

УДК 621.923

М.А. КУРИН, В.Н. ПАВЛЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ПЛАНЕТАРНОГО ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Сформулирована проблема необходимости исследования энергосиловых параметров процесса планетарного глубинного шлифования плоских поверхностей и получения аналитических зависимостей, позволяющих определять силы резания. Рассмотрен процесс стружкообразования при планетарном шлифовании, получена зависимость для определения толщины стружки. На основании гипотезы об обобщенном резце со сплошной режущей кромкой, получены зависимости для расчета тангенциальной и нормальной силы резания при планетарном шлифовании плоских поверхностей, учитывающие влияние адсорбционно-пластифицирующего эффекта Ребиндера.

Ключевые слова: силы резания, обобщенный резец, толщина стружки, расстояние между зернами, изотермы адсорбции, свободная поверхностная энергия.

Введение

Развитие технологии производства лопаток ГТД на таких предприятиях отрасли как ОАО “Мотор – Січ”, ММП “Салют”, ОАО “Рыбинские Моторы” идет путем отказа от фрезерных операций в пользу шлифовальных, что ставит задачу совершенствования метода глубинного шлифования плоских поверхностей [1].

В работах [2, 3] 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 сил резания при планетарном глубинном шлифовании плоских поверхностей, являются актуальными и заслуживают внимания.

1. Формулирование проблемы

Исследование энергосиловых параметров процесса шлифования проводится в основном экспериментальными методами. Обработка и анализ экспериментальных данных позволяют получить эмпирические формулы для расчета сил резания [4, 5]. Однако использование подобных формул на практике ограничено узкими рамками проводимого эксперимента, выход за которые приводит к существенным ошибкам. Изменение в широких пределах коэффициентов и показателей степени в эмпирических формулах, описывающих один и тот же процесс, под-

тверждает ограниченность применения таких зависимостей. Помимо этого эмпирические формулы не отражают в полной мере физику процессов.

2. Решение проблемы

Вопросу исследования динамики процесса абразивной обработки уделялось внимание во многих работах [6 – 8], но представление шлифования процессом массового, скоростного микрорезания абразивными частицами, расположенными на периферии круга, позволяет считать приоритетной методикой, предложенную авторами работы [8], как описывающую процесс наиболее близко к реальному.

Считаем, что сила резания абразивным кругом создается частью обобщенного резца, тогда для сил резания при шлифовании получим [8]:

$$P_z = 0,185M(HV) \cdot a_z \cdot V_d \cdot \varepsilon \cdot \frac{\xi \cdot \cos(\eta - \gamma)}{\xi \cdot \cos(\eta - \gamma) - \sin \eta}; \quad (1)$$

$$P_y = P_z \cdot \operatorname{tg}(\eta - \gamma),$$

где M – часть обобщенного резца, создающая силу резания на дуге контакта круга и детали;

HV – твердость обрабатываемого материала по Виккерсу;

$0,185HV$ – напряжение сдвига;

a_z – глубина резания (толщина стружки);

$\varepsilon = \frac{\xi^2 - 2 \cdot \xi \cdot \sin \gamma + 1}{\xi \cdot \cos \gamma}$ – относительный сдвиг;

ξ – усадка стружки;

η – угол трения скольжения;

γ – передний угол абразивного зерна;

B_d – ширина резца (действительная ширина резания).

Часть обобщенного резца, создающая силу резания на дуге контакта круга и детали равна:

$$M = \frac{N_0}{N} = \frac{N_0 \cdot a_{zi}}{a_z}, \quad (2)$$

где N_0 – число контактирующих зерен, расположенных по дуге контакта;

N – количество сечений (зерен в обобщенном резце);

a_{zi} – толщина стружки, снимаемая одним контактирующим зерном.

Вычислим глубину резания a_z в произвольном сечении.

Глубину резания можно определить из рис. 1 $a_z = BM = OB - OM$.

По теореме синусов из $\triangle OO_0M$ выразим угол α :

$$\frac{\Delta}{\sin \alpha} = \frac{O_0M}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)};$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\Delta \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)}{O_0M}\right) = \arcsin\left(\frac{\Delta \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)}{R + r + r_k}\right),$$

где R – радиус направляющей окружности (половина делительного диаметра солнечного колеса);

r – радиус производящего круга (половина делительного диаметра сателлита);

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

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

$$\Delta = \frac{2\pi \cdot S_{дет.}}{m \cdot \omega_r.}$$

m – количество абразивных кругов ПШГ (планетарной шлифовальной головки);

$\omega_r.$ – угловая скорость водила ПШГ;

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

С учетом того, что $\varphi_\Delta = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \varphi)$, используя

теорему синусов, найдем OM :

$$OM = \frac{\Delta \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - (\alpha + \varphi)\right)}{\sin \alpha} =$$

$$= (R + r + r_k) \cdot \frac{\cos\left(\varphi + \arcsin\left(\frac{\Delta \cdot \cos \varphi}{R + r + r_k}\right)\right)}{\cos \varphi}.$$

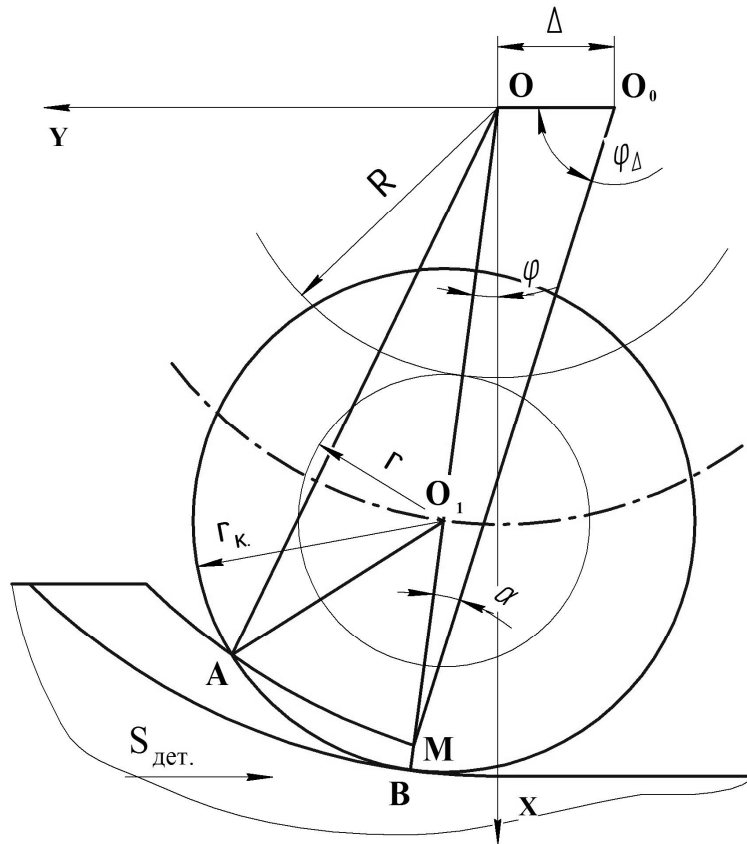


Рис. 1. Схема для определения толщины стружки

Тогда получим:

$$a_z = (R + r + r_k) \left(1 - \frac{\cos \left(\varphi + \arcsin \left(\frac{\Delta \cdot \cos \varphi}{R + r + r_k} \right) \right)}{\cos \varphi} \right). \quad (3)$$

Число контактирующих зерен N_0 можно определить по формуле:

$$N_0 = \frac{l_k}{l_0}, \quad (4)$$

где l_k – длина контакта абразивного круга с поверхностью детали;

l_0 – среднее расстояние между зернами.

Значение l_0 может быть определено расчетным путем, например, из нормативно-справочных (или других) материалов [9 – 12], либо экспериментально. Так, например, согласно данным работы [10], расстояние между зернами l_0 подчиняется зависимости:

$$l_0 = k_\delta \cdot d \cdot \left(\frac{d}{y} \right)^n, \quad (5)$$

где $k_\delta = k_n \cdot k_{ck} \cdot k_3$; k_n – коэффициент поверхностной пористости круга;

k_{ck} – коэффициент структуры круга;

k_3 – коэффициент, характеризующий зерно, его вершину и ориентацию;

d – размер зерна;

y – расстояние от периферии режущей поверхности круга.

Значение коэффициентов k_n , k_{ck} и k_3 приведены в работе [10].

$n = 1 - 2,5$ – (для электрокорундовых кругов на керамической связке $n = 1,5$, для эльборовых и карбидокремниевых на керамической связке $n = 1$).

Толщина слоя, снимаемого одним контактирующим зерном, определяется по формуле [8]:

$$a_{zi} = \frac{V_k \cdot V_d \cdot l_0 \cdot \sqrt{a_z} \cdot S}{V_k^2 + V_d^2 + V_n^2 + V_{np}^2 + 2 \cdot V_k \cdot \sqrt{V_d^2 + V_n^2}} \cdot \frac{1}{\Gamma \cdot b}. \quad (6)$$

Для планетарного шлифования периферией круга $V_{np} = 0$; $V_d = V_r$; $V_n = S_{дет} \cdot \sin \varphi$; $\frac{S}{b} = 1$;

где V_r – линейная скорость планетарной головки;

V_k – линейная скорость абразивных кругов;

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2 \cdot (R + r + r_k) \cdot 2 \cdot r_k}{2 \cdot (R + r + r_k) - 2 \cdot r_k}} = \sqrt{\frac{2 \cdot r_k \cdot (R + r + r_k)}{R + r}}. \quad (7)$$

С учетом выше изложенного

$$a_{zi} = \frac{V_k \cdot V_r \cdot \sqrt{a_z} \cdot l_0}{V_k^2 + V_r^2 + (S_{дет} \sin \varphi)^2 + 2V_k \sqrt{V_r^2 + (S_{дет} \sin \varphi)^2}} \times \sqrt{\frac{R + r}{2 \cdot r_k \cdot (R + r + r_k)}}. \quad (8)$$

Выступающую над связкой часть абразивных зерен разные исследователи идентифицируют с различными геометрическими фигурами [9, 11–14], но согласно данным работы [14] абразивные и в особенности алмазные зерна удовлетворительно описываются эллипсоидами вращения. Таким образом, действительная ширина резания с учетом дискретности контакта определится по формуле [10]:

$$B_d = \frac{k_b \sqrt{d \cdot a_{zi}}}{l_0} \cdot B, \quad (9)$$

где $k_b = 2\alpha$ – коэффициент, зависящий от формы зерна;

α – отношение полуосей эллипсоида вращения ($\alpha = 1,7-2$) [14];

B – ширина абразивного круга.

Рассмотрим выражение (1). Введем замену

$$\psi(\xi, \eta, \gamma) = \frac{\xi^2 - 2 \cdot \xi \cdot \sin \gamma + 1}{\xi \cdot \cos \gamma} \times \frac{\xi \cdot \cos(\eta - \gamma)}{\xi \cdot \cos(\eta - \gamma) - \sin \eta}. \quad (10)$$

Так как при шлифовании скорость относительного перемещения детали и круга больше 10м/с, то можно считать, что усадка стружки равна примерно 1,5. Таким образом, с учетом того, что процесс резания осуществляется с отрицательными передними углами и зависимости коэффициента трения скольжения от скорости перемещения трущихся поверхностей, выражение (9) примет следующий вид [8]:

$$\psi(\xi, \eta, \gamma) = \psi(1,5; \eta(V_k + V_r), \gamma) = \psi_0 \approx 6 \cdot \frac{\cos(\eta + \gamma)}{\cos \gamma} \cdot \frac{1 + \sin \gamma}{3 \cos(\eta + \gamma) - 2 \sin \eta}. \quad (11)$$

Эффективное управление процессом механической обработки (в нашем случае глубинного планетарного шлифования) требует создания математической модели, которая учитывала бы влияние эффекта Ребиндера на такие функциональные характеристики процесса как силы резания, износ инструмента и т.д.

Согласно данным работ [15] между прочностью и свободной поверхностной энергией твердого тела существует корреляция. Так в простейших случаях хрупкого разрушения связь σ_B и σ аппроксимируется универсальным соотношением Гриффитса $\sigma_B \sim \sigma^{1/2}$, однако, в более сложных случаях пласти-

ческого разрушения реальная работа образования новых поверхностей – эффективная поверхностная энергия должна включать работу пластической деформации [15].

Адсорбция на поверхности раздела жидкость–твердое тело описывается фундаментальным термодинамическим уравнением Гиббса, но невозможность экспериментального определения межфазного натяжения на границе жидкость–твердое тело исключает возможность использования этого уравнения. В этом случае необходимо иметь изотермы адсорбции (полученные опытным путем), которые позволят выяснить характер адсорбции и механизм адсорбционного процесса [16, 17].

На адсорбционный процесс оказывают влияние различные факторы, такие как природа адсорбата, адсорбента и жидкой среды, а также условия, при которых протекает процесс (температура, скорость деформирования и т.д.). Таким образом, необходимый минимум для определения величины понижения поверхностной энергии твердого тела, а, следовательно, и величины снижения предела прочности являются изотермы адсорбции, построенные в нашем случае для системы обрабатываемый материал – ПАВ (поверхностно-активные вещества) СОТС (смазывающе-охлаждающая технологическая среда). Получение таких изотерм для всей номенклатуры обрабатываемых материалов и ПАВ – трудоемкий, дорогостоящий и нецелесообразный процесс, с учетом того, что полученный результат не является достаточным для построения эффективной математической модели.

Аналитическое описание механохимических реакций, протекающих в контактной зоне при шлифовании, представлено в работах [18, 19]. Так в работе [19] Н.В. Сурду предложил для учета влияния кинетики адсорбции технологических сред на силовые параметры диспергирования металлов при шлифовании ввести два коэффициента, учитывающих влияние АПЭ (адсорбционно-пластифицирующий эффект Ребиндера) на напряжение сдвига и коэффициент трения (k_1 и k_2 – соответственно). Такой подход к решению проблемы с технологической точки зрения является наиболее рациональным, так как позволяет существенно упростить математическую модель и сделать её более удобной для практических расчетов.

Определить напряжения сдвига можно, зная не только твердость, но и предел прочности обрабатываемого материала, что особенно удобно при определении искомой величины для жаропрочных сталей и сплавов. Так согласно Розенбергу [20], напряжение сдвига можно определить по формуле

$$\tau = \frac{\sigma_B}{\sqrt{3}}, \quad (12)$$

где σ_B – временное сопротивление (предел прочности при разрыве).

Подставив в формулу (1), выражения для N_0 , a_{zi} , V_d , τ , и с учетом влияния АПЭ получим:

$$P_z = \frac{\sigma_B \cdot k_1 \cdot l_k \cdot k_b \sqrt{d} \cdot B}{\sqrt{3} \sqrt{l_0}} \cdot \psi_0 \times \left(\frac{V_k \cdot V_r \cdot \sqrt{a_z}}{V_k^2 + V_r^2 + (S_{дет} \sin \varphi)^2 + 2V_k \sqrt{V_r^2 + (S_{дет} \sin \varphi)^2}} \right)^{1,5} \times \left(\frac{R+r}{\sqrt{2r_k(R+r+r_k)}} \right)^{1,5}, \quad (13)$$

$$P_y = P_z \cdot k_2 \cdot \operatorname{tg}(\eta + \gamma).$$

Заключение

Проведены исследования динамики процесса глубинного планетарного шлифования плоских поверхностей. Получены аналитические зависимости для расчета тангенциальной и нормальной силы резания, учитывающие влияние адсорбционно-пластифицирующего эффекта Ребиндера.

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. 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.
4. Резникова А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов: [Справочник] / А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.
5. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С.С. Силин, В.А. Хрульков, А.В. Лобанов, Н.С. Рыкунов. – М.: Машиностроение, 1984. – 64 с., ил.
6. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
7. Новиков Г.В. Исследования параметров силовой напряженности абразивной обработки / Г.В. Новиков, В.В. Малыхин // *Международная науч-*

но-техническая конференция «Физические и компьютерные технологии». – Харьков, 2007. – С. 140-154.

8. Евсеев Д.Г. Физические основы процесса шлифования / Д.Г. Евсеев, А.Н. Сальников. – Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 128 с.

9. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

10. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования / В.И. Островский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с.

11. Федосеев О.Б. Шлифование синтетическими сверхтвердыми материалами / О.Б. Федосеев // Известия ВУЗов: Машиностроение. – 1977. – №5. – С. 154-158.

12. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования / А.К. Байкалов. – К.: Наукова думка, 1978. – 207 с.

13. Попов С.А. Алмазно-абразивная обработка материалов и твердых сплавов / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.

14. Резников А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.

15. Шукин Е.Д. Понижение поверхностной энергии и изменение механических свойств твердых тел под влиянием окружающей среды / Е.Д. Шукин // Физ. хим. механика матер. – 1976. – № 1. – С. 3-20.

16. Коллоидные поверхностноактивные вещества / К. Шинода, Т. Накагава, Б. Тамамуси, Т. Исемура. – М.: Мир, 1966. – 260 с.

17. Чеботин В.Н. Физическая химия твердого тела / В.Н. Чеботин. – М.: Химия, 1982. – 320 с., ил.

18. Сурду Н.В. Повышение эффективности шлифования труднообрабатываемых материалов за счет усовершенствования кинематики процессов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Сурду Николай Васильевич. – Х., 2005. – 200 с.

19. Сурду Н.В. Адсорбционное влияние сред при шлифовании металлов / Н.В. Сурду // Пробл. машиностроения. – 1999. – Т2, №2. – С. 106-113.

20. Розенберг А.М. Элементы теории резания металлов / А.М. Розенберг, Е.Н. Еремин. – М.: Машиз, 1956. – 319 с.

Поступила в редакцию: 1.12.2009

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ ПЛАНЕТАРНОГО ШЛІФУВАННЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ

М.А. Курін, В.М. Павленко

Сформульована проблема необхідності дослідження енергосилових параметрів процесу планетарного глибинного шліфування плоских поверхонь та отримання аналітичних залежностей для розрахунку сил різання. Розглянуто процес утворення стружки при планетарному шліфуванні, одержано вираз для визначення товщини стружки. З використанням гіпотези узагальненого різця з суцільною ріжучою кромкою одержані залежності для визначення тангенціальної та нормальної сили різання при планетарному шліфуванні плоских поверхонь які враховують вплив адсорбційно-пластифікуючого ефекту Ребіндера.

Ключові слова: сили різання, узагальнений різець, товщина стружки, відстань між зернами, ізотерми адсорбції, вільна поверхнева енергія.

ANALYSIS OF DYNAMICS OF THE PLANETARY GRINDING OF FLAT SURFACES

M.A. Kurin, V.N. Pavlenko

The problem of necessity of research of energy-power and analytic dependencies receiving that allow to determine cutting forces was formulated for deep grinding of flat surfaces. The chip making process was considered and dependence for chip thickness was received. Dependencies for tangential and normal forces determining at deep grinding of flat surfaces were received on the basis of hypothesis of generalized abstract cutter with monolith blade. This dependencies are involving the influence of adsorption and plasticizer Rebinder effect.

Key words: cutting force, generalized abstract cutter, chip thickness, distance between grain, isotherm of adsorption, free energy surface.

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

Павленко Виталий Николаевич – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой теоретической механики и машиноведения, проректор по научно-педагогической работе, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.