

**Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Тиунчик А.А.,
Сенчуров Е.В., Дубновицкий С.К.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА НА СЛОЖНОПРОФИЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Качество поверхности и детали в целом формируется в процессе выполнения практически всех технологических операций. Однако окончательные показатели качества поверхностей формируются на чистовых и отделочных операциях, среди которых превалирует шлифование. Операции абразивной обработки являются финишными в технологических процессах механической обработки, поэтому низкое качество и брак особенно недопустимы, так как они влекут за собой большие потери, обусловленные стоимостью выполнения всех предыдущих операций.

Финишная обработка закрепленным абразивом тонкостенных деталей по сравнению с монолитными в связи с интенсивным тепловыделением вызывает изменение исходного состояния поверхностного слоя и коробление формы изделия [1].

Решением данной проблемы может быть использование подвижно скоординированного инструмента, формируемого энергией магнитного поля, образующего ферроабразивную «щетку», и при наличии ориентированности резания на деталях сложного профиля. Способность изменять элементы топологии этой «щетки» путем выравнивания величины силы тока I обеспечивает простоту кинематической цепи станочного оборудования. Магнитно-абразивная обработка (МАО) [2-4], при реализации которой используется данная ферроабразивная «щетка», обеспечивает при постоянстве материального образа полюсных наконечников требуемые форму и ориентацию режущего контура «щетки» относительно обрабатываемой детали независимо от ее отклонений по размеру, радиальному и торцевому биению и т. д.

По оценкам экспертов, около 10% деталей машиностроения имеют поверхности сложной формы, и их доля постоянно увеличивается по мере совершенствования автоматизированных систем конструирования и изготовления класса CAD/CAM [5].

Изменение параметров образуемых производящих линий поверхности «щетки» относительно исполнительного движения при обработке сложного профиля изделия позволяет максимально трансформировать ее характеристический образ, что приводит к достигаемой точности данного изделия. Поэтому, например, отпадает способ строчечной обработки пространственно развитых сложных поверхностей деталей машин и связанного с ним определения углов наклона осей инструмента и детали, которые требуют сообщения им дополнительных перемещений или образования его производящих элементов для коррекции траектории этого движения. Создание рациональной формы ферроабразивной «щетки» и получение ее характеристического образа в виде функциональной или регрессионной зависимости определяет конгруэнтность обработанной и номинальной поверхностей.

Поэтому одной из задач, стоящих перед процессом МАО тонкостенных деталей, является управление величиной взаимодействия

«щетки» и управление интенсивностью этого взаимодействия при обработке сложнопровильных поверхностей.

Данную задачу можно рассмотреть на примере МАО рукояток микрофонов, которые используются как электроакустические приборы для преобразования звуковых колебаний в динамическом режиме и передачи их в виде электрического «отображения» звуковой волны. Корпус микрофона и в частности его рукоятка должны иметь определенную форму, учитывая эргономические показатели и степень коррозионной стойкости, при наличии различных акустико-механических элементов типа пазов, отверстий, лабиринтных щелей для согласования в заданном диапазоне частот и угла падения звуковой волны с величиной колебательной скорости подвижных сегментов электромеханического преобразователя микрофона. Поскольку изготовление подобных акустико-механических элементов связано с обработкой материалов давлением (ОМД), типа пробивки при помощи пуансонов, то итоговый результат характеризуется наличием различного рода заусенцев и острых кромок, которые не только способны нарушить целостность эпидермиса кожных тканей пользователя, но и по причине увеличения времени ревербации возникает многократное отражение звуковой волны перед ее попаданием на сегменты электромеханического преобразователя. Это, в конечном счете, изменяет линейчатый спектр периодических колебаний, смещает его к показателю плоскости и возникновению различного рода шумов, искажая тембровую окраску звука.

Удаление заусенцев, острых кромок и других дефектов, образуемых ОМД, за счет применения твердосвязанного абразивного инструмента затрудняется тем, что поверхность рукояток имеет сложную форму, отличную от формы инструмента.

Это приводит к тому, что не осуществляется скругление острых кромок в пазах и отверстиях ввиду отсутствия технологических возможностей твердосвязанного абразивного инструмента. Для магнитного поля именно эти кромки представляют собой концентраторы, которые огибаются ферроабразивной «щеткой», и в процессе сочетания исполнительных движений они принимают форму фасонного профиля.

Обработка методом МАО данных рукояток первоначально производилась на роторном станке для МАО СМ 1180 в кольцевом зазоре. Однако в результате проведенных опытно-промышленных испытаний установлено, что по длине поверхности детали с наличием конструктивных элементов (пазы, ступени и др.) присутствует неоднородность параметров съема материала кромок, наблюдаемая визуально. Согласно схеме обработки рукоятки микрофона в круговом рабочем зазоре (рис. 1), образуемом параллельно расположенными полюсными наконечниками N и S , в разных диаметральных сечениях рукоятки на элементарные участки поверхности детали воздействуют различные друг от друга величины давления ферроабразивной «щетки». Наружные точки каждого диаметрального сечения

Акулович Леонид Михайлович, д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии металлов УО «Белорусский государственный аграрный технический университет».

Сергеев Леонид Ефимович, к.т.н., доцент, профессор кафедры технологии металлов УО «Белорусский государственный аграрный технический университет».

Тиунчик Александр Александрович, к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой высшей математики УО «Белорусский государственный аграрный технический университет».

Сенчуров Евгений Витальевич, старший преподаватель кафедры технологии металлов УО «Белорусский государственный аграрный технический университет».

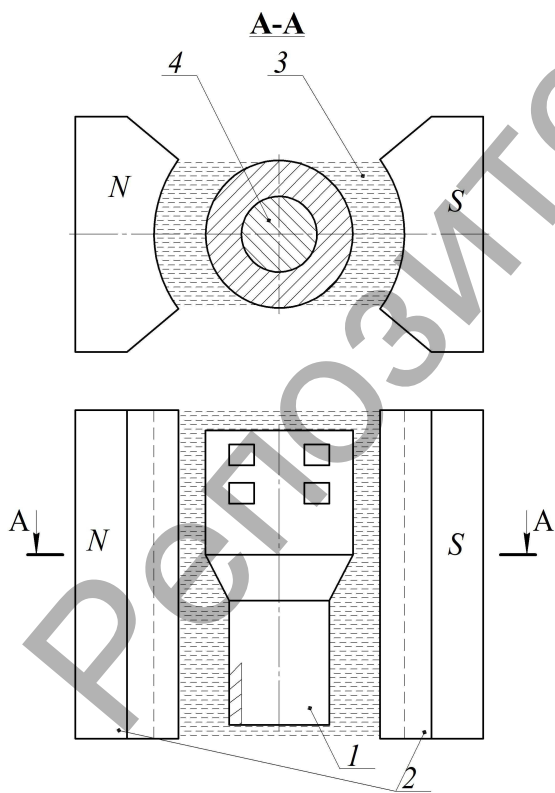
Беларусь, 220023, г. Минск, проспект Независимости, 99.

Дубновицкий Сергей Константинович, директор филиала БрГТУ Пинского индустриально-педагогического колледжа.

Беларусь, 225710, г. Пинск, ул. Иркутско-Пинской дивизии, 27.

находятся на различном расстоянии от оси вращения, и вследствие этого цепочки ферромагнитных частиц данной «щетки» имеют большую длину в области пазов детали, резко изменяя градиент магнитной индукции B по длине рукоятки L . Концентрация магнитных силовых линий в различных частях рабочей зоны также вызывается образованием воздушного зазора во внутренней области детали из-за невозможности попадания конгломерата ферромагнитный порошок (ФАП) в эту область. Установление геометрии границ сред при нелинейности магнитных свойств материалов и наличии движения решается выполнением математического моделирования для определения картины распределения давления «щетки» на обрабатываемую поверхность. Основное допущение заключается в отсутствии учета смещения токов, а поскольку значение магнитной индукции B прямо пропорционально величине давления p , то принципиально математическое моделирование заключается в расчете величины давления ФАП на обрабатываемую деталь в рабочем зазоре, который представляет собой пространство, где сосредоточена энергия магнитного поля.

Деталь помещается в рабочую зону, пространство которой между полюсными наконечниками и ее поверхностью заполняется ФАП с динамической вязкостью η , и на рукоятку воздействует сила давления ферромагнитного инструмента F , приходящаяся на единицу ее площади (рис. 2). Линия центров OO_1 рукоятки и рабочей зоны составляет с вектором силы F угол φ , величина которого меняется с величиной F . Расстояние OO_1 между центрами – эксцентриситет e , при этом с другой стороны $e_{\max} = (R - r)$. С уменьшением серповидности рабочего зазора возникает разница давления, достаточного для выравнивания показателей F . Обозначим через $c = R - r$ средний зазор между рукояткой и полюсным наконечником при учете ввода угловой координаты θ некоторой точки внутри рабочего зазора.



1 – рукоятка микрофона; 2 – полюсные наконечники; 3 – рабочая технологическая среда; 4 – ферромагнитная оправка

Рисунок 1 – Схема MAO рукояток микрофонов в рабочем зазоре СФТ 2.150.00.00000

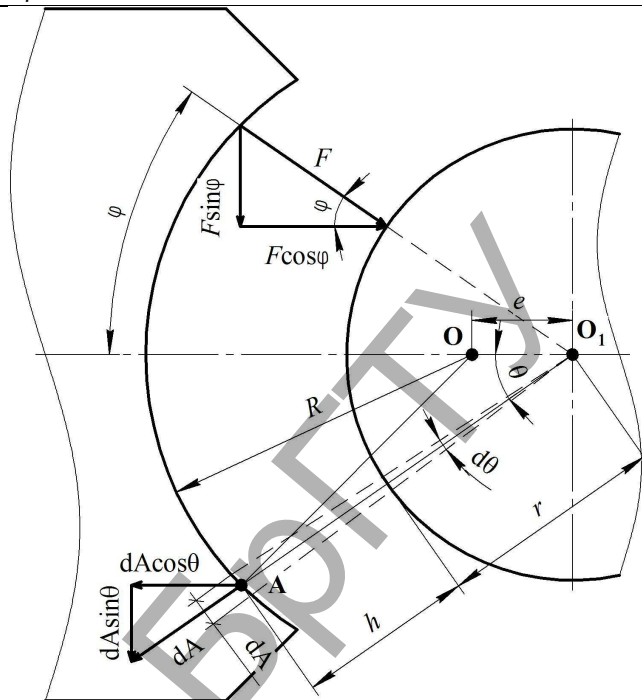


Рисунок 2 – Схема расчета геометрических и динамических параметров рабочей зоны при MAO рукояток микрофонов

Если при использовании концентрического профиля полюсного наконечника по всей площади поверхности контакта давление ФАП на обрабатываемую поверхность F с определенным допущением считать постоянным, то применение расходящегося или серповидного профилей полюсного наконечника связано с резким изменением этого давления [6]. Вследствие этого, вопрос исследования давления, создаваемого ФАП на обрабатываемую поверхность при формах полюсных наконечников, отличных от концентрической, является крайне актуальным и требует создания научной базы для выявления зависимости оказываемого на обрабатываемую поверхность давления ФАП от формы полюсного наконечника, которая позволяет прогнозировать достигаемую шероховатость обработанной поверхности. Основными геометрическими показателями полюсных наконечников, влияющих на давление, создаваемое ФАП, являются форма создаваемого рабочего зазора и эксцентриситет.

Решение поставленной задачи состоит в определении коэффициента изменения давления ФАП на обрабатываемую поверхность в любой точке контакта ферромагнитного инструмента с деталью через угол θ и эксцентриситет e .

Тогда для треугольника OAO_1

$$O_1A = r + h = O_1B + BA = e \cos \theta + \sqrt{(r+c)^2 - e^2 \sin^2 \theta} = e \cos \theta + (r+c) \sqrt{1 - \left(\frac{e}{r+c}\right)^2 \sin^2 \theta}. \quad (1)$$

Поскольку $R = r + c \gg e$, то $\left(\frac{e}{r+c}\right)^2$ пренебрежимо мало и может быть исключено из дальнейшего рассмотрения. В результате из равенства $r + h = e \cos \theta + (r + c)$ имеем:

$$\frac{h}{c} = 1 + \left(\frac{e}{c}\right) \cos \theta. \quad (2)$$

Отношение e/c или ϵ является относительным эксцентриситетом. Используя положение о том, что для расходящегося профиля полюсного наконечника $0 < \epsilon$; для концентрического – $\epsilon = 0$; для серповидного – $0 < \epsilon < 1$. Считаем, что длина рукоятки L велика по сравнению с радиусом R , поэтому не учитываем краевые эффекты.

Считая, что $x = r\theta$ в уравнении Рейнольдса $\frac{dp}{dx} = 6\eta V \frac{h-h_0}{h^3}$ [7], получаем

$$\frac{dp}{d\theta} = 6\eta Vr \frac{h-h_0}{h^3}, \quad (3)$$

где V – скорость вращения рукоятки, м/с; h_0 – значение величины рабочего зазора, при котором давление $p = \max$.

Подставляя $h = c(1 + \varepsilon \cos \theta)$ из уравнения (2) в (3) и интегрируя, получаем

$$p = \frac{6\eta Vr}{c^2} \left[\int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} - \frac{h_0}{c} \int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} \right]. \quad (4)$$

Поскольку ферроабразивная «щетка» может выдерживать только определенные отрицательные давления, то следует принимать граничные условия, заключающиеся в установлении области

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

$$p = 0 \text{ при } \theta = 0 \text{ и } \theta = \theta_2,$$

$$\frac{dp}{d\theta} = 0 \text{ при } \theta = \theta_1 \text{ и } \theta = \theta_2.$$

Используя метод замены переменных, определяются интегралы в выражении (4), что позволяет найти рост давления p [7],

$$p = \frac{6\eta Vr}{c^2} \left[\frac{\varepsilon(2 + \varepsilon \cos \theta) \sin \theta}{(2 + \varepsilon^2)(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} \right]. \quad (5)$$

Для этого необходимо установить, какая сила действует на конкретный локальный участок обрабатываемой поверхности, и чтобы найти это значение, рассмотрим элементарную площадь dA , расположенную на $dA \cos \theta$ и $dA \sin \theta$. Силу F , приходящуюся на единицу площади dA , раскладываем на $F \sin \varphi$ и $F \cos \varphi$, и поскольку $F \sin \varphi$ представляет тангенциальную составляющую, производящую удержание частиц ФАП в рабочем зазоре, то рассмотрению она не подлежит. Основным интерес представляет нормальная составляющая $F \cos \varphi$, ввиду того, что ее воздействие на обрабатываемую поверхность определяет эффективность сема материала.

Чтобы найти угол положения φ , выпишем соотношение

$$F \cos \varphi = Lr \int_0^{\frac{\pi}{2}} p \cos \theta d\theta = Lr \left(p \sin \theta \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dp}{d\theta} \sin \theta d\theta \right) =$$

$$= Lr \left(p - 6\eta Vr \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{h-h_0}{h^2} \sin \theta d\theta \right) = Lr p - 6\eta VLr^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{h-h_0}{h^2} \sin \theta d\theta.$$

Согласно выражению (4)

$$F \cos \varphi = \frac{6\eta VLr^2}{c^2} \left(\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} - \frac{h_0}{c} \int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} \right). \quad (6)$$

Интеграл вида $\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3}$ может быть сведен к интегралам вида $\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2}$ и $\int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2}$:

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} = \frac{1}{2(1 - \varepsilon^2)} \times$$

$$\times \left(\frac{\sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} + \int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} - 2\varepsilon \int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} \right) + C, \quad (7)$$

которые, в свою очередь, сводятся к выражениям, содержащим интеграл вида $\int \frac{d\theta}{1 + \varepsilon \cos \theta}$:

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} = \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(\frac{\sin \theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \varepsilon \int \frac{d\theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} \right) + C, \quad (8)$$

$$\int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} = \frac{1}{\varepsilon^2 - 1} \left(\frac{\varepsilon \sin \theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \int \frac{d\theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} \right) + C. \quad (9)$$

Окончательный вид интегралов зависит от величины ε . Рассмотрим три случая, указанных выше: $\varepsilon < 1$, $\varepsilon > 1$ и $\varepsilon = 1$ [8].

Если $\varepsilon < 1$, то

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} = \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(\frac{\sin \theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \varepsilon \left(\frac{2}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{(1 - \varepsilon) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) \right) + C,$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} = \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(1 - \frac{2\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{(1 - \varepsilon)}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right),$$

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} =$$

$$= \frac{1}{2(1 - \varepsilon^2)} \left(\frac{\sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} + \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(\frac{\sin \theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \frac{2\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{(1 - \varepsilon) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{2\varepsilon}{1 - \varepsilon^2} \left(\frac{\varepsilon \sin \theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \frac{2}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{(1 - \varepsilon) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) \right) + C,$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} =$$

$$= \frac{1}{2(1 - \varepsilon^2)} \left(\frac{1}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} + \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(\frac{1}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \frac{2\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{1 - \varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{2\varepsilon}{1 - \varepsilon^2} \left(\varepsilon - \frac{2}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{1 - \varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) \right).$$

Если $\varepsilon > 1$, то

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} = \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(\frac{\sin \theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \varepsilon \left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2 - 1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon - 1) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + \sqrt{\varepsilon^2 - 1}}{(\varepsilon - 1) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \sqrt{\varepsilon^2 - 1}} \right| \right) \right),$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} = \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2 - 1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon - 1) + \sqrt{\varepsilon^2 - 1}}{(\varepsilon - 1) - \sqrt{\varepsilon^2 - 1}} \right| \right).$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} =$$

$$= \frac{1}{2(1 - \varepsilon^2)} \left(\frac{\sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} + \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(\frac{\sin \theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2 - 1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon - 1) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + \sqrt{\varepsilon^2 - 1}}{(\varepsilon - 1) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \sqrt{\varepsilon^2 - 1}} \right| \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{2\varepsilon}{1 - \varepsilon^2} \left(\frac{\varepsilon \sin \theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2 - 1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon - 1) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + \sqrt{\varepsilon^2 - 1}}{(\varepsilon - 1) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \sqrt{\varepsilon^2 - 1}} \right| \right) \right) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} =$$

$$= \frac{1}{2(1-\varepsilon^2)} \left(1 + \frac{1}{1-\varepsilon^2} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon-1) + \sqrt{\varepsilon^2-1}}{(\varepsilon-1) - \sqrt{\varepsilon^2-1}} \right| \right) \right) +$$

$$+ \frac{2\varepsilon}{1-\varepsilon^2} \left(\varepsilon - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon-1) + \sqrt{\varepsilon^2-1}}{(\varepsilon-1) - \sqrt{\varepsilon^2-1}} \right| \right).$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\varepsilon \cos \theta)^3} =$$

$$= \frac{1}{2(1-\varepsilon^2)} \left(1 + \frac{1}{1-\varepsilon^2} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon-1) + \sqrt{\varepsilon^2-1}}{(\varepsilon-1) - \sqrt{\varepsilon^2-1}} \right| \right) \right) +$$

$$+ \frac{2\varepsilon}{1-\varepsilon^2} \left(\varepsilon - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \ln \left| \frac{(\varepsilon-1) + \sqrt{\varepsilon^2-1}}{(\varepsilon-1) - \sqrt{\varepsilon^2-1}} \right| \right).$$

Если $\varepsilon = 1$, то

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\cos \theta)^2} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{6} \operatorname{tg}^3 \frac{\theta}{2} + C,$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\cos \theta)^2} = \frac{1}{3}.$$

$$\int \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\cos \theta)^3} = \frac{1}{4} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{20} \operatorname{tg}^5 \frac{\theta}{2} + C,$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1+\cos \theta)^3} = \frac{1}{5}.$$

Доказательство истинности перечисленных интегралов может быть проведено путем непосредственного дифференцирования.

Таким образом, $F_{\cos \varphi}$ непосредственно определяет силу, с которой ферроабразивная «щетка» воздействует на каждый локальный участок обрабатываемой поверхности и ее расчет через геометрические параметры профиля полюсного наконечника и материализация его образа позволяет обеспечить качество обработки раз-

личных деталей сложного профиля.

Наличие изменения материального образа профиля полюсных наконечников позволяет произвести целенаправленную обработку отличающихся по форме ступеней рукояток микрофонов в зависимости от уровня взаимодействия данных рукояток и ферроабразивной «щетке» при учете ее топологического декремента, связанного с факторами ослабления и увеличения давления на локальные участки обрабатываемой поверхности.

В результате произведенных теоретических исследований получены аналитические зависимости измерения величины давления ферроабразивной «щетке» как режущего инструмента от геометрического профилирования полюсных наконечников с целью прогнозирования и высокоэффективной обработки методом MAO сложнопрофильных тонкостенных деталей.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зубаирова, Л.Х. Технологическое обеспечение точности формы тонкостенных деталей при плоском торцовом планетарном шлифовании: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Л.Х. Зубаирова. – Пермь, 2014. – 167 с.
2. Ящерицын, П.И. Технологические основы обработки изделия в магнитном поле / П.И. Ящерицын [и др.]. – Минск : Физико-технический институт, 1997. – 416 с.
3. Акулович, Л.М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки поверхностей различного профиля / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2013. – 372 с.
4. Хомич, Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий / Н.С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 200с.
5. Шаталов, Д.Д. Обеспечение постоянства шероховатости фасонных поверхностей деталей при точении : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / Д.Д. Шаталов. – Тула, 2010. – 131 с.
6. Ящерицын, П.И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын [и др.]; АН БССР, Физ.-техн. ин-т. – Минск : Наука и техника, 1988. – 270 с.
7. Мур, Д. Основы применения трибоники / Д. Мур; пер. с англ. к. ф.-м. н. С.А. Харламова; под ред. д.т.н., проф. И.В. Крагельского и к. т. н. Г.И. Трояновской. – Москва : Мир, 1978. – 483 с.
8. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления : в 3 т. / Г.М. Фихтенгольц. – Москва : Физматлит, 2003. – Т. 2. – 864 с.

Материал поступил в редакцию 01.11.2017

AKULOVICH L.M., SERGEEV L.E., TIUNCHUK A.A., SENCHUROV E.V. DUBNOVITSKIY S.K. Modeling of the tool's impact on a difficult-to-profile surface in the case of magnetically abrasive processing of thin-walled parts

The article considers the problem of finishing abrasive machining of thin-walled geometrically-complex parts, which is caused by the uneven pressure of the tool during the cutting process on the processed surface and high temperature in the cutting zone, leading to undesirable structural transformations. The performed theoretical research, we developed a scheme for calculating the geometric and dynamic parameters of the working zone for magnetic-abrasive machining and analytical dependences of the measurement of the pressure ferro tool from the geometrical profiling of the pole pieces.

УДК 677.054.842

Калугин Ю.К., Бакулин Б.А.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТКАЦКИХ СТАНКОВ

Введение. Среди многочисленных методов повышения износостойкости деталей, работающих в диапазонах высоких скоростей и пыли, без изменения размеров можно отметить, кроме широко применяемой объемной закалки, магнитно-импульсное поверхностное упрочнение и упрочнение лазерным лучом. Одним из общих факто-

ров для этих видов обработки являются структурные изменения в поверхностном слое, вызванные воздействием полей, нагревом и остыванием материала. Каждый из методов обработки обладает определенными достоинствами и недостатками.

Процесс лазерной обработки является многофакторным. К ос-

Калугин Юрий Константинович, к.т.н., доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купаль».

Беларусь, 230023, г. Гродно, ул. Э. Ожешки, 22.

Бакулин Борис Александрович, главный конструктор ООО «ДИПРИЗ».

Беларусь, Брестская область, Барановичи, 225320, д. Узноги.