завистовский // Перспективные машиностроительные технологии (Advanced engineering technologies) AET-2022 : сборник материалов международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии AET-2022», Санкт-Петербург, 21–25 ноября 2022 г. / Сан.-Петербургский политех. ун-т. Петра Великого; под. ред. член-корр., д-ра техн. наук А. А. Поповича; д-ра техн. наук Д. П. Гасюка. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022. – С. 116–122.

References

1. Malkin, S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives / S. Malkin, Ch. Guo // NewYork :Industrial Press Inc. – 2008. – 372 p.
2. Nikiforov, I. P. Sostoyanie i perspektivy proizvodstva abrazivnyh materialov / I. P. Nikiforov // Trudy PPI. Ser. Mashinostroenie. Elektrotehnika. – 2012 – № 15(3). – S. 265-270.
3. Kirienko, A. S. Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov formirovaniya rabocheho sloya instrumenta s orientirovannymi zernami na ego ekspluatatsionnye harakteristiki / A.S. Kirienko // Poroshkovaya metallurgiya: Resp. mezhved. sb. nauch. tr./ redkol.: A. F. Il'yushchenko [i dr.]. – Minsk : Belarus. navuka, 2018. – Vyp. 41. – S.257–262
4. Kirienko, A. S. Innovatsionnye resheniya v oblasti izgotovleniya elastichnyh shlifoval'nyh instrumentov / A. S. Kirienko, S. E. Zavistovskij // Novye tekhnologii i materialy, avtomatizatsiya proizvodstva : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Brest, 27–28 maya 2019 goda / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet ; redkol.: M. V. Neroda [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2019. – S. 83–85.
5. Kirienko, A. S. Lentochnyj shlifoval'nyj instrument s orientirovannym rel'efom abrazivosoderzhashchego poverhnostnogo sloya / A. S. Kirienko // Vestnik Poloc. gos. un-ta. Ser. V. Prikladnye nauki. Promyshlennost'. – 2018. – № 6. – S. 90–95.
6. Nikiforov, I. P. Rol' vneshnego i vnutrennego treniya v processe mikrorezaniya abrazivnym zernom / I. P. Nikiforov, P. N. Mal'cev // Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Ekonomicheskie i tekhnicheskie nauki. – 2012. – № 1. – S. 116–123.
7. Kirienko, A. S. Optimizatsiya raspolozheniya zeren abraziva pri elektrostatischekom nanesenii rabochoy sloev elastichnogo instrumenta s upravlyae moy rezhushchey sposobnost'yu / A. S. Kirienko, S. E. Zavistovskij // Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii : sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, posvyashchennoj 50-letiyu mashinostroitel'nyh special'nostej i 15-letiyu nauchno-tekhnologicheskogo parka Polockogo gosudarstvennogo universiteta, Novopolock, 21–22 apr. 2020 g. / Poloc. gos. un-t ; pod. red. chl.-korr., d-ra tekhn. nauk, prof. V. K. Shelega; d-ra tekhn. nauk, prof. N. N. Popok. – Novopolock : Poloc. gos. un-t, 2020. – S. 136–141.
8. Kirienko, A. S. Realizatsiya tekhnologii upravleniya obrazovaniem orientirovannykh struktur v gibkikh abrazivnykh instrumentah / A. S. Kirienko, S. E. Zavistovskij, V. E. Zavistovskij // Perspektivnye mashinostroitel'nye tekhnologii (Advanced engineering technologies) AET-2022 : sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Perspektivnye mashinostroitel'nye tekhnologii AET-2022», Sankt-Peterburg, 21–25 noyabrya 2022 g. / San.-Peterburgskij politekh. un-t. Petra Velikogo; pod. red. chlen-korr., d-ra tekhn. nauk A. A. Popovicha; d-ra tekhn. nauk D. P. Gasyuka. – Sankt-Peterburg : Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet Petra Velikogo, 2022. – S. 116–122.

Материал поступил 21.11.2022, одобрен 14.12.2022, принят к публикации 09.01.2023