

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

**Попова Александра Викторовна**

*Россия, г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет  
[porowa\\_av@mail.ru](mailto:porowa_av@mail.ru)*

Научный руководитель: **Переверзев Павел Петрович**, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Южно-Уральского государственного университета

Шлифование является основным методом обеспечения высокой точности и качества обрабатываемой поверхности. Более 25 % от общего объема шлифовальных работ занимает внутреннее шлифование. Внутренним шлифованием обрабатываются отверстия режущего, мерительного инструмента, втулки, колеса, кольца шарико- и роликоподшипников, гильзы цилиндров двигателей внутреннего сгорания и т.п. [3]. Область применения внутреннего шлифования охватывает все виды производства: от индивидуального (обработка единичной продукции в ремонтно-механическом и инструментальном цехах) до крупносерийного производства (обработка колец подшипников, гильз цилиндров внутреннего сгорания и т.п.).

При проектировании операций внутришлифовальной обработки на предприятиях машиностроительной отрасли назначение режимов резания производят по общемашиностроительным нормативам резания и справочникам 70-х, 80-х годов, составленных для станков с ручным управлением и полуавтоматах [1, 6, 8, 9]. Приведенные в них параметры режимов резания предназначены для расчета основного времени, а не для практического применения в процессе обработки. Кроме того, данные справочники изнашивались физически, достаточно устарели морально и, как следствие, не пригодны в условиях применения нового шлифовального инструмента, современных шлифовальных станков, обладающих более высокими мощностями и расширенными диапазонами режимных параметров, новых марок сталей. В результате чего на предприятиях машиностроительной отрасли вынуждены подбирать циклы внутришлифовальной обработки, как для универсальных станков, так и для станков с ЧПУ (обрабатывающие центры, комбинированные шлифовальные станки) путем шлифования ряда пробных заготовок с ограниченной вариацией значений режимов резания.

На данный момент для внутреннего шлифования не существует методики расчета оптимальных циклов обработки, позволяющих оперативно рассчитать режимные параметры для станков с ЧПУ и разработать нормативно-информационную базу для общемашиностроительных нормативов. Поэтому задача оптимизации циклов внутреннего шлифования носит характер проблемы в масштабах всего машиностроения. Для решения этой проблемы, впервые разработана методика оптимизации ступенчатых циклов внутреннего шлифования, на основе модели процесса съема металла при внутреннем шлифовании и метода динамического программирования [2, 7].

Модель процесса съема металла при внутреннем шлифовании базируется на единой аналитической модели силы резания, выполненной на основе похода расчета составляющих сил резания, разработанного С.Н. Корчаком в работе [4], и на основе баланса мощностей, предложенного П.П. Переверзевым в работе [7]. Разработанная модель сил резания охватывает большую часть технологических факторов, влияющих на изменение силы резания: изменения значения программной и фактической радиальной подачи, механические свойства шлифуемого металла, геометрические параметры зоны контакта круга и заготовки [5], характеристику круга степень затупления зерен круга и т.д. Ниже представлен общий вид формул, полученных для расчета составляющих сил резания при внутреннем шлифовании:

$$\begin{aligned}
P_{Yz,i,k,g} &= \frac{1,86 \cdot \sigma_i \cdot \pi \cdot d_{\zeta\bar{a}\bar{a}} \cdot S_{oc} \cdot t_{\dot{O}z,i,k,g}}{\sqrt{(V_{\dot{e}\bar{d}} + V_{\zeta\bar{a}\bar{a}})^2 + S_{oc}^2}} + \frac{\sigma_i \cdot \eta \cdot B}{3} \sqrt{\frac{d_{\zeta\bar{a}\bar{a}} \cdot D_{\dot{e}\bar{d}\bar{a}\bar{a}} \cdot t_{\dot{O}z,i,k,g}}{d_{\zeta\bar{a}\bar{a}} - D_{\dot{e}\bar{d}\bar{a}\bar{a}}}} \quad (1) \\
P_{Zz,i,k,g} &= \frac{2,732 \cdot \sigma_i \cdot V_{\zeta\bar{a}\bar{a}} \cdot \pi \cdot d_{\zeta\bar{a}\bar{a}} \cdot S_{oc} \cdot t_{\dot{O}z,i,k,g}}{(V_{\dot{e}\bar{d}} + V_{\zeta\bar{a}\bar{a}})^2 + S_{oc}^2} + \frac{\sigma_i \cdot \eta \cdot \mu \cdot V_{\zeta\bar{a}\bar{a}} \cdot B}{3 \cdot \sqrt{(V_{\dot{e}\bar{d}} + V_{\bar{a}\bar{a}\bar{d}})^2 + S_{oc}^2}} \cdot \sqrt{\frac{d_{\zeta\bar{a}\bar{a}} \cdot D_{\dot{e}\bar{d}\bar{a}\bar{a}} \cdot t_{\dot{O}z,i,k,g}}{d_{\zeta\bar{a}\bar{a}} - D_{\dot{e}\bar{d}\bar{a}\bar{a}}}} \\
P_{Xz,i,k,g} &= \frac{2,732 \cdot \sigma_i \cdot \pi \cdot d_{\zeta\bar{a}\bar{a}} \cdot S_{oc}^2 \cdot t_{\dot{O}z,i,k,g}}{(V_{\dot{e}\bar{d}} + V_{\zeta\bar{a}\bar{a}})^2 + S_{oc}^2} + \frac{\sigma_i \cdot \eta \cdot \mu \cdot S_{oc}}{3 \cdot \sqrt{(V_{\dot{e}\bar{d}} + V_{\bar{a}\bar{a}\bar{d}})^2 + S_{oc}^2}} \cdot A_x
\end{aligned}$$

где  $z$  – порядковый номер ступени цикла;  $i$  – порядковый номер хода шлифовального круга (нечетный ход – ход прямого движения, четный ход – ход обратного движения);  $k$  – порядковый номер «рабочего» участка на ширине круга;  $g$  – порядковый номер сечения детали;  $\sigma_i$  – среднее значение интенсивности напряжений, Н/мм<sup>2</sup>;  $\varepsilon_i$  – среднее значение степени деформаций, 1/с;  $V_{\dot{e}\bar{d}\bar{a}\bar{a}}$  – окружная скорость круга, мм/мин;  $V_{\zeta\bar{a}\bar{a}}$  – скорость заготовки, мм/мин;  $S_{oc}$  – осевая подача, мм/мин;  $d_{\zeta\bar{a}\bar{a}}$  – диаметр заготовки, мм;  $D_{\dot{e}\bar{d}\bar{a}\bar{a}}$  – диаметр круга, мм;  $B$  – высота шлифовального круга, мм;  $\mu$  – коэффициент трения абразивного зерна по обрабатываемому материалу;  $\eta$  – степень затупления шлифовального круга;  $A_x$  – площадь контакта шлифовального круга с заготовкой в плоскости, действия силы  $P_{Xz,i,k,g}$ , мм.

Для удобства проведения расчетов часть постоянных параметров (диаметр и ширину шлифовального круга, физико-механические свойства обрабатываемого материала, окружную скорость вращения круга и т.п.) заменим на коэффициенты. В результате формула для расчета радиальной составляющей силы резания (1) будет выглядеть следующим образом:

$$P_{Yz,i,k,\bar{N}} = M_1 \cdot t_{\dot{O}z,i,k,\bar{N}} + M_2 \cdot \sqrt{t_{\dot{O}z,i,k,\bar{N}}} \quad (2)$$

где  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  – коэффициенты.

$$\begin{aligned}
M_1 &= \frac{1,86 \cdot \sigma_i \cdot \pi \cdot d_{\zeta\bar{a}\bar{a}} \cdot S_{oc}}{\sqrt{(V_{\dot{e}\bar{d}} + V_{\zeta\bar{a}\bar{a}})^2 + S_{oc}^2}} \\
M_2 &= \frac{\sigma_i \cdot \eta \cdot B}{3} \cdot \sqrt{\frac{d_{\zeta\bar{a}\bar{a}} \cdot D_{\dot{e}\bar{d}\bar{a}\bar{a}}}{(d_{\zeta\bar{a}\bar{a}} - D_{\dot{e}\bar{d}\bar{a}\bar{a}})}}
\end{aligned}$$

Разделив ширину круга на осевую подачу (мм/об), найдем количество «рабочих» участков круга, каждый из которых снимает определенную часть припуск, удаляемого в течение одного хода, и имеет свое значение жесткости. В результате программная радиальная подача на каждом из «рабочих» участков имеет свое значение (программно-фактическое значение радиальной подачи). Фактическое значение программной подачи меняется на протяжении всего хода из-за наличия упругих перемещений технологической системы. Взаимосвязь программной, программно-фактической и фактической радиальной подачи представлена на рис. 1. Значение программно-фактической радиальной подачи зависит от порядкового номера «рабочего» участка круга и четности хода. Ниже приведены формулы для расчета программно-фактической подачи для среднего сечения заготовки (индекс  $g = C$ ) при условии, что все ходы являются рабочими.

Для первого «рабочего» участка круга первого хода:  $t_{\dot{I} \dot{O} 1,1,1,\bar{N}} = t_{\dot{I} 1,1,1,\bar{N}}$ .

Для последующих «рабочих» участков круга первого и последующих ходов:

$$t_{\dot{I} \dot{O} z,i,k,\bar{N}} = t_{\dot{I} \dot{O} z,i,k-1,C} - t_{\dot{O}z,i,k-1,C} = \gamma_{\dot{A}k-1} \cdot P_{Yk-1}$$

где  $\gamma_{\dot{A}k}$  – податливость  $k$ -ого участка ширины шлифовального круга в вертикальном направлении;

Для первого «рабочего» участка круга последующих ходов:

$$t_{\dot{O}z, i, k, \bar{N}} = t_{\dot{I}z, i, k, C} + \Delta_{z, i, k-1, C},$$

где  $\Delta_{z, i, k, C}$  – неснятая часть припуска, равная величине прогиба на последнем «рабочем» участке круга, мм.

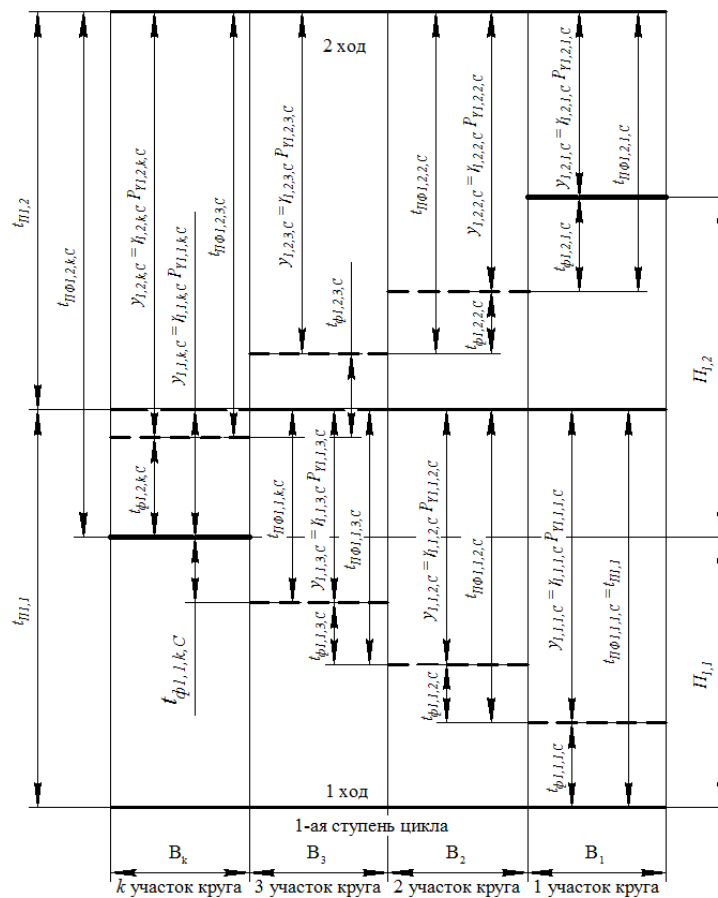
Для холостого хода и процесса выхаживания формирование программно-фактической радиальной подачи носит иной характер.

Из рис. 1 видно, что фактическую подачу можно найти по формуле:

$$t_{\dot{O}z, i, k, g} = t_{\dot{O}z, i, k, g} + y_{z, i, k, g}, \quad (3)$$

где  $y_{z, i, k, g}$  – величина прогиба, определяющая по формуле:

$$y_{z, i, k, g} = \gamma_{Bk} \cdot P_{Yz, i, k, g}, \quad (4)$$



**Рисунок 1** – Взаимосвязь программной, программно-фактической и фактической радиальной подачи (на обоих ходах осуществляется сьем припуска)

Подставив выражение (4) в формулы (3), найдем фактическую радиальную подачу:

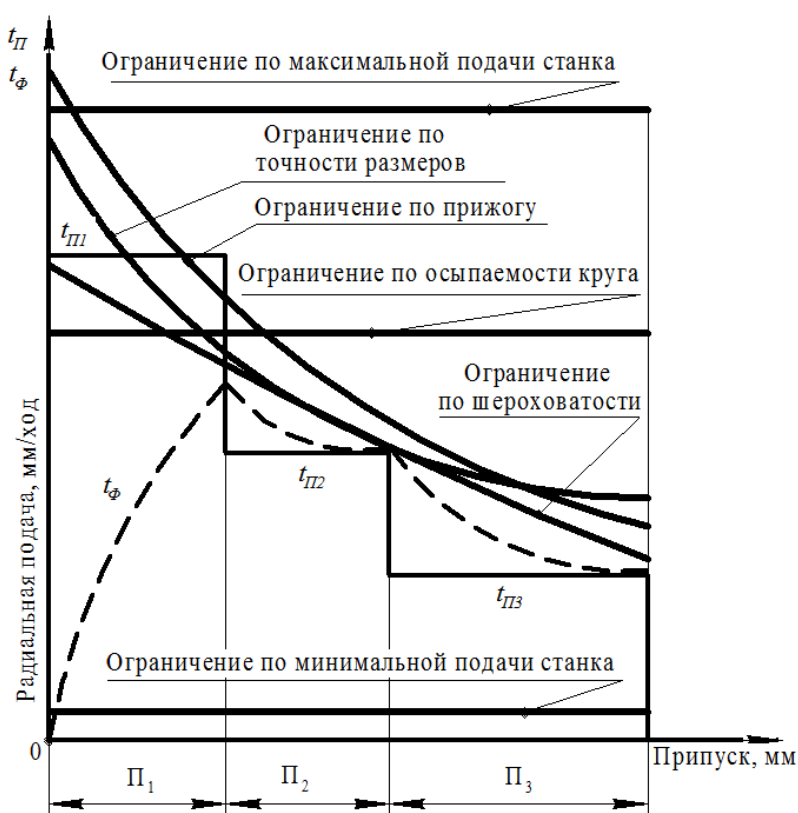
$$t_{\dot{O}z, i, k, \bar{N}} = t_{\dot{O}z, i, k, \bar{N}} - \gamma_{Bk} \cdot P_{Yz, i, k, \bar{N}} \quad (5)$$

Заменив в выражении (5) радиальную составляющую силы резания  $P_{Yz, i, k, \bar{N}}$  на формулу (2), найдем фактическую радиальную подачу:

$$t_{\dot{O}z, i, k, C} = \left[ \frac{\sqrt{\gamma_{Bk}^2 \dot{I}^2 + 4 \cdot t_{\dot{O}z, i, k, g} + 4 \cdot t_{\dot{O}z, i, k, g} \cdot \gamma_{Bk} \cdot M_1 - \gamma_{Bk} M_2}}{2 + 2\gamma_{Bk} M_1} \right]^2 \cdot (6)$$

Полученное выражение (6) позволит моделировать изменения фактической радиальной подачи в процессе внутришлифовальной обработки.

При проектировании оптимальных циклов внутришлифовальной обработки необходимо учесть технологические ограничения, накладываемые на процесс внутришлифовальной обработки. К технологическим ограничениям, накладываемым на процесс, можно отнести: ограничения по допустимой погрешности размеров обрабатываемой поверхности; ограничения по осыпаемости шлифовального круга; ограничения по допустимой глубине дефектного слоя (прижога) на обрабатываемой поверхности; ограничения по допустимой шероховатости обрабатываемой поверхности; ограничения по расчетному диапазону изменения степени затупления круга за период стойкости между правками; ограничения по допустимому количеству ступеней переключения программной скорости подачи; ограничения по мощности привода вращения круга и заготовки. Данный комплекс ограничений базируется на единой модели силы резания, взаимосвязанной с режимами резания, геометрией зоны резания, затуплением круга и его характеристикой (рис. 2).

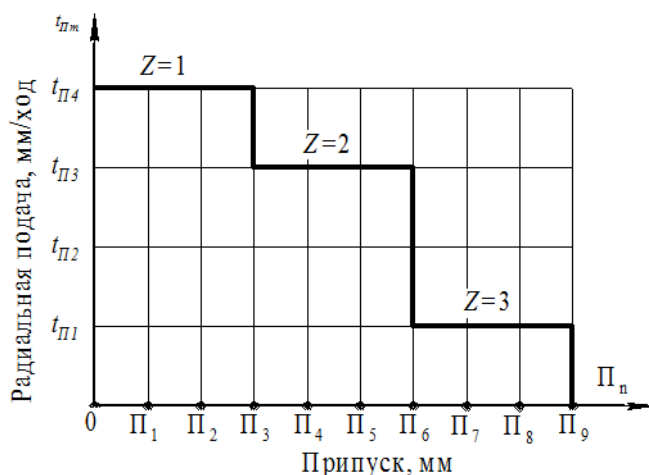


**Рисунок 2** – Область допускаемых значений фактической радиальной подачи трехступенчатого цикла внутреннего шлифования (значение осевой подачи фиксированное)

В качестве критерия оптимальности цикла принимается время шлифования, так как время обработки является переменной частью затрат, зависящих от режимов обработки. И как следствие, оптимизация цикла шлифования сводится к сокращению времени обработки до минимально возможного значения ( $\Theta = \tau_y \rightarrow \min$ ).

Оптимизация цикла относится к области нелинейного программирования, так как требует решения сложной задачи оптимизации цикла внутришлифовальной обработки заданной партии заготовок при нестабильных условиях шлифования и действующих технологических ограничениях. К основным методам нелинейного программирования относятся: метод динамического программирования, метод вероятностной оптимизации, метод ветвей и границ. Анализ данных методов показал, что наиболее приемлемым для оптимизации процесса внутреннего шлифования является метод динамического программирования, предложенный Р. Беллманом в работе [2]. Данный метод заранее не

требует построения области допустимых значений параметров процесса. В основе метода динамического программирования лежит принцип оптимальности: оптимальное поведение обладает тем свойством, что каковы бы не были первоначальные состояния и решение в начальный момент, последующие решения должны составлять оптимальное поведение относительно состояния в результате первого решения [10].



**Рисунок 3** – Управляющая программа трехступенчатого цикла внутришлифовальной обработки (значение осевой подачи фиксированное)

Разработанная методика оптимизации цикла шлифования дает возможность заменить полный перебор вариантов направленным перебором с отсечением недопустимых по ограничениям и неперспективных (т.е. занимающих большее количество времени) ходов, что на много порядков дает снижение количества вариантов. Для расчёта оптимальных циклов это обстоятельство позволяет не только применять программное обеспечение станков с ЧПУ (чтобы оперативно рассчитывать оптимальные параметры управляющих программ при внутреннем шлифовании), но и выполнять громоздкие и сложные проекты, связанные с разработкой САПР и нормативов режимов резания для внутришлифовальных операций. На рис. 3 приведен пример управляющей программы трехступенчатого цикла внутришлифовальной обработки с фиксированным значением осевой подачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Барановский, Ю.В. Режимы резанья металлов: справочник / Ю.В. Барановский. – М.: Машиностроение, 1972. – 406 с.
2. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: изд-во ин.лит., 1960. – 400 с.
3. Ваксер, Д.Б. Внутреннее шлифование / Д.Б. Ваксер, – 2-е изд., пе-раб. и доп. – Ленинград: Машиностроение, 1967. – 99 с.
4. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 278 с.
5. Маслов, Е.Н. Основы теории шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машгиз, 1951. – 190 с.
6. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания, для нормирования работ выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управление: нормативы режимов резания. – Москва: Экономика, 1990 – 472 с.
7. Переверзев, П.П. Теория и методика расчета оптимальных циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках с программным управлением. дис. ... докт. техн. наук / П.П. Переверзев. – Челябинск, 1999. – 293 с.
8. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: справочник / Ы.И. Баранчиков, А.В. Жаринов, Н.Д. Юдина, А.И. Садыхова. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
9. Режимы резанья на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах: справочник. – Челябинск: Изд-во АТКОСО, 2007. – 384 с.
10. Лурье, Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г.Б. Лурьев. – М.: Машиностроение, 1986 – 125с.