

УДК 621.923

А.В. БУРДИН (асп., mc@donntu.edu.ua)

Донецкий национальный технический университет, г.Донецк, Украина

**ВЛИЯНИЕ ЗЕРНИСТОСТИ АЛМАЗОВ НА СИЛУ ПОДЖИМА
КОМБИНИРОВАННОГО ОБРАЗЦА «СТАЛЬ – ТВЕРДЫЙ СПЛАВ»
К РЕЖУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУГА**

Предложена методика расчета силы поджима комбинированного образца «сталь – твердый сплав» к режущей поверхности круга (РПК) при шлифовании кругами различных зернистостей.

Ключевые слова: Алмазное шлифование, сила поджима, зернистость, комбинированный образец.

Введение

Высокопроизводительное шлифование при условии получения заданных показателей качества и минимуме затрат, как правило, обеспечивается оптимизацией режимов шлифования. Так, в работе [1] при оптимизации используются обобщенные режимы шлифования, одним из которых, при шлифовании по упругой схеме, является сила поджима образца к режущей поверхности круга (РПК). Использование при оптимизации обобщенных режимов существенно снижает трудоемкость поиска по сравнению с известными способами [2]

В работах [3, 4] определена сила поджима комбинированного образца «сталь – твердый сплав» к РПК, ограниченная температурой окисления алмазов при шлифовании кругом только одной характеристики 1A1 250x76x15x5 AC6100/80-M2-01.

Таким образом, сведения о влиянии зернистости шлифовального круга на силу поджима комбинированного образца к РПК в литературе отсутствуют.

Целью работы является исследование влияния зернистости алмазов на силу поджима комбинированного образца «сталь 45 – твердый сплав ВК8» к РПК, при плоском врезном шлифовании.

Основное содержание работы

При расчете силы поджима комбинированного образца к РПК (рис.1) используем положение, в соответствии с которым радиальная составляющая силы резания на комбинированном образце равна сумме радиальных сил на отдельных его частях

$$P_{n\ KO} = P_{yTC} + P_{yCT}, \quad (1)$$

где P_{yTC} – радиальная сила резания твердосплавной части комбинированного образца, ограниченная температурой окисления алмазов, P_{yCT} – радиальная сила резания стальной части образца, полученная при шлифовании на режимах, одинаковых с твердым сплавом.

Радиальную силу резания твердосплавной части, ограниченную температурой окисления алмазов, вычислим по формуле, заимствованной из работы [4]:

$$P_{yTC} = \frac{1}{k_{ш}} \left(\frac{[T_{ок} - 293] (\lambda_1 + 2,25 \lambda_{TC} A^* \sqrt{F_0}) \pi z_p d^2}{4,52 A^* \delta \sqrt{\omega_1 V_k L}} \right), \quad (2)$$

где $k_{ш}$ – коэффициент шлифования твердого сплава алмазным кругом; $T_{ок}$ – температура окисления алмазного зерна, °К; L – длина дуги контакта зерна с обрабатываемой поверхностью, мм; V_k – скорость круга, м/с; d – диаметр основания цилиндрической модели зерна, мм; λ_1 – коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/(м·°С); λ_{TC} – коэффициент теплопроводности ВК8, Вт/м·град; ω_1 – коэффициент температуропроводности алмаза, м²/с; δ – коэффициент неравномерности нагрузки на зерне; z_p – количество режущих зерен на площадке контакта круга с заготовкой, шт; F_0 – безразмерное время контакта зерна с кругом, представле нное с помощью критерия Фурье; A^* – безразмерная функция температуры на алмазе.

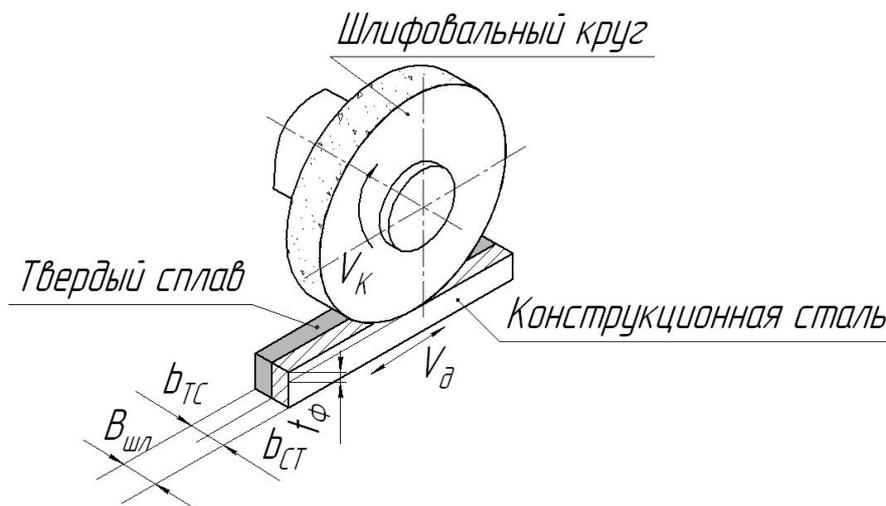


Рис.1. Схема плоского шлифования комбинированного образца.

Длина дуги контакта шлифовального круга с образцом равна:

$$L = \sqrt{2R_k t_\phi}, \quad (3)$$

где R_k – диаметр шлифовального круга, мм; t_ϕ – глубина шлифования, мм.

Диаметр цилиндрической модели зерна определяется через диаметр шаровой модели, по условию равенства объёмов цилиндрической и шаровой моделей зерна [4], мкм,

$$d = \sqrt[3]{\frac{2}{3}} d_{cp}. \quad (4)$$

Диаметр шаровой модели зерна d_{cp} , мкм,

$$d_{cp} = \frac{6090}{\sqrt[3]{N_z}}, \quad (5)$$

где N_z – среднее количество зерен в одном карате, шт.
Количество одновременно работающих зерен z_p , шт [4]:

$$z_p = \frac{Lb_{TC}}{S_{zn}^2} F(a_z), \quad (6)$$

где b_{TC} – ширина твердосплавной части, мм.
Расстояние между зернами на поверхности круга, мм:

$$S_{zn} = S_{zp} K_1. \quad (7)$$

Расстояние между зернами в сечении алмазосносного слоя плоскостью, мм:

$$S_{zp} = \frac{10}{\sqrt[3]{\frac{4,4KN_z}{100}}}, \quad (8)$$

где K – относительная концентрация алмазов в алмазосносном слое, %.
 $K_1 = 2,46$ – коэффициент, учитывающий критическую величину закрепления зерна в связке алмазосносного слоя.

Вероятность попадания вершины зерна в интервал, равный толщине среза, определяется значением функции распределения Вейбулла:

$$F(a_z) = 1 - \exp\left(\frac{-a_z^m}{X_0}\right), \quad (9)$$

где X_0 , m – параметры распределения Вейбулла.
Толщина единичного среза a_z , мкм:

$$a_z = a_{z \max} + R_z k_{cp}, \quad (10)$$

где R_z – параметр шероховатости на поверхности резания, мкм; k_{cp} – коэффициент, учитывающий влияние марки твердого сплава на параметр шероховатости поверхности резания при обработке твердого сплава.

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

$$a_{z \max} = R_k - \sqrt{\left(\frac{V_d l_{\text{фок}}}{60V_k}\right)^2 + R_k^2 - 2 \frac{V_d l_{\text{фок}} R_k}{60V_k} \sqrt{2 \frac{t_{\phi} 10^{-3}}{R_k}}}, \quad (11)$$

где $l_{\text{фок}}$ – фактическое окружное расстояние между двумя контактирующими зернами, мм; V_d – скорость детали, м/мин; V_k – скорость круга, м/с.

Фактическое окружное расстояние между контактирующими зернами определяется по формуле:

$$l_{\phi_{ок}} = S_{зр} K_1 K_c K_{\partial}. \quad (12)$$

Значение коэффициента K_c , учитывающего разновысотное положение зерен определяется через вероятность попадания вершин зерен в интервал равный глубине шлифования, выраженной значением функции распределения Вейбулла

$$K_c = \frac{1}{\sqrt{F(t_{\phi})}}, \quad (13)$$

$$F(t_{\phi}) = 1 - \exp\left(-\frac{t_{\phi}^m}{X_0}\right), \quad (14)$$

где X_0 , m – параметры распределения Вейбулла.

Кинематический коэффициент K_{∂} , учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами:

$$K_{\partial} = \alpha_{\partial} + \beta_{\partial} \frac{60V_{\kappa}}{V_{\partial}}, \quad (15)$$

где α_{∂} , β_{∂} – параметры уравнения регрессии.

Величина A^* определяется по формуле, [3]:

$$A^* = A_1 - \frac{8\lambda_{\kappa} F_0}{\ln \frac{4h}{d} \lambda_1 + 8\lambda_{\kappa} F_0} A_{ср}, \quad (16)$$

где A_1 – безразмерная функция учитывающая температуру рабочего торца зерна [4]; $A_{ср}$ – безразмерная функция, учитывающая среднюю температуру рабочего и не рабочего торца зерна [4]; h – высота цилиндрической модели зерна ($d=h$), мм; λ_{κ} – коэффициентом теплопроводности алмазоносного слоя шлифовального круга, Вт/(м·°К);

Коэффициент теплопроводности алмазоносного слоя шлифовального круга, Вт/(м·°К), рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{\kappa} = \lambda_{\kappa a}^{0,01 \cdot Y_a} \cdot \lambda_{\kappa o}^{0,01 \cdot Y_o} \cdot \lambda_{\kappa m}^{0,01 \cdot Y_m}, \quad (17)$$

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

Безразмерное время шлифования определим следующим образом, [4]:

$$F_0 = \frac{\omega_1 L}{V_{\kappa} d^2} \quad (18)$$

При $F_0 > 10$

$$A_1 = 0,977 + 0,718 F_0^{0,602}, \quad (19)$$

$$A_{cp} = 1,041F_0^{0,5}. \quad (20)$$

При $F_0 \leq 10$

$$A_1 = 1,033 + 0,576F_0^{0,719}, \quad (21)$$

$$A_{cp} = 1,075F_0^{0,502}. \quad (22)$$

Аналитический расчет радиальной силы резания при плоском врезном шлифовании стальной части комбинированного образца выполним, используя формулы, приведенные в работе [5], которые используют схему стружкообразования с единственной условной плоскостью сдвига.

$$P_{yCT} = \left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \sin \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M l_3 \right) S_x z_p \left(C - \frac{4a\alpha V_\kappa \sqrt{H} \alpha_6}{\sqrt{\pi} \lambda V_\Delta S} P_{zCT} \right). \quad (23)$$

Тангенциальная составляющая силы резания на круге определяется по формуле:

$$P_{zCT} = \frac{\left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) S_x z_p C}{1 + \left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_z \right) S_x z_p \frac{4a\alpha V_\kappa \sqrt{H} \alpha_6}{\sqrt{\pi} \lambda V_\Delta S}}. \quad (24)$$

Здесь M – соотношение нормальных и касательных напряжений вдоль условной плоскости сдвига; β – угол сдвига, рад; a_z – толщина единичного среза, мкм; ω – угол действия, рад; C , α – коэффициенты модификации МакГрегора-Фишера для стали 45; κ_3 – коэффициент контактирования задней поверхности зерна по поверхности заготовки; μ – коэффициент трения между зерном и заготовкой; S_x – ширина среза единичным зерном, мм; λ_{CT} – коэффициент теплопроводности стали 45, Вт/м·град; l_3 – величина контактной площадки на зерне, мкм; z_p – количество одновременно работающих зерен, шт; S – площадь зоны контакта заготовки с кругом, мм²; V_Δ – скорость детали, м/мин; V_κ – скорость круга, м/с; H – безразмерная полуширина источника тепла; a_{CT} – коэффициент температуропроводности стали 45, м²/с; α_6 – коэффициент ввода теплоты в заготовку.

Соотношение нормальных и касательных напряжений вдоль условной плоскости сдвига M :

$$M = 1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right). \quad (25)$$

Угол сдвига β , рад:

$$\beta = \arctg \left(\frac{\cos \gamma}{K_L - \sin \gamma} \right), \quad (26)$$

где K_L – коэффициент усадки стружки.

При расчете сил резания форму зерна примем в виде призмы, а передний угол определяется по среднему диаметру шаровой модели зерна, рад:

$$\gamma = -\arcsin\left(1 - \frac{2a_z}{d_{cp}}\right). \quad (27)$$

Толщина единичного среза a_z , мкм:

$$a_z = a_{z \max} + \frac{R_z}{2}. \quad (28)$$

Составляющие формулы (28) находятся по выше приведенным зависимостям. Количество одновременно работающих зерен z_p , длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом L и коэффициент теплопроводности круга определяются по зависимостям (6), (3), (17) соответственно.

Угол действия ω , рад:

$$\omega = \arctg M - \beta. \quad (29)$$

Площадь зоны контакта стальной части комбинированного образца с кругом S , мм²:

$$S = b_{CT} \sqrt{2R_k t_\phi} 10^{-3}. \quad (30)$$

Величина контактной площадки на зерне l_z , мкм:

$$l_z = 0,22 d_{cp} T^{0,047}, \quad (31)$$

где T – время шлифования после правки круга, мин.

Ширина единичных срезов, мм, определяется по формуле:

$$S_x = \frac{S_{zn}^2}{l_\phi F(t_\phi) K_k}, \text{ если } S_x < b_c. \quad (32)$$

Иначе $S_x = b_c$.

В формулах (32), (33) b_c – ширина единичного среза, определяемая по ширине модели зерна в виде конуса с округленной вершиной, по известным зависимостям [6].

$$b_c = 2 \cdot \left(\sqrt{2\rho a_z - a_z^2} + (t_\phi - a_z) \cdot \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} \right), \quad (34)$$

если

$$t_\phi \geq \rho \left(1 - \sin \frac{\varepsilon}{2} \right). \quad (35)$$

Если неравенство (35) не выполняется, то:

$$b_c = 2 \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \rho \cdot t_\phi - t_\phi^2} \right). \quad (36)$$

Безразмерная полуширина источника тепла H :

$$H = \frac{0,5V_\partial L}{60 \cdot 1000 \cdot 2a_{CT}}. \quad (37)$$

Коэффициент ввода теплоты в заготовку $\alpha_{в CT}$:

$$\alpha_{в CT} = \frac{1}{\left(1,25 \frac{\lambda_\kappa}{\lambda_{CT}} \sqrt{\frac{a_{CT}}{21 \cdot 10^{-6} \cdot V_\kappa}} \right) + 1}. \quad (38)$$

Расчет силы поджима выполним по формулам (2) – (38) с помощью разработанной нами программы на ПЭВМ в среде MathCad по исходным данным, для кругов различной зернистости, приведенным в табл.1.

Таблица 1 – Данные для вычисления силы поджима комбинированного образца к РПК.

Наименование параметра	Числовое значение
1	2
$b_{ТС}$ – Ширина твердосплавной части образца, мм.	7
$b_{СТ}$ – Ширина стальной части образца, мм.	7
R_κ – Радиус круга, мм.	125
V_κ – Скорость круга, м/с.	35
V_∂ – Скорость стола, м/мин.	6
t_ϕ – Глубина резания, мкм.	15
T – Время шлифования (после правки), мин.	1
K – Относительная концентрация алмазов, %.	100
Параметры распределения разновысотности (для зернистости 100/80)*, сформированные после электроэрозионной правки и описываемые законом Вейбулла: m / X_0	1,69 / 262
Параметры распределения разновысотности (для зернистости 160/125)*: m / X_0	1,71 / 539
Параметры распределения разновысотности (для зернистости 250/200)*: m / X_0	1,63 / 532
Параметры уравнения регрессии для расчета K_∂ (зернистость 100/80): $\alpha_\partial / \beta_\partial$	14,32 / 0,112
Параметры уравнения регрессии для расчета K_∂ (зернистость 160/125): $\alpha_\partial / \beta_\partial$	10,31 / 0,105

Продолжение таблицы 1.

1	2
Параметры уравнения регрессии для расчета K_d (зернистость 250/200): α_d / β_d	9,83 / 0,04
$N_{z\ 100/80}$ – Число зерен в одном карате зернистости 100/80, шт.	100000
$N_{z\ 160/125}$ – Число зерен в одном карате зернистости 160/125, шт.	29100
$N_{z\ 250/200}$ – Число зерен в одном карате зернистости 250/200, шт.	8410
K_l – Коэффициент для расчета расстояния между зернами на РПК.	2,46
k_{cp} – коэффициент, учитывающий влияние марки твердого сплава на параметр шероховатости.	0,94
a_{TC} – коэффициент температуропроводности ВК8, м ² /с	$0,246 \cdot 10^{-4}$
a_{CT} – коэффициент температуропроводности стали 45, м ² /с.	$0,08 \cdot 10^{-4}$
λ_{TC} – Коэффициент теплопроводности ВК8, Вт/м·град.	54,4
λ_{CT} – Коэффициент теплопроводности стали 45, Вт/м·град.	40,2
ω_l – Коэффициент температуропроводности алмаза, м ² /с.	$0,83 \cdot 10^{-4}$
λ_l – Коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/м·град.	520
λ_{KM} – коэффициент теплопроводности меди, Вт/м·град.	361
λ_{KO} – коэффициент теплопроводности олова, Вт/м·град.	67
Y_m – Объемная доля меди, %.	57,7
Y_o – Объемная доля олова, %.	17,3
Y_a – Содержание алмазов, %.	25
κ_z – Коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на площадке износа.	1
Параметры для определения величины касательных напряжений в стали 45, C (Па) и α (Па/°К).	$C=380 \cdot 10^6$ $\alpha=54 \cdot 10^3$
μ – Коэффициент трения (алмаз по стали).	0,2
δ – Коэффициент неравномерности нагрузки на зерне.	1,5
$T_{ок}$ – температура начала окисления алмазов марки АС6, °К	823
$K_{ш}$ – коэффициент шлифования.	0,35 [3]

* Примечание: влияние времени обработки на параметры распределения разновысотности и длину контактных площадок в процессе шлифования для обоих компонентов, определяются по зависимостям, найденным для шлифования твердого сплава ВК8, как имеющей большую твердость по сравнению со сталью 45.

Для выяснения механизма влияния зернистости алмазных зерен на усилие поджима РПК к заготовке кроме результатов расчета на печать были выведены параметры рабочей поверхности модели круга, зависящие от зернистости (табл.2).

Таблица 2 – Влияние зернистости алмазов на силу поджима РПК к комбинированному образцу «сталь – твердый сплав» ($V_k=35$ м/с, $V_d=6$ м/мин, $t_{\phi}=0,015$ мм, 1А1 250x76x15x5 АС6 100/80-М2-01, 1-я минута шлифования).

Характеристика круга	Шлифование твердосплавной части образца			Шлифование стальной части образца					$P_{нКО}$, Н	
	Параметры, влияющие на теплоотвод			P_{yTC} , Н	Параметры модели круга					P_{yCT} , Н
	z_p , шт	f_z , мкм ²	f_z общ, мкм ²		γ , °	z_p , шт	l_z , мкм	S_x , мкм		
АС6 100/80-4-М2-01	18,4	$10,3 \cdot 10^3$	$189 \cdot 10^3$	41,6	-67	49	29	9,8	22,8	64,4
АС6 160/125-4-М2-01	7,63	$23,5 \cdot 10^3$	$179 \cdot 10^3$	35	-66	12	43	23	19,5	54,5
АС6 250/200-4-М2-01	5	$53,5 \cdot 10^3$	$267 \cdot 10^3$	50	-70,3	4,3	66	43	19,5	69,5

При шлифовании части образца, состоящей из твердого сплава, это количество одновременно контактирующих зерен z_p , площадь контакта цилиндрической модели зерна с поверхностью резания f_z , влияющие на условия отвода тепла в шлифовальный круг. При шлифовании стальной части были выведены параметры, влияющие на величину составляющих сил резания: количество одновременно контактирующих зерен, передний угол γ , длина площадки контакта l_z и ширина единичного среза S_x , описывающие модель режущей части зерна и круга.

Как видно из табл.2, при шлифовании стальной части, с увеличением зернистости уменьшается число зерен, а ширина среза увеличивается, что приводит к уменьшению силы P_{yCT} . При шлифовании твердого сплава, увеличение зернистости приводит к изменению площади контакта зерна с поверхностью резания, а соответственно, условий отвода тепла в шлифовальный круг. В результате, при шлифовании кругом зернистости 250/200 допустимая величина составляющей силы резания P_{yTC} больше, чем для зернистостей 100/80 и 160/125. Влияние зернистости круга на силу поджима комбинированного образца к РПК $P_{нКО}$ качественно аналогично с влиянием зернистости на радиальную составляющую силы резания твердого сплава.

Выводы

Предложена методика расчета силы поджима комбинированного образца к РПК при шлифовании кругами различных зернистостей.

Список литературы

1. Матюха П.Г. Обобщенные режимы процесса шлифования, обеспечивающие стабильные показатели качества / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2010. – Вип.7(166). – С. 39 – 45.
2. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / под ред. д-ра техн. наук проф. А.Н. Резникова. – М.: «Машиностроение», 1977. – 391 с.
3. Матюха П.Г. Определение усилия поджима комбинированного образца «конструкционная сталь – твердый сплав» к рабочей поверхности круга при шлифовании по упругой схеме / П.Г. Матюха, В.В. Габитов, Р.В. Кондрашов //

Надежность инструмента и оп-тимизация технологических сис-тем. Сборник научных трудов. – Краматорск, 2007. – Вып. 21. – С. 52-56.

4. Матюха П.Г. Определение силы поджима образца к кругу, ограниченной температурой графитизации алмазных зерен / П.Г.Матюха, В.Б.Стрелков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2004. – Вип.71. – С. 41 – 46.

5. Матюха П.Г. Вископродуктивне шліфування ванадієвих штампових та інструментальних сталей / П.Г. Матюха. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – 222 с.

6. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.

Рецензент: Калафатова Л.П.

Надійшла до редколегії: 21.04.2011р.

О.В. БУРДИН

Донецький національний технічний університет

**ВПЛИВ ЗЕРНИСТОСТІ АЛМАЗІВ НА СИЛУ ПІДТИСКУ КОМБІНОВАНОГО
ЗРАЗКА «СТАЛЬ – ТВЕРДИЙ СПЛАВ» ДО РІЗАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ КРУГА**

Запропонована методика розрахунку сили підтиску комбінованого зразка «сталь – твердий сплав» до різальної поверхні круга (РПК) при шліфуванні кругами різних зернистостей.

Алмазне шліфування, сила підтиску, зернистість, комбінований зразок

A.V. BURDIN

Donetsk nation technical university

**INFLUENCE OF DIAMOND GRAININESS ON HOLD-DOWN PRESSURE
OF COMBINED SAMPLE «STEEL – HARD ALLOY»
TO WHEEL WORKING SURFACE**

The method of calculation of hold-down pressure of combined sample «steel – hard alloy» to wheel working surface with grinding by wheels of different graininess is proposed .

Diamond grinding, hold-down pressure, graininess, combined sample