

УДК 621.923

М.А. КУРИН

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ОРИЕНТАЦИИ РЕЖУЩЕГО ЗЕРНА ОТНОСИТЕЛЬНО ВЕКТОРА СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ ПРИ ПЛАНЕТАРНОМ ШЛИФОВАНИИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*Сформулирована проблема необходимости исследования изменения величины и направления абсолютной скорости резания абразивного зерна, а также угла ориентации режущего зерна относительно скорости резания. Получены выражения, которые позволяют определить изменение величины скорости резания и её угла ориентации относительно режущего зерна в пределах угла контакта. Проведенные исследования дают возможность прогнозировать эффективность использования абразивного инструмента при планетарном шлифовании плоских поверхностей.*

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

### Введение

Рост количества шлифовальных операций при производстве лопаток ГТД на таких авиадвигателестроительных предприятиях как ОАО “Мотор Січ”, ММПП “Салют”, ОАО “Рыбинские Моторы” ставит задачу совершенствования данного метода обработки [1].

В работе [2] отмечено, что эффективное управление процессом плоского планетарного шлифования возможно при условии прогнозирования силовых, тепловых и других характеристик процесса, которое нельзя осуществить без их аналитического описания. Таким образом, исследования, посвященные поиску аналитических зависимостей для расчета геометрических параметров контакта инструмента с деталью, являются актуальными и заслуживают внимания.

**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 [3].

Характерной особенностью планетарного шлифования является то, что абсолютная скорость движения абразивного зерна в процессе обработки изменяется как по величине, так и по направлению [2, 4 – 6], что способствует вовлечению в процесс резания не затупленных вершин зерен, а следовательно, позволяет более эффективно использовать абразивный инструмент.

Таким образом, возникает необходимость в исследовании изменения величины и направления абсолютной скорости абразивного зерна, целью которого является возможность прогнозирования эффективности использования абразивного инструмента, установление величины скорости резания и её изменения в пределах угла контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью детали.

### Решение проблемы

#### Определение абсолютной скорости движения абразивного зерна

В работе [2] получены в параметрической форме уравнения эпитрохоиды, представляющей собой траекторию движения  $i$ -го зерна. Принимая во внимание, что  $\varphi = \omega_r t$ , где  $t$  – время, то с учетом перемещения детали по оси  $Y$  данные уравнения примут следующий вид:

$$\begin{cases} x_i = (R + r) \cos(\omega_r t) - r_k \times \\ \times \cos\left(\left(\frac{R + r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi}\right)(\omega_r t) + \left(\frac{R}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi}\right)\beta - \theta_i\right); \\ y_i = (R + r) \sin(\omega_r t) - r_k \times \\ \times \sin\left(\left(\frac{R + r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi}\right)(\omega_r t) + \left(\frac{R}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi}\right)\beta - \theta_i\right) + \\ + \frac{S_{\text{дет.}}}{\omega_r}(\omega_r t + \beta), \end{cases} \quad (1)$$

где  $R$  – диаметр направляющей окружности (делительный диаметр солнечного колеса);

$r$  – диаметр производящего круга (делительный диаметр сателлита);

$r_k$  – расстояние от зерна до центра производящего круга (радиус абразивного круга);

$\varphi$  – угол поворота водила, определяющий положение центра производящего круга;

$\theta_i$  – угол, определяющий положение  $i$ -го зерна;

$\beta$  – угол, определяющий положение центра абразивного круга в момент касания;

$S_{дет.}$  – заданная скорость перемещения детали (продольная подача детали);

$\varphi_{дов.}$  – угол доворота абразивных кругов за один оборот водила;

$\omega_r$  – угловая скорость водила планетарной шлифовальной головки (ПШГ).

Найдем уравнения проекций вектора скорости на координатные оси:

$$V_{xi} = -\omega_r (R+r) \sin(\omega_r t) + r_k \omega_r \left( \frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) \times \sin \left( \left( \frac{R}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) (\omega_r t + \beta) + \omega_r t - \theta_i \right); \quad (2)$$

$$V_{yi} = \omega_r (R+r) \cos(\omega_r t) - r_k \omega_r \left( \frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) \times \cos \left( \left( \frac{R}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) (\omega_r t + \beta) + \omega_r t - \theta_i \right) + S_{дет.} \quad (3)$$

Полную величину вектора абсолютной скорости найдем по формуле:

$$V_i = \sqrt{V_{xi}^2 + V_{yi}^2}. \quad (4)$$

Подставив в формулу (4) значения проекций вектора скорости, определенных выше, и перейдя снова к углу  $\varphi$ , получим:

$$V_i = \left[ \omega_r^2 (R+r)^2 - 2r_k \omega_r^2 (R+r) \left( \frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) \times \cos \left( \left( \frac{R}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) (\varphi + \beta) - \theta_i \right) + S_{дет.}^2 + r_k^2 \omega_r^2 \times \left( \frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right)^2 + 2\omega_r (R+r) S_{дет.} \cos \varphi - 2r_k \left( \frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) \omega_r S_{дет.} \times \cos \left( \left( \frac{R}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) (\varphi + \beta) + \varphi - \theta_i \right) \right]^{0,5}. \quad (5)$$

### Определение угла ориентации режущего зерна относительно вектора скорости резания

При определении угла ориентации режущего зерна примем в качестве начального такое его положение, при котором оно находится на периферии ПШГ. Данное положение абразивного зерна определится углом  $\varphi_{0i}$  (рис. 1). Тогда угол между осью  $OX$  и вектором относительной скорости зерна ( $V_{кр.}$ ) можно определить по формуле:

$$\gamma_{зер.i} = \frac{\pi}{2} + \varphi_{0i} + \left( \frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) (\varphi - \varphi_{0i}). \quad (6)$$

Угол между вектором скорости резания и осью  $OX$  найдем через тангенс угла наклона касательной к траектории движения абразивного зерна [7]:

$$\gamma_{рез.i} = \arctg \left( \frac{\partial y_i}{\partial x_i} \right) = \arctg \left( \frac{V_{yi}}{V_{xi}} \right). \quad (7)$$

Подставив (2), (3) в (7) и перейдя к углу  $\varphi$ , получим:

$$\gamma_{рез.i} = \arctg \left( \frac{\left( (R+r) \cos \varphi - r_k \left( \frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) \times \cos \left( \left( \frac{R}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) (\varphi + \beta) + \varphi - \theta_i \right) + \frac{S_{дет.}}{\omega_r} \right)}{\left( (R+r) \sin \varphi - r_k \left( \frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) \times \sin \left( \left( \frac{R}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) (\varphi + \beta) + \varphi - \theta_i \right) \right)} \right). \quad (8)$$

С учетом периодичности значение  $\gamma_{рез.i}$  примет следующий вид:

$$\gamma_{рез.i} = \arctg \left( \frac{\partial y_i}{\partial x_i} \right) + \pi k, \quad (9)$$

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

Полученное выражение (9) требует пояснения. При определении искомого угла следует учитывать, что  $0 < \gamma_{рез.i} < \pi$ , а в том случае, когда функция (9) не определена, что соответствует значению параметра  $\varphi$ , при котором  $\frac{\partial x_i}{\partial \varphi} = 0$ ,  $\gamma_{рез.i} = \frac{\pi}{2}$ .

Найти положение водила, при котором  $\gamma_{рез.i} = \frac{\pi}{2}$  можно, решив систему уравнений:

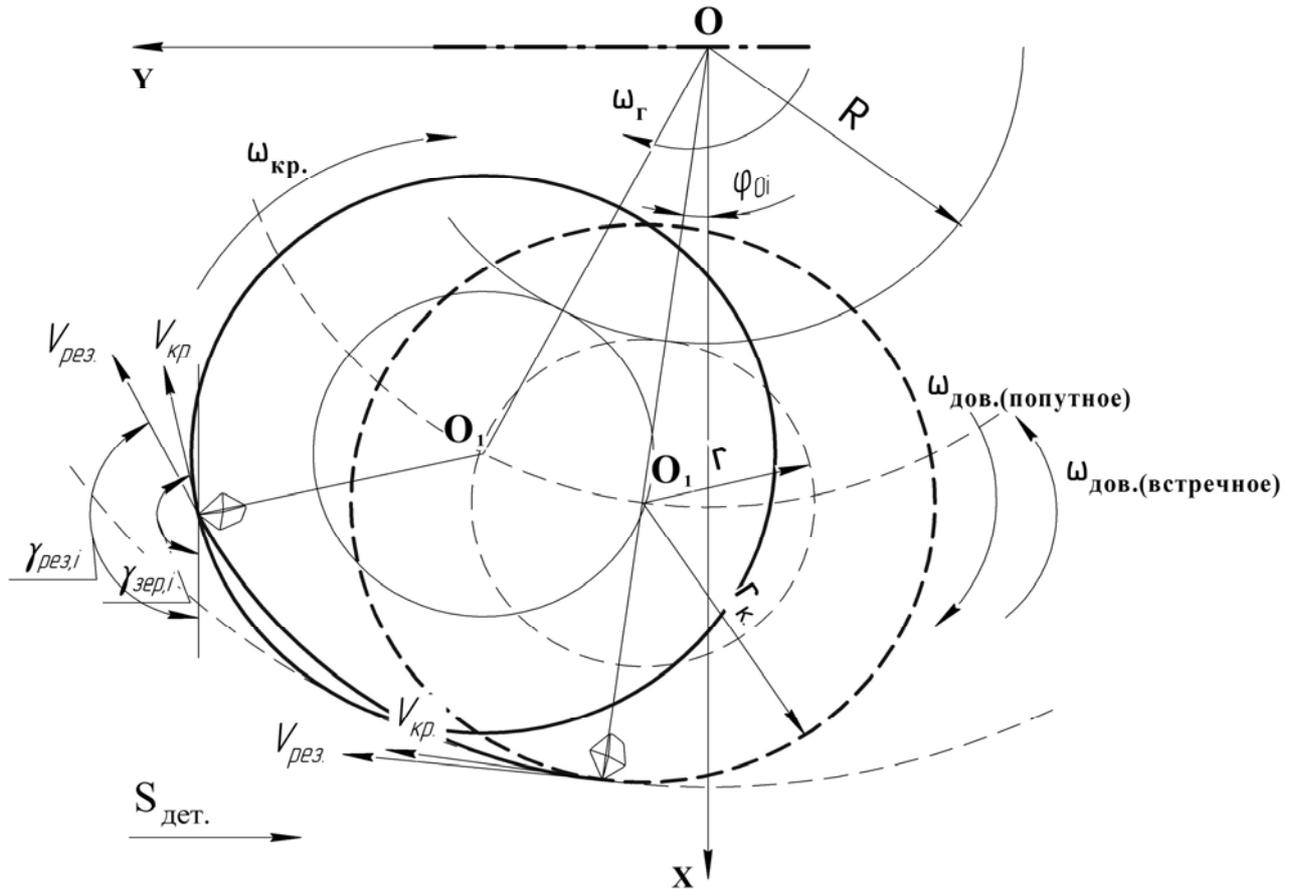


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая изменение угла ориентации абразивного зерна относительно вектора скорости резания

$$\begin{cases} \varphi_{in} \leq \varphi \leq \varphi_{ik}; \\ (R + r) \sin \varphi - r_k \left( \frac{R + r}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) \times \\ \times \sin \left( \left( \frac{R}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) (\varphi + \beta) + \varphi - \theta_i \right) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Угол ориентации зерна относительно скорости резания найдем по формуле:

$$\Delta \gamma_i = \gamma_{рез.i} - \gamma_{зер.i}. \quad (11)$$

Найдем значение угла  $\varphi_{0i}$ .

Координаты вершины зерна, расположенного на периферии ПШГ в параметрической форме, примут следующий вид:

$$\begin{cases} x_i = (R + r + r_k) \cos \varphi_{0i}; \\ y_i = (R + r + r_k) \sin \varphi_{0i} + \frac{S_{дет.}}{\omega_r} (\varphi_{0i} + \beta). \end{cases} \quad (12)$$

С другой стороны координаты вершины зерна можно найти, воспользовавшись системой уравнений (1):

$$\begin{cases} x_i = (R + r) \cos(\varphi_{0i}) - r_k \times \\ \times \cos \left( \left( \frac{R}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) (\varphi_{0i} + \beta) + \varphi_{0i} - \theta_i \right); \\ y_i = (R + r) \sin(\varphi_{0i}) - r_k \times \\ \times \sin \left( \left( \frac{R}{r} + \frac{\varphi_{дов.}}{2\pi} \right) (\varphi_{0i} + \beta) + \varphi_{0i} - \theta_i \right) + \\ + \frac{S_{дет.}}{\omega_r} (\varphi_{0i} + \beta). \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, для нахождения угла  $\varphi_{0i}$  необходимо приравнять левые части уравнений систем (12) и (13). Решив полученную в результате выше указанных действий систему, получим выражение для нахождения  $\varphi_{0i}$ :

$$\varphi_{0i} = \frac{\theta_i + \pi(2k+1)}{R/r + \varphi_{дов.}/2\pi} - \beta, \quad (14)$$

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

Значение  $\varphi_{0i}$  следует брать ближайшее к углам контакта  $\varphi_{in}$  и  $\varphi_{ik}$ . [8].

## Заключение

Проведены исследования изменения скорости абсолютного движения абразивного зерна, а также угла ориентации режущего зерна относительно вектора скорости резания. Получены выражения, которые позволяют определить изменение величины скорости резания и её угла ориентации относительно режущего зерна в пределах угла контакта.

## Литература

1. Крымов В.В. Производство лопаток газотурбинных двигателей / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин; под ред. В.В. Крымова. – М.: Машиностроение: Машиностроение-Полет, 2002. – 376 с.
2. Курин М.А. Траектория микрорезания шлифующего зерна при плоском планетарном шлифовании периферией круга / М.А. Курин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 3(50). – С. 47-50.
3. Изготовление деталей газотурбинных двигателей из титановых сплавов / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, П.Д. Жеманюк, А.Ф. Горбачев, В.С. Кривцов. – Запорожье.: Дека, 1997. – 276 с.

4. Горбачев А.А. Определение кинематических параметров планетарного глубинного шлифования плоских поверхностей / А.А. Горбачев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 2(18). – С. 19-22.

5. Горбачев А.А. Определение технологических параметров планетарного глубинного шлифования плоских поверхностей / А.А. Горбачев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 3(19). – С. 20-23.

6. Долматов А.И. К вопросу о влиянии типоразмера абразивного инструмента на эффективность планетарного шлифования плоских поверхностей / А.И. Долматов, М.А. Курин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 1(48). – С. 31-36.

7. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Госуд. издательство физико-математ. литературы, 1962. – 608 с.

8. Курин М.А. Определение длины дуги контакта абразивного зерна с деталью при глубинном планетарном шлифовании плоских поверхностей / М.А. Курин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – №5(52). – С. 24-27.

Поступила в редакцию 10.11.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры 204 В.К. Борисевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ВИЗНАЧЕННЯ КУТА ОРІЄНТАЦІЇ ЗЕРНА, ЩО РІЖЕ ВІДНОСНО ВЕКТОРА ШВИДКОСТІ РІЗАННЯ ПРИ ПЛАНЕТАРНОМУ ШЛІФУВАННІ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ

*М.А. Курін*

Сформульована проблема необхідності дослідження зміни величини та напрямку абсолютної швидкості різання абразивного зерна, а також кута орієнтації зерна, що ріже відносно швидкості різання. Одержані вирази, які дозволяють визначити змінення величини абсолютної швидкості різання та її кута орієнтації відносно зерна, що ріже у межах кута контакту. Дослідження, що проведені, дають можливість прогнозувати ефективність використання абразивного інструменту при планетарному шліфуванні плоских поверхонь.

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

## DETERMINATION OF THE ANGLE ORIENTATION ABRASIVE GRAIN ABOUT VECTOR CUTTING SPEED ON THE PLANETARY GRINDING FLAT SURFACE

*M.A. Kurin*

The problem of necessity research quantity and direction change cutting speed, and angle orientation abrasive grain about cutting speed is formulate. The expression for determination change vector cutting speed and angle orientation abrasive grain about cutting speed is receive. This researches is giving potential to prediction abrasive tool efficiency on the planetary grinding flat surface.

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

**Курин Максим Александрович** – аспирант кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.