

УДК 621.92

**В.Б. Богущий**, ст.преподаватель, **С.М. Братан**, профессор, докт. техн. наук  
Севастопольский технический университет, Россия  
*E-mail: bogutskivb@yandex.ru*

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ СТРУЖЕЧНЫХ КАНАВОК ПРОТЯЖЕК

*В статье рассмотрена геометрическая задача взаимодействия шлифовального круга, расположенного под углом к оси заготовки и предложены аналитические зависимости расчета площадей их контакта с целью предотвращения дефектов структуры металла.*

**Ключевые слова:** шлифование, шлифовальный круг, стружечная канавка, площадь контакта, периферийная поверхность, дефекты структуры металла

### 1. Введение

Одной из наиболее сложных и трудоемких операций при производстве металло-режущего инструмента, является операция шлифования стружечных канавок и задних поверхностей. Особенно это важно при изготовлении таких дорогостоящих инструментов как протяжки, цилиндрические и модульные фрезы и др. Обработка вышеуказанных поверхностей, а именно: стружечных канавок червячных фрез или протяжек выполняется профильным инструментом, правка которого выполняется по копиру. При этом следует учитывать, что часть профилированной поверхности шлифовального круга имеет большую площадь контакта с поверхностью обрабатываемой детали.

В работах многих авторов [1,2,3] отмечается, что работоспособность протяжек во многом зависит от размеров и формы стружечных канавок, так как при протягивании они оказывают существенное влияние на процесс формирования и схода стружки. Форма впадины зуба должна способствовать плавному завиванию стружки в плотный валик и ее свободному размещению во впадине. Отмечается, что режущие зубья протяжки образуются путем прорезания на исходном стержне поперечных стружечных канавок, т. е. образования передней поверхности и пространства для размещения образующейся при резании стружки и созданий задних поверхностей, обеспечивающих положительные задние углы на режущих кромках.

Необходимо отметить, что работоспособность протяжек так же во многом зависит как от размеров и формы стружечных канавок, так и качества их обработки [4]. Форма впадины зуба должна способствовать плавному завиванию стружки в плотный валик и ее свободному размещению во впадине.

### 2. Основное содержание и результаты работы

При анализе особенностей процесса шлифования стружечных канавок, было выявлено, что их шлифование можно рассматривать как процесс обработки, при котором сьем материала происходит периферией профильного шлифовального круга и его боковой поверхностью по мере его внедрения в обрабатываемую заготовку. При этом следует учитывать, что ось вращения инструмента находится под углом к оси вращения инструмента. Производительность процесса при этом прямо пропорциональна площади поверхности фасонного круга, которая находится в непосредственном контакте с заготовкой, и скорости его внедрения (подачи) вглубь разрезаемой заготовки. Таким обра-

зом, не затрагивая вопроса, связанного с характеристикой круга по его зернистости, материалу абразива, твердости и характеру рельефа боковых поверхностей, необходимо рассмотреть геометрическую задачу взаимодействия круга с заготовкой [5, 6].

Задача заключается в определении общей площади  $F_S$  контакта круга диаметром  $D$ , расположенного под углом  $\gamma$  к оси обрабатываемой заготовки с наружным диаметром  $d$ , диаметром стружечных канавок  $d_1$ , с радиусной поверхностью  $r$  в зависимости от величины внедрения  $y$  круга в заготовку с подачей инструмента под углом  $\gamma$  к оси заготовки –  $S_y$ .

При построении математической модели необходимо найти величину площади  $F_S$ , которая складывается из двух частей: боковой площади  $F_B$ , и площади  $F_P$  контакта периферийной части фасонного круга.

$$F_S = F_B + F_P.$$

На рис. 1 показана схема взаимодействия фасонного круга с заготовкой. Видно, что боковая поверхность круга контактирует с заготовкой по площади ограниченной кривыми  $ABC$  и  $ADC$  (рис. 1 а,б), а контактирование периферийной поверхности инструмента происходит по поверхности  $EE'F'F$  (рис.1, в), суммарная поверхность контакта и её форма показана на (рис.1, г).

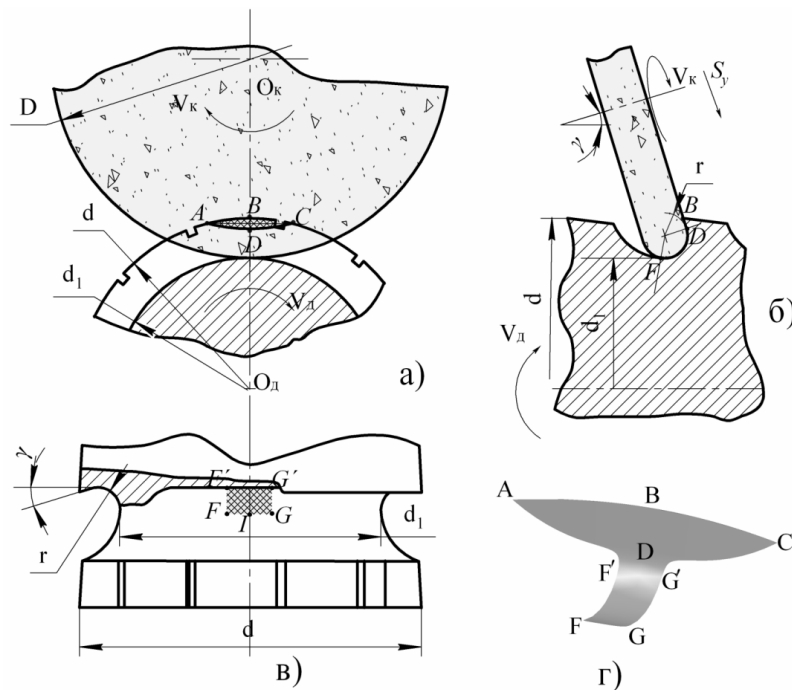


Рис. 1. Схема контактирования поверхности круга с заготовкой: а,б - боковой поверхности; в - периферийной поверхности; г - суммарная поверхность контакта

Площадь контакта боковой поверхности фасонного круга может быть определена как сумма площадей сегментов  $ABC$  и  $ADC$  (рис. 2). Площадь сегмента  $ADC$  рассчитаем как разность площадей сектора  $O_KADC$  и треугольника  $O_KAC$ . При этом необходимо учесть, что ось вращения шлифовального круга расположена под углом  $\gamma$  к оси вращения заготовки и, следовательно, сечение заготовки в плоскости, параллельной плоскости боковой поверхности круга, будет иметь форму эллипса. Обозначим высоту

зоны контакта (отрезок  $BD$ ) как  $h$ . Тогда из треугольника  $BDD'$  (рис. 2) можно записать  $h = BD' / \cos \gamma$

Величину отрезка  $BD'$  можно рассчитать как  $BD' = B'O'_r = \frac{d}{2} - \frac{d_1}{2} - r - O_r O'_r$ .

Из треугольника  $O_r D O'_r$   $O_r O'_r = r \cdot \sin \gamma$ .

Тогда

$$h = \frac{\left( \frac{d}{2} - \frac{d_1}{2} - r - r \cdot \sin \gamma \right)}{\cos \gamma} = \frac{\left( \frac{d - d_1}{2} - r(1 + \sin \gamma) \right)}{\cos \gamma} . \quad (1)$$

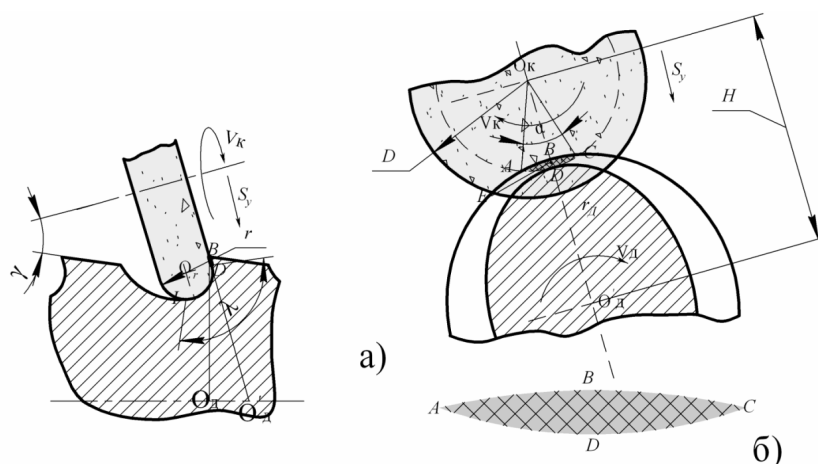


Рис. 2. Схема к расчету площади контакта

Для определения длины дуги контакта  $ADC$ , необходимо определить угол  $\alpha$ .

Представим нашу схему в виде системы координат с центром расположенным в центре эллипса с координатами  $(0;0)$ . Окружность с центром в точке  $O_k$  на которой расположена дуга  $ADC$ , описывается уравнением  $x^2 + y^2 = R^2$ , где  $R$  – радиус окружности,  $R = \frac{D - 2r}{2}$ .

Центр круга  $O_k$  смещен по оси  $y$  относительно начало координат на величину  $H$ , равную расстоянию между центрами эллипса и шлифовального круга

$$H = \frac{D - 2r}{2} + \frac{d}{2 \cos \gamma} - h .$$

Тогда уравнение окружности примет вид

$$x^2 + (H - y)^2 = \left( \frac{D - 2r}{2} \right)^2 . \quad (2)$$

Эллипс с центром в точке  $O_d$  описывается уравнением (каноническое уравнение эллипса)

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 , \quad (3)$$

где  $x$  и  $y$  – координаты точек на линии, описывающей эллипс относительно осей  $x$  и  $y$ ;  $a$ ,  $b$  – полуоси эллипса.

$$\text{Из } \Delta O_D B O'_D \quad b = B O'_D = \frac{B O_D}{2 \cos \gamma} = \frac{d}{2 \cos \gamma}, \text{ согласно свойствам эллипса } a = \frac{d}{2}.$$

С учетом полученных значений  $a$  и  $b$

$$\frac{x^2}{\left(\frac{d}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{d}{2 \cos \gamma}\right)^2} = 1. \quad (4)$$

Так как точки  $A$  и  $C$  являются точками пересечения окружности с центром  $O_K$  и эллипса с центром  $O'_D$ , их положение относительно осей координат может быть описано как уравнением (2), так и уравнением (4). Соответственно можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} x^2 + (H - y)^2 = \left(\frac{D - 2r}{2}\right)^2 \\ \frac{x^2}{\left(\frac{d}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{d}{2 \cos \gamma}\right)^2} = 1 \end{cases}. \quad (5)$$

Решая данную систему получим

$$y = \frac{\sqrt{\cos^2 \gamma (d^2 - D^2 + 4H^2 - 4r^2 + 4Dr) - d^2 + (D - 2r)^2}}{\cos^2 \gamma - 1} + \frac{H}{\cos^2 \gamma - 1}. \quad (6)$$

$$x = 0.5 \sqrt{d^2 - 4y^2 \cdot \cos^2(\gamma)}. \quad (7)$$

Из рис. 2 видно, что для  $\Delta O_K AB$   $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{AB}{O_K B} = \frac{x}{H - y}$  и угол  $\alpha$  можно определить как  $\alpha = 2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{x}{H - y}$ .

$$\text{Площадь сектора } O_K ADC \quad F_{O_K ADC} = \frac{\pi}{360} \alpha \left(\frac{D - 2r}{2}\right)^2.$$

$$\text{Для треугольника } O_K AC \text{ запишем площадь в виде } F_{O_K AC} = \frac{1}{2} \left(\frac{D - 2r}{2}\right)^2 \sin \alpha.$$

Таким образом, искомая площадь сегмента  $ADC$  равна

$$F_{ADC} = F_{O_K ADC} - F_{O_K AC} = \frac{\pi}{360} \alpha \left(\frac{D - 2r}{2}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{D - 2r}{2}\right)^2 \sin \alpha = \left(\frac{D - 2r}{2}\right)^2 \left(\frac{\pi \cdot \alpha}{360} - \frac{1}{2} \sin \alpha\right). \quad (8)$$

Площадь сегмента  $F_{ABC}$  (рис. 4) определим как разность площади сектора  $F_{ABCO'_D}$  и площади треугольника  $F_{ACO'_D}$ . Для определения площади сектора  $F_{ABCO'_D}$ , предварительно определим площадь  $F_{ABO'_D A}$  криволинейной трапеции  $ABO'_D A$ .

Из уравнения эллипса имеем

$$y = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2} \quad (9).$$

тогда  $F_{ABO'_dA'} = \int_0^x \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2} dx = \frac{a \cdot b}{2} \arcsin \frac{x}{a} + \frac{b}{2a} \cdot x \cdot \sqrt{a^2 - x^2} = \frac{a \cdot b}{2} \arcsin \frac{x}{a} + \frac{x \cdot y}{2}$ .

Площадь сектора  $ABO'_d$

$$F_{ABO'_d} = F_{ABO'_dA'} - F_{\Delta O'_dA'} = \frac{a \cdot b}{2} \arcsin \frac{x}{a} + \frac{x \cdot y}{2} - \frac{x \cdot y}{2} = \frac{a \cdot b}{2} \arcsin \frac{x}{a} = \frac{d^2}{8 \cos \gamma} \arcsin \frac{\sqrt{d^2 - 4y^2 \cdot \cos(\gamma)^2}}{d}$$

Площадь сектора  $ABCO'_d$

$$F_{ABCO'_d} = 2F_{ABO'_d} = \frac{d^2}{4 \cos \gamma} \arcsin \frac{\sqrt{d^2 - 4y^2 \cdot \cos(\gamma)^2}}{d} \quad (10)$$

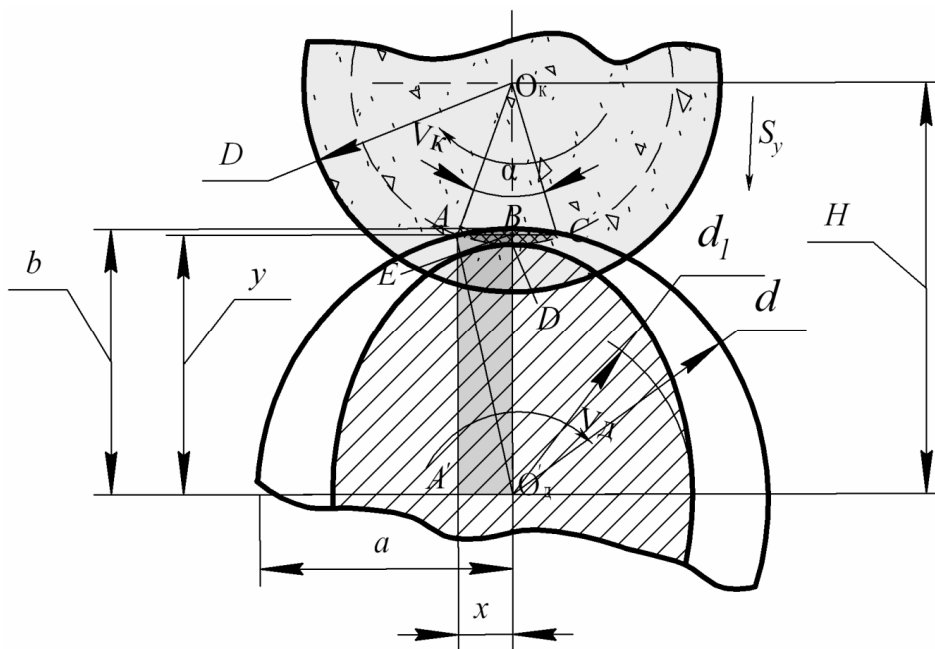


Рис.4. Схема для расчета площади сегмента  $F_{ABC}$

Для треугольника  $ACO'_d$  запишем площадь в виде

$$F_{ACO'_d} = 2 \cdot \frac{1}{2} x \cdot y = 0.5 y \sqrt{d^2 - 4y^2 \cdot \cos(\gamma)^2}.$$

Искомая площадь сегмента  $ABC$  равна

$$F_{ABC} = F_{ABCO'_d} - F_{ACO'_d} = \frac{d^2}{4 \cos \gamma} \arcsin \frac{\sqrt{d^2 - 4y^2 \cdot \cos(\gamma)^2}}{d} - 0.5 y \sqrt{d^2 - 4y^2 \cdot \cos(\gamma)^2}, \quad (11)$$

Таким образом, площадь боковой поверхности контакта шлифовального круга с заготовкой равна

$$F_B = F_{ADC} + F_{ABC} = \left(\frac{D-2r}{2}\right)^2 \left(\frac{\pi \cdot \alpha}{360} - \frac{1}{2} \sin \alpha\right) + \frac{d^2}{4 \cos \gamma} \arcsin \frac{\sqrt{d^2 - 4y^2 \cdot \cos(\gamma)^2}}{d} - 0.5y\sqrt{d^2 - 4y^2 \cdot \cos(\gamma)^2}. \quad (12)$$

Контактирование периферийной поверхности инструмента происходит по площади  $FF'G'G$  (рис. 5,а), имеющей сложную форму (см. рис. 5,б).

Шлифовальный круг профилирован радиусом  $r$  поэтому заготовка с переменным диаметром  $d_i$  в зоне контакта  $FF'G'G$  обрабатывается шлифовальным кругом переменного диаметра  $D_i$ . Согласно рис. 5,а можно записать уравнения, описывающие изменение диаметров  $D_i$  и  $d_i$ : для шлифовального круга  $D_i = D + 2r(\cos \gamma_i - 1)$ ; для заготовки  $d_i = d_1 + 2r(1 - \cos \gamma_i) = d_1 - 2r(\cos \gamma_i - 1)$ .

Для определения площади контакта найдем длину дуги контакта  $FDG$

$$L_{FDG} = \frac{\pi \alpha_i D_i}{2 \cdot 180} = \frac{\pi \alpha_i D_i}{360} \sin \frac{\alpha_i}{2} = \frac{2L_i}{D_i} \alpha_i = 2 \arcsin \frac{2L_i}{D_i},$$

где  $L_i$  - половина хорды дуги  $FDG$

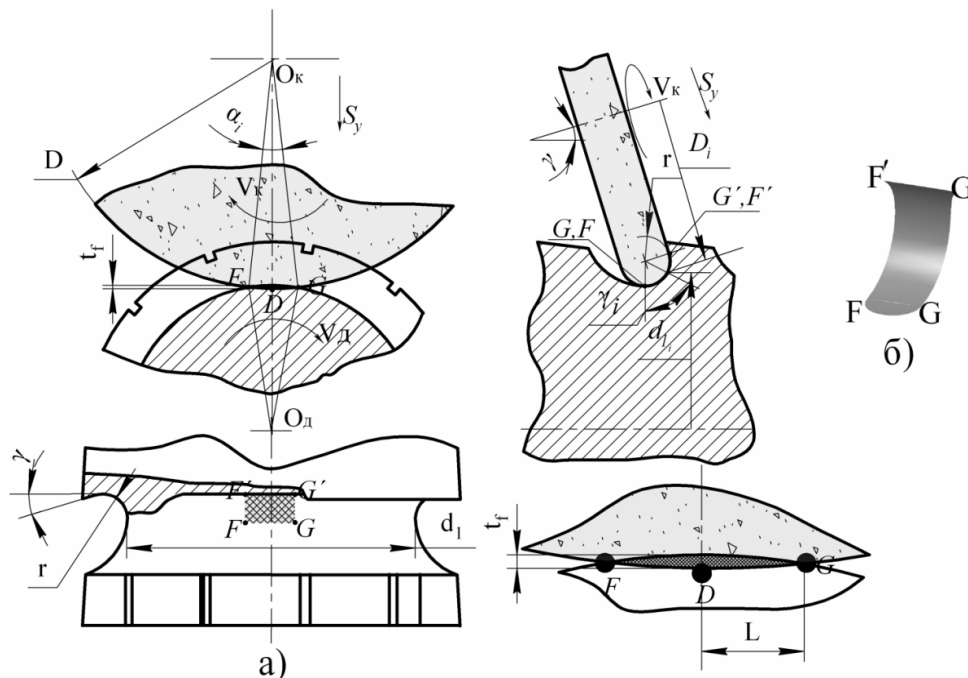


Рис. 5. Схема к расчету площади контакта периферийной поверхности шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью протяжки

Величину  $L_i$  можно найти из соотношения

$$L_i = \sqrt{t_f \cdot \frac{D_i \cdot d_i}{D_i + d_i}} = \sqrt{\frac{t_f (D + 2r(\cos \gamma_i - 1)) \cdot (d_1 + 2r(1 - \cos \gamma_i))}{D + 2r(\cos \gamma_i - 1) + d_1 + 2r(1 - \cos \gamma_i)}} = \sqrt{\frac{t_f (D + 2r(\cos \gamma_i - 1)) \cdot (d_1 + 2r(1 - \cos \gamma_i))}{D + d_1}},$$

где  $t_f$  глубина микрорезания.

Тогда

$$\alpha_i = 2 \arcsin \frac{2 \sqrt{\frac{t_f (D + 2r(\cos \gamma_i - 1)) \cdot (d_1 + 2r(1 - \cos \gamma_i))}{D + d_1}}}{(D + 2r(\cos \gamma_i - 1))} = 2 \arcsin 2 \sqrt{\frac{t_f \cdot (d_1 + 2r - 2r \cos \gamma_i)}{(D + d_1)(D + 2r(\cos \gamma_i - 1))}}$$

Длина дуги контакта  $FDG$

$$L_{FDG} = \frac{\pi \alpha_i D_i}{360} = \frac{\pi D_i}{360} \cdot 2 \arcsin 2 \sqrt{\frac{t_f \cdot (d_1 + 2r - 2r \cos \gamma_i)}{(D + d_1)(D + 2r(\cos \gamma_i - 1))}} =$$

$$= \frac{\pi}{180} (D + 2r(\cos \gamma_i - 1)) \cdot \arcsin 2 \sqrt{\frac{t_f \cdot (d_1 + 2r - 2r \cos \gamma_i)}{(D + d_1)(D + 2r(\cos \gamma_i - 1))}}$$

Длину дуги  $DD'$  определим как  $L_{DD'} = \frac{\pi \gamma_i r}{180} = 0.00555 \gamma_i r$

Площадь рассматриваемой фигуры определим

$$F_p = \int_0^{0.01745 \gamma_i r} [D + 2r(\cos \gamma_i - 1)] \cdot \arcsin \left( 2 \sqrt{\frac{t_f (d + 2r(1 - \cos \gamma_i))}{(D + d)(D + 2r(\cos \gamma_i - 1))}} \right) d\gamma_i$$

Рис. 6 иллюстрирует изменение площади контакта боковой поверхности шлифовального круга (кривая 1) и площади контакта периферийной поверхности круга (кривая 2) в процессе обработки поверхностей протяжки. Расчет выполнен для условий  $d = 54 \text{ мм}$ ,  $d_1 = 38 \text{ мм}$ , материал заготовки – сталь Р6М5, твердость HRC62...64, шлифовальный круг  $48 \times 10 \times 19$  ( $r = 5 \text{ мм}$ ), 24AF60KV (24A25CM1Б),  $S_y = 0.1 \text{ мм/мин}$ ,  $V_k = 30 \text{ м/с}$ .

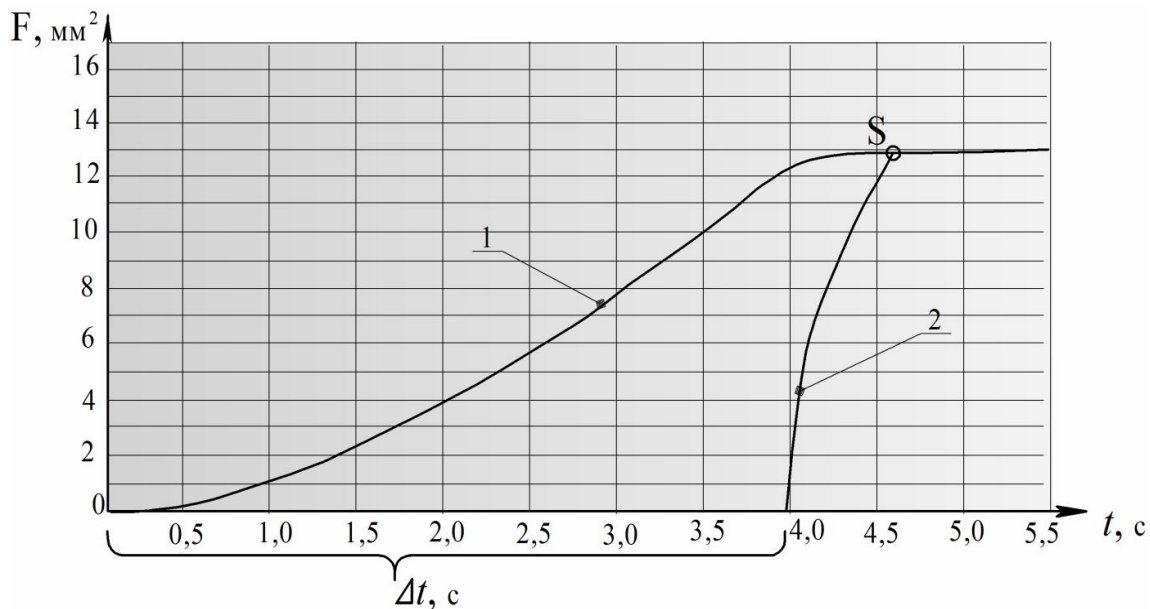


Рис. 6. Изменение площади контакта боковой (кривая 1) и периферийной (кривая 2) поверхностей круга с заготовкой

Анализ результатов приведенного расчета показывает, что площадь контакта боковой стороны  $F_B$  возрастает до определенной величины по мере уменьшения межосе-

вого расстояния между кругом и заготовкой (рис. 6, кривая 1) и фактически достигает максимума в момент начала работы периферийной поверхности шлифовального круга.

Определено, что контакт периферийной поверхности шлифовального круга возникает через некоторый промежуток времени  $\Delta t$  (см. рис. 6) после возникновения контакта боковой поверхности круга и площадь контакта периферийной поверхности шлифовального круга  $F_p$  с ростом глубины внедрения в заготовку  $u$  возрастает до момента прекращения подачи  $S_y$  (точка  $S$  на пересечении кривых 1 и 2), при этом площади контакта  $F_b$  и  $F_p$  в момент прекращения подачи  $S_y$  равны или близки по своим значениям.

### **Заключение.**

Предложены уточненные аналитические зависимости расчета площадей контакта шлифовального круга с заготовкой, позволяющие определить наиболее протяженные участки контакта зерна круга с поверхностью детали с учетом поворота оси круга. Полученные результаты позволяют выявить наиболее теплонапряженные участки зоны контакта для предотвращения возникновения прижогов

### **Список литературы**

1. Звягольский Ю.С. Технология производства режущего инструмента : учебное пособие / Ю.С. Звягольский, В.Г. Солоненко, А.Г. Схиртладзе. – М.: КНОРУС, 2012. – 336 с. ISBN 978-5-406-02253-5
2. Справочник инструментальщика./ Под общей редакцией А.Р. Маслова. Г.В. Боровский, С.Н. Григорьев, А.Р. Маслов. – М.: «Машиностроение», 2005. – 464с. ISBN 5-217-03284-7
3. Ярьсько, С.И. Прогнозирование стойкости упроченного режущего инструмента / С.И. Ярьсько // Вестн. машиностроения. – 2002. №10. – С.41-44. ISSN: 0042-4633
4. Палей М.М. Технология шлифования и заточки режущего инструмента / М. М. Палей, Л.Г. Дибнер, М.Д. Флид. -М.: Машиностроение, 1988. –288с.
5. Кальченко В.В. Шлифование вогнутых и выпуклых криволинейных поверхностей вращения на станках с ЧПУ одним инструментом со скрещивающимися осями его и детали // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2003. – Вып. 65. – С.65-72.
6. Богуцкий В.Б. Особенности процесса шлифования и заточки в условиях перекрещивающихся осей инструмента и детали/ В.Б. Богуцкий, С.М.Братан // Міжнародна науково-технічна конференція «Машинобудування – очима молодих», Кременчук, 30 жовтня – 1 листопада 2013р.: матеріали конференції – Кременчук: КрНУ ім. М.Остроградського, 2013. – С.37-39.

Надійшла до редакції 21.06.2014

**В.Б. Богуцкий, С.М.Братан**

### **АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ СТРУЖКОВИХ КАНАВОК ПРОТЯЖЕК**

*У статті розглянуто геометрична задача взаємодії шліфувального кола, розташованого під кутом до осі заготовки та запропоновано аналітичні залежності розрахунку площ їх контакту з метою запобігання дефектів структури металу.*

**Ключові слова:** шліфування, шліфувальний круг, стружкова канавка, площа контакту, периферійна поверхню, дефекти структури металу



**V.B. Bogutski, S.M.Bratan**

**THE ANALYSIS OF THE PROCESS OF GRINDING CHIP FLUTES BROACHING TOOL**

*The article considers the geometric problem of interaction of a grinding circle, situated at an angle to the axis of the workpiece and the analytical dependence of calculating the area of their contact with the purpose of preventing defects of structure of metal.*

**Keywords:** *grinding, grinding wheel, bonded groove, contact area, peripheral surface defects in the structure of metal*