

УДК 621.923

В.А. Носенко, профессор, д-р техн. наук,**С.В. Носенко***Волжский политехнический институт**ул. Энгельса, 42а, г. Волжский, Волгоградская обл., Россия 404121**nosenko@volpi.ru***МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПОВ ПЛОСКОГО ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ
КРУГОМ ПРЯМОГО ПРОФИЛЯ**

Получены математические модели показателей надежности: наработки, режущей и мгновенной режущей способности для операции плоского глубинного шлифования горизонтальных поверхностей кругом прямого профиля на всех этапах процесса (врезание, добор глубины, постоянная длина дуги контакта и выход). Установлена корреляционная связь мгновенной режущей способности с силой шлифования.

Ключевые слова: *глубинное шлифование, дуга контакта, наработка, режущая способность, сила шлифования.*

Глубинное шлифование является одним из наукоемких и наиболее перспективных направлений повышения эффективности механической обработки материалов, сочетающее высокое качество поверхности детали с высокой производительностью и возможностью автоматизации управления [1, 2].

Большая глубина шлифования предполагает наличие и большой дуги контакта инструмента с заготовкой L . Например, для круга диаметром 500 мм в диапазоне глубин от 3 до 50 мм L изменяется от 38 до 163 мм. Для маятникового шлифования L составляет около 2 – 5 мм. Большая дуга контакта определяет достаточно протяженные этапы врезания и выхода, при шлифовании на которых L изменяется от нуля до максимального значения, что существенно отражается на эксплуатационных критериях процесса.

По ГОСТ 4.349–85 одними из основных показателей надежности при шлифовании являются наработка и режущая способность. Нарботка V характеризуется объемом выполненной работы и выражается объемом или массой снятого материала. Режущая способность Q определяет среднюю производительность процесса и равна отношению наработки V к времени шлифования τ :

$$Q = \frac{V}{\tau}. \quad (1)$$

Остальные эксплуатационные показатели, например, сила шлифования, износ инструмента, качество обработанной поверхности и др. во многом зависят от наработки и режущей способности, т.е. от объема удаляемого материала [3].

При глубинном шлифовании достаточно большого ассортимента деталей этапы врезания и выхода соизмеримы с длиной обрабатываемой поверхности или равны ей, например, глубинное зубошлифование, шлифование замков турбинных лопаток и пр. Поэтому особенности формообразования на данных этапах необходимо учитывать при назначении оптимальных режимов глубинного шлифования. Тем не менее, вопросы формообразования на различных этапах процесса при глубинном шлифовании исследованы недостаточно, в частности, требуют совершенствования математические модели основных показателей надежности – наработки и режущей способности, что и является целью данных исследований применительно к глубинному шлифованию плоских поверхностей кругом прямого профиля.

Если обрабатываемая поверхность строго горизонтальна и её длина $l \geq b = \sqrt{t(2R-t)}$, где R – радиус наружной поверхности круга, t – глубина шлифования, то процесс включает три последовательных этапа: врезание, постоянная длина дуги контакта и выход. Когда $l = \sqrt{t(2R-t)}$ этап постоянной длины дуги контакта реализуется только в конце этапа врезания, после которого сразу начинается этап выхода. Если $l < \sqrt{t(2R-t)}$ – длина дуги контакта не достигает своего максимального значения и этап врезания заканчивается на длине пути шлифования $l_s = l < \sqrt{t(2R-t)}$. В данном случае целесообразно ввести промежуточный этап в интервале $l_s \leq b$, который назовем этапом добора глубины. После $l_s = b$ начинается собственно этап выхода.

Учитывая, что режущая способность Q на этапах врезания, выхода и добора глубины не постоянна, введем понятие мгновенной режущей способности – производной от наработки по времени:

$$q = \frac{V}{\tau}. \quad (2)$$

Поскольку направление подачи заготовки не оказывает влияния на полученные математические модели, в качестве примера рассмотрим попутное глубинное шлифование. Будем считать, что рабочая поверхность шлифовального круга представляет собой цилиндр радиуса R , торцовые поверхности которого перпендикулярны оси цилиндра, а заготовка имеет форму прямоугольного параллелепипеда с размерами обрабатываемой поверхности $l \times h$ ($h \leq H$), где l и h – соответственно длина и ширина заготовки, H – высота круга.

При выводе формулы наработки примем следующие начальные условия: поверхности заготовки и шлифовального круга считаем идеально гладкими; скорость подачи стола v_s и скорость шлифования постоянны; размеры круга за время шлифования не изменяются; время шлифования τ будем отсчитывать от начала каждого из этапов.

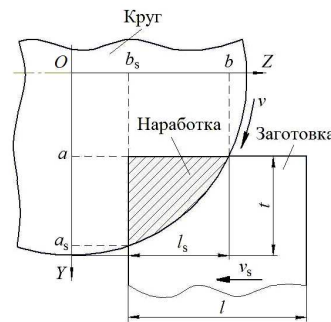


Рисунок 1 – Схема попутного шлифования на этапе врезания

Расположим систему координат в центре шлифовального круга, направив ось X по оси инструмента. Обрабатываемую поверхность заготовки ориентируем строго горизонтально, боковые и торцовые поверхности параллельно, соответственно, плоскостям YOZ и XOY (рисунок 1).

Объемную номинальную наработку (далее – наработка) будем определять как объем, отсекаемый в теле круга тремя плоскостями: горизонтальной плоскостью или обрабатываемой поверхностью; вертикальной плоскостью, в которой лежит торец заготовки; двумя вертикальными плоскостями, в которой находятся боковые стороны заготовки.

В плоскости YOZ тело наработки представляет собой фигуру, ограниченную окружностью $y = \sqrt{R^2 - z^2}$, прямыми $y = a$, $z = b - l_s$, где $l_s = v_s \tau$, $a = R - t$. За время τ наработка представляет собой некоторую область, координаты точек которой удовлетворяют системе ограничений:

$$a \leq y \leq \sqrt{R^2 - z^2}; b - l_s \leq z \leq b; 0 \leq x \leq h.$$

Наработку на этапе врезания в зависимости от времени шлифования, учитывая геометрический смысл тройного интеграла, найдём по формуле:

$$V_p = \int_0^h dx \int_{b-l_s}^b dz \int_a^{\sqrt{R^2-z^2}} dy = bV_{bp},$$

где V_{bp} – наработка, приведенная к единице ширины обрабатываемой поверхности (далее – приведенная наработка).

В результате решения внутренних интегралов получено следующее выражение для расчета приведенной наработки:

$$V_{bp} = \frac{1}{2} \left(b \sqrt{R^2 - b^2} + R^2 \arcsin \frac{b}{R} \right) - \frac{1}{2} \left((b - v_s \tau) \sqrt{R^2 - (b - v_s \tau)^2} + R^2 \arcsin \frac{b - v_s \tau}{R} \right) - av_s \tau. \quad (3)$$

Приведенная режущая способность Q_{bp} на этапе врезания получена из (1) с учетом (3):

$$Q_{bp} = \frac{1}{2\tau} \left(b \sqrt{R^2 - b^2} + R^2 \arcsin \frac{b}{R} \right) - \frac{1}{2\tau} \left((b - v_s \tau) \sqrt{R^2 - (b - v_s \tau)^2} + R^2 \arcsin \frac{b - v_s \tau}{R} \right) - av_s. \quad (4)$$

Мгновенную приведенную режущую способность найдем дифференцированием (3) по времени:

$$q_{bp} = v_s \left(\sqrt{R^2 - (b - v_s \tau)^2} - a \right). \quad (5)$$

Максимальной величины приведенные значения наработки V_{bpm} , режущей Q_{bpm} и мгновенной режущей способностей q_{bpm} на этапе врезания достигают при $\tau = \tau_{max} = b/v_s$. После подстановки τ_{max} в (3), (4) и (5) получим, соответственно:

$$V_{bpm} = \frac{R^2}{2} \arcsin \frac{b}{R} - \frac{ab}{2}, \quad Q_{bpm} = \frac{v_s}{2} \left(\frac{R^2}{b} \arcsin \frac{b}{R} - R + t \right), \quad q_{bpm} = v_s t. \quad (6)$$

Приведенная наработка на этапе постоянной длины дуги контакта равна произведению глубины и длины шлифования:

$$V_{bn} = tv_s = tv_s \tau. \quad (7)$$

Приведенные режущая и мгновенная режущие способности на данном этапе определяются по (1) и (2) с учетом (7):

$$Q_{bn} = q_{bn} = tv_s. \quad (8)$$

Из сопоставления (6) и (8) следует:

$$q_{bpm} = Q_{bn} = q_{bn} = tv_s. \quad (9)$$

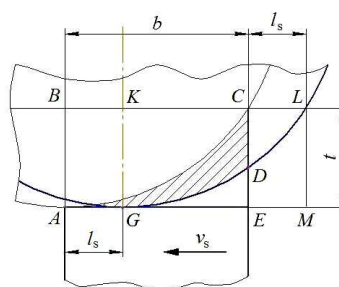


Рисунок 2 – Схема попутного шлифования на этапе выхода

В проекции на плоскость YOZ наработка на этапе выхода V_{bv} представляет собой фигуру ACDG (рисунок 2):

$$V_{bs} = ACDG = ACE - GDE.$$

Составляющие правой части равенства соответственно равны:

$$ACE = ABCE - ABC;$$

$$GDE = GKLM - GKL - EDLM, \text{ где } EDLM = ECLM - CLD.$$

Подставив значения площадей в V_{bs} , получим:

$$V_{bs} = ACDG = EDLM = ECLM - CLD.$$

Выразим стороны прямоугольника ECLM через параметры режима шлифования и время: $EM = l_s = v_s \tau$, $LM = t$. С учетом (7) $ECLM = tv_s \tau = V_{bn}$. Площадь CLD представим, как приведенную наработку V_{bp} на этапе врезания за время τ . Тогда

$$V_{bs} = V_{bn} - V_{bp} \quad (10)$$

Таким образом, наработка на этапе выхода за время τ определяется, как разность между наработками на этапах постоянной длины дуги контакта и врезания за то же время.

Подставив в (10) значение V_{bp} из (3) с заменой a на $R - t$, получим

$$V_{bv} = R v_s \tau - \frac{1}{2} \left(b \sqrt{R^2 - b^2} + R^2 \arcsin \frac{b}{R} \right) + \frac{1}{2} \left((b - v_s \tau) \sqrt{R^2 - (b - v_s \tau)^2} + R^2 \arcsin \frac{b - v_s \tau}{R} \right). \quad (11)$$

Аналогичное выражение выведено в результате интегрального исчисления, как это было сделано для этапа врезания.

Приведенные режущую и мгновенную режущую способности на этапе выхода найдем по формулам (1) и (2), подстановкой V_{bv} из (10) или (11):

$$Q_{bs} = tv_s - \frac{V_{bp}}{\tau}, \quad q_{bs} = tv_s - q_{bp} = v_s \left[R - \sqrt{R^2 - (b - v_s \tau)^2} \right]. \quad (12)$$

Максимальная наработка на этапе выхода V_{bvm} достигается при $\tau \rightarrow \tau_{\max}$, а максимальные значения приведенных режущей Q_{bvm} и мгновенной режущей q_{bvm} способностей при $\tau \rightarrow 0$.

Проведя соответствующие преобразования, получим:

$$V_{bvm} = \frac{b}{2} (R + t) - \frac{R^2}{2} \arcsin \frac{b}{R}, \quad Q_{bvm} = tv_s, \quad q_{bvm} = tv_s. \quad (13)$$

Из (9) и (13) следует, что

$$q_{bpm} = q_{bvm} = Q_{bvm} = Q_{bn} = q_{bn} = tv_s, \quad (14)$$

т.е. максимальные мгновенные приведенные режущие способности на этапах врезания и выхода, максимальная приведенная режущая способность на этапе выхода, приведенные режущая и мгновенная режущая способности на этапе постоянной длины дуги контакта одинаковы и равны произведению глубины шлифования на скорость подачи стола.

На этапе добора глубины в проекции на плоскость YOZ (рисунок 3) при шлифовании заготовки $FLBM$ наработка за время τ определяется площадью фигуры $ABCD$, которую выразим в виде разности площадей:

$$ABCD = EBCG - EADG.$$

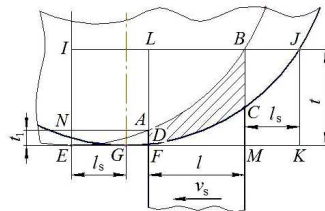


Рисунок 3 – Схема попутного шлифования на этапе добора глубины

Фигуры $EBCG$ и $EADG$ представляют собой приведенные наработки на этапе выхода при удалении за время τ материала, имеющего в продольном сечении соответственно форму прямоугольников $EIBM$ и $ENAF$. Тогда

$$V_{bd} = V_{be}(\tau, t) - V_{be}(\tau, t_1) = v_s \tau(t - t_1) - [V_{bp}(\tau, t) - V_{bp}(\tau, t_1)], \quad (15)$$

где $t_1 = R - \sqrt{R^2 - (b-l)^2}$ и $V_{bp}(\tau, t_1)$ – соответственно глубина и приведенная наработка на этапе врезания при удалении прямоугольника $ENAF$.

Приведенную наработку на этапе добора глубины можно найти из разности площадей

$$V_{bd} = ABCD = LJD - LBA - BJC.$$

Площади LJD , LBA и BJC представляют собой приведенные наработки на этапе врезания за время соответственно $\tau_1 + \tau$, τ_1 и τ , где $\tau_1 = l/v_s$ при шлифовании на одной глубине t . Тогда

$$V_{bd} = V_{bp}(\tau_1 + \tau) - [V_{bp}(\tau_1) + V_{bp}(\tau)]. \quad (16)$$

Таким образом, приведенную наработку на этапе добора глубины можно определить, как разность между приведенными наработками на этапе выхода для исходной глубины шлифования t и глубины t_1 (15) или, как разность между наработками для этапа врезания при исходной глубине шлифования t , где уменьшаемое представляет собой наработку, рассчитанную за время $\tau_1 + \tau$, а вычитаемое является суммой наработок, соответственно, за исходное время τ и время τ_1 прохождения пути, равного длине шлифуемой поверхности.

Приведенные режущую и мгновенную режущую способности на этапе добора глубины получаем подстановкой (15) или (16) соответственно в (1) и (2). Например:

$$q_{bd} = v_s \left[\sqrt{R^2 - (b-l-v_s\tau)^2} - \sqrt{R^2 - (b-v_s\tau)^2} \right]. \quad (17)$$

Используя полученные математические модели, исследованы закономерности изменения показателей надежности при шлифовании с глубиной 3 мм кругом диаметром 467,5 мм заготовок различной длины: $l_1 = 45,2$ мм, $l_2 = 32,1$ мм и $l_3 = 17,2$ мм. В качестве примера на рисунке 4,а показана мгновенная приведенная режущая способность. Графики построены в зависимости от длины шлифования. Для этого в формулах (5), (12) и (17) время шлифования выражали в виде l_s/v_s . Выбор мгновенной режущей способности обусловлен тем, что именно этот параметр, как будет показано далее, тесно связан с силами шлифования.

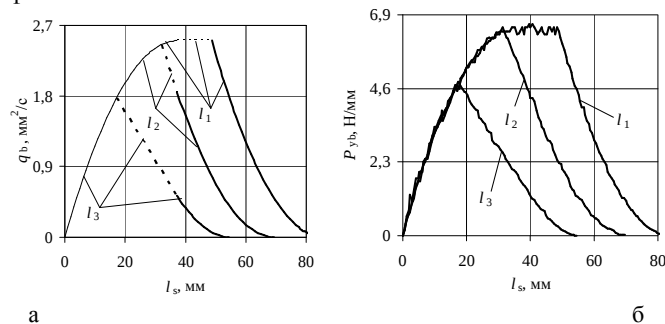


Рисунок 4 – Изменение мгновенной приведенной режущей способности q_b (а) и составляющей силы шлифования P_y (б) по длине шлифования l_s образцов различной длины:
— врезание; — выход; — — постоянная длина дуги контакта; — — добор глубины

При обработке заготовки $l_1 = 45,2$ мм длина этапов врезания и выхода равна $b \approx 37,3$ мм. Этап постоянной длины дуги контакта составляет около 7,9 мм. Общая длина шлифования равна $l_1 + b \approx 82,5$ мм. С уменьшением длины заготовки до 32,1 мм дуга контакта на этапе врезания не доходит до своего максимального значения и при $l_s \approx 32,1$ мм начинается этап добора глубины протяженностью около 5,2 мм. Этап выхода начинается при $l_s = b$. У заготовки длиной $l_3 = 17,2$ мм этап врезания и выхода сокращается, а этап добора глубины увеличивается по сравнению с заготовкой средней длины на 14,9 мм, и достигает 20,1 мм.

На этапе врезания при шлифовании длинной заготовки рост q_b постепенно замедляется и стабилизируется к началу этапа постоянной длины дуги контакта. Этап выхода характеризуется существенным уменьшением q_b , что на графике отмечается резким изломом кривых в точке перехода к новому этапу на длине пути $l_s = l_1 + b$.

При шлифовании заготовок длиной l_2 и l_3 начало этапа добора глубины, так же как и этапа выхода, характеризуется резким изменением положения кривых. Завершение этапа добора глубины на графике плавно сопрягается с началом этапа выхода. Как показали расчеты, на этапе добора глубины q_b снижается почти без изменения длины дуги контакта L . В данном случае происходит значительное уменьшение ширины номинального сечения. Например, при шлифовании образца l_3 снижение L на этапе добора глубины составляет около 1%, а средняя толщина номинального сечения среза в начале и конце этапа снижается более, чем в три раза. В результате q_b в конце этапа добора глубины уменьшается в таких же пределах по сравнению с началом.

Исследования закономерностей изменения составляющих силы глубинного шлифования выполнены при обработке пазов на станке ЛШ-220. Титановый сплав ВТ8 обрабатывали кругом 1 500×20×127 64С10М112К33КФ16 производства ОАО «Волжский абразивный завод». Непрерывная правка круга осуществлялась алмазным роликом с подачей 1 мкм/имп. Режимы обработки: скорость шлифования 25 м/с, $v_s = 50$ мм/мин, $t = 3$ мм, длина пазов соответствовала длине заготовок в рассмотренном выше примере. В качестве СОЖ использовали специальную жидкость для титановых сплавов [4].

Составляющие силы шлифования P_y и P_z измеряли динамометром СУР-600. Сигналы с датчиков динамометра поступали на тензоусилительную станцию и через цифровой аналоговый преобразователь – на персональный компьютер. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием разработанной компьютерной программы (свидетельство № 2009615802). Погрешность измерения P_y и P_z в диапазоне до 2 Н не превышала соответственно 3 и 5 %.

Поскольку математические модели показателей надежности приведены к единице ширины обрабатываемой поверхности, данные по силам шлифования представлены в таком же виде. На рисунке 4,б показана закономерность изменения вертикальной составляющей силы глубинного шлифования P_{yb} , приведенная к единице ширины обрабатываемой поверхности. Горизонтальная составляющая силы шлифования по длине пути изменяется аналогично.

Сравнение графиков на рисунке 4 свидетельствует об одинаковой закономерности изменения мгновенной режущей способности и составляющей силы глубинного шлифования. Установлено, что коэффициент корреляции между P_{yb} , P_{zb} и q_b превышает 0,9, что говорит о весьма значительной силе связи между параметрами в рассмотренных условиях обработки. Закономерности изменения наработки и режущей способности не соответствуют изменению составляющих силы шлифования.

Разработаны математические модели наработки, режущей и мгновенной режущей способности для операции глубинного шлифования плоских горизонтальных поверхностей кругом прямого профиля.

Установлена корреляционная связь составляющих силы глубинного шлифования и мгновенной режущей способности, что позволяет прогнозировать закономерности изменения силы по закономерностям изменения мгновенной режущей способности, полученным на основании теоретических расчетов.

Библиографический список

1. Силин С.С. Оптимизация технологии глубинного шлифования / С.С. Силин, Б.Н. Леонов, В.А. Хрульков. — М.: Машиностроение, 1989. — 120 с.
2. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами / В.К. Старков. — М.: Машиностроение, 2007. — 688 с.
3. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. — М.: Машиностроение, 1974. — 320 с.
4. Носенко В.А. Шлифование адгезионно-активных металлов / В.А. Носенко. — М.: Машиностроение, 2000. — 267 с.

Поступила в редакцию 13.02.2010 г.