

УДК 621.923

С.Н. НИЖНИК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## К ВОПРОСУ ОПТИМАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ ЗЕРЕН ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ

*Сформулирована проблема необходимости исследования влияния кинематических и геометрических параметров процесса обработки на величину и характер износа абразивного инструмента при плоском шлифовании. Проведено исследование изменения угла ориентации режущего зерна относительно вектора скорости резания. Получены выражения, которые позволяют определить соотношение между кинематическими и геометрическими параметрами процесса обработки, обеспечивающее оптимальное использование режущих свойств зерен при плоском шлифовании. Проведенные исследования дают возможность прогнозировать эффективность использования абразивного инструмента при плоском шлифовании.*

**Ключевые слова:** *износ зерен, скорость резания, угол ориентации, вершина зерна, абразивное зерно, прогнозирование, поверхность детали.*

### Введение

Развитие современного авиадвигателестроения происходит в условиях широчайшего внедрения деталей из коррозионно-стойких, высоко- и жаропрочных материалов и сплавов.

Данные материалы наряду с высокими прочностными характеристиками, определяющими долговечность изделий, которые работают в условиях высоких температур при знакопеременных циклических нагрузках, отличаются низкой обрабатываемостью [1, 2]. Эти материалы практически не поддаются обработке резанием (среднее значение коэффициента обрабатываемости по отношению к стали 45 составляет 0,2-0,3). Одним из возможных методов обработки рассматриваемых материалов является шлифование. Таким образом, исследования, посвященные повышению эффективности процесса шлифования деталей авиационных двигателей, являются актуальными и заслуживают внимания.

### 1. Формулирование проблемы

Шлифование таких труднообрабатываемых материалов как нержавеющие, жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы, а также титановых сплавов, широко применяемых в авиадвигателестроении, сопровождается интенсивным адгезионным и химическим износом абразивных зерен [1].

Характерной особенностью шлифования является то, что абсолютная скорость движения абразивного зерна в процессе обработки изменяется как по величине, так и по направлению [1 – 3], что способствует вовлечению в процесс резания не затуп-

ленных вершин зерен, а, следовательно, позволяет более эффективно использовать абразивный инструмент.

Таким образом, возникает необходимость в исследовании влияния кинематических и геометрических параметров процесса обработки на величину и характер износа абразивного инструмента. Целью проводимого исследования является получение математической модели, позволяющей на этапе проектирования технологической операции осуществлять прогнозирование эффективности использования абразивного инструмента. Это возможно при условии определения величины скорости резания и её изменения в пределах угла контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью детали.

### 2. Решение проблемы

Величина и характер износа абразивных зерен и зерен из сверхтвердых материалов оказывают существенное влияние на процесс шлифования труднообрабатываемых материалов.

Контактные процессы, возникающие при шлифовании материалов, достаточно сложны и разнообразны. На интенсивность и характер протекания контактных процессов существенное влияние оказывают такие кинематические и геометрические параметры формообразования как: форма, положение зерна и его ориентация в процессе шлифования.

При определении угла ориентации режущего зерна необходимо найти угол между вектором абсолютной скорости резания и вектором скорости движения зерна относительно оси вращения круга (в подвижной системе координат связанной с кругом).

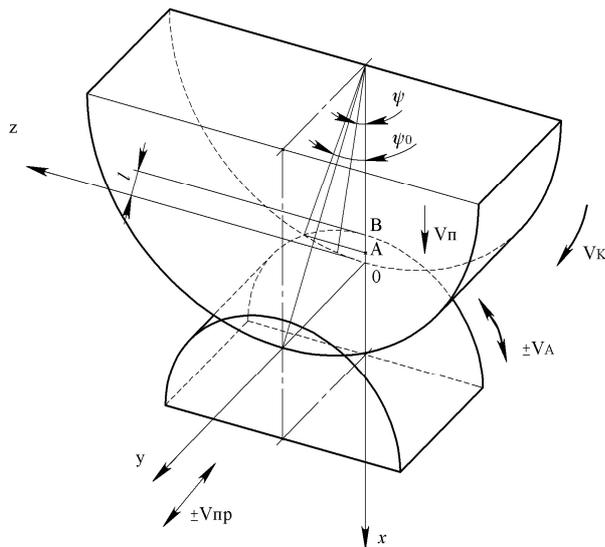


Рис. 1. Схема для расчета основных кинематических параметров процесса шлифования

В работе [4] получена формула:

$$\varphi = \arccos \left[ \frac{V_K - V_{\Pi} \sin \psi \pm V_D \cos \psi}{\sqrt{V_K^2 - 2V_{\Pi} V_K \sin \psi \pm \sqrt{\pm 2V_D V_K \cos \psi + V_{\Pi}^2 + V_{\Pi P}^2 + V_D^2}}} \right], \quad (1)$$

$$0 \leq \varphi \leq \pi.$$

Знак «+» принимается при встречном перемещении детали и инструмента, а знак «-» – при попутном.

Изменение угла ориентации зерна относительно вектора скорости резания способствует увеличению общей площади дискретных площадок контакта (касания) зерна с обрабатываемой поверхностью и сходящей стружкой при одновременном уменьшении времени контакта каждой из площадок.

Известно, что для плоского шлифования  $V_{\Pi} = V_{\Pi P} = 0$ , а  $d = \infty$ . Тогда выражение (1) примет вид:

$$\varphi = \arccos \left( \frac{V_K \pm V_D \cos \psi}{\sqrt{V_K^2 \pm 2V_K V_D \cos \psi + V_D^2}} \right). \quad (2)$$

Таким образом, изменение угла ориентации  $\varphi$ , можно рассматривать как функцию нескольких переменных  $\varphi = f(V_K, V_D, \psi)$ . Вызывает интерес нахождение таких значений параметров режима обработки, при которых значение функции  $\varphi = f(V_K, V_D, \psi)$  будет максимальным.

Рассмотрим выражение (2) как функцию одной переменной  $\psi$  и найдем ее экстремумы.

Продифференцируем выражение (2) по  $\psi$ :

$$\frac{d\varphi}{d\psi} = \left[ \frac{V_D \sin \psi}{\sqrt{V_K^2 \pm 2V_K V_D \cos \psi + V_D^2}} - \frac{(V_K \pm V_D \cos \psi)^2}{\sqrt{V_K^2 \pm 2V_K V_D \cos \psi + V_D^2}} \cdot \frac{V_K \cdot V_D \sin \psi \cdot (V_K \pm V_D \cos \psi)}{\sqrt{V_K^2 \pm 2V_K V_D \cos \psi + V_D^2}} \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(V_K \pm V_D \cos \psi)^2}{V_K^2 \pm 2V_K V_D \cos \psi + V_D^2}}}. \quad (3)$$

Найдем критические точки, решив уравнения  $f'(\psi) = 0$ ;

Приравняв выражение (3) к нулю и решив его относительно  $\psi$ , получим следующие критические точки:

– для (встречного) шлифования

$$\psi = 2\pi k; \psi = \pi(2k+1) \pm \arccos \left( \frac{V_K}{V_D} \right);$$

– для (попутного) шлифования:

$$\psi = 2\pi k; \psi = 2\pi k \pm \arccos \left( \frac{V_K}{V_D} \right),$$

где  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Найдем знак второй производной функции  $\varphi = f(\psi)$  в критических точках.

Рассмотрим встречное шлифование:

$$f'' \left( \pm \arccos \left( \frac{V_D}{V_K} \right) \right) = \frac{\left[ \frac{V_D^2}{V_K \cdot \sqrt{V_K^2 - V_D^2}} - \frac{V_D^2 \left( V_K - \frac{V_D^2}{V_K} \right)}{\sqrt{(V_K^2 - V_D^2)^3}} \right]}{\sqrt{1 - \frac{\left( V_K - \frac{V_D^2}{V_K} \right)^2}{V_K^2 - V_D^2}}} + \frac{\left[ \frac{2V_K V_D^2 \left( \frac{V_D^2}{V_K^2} - 1 \right)}{\sqrt{(V_K^2 - V_D^2)^3}} - \frac{3V_K^2 V_D^2 \left( V_K - \frac{V_D^2}{V_K} \right) \cdot \left( \frac{V_D^2}{V_K^2} - 1 \right)}{\sqrt{(V_K^2 - V_D^2)^5}} \right]}{\sqrt{1 - \frac{\left( V_K - \frac{V_D^2}{V_K} \right)^2}{V_K^2 - V_D^2}}} - B, \quad (4)$$

где

$$B = \xi \times \left[ \frac{2V_d \left( V_k - \frac{V_d^2}{V_k} \right) \sqrt{1 - \frac{V_d^2}{V_k^2}}}{V_k^2 - V_d^2} - \frac{2V_k V_d \left( V_k - \frac{V_d^2}{V_k} \right)^2 \sqrt{1 - \frac{V_d^2}{V_k^2}}}{(V_k^2 - V_d^2)^2} \right];$$

$$\xi = \left[ \frac{V_d \sqrt{1 - \frac{V_d^2}{V_k^2}}}{\sqrt{V_k^2 - V_d^2}} - \frac{V_k \cdot V_d \left( V_k - \frac{V_d^2}{V_k} \right) \cdot \sqrt{1 - \frac{V_d^2}{V_k^2}}}{\sqrt{(V_k^2 - V_d^2)^3}} \right];$$

Рассмотрим подробнее полученное выражение. Упростим числитель первой дроби:

$$A = - \frac{\frac{V_d^2}{V_k \sqrt{V_k^2 - V_d^2}}}{\sqrt{1 - \frac{\left( V_k - \frac{V_d^2}{V_k} \right)^2}{V_k^2 - V_d^2}}}$$

Рассмотрим вторую дробь:

$$\xi = \frac{(V_k^2 - V_d^2)V_d \sqrt{1 - \frac{V_d^2}{V_k^2}} - V_d (V_k^2 - V_d^2) \sqrt{1 - \frac{V_d^2}{V_k^2}}}{\sqrt{(V_k^2 - V_d^2)^3}} = \frac{V_d \sqrt{1 - \frac{V_d^2}{V_k^2}} \cdot (V_k^2 - V_d^2 - V_k^2 + V_d^2)}{\sqrt{(V_k^2 - V_d^2)^3}} = 0$$

Таким образом, получаем, что

$$f'' \left( \pi \pm \arccos \left( \frac{V_d}{V_k} \right) \right) = - \frac{\frac{V_d}{V_k \sqrt{V_k^2 - V_d^2}}}{\sqrt{1 - \frac{\left( V_k - \frac{V_d^2}{V_k} \right)^2}{V_k^2 - V_d^2}}}$$

То есть вторая производная функция отрицательна, следовательно функция  $f(\psi)$  имеет в точке

$$\psi = \pi(2k+1) \pm \arccos \left( \frac{V_k}{V_d} \right) \text{ максимум.}$$

Аналогичный результат получен для критической точки в случае попутного шлифования, то есть  $f'' \left( \pi \pm \arccos \left( \frac{V_d}{V_k} \right) \right) = f'' \left( \pm \arccos \left( \frac{V_d}{V_k} \right) \right)$ .

Поскольку при малых углах  $\psi$ , когда  $\sin \psi \approx \psi$  имеем, что  $\frac{\psi}{2} \approx \sqrt{\frac{dt}{D \cdot (d+D)}}$ , то

$$\cos \psi = \frac{2}{D} \cdot \left( \frac{D}{2} - \frac{td}{D+d} \right). \quad (6)$$

Упростим выражение (6):

$$\cos \psi = 1 - \frac{2td}{D \cdot (d+D)}. \quad (7)$$

Рассмотрим выражение (7). Известно, что для плоского шлифования  $d \rightarrow \infty$ , тогда получим:

$$\lim_{d \rightarrow \infty} \cos \psi = \lim_{d \rightarrow \infty} \left( 1 - \frac{2td}{D \cdot (d+D)} \right) = \lim_{d \rightarrow \infty} \left( 1 - \frac{2td}{dD(1 + \frac{D}{d})} \right) = \lim_{d \rightarrow \infty} \left( 1 - \frac{2t}{D(1 + \frac{D}{d})} \right) = \lim_{d \rightarrow \infty} \left( 1 - \frac{2t}{D} \cdot \frac{1}{(1 + \frac{D}{d})} \right) = 1 - \frac{2t}{D}.$$

$$\text{То есть } \cos \psi = 1 - \frac{2t}{D} \quad (8)$$

Найдем значение  $\cos \psi$  в критических точках и, приравняв полученный результат к правой части равенства (8), получим:

– для встречного

$$-\frac{V_d}{V_k} = \frac{D-2t}{D}; \quad (9);$$

– для попутного

$$\frac{V_d}{V_k} = \frac{D-2t}{D}. \quad (10)$$

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что оптимальное использование режущих свойств зерен обеспечивается при попутном шлифовании, когда кинематические и геометрические параметры связаны соотношением (10). Действительно выражение (9) имеет физический смысл лишь, тогда когда  $\frac{V_d}{V_k} < 0$ , что возможно при попутной схеме обработки.

### Заключение

Проведено исследование изменения угла ориентации режущего зерна относительно вектора скорости резания. Получены выражения, которые позволяют определить соотношение между кинемати-

ческими и геометрическими параметрами процесса обработки, обеспечивающее оптимальное использования режущих свойств зерен при плоском шлифовании. Представленные исследования дают возможность прогнозировать эффективность использования абразивного инструмента при плоском шлифовании.

### Литература

1. Крымов, В.В. Производство лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин; под ред. В.В. Крымова. – М.: Машиностроение-Полет, 2002. – 376 с.
2. Евсеев, Д.Г. Физические основы процесса шлифования [Текст] / Д.Г. Евсеев, А.Н. Сальников. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1978. – 128 с.

3. Изготовление деталей газотурбинных двигателей из титановых сплавов [Текст] / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, П.Д. Жеманюк, А.Ф. Горбачев, В.С. Кривоцов. – Запорожье: Дека, 1997. – 276 с.

4. Нижник, С.Н. Определение угла ориентации режущего зерна относительно вектора скорости резания при круглом наружном и внутреннем шлифовании [Текст] / С.Н. Нижник // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 7 (84). – С. 58-61.

5. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. [Текст] / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Госуд. изд-во физико-математической литературы, 1962. – 608 с.

Поступила в редакцию 10.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина.

## ДО ПИТАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ РІЗАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗЕРЕН ПРИ ПЛОСКОМУ ШЛІФУВАННІ

*С.М. Нижник*

Сформульовано проблему необхідності дослідження впливу кінематичних і геометричних параметрів процесу обробки на величину і характер зносу абразивного інструменту при плоскому шліфуванні. Проведено дослідження зміни кута орієнтації ріжучого зерна щодо вектора швидкості різання. Отримано вирази, які дозволяють визначити співвідношення між кінематичними та геометричними параметрами процесу обробки, забезпечуючи оптимальне використання ріжучих властивостей зерен при плоскому шліфуванні. Проведені дослідження дають можливість прогнозувати ефективність використання абразивного інструменту при плоскому шліфуванні.

**Ключові слова:** знос зерен, швидкість різання, кут орієнтації, вершина зерна, абразивне зерно, прогнозування, поверхня деталі

## ON OPTIMAL USE OF CUTTING PROPERTIES GRAINS IN A PLANE GRINDING

*S.N. Nizhnik*

We formulate the problem of the need to investigate the influence of kinematic and geometric parameters of the treatment on the magnitude and nature of wear of the abrasive tool with a flat grinding. The study of changes in the orientation angle of the cutting grain with respect to the velocity of cutting. Expressions are obtained which allow us to determine the relationship between the kinematic and geometric parameters of the treatment process, ensuring an optimum use of the cutting properties of the grains with a flat grinding. The studies make it possible to predict the efficiency of the abrasive tool with a flat grinding.

**Key words:** wear of grain, cutting speed, angle orientation, top of grain, abrasive grain, prediction, surface of workpiece.

**Нижник Сергей Николаевич** – старший преподаватель кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.