

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО СЛОЯ ИНСТРУМЕНТА С ОРИЕНТИРОВАННЫМИ АБРАЗИВНЫМИ ЗЕРНАМИ НА ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А. С. Кириенко

Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, 211446, г. Новополоцк, Беларусь,
e-mail: kirienko@alexandr.by

Поступила 17.01.2018 г.

Статья посвящена вопросам влияния макроструктуры рабочего слоя из ориентированных в электростатическом поле абразивных материалов эластичных шлифовальных инструментов на их режущую способность и другие эксплуатационные характеристики.

Введение. Изучению вопросов, связанных с прогнозированием различных свойств абразивосодержащих рабочих слоев при получении эластичных шлифовальных инструментов, большое внимание уделяют ведущие производители эластичных шлифовальных инструментов, такие как ОАО «Белгородский абразивный завод» (Россия), компания «RHODIUS Schleifwerkzeuge-GmbH&Co KG» (г. Бургбрюль, Германия), фирма KLINGSPOR (г. Хайгер, Германия), Karbosan (г. Стамбул, Турция), многие из которых являются членами Всемирной организации безопасности абразивных материалов OSA и членами Европейской Федерации Производителей Абразивных Товаров FEPA. Импорт эластичных шлифовальных инструментов достаточно велик. Объем всего потенциального EU-рынка эластичных шлифовальных инструментов в среднем ежегодно составляет 112,5 млн долл. Объем целевого рынка эластичных шлифовальных инструментов в странах ТС составляет 48,5 млн долл. в год. Объем реально доступного сегмента эластичных шлифовальных инструментов в Республике Беларусь составляет 4,5 млн долл. в год. Объем реально доступной доли рынка эластичных шлифовальных инструментов в стране равен 1,7 млн долл. в год. В связи с отсутствием в Республике Беларусь соответствующих производственных мощностей проведение научных исследований в данной области относится к основным направлениям замещения импортного шлифовального инструмента в машиностроении и создание аналогичного производства было бы целесообразным.

Актуальной является разработка технологии, позволяющей достигнуть наилучших эксплуатационных характеристик получаемых инструментов за счет формирования рабочего слоя с ориентированными абразивными зёрнами. Известна зависимость между определенным образом сориентированными структурами поверхностей шлифовальных инструментов, геометрия которых влияет на напряженно-деформированное состояние абразивных зёрен при шлифовании, и эксплуатационными характеристиками самого инструмента. Однако отсутствуют научно обоснованные и экспериментально подтвержденные способы обеспечения получения ленточных шлифовальных инструментов и значений углов ориентирования зёрен рабочих слоев инструментов, используемых для шлифования конкретных конструкционных материалов. Это явилось условием для реализации научной задачи, направленной на разработку способа ориентирования абразивных зёрен в рабочем слое эластичного шлифовального инструмента, для повышения его износостойкости и режущей способности, а также производительности шлифовальной обработки. Эластичный шлифовальный инструмент с рационально ориентированными зёрнами абразива сможет заменить дорогостоящие абразивные инструменты на эластичной основе с произвольным расположением синтетического алмаза, эльбора и т. п. сверхтвердых материалов за счет направленного использования физико-механических свойств недорогих марок абразива [1–4].

Материалы и методы исследования. В рамках исследования проанализированы свойства, форма и размеры абразивных материалов, кинематика абразивного зерна при эластичном шлифовании, способы управления механическими и эксплуатационными свойствами абразивосодержащих рабочих слоев шлифовальных инструментов; обозначены научные проблемы, не решаемые применяемыми в этой области способами; предложено решение, определяющее производительность эластичного шлифования; установлены теоретические зависимости режущей способности инструмента от углов ориентирования зерен абразива в рабочем слое; проведены необходимые экспериментальные исследования управления ориентацией абразивных зерен в электростатическом поле при изготовлении инструмента. Проведено комплексное исследование производительности полученных образцов ленточного шлифовального инструмента с ориентированными в электростатическом поле зернами абразива. С целью изучения использовался современный математический аппарат, стандартные и оригинальные методики и оборудование в лабораторных и эксплуатационных условиях с применением методов математической статистики и анализа. В качестве специальных методов были применены: разработанная методика исследования электростатической восприимчивости абразивных материалов; экспериментальное оборудование для определения оптимальных режимов электростатического образования ориентированных абразивосодержащих слоев; методика и оборудование для комплексного исследования износостойкости и режущей способности полученных образцов инструмента; количественный стереологический анализ образцов с помощью программного комплекса обработки и анализа изображений «Autoscan», разработанного НИИ ПФП им. А. Н. Севченко (г. Минск). Исследование макроструктуры экспериментальных образцов осуществлялось на микроскопе ЕС МЕТАМ РВ-21 производства ЛОМО (С.-Петербург, Россия) и сканирующем электронном микроскопе СЭМ в ГНУ «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа». Достоверность результатов теоретических и экспериментальных исследований подтверждается их воспроизводимостью, а также применением апробированных методик и средств измерений, прошедших метрологическую аттестацию.

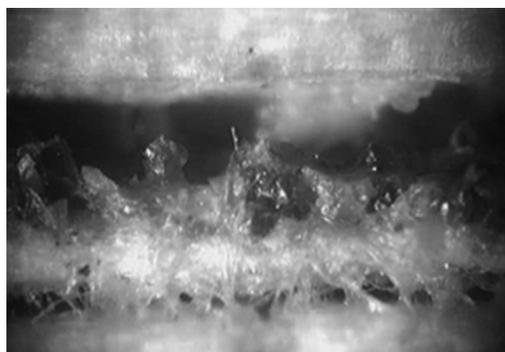
Результаты и их обсуждение. Исходя из анализа и результатов микроскопических исследований формы, структуры, физико-механических свойств, прочности, плотности, восприимчивости к воздействию электростатическим полем и эксплуатационных характеристик абразивных материалов обозначены следующие критерии выбора номенклатуры абразивов для исследований: максимальная величина фактора неравноосности абразивного зерна один к четырем; оптимальный размер зерна от 0,16 мм до 0,40 мм и минимальная стоимость. Соответственно, особое внимание уделено осколочной и пластинчатой формам зерен.

В результате исследований из многообразия абразивов выбран неравноосный материал пластинчатой формы – электрокорунд 14А, соответствующий дисперсным материалам, восприимчивым к действию электростатических полей. Анализ кинематики абразивного зерна при эластичном шлифовании позволил выявить зависимость глубины внедрения зерна a_z , нагрузки на шлифующее зерно, температуры в зоне резания, режимов шлифования от длины кривой контакта, размеров и формы самого зерна, геометрии макроструктуры рабочей поверхности шлифовального инструмента и предложить механизм управления ориентированностью абразивных зерен в электростатическом поле при получении эластичного шлифовального инструмента [5, 6]. Получение такого инструмента с ориентированием абразивных зерен в электростатическом поле описывается тремя последовательно протекающими стадиями: заряджение абразивной частицы, образование заряженного диполя с последующей его ориентированностью вдоль наибольшей оси в электростатическом поле; отрыв от поверхности электрода и полет заряженного диполя под действием электростатического поля; контакт и проникновение движущегося абразива в вязкую основу. На основе разработанной математической модели управляемого процесса образования рационально ориентированного в электростатическом поле слоя из абразивных материалов ленточного шлифовального инструмента установлена зависимость макроструктуры формируемого рабочего слоя от геометрических параметров и оптимальных углов ориентированности зерен абразива β , расстояния перемещения зерен L , величины напряженности электростатического поля E , скорости перемещения абразива v_0 ,

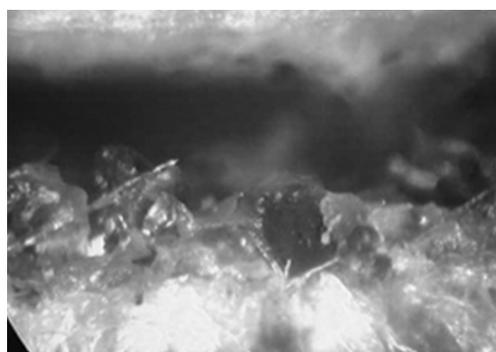
плотности ρ и размера абразива a . На рис. 1 представлена расчетная зависимость напряженности электростатического поля от размера фракции электрокорунда 14А и расстояния перемещения зерен абразива в электростатическом поле [7].

В результате экспериментальных исследований технологических параметров нанесения абразивосодержащих слоев с регулируемой в электростатическом поле ориентацией зерен абразива и статистической обработки результатов установлено, что с каждым равным увеличением расстояния переноса, размера фракции электрокорунда 14А и снижением выходного напряжения генератора электростатического поля значение изменения массы опытных и полученных образцов уменьшается, что свидетельствует о снижении эффективности процесса электростатического нанесения абразивосодержащих покрытий в 1,5–2,5 раза. В результате исследований отработаны оптимальные режимы получения рационально сориентированных абразивосодержащих рабочих слоев из зерен электрокорунда 14А в электростатическом поле при получении эластичных шлифовальных инструментов: расстояние перемещения зерен абразива – 50 мм; выходное напряжение генератора – 40 кВ; размер зерен абразива – 0,16–0,20 мм; скорость протягивания тканевой ленты – 0,5–1,0 м/мин [7, 8].

Результаты микроскопических исследований продольных срезов, полученных образцов эластичного шлифовального инструмента с ориентированными зернами абразива, подтверждают ориентированность зерен по своей наибольшей оси (рис. 2, а) в отличие от хаотично расположенных зерен абразива в образцах инструментов, полученных методом механической насыпки (рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Образцы эластичного шлифовального инструмента: а – с ориентированными зернами абразива; б – с неориентированными зернами абразива

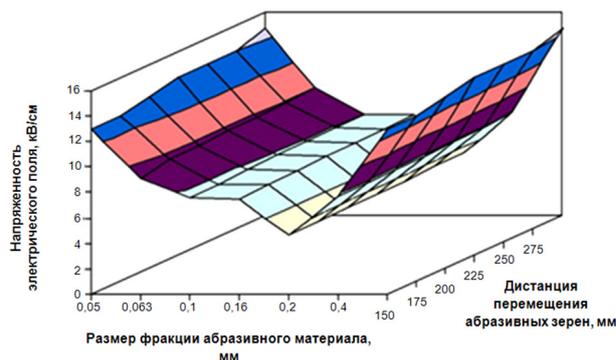


Рис. 1. Зависимость напряженности электростатического поля от размера фракции электрокорунда 14А и расстояния перемещения зерен абразива в электростатическом поле

Макроскопические исследования абразивосодержащих однослойных рабочих поверхностей полученных образцов эластичного шлифовального инструмента (рис. 3) показали, что видимых различий расположения и концентрации зерен абразива в различных направлениях не наблюдается, что подтверждает их ориентированность в направлении действия вектора напряженности электростатического поля [5, 7].

Анализ результатов макроскопических исследований образцов эластичного шлифовального инструмента позволил сделать следующие выводы:

- 1) электростатическое поле оказывает влияние на ориентированность зерен абразива в шлифовальной ленте, при этом их концентрация и направление ориентации зависят от направления вектора напряженности поля;
- 2) уменьшение угла между вектором напряженности электростатического поля и поверхностью ленты приводит к уменьшению угла между наибольшей осью зерна абразива и по-

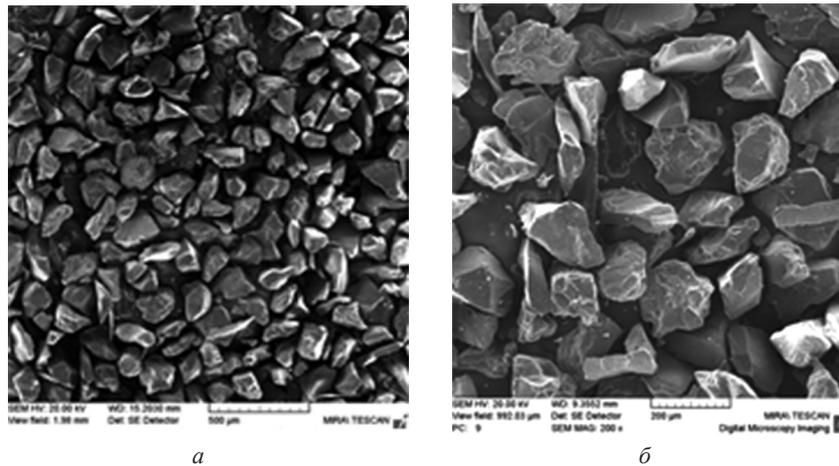


Рис. 3. Образцы однослойной рабочей поверхности эластичного шлифовального инструмента с ориентированными под углом $\beta = 90^\circ$ зёрнами абразива относительно основы: *a* – $\times 100$; *б* – $\times 200$

верхностью ленты. При этом отмечается увеличение разности между этими углами на $2\text{--}4^\circ$;

3) зёрна меньшего размера при одних и тех же параметрах электростатического поля в среднем проникают на меньшую глубину, и их концентрация меньше, чем у более крупных [7–9].

Для повышения удельной мощности взаимодействия абразивных зёрен и обрабатываемого металла при прочих равных условиях необходимо целенаправленно сориентировать абразивные зёрна в рабочем слое инструмента. Для выявления зависимости между рациональными углами ориентирования зёрен абразива и режущей способностью инструмента, обеспечивающих наиболее оптимальные параметры шлифования, рассмотрели модель процесса трения материалов «абразив–металл» [3]. При исследовании процесса трения абразивного материала по шлифуемой поверхности металлической заготовки в расчетах износа абразива исходим из модели конуса трения «абразив–металл», при которой тангенс угла трения φ равен коэффициенту трения f

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{F_{\max}}{N} = f, \quad (1)$$

где N – вектор нормальной реакции; F_{\max} – вектор действия силы трения. В связи с чем оптимальный угол ориентированности абразивных зёрен относительно основы ленточного шлифовального инструмента равен

$$\beta = \delta + \varphi = 90^\circ + \varphi. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) позволяют определить коэффициенты трения f при шлифовании ленточным шлифовальным инструментом с ориенти-

рованными зёрнами абразива. Представив все иные факторы, влияющие на режущую способность ленточного шлифовального инструмента Q в виде коэффициента k определили режущую способность по формуле

$$Q = k \sin\beta. \quad (3)$$

В результате дальнейших теоретических исследований аналитически определена зависимость значений режущей способности Q ленточного шлифовального инструмента при углах ориентированности β зёрен абразива размером a , равным 0,10 мм, 0,16 мм и 0,20 мм (рис. 4).

В соответствии с рис. 4 для всех размеров абразивных зёрен максимальное значение режущей способности Q_{\max} достигается при угле ориентированности абразива относительно основы $\beta = 90^\circ$. Например, для абразивных зёрен размером $a = 0,10$ мм режущая способность $Q_{\max} = 255$ мм³/мин. Оптимальные значения углов ориентированности β для основных размеров зёрен

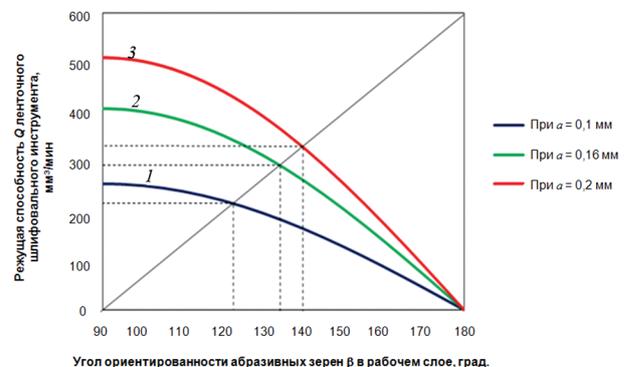


Рис. 4. Зависимость режущей способности Q ленточного шлифовального инструмента от угла ориентированности абразивных зёрен β

абразива определили, проведя биссектрису. В результате для шлифпорошков размером $a = 0,10$ 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 угол $\beta = 135^\circ$, а $Q = 288,98$ мм³/мин, размером $a = 0,2$ мм угол $\beta = 140^\circ$, а $Q = 328,46$ мм³/мин. Подставив эти значения в выражение (3), определили значения коэффициента k для каждого размера абразива. Так, $k = 255$ для шлифпорошков размером $0,10$ мм, $k = 408,19$ для зерен размером $0,16$ мм и $k = 510,24$ для зерен размером $0,20$ мм, что доказывает верность соотношения $k = Q/\sin\beta = Q_{\max}$ и правильность вышеописанных математических зависимостей. Разработанный математический аппарат использован при создании оборудования и технологического процесса, реализующих механизм управляемого образования абразивосодержащих слоев инструментов из зерен, ориентированных в электростатическом поле относительно тканевой основы.

При исследовании износостойкости и режущей способности образцов ленточных шлифовальных инструментов в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 5009-82, провели сравнение экспериментальных значений показателей (рис. 5) с нормативными. При этом установлено, что стойкость инструмента с ориентированными под углом 90° зернами абразива входит в предел нормативных значений, равных $14\text{--}70$ г/м²·ч, однако они ниже в $1,2$ раза его верхнего предела, а инструмента с ориентированными под углами $120, 140$ и 160° зернами абразива выше максимального нормативного показателя в $1,3\text{--}1,5$ раза.

В результате сравнения данных исследований режущей способности (рис. 6) экспериментальных образцов инструмента с различными углами ориентированности зерен абразива с расчетными (см. рис. 4) и нормативными показателями по ГОСТ 5009-82 установлено, что нанесение абразива под углами к тканевой основе в диапазоне $120\text{--}140^\circ$ в электростатическом поле позво-

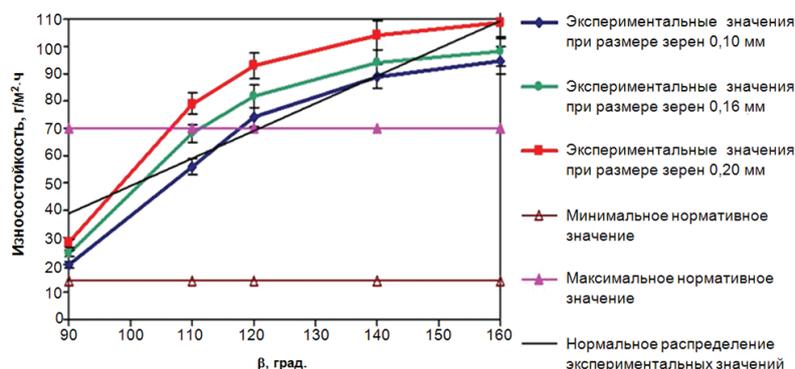


Рис. 5. Зависимость износостойкости образцов абразивосодержащих покрытий от угла ориентированности β зерен абразива

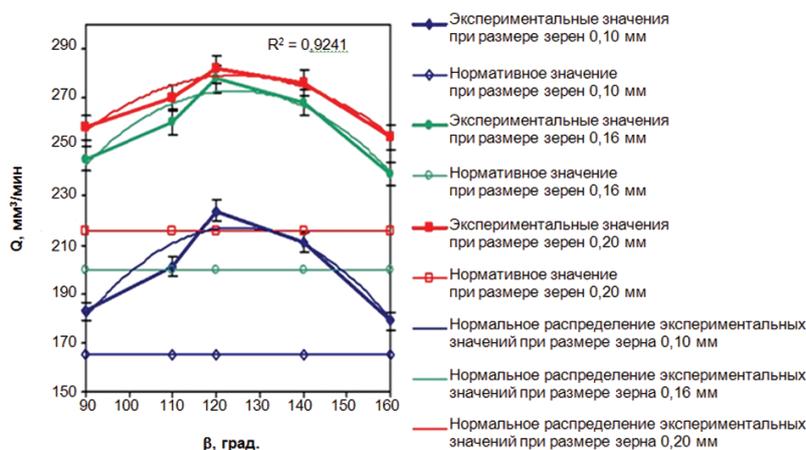


Рис. 6. Зависимость режущей способности Q образцов абразивосодержащих покрытий от угла ориентированности β зерен абразива

ляет повысить режущую способность в 1,3–1,5 раза, что соответствует теоретическим расчетам.

В связи с этим для используемых размеров зерен с учетом допустимого отклонения $\pm 4^\circ$ приняты следующие рациональные углы ориентированности зерен абразива относительно тканевой основы: при размере абразивных зерен $a = 0,10$ мм угол $\beta = 120^\circ \pm 4^\circ$; при $a = 0,16$ мм угол $\beta = 130^\circ \pm 4^\circ$; при $a = 0,20$ мм угол $\beta = 140^\circ \pm 4^\circ$.

Исследования шероховатости поверхностей валов диаметром 50 мм из стали 45, шлифованных образцами ленточного шлифовального инструмента, полученного при ориентировании зерен электрокорунда 14А размером 0,10 мм, 0,16 мм, 0,20 мм относительно тканевой основы под углами 90, 110, 120, 140 и 160° на профилеграфе Mitutoyo SJ-410, установили, что достигнутые показатели шероховатости $Ra = 0,142–0,543$ мкм соответствуют ГОСТ 2789-73. Также установлено, что шероховатость поверхности исследуемых образцов в большей степени зависит от размера зерна абразива инструмента нежели от угла ориентирования абразивных зерен в инструменте.

Выводы. В результате исследований рабочих слоев образцов эластичного шлифовального инструмента обоснованы зависимости режущей способности и износостойкости шлифовальных лент с ориентированными абразивными зёрнами от геометрических, физико-механических свойств используемых абразивных материалов, напряженности электростатического поля, расстояния переноса абразива и угла их ориентированности относительно основы ленты, которые позволили реализовать в разработанном и изготовленном оборудовании механизм управляемого получения рабочих слоев из ориентированных в электростатическом поле зерен абразива для получения производительных шлифовальных лент. Экспериментально доказано, что ориентированность зерен абразива в электростатическом поле на 120–140° относительно тканевой основы при получении эластичного шлифовального инструмента позволяет повысить его режущую способность и износостойкость в 1,3–1,5 раза в сравнении с традиционными эластичными инструментами [5, 6, 10, 11].

Литература

1. Кириенко, А. С. Ленточный шлифовальный инструмент с ориентированным рельефом абразивосодержащего поверхностного слоя / А. С. Кириенко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. – 2018. – № 6. – С. 90–95.
2. Мрочек, Ж. А. Процессы шлифования в машиностроении: учеб. пособие / Ж. А. Мрочек, М. Г. Киселев, Л. М. Кожуро. – М.: Инфра-М, Новое знание, 2013. – 358 с.
3. Никифоров, И. П. Роль внешнего и внутреннего трения в процессе микрорезания абразивным зерном / И. П. Никифоров, П. Н. Мальцев // Вестн. Псковского гос. ун-та. Сер. Экономические и технические науки. – 2012. – № 1. – С. 116–123.
4. Lynch, A. J. The History of Grinding / A. J. Lynch, C. A. Rowland. – SME: Electronic edition published, 2009. – 218 p.
5. Кириенко, А. С. Аспекты формирования рельефа абразивосодержащих поверхностных слоев эластичных инструментов [Электронный ресурс] / А. С. Кириенко // Инновационные технологии в машиностроении: электронный сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию Полоцкого гос. ун-та, Новополоцк, 19–20 апр. 2018 г. / Полоц. гос. ун-т; под ред. В. К. Шелега, Н. Н. Попок. – Новополоцк, 2018. – С. 81–85.
6. Кириенко, А. С. Получение ориентированного рельефа покрытий из абразивосодержащих дисперсных порошков / А. С. Кириенко // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 16–18 мая 2018 г.); редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред) [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2018. – С. 293–296.
7. Кириенко, А. С. Технология изготовления специального ленточного абразивного инструмента и оценка его производительности / А. С. Кириенко, С. Э. Завистовский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В: Прикладные науки. Промышленность. – 2006. – № 6. – С. 20–25.
8. Завистовский, С. Э. Особенности получения рабочей поверхности специального гибкого абразивного инструмента на предприятиях Витебской области / С. Э. Завистовский, А. С. Кириенко // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: сб. докл. 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 мая 2008 г.; редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2008. – С. 125–128.
9. Кириенко, А. С. Технология и оборудование для получения эластичного инструмента с ориентированными зёрнами абразива / А. С. Кириенко // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 35-летию машиностр. факультета Полоцкого гос. ун-та, г. Новополоцк, 19–20 окт. 2011 г. / М-во образования Респ. Беларусь; Нац. акад. наук Беларуси; Госкомитет по науке и технологиям; Полоцкий гос. ун-т; под ред. А. И. Гордиенко, В. К. Шелега. – Новополоцк: ПГУ, 2011. – С. 98–101.

10. Кириенко, А. С. Тенденции развития современных технологий производства эластичных инструментов с ориентированными зернами абразива / А. С. Кириенко // Инновационные технологии в машиностроении «ИННТЕХМАШ-2015», посвящ. 100-летию акад. П. И. Ящерицына и 40-летию машиностр. фак-та Полоцкого гос. ун-та, Новополоцк, 28–29 окт. 2015 г. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. А. И. Гордиенко, В. К. Шелега. – Новополоцк, 2015. – С. 112–114.

11. Кириенко, А. С. Развитие шлифовального инструмента на эластичной основе / А. С. Кириенко, П. Н. Рогов // Инновационные технологии в машиностроении «ИННТЕХМАШ-2015», посвящ. 100-летию акад. П. И. Ящерицына и 40-летию машиностр. фак-та Полоцкого гос. ун-та, Новополоцк, 28–29 окт. 2015 г. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. А. И. Гордиенко, В. К. Шелега. – Новополоцк, 2015. – С. 115–118.

EFFECT OF THE WORKING SURFACE RELIEF OF COATINGS FROM ABRASI-CONTAINING DISPERSE POWDERS ORIENTED IN THE ELECTROSTATIC FIELD ON THEIR ABNORMAL ABILITY

A. Kirienko

Polotsk State University, Novopolotsk, Belarus, e-mail: kirienko@alexandr.by

The article is devoted to the influence of the macrostructure of the working layer of electrostatic oriented abrasive materials of elastic grinding tools on their cutting capacity and other performance characteristics.