

3. Ищенко А.А. Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами / А.А. Ищенко. – Мариуполь : ПГТУ, 2007. – 250 с.
4. Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет / О.А. Савинов. – Л. : Стройиздат, 1979. – 200 с.
5. Исследование коэффициента трения покоя пластмасс со сталью / А.А. Ищенко [и др.] // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Мариуполь, 2012. – Вип. 24. – С. 258-261.

Bibliography:

1. Polymer Encyclopedia / V.A. Kargin [et al.]. – М. : Sovetskaya entsiklopediya, 1972. – 1224 p. – (In 3 volumes, Vol. 1). (Rus.)
2. Official «Diamant» company website [Electronic resource]. – (<http://diamant.net.ru/materials/multimetall>).
3. Ischenko A. Technological bases of recovery of industrial equipment with modern polymeric materials / A. Ischenko. – Mariupol : PSTU, 2007. – 250 p. (Rus.)
4. Savinov O. Modern construction of foundations for machines and their calculation / O. Savinov. – L. : Stroyizdat, 1979. – 200 p. (Rus.)
5. Study of static friction coefficient plastic with steel / A. Ishchenko [et al.] // Reporter of the Priazovskyi state technical university : Collection of scientific works / SHEE «PSTU». – Mariupol, 2012. – Issue 24. – P. 258-261. (Rus.)

Рецензент: В.В. Суглобов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 05.05.2016

УДК 621.923

© Рябенков И.А.¹, Новиков Ф.В.², Андилахай А.А.³

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ
ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ
И УСЛОВИЯ ЕЕ УМЕНЬШЕНИЯ**

Проведен теоретический анализ закономерностей формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке. Установлено, что уменьшить шероховатость поверхности при шлифовании можно увеличением количества одновременно работающих зерен и длины дуги контакта круга с обрабатываемой деталью. При обработке отверстия эффективно шлифование производить торцовой поверхностью круга, имеющей форму окружности и обеспечивающей наибольшую площадь контакта с обрабатываемым отверстием.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, абразивная обработка, обработка связанным абразивом, круглое наружное шлифование, производительность обработки, одновременно работающие зерна, отверстие, хонингование.

Рябенков І.О., Новіков Ф.В., Анділахай О.О. Закономірності формування шорсткості поверхні при абразивній обробці та умови її зменшення. Проведено теоретичний аналіз закономірностей формування шорсткості поверхні при абразивній обробці. Встановлено, що зменшити шорсткість поверхні при шліфуванні мо-

¹ канд. техн. наук, директор, ООО «ДиМерус Инженеринг», г. Харьков, dimerus@dimerus.com

² д-р техн. наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет, г. Харьков, fokusnic1@rambler.ru

³ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Andilayah@mail.ru

жна збільшенням кількості одночасно працюючих зерен і довжини дуги контакту круга з оброблюваною деталлю. При обробці отвору ефективно шліфування здійснювати торцевою поверхнею круга, яка має форму кола і забезпечує найбільшу площу контакту з оброблюваним отвором.

Ключові слова: шорсткість поверхні, абразивна обробка, обробка пов'язаним абразивом, кругле зовнішнє шліфування, продуктивність обробки, зерна, що одночасно працюють, отвір, хонінгування.

I.O. Riabekov, F.V. Novikov, O.O. Andilayah. Laws of formation of surface roughness when abraded, and the conditions for its reduction. *New analytical relationships of defining cutting temperatures at multipass surfacing with regard to the heat getting into the part being machined and the chips have been got in this work from cutting temperature calculation at grinding by simplified method. It has been shown in this paper that the main part of the heat at multipass grinding gets into the part being machined while just little heat gets into the chips. That is why calculation of the heat getting into the part being machined brings theory of grinding in compliance with the practice. It has been stated in theory that density change type of the heat flow into the surface layer of the part being machined does not influence considerably either on the absolute value or cutting temperature at grinding change type or on the heat penetration depth into the surface layer of the part being machined. It is in good compliance with the experimental research results of the heat penetration depth into the surface layer of the part being machined which corroborates the theory and its practical use possibility for determination of optimum conditions of cutting at multipass grinding from temperature. It has been shown that conventional cutting stress decrease influencing greatly on the cutting temperature is the main condition of cutting temperature decrease. It has been stated in theory that cutting temperature at grinding can be decreased, specific efficiency given, by grinding depth decrease, that is by multipass grinding. It has also been stated as opposed to the known solutions of heat conduction classic equation at grinding when heat penetration depth into the surface layer is infinite and thus the true value of the distorted layer (the layer is imperfect as regards the thermal effect) the heat penetration depth into the surface layer in this solution is finite.*

Keywords: surface roughness, abrasion, abrasive processing associated circular outer grinding, machining performance, while working the grain hole honing

Постановка проблеми. При изготовлении деталей гидравлической аппаратуры постоянно возникают проблемы обеспечения высоких показателей точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей. Традиционно они решаются на основе применения методов абразивной обработки, включая обработку связанным и свободным абразивом. Как показывает практика, применение методов обработки связанным абразивом (шлифование, хонингование и т. д.) позволяет добиться высоких показателей точности и производительности обработки, однако достижение высоких показателей шероховатости обрабатываемых поверхностей ограничено. Более эффективными в этом плане являются методы обработки свободным абразивом (доводка, полирование и т. д.), однако они осуществляются с относительно низкой производительностью обработки и высокой трудоемкостью. В связи с этим актуальны задачи разработки и внедрения в производство новых технологий абразивной обработки, позволяющих одновременно обеспечить высокие показатели производительности и шероховатости обработки с учетом требований по точности и качеству обрабатываемых поверхностей.

Анализ последних исследований и публикаций. В научно-технической литературе вопросам обеспечения производительности и шероховатости обработки на финишных операциях с использованием абразивных инструментов уделено большое внимание [1-3]. В особой мере это относится к алмазно-абразивной обработке деталей, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами, а также деталей из закаленных сталей [4]. Разработаны эффективные технологические процессы их абразивной обработки, позволяющие получить высокие показатели производительности и качества обработки, однако стабильно обеспечить шероховатость поверхности на уровне $R_a = 0,05$ мкм и менее весьма сложно. Для этого

необходимо применять относительно малопроизводительные методы обработки свободным абразивом, т. к. методы шлифования не позволяют обеспечить такую шероховатость поверхности. В связи с этим, важно провести теоретический анализ технологических возможностей методов доводки и шлифования для научно обоснованного определения условий их дальнейшего совершенствования.

Цель работы – теоретическое определение условий уменьшения шероховатости поверхности для различных кинематических схем обработки связанным и свободным абразивом.

Изложение основного материала. При лезвийной обработке шероховатость поверхности формируется в результате копирования профиля режущего лезвия инструмента с учетом кинематики его движения. При абразивной обработке шероховатость поверхности формируется в результате массового наложения и перекрытия проекций зерен на обрабатываемую поверхность. Чем больше зерен участвует в процессе резания, тем больше перекрытий проекций зерен и меньше максимальная высота микронеровностей обработанной поверхности. Поэтому с целью уменьшения максимальной высоты микронеровностей обработанной поверхности необходимо использовать методы абразивной обработки и абразивные инструменты, которые обеспечивают максимально возможное количество одновременно работающих зерен. В этом плане метод круглого наружного шлифования кругом прямого профиля (ПП) является наименее эффективным (рис. 1, а), т.к. характеризуется относительно небольшой длиной дуги контакта круга с обрабатываемой деталью и, соответственно, относительно высокой максимальной высотой микронеровностей обработанной поверхности. Применение кругов чашечной формы (рис. 1, б) при круглом наружном шлифовании позволяет увеличить длину дуги контакта круга с обрабатываемой деталью, увеличивая количество одновременно работающих зерен и уменьшая максимальную высоту микронеровностей обработанной поверхности. Еще эффективнее использовать метод охватывающего шлифования (рис. 1, в), который характеризуется увеличенной длиной дуги контакта круга с обрабатываемой деталью и меньшей шероховатостью обрабатываемых поверхностей. Однако в этом случае диаметр рабочей части круга, как правило, меньше диаметра круга формы ПП, соответственно, меньше площадь рабочей поверхности круга, что снижает его работоспособность вследствие быстрого засаливания и износа (по аналогии с кругами небольшого диаметра, используемыми при внутреннем шлифовании).

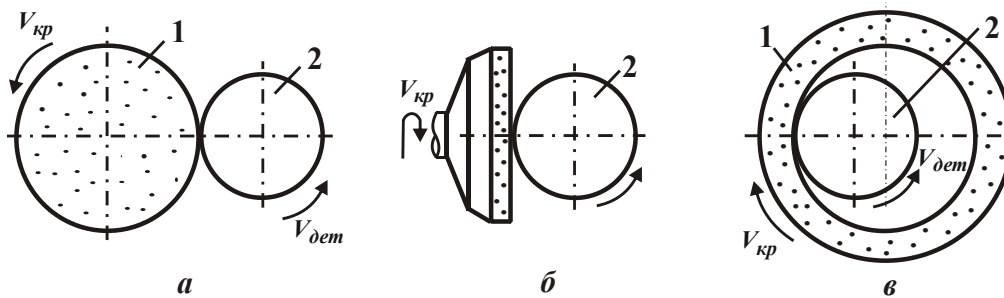


Рис. 1 – Кинематические схемы шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь

Следует отметить, что увеличение количества одновременно работающих зерен шлифовального круга является необходимым, но недостаточным условием уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности. Важно обеспечить примерно одновысотное выступание вершин зерен над уровнем связки круга, что достигается, например, применением алмазных кругов на металлических связках с плосковершинными зёрнами [5], образованными в результате электроэрозионной правки круга и его последующего обтачивания алмазным правящим карандашом. В этом случае при шлифовании твердых сплавов может быть достигнута шероховатость поверхности на уровне $R_a = 0,1$ мкм без уменьшения производительности обработки.

Эффективно также применение алмазных и абразивных кругов на относительно мягких связках, обеспечивающих «утопание» в них режущих зерен. В результате происходит переход от разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности круга к фактически одновысотному, что увеличивает количество одновременно работающих зерен и уменьшает шероховатость обработанной поверхности.

С целью увеличения количества зерен, расположенных на рабочей поверхности круга, применяют технологию электрогальванического нанесения зерен на рабочую поверхность круга. По сравнению с обычными абразивными и алмазными кругами, изготовленными традиционными методами, эти круги имеют на рабочей поверхности значительно больше зерен, что позволяет увеличить количество одновременно работающих зерен и уменьшить шероховатость обработанной поверхности. Например, изготовленные электрогальваническим методом алмазные круги, предназначенные для огранки природных алмазов в бриллианты, дополнительно подвергают «укатыванию» алмазных зерен в металлическую связку путем их вдавливания поликристаллическим сверхтвердым материалом. Это обеспечивает, по сути, одновысотное выступание зерен над уровнем связки круга и, соответственно, уменьшение шероховатости обработанной поверхности, что чрезвычайно важно для высококачественной обработки природных алмазов.

Наиболее перспективным решением задачи увеличения количества одновременно работающих зерен и уменьшения шероховатости обработанной поверхности является применение метода обработки свободным абразивом (доводки) с использованием алмазных паст (рис. 2 [5]).

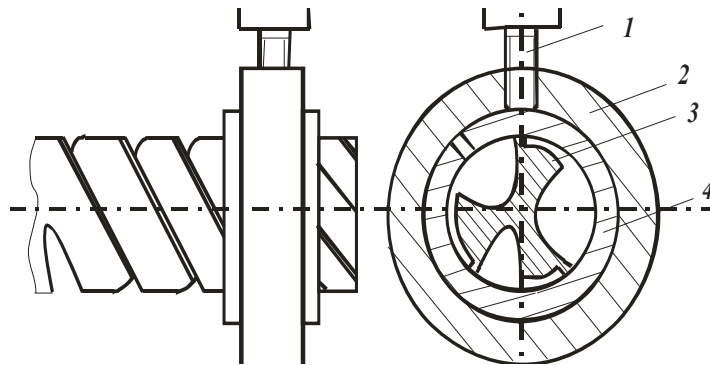


Рис. 2 – Схема доводки наружной поверхности твердосплавного многолезвийного инструмента: 1 – винт; 2 – кольцо; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – притир [5]

Однако, как показывает производственный опыт ГП ХМЗ «ФЭД», продолжительность операции доводки наружных поверхностей твердосплавных многолезвийных инструментов при съеме припуска 0,02 мм на сторону составляет 3...12 минут, тогда как продолжительность операции круглого наружного шлифования при съеме припуска величиной до 2 мм на сторону составляет 1...5 минут. Следовательно, операция доводки является достаточно трудоемкой, хотя при этом и решается задача получения шероховатости поверхности на уровне $R_a = 0,05...0,1$ мкм и менее, чего нельзя достичь при шлифовании. Очевидно, для эффективного ведения процесса доводки необходимо добиться уменьшения продолжительности этой операции, хотя бы до уровня операции круглого наружного шлифования. Это может быть достигнуто, например, за счет применения мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П. Экспериментально установлено, что в условиях внутреннего шлифования на токарном станке модели 1М63 с частотой вращения шпинделя 200 об/мин и шлифовального круга 1400 об/мин обеспечивается существенное уменьшение шероховатости поверхности без снижения производительности обработки. В особой мере эффект обработки проявляется при установке оси вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия детали (цилиндра), рис. 3. Так, за 30 минут обработки может быть достигнута шероховатость поверхности $R_a = 0,04$ мкм, чего нельзя добиться при обычном внутреннем шлифовании абразивными и алмазными кругами. В этом случае в результате увеличения площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, а также возможного «утопания» режущих зерен в мягкую связку круга и снижения разновысотного выступания зерен, увеличивается количество одновременно работающих зерен, что и создает эффект уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a .

Необходимо отметить, что наибольший эффект обработки отверстия может быть достигнут при внутреннем продольном шлифовании торцевой поверхностью круга, имеющей форму

окружности и обеспечивающей наибольшую площадь контакта с обрабатываемым отверстием (рис. 4). Количество одновременно работающих зерен в процессе обработки равно:

$$n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau = k \cdot B^2 \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}}, \quad (1)$$

где k – поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности круга, шт./м²; B – ширина шлифования, м; $V_{кр}$ – скорость вращения круга, м/с; $\tau = l / V_{дет} = B / V_{дет}$ – время контакта фиксированного сечения обрабатываемой поверхности детали с шлифовальным кругом, с; $l = B$ – длина дуги контакта круга с обрабатываемой поверхностью детали, м; $V_{дет}$ – скорость вращения детали, м/с.



Рис. 3 – Компоновка обработки отверстия в цилиндре

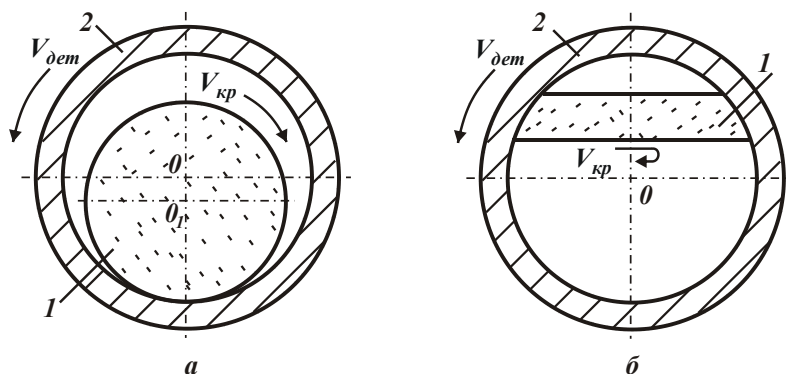


Рис. 4 – Схемы обычного внутреннего шлифования (а) и шлифования с перпендикулярным расположением осей вращения круга и детали (б): 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь

Как видно, наибольшее влияние на количество одновременно работающих зерен n оказывает параметр B , входящий в зависимость во второй степени. Поэтому наибольший эффект обработки достигается прежде всего за счет его увеличения.

Увеличить количество одновременно работающих зерен n можно также увеличением параметров k , $V_{кр}$ и уменьшением $V_{дет}$. Уменьшение скорости вращения детали $V_{дет}$ предполагает применение схемы глубинного шлифования, осуществляемой с глубиной шлифования, равной величине снимаемого припуска. Чем больше глубина шлифования и меньше скорость вращения детали $V_{дет}$, тем значительно может быть уменьшен параметр шероховатости поверхности R_a . При этом производительность обработки может быть увеличена по сравнению с обычным продольным многопроходным шлифованием.

Для определения параметра шероховатости поверхности R_{max} при абразивной обработке следует воспользоваться вероятностной функцией неснятого металла по глубине поверхност-

ного слоя обрабатываемой детали, определяемой координатой y (отсчитывая ее от вершины режущего зерна) [6]:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}, \quad (2)$$

где γ – угол при вершине конусообразного режущего зерна; n – суммарное количество абразивных зерен, участвующих в формировании шероховатости обрабатываемой поверхности; B – ширина абразивного инструмента, мм.

При $y=0$ функция $\Phi(y=0)=1$, т.е. на этом уровне весь материал не снят абразивными зернами. При $y=R_{max}$ функция $\Phi(y=R_{max})=\Phi_0$, где Φ_0 может принимать значения, равные 0,1; 0,05; 0,01 и менее. Тогда, потенцируя зависимость (2), получено:

$$R_{max} = -\frac{\ln \Phi_0 \cdot B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (3)$$

Поскольку функция $\ln \Phi_0$ отрицательна, то параметр шероховатости поверхности R_{max} принимает положительные значения.

Подставляя в (3) зависимость (1), имеем:

$$R_{max} = -\frac{\ln \Phi_0 \cdot V_{\text{дем}}}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot B \cdot V_{\text{кр}}}. \quad (4)$$

Как видно, уменьшить параметр шероховатости поверхности R_{max} можно уменьшением скорости вращения детали $V_{\text{дем}}$ и увеличением параметров k , B и $V_{\text{кр}}$. По сути, характер изменения параметра R_{max} обусловлен изменением количества одновременно работающих зерен n : чем больше n , тем меньше R_{max} . Однако в отличие от зависимости (1), зависимость (4) содержит параметр B в первой степени, т.е. все входящие в зависимость (4) параметры в одинаковой степени влияют на R_{max} .

Установленные выше закономерности позволяют объяснить эффект уменьшения шероховатости поверхности в процессе хонингования отверстия, когда в резании участвует вся рабочая поверхность абразивного инструмента (хона), а его диаметр равен диаметру обрабатываемого отверстия. Весьма эффективным следует рассматривать процесс хонингования по упругой схеме, реализующий обработку с начальным натягом в технологической системе, т. е., по сути, традиционную схему выхаживания.

Как установлено опытами, данная схема обработки позволяет в несколько раз уменьшить параметр шероховатости поверхности R_a и в условиях шлифования по жесткой схеме (круглое наружное и внутреннее шлифование, плоское шлифование). Однако шлифование по схеме выхаживания не позволяет в полной мере реализовать кинематические возможности рабочей поверхности круга в формировании шероховатости поверхности из-за разновысотного выступания зерен над уровнем связки круга, в результате чего лишь небольшая часть наиболее выступающих зерен участвует в процессе резания, что не позволяет существенно уменьшить шероховатость поверхности. Кроме того, как установлено экспериментальными исследованиями, это приводит к появлению на обрабатываемых поверхностях отдельных рисок-царапин, которые сложно удалить на последующей операции доводки.

Существенным ограничением условий уменьшения шероховатости поверхности в процессе выхаживания является также возникновение в технологической системе упругих перемещений и колебаний, которые как бы условно увеличивают разновысотное расположение зерен на рабочей поверхности круга и, соответственно, шероховатость обработанной поверхности. Поэтому наибольший эффект от применения схемы выхаживания может быть достигнут в процессе хонингования, когда необходимо обеспечить одновременно высокие показатели точности и шероховатости поверхности.

Выводы

В работе проведен теоретический анализ закономерностей формирования шероховатости поверхности для различных кинематических схем абразивной обработки, включая схемы обработки свободным и связанным абразивом. Показано, что схемы обработки связанным абрази-

вом (схемы шлифования) характеризуются высокой производительностью, однако с точки зрения уменьшения шероховатости поверхности ограничены возможностями. Установлено, что уменьшить шероховатость поверхности при круглом наружном шлифовании можно увеличением количества одновременно работающих зерен на рабочей поверхности круга и длины дуги контакта круга с обрабатываемой деталью, применяя, например, охватывающее шлифование. Эффективно использовать также шлифовальные круги с плосковершинными зёрнами, образованными путем дополнительного механического воздействия на них алмазным правящим карандашом. В результате обеспечивается фактически одновысотное выступание зерен над уровнем связки и увеличение количества одновременно работающих зерен. При обработке отверстия эффективно шлифование производить торцовой поверхностью круга, имеющей форму окружности и обеспечивающей наибольшую площадь контакта с обрабатываемым отверстием. Показано, что за счет установки оси вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия детали и применения мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П достигнута шероховатость поверхности $R_a=0,04$ мкм, чего нельзя добиться при обычном внутреннем шлифовании абразивными и алмазными кругами. Показано в этом направлении наибольший эффект обработки можно достичь при хонинговании, когда диаметр хона равен диаметру обрабатываемого отверстия, а в резании одновременно участвует наибольшее количество зерен.

Список использованных источников:

1. Алмазно-абразивная обработка материалов : справочник / Под ред. проф. А.Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 390 с.
2. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1989. – 320 с.
3. Евсеев Д.Г. Физические основы процесса шлифования / Д.Г. Евсеев, А.И. Сальников. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 128 с.
4. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий. – К. : Наукова думка, 1979. – 244 с.
5. Дитиненко С.О. Підвищення ефективності технології фінішної обробки циліндричних поверхонь твердосплавних виробів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / С.О. Дитиненко; НТУ «ХПІ». – Харків, 2005. – 26 с.
6. Новиков Ф.В. Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятности / Ф.В. Новиков, В.Г. Шкурупий // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2004. – № 44. – С. 140-149.

Bibliography:

1. Diamond abrasive processing of materials: a handbook / ed. prof. A.N. Reznikov. – M. : Mashinostroenie, 1977. – 390 p. (Rus.)
2. Korolev A.V. Theoretical and probabilistic basis abrasion / A.V. Korolev, J.K. Novoselov. – Saratov : Publishing House of Saratov. Univ., 1989 – 320 p. (Rus.)
3. Evseev D.G. Physical fundamentals of the process of grinding / D.G. Evseev, A.I. Salnikov. – Saratov : Publishing House of Saratov. Univ., 1978. – 128 p. (Rus.)
4. The quality of the surface rough and abrasive machining / E.V. Ryzhov, A.A. Sagarda, V.B. Ilyitsky, I.H. Chepovetsky. – K. : Naukova dumka, 1979. – 244 p. (Rus.)
5. Ditinenko S.O. Improved technology finishing cylindrical surfaces of cemented carbide products : Phd.thesis : 05.02.08 / S.O. Ditinenko; NTU «KhPI». – Kharkiv, 2005. – 26 p. (Ukr.)
6. Novikov F.V. Studies of surface roughness when the diamond-abrasive machining methods of probability / F.V. Novikov, V.G. Shkurupiy // Reporter of the NTU «KhPI». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2004. – № 44. – P. 140-149. (Rus.)

Рецензент: В.В. Суглобов
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 14.06.2016