

УДК 621.923

М.А. КУРИН

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ДУГИ КОНТАКТА АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА С ДЕТАЛЬЮ ПРИ ГЛУБИННОМ ПЛАНЕТАРНОМ ШЛИФОВАНИИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Сформулирована проблема необходимости определения начальной и конечной точек контакта абразивного зерна с поверхностью детали, решение которой позволит производить прогнозирование выполнения условий для наиболее полного протекания адсорбционного взаимодействия поверхностно-активных веществ СОТС с ювенильными участками обработанной поверхности. Получено выражение для определения длины дуги контакта абразивного зерна с поверхностью детали. Представлен алгоритм определения начальной и конечной точек контакта абразивного зерна с поверхностью детали.

Ключевые слова: прогнозирование, точки контакта, длина дуги, системы уравнений, численный метод.

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.

1. Формулирование проблемы

Необходимость прогнозирования выполнения условий [2 – 5] для наиболее полного протекания адсорбционного взаимодействия поверхностно-активных веществ (смазывающе-охлаждающей технологической среды) СОТС с ювенильными участками обработанной поверхности ставит задачу определения начальной и конечной точек контакта абразивного зерна с поверхностью детали. Решение поставленной задачи также дает возможность определить для каждого абразивного зерна, участвующего в резании, длину дуги контакта с обрабатываемой поверхностью детали, а, следовательно, спрогнозировать величину и характер износа абразивного инструмента в целом.

2. Решение проблемы

В работе [2] получены в параметрической форме уравнения эпитрохоиды, представляющей собой траекторию движения *i*-го зерна. С учетом перемещения детали по оси *Y* данные уравнения примут следующий вид:

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

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

r – диаметр производящего круга (делительный диаметр сателлита);

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

φ – угол поворота водила, определяющий положение центра производящего круга;

θ_i – угол, определяющий положение *i*-го зерна;

β – угол, определяющий положение центра абразивного круга в момент касания;

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

φ_{дов.} – угол доворота абразивных кругов за один оборот водила;

ω_г – угловая скорость водила планетарной шлифовальной головки (ПШГ).

Длина дуги линии контакта *i*-го абразивного зерна с деталью [6]:

$$L_i = \int_{\varphi_{\text{ин.}}}^{\varphi_{\text{ик.}}} \sqrt{[x'_i(\varphi)]^2 + [y'_i(\varphi)]^2} \partial\varphi, \quad (2)$$

где $\varphi_{\text{ин.}}$ – угол, определяющий положение водила в момент входа абразивного зерна в контакт с деталью;

$\varphi_{\text{ик.}}$ – угол, определяющий положение водила в момент выхода абразивного зерна из контакта с деталью.

$$\begin{aligned} x'_i(\varphi) &= -(R+r)\sin\varphi + r_k \left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \times \\ &\times \sin \left(\left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \varphi + \left(\frac{R}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \beta - \theta_i \right); \\ y'_i(\varphi) &= (R+r)\cos\varphi - r_k \left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \times \\ &\times \cos \left(\left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \varphi + \left(\frac{R}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \beta - \theta_i \right) + \frac{S_{\text{дет.}}}{\omega_r}. \end{aligned} \quad (3)$$

Возведем выражения (3) и (4) в квадрат:

$$\begin{aligned} [x'_i(\varphi)]^2 &= \\ &= (R+r)^2 \sin^2\varphi + r_k^2 \left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right)^2 \times \\ &\times \sin^2 \left(\left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \varphi + \left(\frac{R}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \beta - \theta_i \right) - \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &- 2r_k (R+r) \left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \sin\varphi \times \\ &\times \sin \left(\left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \varphi + \left(\frac{R}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \beta - \theta_i \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [y'_i(\varphi)]^2 &= \\ &= (R+r)^2 \cos^2\varphi + r_k^2 \left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right)^2 \times \\ &\times \cos^2 \left(\left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \varphi + \left(\frac{R}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \beta - \theta_i \right) + \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{S_{\text{дет.}}^2}{\omega_r^2} - 2r_k (R+r) \left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \cos\varphi \times \\ &\times \cos \left(\left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \varphi + \left(\frac{R}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \beta - \theta_i \right) + \\ &+ 2(R+r) \frac{S_{\text{дет.}}}{\omega_r} \cos\varphi - 2r_k \left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \frac{S_{\text{дет.}}}{\omega_r} \times \\ &\times \cos \left(\left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \varphi + \left(\frac{R}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \beta - \theta_i \right). \end{aligned}$$

После подстановки выражений (5), (6) в (2) и преобразований получим:

$$\begin{aligned} L_i &= \int_{\varphi_{\text{ин.}}}^{\varphi_{\text{ик.}}} \left[(R+r)^2 + r_k^2 \left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right)^2 - \right. \\ &- 2r_k (R+r) \left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \times \\ &\times \cos \left(\left(\frac{R}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) (\varphi + \beta) - \theta_i \right) - \\ &- 2r_k \left(\frac{R+r}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) \frac{S_{\text{дет.}}}{\omega_r} \times \\ &\times \cos \left(\left(\frac{R}{r} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi} \right) (\varphi + \beta) + \varphi - \theta_i \right) + \\ &\left. + \frac{S_{\text{дет.}}^2}{\omega_r^2} + 2(R+r) \frac{S_{\text{дет.}}}{\omega_r} \cos\varphi \right]^{0,5} \partial\varphi. \end{aligned} \quad (7)$$

Для нахождения углов $\varphi_{\text{ин.}}$ и $\varphi_{\text{ик.}}$ воспользуемся следующим алгоритмом:

1) определяем положение водила, при котором траектория абразивного зерна пересекает траекторию абразивного круга, прошедшего перед рассматриваемым кругом;

2) определяем положение водила, при котором траектория движения i -го зерна пересекает траекторию $(i-1)$ -го зерна;

3) определяем точку пересечения траектории i -го зерна с поверхностью детали.

Положение водила, при котором траектория абразивного зерна пересекает траекторию абразивного круга, прошедшего перед рассматриваемым кругом определится двумя углами $\varphi'_{\text{ин.}}$ и $\varphi'_{\text{ик.}}$. Для нахождения этих углов необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} -\beta \leq \varphi'_i \leq \arccos\left(1 - \frac{t}{A+B}\right); \\ (A+B)\cos\psi - A\cos\varphi'_i + B\cos\Sigma'_i(\varphi'_i) = 0; \\ (A+B)\sin\psi - A\sin\varphi'_i + B\sin\Sigma'_i(\varphi'_i) + \\ + \frac{S_{\text{дет.}}}{\omega_r} (\psi - \varphi'_i) - \Delta = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где $\Delta = \frac{2\pi \cdot S_{\text{дет.}}}{m \cdot \omega_r}$ – перемещение ПШГ относительно

детали за промежуток времени между входом в контакт двух соседних абразивных кругов;

m – количество абразивных кругов ПШГ;

t – глубина шлифования;

Ψ – угол, определяющий положение центра абразивного круга, прошедшего перед рассматриваемым кругом;

$A = R + r$;

$B = r_k$;

$$\Sigma_i'(\varphi_i') = \frac{R+r}{r}\varphi_i' + \frac{R}{r}\beta - \theta_i + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi}(\varphi_i' + \beta).$$

Учитывая, что $\sin\Psi > 0$, систему уравнений (8) можно свести к следующей:

$$\begin{cases} -\beta \leq \varphi_i' \leq \arccos\left(1 - \frac{t}{A+B}\right); \\ \psi = \arccos\left(\frac{A \cos \varphi_i' - B \cos \Sigma_i'(\varphi_i')}{A+B}\right); \\ \sqrt{(A+B)^2 - (A \cos \varphi_i' - B \cos \Sigma_i'(\varphi_i'))^2} - \\ -A \sin \varphi_i' + B \sin \Sigma_i'(\varphi_i') + \frac{S_{\text{дет.}}}{\omega_r}(\psi - \varphi_i') - \Delta = 0. \end{cases} \quad (9)$$

После того как найдены углы $\varphi_{\text{ин.}}'$ и $\varphi_{\text{ик.}}'$, необходимо найти положение водила, при котором траектория движения i -го зерна пересекает траекторию $(i-1)$ -го зерна. Это положение определится углом φ_i'' , причем $\varphi_{\text{ин.}}' \leq \varphi_i'' \leq \varphi_{\text{ик.}}'$. Если такое положение водила существует, то $\varphi_{\text{ин.}}'' = \varphi_i''$, в противном случае $\varphi_{\text{ин.}}'' = \varphi_{\text{ин.}}'$. Значение угла φ_i'' можно найти, решив следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \varphi_{\text{ин.}}'' \leq \varphi_i'' \leq \varphi_{\text{ик.}}'; \\ A(\cos \varphi_{i-1}'' - \cos \varphi_i'') + B \cos \Sigma_i''(\varphi_i'') - \\ -B \cos \Sigma_{i-1}''(\varphi_{i-1}'') = 0; \\ A(\sin \varphi_{i-1}'' - \sin \varphi_i'') + B \sin \Sigma_i''(\varphi_i'') - \\ -B \cos \Sigma_{i-1}''(\varphi_{i-1}'') + \frac{S_{\text{дет.}}}{\omega_r}(\varphi_{i-1}'' - \varphi_i'') = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Рассмотрим второе уравнение системы (10). Оценим порядок первого и последнего слагаемых, учитывая технологические особенности процесса глубинного шлифования и конструкцию конкретной головки. Отношение последнего и первого слагаемого после преобразований примет вид:

$$\frac{S_{\text{дет.}}(\varphi_{i-1}'' - \varphi_i'')}{2A\omega_r \cos\left(\frac{\varphi_{i-1}'' + \varphi_i''}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_{i-1}'' - \varphi_i''}{2}\right)}. \quad (11)$$

Выразим ω_r через скорость резания, и заменим $\sin\left(\frac{\varphi_{i-1}'' - \varphi_i''}{2}\right)$ на $\frac{\varphi_{i-1}'' - \varphi_i''}{2}$ (так как $(\varphi_{i-1}'' - \varphi_i'') \rightarrow 0$).

Тогда выражение (11) примет вид:

$$\frac{S_{\text{дет.}} \left(1 + \frac{r_k}{R+r} + \frac{R}{r} \cdot \frac{r_k}{R+r}\right)}{V_{\text{рез.}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{i-1}'' + \varphi_i''}{2}\right)}. \quad (12)$$

Выражение (12) принимает наибольшее значение при максимальном числителе и минимальном знаменателе. С учетом того, что при глубинном шлифовании $S_{\text{дет.}} \leq 800$ (мм/мин), $V_{\text{рез.}} \geq 30$ (м/с), а $t \leq 10$ (мм), то для ПШГ, у которой $R/r = 2,5$, получим:

$$\frac{S_{\text{дет.}}(\varphi_{i-1}'' - \varphi_i'')}{A\omega_r(\sin \varphi_{i-1}'' - \sin \varphi_i'')} \leq 0,002. \quad (13)$$

Следовательно, третье слагаемое меньше первого на три порядка, и им можно пренебречь ввиду его малости. Тогда систему уравнений (10) можно свести к следующей:

$$\begin{cases} \varphi_{\text{ин.}}'' \leq \varphi_i'' \leq \varphi_{\text{ик.}}'; \\ \xi = \varphi_i'' + \varphi_{i-1}'' = \frac{\theta_i + \theta_{i-1} + 2\pi k}{R/r + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi}} - 2\beta; \\ A(\cos(\xi - \varphi_i'') - \cos \varphi_i'') + B \cos \Sigma_i''(\varphi_i'') - \\ -B \cos \Sigma_{i-1}''(\varphi_{i-1}'') = 0, \end{cases} \quad (14)$$

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

$$\begin{aligned} \Sigma_i''(\varphi_i'') &= \frac{R+r}{r}\varphi_i'' + \frac{R}{r}\beta - \theta_i + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi}(\varphi_i'' + \beta); \\ \Sigma_{i-1}''(\varphi_{i-1}'') &= \frac{R+r}{r}(\xi - \varphi_i'') + \frac{R}{r}\beta - \theta_{i-1} + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi}(\xi - \varphi_i'' + \beta). \end{aligned}$$

Если известны углы $\varphi_{(i-1)\text{н.}}$ и $\varphi_{(i-1)\text{к.}}$, то пределы возможных значений k вычисляются достаточно легко.

На следующем этапе необходимо найти точку пересечения траектории i -го зерна с поверхностью детали. Искомое положение водила определится углом φ_i''' ($\varphi_{\text{ин.}}'' \leq \varphi_i''' \leq \varphi_{\text{ик.}}'$). Найти угол φ_i''' можно, решив систему уравнений:

$$\begin{cases} \varphi_{\text{ин.}}''' \leq \varphi_i''' \leq \varphi_{\text{ик.}}'; \\ (A+B-t) - A \cos \varphi_i''' + B \cos \Sigma_i'''(\varphi_i''') = 0, \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{где } \Sigma_i'''(\varphi_i''') = \frac{R+r}{r}\varphi_i''' + \frac{R}{r}\beta - \theta_i + \frac{\varphi_{\text{дов.}}}{2\pi}(\varphi_i''' + \beta).$$

Если система (12) имеет решение, то $\varphi_{\text{ик.}}''' = \varphi_i'''$, в противном случае $\varphi_{\text{ик.}}''' = \varphi_{\text{ик.}}'$.

Таким образом, задача определения угла контакта абразивного зерна с деталью сводится к последовательному решению систем уравнений (9), (14) и (15). Решение выше указанных систем, содержащих трансцендентные уравнения, следует производить численным методом.

Заключение

Получено выражение для определения длины дуги контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью детали. Представлен алгоритм определения начальной и конечной точек контакта абразивного зерна с поверхностью детали, использование которого дает возможность прогнозирования выполнения условий для наиболее полного протекания адсорбционного взаимодействия поверхностно-активных веществ СОТС с ювенильными участками обработанной поверхности.

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. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

Поступила в редакцию 19.09.2008

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

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ДУГИ КОНТАКТУ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА З ДЕТАЛЛЮ ПРИ ГЛИБИННОМУ ПЛАНЕТАРНОМУ ШЛІФУВАННІ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ

М.О. Курін

Сформульована проблема необхідності визначення початкової та кінцевої точки контакту абразивного зерна з поверхнею деталі, рішення якої дозволить здійснити прогнозування виконання умов за для найбільш повного протікання адсорбційної взаємодії поверхнево-активних речовин ЗОТС із ювенильними ділянками оброблюваної поверхні. Одержано вираз для визначення довжини дуги контакту абразивного зерна з поверхнею що обробляється. Надано алгоритм визначення початкової та кінцевої точки контакту абразивного зерна з поверхнею деталі.

Ключові слова: прогнозування, точки контакту, довжина дуги, система рівнянь, чисельний метод.

DETERMINATION OF CONTACT ARC LENGTH ABRASIVE GRAIN WITH WORKPIECE BY THE PLANETARY DEEP GRINDING FLAT SURFACE

М.А. Kurin

The problem of necessity determination start and finish contact point abrasive grain with workpiece is formulate, the decision of this problem will allow effect prediction of execution condition for surfactant adsorption on the juvenile piecemeal of workpiece. The expression for determination of contact arc length abrasive grain with workpiece is receive. The procedure of determination start and finish contact point abrasive grain with workpiece is present.

Key words: prediction, contact point, arc length, combined equation, numerical method.

Курин Максим Александрович – аспирант кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.