

**Матюха П. Г., Габитов В. В., Кондрашов Р. В.**  
ДонНТУ, Донецк, Украина

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ПОДЖИМА КОМБИНИРОВАННОГО ОБРАЗЦА «КОНСТРУКЦИОННАЯ СТАЛЬ-ТВЕРДЫЙ СПЛАВ» К РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУГА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ПО УПРУГОЙ СХЕМЕ**

*In a given article is resulted the method of determination total force of screwing of purveyance from a carboloy and steel to the diamond grinding circle and is certain a temperature on-the-spot purveyance. Cutting ability of grinding circle is experimentally certain.*

### ***Введение***

Алмазное шлифование кругами на металлической связке широко применяется на операциях заточки твердосплавного инструмента. При этом одновременно выполняется шлифование рабочей твердосплавной части и державки из конструкционной стали.

На заточных операциях наиболее целесообразно применение упругой схемы шлифования, так как при этом достигается наибольшее качество обработанной поверхности, что непосредственно влияет на эксплуатационные показатели инструмента [1, 2, 3]. В перечисленных работах оптимизация режимов обработки осуществляется экспериментальным путем с использованием многофакторных экспериментов, что требует больших затрат времени. Для определения оптимальных режимов обработки при алмазном шлифовании быстрорежущих сталей и твердых сплавов предложено использовать мгновенную текущую лимитированную режущую способность шлифовального круга [4, 5, 6]. Производительность заточной операции в этом случае зависит от исходного состояния рабочей поверхности круга (РПК) и усилия поджима обрабатываемой поверхности образца к РПК, методика расчета которого в литературе отсутствует.

Цель работы: разработка методики расчета усилия поджима комбинированного образца из конструкционной стали и твердого сплава к РПК.

### ***Основная часть***

Определение суммарной силы поджима обрабатываемой поверхности образца к РПК выполним на основе следующих допущений:

- а) усилие поджима твердосплавной части образца к РПК ограничивается температурой окисления алмазных зерен;
- б) при расчете усилия поджима стальной части глубина шлифования равна глубине шлифования твердого сплава;

в) боковые поверхности комбинированного образца адиабатичны, т.е. теплообмен между ними через слой припоя отсутствует;

г) общее усилие поджима комбинированного образца определяется суммой составляющих радиальных сил резания стальной и твердосплавной частей.

Определение усилия поджима комбинированного образца выполним в три этапа: на первом этапе определим усилие поджима твердосплавной части образца исходя из отсутствия окисления алмазных зерен, на втором – определим усилие поджима стальной части образца при шлифовании с глубиной, равной глубине шлифования твердосплавной части, на третьем – определим суммарное усилие поджима.

Усилие поджима обрабатываемого образца к РПК при плоском врезном шлифовании периферией круга  $P_{yTC}$  (рис. 1.1) имеет вид [7]:

$$P_{yTC} = \frac{1}{k_{ш}} \cdot \left( \frac{0,95 \cdot T_{ок} \cdot (\lambda_1 + 2,25 \cdot \lambda \cdot A^* \cdot \sqrt{F_0}) \cdot \pi \cdot n_p \cdot d^2 \cdot \sqrt{l} \cdot b}{4,52 \cdot A^* \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega_1 \cdot V_k}} \right), \quad (1)$$

где:  $k_{ш}$  – коэффициент шлифования твердого сплава алмазным кругом;

$T_{ок}$  – температура окисления алмазного зерна, °С;

$l$  – длина дуги контакта зерна с обрабатываемой поверхностью, мм;

$V_k$  – скорость круга, м/с;

$b$  – ширина шлифуемой поверхности, мм;

$d$  – диаметр основания цилиндрической модели зерна, мм;

$\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/(м·°С);

$\omega_1$  – коэффициент температуропроводности алмаза, м<sup>2</sup>/с;

$\delta$  – коэффициент неравномерности нагрузки на зерне;

$n_p$  – количество режущих зерен на одном квадратном метре поверхности круга.

Величина  $A^*$  определяется по формуле:

$$A^* = A_1 - \frac{8 \cdot \lambda_k \cdot F_0}{\ln 4h/d\lambda_1} \cdot \frac{A_{cp}}{1 + \frac{8 \cdot \lambda_k \cdot F_0}{\ln 4h/d\lambda_1}}$$

Здесь:

$A_1$  – безразмерная функция учитывающая температуру рабочего торца зерна;

$A_{cp}$  – безразмерная функция, учитывающая среднюю температуру рабочего и не рабочего торца зерна;

$F_0$  – безразмерное время контакта зерна с кругом, представленное с помощью критерия Фурье;

$h$  – высота цилиндрической модели, мм;

$\lambda_k$  – коэффициентом теплопроводности связки, Вт/(м·°С);

Длина дуги контакта шлифовального круга с образцом равна:

$$l = \sqrt{D_k \cdot t};$$

где:  $D_k$  – диаметр шлифовального круга, мм;  
 $t$  – глубина шлифования, мм.

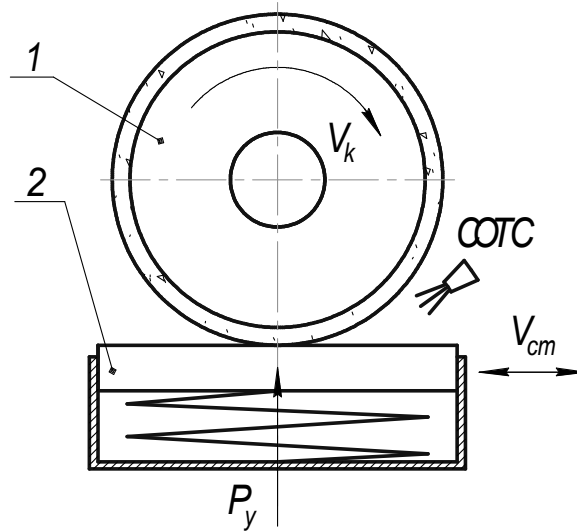


Рисунок 1 – Схема плоского шлифования по упругой схеме периферией круга: 1 – шлифовальный круг, 2 – обрабатываемый образец

Усилие поджима стальной части комбинированного образца к РПК было определено по существующей методике [4] при условии, что глубина шлифования стальной и твердосплавной частей равны.

Усилие поджима стальной части обрабатываемого образца к РПК определим по формуле [4]:

$$P_{уст} = \left( \frac{\sqrt{1 + M^2} \cdot a_z \cdot \sin \omega}{\sin \beta} + K_3 \cdot M \cdot l_3 \right) \cdot b \cdot z_p \cdot \left( C - a \cdot \frac{4 \cdot \alpha \cdot 60 \cdot V_k \cdot \sqrt{H} \cdot \alpha_6}{\lambda \cdot V_{cm} \cdot S \cdot \sqrt{\pi}} \cdot P_{зСТ} \right), \quad (2)$$

где  $V_k$  – скорость круга, м/с;

$V_{cm}$  – скорость обрабатываемой детали, м/мин;

$b$  – ширина шлифуемой поверхности, мм;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности стали 45, из которой изготовлена стальная часть образца, Вт/(м·°C);

$\alpha$  – коэффициент температуропроводности стали 45, м<sup>2</sup>/с;

$z_p$  – количество одновременно работающих зерен;

$l_3$  – величина площадки контакта зерна с обрабатываемой поверхностью;

$\omega$  – угол действия силы стружкообразования, рад;

$\beta$  – угол сдвига, рад;

$M$  – соотношение нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau_s$  напряжений вдоль условной плоскости сдвига  $M = \frac{\sigma}{\tau_s} = \left[ 1 + 2 \cdot \left( \frac{\pi}{4} - \beta \right) \right]$ ;

$K_3$  – коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на площадке износа;

$K_3$  – коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на площадке износа;

$C$ ,  $a$  – начальная ордината и коэффициент в линейной зависимости, отражающий влияние температурно-скоростных факторов на величину касательных напряжений;

$\alpha_g$  – коэффициент ввода тепла в заготовку;

$P_{zCT}$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н.

Тангенциальная составляющая равна [4]:

$$P_{zCT} = \frac{\left( \frac{\sqrt{1+M^2} \cdot a_z \cdot \cos \omega}{\sin \beta} + K_3 \cdot M \cdot l_3 \cdot \mu \right) \cdot b \cdot z_p \cdot C}{1 + \left( \frac{\sqrt{1+M^2} \cdot a_z \cdot \cos \omega}{\sin \beta} + K_3 \cdot M \cdot l_3 \cdot \mu \right) \cdot b \cdot z_p \cdot a \cdot \frac{4 \cdot \alpha \cdot 60 \cdot V_k \cdot \sqrt{H} \cdot \alpha_g}{\lambda \cdot V_{cm} \cdot S \cdot \sqrt{\pi}}}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения алмазного зерна по поверхности обрабатываемого материала.

Зависимость влияния температурно-скоростных факторов на величину касательных напряжений при шлифовании конструкционной стали выполняется при помощи модификации К. Макгрегора и И. Фишера с использованием данных стандартных испытаний [8], которая имеет вид

$$\tau_s = C - \alpha \cdot T.$$

Чтобы стальная и твердосплавная части комбинированного образца не разъединились в процессе шлифования в результате плавления припоя, температура на поверхности стальной и твердосплавной частей не должна превышать допустимой рабочей температуры припоя.

Температура на обрабатываемой поверхности стальной и твердосплавной частей комбинированного образца определяется по формуле [9]:

$$T_{nz} = \frac{2 \cdot q \cdot \omega_3}{\pi \cdot \lambda \cdot V_{cm}} \cdot \sqrt{2\pi \cdot 2H}, \quad (4)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, поступающего в заготовку;

$H$  – безразмерная полуширина источника тепла;

$V_{cm}$  – продольная скорость стола, м/с;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Дж/(м·с·°С);

$\omega$  – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с.

Плотность теплового потока определим по формуле:

$$q = \frac{P_z \cdot V_k \cdot \alpha_g}{b \cdot \sqrt{D_k \cdot t}},$$

где  $\alpha_g$  – коэффициент ввода тепла в заготовку.

Коэффициент ввода тепла в заготовку равен:

$$\alpha_g = \frac{1}{1,25 \cdot \frac{\lambda_k}{\lambda} \sqrt{\frac{\omega}{r_o \cdot V_k}} + 1},$$

где  $\lambda_k$  – коэффициент теплопроводности алмазоносного слоя, Дж/(м·с·°С);  
 $r_o$  – радиус закругления вершины зерна, м.

Безразмерная полуширина источника тепла находится по формуле:

$$H = \frac{V_{cm} \cdot \sqrt{D_k \cdot t}}{4 \cdot \omega}.$$

Как отмечалось ранее, суммарную силу поджима определим как сумму составляющих сил поджима при шлифовании стальной  $P_{yCT}$  и твердосплавной частей  $P_{yTC}$  комбинированного образца:

$$P_y = P_{yCT} + P_{yTC}.$$

Для выполнения расчетов на ПЭВМ по формулам (1) – (4) была составлена программа.

**Пример.** Рассчитать усилие поджима  $P_y$  комбинированного образца к РПК при плоском врезном шлифовании и температуру на обрабатываемых поверхностях при следующих исходных данных:

1) режимы шлифования: скорость круга  $V_k = 35$  м/с, скорость стола  $V_{cm} = 6$  м/мин; глубина шлифования  $t = 0,015$  мм;

2) геометрические размеры образца: ширина стальной и твердосплавной части одинакова и равна  $b = 7,5$  мм;

3) геометрические характеристики модели алмазного зерна шлифовального круга 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80-4-М1-0: радиус закругления вершины зерна  $r_o = 6,69$  мкм, угол заострения зерна  $\varepsilon = 91^\circ$ ;

4) характеристики алмазоносного слоя: процентное содержание алмазов в связке круга  $y_a = 25\%$ , процентное содержание меди в связке круга  $y_m = 60\%$ , процентное содержание олова в связке круга  $y_o = 15\%$ , относительная концентрация алмазов в круге  $K = 100\%$ , число зерен в одном карате алмазов  $N_z = 10^5$  шт/карат;

5) кинематические и динамические характеристики шлифования: коэффициент контактирования зерна с обрабатываемой поверхностью  $K_k = 0,44$ , коэффициент неравномерности нагрузки на зерне  $\delta = 1,5$ , коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на площадке износа  $K_z = 1$ , коэффициент шлифования для твердого сплава марки ВК8  $k_{ш} = 0,42$ ; коэффициент усадки стружки при шлифовании стали 45  $K_l = 1,35$ ; начальная ордината и коэффициент в линейной зависимости влияния температурно-скоростных факторов на величину касательных напряжений  $C = 380,6$  МПа,  $\alpha = 0,054$  МПа/°С.

6) теплофизические свойства инструмента и обрабатываемых материалов: температура окисления алмазного зерна  $T_{ок} = 775^\circ\text{С}$ , коэффициент теплопроводности алмаза  $\lambda_{ка} = 530$  Вт·м/°С, коэффициент температуропроводности

алмаза  $\omega_{ка} = 0,000083 \text{ м}^2/\text{с}$ , коэффициент теплопроводности меди  $\lambda_{км} = 361 \text{ Вт}\cdot\text{м}/^\circ\text{С}$ , коэффициент теплопроводности олова  $\lambda_{ко} = 58,41 \text{ Вт}\cdot\text{м}/^\circ\text{С}$ , коэффициент теплопроводности твердого сплава ВК8  $\lambda_{ТС} = 54,4 \text{ Вт}\cdot\text{м}/^\circ\text{С}$ , коэффициент температуропроводности твердого сплава ВК8  $\omega_{ТС} = 0,246 \text{ м}^2/\text{с}$ , коэффициент температуропроводности стали 45  $\omega_{СТ} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , коэффициент теплопроводности стали 45  $\lambda_{СТ} = 45,4 \text{ Вт}/\text{м}\cdot^\circ\text{С}$ .

Как показали расчеты, допустимое усилие поджима твердосплавной части образца составляет  $P_{уТС} = 62 \text{ Н}$ , стальной части  $P_{уСТ} = 11 \text{ Н}$ , температура на поверхности стальной части  $T_{СТ} = 232^\circ\text{С}$ , температура на поверхности твердого сплава  $T_{ТС} = 336^\circ\text{С}$ , что ниже предельно допустимой рабочей температуры припоя марки ПМФ-7  $T_{дон} = 700^\circ\text{С}$  [10].

Суммарное усилие поджима комбинированного образца «сталь 45 – ВК8» к РПК составило  $P_y = 73 \text{ Н}$ .

Для оценки погрешности, вызванной допущением об адиабатичности поверхностей стальной и твердосплавной частей, скрепленных припоем, был выполнен расчет температур на поверхностях образца методом конечных элементов в пакете ANSYS. Расчет показал, что при шлифовании комбинированного образца максимальная температура возникает на поверхности твердосплавной части и составляет  $T_{нз} = 386,39^\circ\text{С}$  (рис. 2, а). Максимальная температура на поверхности для отдельно взятого твердосплавного образца составляет  $T_{ТС} = 386,41^\circ\text{С}$  (рис. 2, б), а стального образца –  $T_{СТ} = 171,17^\circ\text{С}$  (рис. 2, в).

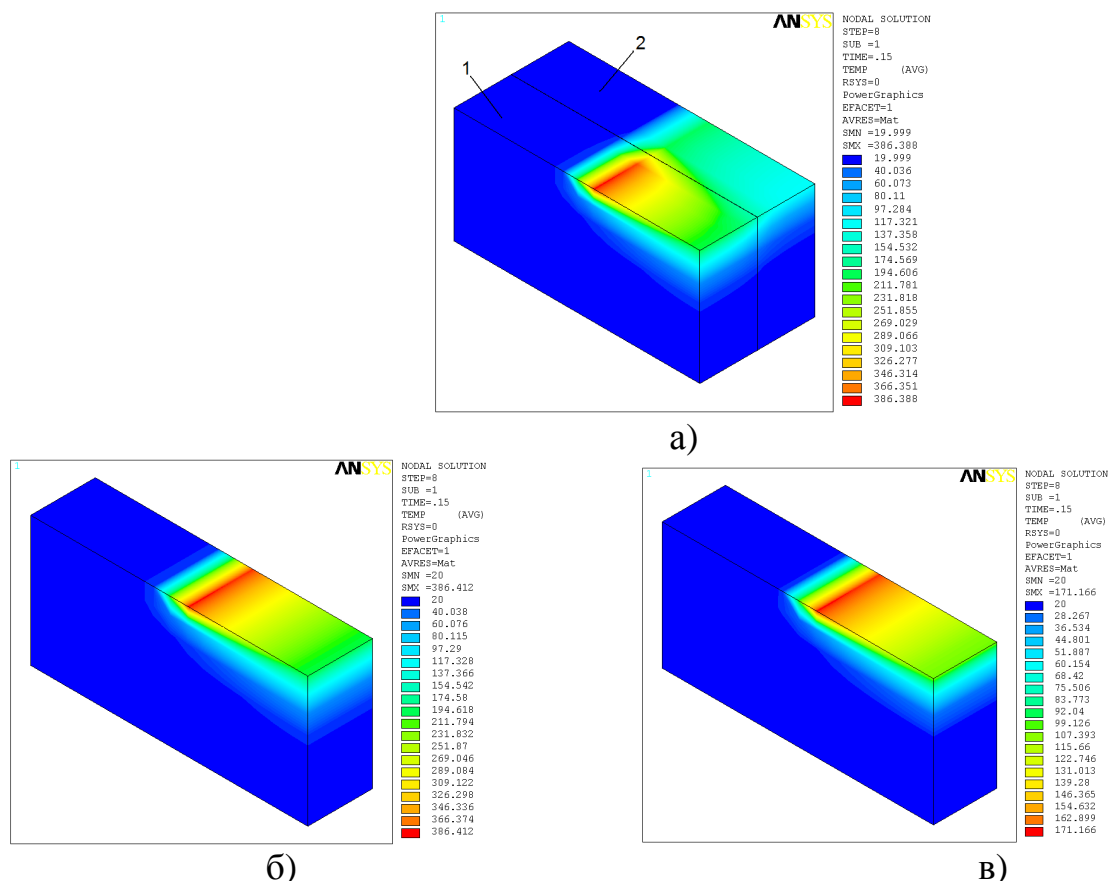


Рисунок 3 – Температурное поле комбинированного образца (а), отдельных его твердосплавной (б) и стальной (в) частей

Степень влияния теплообмена между сопрягаемыми поверхностями комбинированного образца на максимальную температуру поверхности образца составляет:

$$\frac{386,412^{\circ}\text{C} - 386,388^{\circ}\text{C}}{386,412^{\circ}\text{C}} \cdot 100\% = 0,06 \%$$

Таким образом, допущение об адиабатичности спаянных поверхностей не вносит существенной погрешности в расчет максимальной температуры на поверхности комбинированного образца и является в ранее приведенных расчетах обоснованным.

Расхождение температур на поверхности образца аналитически и с помощью метода конечных элементов находится в пределах 13% для твердого сплава и 26% - для стали, что вполне приемлемо.

### **Выводы**

1. Суммарная сила поджима комбинированного образца из стали 45 и твердого сплава ВК8 к РПК, ограничена температурой окисления алмазных зерен при шлифовании твердосплавной части образца, составляет  $P_y = 73$  Н.

2. Температура на поверхности стальной части комбинированного образца составляет  $T_{СТ}=232^{\circ}\text{C}$ , на поверхности твердосплавной части  $T_{ТС}=336^{\circ}\text{C}$ , что не превышает допустимой рабочей температуры припоя  $T_{дон}=700^{\circ}\text{C}$ .

3. Погрешность допущения об адиабатичности сопрягаемых поверхностей комбинированного образца составляет 0,06%, что не влияет на точность расчетов.

4. Суммарное усилие поджима комбинированного образца к РПК будет использовано при проведении экспериментов с целью нахождения уравнения, описывающего зависимость изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга в процессе шлифования.

### **Литература**

- 1 Узунян М.Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов. – Харків: НТУ „ХПІ” 2003. – 359 с.
- 2 Глейзер Л.А. О сущности процесса круглого шлифования// Вопросы точности в технологии машиностроения. – М.; Машгиз, 1959.- с. 5-24.
- 3 Основы алмазного шлифования/ М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, А.Ф. Раб и др. – К.; Техніка, 1978. – 192 с.
- 4 Матюха П.Г. Научные основы стабилизации выходных показателей алмазного шлифования с помощью управляющих воздействия на рабочую поверхность круга: Дис... д-ра. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 1996. – 456 с.
- 5 Полтавец В.В. Обоснование режимов шлифования труднообрабатываемых материалов при электроэрозионном воздействии на рабочую поверхность круга: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / ДонНТУ – Донецк, 2000. – 319с.

- 6 Стрелков В.Б. Повышение производительности алмазного шлифования твердых сплавов за счет рационального использования режущих свойств круга: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / ДонНТУ – Донецк, 2008. – 240с.
- 7 Матюха П.Г., Стрелков В.Б. Определение силы поджима образца к кругу, ограниченной температурой графитизации алмазных зерен. Наукові праці Донецького національного університету. Серія : Машинобудування і машинознавство. Вип. 71. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. С. 41-46.
- 8 Полухин П.И., Гунн Г.Я, Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1976. -488 с.
- 9 Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978 – 167 с.
- 10 Хряпин В.Е. Справочник паяльщика. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1981 – 348 с.