

УДК 67.05

Анализ взаимосвязи износа круга и сил резания при алмазном шлифовании

Шавва М. А.^{1,*}, Грубый С. В.²

[*katapu@mail.ru](mailto:katapu@mail.ru)

¹Всероссийский Научно-Исследовательский Инструментальный
Институт, Москва, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Приведены расчетные зависимости, позволяющие установить взаимосвязь между износом алмазного шлифовального круга и силами резания. Рассчитаны силы резания, действующие на единичное алмазное зерно, и суммарные силы резания при шлифовании. Проведено сравнение теоретического расчета сил и расчета по степенным формулам, заимствованным из литературных источников. Раскрыта методика эксперимента по измерению сил при плоском алмазном шлифовании торцом круга. Представлены результаты экспериментов по измерению сил при алмазном шлифовании твердого сплава. Проанализирована сходимость между результатами расчетов по предложенной модели, результатами расчетов по степенным формулам и экспериментальными данными. Предложена последовательность определения стойкости алмазного круга по контролю мощности шлифовального шпинделя.

Ключевые слова: алмазное шлифование, силы резания, стойкость алмазного круга, правка алмазного круга, контроль силы резания

Введение

Силы резания при шлифовании влияют на качество обработанной поверхности, а также по уровню сил можно оценить степень износа алмазного круга и своевременно прибегнуть к восстановлению его режущих свойств. В свою очередь, мощность привода шлифовального круга прямо пропорциональна тангенциальной составляющей силы резания, поэтому непрерывный контроль изменения силы можно осуществлять по измерению мощности привода.

Сила резания при шлифовании непосредственно связана с износом абразивных зерен на его поверхности [1]. Зависимость между износом круга и силами шлифования необходима для решения поставленной задачи по контролю сил. Зависимость должна учитывать режимные параметры процесса и свойства абразивного инструмента.

В литературных источниках расчет сил при шлифовании сводится к использованию степенных уравнений, полученных по результатам экспериментальных исследований [2, 3]. Расчетные данные, полученные по степенным уравнениям, достаточно точно

характеризуют силы шлифования, однако эти данные применимы только для конкретных условий обработки.

Теоретический расчет сил в зоне резания при шлифовании, как правило, носит самый общий характер [4, 5]. Полученные зависимости можно использовать в качестве инструмента для анализа при конструировании абразивных инструментов и назначения условий процесса абразивной обработки конкретных деталей [6].

1. Теоретический расчет силы резания при алмазном шлифовании

1.1. Геометрическая форма алмазного зерна

Для решения задачи по расчету сил в зоне резания при алмазном шлифовании необходимо рассмотреть частный случай резания единичным алмазным зерном. При этом особое значение имеет вопрос геометрической формы алмазного зерна. В работе [6] приводится перечень наиболее часто применяемых допущений при определении формы алмазного зерна. В качестве эквивалентной формы зерна применяют:

1. Сферу с диаметром, равным среднему диаметру алмазных зерен в пределах поверхности рассматриваемого шлифовального круга.

2. Конус или пирамиду, основные размеры которых напрямую зависят от параметров абразива.

3. Различного рода многогранники, в этом случае поперечное сечение алмазного зерна возможно рассматривать как неправильный многоугольник.

В работах [7, 8] в качестве эквивалентной формы алмазного зерна применяется параболоид вращения. Недостатком такой формы является то, что параболоид вращения не ограничен, следовательно, не может быть ограниченной и величина износа.

Для нахождения зависимости между износом алмазного зерна и силами резания величина износа зерна должна быть конечной и определяться, исходя из условий резания и параметров абразива. Для выполнения этих условий в работах [7, 9] в качестве эквивалентной геометрической формы алмазного зерна предложен эллипсоид вращения с постоянным отношением полуосей. В источнике [9] приведены данные об исследовании геометрической формы алмазных зерен, доказано, что эллипсоид максимально приближен к форме алмазного зерна, представлено ориентировочное значение коэффициента отношения полуосей эллипсоида.

По результатам проведенного анализа в качестве эквивалентной геометрической формы алмазного режущего зерна в рассмотренном случае плоского шлифования заготовок торцом круга принят эллипсоид вращения с постоянным отношением полуосей, ориентированный таким образом, что наибольшая полуось эллипсоида перпендикулярна к режущей поверхности шлифовального круга.

Таким образом, при определении формы алмазного зерна были введены следующие допущения:

1) единичное зерно представляет собой эллипсоид с постоянным отношением полуосей, равным α [9]. Тогда поверхность, используемая для аппроксимации формы зерна, может быть задана уравнением (1):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (1)$$

где a, c - малые полуоси эллипсоида, мкм, причем $a = c$;

b - большая полуось эллипсоида, мкм;

2) алмазное зерно, аппроксимированное эллипсоидом вращения, ориентировано таким образом, что большая полуось b перпендикулярна к плоскости контакта заготовки и шлифовального круга;

3) зависимость величины полуосей эллипсоида вращения от геометрического размера алмазных зерен задана выражением (2):

$$d_{cp} = a + b = b(\alpha + 1), \quad (2)$$

где d_{cp} - средний диаметр алмазных зерен, мкм.

1.2. Силы, действующие на единичное режущее зерно

При шлифовании происходит постепенный износ алмазных зерен, который учитывается в предложенной модели. Вид частично изношенного зерна в произвольный момент резания представлен на рис. 1.

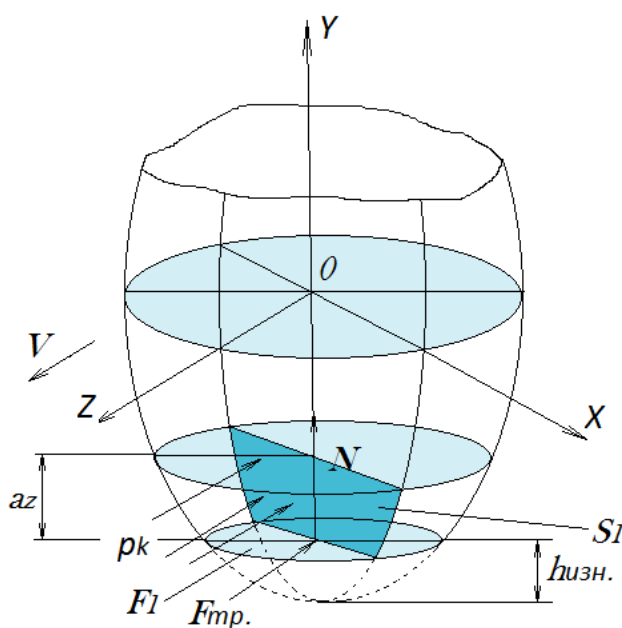


Рис. 1. Частично изношенное единичное алмазное зерно в произвольный момент резания и силы, действующие на поверхности зерна.

Плоскость износа алмазного зерна отстоит от вершины эллипсоида на величину линейного износа - $h_{изн.}$, мкм. На зерно действуют следующие силы:

- сила реакции опоры - N , действующая на плоскость износа зерна;

■ сила трения - $F_{тр.}$ между плоскостью износа зерна и обрабатываемой поверхностью, которая задается соотношением (3):

$$F_{тр.} = \mu N, \quad (3)$$

где μ - коэффициент трения на поверхности контакта;

■ суммарное нормальное давление по контактной поверхности p_k , действующее на площадь, находящуюся в нормальном сечении алмазного зерна и заключенную между плоскостью износа зерна и плоскостью, определяющей величину снимаемого припуска a_z единичным зерном в данный момент времени.

В отношении параметров, действующих на единичное зерно, сделаны следующие допущения:

1. Распределение напряжений по поверхности зерна в зоне резания постоянно;
2. Напряжения по поверхности зоны резания пропорционально твердости обрабатываемого материала;
3. Коэффициент трения μ - постоянен по всей поверхности контакта между алмазным зерном и заготовкой.

Таким образом, проекционные составляющие силы резания, действующие на единичное зерно при шлифовании, могут быть выражены зависимостями (4), (5):

$$\begin{aligned} F_{pz} &= p_k S_1 + F_{тр.}, \\ F_{py} &= N \end{aligned}, \quad (4, 5)$$

где S_1 - величина площади сечения, на которое действует суммарное напряжение по контактной поверхности, мкм^2 .

Величина площади сечения может быть рассчитана по формуле (6):

$$\begin{aligned} S_1 = 2 \int_{-b+h_{изн}}^{-b+h_{изн}+a_z} \frac{a}{b} \sqrt{b^2 - y^2} dy = ab \left(\arcsin \frac{-b+h_{изн}}{b} - \arcsin \frac{-b+h_{изн}+a_z}{b} - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \sin \left(2 \arcsin \frac{-b+h_{изн}}{b} \right) + \frac{1}{2} \sin \left(2 \arcsin \frac{-b+h_{изн}+a_z}{b} \right) \right) \end{aligned}, \quad (6)$$

где величина a_z задается соотношением (7):

$$a_z = \frac{t}{n_p}, \quad (7)$$

где t - суммарный припуск при шлифовании за один проход, мкм/дв. ход ;

n_p - число рабочих (активных) зерен на поверхности шлифовального круга.

Для расчета суммарного напряжения по контактной поверхности p_k необходимо рассмотреть схему действия сил в зоне резания. На рис. 2 представлена схема действия сил на боковую поверхность зерна.

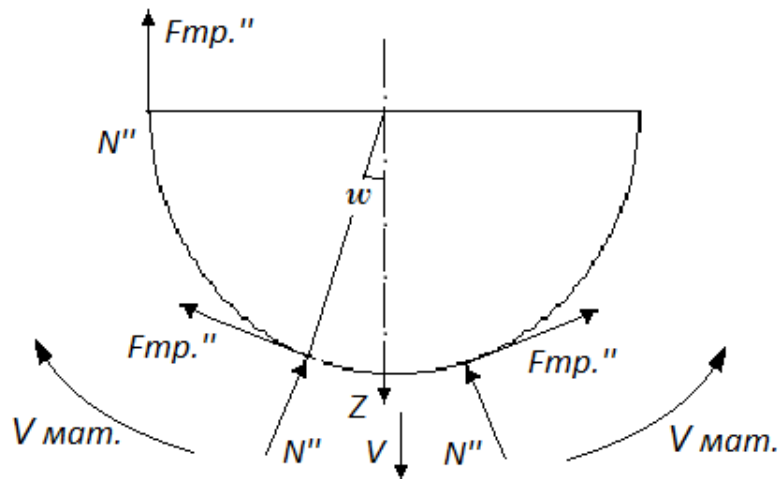


Рис. 2. Схема действия сил на боковую поверхность зерна.

Схема учитывает следующие силы:

N'' - нормальная сила реакции, действующая на зерно со стороны обрабатываемого материала;

$F_{mp.}''$ - сила трения.

При проецировании этих сил на ось Z , получаем выражения (8), (9):

$$\begin{aligned} N''_{\epsilon} &= N'' \cos \omega \\ F_{mp.}''_{\epsilon} &= F_{mp.}'' \sin \omega \end{aligned} \quad (8, 9)$$

причем, при рассмотрении половины периметра зоны контакта, угол ω меняется от 90° до 0° .

Суммируя векторы N'' и $F_{mp.}''$ на полупериметре, с учетом изменения угла ω , получаем сумму (10) их интегральных абсолютных значений:

$$\overline{N''} + \overline{F_{mp.}''} = \int_{90^\circ}^{0^\circ} N'' \cos \omega d\omega + \int_{90^\circ}^{0^\circ} F_{mp.}'' \sin \omega d\omega = N'' + F_{mp.}'' . \quad (10)$$

Нормальные силы определены через нормальное давление, а силы трения – через касательное напряжение. В свою очередь, нормальное давление пропорционально твердости обрабатываемого материала, как показано в выражении (11):

$$\sigma_n \approx \beta \cdot HV , \quad (11)$$

где HV - твердость обрабатываемой поверхности по шкале Виккерса, МПа; β - константа, выражающая отношение величин σ_n и HV . Например, по литературному источнику [10] величина $\beta = 1 \dots 1,23$. Принимаем меньшее значение предела, тогда $\beta = 1$, т.е. нормальное давление на поверхности зерна равно твердости обрабатываемого материала, что и следует из формулы (12):

$$\sigma_n \approx HV . \quad (12)$$

Касательное напряжение выражается через нормальное напряжение и коэффициент трения по формуле (13):

$$p_{F_{np.}} = \mu \sigma_n. \quad (13)$$

Аналогично может быть получено выражение (14) для значения нормальной силы реакции, действующей на зерно со стороны изношенной поверхности:

$$N = \sigma_n F_1, \quad (14)$$

где F_1 - площадь поверхности износа алмазного зерна, которая может быть рассчитана по выражению (15):

$$F_1 = 2\pi a \sqrt{1 - \frac{(-b + h_{изн} + a_z)^2}{b^2}}. \quad (15)$$

Таким образом, с учетом выражений (10), (12), (14) составляющие силы резания, действующие на единичное зерно, могут быть описаны зависимостями (16), (17):

$$\begin{aligned} F_{pz} &= HV \cdot (1 + \mu) S_1 + HV \cdot \mu F_1 \\ F_{py} &= HV \cdot F_1 \end{aligned} \quad (16, 17)$$

Составляющие силы зависят от коэффициента трения между площадкой износа зерна и обрабатываемой поверхностью, а также от твердости обрабатываемого материала, величины износа зерна и припуска на единичное зерно.

Приведенные выше выражения описывают силы в зоне резания при шлифовании твердого сплава. В случае обработки хрупких материалов стружкообразование происходит по другому механизму.

Под действием алмазного зерна в зоне резания образуется система трещин, распространяющихся в направлении движения резания. На этом этапе стружкообразования происходит непрерывное повышение силы резания, обеспечивающее развитие ведущей равномерно-подвижной трещины. Оно продолжается до тех пор, пока напряжения не превысят предел прочности материала [13].

При внесении определенной коррекции рассмотренную выше модель расчета сил шлифования можно адаптировать для случая обработки хрупких оптических материалов, таких как стекло марки К8.

1.3. Расчет суммарной силы в зоне резания при шлифовании

Для расчета суммарной силы резания при алмазном шлифовании необходимо определить число режущих зерен на поверхности инструмента, находящихся в контакте между заготовкой и кругом. Определенно ориентированные зерна на поверхности шлифовального круга имеют вылет фиксированной величины из связки. Необходимо задать закон распределения вылетов этих зерен из связки в пределах рабочего слоя шлифовального круга [9]. Этот закон не может быть выявлен без расчета средневероятного количества алмазных зерен в единичном объеме шлифовального круга.

Средневероятное количество алмазных зерен в единичном объеме шлифовального круга может быть рассчитано по формуле (18):

$$n_w \approx \frac{3}{200\pi} \frac{K_0}{\alpha^2 (2b)^3}, \quad (18)$$

где K_0 - концентрация абразивного материала в шлифовальном круге в процентах.

Данная формула учитывает нормальный закон распределения размеров большой полуоси алмазного зерна.

Зададимся также параметром, описывающим выступ зерна с поверхности связки круга, как относительная критическая заделка зерна - ε_k . Этот параметр равен:

$$\varepsilon_k = l_k / (2b),$$

где l_k - глубина заделки зерна в связке в момент, когда оно уже не удерживается последней на поверхности круга. Тогда вылет зерна из связки - Δ , находится в пределах:

$$0 \leq \Delta \leq (1 - \varepsilon)(2b).$$

Если в единице объема круга содержится n_w зерен, то количество зерен, имеющих размер большой оси $2b$ и выступающих из связки, на единичной площади задается выражением (19):

$$n = n_w (1 - \varepsilon)(2b) \varphi(2b) \cdot d(2b), \quad (19)$$

где $\varphi(2b)$ - плотность распределения размеров зерен.

Подставляя значение n_w из (19), получаем выражение (20):

$$n = \frac{3K_0(1 - \varepsilon)}{200\pi\alpha^2(2b)^3} \int_{-\infty}^{+\infty} (2b) \varphi(2b) d(2b). \quad (20)$$

Интегрируя по b , с учетом нормального закона распределения размеров зерен, получаем выражение (21) для количества зерен, выступающих из связки:

$$n \approx \frac{3K_0(1 - \varepsilon)}{200\pi\alpha^{3/2}(2b)^2} = n_0(1 - \varepsilon), \quad (21)$$

где n_0 - номинальное число зерен на поверхности круга без учета потери их при износе или правке инструмента.

Однако, в процессе резания при шлифовании участвуют не все зерна. Вероятность $P(\xi - \eta > 0)$ описывает долю зерен, активно участвующих в работе. Расчеты, приведенные в работе [9] показывают, что данная вероятность может быть определена по формуле (22):

$$P(\xi - \eta > 0) \approx 0.55 / \sqrt{v}, \quad (22)$$

где v - безразмерная величина, которая может быть определена по выражению (23):

$$v \approx 0.53 \frac{V}{w} K_0 (1 - \varepsilon)^3, \quad (23)$$

где V – скорость шлифовального круга, м/с; w – скорость "погружения" зерен в обрабатываемый материал, мм/с. Скорость погружения также равна удельной производительности шлифования:

$$w = \frac{V_{\text{шл}}}{(F_k \tau)}, \quad (24)$$

где $V_{\text{шл}}$ – объем сошлифованного (удаленного) материала, мм³; F_k – площадь контакта круга с деталью, мм²; τ – время удаления объема материала, мин.

Общее выражение величины w можно адаптировать для любой схемы обработки шлифованием. В частности для плоского шлифования торцом круга схема, поясняющая расчет, представлена на рис. 3.

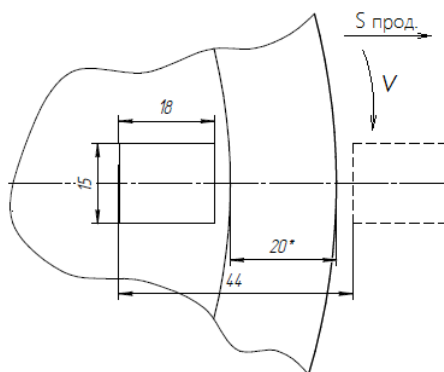


Рис. 3. Зона обработки заготовки при плоском шлифовании торцом круга.

Объем сошлифованного (удаленного) материала может быть определен как:

$$V_{\text{шл}} = F_k t, \quad (25)$$

а время удаления материала может быть рассчитано из соотношения:

$$\tau = \frac{B}{S_{\text{прод.}}}, \quad (26)$$

где B – ширина шлифования, мм, которая для выбранной схемы равна длине обрабатываемой заготовки; $S_{\text{прод.}}$ – продольная подача заготовки, м/мин.

Тогда для плоского шлифования торцом круга скорость "погружения" зерен в обрабатываемый материал может быть рассчитана по выражению:

$$w = \frac{1000}{60} \frac{S_{\text{прод.}} t}{B}. \quad (27)$$

Таким образом, с учетом выражений (23), (27), вероятность количества режущих зерен, участвующих в процессе, может быть рассчитана по формуле (28):

$$P(\xi - \eta > 0) = \frac{0.55}{\sqrt{0.53VK_0(1-\varepsilon)^3}} \sqrt{\frac{1000}{60} \frac{S_{\text{прод.}} t}{B}}. \quad (28)$$

Однако, необходимо также принять во внимание поправку на несимметричность расположения кривой распределения вершин зерен. Данный параметр может быть рассчитан по формуле (29) [8]:

$$\beta^* = 1 + \Phi(4.24b_0), \quad (29)$$

где b_0 - параметр, отвечающий за величину смещения центра формирования кривой распределения вылетов вершин зерен, причем $b_0 = 0.05 \div 0.2$.

Тогда для расчета средневероятного количества активных зерен на единице поверхности контакта круга с деталью предложено выражение (30):

$$n_p = \beta^* nP(\xi - \eta > 0). \quad (30)$$

Суммарные составляющие силы могут быть рассчитаны через номинальную площадь контакта шлифовального круга с деталью по формулам (31), (32):

$$\begin{aligned} P_z &= F_{pz} F_k n_p \\ P_y &= F_{py} F_k n_p \end{aligned} \quad (31, 32)$$

1.4. Сравнение теоретического расчета сил шлифования с расчетом по степенным формулам

В работах [2, 3] приведены степенные формулы для расчета сил резания при шлифовании твердого сплава, полученные на основании аппроксимации экспериментальных данных. Так в работе [2] силы рассчитаны по формулам (34), (35) для плоского шлифования алмазным чашечным шлифовальным кругом заготовок из различных марок твердого сплава:

$$\begin{aligned} P_{zp} &= 9.81 C_{pz} t^{x_{pz}} S_{\text{прод}}^{y_{pz}} v^{z_{pz}} F_k^{m_{pz}} \prod_{i=1}^m K_{zi} \\ P_{yp} &= 9.81 C_{py} t^{x_{py}} S_{\text{прод}}^{y_{py}} v^{z_{py}} F_k^{m_{py}} \prod_{i=1}^m K_{yi} \end{aligned} \quad (34, 35)$$

где $C_{py}, C_{pz}, x_{pz}, x_{py}, y_{pz}, y_{py}, z_{pz}, z_{py}, m_{pz}, m_{py}$ - коэффициенты и показатели степеней, значение которых зависит от вида связки шлифовального круга, $\prod_{i=1}^m K_{zi}$ и $\prod_{i=1}^m K_{yi}$ - произведение поправочных коэффициентов, учитывающих изменение условий работы. Поправочные коэффициенты определяют следующие условия шлифования:

K_{y1}, K_{z1} - вид связки шлифовального круга;

K_{y2}, K_{z2} - зернистость шлифовального круга;

K_{y3}, K_{z3} - концентрацию алмазных зерен в шлифовальном круге;

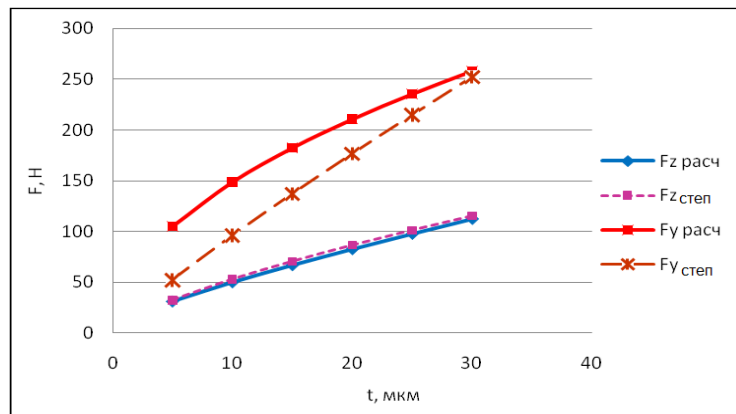
K_{y4}, K_{z4} - охлаждение зоны резания при шлифовании;

K_{y5}, K_{z5} - марку твердого сплава заготовки.

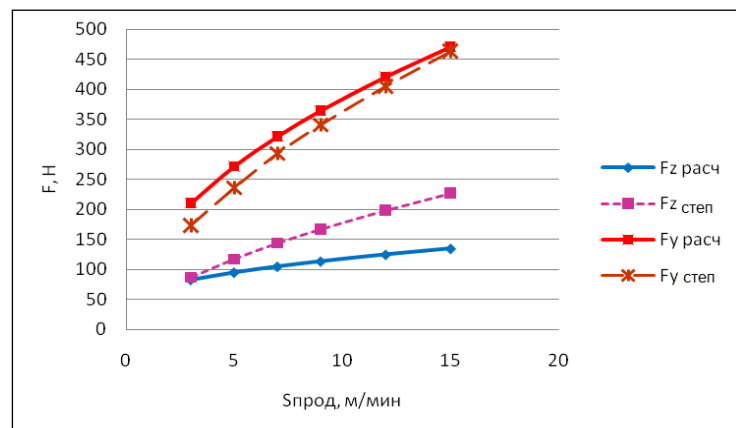
Таким образом, можно сравнить результаты расчетов теоретического (31), (32) и по степенным формулам (34), (35).

На рис. 5 приведены графики, построенные по данным теоретического расчета и по степенным формулам для одних и тех же условий шлифования. Параметры процесса, используемые для расчетов, приведены в табл. 1. Значения сил резания варьируются в

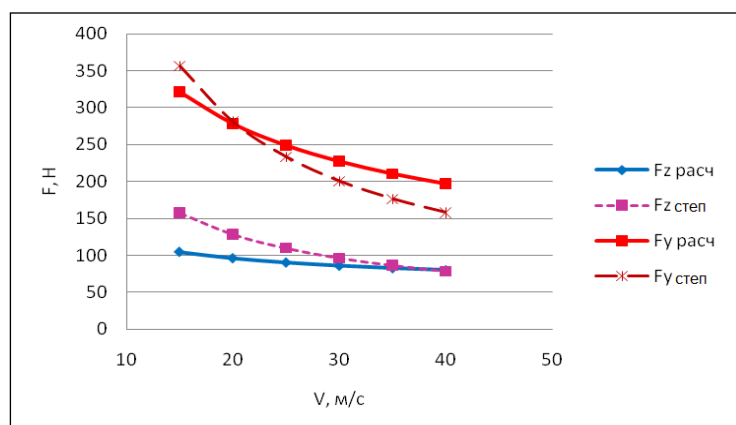
зависимости от продольной подачи заготовки, глубины шлифования на проход и скорости шлифовального круга.



а.)



б.)



в.)

Рис. 4. Значение составляющих силы резания в зависимости от: а.) подачи врезания на проход ($S_{\text{прод.}} = 3 \text{ м / мин}$, $V = 35 \text{ м / с}$); б.) продольной подачи ($t = 20 \text{ мкм}$, $V = 35 \text{ м / с}$); в.) скорости шлифования ($S_{\text{прод.}} = 3 \text{ м / мин}$, $t = 20 \text{ мкм}$).

Теоретический расчет сил проводится при условии, что вылет всех рабочих зерен одинаков и все зерна изношены максимально, т.е. площадь поперечного сечения зерна, на которой действует сила реакции опоры и сила трения, максимальна.

Анализ графиков на рис. 4 показывает их удовлетворительное качественное и количественное совпадение. Расхождения в значениях сил объясняются как некоторыми допущениями, принятыми в расчетной модели, так и погрешностями экспериментов и аппроксимации их результатов степенными зависимостями.

2. Экспериментальная проверка сил резания

В МГТУ им. Баумана были проведены эксперименты по плоскому алмазному торцевому шлифованию заготовок из твердого сплава марки Т15К6. Эксперименты проведены на универсальном плоскошлифовальном станке 3Г71М с использованием алмазного шлифовального круга 6А2 250х20х4х29х76 АС6 160/125 А1 100% М1-01 по ГОСТ 16170-91. Типоразмеры и форма алмазного круга определены техническими характеристиками оборудования и схемой шлифования, которая приведена на рис. 6. Режимы резания, реализуемые на данном оборудовании составляют: скорость шлифования - 35 м/с, продольная подача стола находится в пределах от 3 до 12 м/мин.

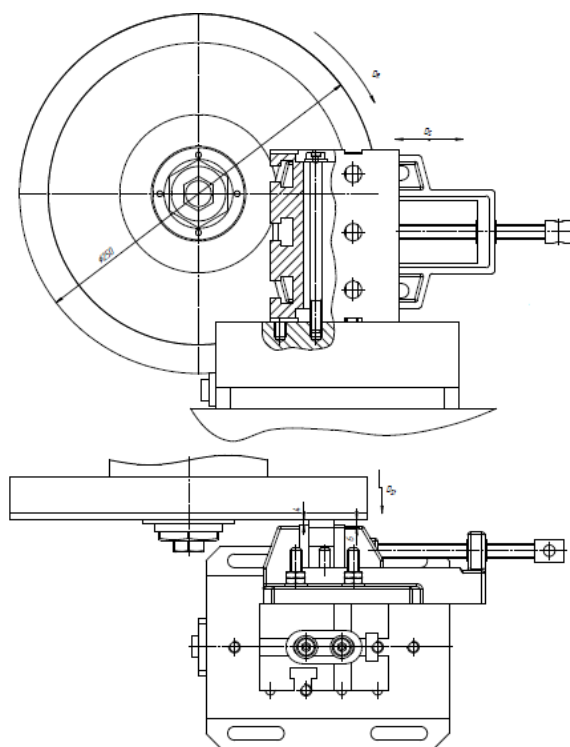


Рис. 5. Схема шлифования заготовок.

Перед установкой на шпинделе станка шлифовальный круг был отбалансирован на оправке с помощью балансировочных грузов. После выверки и закрепления на шпинделе станка биение торца алмазного шлифовального круга составило 50 мкм. Для дальнейшего

уменьшения биения торца круга была выполнена механическая правка алмазным карандашом по рекомендациям источника [11].

Правка алмазного шлифовального круга проведена алмазным карандашом 3908-0054С с применением охлаждения эмульсией на водной основе. Схема правки приведена на рис. 6. Режимы правки составили: продольная подача $S_{\text{прод.}} = 3 \text{ м / мин}$, глубина $t = 5 \text{ мм}$, скорость вращения круга - 35 м/с. Правка алмазным карандашом проводилась в течение 40 мин, остаточное биение торца шлифовального круга составило 15 мкм.

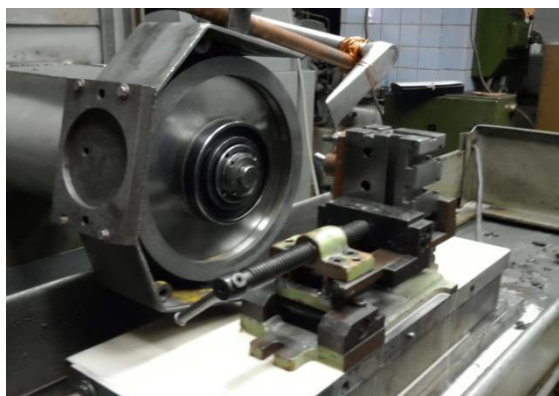


Рис. 6. Правка алмазного шлифовального круга алмазным карандашом.

Для дальнейшего уменьшения биения, а также для удаления с поверхности шлифовального круга алмазных зерен, поврежденных при правке алмазным карандашом, была применена правка бруском из зеленого карбида кремния. Параметры абразива бруска были назначены по справочным данным: материал - 6С, твердость – 1С, зернистость 16/25 [11]. Брусок для правки закреплялся в тисках, которые установлены на электромагнитном столе. Схема правки бруском из зеленого карбида кремния приведена на рис. 7.

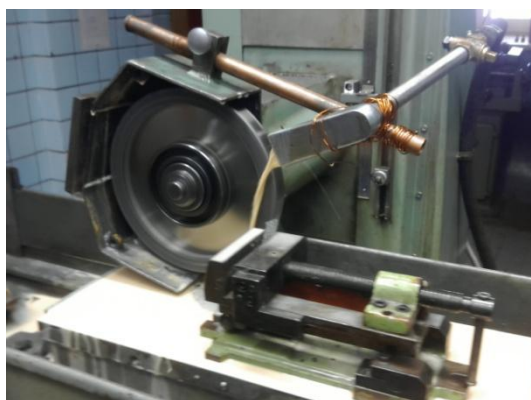


Рис. 7. Правка алмазного шлифовального круга бруском из зеленого карбида кремния.

Правка зеленым карбидом кремния проведена с охлаждением эмульсией на водной основе. Режимы правки составили: $S_{\text{прод.}} = 3 \text{ м / мин}$, $t = 10 \text{ мм}$ в соответствии с

рекомендациями [12]. Правка брусом из зеленого карбида кремния проходила в течение 120 минут. Остаточное торцевое биение круга после правок составило 12 мкм.

На первом этапе эксперимента в качестве заготовки были использованы пластины формы 62271 из твердого сплава марки Т15К6 по ГОСТ 25395-90. Пластина закреплялась в тисках, в качестве баз для закрепления использовались плоские торцы. Тиски были установлены на приспособление УСП-15 так, чтобы средняя линия заготовки была коллинеарна к нормали окружности шлифовального круга, параллельной плоскости стола станка. При таком закреплении не будет искажения измеряемых сил резания. Приспособление УСП-15 установлено на трехкомпонентный динамометр для измерения усилий резания марки Kistler 9257В.

Шлифование выполнено на следующих режимах: продольная подача $S_{\text{прод.}} = 3 \text{ м / мин}$, глубина $t = 20 \text{ мкм}$. Шлифование проводилось с использованием охлаждения эмульсией на водной основе. Скорость вращения круга составляла 35 м/с. Динамометр был настроен на частоту снятия сигнала, равную 250 Гц.

Внешний вид сигнала, поступившего на динамометр, представлен на рис. 8.

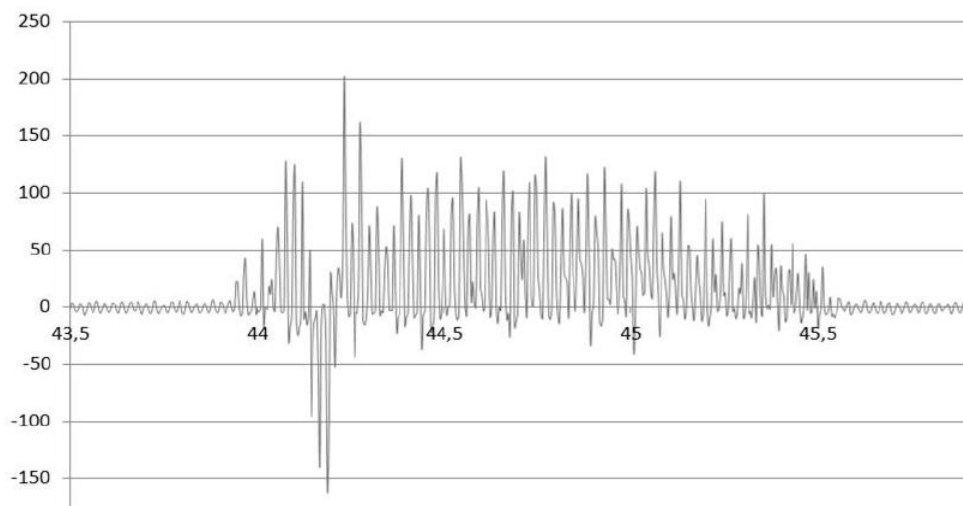


Рис.8. Внешний вид сигнала измерения составляющей P_y силы шлифования.

Внешний вид сигнала свидетельствует о том, что контакт шлифовального круга и заготовки был непостоянным. Данный факт можно объяснить биением поверхности шлифовального круга. Для оценки величины составляющих силы шлифования необходимо исключить все значения, кроме вершин пиков. Обработка данных, соответствующих одному прямому проходу одной составляющей силы резания, включала в себя следующие этапы:

1. Получение обработанной дискретной функции, включающей в себя только точки, являющиеся локальными максимумами исходной;
2. Аппроксимация полученной функции сплайном;
3. Получение среднего значения силы как интеграла аппроксимированной функции на некотором диапазоне, поделенного на ширину диапазона.

Эти операции повторялись для трех прямых ходов по каждой составляющей силы резания при обработке образцов и сравнивались с расчетным значением.

В табл. 2 приведены результаты экспериментов по силам резания при шлифовании твердого сплава, данные расчета по степенным формулам, а также данные, полученные путем теоретического расчета по п. 1.3. Все результаты получены при одинаковых режимных параметрах процесса.

На рис. 10 представлены диаграммы составляющих сил резания при шлифовании твердого сплава.

Таблица 2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных.

Расчет по степенным формулам		Теоретический расчет		Экспериментальные данные	
F_z , Н	F_y , Н	F_z , Н	F_y , Н	F_z , Н	F_y , Н
82,72	210,50	86,37	176,4	98,83	185,70

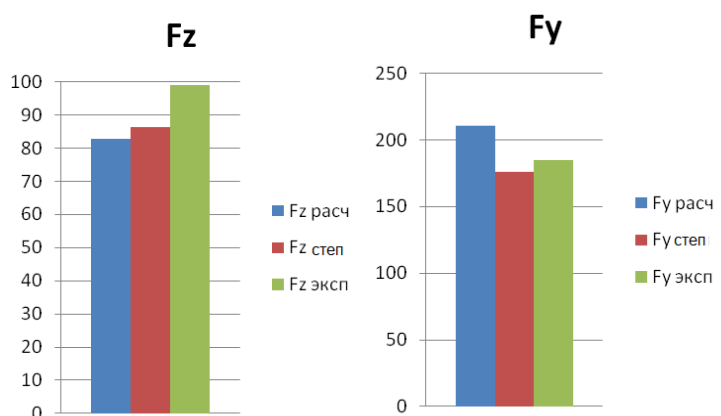


Рис. 9. Диаграммы составляющих сил резания.

Расхождение между экспериментальными результатами и данными, полученными путем теоретического расчета, не превысило 17%.

3. Анализ взаимосвязи износа круга и сил резания

Разработанная расчетная методика, представленная последовательностью формул в п. 1.2, 1.3, позволяет установить связь износа зерен шлифовального круга с силами резания при шлифовании. Параметры процесса, при которых проводился расчет, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры процесса шлифования.

Параметр процесса	Значение параметра
Обрабатываемый материал	Твердый сплав марки Т15К6
Твердость обрабатываемого материала HV , МПа	12 000
Концентрация алмазных зерен в связке, %	100
Отношение осей эллипсоида, задающего форму зерна α	0,6
Коэффициент заделки алмазного зерна в связке ε_k	0,5
Припуск на один проход t , мм	0,02
Скорость шлифовального круга $V_{шл}$, м/с	35
Скорость стола детали $S_{прод.}$, м/мин	3
Ширина шлифовального круга B , мм	18
Зернистость шлифовального круга, мкм	125/160
Площадь контакта между заготовкой и поверхностью шлифовального круга F_k , мм ²	234
Максимальный износ алмазного зерна $h_{изн.}$, мкм	87,5
Коэффициент трения между обрабатываемым материалом и алмазными зернами, μ	0,1

На рис. 4 приведена зависимость составляющих силы шлифования от износа зерна.

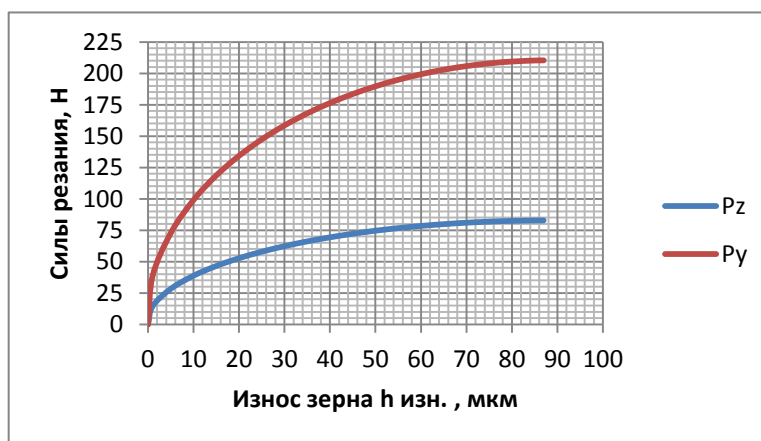


Рис. 10. График зависимости составляющих сил резания при шлифовании от износа алмазного зерна.

При увеличении износа зерна на 5 мкм составляющие силы резания увеличиваются в среднем на 10-11%, а при увеличении износа на 10 мкм – на 28-30%. Графики могут быть аппроксимированы степенной зависимостью. Следовательно, можно получить данные об износе алмазного инструмента в процессе резания по изменению силы резания.

Максимальная сила резания наблюдается при износе зерна на 50% от его среднего диаметра. Критическими будут являться силы, соответствующие этому износу. При этих значениях сил правка круга является обязательной.

В случае финишной обработки, когда качество обрабатываемой поверхности должно быть максимально высоким, допустимый износ зерна может быть ограничен 20% от среднего диаметра. Эта цифра может меняться, в зависимости от реального состояния

круга и обрабатываемой поверхности, или может быть установлен иной допустимый предел.

Поскольку непосредственный контроль сил в зоне резания затруднен, процедура контроля может осуществляться по мощности привода шлифовальной бабки. Связь силы резания P_z и мощностью привода представлена выражением:

$$N = \frac{1}{1000} P_z v_{кр}, \quad (36)$$

где N - мощность шлифовального шпинделя, кВт; $v_{кр}$ - скорость шлифовального круга, м/с.

Например, для графика рис. 4 мощность увеличивается со значения 0,91 кВт при износе 5 мкм до значения 2,66 кВт при износе 87,5 мкм.

Инструментальный контроль мощности привода шлифовальной бабки осуществляется по силе тока электродвигателя привода.

Заключение

Предложенная модель расчета составляющих силы резания при шлифовании имеет удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными и результатами расчета по степенным формулам, заимствованным из литературных источников.

Развитие модели будет направлено на раскрытие допущений, связанных с ориентацией зерен в связке круга, разновысотностью вылета зерен и механизмом износа алмазного зерна. Для адаптации предложенной модели к обработке хрупких материалов необходимо количественно представить механизм стружкообразования при шлифовании заготовок из этих материалов.

Расчетные зависимости по силам шлифования будут использованы для оценки износа, режущей способности и частоты правки круга.

Список литературы

1. Шавва М.А., Захаревич Е.М. Экспериментальная установка для алмазного шлифования с применением непрерывной электрохимической правки шлифовального круга // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 3. С. 44-58. DOI: [10.7463/0314.0699920](https://doi.org/10.7463/0314.0699920)
2. Резников А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1977. 391 с.
3. Бакуль В.Н., Захаренко И.П., Кункин Я.А., Мильштейн М.З. Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента / под ред. В.Н. Бакуль. Киев: Техника, 1971. 208 с.
4. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.

5. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. М.: Машиностроение, 1977. 263 с.
6. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. Киев: Наукова думка, 1978. 207 с.
7. Кузнецов А.А., Федотов В.В. Определение силы резания, действующей на единичную режущую кромку изношенного абразивного зерна // IV Всероссийский конференция-семинар «Научно-техническое творчество: проблемы и перспективы» (г. Сызрань, 22-23 мая 2009 г.): тр. Филиал СамГТУ, 2009. Режим доступа: http://www.sstu.syzran.ru/MECHFAK/downloads/ntt/kuznecov_fedotov.pdf (дата обращения 01.10.2014).
8. Осипов А.П. Моделирование шероховатой поверхности методом суперпозиции относительных опорных кривых // Вестник СамГТУ. Сер. Физико-математические науки. 2002. Вып. 16. С. 168-175.
9. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
10. Рыжов Э.В., Сагарда А.А., Ильинский В.Б., Человецкий И.Х. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / под ред. А.А. Сагарды. Киев: Наукова думка, 1979. 244 с.
11. Дубовик Н.П., Мендельсон В.С. Устройства для правки шлифовальных кругов алмазными инструментами. Киев: Наукова думка, 1982. 128 с.
12. Наерман М.С. Справочник молодого шлифовальщика. М.: Высшая школа, 1985. 207 с.
13. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Высшая школа, 1974. 587 с.

Analysing a Relationship Between Wheel Wear and Cutting Forces During Diamond Grinding

M.A. Shavva^{1,*}, S.V. Grubiy²

[*katapu@mail.ru](mailto:katapu@mail.ru)

¹ Russian Research & Development Tooling Institute, Moscow, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: diamond grinding, cutting forces, cutting time of diamond wheel, dressing of diamond wheel, control of cutting force

In diamond grinding cutting forces affect the quality of the machined surface. We can estimate a wear rate of the diamond wheel by the magnitude of the forces and promptly resort to the restoration of its cutting properties. To solve this problem it is necessary to define a relationship between grinding wheel wear and cutting forces. There was no this dependence found in the sources of literature.

The forces acting on a single worn diamond grain are considered to find the relationship between wheel wear and cutting forces. The main forces acting on the diamond grain are such as a reaction force of machining material, a frictional force over a worn place of the grain, and a total pressure on the contact surface of the grain and machining material. According to calculation results, in grinding the cutting forces are proportional to the hardness of machining material, and depend on the grain wear, as well as on the process operation conditions.

The paper presents a technique for calculating the number of cutting (active) grains per unit surface of diamond wheel to determine a total cutting force in grinding. The number of cutting grains depends on the properties of diamond wheel and on the operation conditions of grinding process.

During grinding a total cutting force is calculated through the single grain cutting force, the number of cutting grains per unit surface of the grinding wheel and the contact area between the wheel and the work piece. Theoretical calculation of the forces is based on the condition that protrusions of all cutting grains are identical and all grains have a maximum wear, i.e. maximum worn place of grain.

Calculations based on proposed theoretical formulas are compared with the calculations from the empirical formulas given in the literature. Varying the operation conditions of grinding makes the comparison. Convergence of results in the range of 5-20% is regarded as acceptable.

On the BMSTU base flat diamond grinding of tungsten carbide (T15K6) work pieces was experimentally made. Experiments were carried out on the universal flat-grinding machine 3G71M using a diamond grinding wheel 6A2 250x20x4x29x76 AC6 160/125 A1 100% M1-01

according to GOST 16170-91. When using this equipment, cutting operation conditions, namely grinding speed and longitudinal table feed were 35 m/s and 3 - 12 m/min, respectively.

The work piece was clamped in a vise. Vise was set on the universal attachment. Device was installed on a three-component dynamometer brands Kistler 9257B to measure cutting forces.

Grinding was carried out under the following operation conditions: traverse $S_{\text{trav}} = 3 \text{ m/min}$, depth of cutting $t = 20 \text{ }\mu\text{m}$. Grinding used a water-based cooling emulsion. Wheel speed was 35m/s. The dynamometer was tuned to the frequency of signal equal to 250 Hz.

After processing the experimental and calculated data were compared using the theoretical formulas. The maximum difference between them was 17%.

Owing to the presented model it is possible to obtain data on the diamond tool wear during cutting through a change of the tangential component of the cutting force. With the definite maximum wear of diamond wheel it is possible to calculate a threshold value of the tangential component of the cutting force. When the threshold value of the tangential component of the cutting force is reached, a diamond wheel must be subjected to dressing. On-time wheel dressing allows us to avoid reducing quality of the machined surface.

Control of forces in the cutting zone is difficult to organize; the procedure can be performed by power control of the grinding spindle through the current control.

References

1. Shavva M.A., Zakharevich E.M. Experimental Setup for Diamond Grinding Using Electrochemical In-Process Controlled Dressing (ECD) of Grinding Wheel. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 3, pp. 44-58. DOI: [10.7463/0314.0699920](https://doi.org/10.7463/0314.0699920) (in Russian).
2. Reznikov A.N. *Abrazivnaia i almaznaia obrabotka materialov* [Abrasive and diamond material machining]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 391 p. (in Russian).
3. Bakul' V.N., Zakharenko I.P., Kunkin Ia.A., Mil'shtein M.Z. *Spravochnik po almaznoi obrabotke metallorazhushchego instrumenta* [Handbook of diamond processing cutting tools]. Kiev, Tekhnika Publ., 1971. 208 p. (in Russian).
4. Maslov E.N. *Teoriia shlifovaniia materialov* [Theory on grinding of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 320 p. (in Russian).
5. Popov S.A., Malevskii N.P., Tereshchenko L.M. *Almazno-abrazivnaia obrabotka metallov i tverdykh splavov* [Diamond abrasive machining of metals and tungsten carbide]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 263 p. (in Russian).
6. Baikalov A.K. *Vvedenie v teoriiu shlifovaniia materialov* [[Introduction to the theory of grinding]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1978. 207 p. (in Russian).

7. Kuznetsov A.A., Fedotov V.V. Determination of cutting forces acting on the single cutting edge of worn abrasive grain. *4 Vserossiiskii konferentsiia-seminar "Nauchno-tekhnicheskoe tvorchestvo: problemy i perspektivy": tr.* [Proc. of the 4 All-Russian Conference-Seminar "Scientific and Technical Creativity: Challenges and Prospects"], Syzran', 22-23 May 2009. Brunch of Samara STU, 2009. Available at: http://www.sstu.syzran.ru/MECHFAK/downloads/ntt/kuznecov_fedotov.pdf , accessed 01.10.2014. (in Russian).
8. Osipov A.P. Rough surface simulation by the method of superposition of relative reference curves. *Vestnik Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2002, iss. 16, pp. 168-175. (in Russian).
9. Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoi obrabotki* [Thermophysics of machining processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 279 p. (in Russian).
10. Ryzhov E.V., Sagarda A.A., Il'inskii V.B., Chelovetskii I.Kh. *Kachestvo poverkhnosti pri almazno-abrazivnoi obrabotke* [Surface quality when diamond abrasive machining]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1979. 244 p. (in Russian).
11. Dubovik N.P., Mendel'son V.S. *Ustroistva dlia pravki shlifoval'nykh krugov almaznymi instrumentami* [Devices for dressing grinding wheels with diamond tools]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1982. 128 p. (in Russian).
12. Naerman M.S. *Spravochnik molodogo shlifoval'shchika* [Handbook of grinding]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1985. 207 p. (in Russian).
13. Poduraev V.N. *Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Cutting demanding materials]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1974. 587 p. (in Russian).