У роботі в межах феноменологічної теорії оздоблювально-зачисних операцій (ФТОЗО) досліджено апарат кількісних оцінок фізичних та технологічних параметрів, які характеризують у методі шпиндельної обробки динаміку формування М-поверхонь

Ключові слова: оздоблювально-зачисні операції, шпиндельна обробка, зняття матеріалу, М-поверхня, коефіцієнт дефекту маси

В работе в рамках феноменологической теории отделочно-зачистных операций (ФТОЗО) исследован аппарат количественных оценок основных физических и технологических параметров, характеризующих в методе шпиндельной обработки динамику формирования М-поверхностей

Ключевые слова: отделочно-зачистные операции, шпиндельная обработка, съем металла, М-поверхность, коэффициент дефекта массы

In work the model of quantitative estimations of basic physical and technologecal parametres of process of shpindel treatment of M-surfaces in measures of phenomenologecal theory of finishing-and-skining operations (PTFSO) are investigated

Key words: finishing-and-skining operations, spindle treatment, M- surface, remove of material, coefficient of mass defect

УДК 621.9.048

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ПРОЦЕССА ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Е.В. Нечай
Аспирант
Кафедра «Технология машиностроения»
Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля
кв. Молодежный, 20А, г. Луганск, Украина, 91034
Контактный тел.: 050-694-73-01
E-mail: elenanechaj@yandex.ru

1. Введение

В работе [1] были сформированы основные положения феноменологической теории отделочно-зачистных операций (ФТОЗО) шпиндельной обработки поверхностей тел вращения, которые учитывают весь спектр макропараметров абразивной среды и обрабатываемого начального тела Σ_0 (здесь и в дальнейшем используются обозначения работы [1]). Тело (деталь) с плотностью массы ρ образовано вращением вокруг оси $0x$ криволинейной трапеции T_0, ограниченной сверху кривой $C_0: r = r_0(\varphi)$, $0 \le \varphi \le \pi$, а снизу – отрезком оси абсцисс $[a,b]$, $a = r_0(\pi)$, $b = r_0(0)$ (рис. 1 в [1]). Начиная с момента времени $t = 0$ тело Σ_0, погруженное в изотропную среду свободного абразива с внутренним давлением p и закрепленное посредством зажимного устройства в шпинделе, вращается с угловой скоростью ω. Обозначим, следуя работе [1], символом S_t – поверхность, образованную вращением вокруг оси $0x$ кривой $C_t: r = r(t,\varphi)$, $0 \le \varphi \le \pi$, $t \ge 0$, при этом $C_0: r = r(0,\varphi) = r_0(\varphi)$, $0 \le \varphi \le \pi$. Будем полагать, что $r(t,\varphi) \in C^1(\{t \ge 0\} \times [0,\pi])$. Очевидно, что в этих условиях задачи поверхность S_0 начального тела Σ_0 в процессе ОЗО непрерывно переходит в поверхность S_t модифицированного тела вращения Σ_t. Модификация происходит за счет потери массы тела Σ_0 в результате работы силы трения между поверхностью S_0 и абразивной средой. Динамика формирования поверхности S_t описывается зависимостью (6) из [1] в общем случае

$$r(t,\varphi) = r_0(\varphi)\exp\left(-\frac{\alpha K_\alpha \omega p t}{\rho}\sin\varphi\right),\ t \ge 0,\ 0 \le \varphi \le \pi. \quad (1)$$

и зависимостью (23) из [1] в специальном случае, когда финишной обработке подвергается боковая поверхность цилиндра радиуса r_0

$$r(t) = r_0 \exp\left(-\frac{\alpha K_\alpha \omega p}{\rho} t\right),\ t \ge 0, \quad (2)$$

где α – коэффициент трения, K_α – коэффициент дефекта массы, ω – угловая скорость, p – давление в абразивной среде, ρ – плотность массы тела Σ_0.

Зависимость $r(t,\varphi)$ (1) носит название М-поверхности и обозначается $M_{surf}(t,\varphi;r_0(\varphi);\alpha,K_\alpha,\omega,p,\rho)$. М-поверхность определяется параметрическим рядом $P(M_{surf}) = (\alpha,K_\alpha,\omega,p,\rho;r_0(\varphi))$ в общем случае и рядом $P(M_{surf}) = (\alpha,K_\alpha,\omega,p,\rho;r_0)$ – в специальном случае. Зависимости (1) и (2) полностью описывают геометрию соответствующей поверхности вращения S_t. Покажем, как, используя структуру зависимостей (1) и (2), можно сформулировать схему количественных оценок основных физических и технологических параметров, характеризующих динамику процесса ОЗО. Актуальность этой проблемы объясняется тем, что в современных исследованиях шпиндельной обработки поверхностей тел вращения (см. например [2], [3] и др.) связь между микроскопическим описанием на уровне единичного контакта абразивной частицы с обрабатываемой поверхностью и макроскопическими характеристиками носит интуитивный или эмпирический характер и лишена корректных математических построений.

2. Постановка проблемы

Зависимости (1) и (2) являются основными строгими результатами в ФТОЗО и, поэтому, требуют детального исследования с точки зрения прикладной перспективы. В первую очередь это касается процедуры оценки макропараметров α, K_α, ω, p, ρ. Наиболее принципиальной в этом смысле является оценка коэффициента дефекта массы K_α, что сделает возможным формальное использование соотношений (1) и (2) для количественного анализа процесса ОЗО тела Σ_0. В связи с этим рассмотрим два вопроса:

* определение массы снятого материала тела Σ_0 в процессе ОЗО в общем (1) и специальном (2) случаях;

* оценка коэффициента дефекта массы K_α.

3. Результаты исследования

Определение массы снятого материала. Общий случай. Масса снятого материала $m(t)$ за промежуток времени $[0, t]$ при начальной поверхности $r = r_0(\varphi)$, $0 \le \varphi \le \pi$ – это масса слоя материала тела Σ_0, заключенного между двумя поверхностями вращения S_0 и S_t, т.е.

$$m(t) = m_0 - m_t, \tag{3}$$

где m_0 – масса начального тела Σ_0, а m_t – масса модифицированного тела Σ_t.

Легко видеть, что величина m_0 дается равенством

$$m_0 = \pi\rho\int_0^\pi \left[-r_0^2(\varphi)\frac{dr_0(\varphi)}{d\varphi}\cos\varphi\sin^2\varphi + r_0^3(\varphi)\sin^3\varphi\right]d\varphi, \tag{4}$$

а величина m_t – равенством

$$m_t = \pi\rho\int_0^\pi \left[-r^2(t,\varphi)\frac{dr(t,\varphi)}{d\varphi}\cos\varphi\sin^2\varphi + r^3(t,\varphi)\sin^3\varphi\right]d\varphi, \tag{5}$$

где $r(t,\varphi)$ имеет вид (1).

Учитывая, что в зависимости (5)

$$\frac{dr(t,\varphi)}{d\varphi} = \left[\frac{dr_0(\varphi)}{d\varphi} - r_0(\varphi)\frac{\alpha K_\alpha \omega pt}{\rho}\cos\varphi\right]\exp\left(-\frac{\alpha K_\alpha \omega pt}{\rho}\sin\varphi\right)$$

на основании (4), (5), (1) окончательно находим

$$\begin{aligned} m(t) = &-\pi\rho\int_0^\pi r_0^2(\varphi)\frac{dr_0(\varphi)}{d\varphi}\left[1-\exp\left(-\frac{3\alpha K_\alpha \omega pt}{\rho}\sin\varphi\right)\right]\cos\varphi\sin^2\varphi d\varphi - \\ &-\pi\alpha K_\alpha \omega pt\int_0^\pi r_0^3(\varphi)\cos^2\varphi\sin^2\varphi\exp\left(-\frac{3\alpha K_\alpha \omega pt}{\rho}\sin\varphi\right)d\varphi + \\ &+\pi\rho\int_0^\pi r_0^3(\varphi)\left[1-\exp\left(-\frac{3\alpha K_\alpha \omega pt}{\rho}\sin\varphi\right)\right]\sin^3\varphi d\varphi,\ t \ge 0. \end{aligned} \tag{6}$$

Заметим здесь, что вычисление интервалов в (6) для произвольной функции $r_0(\varphi)$ класса $C^1[0,\varphi]$ в конечном виде невозможно. Для конкретной структуры функции $r_0(\varphi)$ необходимо использовать в (6) процедуру численного интегрирования.

Пусть для М-поверхности (1) задан технологический параметр δ с помощью равенства

$$\begin{aligned} &\delta = \max_\varphi\left[r0(\varphi) - r(t,\varphi)\right], \\ &\delta << \min_\varphi r_0(\varphi). \end{aligned} \tag{7}$$

Тогда время шлифования t_δ начальной поверхности S_0 определяется соотношением

$$t_\delta = \frac{\rho\delta}{\alpha K_\alpha \omega pG},\ G = \max_\varphi\left[r_0(\varphi)\sin\varphi\right]. \tag{8}$$

С учетом (8) масса снятого материала (6) начального тела Σ_0 в процессе ОЗО за временной промежуток $[0,t_\delta]$ равна

$$\begin{aligned} m(t_\delta) = &\\ = &-\pi\rho\int_0^\pi r_0^2(\varphi)\frac{dr_0(\varphi)}{d\varphi}\left[1-\exp\left(-\frac{3\delta}{G}\sin\varphi\right)\right]\cos\varphi\sin^2\varphi d\varphi - \\ &-\frac{\pi\delta\rho}{G}\int_0^\pi r_0^3(\varphi)\cos^2\varphi\sin^2\varphi\exp\left(-\frac{3\delta}{G}\sin\varphi\right)d\varphi + \\ &+\pi\rho\int_0^\pi r_0^3(\varphi)\left[1-\exp\left(-\frac{3\delta}{G}\sin\varphi\right)\right]\sin^3\varphi d\varphi. \end{aligned} \tag{9}$$

Если в М-поверхности (1) $r_0(\varphi) = r_0 = \text{const}$, т.е. начальная поверхность S_0 представляет собой сферу радиуса r_0, то масса $m(t_\delta)$ снятого припуска за временной промежуток $[0,t_\delta]$, на основании (9), дается зависимостью

$$\begin{aligned} m(t_\delta) = &-\pi\delta\rho r_0^2\int_0^\pi \cos^2\varphi\sin^2\varphi\exp\left(-\frac{3\delta}{r_0}\sin\varphi\right)d\varphi + \\ &+\pi\rho r_0^3\int_0^\pi\left[1-\exp\left(-\frac{3\delta}{r_0}\sin\varphi\right)\right]\sin^3\varphi d\varphi. \end{aligned} \tag{10}$$

При этом учли, что в данном случае $G = \max_\varphi\left[r_0(\varphi)\sin\varphi\right] = r_0$. Зависимость (10) с измененными пределами интегрирования может быть использована для определения массы снятого материала шарового слоя (см. рис.3 в [1]), что соответствует модели клапана шариковых кранов

$$\begin{aligned} m(t_\delta) = &-\pi\delta\rho r_0^2\int_{\bar\varphi}^{\pi-\bar\varphi} \cos^2\varphi\sin^2\varphi\exp\left(-\frac{3\delta}{r_0}\sin\varphi\right)d\varphi + \\ &+\pi\delta\rho r_0^3\int_{\bar\varphi}^{\pi-\bar\varphi}\left[1-\exp\left(-\frac{3\delta}{r_0}\sin\varphi\right)\right]\sin^3\varphi d\varphi. \end{aligned} \tag{11}$$

Далее, рассмотрим практически важный случай, когда задана технологическая поверхность S_{tec} [1]:

$$S_{tec} = \{(r,\varphi): r = r_{tec}(\varphi), 0 \le \varphi \le \pi\}. \quad (12)$$

Зависимость формирования технологической поверхности S_{tec} имеет вид

$$r(t,\varphi) = r_{tec}(\varphi)\exp\left\{-\frac{\alpha K_\alpha \omega_{tec} p_{tec}}{\rho}(t - \tau_{tec})\sin\varphi\right\}, \quad 0 \le t \le \tau_{tec},\ 0 \le \varphi \le \pi. \quad (13)$$

Определим массу $m(\tau_{tec})$ снятого материала начального тела Σ_{0tec} с начальной поверхностью S_{0tec}, задаваемой уравнением

$$r_{0tec}(\varphi) = r_{tec}(\varphi)\exp\left(\frac{\alpha K_\alpha \omega_{tec} p_{tec} \tau_{tec}}{\rho}\sin\varphi\right),\ 0 \le \varphi \le \pi \quad (14)$$

На основании (14) найдем для $m(\tau_{tec})$

$$m(\tau_{tec}) = m_{\delta tec} - m_{tec}, \quad (15)$$

где $m_{\delta tec}$ – масса начального тела Σ_{0tec}, а m_{tec} – масса эталонного тела Σ_{tec}. Выпишем, на основании (13), (14) зависимости для определения величин m_{tec} и $m_{\delta tec}$. Имеем

$$m_{tec} = \pi\rho\int_0^\pi\left[-r_{tec}^2(\varphi)\frac{dr_{tec}(\varphi)}{d\varphi}\cos\varphi\sin^2\varphi + r_{tec}^3(\varphi)\sin^3\varphi\right]d\varphi, \quad (16)$$

$$m_{\delta tec} = \pi\rho\int_0^\pi\left[-r^2(0,\varphi)\frac{\partial r(0,\varphi)}{\partial\varphi}\cos\varphi\sin^2\varphi + r^3(0,\varphi)\sin^3\varphi\right]d\varphi, \quad (17)$$

где $r(t,\varphi)$ имеет вид (13).

Находя частную производную $\dfrac{\partial r(0,\varphi)}{\partial\varphi}$ в (17)

$$\frac{\partial r(0,\varphi)}{\partial\varphi} = \left[\frac{dr_{tec}(\varphi)}{d\varphi} + r_{tec}(\varphi)\frac{\alpha K_\alpha \omega_{tec} p_{tec}\tau_{tec}}{\rho}\cos\varphi\right]\times \times\exp\left(\frac{\alpha K_\alpha \omega_{tec} p_{tec}\tau_{tec}}{\rho}\sin\varphi\right),$$

с помощью (16), (17), (15) окончательно находим

$$m(\tau_{tec}) = -\pi\rho\int_0^\pi r_{tec}^2(\varphi)\frac{dr_{tec}(\varphi)}{d\varphi}\left[\exp\left(\frac{3\delta_{tec}}{G}\sin\varphi\right) - 1\right]\cos\varphi\sin^2\varphi\, d\varphi - \frac{\pi\delta_{tec}\rho}{G}\int_0^\pi r_{tec}^3(\varphi)\cos^2\varphi\sin^2\varphi\exp\left(\frac{3\delta_{tec}}{G}\sin\varphi\right)d\varphi + \pi\rho\int_0^\pi r_{tec}^3(\varphi)\left[\exp\left(\frac{3\delta_{tec}}{G}\sin\varphi\right) - 1\right]\sin^3\varphi\, d\varphi. \quad (18)$$

В (18) учли, что технологический параметр δ_{tec} для М-поверхности (13) связан с технологическим временным параметром τ_{tec} соотношением

$$\delta_{tec} = \frac{\alpha K_\alpha \omega_{tec} p_{tec}\tau_{tec}}{\rho}\cdot G,\ G = \max_\varphi\left[r_{tec}(\varphi)\sin\varphi\right]. \quad (19)$$

Выпишем зависимость (18) для случая, когда технологическая поверхность S_{tec} (12) представляет собой сферу радиуса r_{0tec}, $r_{tec}(\varphi) = r_{0tec}$:

$$m(\tau_{tec}) = -\pi\delta_{tec}\rho r_{0tec}^2\int_0^\pi\cos^2\varphi\sin^2\varphi\exp\left(\frac{3\delta_{tec}}{r_{0tec}}\sin\varphi\right)d\varphi + \pi\rho r_{0tec}^2\int_0^\pi\left[\exp\left(\frac{3\delta_{tec}}{r_{0tec}}\sin\varphi\right) - 1\right]\sin^3\varphi\, d\varphi. \quad (20)$$

Определение массы снятого материала. Специальный случай. Пусть начальное тело Σ_0 - цилиндр радиуса r_0 и высотой H. Найдем массу $m(t)$ снятого материала тела Σ_0 за промежуток времени $[0,t]$ в процессе ОЗО, описываемом уравнением (2). Используя зависимость (2), легко найти, что $m(t)$ имеет вид

$$m(t) = \pi H\rho\left[r_0^2 - r^2(t)\right] = \pi H\rho r_0^2\left[1 - \exp\left(-\frac{2\alpha K_\alpha\omega p}{\rho}t\right)\right], \quad t \ge 0. \quad (21)$$

При заданном технологическом параметре δ время t_δ шлифования Σ_0 определяется равенством

$$t_\delta = \frac{\rho}{\alpha K_\alpha\omega p}\ln\frac{r_0}{r_0 - \delta},\ \delta << r_0. \quad (22)$$

Тогда масса $m(t_\delta)$ снятого материала тела Σ_0, на основании (21), дается зависимостью

$$m(t_\delta) = \pi H\rho\delta(2r_0 - \delta),\ \delta = r_0\left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha K_\alpha\omega p}{\rho}t_\delta\right)\right]. \quad (23)$$

Заметим здесь, что если в качестве технологической поверхности S_{tec} рассматривать цилиндр радиуса r_{tec}, то технологический временной параметр τ_{tec} равен

$$\tau_{tec} = \frac{\rho}{\alpha K_\alpha\omega_{tec}p_{tec}}\ln\frac{r_{tec} + \delta_{tec}}{r_{tec}}, \quad (24)$$

а масса $m(\tau_{tec})$ снятого материала начального цилиндра Σ_{0tec} радиуса $r_{0tec} = r_{tec}\exp\left(\dfrac{\alpha K_\alpha\omega_{tec}p_{tec}\tau_{tec}}{\rho}\right)$ определяется соотношением

$$m(\tau_{tec}) = \pi H\rho\delta_{tec}(2r_{tec} + \delta_{tec}), \quad \delta_{tec} = r_{tec}\left[\exp\left(\frac{\alpha K_\alpha\omega_{tec}p_{tec}\tau_{tec}}{\rho}\right) - 1\right]. \quad (25)$$

Оценка коэффициента дефекта массы K_α.

Зависимости (6) и (21), с помощью которых вычисляется масса снятого материала $m(t)$ начального тела Σ_0 за временной промежуток $[0,t]$ содержат пять параметров $\alpha, K_\alpha, \omega, p, \rho$, среди которых оценка коэффициента дефекта массы K_α представляет определенную сложность. Параметр K_α отражает ассоциативный характер процесса ОЗО и зависит от зернистости абразива, исходной шероховатости тела Σ_0 и других физико-механических свойств исследуемой модели. Покажем, как эмпирическим путем можно дать оценку параметру K_α, используя точные равенства (22), (23). Выразим, на основании (22) коэффициент K_α как функцию переменных δ и t_δ при фиксированных значениях параметров α, ω, p, ρ:

$$K_\alpha = \frac{\rho}{\alpha\omega p t_\delta}\ln\frac{r_0}{r_0 - \delta}. \quad (26)$$

Фиксируем время t_δ шлифования цилиндра Σ_0 и взвешиванием определяем массу снятого материала $m(t_\delta)$. С помощью равенства (23) находим значение технологического параметра δ:

$$\delta = r_0 - \sqrt{r_0^2 - \frac{m(t_\delta)}{\pi H\rho}}. \quad (27)$$

По известным значениям t_δ и δ вычисляем значение параметра K_α, исходя из соотношения (26). Выполняя в одинаковых условиях этот эксперимент

n раз, $n \geq 10$ получим вариационный ряд, выборочное среднее которого будет служить статистической оценкой величины K_α .

4. Выводы

В настоящей работе с использованием ФТОЗО исследована прикладная перспектива соответствующего математического аппарата: получены зависимости (6) и (21), фиксирующие массу снятого материала в методе шпиндельной обработки поверхности тел вращения и приведен алгоритм оценки наиболее значимого параметра модели – коэффициента дефекта масс K_α . Полученные результаты требуют дополнительного уточнения: целесообразно в некоторой аналитической схеме получить явную зависимость коэффициента K_α от величины коэффициента трения α. Этот вопрос будет изучен в следующих работах автора.

Литература

1. Нечай Е.В. Основы теории отделочно-зачисных операций / Е.В. Нечай, В.С. Щелоков //Вібрації в техніці та технлогіях. - 2010.- № 3(59). – с.85 -92.
2. Зверовщиков А.В. Совершенствование технологии шпиндельной обработки деталей при уплотнении шлифовального материала внешним давлением: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Зверовщиков Анатолий Владимирович: Пензенский гос. ун-т. – Пенза, 2004. – 270 с.
3. Чирков О.И. Совершенствование технологии шпиндельной центробежно-ротационной обработки деталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Чирков Олег Игоревич: Пензенский гос. ун-т. – Пенза, 2005. – 19 с.

УДК 621.869

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕНКЕ КАНАТНОГО БАРАБАНА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Н.Н. Фидровская
Кандидат кандидат технических наук, доцент*

И.С. Варченко
Аспирант*
*Кафедра металлорежущего оборудования и технических систем
Украинская инженерно-педагогическая академия
ул. Университетская, 16, г. Харьков, Украина
Контактный тел.: 066-451-69-74

В статті наведені результати експерименту, який провели в лабораторних умовах. Проведено порівняння даних, які отримані в експерименті, з розрахунковими

Ключові слова: канатний барабан, підйомний канат, деформація, ZETLab

В статье приведены результаты эксперимента, проведенного в лабораторных условиях. Проведено сравнение данных, полученных в эксперименте, с расчетными

Ключевые слова: канатный барабан, подъемный канат, деформация, ZETLab

Experimental exploration in the side of ropes drum. The article prouides one with the data of experiment performed in laboratorion conditions and actnowledges the comparison with expected data

Keywords: the Rope drum, an elevating rope, deformation, ZETLab

1. Введение

Теоретические исследования, которые имеют целью получение расчетных формул, как правило, проверяются экспериментами, проводящимися на лабораторных образцах или действующих машинах.

С целью проверки методики расчета напряженного состояния обечайки канатного барабана (1), нами был разработан экспериментальный стенд (рис. 1, 2, 3).