



Нечай Е.В.

Щелоков В.С.

**Восточноукраинский
национальный
университет имени
Владимира Даля**

УДК 621.9.048

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОТДЕЛОЧНО-
ЗАЧИСТНЫХ ОПЕРАЦИЙ**

У роботі сформульовані загальні вимоги модельного характеру в межах аналітичного розв'язку проблеми оздоблювально-зачисних операцій шпіндельної обробки деталей у середовищі вільного абразиву. Знайдено закон, який описує просторово-часові особливості геометричної модифікації оброблюваної поверхні та наведені оціночні співвідношення прикладного змісту.

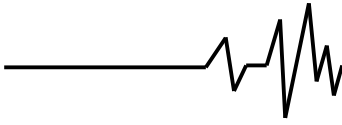
The general requirements of model character in measures of analytic decision of the problem of finishing-and-skining operations of shpindel treatment of details in free abrasive. Law which describes the spatio-temporal features of geometrical modification of treating surface is found. Evaluation correlations of the applied maintenance are resulted.

1. Введение. В публикациях отечественных [1, 2, 3] и зарубежных ученых [4, 5] содержатся многочисленные экспериментальные результаты в области отделочно-зачистных операций (ОЗО) обработки деталей. Эксперименты подобного рода приобретают особую актуальность в связи с интенсивным развитием производства высокоточного оборудования, используемого в различных отраслях машиностроения, в частности, в авиационной промышленности. Несмотря на положительный характер полученных экспериментальных данных, широкое внедрение тех или иных технологий шлифовки поверхностей деталей (метод виброобработки, метод шпіндельної обробки и др.) сдерживается отсутствием системного аналитического подхода к проблеме описания ОЗО, особенно в практически важном случае, когда финишной обработке подвергаются поверхности тел вращения, погруженных в среду свободного абразива. Следует отметить, что существующие аналитические схемы взаимодействия обрабатываемой поверхности с обрабатываемой средой [6, 7] строятся на детальном изучении единичного контакта абразивной частицы и детали с привлечением вероятностного аппарата для количественной оценки результатов обработки. Такой подход, на наш взгляд, является недостаточным для создания технологии ОЗО, которая должна основываться на принципах феноменологической теории, так как совокупность большого числа микроконтактов носит феноменологический характер и должна исследоваться на уровне макропараметров

абразивной среды и обрабатываемого тела как единой консервативной системы. Эта проблема и будет представлять собой предмет исследования в данной работе.

2. Постановка проблемы. *Общий случай.* Рассмотрим на евклидовой плоскости R^2 декартову прямоугольную систему координат x^0y и совмещенную с ней полярную систему координат $rO\varphi$. Пусть Σ_0 - некоторое однородное тело (деталь) с плотностью массы ρ образовано вращением вокруг оси Ox криволинейной трапеции T_0 , ограниченной сверху кривой $C_o: r = r_o(\varphi)$, $0 \leq \varphi \leq \pi$, а снизу – отрезком оси абсцисс $[a, b]$, $a = r_o(\pi)$, $b = r_o(0)$ (рис. 1)

Выбор такой геометрии тела Σ_o не ограничивает общности последующих аналитических построений, которые легко могут быть распространены и на практически важный случай, когда в уравнении кривой C_o полярный угол изменяется в промежутке $[\varphi_1, \varphi_2]$, $0 < \varphi_1 < \varphi_2 < \pi$, а криволинейная трапеция T_0 ограничена справа и слева соответственно отрезками прямых $x=c$ и $x=d$ и снизу – отрезком $[c,d]$ (рис.1, заштрихованная область). Математически эта модель может быть изучена с помощью процедуры доопределения до схемы общей задачи. Отметим, что в данной работе будет рассмотрен и, так называемый, *специальный случай*, когда тело V_o - это цилиндр радиуса r_o .



Далее тело Σ_o погружается в изотропную среду свободного абразива с

внутренним давлением P и закрепляется посредством зажимного устройства в шпинделе, который вращается с угловой скоростью ω , начиная с момента времени $t = 0$. Рис.1 представляет собой идеализацию эксперимента, поэтому кинематическая часть ОЗО на нем не обозначена.

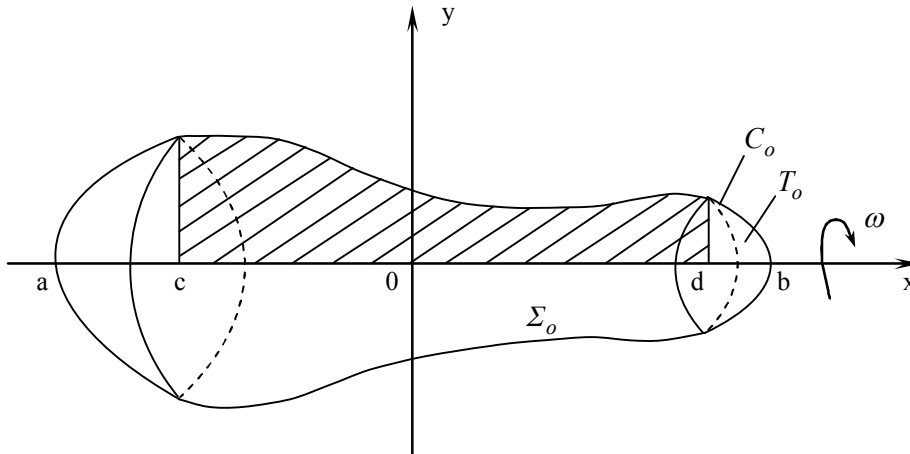


Рис.1. Общий вид тела вращения Σ_o в методе шпиндельной обработки с установкой зажимного приспособления в точках $x = a$ и $x = b$

Пусть S_t - поверхность, образованная вращением вокруг оси Ox кривой $C_t : r = r(t, \varphi)$, $0 \leq \varphi \leq \pi$, $t \geq 0$, при этом $C_o : r = r(0, \varphi) \equiv r_o(\varphi)$, $0 \leq \varphi \leq \pi$. Будем полагать, что $r(t, \varphi) \in C^1(\{t \geq 0\} \times [0, \pi])$. В процессе шлифовки начальной поверхности S_o тела Σ_o происходит модификация его геометрии за счет съема материала тела (потери массы). В связи с этим возникают следующие вопросы:

- * какой будет геометрия модифицированного начального тела Σ_o в процессе ОЗО его поверхности в произвольный момент времени $t > 0$;
- * как сочетание внутренних и внешних параметров задачи влияет на скорость ОЗО;
- * как определяется оптимальный режим ОЗО для достижения технологической поверхности S_{tec} ;
- * какой должен быть класс исходной поверхности S_o тела Σ_o , чтобы в течении технологического промежутка времени $[0, \tau_{tec}]$ достичь поверхности S_{tec} .

Замечание. Строгое определение понятия S_{tec} и величины τ_{tec} будет дано ниже.

3. Результаты исследования. При ОЗО исходной поверхности происходит потеря массы тела Σ_o в результате работы силы трения между поверхностью S_o и абразивной средой. Обозначим символом Σ_t тело, в которое переходит начальное тело Σ_o за время шлифовки $t > 0$. Тогда, учитывая изотропию абразивной среды, легко видеть, что поверхность S_t тела Σ_t будет образована вращением вокруг оси Ox кривой C_t . Отсюда следует, что полное описание процесса ОЗО поверхности тела Σ_o должно проводиться в терминах функции $r(t, \varphi)$. Имея в виду биекцию между множествами $\{S_t, t \geq 0\}$ и $\{r(t, \varphi), t \geq 0\}$ функцию $r(t, \varphi)$ будем в дальнейшем называть *поверхностью*.

Для иллюстрации последующих математических построений удобно использовать информацию на рис. 2, где



изображены графики кривой $C_t : r = r(t, \varphi)$, $0 \leq \varphi \leq \pi$ и $C_{t+\Delta t} : r = r(t + \Delta t, \varphi)$, $0 \leq \varphi \leq \pi$, соответствующих динамике процесса ОЗО на временном промежутке $[t, t + \Delta t]$.

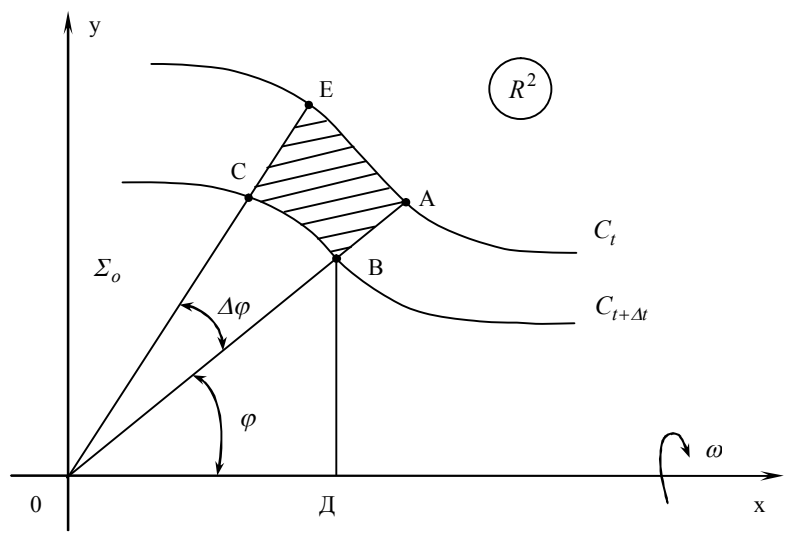


Рис.2. Графики кривых C_t и $C_{t+\Delta t}$ фиксирующих слой снятого материала при шлифовке тела Σ_o за время Δt

Криволинейный четырехугольник ABCE (рис. 2, заштрихованная область) представляет собой сечение плоскостью xOy кольца материала тела Σ_o , который снимается при шлифовке за время Δt . Найдем массу этого кольца Δm . Площадь криволинейного четырехугольника ABCE равна:

$$\Delta V = 2\pi r^2(t + \Delta t, \varphi) \sin \varphi [r(t, \varphi) - r(t + \Delta t, \varphi)] \Delta \varphi .$$

Таким образом, Δm дается равенством

$$\Delta m = \rho \Delta V = 2\pi \rho r^2(t + \Delta t, \varphi) \sin \varphi [r(t, \varphi) - r(t + \Delta t, \varphi)] \Delta \varphi . \quad (1)$$

Найдем теперь работу ΔA силы трения на промежутке времени $[t, t + \Delta t]$, что влечет за собой потерю телом Σ_o массы Δm (1). Абразивная среда является *изотропной* с постоянным внутренним давлением P , действующим по нормали к поверхности S_t , а сила трения направлена по касательной к окружности радиуса $r(t + \Delta t, \varphi) \sin \varphi$ в любой ее точке. Следовательно, работа ΔA равна

$$\Delta A = 2\pi \alpha \rho r^3(t + \Delta t, \varphi) \sin^2 \varphi \Delta \varphi \Delta t , \quad (2)$$

где α - коэффициент трения.

пл. $ABCE = r(t + \Delta t, \varphi) [r(t, \varphi) - r(t + \Delta t, \varphi)] \Delta \varphi$, где Δt и $\Delta \varphi$ - дифференциально малые величины, а объем ΔV соответствующего кольца равен:

$$\Delta V = 2\pi \text{ВД} \cdot \text{пл.} ABCE$$

или

При выводе формулы (2) мы учли, что площадь поверхности, образованной вращением дуги $\overset{\frown}{BC}$ вокруг оси Ox (рис. 2) равна $2\pi r^2(t + \Delta t, \varphi) \sin \varphi \Delta \varphi$, а путь, на котором фиксируется работа силы трения ΔA (2), равен $\omega r(t + \Delta t, \varphi) \sin \varphi \Delta t$.

Далее, введем следующее:

Определение 1. Величина, численно равная массе материала, теряемой телом Σ_o в процессе ОЗО его поверхности в среде свободного абразива и соответствующей единичной работе силы трения, называется



коэффициентом дефекта массы и В соответствии с Определением 1 и обозначается символом K_α . учитывая равенства (1), (2), получим

$$\Delta m = K_\alpha \Delta A,$$

$$\begin{aligned} 2\pi\rho r^2(t + \Delta t, \varphi) \sin \varphi [r(t, \varphi) - r(t + \Delta t, \varphi)] \Delta \varphi = \\ = 2\rho b K_\alpha \omega p r^3(t + \Delta t, \varphi) \sin^2 \varphi \Delta \varphi \Delta t. \end{aligned} \quad (3)$$

Выполняя в (3) соответствующие упрощения и деля правую и левую части на $\Delta t \neq 0$, будем иметь

$$-\frac{r(t + \Delta t, \varphi) - r(t, \varphi)}{\Delta t} = \frac{b K_\alpha \omega p}{c} \sin \varphi r(t + \Delta t, \varphi). \quad (4)$$

Переходя в (4) к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$ и замечая, что $r(t, \varphi) \in C^1(\{t \geq 0\} \times [0, \pi])$, получим дифференциальное уравнение (ДУ) первого порядка по переменному t для неизвестной функции $r(t, \varphi)$:

$$\frac{\partial r(t, \varphi)}{\partial t} = -\frac{b K_\alpha \omega p}{c} \sin \varphi r(t, \varphi), \quad (5)$$

$$r(0, \varphi) = r_0(\varphi), \quad 0 \leq \varphi \leq \pi.$$

Решение ДУ (5) имеет вид

$$\begin{aligned} r(t, \varphi) = r_0(\varphi) \exp\left(-\frac{b K_\alpha \omega p t}{c} \sin \varphi\right), \\ t \geq 0, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi. \end{aligned} \quad (6)$$

Определение 2. Закон $r(t, \varphi)$ (6), описывающий геометрию соответствующей поверхности вращения S_t в духе сюръективного отображения, называется *M-поверхностью* и обозначается $M_{surf}(t, \varphi; r_0(\varphi); \alpha, K_\alpha, \omega, p, \rho)$ или кратко M_{surf} .

Учитывая, что $r_0(\varphi) \in C^1[0, \pi]$, легко видеть, что M_{surf} принадлежит классу $C^1(\{t \geq 0\} \times [0, \pi])$, а по переменному t - классу $C^\infty(t \geq 0)$.

Из структуры M_{surf} (6) непосредственно следует, что у произвольного тела вращения Σ_o в процессе ОЗО существуют две неподвижные точки, в которых отсутствует сьем материала. Этим точкам соответствуют значения полярного угла $\varphi = 0, \pi$: $r(t, 0) = r_0(0) = b$, $r(t, \pi) = r_0(\pi) = a$, $t \geq 0$.

Рассмотрим с точки зрения приложения аппарата формулы (6) практически важный случай, когда в (6) $r_0(\varphi) = r_0 = const$, т.е. начальное тело Σ_o представляет собой шар радиуса r_o . Тогда (6) примет вид

$$\begin{aligned} r(t, \varphi) = r_o \exp\left(-\frac{b K_\alpha \omega p t}{c} \sin \varphi\right), \\ t \geq 0, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi. \end{aligned} \quad (7)$$

Потребуем, чтобы максимальное искажение сферической поверхности шара Σ_o в процессе ОЗО не превосходило некоторого технологического параметра δ , т.е.

$$r_o - r\left(t, \frac{\pi}{2}\right) = r_o \left[1 - \exp\left(-\frac{b K_\alpha \omega p t}{c}\right)\right] \leq \delta. \quad (8)$$

Из неравенства (8) следует оценка времени шлифовки t_δ :

$$t_\delta \cong \frac{\rho}{\alpha K_\alpha \omega p} \ln \frac{r_o}{r_o - \delta}. \quad (9)$$

Если выделить в начальном шаре Σ_o шаровой слой, заключенный между плоскостями $x = -r_o \cos \bar{\varphi}$ и $x = r_o \cos \bar{\varphi}$ (например, модель клапана шариковых кранов) (рис.3), то максимальное приращение функции $r(t, \varphi)$ (7) за промежуток времени $[0, t_\delta]$ равно

$$\begin{aligned} \max_{[0, t_\delta]} \Delta r(t, \varphi) = r(t_\delta, \bar{\varphi}) - r(t_\delta, \pi/2) = \\ = r_o \left[\exp\left(-\frac{\alpha K_\alpha \omega p t_\delta}{\rho} \sin \bar{\varphi}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha K_\alpha \omega p t_\delta}{\rho}\right) \right] \cong \\ \cong r_o \frac{\alpha K_\alpha \omega p t_\delta}{\rho} (1 - \sin \bar{\varphi}) = r_o (1 - \sin \bar{\varphi}) \ln \frac{r_o}{r_o - \delta}. \end{aligned} \quad (10)$$

Соотношения (9) и (10) можно рассматривать как основные технологические оценки при шлифовке шарового слоя.

Заметим, что приведенные аналитические построения, связанные с



исследование процесса ОЗО поверхностей тел вращения (включая и рассмотренный ранее иллюстративный пример), основывались на предположении о том, что исходная поверхность S_0 задана, т.е. имеет строгое математическое описание и проблема заключалась в нахождении модифицированной поверхности S_t , $t > 0$. Большой теоретический и практический интерес представляет также и обратная задача: по

заданной модифицированной поверхности S_t описать геометрическую форму исходной поверхности S_0 . Покажем, в каких терминах решается эта задача.

Определение 3. Система величин $P(M_{surf}) \stackrel{\text{det}}{=} (\alpha, K_\alpha, \omega, p, \rho; r_0(\varphi))$ называется *параметрическим рядом* поверхности M_{surf} .

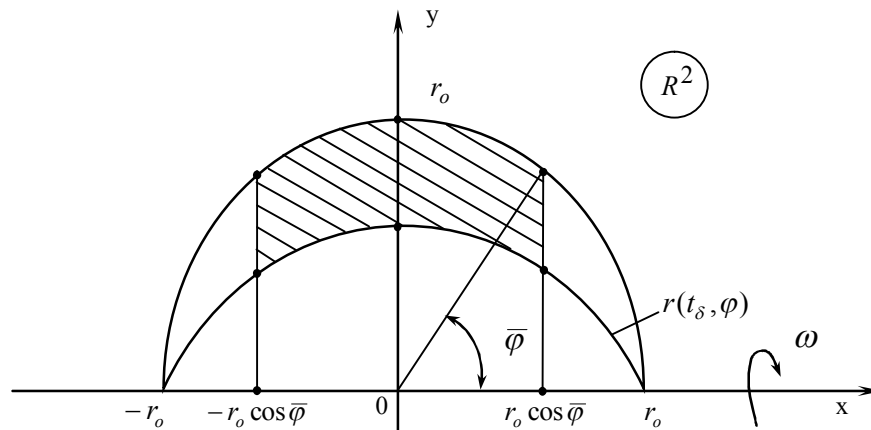


Рис.3. Модификация шарового слоя за время шлифовки $t = t_\delta$ (область съема материала заштрихована)

При фиксированном параметрическом ряде $P(M_{surf})$ M - поверхности образуют континуальное семейство $\{M_{surf}, t > 0\}$, определяемое временным параметром $t > 0$.

Определение 4. Поверхность $S_{tec} = \{(r, \varphi) : r = r_{tec}(\varphi), 0 \leq \varphi \leq \pi\}$ тела вращения Σ_{tec} , рассматриваемого в качестве эталона в процессе ОЗО, называется *технологической поверхностью*.

Покажем, что для произвольной фиксированной технологической поверхности

$$S_{tec} = M_{surf}^{tec}(\tau_{tec}, \varphi; r_{0tec}(\varphi); \alpha, K_\alpha, \omega_{tec}, p_{tec}, \rho). \tag{11}$$

Определение 5. Промежуток $[0, \tau_{tec}]$, в течении которого достигается технологическая поверхность S_{tec} , называется *технологическим промежуток времени*, а величина τ_{tec} - *технологическим временным параметром*.

Предполагая существование M - поверхности (11) получим, на основании (6), равенство

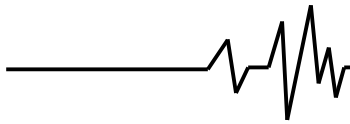
S_{tec} существует хотя бы одна M - поверхность M_{surf}^{tec} с параметрическим рядом

$P(M_{surf}^{tec}) = (\alpha, K_\alpha, \omega_{tec}, p_{tec}, \rho; r_{0tec}(\varphi))$ и являющая элементом семейства $\{M_{surf}^{tec}, t > 0\}$, соответствующим некоторому значению $t = \tau_{tec}$, т.е.

$$r_{tec}(\varphi) = r_{0tec}(\varphi) \exp\left(-\frac{\delta K_\delta u_{tec} p_{tec} \phi_{tec}}{c} \sin\varphi\right). \tag{12}$$

Из (12) следует, что начальная поверхность S_{0tec} для технологической поверхности S_{tec} (11) определяется уравнением

$$r_{0tec}(\varphi) = r_{tec}(\varphi) \exp\left(\frac{\delta K_\delta u_{tec} p_{tec} \phi_{tec}}{c} \sin\varphi\right). \tag{13}$$



Подставляя (13) в (6), найдем закон формирования технологической поверхности S_{tec} за время τ_{tec} :

$$r(t, \varphi) = r_{tec}(\varphi) \exp\left(-\frac{\delta K_{\delta} u_{tec} p_{tec}}{c} (t - \varphi_{tec}) \sin \varphi\right), \quad (14)$$

$$0 \leq t \leq \tau_{tec}, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi.$$

Уравнение (14) решает вопрос о существовании M - поверхности вида (11). Анализируя структуру соотношения (13) легко заметить, что если для S_{tec} существует хотя бы одна M - поверхность (11), то для нее существует бесконечное (континуальное) множество M - поверхностей

$$M_{surf}(t, \varphi; r_0(\varphi); \alpha, K_{\alpha}, \omega, p, \rho),$$

таких, что $\omega p t = \omega_{tec} p_{tec} \tau_{tec}$. Отсюда находим

$$t = \frac{h}{\omega p}, \quad h = u_{tec} p_{tec} \varphi_{tec} = const. \quad (15)$$

Определение 6. Произвольная монотонно возрастающая последовательность времен $\{t_n\}_{n=1}^{\infty}$, $t_1 < t_2 < \dots < t_n \dots$ называется

последовательностью, индуцированной параметром τ_{tec} и обозначается $\{t_n, n = \overline{1, \infty}; \varphi_{tec}\}$, если среди ее элементов найдется такой t_n , что $t_n = \tau_{tec}$.

Исследуем линии уровня функции (15), соответствующие $\{t_n, n = \overline{1, \infty}; \varphi_{tec}\}$. Полагая в (15) $t = t_n, n = \overline{1, 2, \dots}$ получим

$$p = \frac{h}{t_n} \cdot \frac{1}{\omega}. \quad (16)$$

Взаимное расположение линий уровня (16) показано на рис.4.

Из (4) видно, что фиксирование времени операции ОЗО $t = t_n, n = \overline{1, 2, \dots}$ приводит к обратно пропорциональной зависимости внутреннего давления P в среде свободного абразива от частоты ω вращения шпинделя. Таким образом, на основании (16), можно решить проблему оптимизации ОЗО.

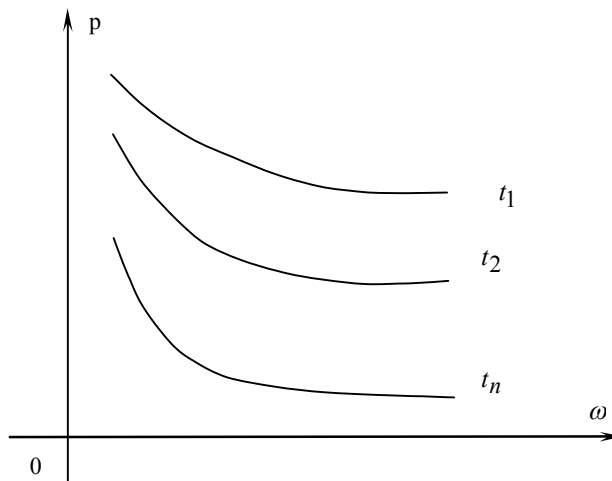


Рис.4. Линии уровня $p = \frac{h}{t_n} \cdot \frac{1}{\omega}$, $n = \overline{1, 2, \dots}$ функции (15)

Пусть в формуле (13) $r_{tec}(\varphi) = r_{tec} = const$, т.е. технологическая поверхность S_{tec} представляет собой сферу радиуса r_{tec} . Тогда начальная поверхность S_{0tec} имеет вид

$$r_{0tec}(\varphi) = r_{tec}(\varphi) \exp\left(\frac{\delta K_{\delta} u_{tec} p t_n}{c} \sin \varphi\right), \quad (17)$$

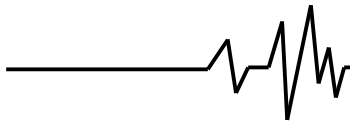
$$u_{tec} p t_n = h.$$

Из соотношения (17) легко видеть, что у технологической поверхности - сферы S_{tec}

существует при фиксированном h единственная начальная поверхность S_{0tec} , которая при ОЗО непрерывно переходит в S_{tec} (рис.5).

Съем материала при ОЗО (рис. 5, заштрихованная область) происходит за время $t = t_n, n = \overline{1, 2, \dots}$ (рис.4).

В заключение исследуем процесс ОЗО в специальном случае, когда шлифовке подвергается поверхность однородного тела Σ_o с плотностью массы ρ , представляющей



собой цилиндр радиуса r_0 , вращающийся вокруг своей оси с частотой ω . Заметим, что высоту цилиндра Σ_o можно принять равной единице, так как торцы цилиндра блокируются зажимным устройством и не обрабатываются, а среда свободного абразива, по предположению, является изотропной и имеет постоянное внутреннее давление P . С учетом этого замечания можно утверждать, что задача носит плоский характер с радиальной симметрией (рис.6).

Найдем явное выражение для переменного радиуса цилиндра – функции $r = r(t)$, $t \geq 0$, которая описывает весь процесс ОЗО поверхности исходного цилиндра Σ_o (рис.6). Масса материала Δm , которая снимается за промежуток времени $[t, t + \Delta t]$ равна

$$\Delta m = \pi \rho [r^2(t) - r^2(t + \Delta t)]. \quad (18)$$

При этом работа ΔA сил трения вычисляется по формуле

$$\Delta A = \rho b \omega \mu p r^2(t + \Delta t) \Delta t. \quad (19)$$

С учетом (18), (19) и первого из равенств $\rho c [r^2(t) - r^2(t + \Delta t)] = 2 \rho b K_{\delta \omega \mu p} r^2(t + \Delta t) \Delta t$. (20)

После очевидных упрощений и деления обеих частей равенства (20) на $\Delta t \neq 0$, будем иметь

$$[r(t) + r(t + \Delta t)] \cdot \frac{r(t) - r(t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{2 \rho b K_{\delta \omega \mu p}}{c} r^2(t + \Delta t). \quad (21)$$

Выполняя в (21) предельный переход при $\Delta t \rightarrow 0$ и предполагая, что $r(t) \in C^1(t \geq 0)$, получим

$$\frac{dr(t)}{dt} = -\frac{\rho b K_{\delta \omega \mu p}}{c} r(t), \quad (22)$$

$$r(0) = r_0.$$

Решение задачи Коши (22) имеет вид

$$r(t) = r_0 \exp\left(-\frac{\rho b K_{\delta \omega \mu p}}{c} t\right), \quad t \geq 0. \quad (23)$$

Формула (23) представляет собой M - поверхность M_{surf} в момент времени $t > 0$, в которую непрерывно переходит поверхность исходного цилиндра Σ_o .

Пусть глубина обработки (технологический параметр) при ОЗО поверхности цилиндра Σ_o равна δ , т.е. $\delta = r_0 - r(t)$. Тогда время t_δ процесса ОЗО дается равенством

$$t_\delta = \frac{c}{K_{\delta \omega \mu p}} \ln \frac{r_0}{r_0 - \delta}. \quad (24)$$

При фиксированных параметрах t_δ , ρ , $K_{\delta \omega \mu p}$ давление P в среде свободного абразива и частота ω вращения шпинделя могут быть заданы в соответствии с уравнением

$$p = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{c}{K_{\delta \omega \mu p} t_\delta} \ln \frac{r_0}{r_0 - \delta}. \quad (25)$$

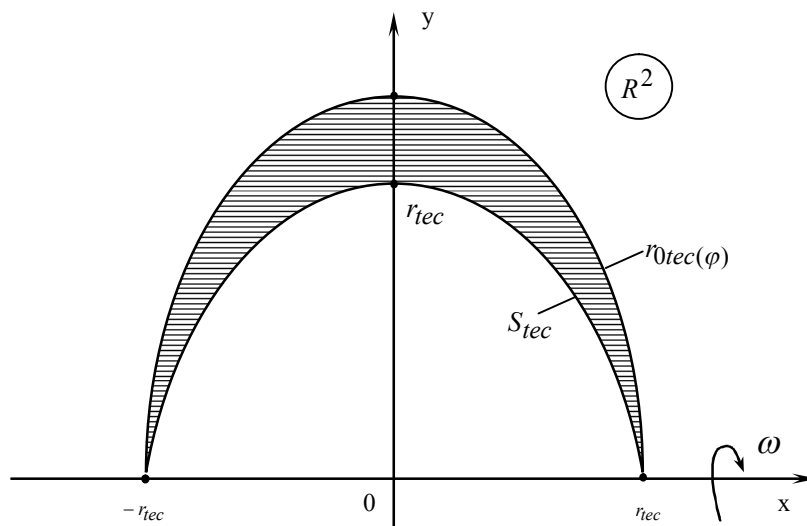


Рис.5. Взаимное расположение технологической поверхности S_{tec} и начальной поверхности $r_{0tec}(\varphi)$

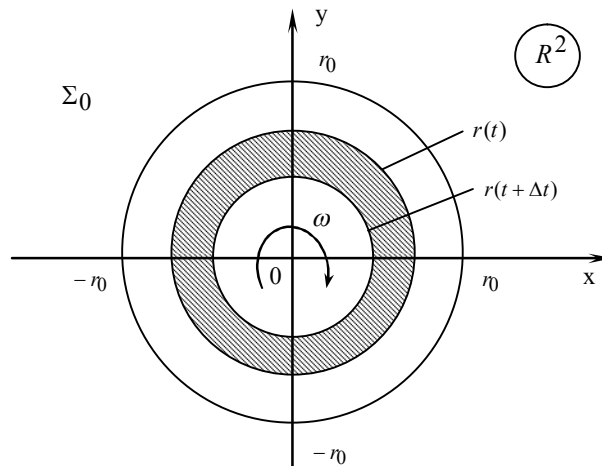
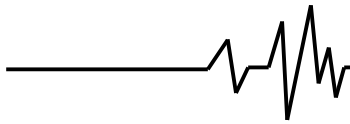


Рис.6. Модель процесса ОЗО поверхности однородного цилиндра Σ_0 (область съема материала за время Δt заштрихована)

4. Выводы. В работе получены законы (M - поверхности): (6) – в общем случае и (23) – в специальном случае, которые регулируют съем материала тела Σ_o в нестационарном процессе ОЗО. Эти законы являются полипараметрическими – они зависят от пяти параметров:

- * α - коэффициента трения;
- * K_α - коэффициент дефекта массы;
- * ω - частота вращения шпинделя;
- * P - давление в среде свободного абразива;
- * ρ - плотность массы Σ_o .

В условиях нестационарности возможно влияние тепловых эффектов на геометрию обрабатываемой поверхности. В связи с этим возникает проблема выбора времени продолжительности t_δ процесса ОЗО и оптимального сочетания всех его параметров, что может составить предмет самостоятельного исследования в рамках предложенной теории ОЗО.

Литература

1. Лубенская Л.М., Мелконов Л.Д., Нечай Е.В. К вопросу обоснования выбора метода отделочно-зачисных операций //Авиационно-космическая техника и технология. – 2009.- № 2(59). – с.21 -26.
2. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии /А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. –

Ростов на Дону: Издательский центр ДГТУ, 2008. -694 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. – т. – Пенза, 2005. – 19 с.

4. Willkommen bei OTEC [Электронный ресурс] : Schleppfinishanlagen /Serie DF 5/6 Tools. – Режим доступа к ресурсу: http://www.otec.de/typo3cms/serie_df_5_6_tools.html, сводный. – Загл. с экрана.

5. WALTHER TROWAL! [Электронный ресурс]: Produkte / Gleitschleiftechnik / Schleppscheifanlagen. - Режим доступа к ресурсу: <http://www.walthertrowal.de/produkte/gleitschleiftechnik/schleppscheifanlagen/>, сводный. – Загл. с экрана.

6. 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.

7. Георгиев В.М. Исследование шпиндельной виброотделки наружных поверхностей деталей тел вращения: дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Георгиев Виктор Михайлович; Ростовский-на-Дону институт сельскохозяйственного машиностроения. – Ростов-на-Дону, 1978. – 192 с.