

10. Elastic-plastic self-strengthening thick-walled containers pressurized elastic medium / V.A. Barvinok [et al.] // Bulletin of Samara Scientific Center of the Russian Academy Science. – 1999. – № 1. – P. 157-160. (Rus.)
11. Lipatov Y.S. Structure and properties of polyurethanes / Y.S. Lipatov, Y.Y. Kerch, L.M. Sergeeva. – Kiev : Naukova Dumka, 1970. – 288 p. (Rus.)
12. Timoshenko V.A. Separation of elastic sheet metal environments / V.A. Timoshenko, V.S. Bogoev. – Chisinau : Shtiintsa, 1988. – 106 p. (Rus.)
13. Ilyin L.N. Technology sheet metal forming / L.N. Il'in, E.I. Semenov. – M. : Drofa, 2009. – 475 p. (Rus.)
14. Kozhushko A.A. Calculation of stress-strain state of the elastomeric elements of vibration isolators with consideration of peculiarities of their viscoelastic deformation : Phd. thesis : 01.02.06 / A.A. Kozhushko; Omsk state technical university. – Omsk, 2012. – 18 p. (Rus.)
15. Yakovlev S.N. The calculation of polyurethane parts working in compression when a static load / S.N. Yakovlev // Scientific and technical Gazette of St. Petersburg state Polytechnic University. – 2014. – № 1(190) – P. 137-142. (Rus.)
16. Balalaeva E.Y. Development of an automated methodology for calculating annular elastic compensator of the errors of the system «press-stamp» / E.Y. Balalaeva, V.V. Kukhar // Reporter of the National technical university «KPI». Special issue : New solutions in modern technologies : Collection of scientific works. – Kharkiv, 2009. – № 31. – P. 55-63. (Rus.)
17. Kukhar V.V. Analytical study of the universal elastic compensator of the errors of slide direction / V.V. Kukhar, E.Y. Balalaeva // Bulletin of the Kremenchug state Polytechnic University. M. Ostrogradsky / KSPU. – Kremenchug, 2008. – Issue 5 (52), part 2. – P. 57-60. (Rus.)
18. Balalaeva E.Y. Calculation of the universal elastic rotatable compensator of the errors of the system «press-stamp» for the operation of the extrusion-molding / E.Y. Balalaeva // Processing materials by pressure. – 2011. – № 1(26). – P. 193-198. (Rus.)
19. Efimov N.A. Technological capabilities punching-cutting sheet metal parts in the open volume of polyurethane / N.A. Efimov // Bulletin of Samara State Academy of Railway Transport. – 2006. – № 6. – P. 12-16. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самогугин
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 26.09.2015

УДК 621.923

© Рябенков И.А.¹, Анділахай В.А.²

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПО ЖЕСТКОЙ СХЕМЕ

Обоснованы оптимальные условия шлифования, которые основаны на применении абразивного круга, работающего в режиме самозатачивания и фактически исключая трение связки круга с обрабатываемым материалом. Показана также возможность уменьшения силы резания за счет увеличения отношения скоростей круга и детали.

Ключевые слова: *шлифование, резание, трение, сила резания, условное напряжение резания, технологическая система, упругое перемещение, скорость детали.*

Рябенков И.О., Анділахай В.О. Підвищення ефективності технології врізного шліфування за жорсткою схемою. Обґрунтовано оптимальні умови шліфування,

¹ канд. техн. наук, вед. інженер-технолог, ГП «Харьковский машиностроительный завод «ФЭД», г. Харьков
² канд. техн. наук, доцент ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь,
andilahaiv@mail.ru

які засновані на застосуванні абразивного круга, що працює в режимі самозагострювання й фактично виключає тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом. Показана також можливість зменшення сили різання за рахунок збільшення відношення швидкостей круга й деталі.

Ключові слова: шліфування, різання, тертя, сила різання, умовне напруження різання, технологічна система, пружне переміщення, швидкість деталі.

I.O. Ryabenkov, B.O. Andilabay. Improving the plunge grinding technology efficiency through a rigid scheme use. Theoretical bases of grinding technology researches results form the basis of this work. It has been shown that grinding efficiency increase can be achieved through the use of new kinematic grinding schemes and progressive designs of abrasive tools. However, not enough attention is paid to the calculation of the main technological machining parameters with due regard to separate processes of cutting and friction at grinding, thus restricting the effective application of these kinematic grinding schemes and scientifically grounded selection of optimal processing conditions. In this paper a mathematical model has been developed for determining the material removal rate and cutting force at plunge grinding, what made it possible to substantiate reducing the power strength at grinding and to increase productivity. Calculations revealed that the cutting force at plunge grinding is conditioned by the disk bond friction against the material being processed, the intensity of which in the course of processing time increases proportionally due to an increase of elastic movements in the technological system. Proceeding from these results the optimum grinding conditions based on the use of the abrasive disk that works under self-sharpening conditions, thus eliminating the disk bond friction against the material being processed, have been grounded. In this case, the abrasive disk provides complete removal of the processed material supplied to the cutting zone at the nominal speed of a workpiece movement. Also the ability to reduce cutting forces through the increase of the disk speed and the workpiece speed ratio has been shown.

Keywords: grinding, cutting, friction, cutting force, conventional stress cutting technology system, elastic displacement, velocity details.

Постановка проблеми. При изготовлении высокоточных деталей достаточно широко используются технологии врезного шлифования по жесткой схеме. Это связано с возможностью уменьшения силовой и тепловой напряженности процесса резания и повышения показателей точности, качества и производительности обработки. Вместе с тем, как показывает практика шлифования, технологические возможности этой прогрессивной технологии используются не в полной мере из-за отсутствия научно обоснованных практических рекомендаций, обеспечивающих снижение интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом, являющегося основным фактором повышения силовой и тепловой напряженности процесса шлифования. Поэтому актуально решение задачи теоретического определения технологических возможностей врезного шлифования и условий их осуществления на практике.

Анализ последних исследований и публикаций. В основу работы положены результаты исследований [1-3], в которых разработаны теоретические основы технологий шлифования. Показано, что повысить эффективность шлифования можно за счет применения новых кинематических схем шлифования и прогрессивных конструкций абразивных инструментов. Однако при этом недостаточно внимания уделено расчету основных технологических параметров обработки на основе раздельного учета процессов резания и трения при шлифовании [4], что ограничивает возможности эффективного применения данных кинематических схем шлифования и научно обоснованного выбора оптимальных условий обработки.

Цель работы – определение условий снижения силовой напряженности процесса шлифования и повышения производительности обработки на основе разработки математической модели определения интенсивности съема материала и силы резания при врезном шлифовании. В работе поставлена задача обоснования потенциальных возможностей врезного шлифования с учетом раздельного анализа процессов резания и трения.

Изложение основного материала. Тангенциальная P_z и радиальная P_y , составляющие

силы резания при шлифовании прямолинейной детали, движущейся по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью $V_{дет}$ (рис. 1), описываются зависимостями [5]:

$$P_z = \frac{\sigma F V_{дет0}}{V_{кр}} + f_1 c (V_{дет} - V_{дет0})\tau; \quad (1)$$

$$P_y = \frac{\sigma F V_{дет0} \operatorname{tg}(\psi + \gamma)}{V_{кр}} + c (V_{дет} - V_{дет0})\tau, \quad (2)$$

где σ – условное напряжение резания при шлифовании, Н/мм²; F – площадь поперечного сечения обрабатываемой прямолинейной детали, мм²; $V_{дет}$ – номинальная линейная скорость съема материала, м/с; $V_{дет0}$ – фактическая линейная скорость съема материала, м/с ($V_{дет0} \leq V_{дет}$); $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; τ – время обработки, с; ψ – условный угол трения зерна с обрабатываемым материалом; γ – условный (отрицательный) передний угол режущего зерна; c – приведенная жесткость технологической системы, Н/мм; f_1 – коэффициент трения связки круга с обрабатываемым материалом.

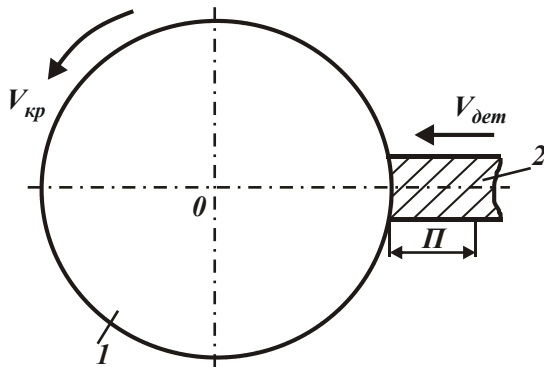


Рис. 1 – Расчетная схема процесса шлифования: 1 – круг; 2 – деталь

риала $V_{дет0}$.

На рис. 2 приведены результаты расчетов первого и второго слагаемых зависимости (1) для исходных данных: $\sigma = 10^5$ Н/мм², $F = 100$ мм², $V_{дет0} = 6$ мм/мин, $V_{кр} = 30$ м/с, $c = 3 \cdot 10^3$ Н/мм, $f_1 = 0,4$, $V_{дет} = 7$ мм/мин.

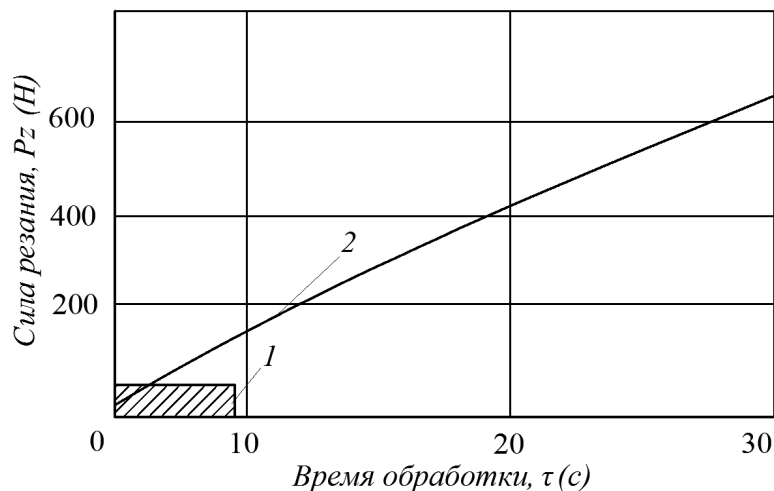


Рис. 2 – Расчетные значения первого (1) и второго (2) слагаемых зависимости (1)

Как видно, первое слагаемое зависимости (1) существенно меньше второго слагаемого (почти в 10 раз при $\tau=10$ с). Причем, с увеличением времени обработки τ второе слагаемое пропорционально увеличивается. Поэтому необходимо ограничиваться временем обработки, поскольку дальнейшее продолжение процесса шлифования нецелесообразно – это приводит к значительному увеличению тангенциальной P_z составляющей силы резания при шлифовании. Следовательно, для эффективного использования данной схемы шлифования необходимо исключить образование второго слагаемого в зависимости (1) за счет применения шлифовального круга, работающего в режиме самозатачивания и обеспечивающего полный съем подводимого в зону резания обрабатываемого материала ($V_{dem0} = V_{dem}$).

Зависимости (1) и (2) следует считать упрощенными, т.к. они не учитывают изменение фактической скорости съема металла V_{dem0} с течением времени обработки. Поэтому важно установить закон изменения V_{dem0} во времени. Для этого следует исходить из условия, что радиальная составляющая силы резания P_y равна силе, определяемой величиной упругого перемещения y , возникающего в технологической системе, т.е. $P_y = c y$, где $y = V_{dem} \tau - \int V_{dem0} d\tau$; V_{dem} – номинальная линейная скорость съема металла, м/с.

Из зависимости (2) без учета второго слагаемого (т.е. без учета трения связки круга с обрабатываемым материалом) получено интегральное уравнение:

$$\sigma \frac{F V_{dem0}}{V_{кр}} \operatorname{tg}(\psi + \gamma) = c V_{dem} \tau - c \int V_{dem0} d\tau. \quad (3)$$

Рассматривая V_{dem} постоянной величиной и дифференцируя все слагаемые уравнения (3) по времени обработки τ , получено дифференциальное уравнение, в котором неизвестной функцией является $V_{dem0}(\tau)$:

$$\frac{dV_{dem0}}{d\tau} + P_1 V_{dem0} = P_2, \quad (4)$$

$$\text{где } P_1 = \frac{c V_{кр}}{\sigma F \operatorname{tg}(\psi + \gamma)}; P_2 = \frac{c V_{кр} V_{dem}}{\sigma F \operatorname{tg}(\psi + \gamma)}.$$

Решение дифференциального уравнения (4) общеизвестно [6]:

$$V_{dem0} = \left[\int d\tau P_2 e^{\int P_1 d\tau} + C_1 \right] e^{-\int P_1 d\tau}, \quad (5)$$

где C_1 – постоянная интегрирования.

Преобразуя зависимость (5), получено:

$$V_{dem0} = V_{dem} + C_1 e^{-P_1 \tau}. \quad (6)$$

Для начального условия $V_{dem0}(\tau=0) = 0$ постоянная интегрирования $C_1 = -V_{dem}$. Тогда зависимость (6) примет вид:

$$V_{dem0} = V_{dem} \left(1 - e^{-P_1 \tau} \right) = V_{dem} \left(1 - e^{-\frac{c V_{кр} \tau}{\sigma F \operatorname{tg}(\psi + \gamma)}} \right). \quad (7)$$

Общий вид зависимости (7) показан на рис. 3,а. С течением времени обработки τ фактическая линейная скорость съема материала V_{dem0} непрерывно увеличивается, асимптотически приближается к номинальному значению V_{dem} .

Величина упругого перемещения y , возникающего в технологической системе, с учетом зависимости (7) опишется:

$$y = V_{dem} \tau - \int V_{dem0} d\tau = -\frac{V_{dem}}{P_1} e^{-P_1 \tau} + C_2, \quad (8)$$

где C_2 – постоянная интегрирования.

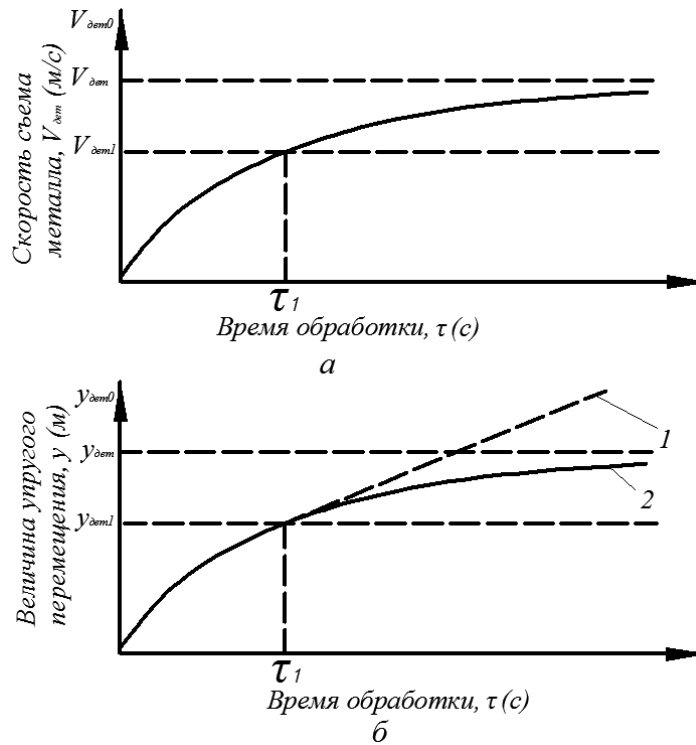


Рис. 3 – Зависимости V_{dem0} (а) и y (б) от τ

С учетом начального условия $y(\tau = 0) = 0$ постоянная интегрирования $C_2 = V_{dem} / P_1$. Тогда зависимость (8) примет вид:

$$y = \frac{V_{dem}}{P_1} \left(1 - e^{-P_1 \tau} \right) = \frac{\sigma F \operatorname{tg}(\psi + \gamma) V_{dem}}{c V_{кр}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{c V_{кр} \tau}{\sigma F \operatorname{tg}(\psi + \gamma)}} \right). \quad (9)$$

Как видно, зависимости (9) и (7) имеют одинаковую структуру, т.е. параметры V_{dem0} и y изменяются по одному закону (рис. 3,б), обусловленному характером изменения величины упругого перемещения y , возникающего в технологической системе с течением времени обработки τ . Номинальная величина упругого перемещения y_0 , согласно зависимости (9), определяется зависимостью:

$$y_0 = \frac{V_{dem}}{P_1} = \frac{\sigma F \operatorname{tg}(\psi + \gamma) V_{dem}}{c V_{кр}}. \quad (10)$$

Уменьшить величину упругого перемещения y_0 можно уменьшением параметров σ , F , ψ , γ , V_{dem} и увеличением c , $V_{кр}$.

Установленный характер изменения функции V_{dem0} , в соответствии с зависимостью (7), справедлив при условии, когда шлифовальный круг обеспечивает полный сьем подводимого в зону резания обрабатываемого материала со скоростью V_{dem} . При невыполнении данного условия, т.е. когда полный сьем подводимого в зону резания обрабатываемого материала происходит с меньшей скоростью $V_{dem1} < V_{dem}$, при достижении равенства скоростей $V_{dem0} = V_{dem1}$ произойдет стабилизации процесса шлифования во времени (рис. 3,а).

Время $\tau = \tau_1$, при котором произойдет стабилизации процесса шлифования, определяется из зависимости (6) при условии $V_{dem0} = V_{dem1}$, т.е.

$$V_{dem1} = V_{dem} - V_{dem} e^{-P_1 \tau_1}. \quad (11)$$

Откуда после преобразований получено:

$$\tau_1 = \frac{\sigma F \operatorname{tg}(\psi + \gamma)}{c V_{кр}} \ln \left| \frac{1}{\left(1 - \frac{V_{\text{дем1}}}{V_{\text{дем}}}\right)} \right|. \quad (12)$$

При условии $\tau > \tau_1$ в технологической системе будет образовываться упругое перемещение y , увеличивающееся по линейной зависимости с течением времени τ (график 2 на рис. 3,б), т.е.

$$y = y_1 + (V_{\text{дем}} - V_{\text{дем1}}) (\tau - \tau_1), \quad (13)$$

где $y_1 = \frac{V_{\text{дем}}}{P_1} (1 - e^{-P_1 \tau_1})$ – величина упругого перемещения при условии $\tau = \tau_1$.

С учетом зависимости (7) для условия $\tau > \tau_1$ после соответствующих преобразований зависимость (13) принимает вид:

$$y = \frac{\sigma F \operatorname{tg}(\psi + \gamma) V_{\text{дем}}}{c V_{кр}} \left(1 - e^{-\frac{c V_{кр} \tau_1}{\sigma F \operatorname{tg}(\psi + \gamma)}} \right) + (V_{\text{дем}} - V_{\text{дем1}}) (\tau - \tau_1). \quad (14)$$

Как видно, при условии $\tau = \tau_1$ величина упругого перемещения принимает значение $y = y_1$, а при условии $\tau > \tau_1$ принимает большее значение $y > y_1$ – из-за наличия второго слагаемого в зависимости (14), обусловленного трением связки круга с обрабатываемым материалом.

Радиальная составляющая силы резания $P_y = c \cdot y$ с учетом зависимости (14) аналитически описывается:

$$P_y = \frac{\sigma F \operatorname{tg}(\psi + \gamma) V_{\text{дем}}}{V_{кр}} \left(1 - e^{-\frac{c V_{кр} \tau_1}{\sigma F \operatorname{tg}(\psi + \gamma)}} \right) + c (V_{\text{дем}} - V_{\text{дем1}}) (\tau - \tau_1). \quad (15)$$

Соответственно, тангенциальная составляющая силы резания $P_z = P_y \cdot K_{ш}$ с учетом зависимости (15) выражается:

$$P_z = \frac{\sigma F \operatorname{tg}(\psi + \gamma) V_{\text{дем}} K_{ш}}{V_{кр}} \left(1 - e^{-\frac{c V_{кр} \tau_1}{\sigma F \operatorname{tg}(\psi + \gamma)}} \right) + c K_{ш} (V_{\text{дем}} - V_{\text{дем1}}) (\tau - \tau_1). \quad (16)$$

Зависимости (15) и (16) имеют более сложный вид по сравнению с аналогичными упрощенными зависимостями (1) и (2). Однако, характер изменения составляющих силы резания P_z и P_y от всех слагаемых, входящих в зависимости (1), (2), (15), (16), аналогичен. Наличие в первых слагаемых зависимостей (15) и (16) выражения, заключенного в круглые скобки, приводит к их уменьшению. Также приводит к уменьшению вторых слагаемых в зависимостях (15) и (16) наличие в них множителя $(\tau - \tau_1)$, который в зависимостях (1) и (2) принимает большее значение, равное τ . Следовательно, учет изменения фактической скорости съема металла $V_{\text{дем0}}$ с течением времени обработки в результате решения интегрального уравнения (3) приводит к уменьшению составляющих силы резания P_z и P_y . Однако при этом, по-прежнему, в формировании составляющих силы резания P_z и P_y , согласно зависимостям (15) и (16), преобладают вторые слагаемые, обусловленные трением связки круга с обрабатываемым материалом. Исходя из этого, на практике в первом приближении с целью упрощения анализа параметров обработки можно использовать приближенные зависимости (1) и (2). Они позволяют принципиально решить вопрос определения условий уменьшения силовой напряженности процесса шлифования и повышения производительности обработки.

Выводы

В работе разработана математическая модель определения интенсивности съема материала и силы резания при врезном шлифовании, что позволило обосновать условия снижения силовой напряженности процесса шлифования и повышения производительности обработки. Расчетами установлено, что сила резания при врезном шлифовании обусловлена, главным образом, наличием трения связки круга с обрабатываемым материалом, интенсивность которого с течением времени обработки пропорционально увеличивается в связи с увеличением в технологической системе упругих перемещений. Исходя из этого, обоснованы оптимальные условия шлифования, которые основаны на применении абразивного круга, работающего в режиме самозатачивания и фактически исключающего трение связки круга с обрабатываемым материалом. В этом случае шлифовальный круг обеспечивает полный съем подводимого в зону резания обрабатываемого материала с номинальной скоростью перемещения детали. Показана также возможность уменьшения силовой напряженности процесса шлифования за счет уменьшения условного напряжения резания и увеличения отношения скоростей круга и детали.

Список использованных источников:

1. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с.
2. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.А. Королев. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 212 с.
3. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов [и др.]. – К. : Техніка, 1983. – 184 с.
4. Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 802 с. – (Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова : в 10-ти т.; Т. 4).
5. Рябенков И.А. Оценка влияния интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом на эффективность процесса шлифования / И.А. Рябенков, Ф.В. Новиков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : Зб. наук. пр. / НТУ «ХПІ». – Харків, 2014. – № 43 (1086). – С. 143-147.
6. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. – М. : Госиздат физ.-мат. литературы, 1959. – 783 с.

Bibliography:

1. Novoselov J.K. The dynamics shaping surfaces during abrading / J.K. Novoselov. – Saratov, 1979. – 232 p. (Rus.)
2. Korolev A.V. The study of the formation surfaces of the tool and workpiece during abrasion / A.A. Korolev. – Saratov : Publishing house Saratov University, 1975. – 212 p. (Rus.)
3. Managing the grinding / A.V. Yakimov [et al.]. – K. : Tehnika, 1983. – 184 p. (Rus.)
4. Theory abrasive and abrasive diamond material processing. – Odessa : ONPU, 2002. – 802 p. – (Physical and mathematical theory of processing materials and technologies, machine building eniya / Under total. ed. F.V. Novikov and A.V. Yakimov : in ten volumes; Vol. 4). (Rus.)
5. Ryabentov I.A. Assessing the impact of the intensity of the friction circle bundles processed material on the efficiency of the grinding / I.A. Ryabentov, F.V. Novikov // Reporter of the National technical university «KPI» : Collection of scientific works / NTU «KPI». – Kharkiv, 2014. – № 43 (1086). – P. 143-147. (Rus.)
6. Profitable M.J. Directory of higher mathematics / M.J. Profitable. – M. : Gosizdat physical and mathematical literature, 1959. – 783 p. (Rus.)

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

Статья поступила 26.09.2015