

УДК 621.923

**П.Г. Матюха, профессор, д-р техн. наук,****А.В. Бурдин, аспирант,****В.В. Габитов, аспирант***Донецкий национальный технический университет**ул. Артема, 58, г. Донецк, Украина, 83001**info@dgtu.donetsk.ua***ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ВРЕЗНОМ ШЛИФОВАНИИ КОМБИНИРОВАННОГО ОБРАЗЦА**

*В статье предложен метод аналитического расчета составляющих силы резания при шлифовании комбинированного образца «конструкционная сталь – быстрорежущая сталь».*

**Ключевые слова:** комбинированный образец, силы шлифования, плоское шлифование.

Силы резания являются важным параметром обработки, оказывающим влияние на точность обработки и качество обработанной поверхности. В большинстве составляющие силы резания определяются на основе регрессионных зависимостей, полученных в результате обработки экспериментальных данных [1].

Нами в работе [2] предложен метод аналитического расчета составляющих силы резания при шлифовании ванадиевых, штамповых и инструментальных сталей. Методики расчета составляющих силы резания при шлифовании комбинированных образцов в литературе отсутствуют.

**Целью** работы является аналитический расчет составляющих силы резания при врезном шлифовании комбинированного образца.

Расчет сил резания при плоском врезном шлифовании комбинированного образца, состоящего из стали 45 и быстрорежущей стали Р6М5Ф3 (рисунок 1), выполним, используя положение, в соответствии с которым суммарная сила резания на комбинированном образце равна сумме сил резания на отдельных его компонентах. Материалы компонентов комбинированного образца выбраны из условия, что при их шлифовании образуется сливная стружка.

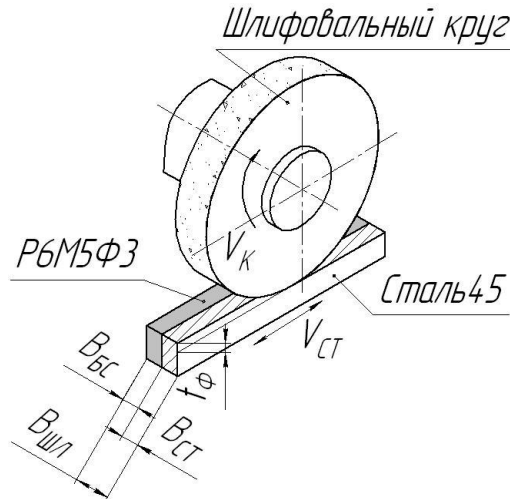


Рисунок 1 – Схема плоского врезного шлифования комбинированного образца

Аналитический расчет составляющих силы резания при плоском врезном шлифовании периферией круга компонентов образца выполним, применяя формулы, приведенные в работе [2], которые используют схему стружкообразования с единственной условной плоскостью сдвига.

При этом тангенциальная составляющая силы резания на круге определяется по формуле:

$$P_{\text{зк}} = \frac{\left( \frac{\sqrt{1+M^2} \cdot a_z \cdot \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 \cdot M \cdot \mu \cdot l_z \right) \cdot b \cdot z_p \cdot C}{1 + \left( \frac{\sqrt{1+M^2} \cdot a_z \cdot \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 \cdot M \cdot \mu \cdot l_z \right) \cdot b \cdot z_p \cdot \frac{4 \cdot a \cdot \alpha \cdot V_k \cdot \sqrt{H} \cdot \alpha_s}{\sqrt{\pi} \cdot \lambda \cdot V_d \cdot S}}, \quad (1)$$

а радиальная составляющая –

$$P_{ук} = \left( \frac{\sqrt{1+M^2} \cdot a_z \cdot \sin \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 \cdot M \cdot l_3 \right) \cdot b \cdot z_p \cdot \left( C - \frac{4 \cdot a \cdot \alpha \cdot V_k \cdot \sqrt{H} \cdot \alpha_e}{\sqrt{\pi} \cdot \lambda \cdot V_d \cdot S} \cdot P_{зк} \right). \quad (2)$$

Здесь  $M$  – соотношение нормальных и касательных напряжений вдоль условной плоскости сдвига;  $\beta$  – угол сдвига, рад;  $a_z$  – толщина единичного среза, мкм;  $\omega$  – угол действия, рад;  $C, \alpha$  – коэффициенты модификации МакГрегора-Фишера, описывающие влияние скорости деформации и температуры на величину касательных напряжений в условиях шлифования;  $\kappa_3$  – коэффициент, учитывающий закон распределения напряжений на задней поверхности зерна;  $\mu$  – коэффициент трения между зерном и заготовкой;  $b$  – ширина шлифования, мм;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·град;  $l_3$  – величина контактной площадки на задней поверхности зерне, мкм;  $z_p$  – количество одновременно работающих зерен, шт;  $S$  – площадь зоны контакта заготовки с кругом, мм<sup>2</sup>;  $V_d$  – скорость детали, м/мин;  $V_k$  – скорость круга, м/с;  $H$  – безразмерная полуширина источника тепла;  $a$  – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с;  $\alpha_e$  – коэффициент ввода теплоты в заготовку.

Расчет величин, входящих в формулы (1) и (2), выполняется по следующим зависимостям [2].

Соотношение нормальных и касательных напряжений вдоль условной плоскости сдвига  $M$

$$M = 1 + 2 \cdot \left( \frac{\pi}{4} - \beta \right).$$

Угол сдвига  $\beta$ , рад:

$$\beta = \text{arctg} \left( \frac{\cos \gamma}{K_L - \sin \gamma} \right),$$

где  $K_L$  – коэффициент усадки стружки.

Передний угол зерна, рад:

$$\gamma = -\arcsin \left( 1 - \frac{2 \cdot a_z}{d_{cp}} \right).$$

Толщина единичного среза  $a_z$ , мкм:

$$a_z = a_{z \max} + \frac{R_z}{2},$$

где  $R_z$  – параметр шероховатости на поверхности резания, мкм.

Максимальная толщина среза  $a_{z \max}$ , мкм:

$$a_{z \max} = R_k - \sqrt{\left( \frac{V_d \cdot l_\phi}{60 \cdot V_k} \right)^2 + R_k^2 - 2 \cdot \frac{V_d \cdot l_\phi \cdot R_k}{60 \cdot V_k} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{t_\phi \cdot 10^{-3}}{R_k}}},$$

где  $R_k$  – радиус шлифовального круга, мм;  $t_\phi$  – фактическая глубина резания, мкм;  $l_\phi$  – расстояние между двумя контактирующими зернами, мм.

Расстояние между контактирующими зернами определяется по формуле:

$$l_\phi = S_{зр} \cdot K_I \cdot K_c \cdot K_d.$$

Здесь  $K_I = 2,46$  – коэффициент, учитывающий критическую величину закрепления зерна в связке алмазного слоя. Значение коэффициента  $K_c$ , учитывающего разновысотное положение зерен, определяется по следующей формуле

$$K_c = \frac{1}{\sqrt{F(\phi)}}.$$

Значение функции распределения Вейбулла, определяющее вероятность попадания вершины зерна в интервал  $(0 - t_\phi)$ :

$$F(\phi) = 1 - \exp \left( \frac{-t_\phi^m}{X_0} \right),$$

где  $X_0, m$  – параметры распределения Вейбулла.

Кинематический коэффициент  $K_d$ , учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами:

$$K_{\partial} = \alpha_{\partial} + \beta_{\partial} \cdot \frac{60 \cdot V_{\kappa}}{V_{\partial}},$$

где  $\alpha_{\partial}$ ,  $\beta_{\partial}$  – параметры уравнения регрессии.

Расстояние между зернами в сечении алмазосного слоя плоскостью, мм:

$$S_{3p} = \frac{10}{\sqrt[3]{\frac{4,4 \cdot K \cdot N_z}{100}}},$$

где  $K$  – относительная концентрация алмазов в алмазосном слое круга, %.

Расстояние между зернами на поверхности круга, мм:

$$S_{3n} = S_{3p} \cdot K_1,$$

Диаметр шаровой модели зерна  $d_{cp}$ , мкм:

$$d_{cp} = \frac{6090}{\sqrt[3]{N_z}},$$

где  $N_z$  – среднее количество зерен в одном карате, шт.

Количество одновременно работающих зерен  $z_p$ , шт:

$$z_p = \frac{L \cdot b \cdot K_{\kappa}}{S_{3n}^2} \cdot F_{\phi},$$

где  $b$  – ширина шлифования, мм;  $K_{\kappa}$  – коэффициент контактирования, учитывающий влияние длительности шлифования на количество одновременно работающих зерен.

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом  $L$ , мм:

$$L = \sqrt{2 \cdot R_{\kappa} \cdot t_{\phi}} \cdot 10^{-3}.$$

Угол действия  $\omega$ , рад:

$$\omega = \arctg(M) - \beta.$$

Площадь зоны контакта заготовки с кругом  $S$ , мм<sup>2</sup>:

$$S = b \cdot \sqrt{2 \cdot R_{\kappa} \cdot t_{\phi}} \cdot 10^{-3}.$$

Величина контактной площадки на зерне  $l_3$ , мкм:

$$l_3 = 0,22 \cdot d_{cp} \cdot T^{0,047},$$

где  $T$  – время шлифования после правки круга, мин.

Ширина единичных срезов, мм:

$$S_x = \frac{S_{3n}^2}{l_{\phi} \cdot F_{\phi} \cdot K_{\kappa}}.$$

Безразмерная полуширина источника тепла  $H$ :

$$H = \frac{0,5 \cdot V_{\partial} \cdot L}{60 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot a},$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности тел, содержащих частицы или участки с различными теплофизическими характеристиками, расположенные в случайном порядке, определяют по ориентировочной формуле [3]:

$$\lambda_{\text{экв}} \approx \lambda_1^{p_1} \cdot \lambda_2^{p_2} \cdot \lambda_3^{p_3} \dots \lambda_m^{p_m} = \prod_{i=1}^m \lambda_i^{p_i},$$

где  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности отдельного элемента,  $p_i$  – относительная объемная концентрация элемента ( $\sum_{i=1}^m p_i = 1$ ).

Коэффициент теплопроводности алмазосного слоя круга АСб 100/80-4-М2-01, Вт/м·град, рассчитывается по формуле [4]:

$$\lambda_{\kappa} = \lambda_{\kappa a}^{0,01Y_a} \cdot \lambda_{\kappa o}^{0,01Y_o} \cdot \lambda_{\kappa m}^{0,01Y_m},$$

где  $Y_a$ ,  $Y_o$ ,  $Y_m$  – соответственно, процентное содержание алмаза, олова, меди в алмазосном слое;  $\lambda_{\kappa a}$ ,  $\lambda_{\kappa o}$ ,  $\lambda_{\kappa m}$  – соответственно, коэффициенты теплопроводности алмаза, олова и меди.

Коэффициент ввода теплоты в заготовку  $a_b$ :

$$\alpha_a = \frac{1}{\left(1,25 \cdot \frac{\lambda_k}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a}{21 \cdot 10^{-6} \cdot V_k}}\right) + 1}$$

Для расчета составляющих силы резания по формулам (1), (2) было составлена программа расчета на ПЭВМ в среде Mathcad.

Выполним расчет составляющих силы резания при врезном шлифовании комбинированного образца и отдельных его компонентов из сталей 45 и Р6М5Ф3 шлифовальным кругом – 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80-4-М2-01 на следующих режимах –  $V_k = 35$  м/с,  $V_d = 6$  м/мин,  $t_{\phi} = 0,015$  мм. Исходные данные для расчета составляющих силы резания при алмазном шлифовании материала каждой компоненты комбинированного образца приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для аналитического расчета составляющих силы резания компонентов комбинированного образца

Наименование параметра	Сталь 45	Р6М5Ф3
1	2	3
$b$ – ширина шлифуемой поверхности, мм	7	7
$R_k$ – радиус круга, мм	125	125
$V_k$ – скорость круга, м/с	35	35
$V_d$ – скорость стола, м/мин	6	6
$t_{\phi}$ – глубина резания, мкм	15	15
$T$ – время шлифования, мин	1	5
$K$ – относительная концентрация алмазов, %	100	100
$R_z$ – шероховатость поверхности резания, мкм	12	12
Параметры распределения разновысотности*, сформированные после электроэрозионной правки и описываемые законом Вейбулла $m$ и $X_0$ соответственно	2,23 2946	2,23 2946
Параметры уравнения регрессии для расчета $K_d$ : $\alpha_d$ и $\beta_d$	14,32 0,112	14,32 0,112
$N_z$ – число зерен в одном карате, шт	100000	100000
$K_k$ – коэффициент длительности шлифования	0,44	0,44
$K_l$ – коэффициент для расчета расстояния между зернами на РПК	2,46	2,46
$a$ – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м <sup>2</sup> /с	$0,08 \cdot 10^{-4}$	$0,246 \cdot 10^{-4}$
$\lambda$ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·град	40,2	19,51
$\lambda_{ка}$ – коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/м·град	520	520
$\lambda_{км}$ – коэффициент теплопроводности меди, Вт/м·град	361	361
$\lambda_{ко}$ – коэффициент теплопроводности олова, Вт/м·град	67	67
$Y_m$ – объемная доля меди, %	57,7	57,7
$Y_o$ – объемная доля олова, %	17,3	17,3
$Y_a$ – содержание алмазов, %	25	25
$\kappa_3$ – коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на площадке износа	1	1
$K_L$ – коэффициент усадки стружки при шлифовании	1,35	1,35
Параметры для определения величины касательных напряжений, $C$ (Па) и $\alpha$ (Па/°К)	$C=380 \cdot 10^6$ $\alpha=54 \cdot 10^3$	$C=1761 \cdot 10^6$ $\alpha=185 \cdot 10^3$
$\mu$ – коэффициент трения (алмаз по стали)	0,2	0,2

\* Примечание: влияние времени обработки на параметры распределения разновысотности и длину контактных площадок в процессе шлифования для обоих компонентов определяются по зависимостям, найденным для шлифования стали Р6М5Ф3, как имеющей большую твердость по сравнению со сталью 45.

Результаты расчетов по формулам (1), (2) и исходным данным (см. таблицу 1) показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные значения составляющих силы резания на комбинированном образце и его компонентах

Составляющие силы резания	Значения составляющих силы резания, Н		
	На компонентах образца		На комбинированном образце в сборе
	Сталь45	Р6М5Ф3	
$P_z$	7,81	34,4	42,2
$P_y$	15,8	69	84,8

Для проверки аналитического расчета были проведены эксперименты по определению составляющих силы резания на отдельных компонентах комбинированного образца из сталей 45 и Р6М5Ф3 и образце в сборе при врезном шлифовании на режимах:  $V_k = 35$  м/с,  $V_d = 6$  м/мин,  $t_\phi = 0,015$  мм, кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80-4 М2-01.

Плоское врезное шлифование комбинированного образца (см. рисунок 1) и его компонентов выполняли на станке мод. 3Г71, модернизированном для осуществления электроэрозионных воздействий на РПК. Составляющие силы резания измеряли с помощью динамометра УМД-100, усилителя УТ 4-1 и запоминающего двулучевого осциллографа мод. С8-17.

Шлифовальный круг был заправлен электроэрозионным способом с использованием генератора ИТТ-35 на режимах:  $U_{xx} = 60$  В,  $I_{cp} = 8-10$  А, рабочая среда 0,3% раствор кальцинированной соды.

Перед проведением экспериментов была выполнена тарировка динамометра УМД-100. Тарировочные графики показаны на рисунках 2 и 3, а тарировочные уравнения, найденные методом наименьших квадратов для составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$ , имеют вид, соответственно:

$$P_z = 6,046 \cdot D ;$$

$$P_y = 10,5 \cdot D ,$$

где  $D$  – число делений на осциллографе.

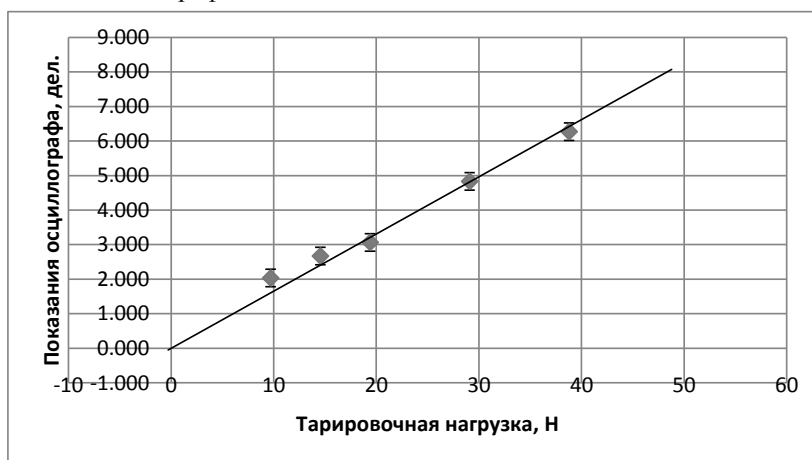


Рисунок 2 – Тарировочный график УМД-100 по составляющей  $P_z$

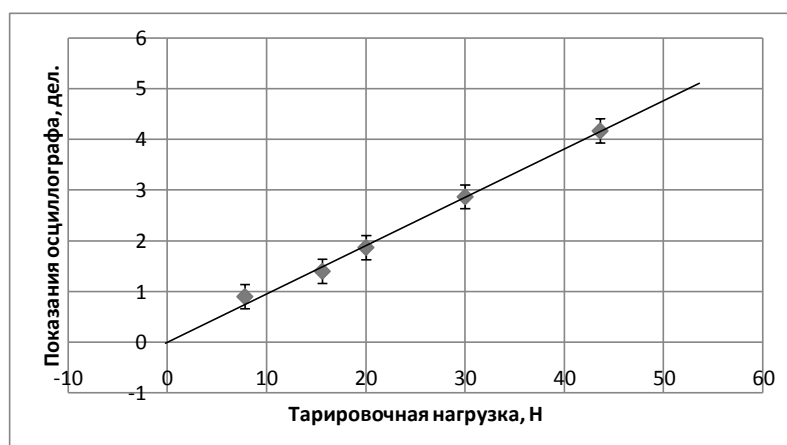


Рисунок 3 – Тарировочный график УМД-100 по составляющей  $P_y$

Експериментальні значення складових сил різання на комбінованому зразку і його компонентах приведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Складові сили різання на комбінованому зразку і його компонентах, знайдені експериментально

Складові сили різання	Значення складових сил різання, Н		
	На компонентах зразка		На комбінованому зразку «Сталь45-Р6М5Ф3»
	Сталь45	Р6М5Ф3	
$P_z$	14,9±8,68	35,8±8,68	51,4±8,68
$P_y$	31,1±12,4	56,1±12,4	84±12,4

Як видно, значення складових сил різання на компонентах комбінованого зразка, знайдені теоретичним шляхом (таблиця 2), і експериментально (таблиця 3), знаходяться в 95% довірливих інтервалах, що підтверджує правильність розрахунку за формулами (1) і (2), а також положення, в відповідності з якими сили різання на комбінованому зразку рівні сумі сил на його компонентах.

По даній роботі можна зробити наступні висновки:

1. Складові сили різання на комбінованому зразку і його компонентах, розраховані аналітично, потрапляють в 95%-й довірливий інтервал на середні величини цих же складових, отриманих експериментально.

2. Складові сили різання при врізному шліфуванні комбінованого зразка рівні сумі складових сил різання на окремих його компонентах.

Предложена методика розрахунку складових сил різання на комбінованому зразку в подальшому буде використана для визначення зусилля піджима зразка к РПК, обмеженої температурою окислення алмазних зерен, при врізному шліфуванні по епрувній схемі.

#### **Бібліографічний список використаної літератури:**

1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. Под. ред. д-ра техн. наук проф. А.Н. Резникова. — М.: Машиностроение, 1977. — 391 с.
2. Матюха П.Г. Високопродуктивне шліфування ванадієвих штампових та інструментальних сталей / П.Г. Матюха. — Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. — 222 с.
3. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах: Учебник для вузов по специальности «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты» / А.Н. Резников, Л.А. Резников. — М.: Машиностроение, 1990. — 288 с.
4. Грінюв А.О. Підвищення ефективності алмазного шліфування важкооброблюваних інструментальних сталей при обробленні зі збільшеними дугами контакту круга із заготовкою: автореф. дис... на здобуття ступеню канд. техн. наук. 05.03.01: Процеси механічної обробки, верстати та інструмент / А.О. Грінюв. — Донецьк: ДонНТУ, 2005. — 18 с.

*Поступила в редакцію 9.06.2010 г.*

#### **Матюха П.Г., Бурдін О.В., Габітов В.В. Визначення складових сил різання при врізному шліфуванні комбінованого зразка**

У статті запропонований метод аналітичного розрахунку складових сил різання при шліфуванні комбінованого зразка «конструкційна сталь – швидкорізальна сталь».

**Ключові слова:** комбінований зразок, сили шліфування, плоске шліфування.

#### **Matjuha P.G., Burdin A.V., Gabitov V.V. Determination of grinding forces by the infeed mode grinding of a complex workpiece**

The method for analytical calculation of grinding forces by the complex workpiece “steel – high speed steel” is proposed in the article.

**Keywords:** complex workpiece, grinding forces, infeed mode grinding.