

УДК 621.922

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЪЕМА МЕТАЛЛА НА ПРИМЕРЕ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ

П.П. Переверзев, А.В. Попова

Представленная в данной статье модель формирования фактически снимаемого припуска, позволяющая рассчитать количество ходов и время цикла путем моделирования процесса съема металла для каждого хода при заданных значениях режимов резания, с учетом упругих деформаций и особенностей кинематики резания.

Ключевые слова: внутреннее шлифование, модель сил, модель съема припуска

Шлифование является самым распространенным видом «чистовой» обработки деталей, прошедших термообработку. Более четверти от общего объема шлифовальных операций составляет внутреннее шлифование. Оно позволяет обрабатывать: сквозные и глухие отверстия различной формы; отверстия с пересеченной поверхностью; отверстия в деталях с неодинаковой толщиной стенок или с неоднородной твердостью металла; ступенчатые отверстия; отверстия больших диаметров (свыше 100 мм). Внутреннему шлифованию могут подвергаться детали из различных материалов – стали с различными физико-механическими свойствами (закаленных, труднообрабатываемых), чугуны, цветные сплавы и др.

Появления современных шлифовальных станков с ЧПУ, высокопроизводительного режущего инструмента, позволяющих производить обработку изделий на более высоких скоростях [1, 2], столкнуло современное машиностроение с отсутствием нормативно-справочной литературы, позволяющей назначать режимы обработки, удовлетворяющих требованиям современного производства. Имеющая на данный момент справочная литература, разработанная в 60-х, 70-х, 80-х годах для универсальных станков на основании статических данных, полученных в советский период. В результате, на предприятиях вынуждены подбирать режимы резания экспериментальным путем. Процесс подбора режимов резания имеет ряд значительных недостатков: значительные затраты материальных средств, времени на подбор режимов; требуемые качества и точность изделия не всегда достигаются; потеря производительности процесса обработки (на первое место ставится качество и точность изделия); нерентабельность для серийного и мелкосерийного типа производства из-за ограниченности количества пробных заготовок и др. Покупка нормативно-справочной литературы, методик расчета режимов обработки за рубежом не всегда является возможной, т.к. данный продукт является стратегическим и не находится в свободном доступе для

обычного потребителя. С целью решения данной проблемы нами впервые разработана методика создания оптимальных ступенчатых циклов внутришлифовальной обработки, основанная на модели съема металла и применяемая для выбора оптимального решения методом динамического программирования [3].

Моделирование процесса съема металла для внутреннего шлифования базируется на двух основополагающихся моделях – модели сил резания и модели взаимосвязи программного и фактического значений радиальной подачи с упругими деформациями технологической системы. Разработанная силовая модель процесса внутреннего шлифования охватывает практически все технологические факторы, влияющие на изменение сил: фактические и программные значения радиальной подачи, скорость вращения детали и круга, механические свойства шлифуемого металла (интенсивность напряжений), геометрические параметры зоны контакта круга и заготовки, характеристика круга, коэффициент трения при шлифовании, затупление зерен круга. Более подробно с разработанной моделью сил резания для внутреннего шлифования можно ознакомиться в работе [4]. Ниже представлен общий вид модели сил резания, возникающих в процессе внутреннего шлифования.

Радиальная составляющая силы резания:

$$P_{Yz,i} = \frac{1,86\sigma_i \pi d_{\text{зар}} V_{\text{Soc}} S_{\text{рад}z,i}}{\sqrt{(V_{\text{кр}} + V_{\text{зар}})^2 + V_{\text{Soc}}^2}} + \frac{\sigma_i \eta T_{\text{общ}}}{3} \sqrt{\frac{d_{\text{зар}} D_{\text{кр}} S_{\text{рад}z,i}}{d_{\text{зар}} - D_{\text{кр}}}}. \quad (1)$$

Тангенциальная составляющая силы резания:

$$P_{Zz,i} = \frac{2,732\sigma_i V_{\text{зар}} \pi d_{\text{зар}} V_{\text{Soc}} S_{\text{рад}z,i}}{(V_{\text{кр}} + V_{\text{зар}})^2 + V_{\text{Soc}}^2} + \frac{\sigma_i \eta \mu V_{\text{зар}} T_{\text{общ}}}{3\sqrt{(V_{\text{кр}} + V_{\text{зар}})^2 + V_{\text{Soc}}^2}} \sqrt{\frac{d_{\text{зар}} D_{\text{кр}} S_{\text{рад}z,i}}{d_{\text{зар}} - D_{\text{кр}}}}.$$

Осевая составляющая силы резания:

$$P_{Xz,i} = \frac{2,732\sigma_i \pi d_{\text{зар}} V_{\text{Soc}}^2 S_{\text{рад}z,i}}{(V_{\text{кр}} + V_{\text{зар}})^2 + V_{\text{Soc}}^2} + \frac{\sigma_i \eta \mu V_{\text{Soc}} S_X}{3\sqrt{(V_{\text{кр}} + V_{\text{зар}})^2 + V_{\text{Soc}}^2}},$$

где z – порядковый номер ступени цикла; i – порядковый номер хода шлифовального круга; $S_{\text{рад}z,i}$ – радиальная подача шлифовального круга, мм/ход; $V_{\text{кр}}$ – окружная скорость круга, мм/мин; V_{Soc} – скорость осевая подача, мм/мин; σ – среднее значение интенсивности напряжений, Н/мм²; S_X – площади контакта круга с заготовкой в плоскости действия осевой силы резания, мм²; $d_{\text{зар}}$ – диаметр заготовки, мм; $D_{\text{круга}}$ – диаметр круга, мм; $T_{\text{общ}}$ – высота шлифовального круга, мм; η – степень затупления шлифовального круга, равная отношению суммарной площади площадок затупления зерен круга, образующихся в результате их износа по задней поверхности и расположенных на рабочей поверхности круга, к геометрической площади рабочей поверхности круга.

Многие параметры сохраняют свои значения, практически не изменяясь (диаметры заготовки и круга, скорости вращения круга и др.), поэтому их можно выразить через коэффициенты, тем самым упрощая вид основных формул. После преобразований, формула для расчета радиальной составляющей силы резания (1) примет следующий вид:

$$P_{Yz,i} = M_1 S_{\text{раз},i} + M_2 T_{\text{общ}} \sqrt{S_{\text{раз},i}}, \quad (2)$$

где M_1 , M_2 – коэффициенты, определяющиеся по формулам (3) и (4).

$$M_1 = \frac{1,86 \sigma \pi d_{\text{зар}} V_{\text{Soc}}}{\sqrt{(V_{\text{кр}} + V_{\text{зар}})^2 + V_{\text{Soc}}^2}}, \quad (3)$$

$$M_2 = \frac{\sigma \eta}{3} \sqrt{\frac{d_{\text{зар}} D_{\text{круга}}}{(d_{\text{зар}} - D_{\text{круга}})}}. \quad (4)$$

Из всех элементов технологической системы в процессе внутреннего шлифования наибольшей податливостью обладает шлифовальной шпиндель с оправкой и кругом [5]. Под действием радиальной составляющей силы резания происходит частичное «выдавливание» круга из зоны контакта круга с заготовкой. В результате, чего съём припуска осуществляет не всей общей высотой круга, а только ее частью – активной высотой круга. Выделим три варианта контакта круга с заготовкой, возникающих при различных условиях обработки. Первый вариант, круг – частично контактирует с заготовкой, при этом величина активной части высоты круга меньше общей высоты круга (рис. 1а). Вторым и третьим варианты возможны при полном контакте круга с заготовкой. При втором варианте заготовка и круг находятся в контакте по всей высоте круга, т.е. величина активной высоты круга равна общей высоте (рис. 2а) – идеальный случай. Третий вариант становится возможным в результате резкого увеличения значения программной радиальной подачи при малом значении общей высоты круга. При нем теоретически максимально возможное значение активной высоты круга больше общей высоты круга (рис. 2б). В дальнейшем, в процессе расчетов для данного случая величину активной части высоты круга принимаем равной общей высоте.

Степень полноты контакта круга и заготовки определяется двумя параметрами: углом поворота и упругой деформацией (прогибом) режущей кромки круга. Данные параметры находятся из дифференциального уравнение упругой линии шлифовального шпинделя, разработанного на основании методики, представленной в источнике [6].

Угол поворота режущий кромки круга можно найти по формуле

$$\varphi = P_Y \left(\frac{4A_1 - W_q^2}{4EJ_{X1}} \right). \quad (5)$$

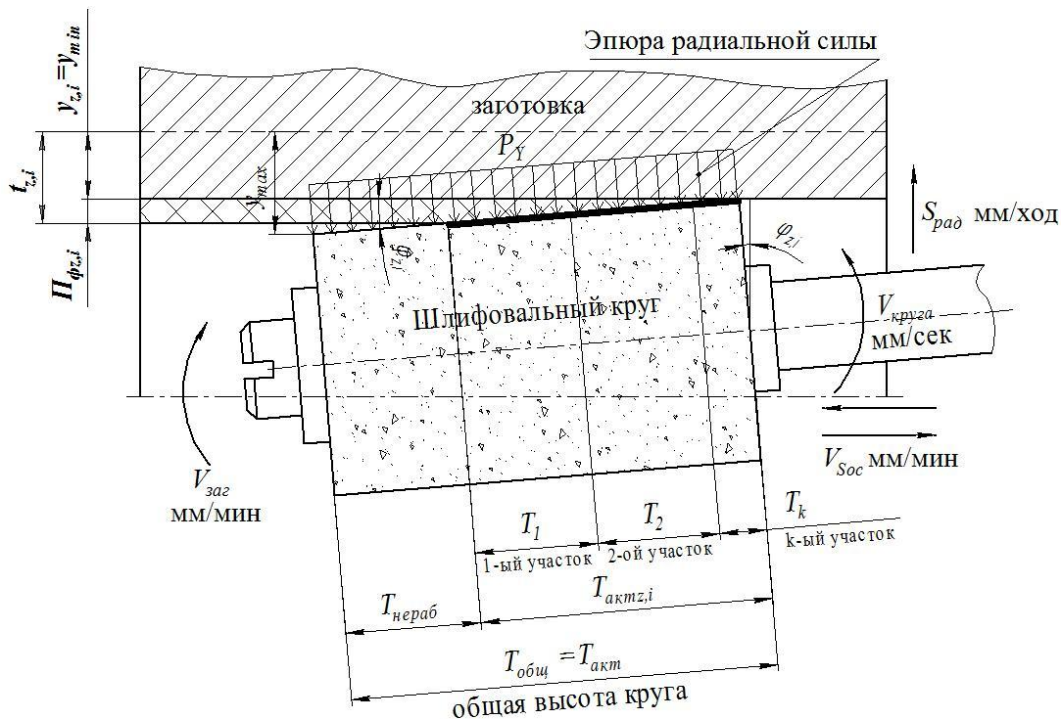


Рис. 1. Расчетная схема снятия припуска при неполном контакте круга с заготовкой ($T_{общ} > T_{акт}$)

Минимальное значение упругой деформации режущей кромки круга находится по формуле:

$$y = P_Y \left(\frac{12A_1 W_q + 12A_3 - W_q^3}{12EJ_{X1}} \right), \quad (6)$$

где E – модуль упругости, МПа; J_{Xn} – полярный момент инерции n -ого сечения шлифовальной оправки, m^4 ; L – длина вылета шлифовальной оправки, мм; A_1 , A_2 – коэффициенты, определяющие по формулам

$$A_1 = \frac{4J_{X1}L^2 + 4J_{X1}W_qL + W_q^2J_{X2}}{4J_{X2}}, \quad (7)$$

$$A_3 = \frac{-4J_{X1}L^3 - 9J_{X1}L^2W_q - 6J_{X1}W_q^2L - 2J_{X2}W_q^3}{12J_{X2}}. \quad (8)$$

В результате действия радиальной силы резания изменяется не только величина активной высоты круга, но величина фактически-снятого припуска:

$$П_{Фz,i} = t_{z,i} + y_{z,i},$$

где $y_{z,i}$ – упругая деформация режущей кромки круга, определяется по формуле (6), мм; $t_{z,i}$ – глубина резания, мм.

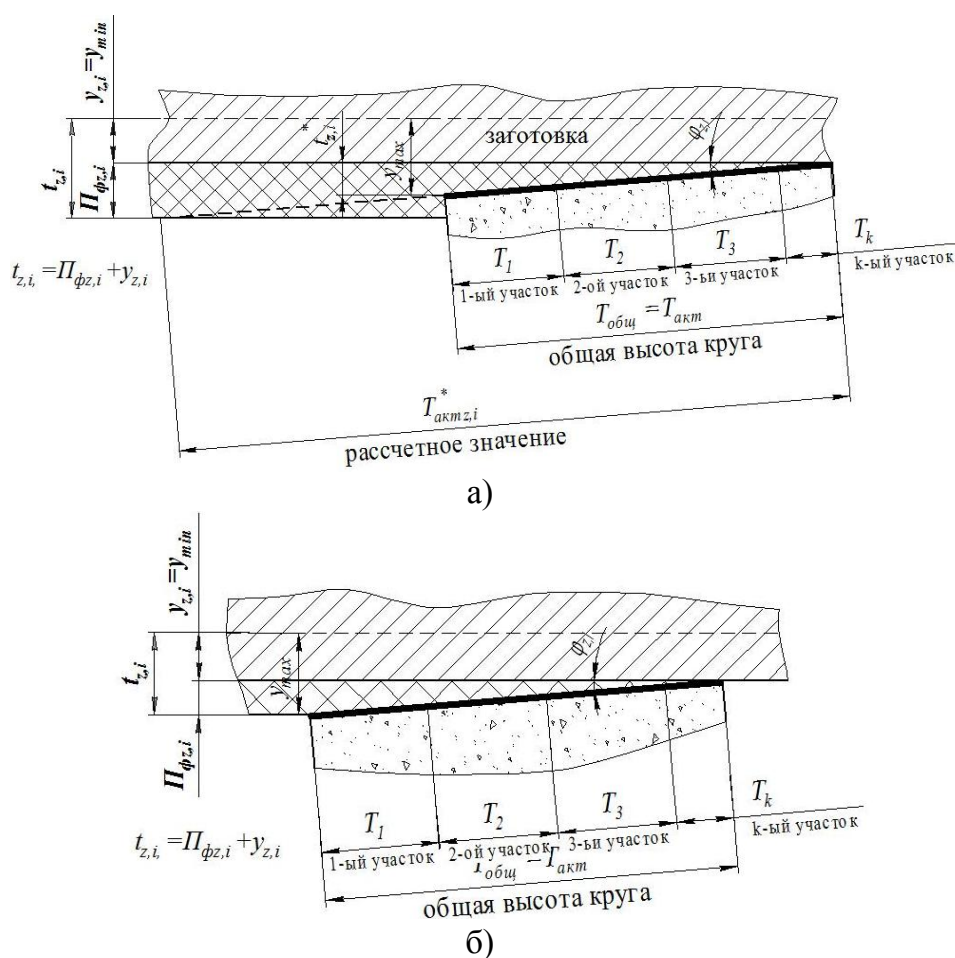


Рис. 2. Расчетная схема снятия припуска: при полном контакте круга с заготовкой: а – $T_{общ} = T_{акт}$; б – $T_{общ} < T_{акт}$

Глубина резания – расстояние между оборотанной и обрабатываемой поверхностями, измеренное в перпендикулярном направлении. Наличие упругих деформаций режущей кромки круга глубина резания на текущем ходе включает в себя помимо радиальной подачи и величину неснятого припуска с предшествующих ходов. Таким образом, можно сказать, что глубина резания зависит от порядкового номера хода и его вида (рабочий, нерабочий):

– для первого рабочего хода:

$$t_{z,i} = S_{\text{рад},i}, \quad (9)$$

– для последующих рабочих ходов:

$$t_{z,i} = S_{\text{рад},i} + y_{z,i-1}, \quad (10)$$

– для последующих нерабочих ходов:

$$t_{z,i} = y_{z,i-1}. \quad (11)$$

На рис. 3. на примере 4-х ходов (нечетный – рабочий, четный – нерабо-

чий) подробно рассмотрена взаимосвязь глубины резания ($t_{z,i}$, мм), фактически-снятого припуска ($\Pi_{\Phi z,i}$, мм), активной высотой круга ($T_{\text{акт},i}$, мм) с упругими деформациями режущей кромки ($y_{z,i}$, мм) и программным значением радиальной подачи ($S_{\text{рад},i}$, мм).

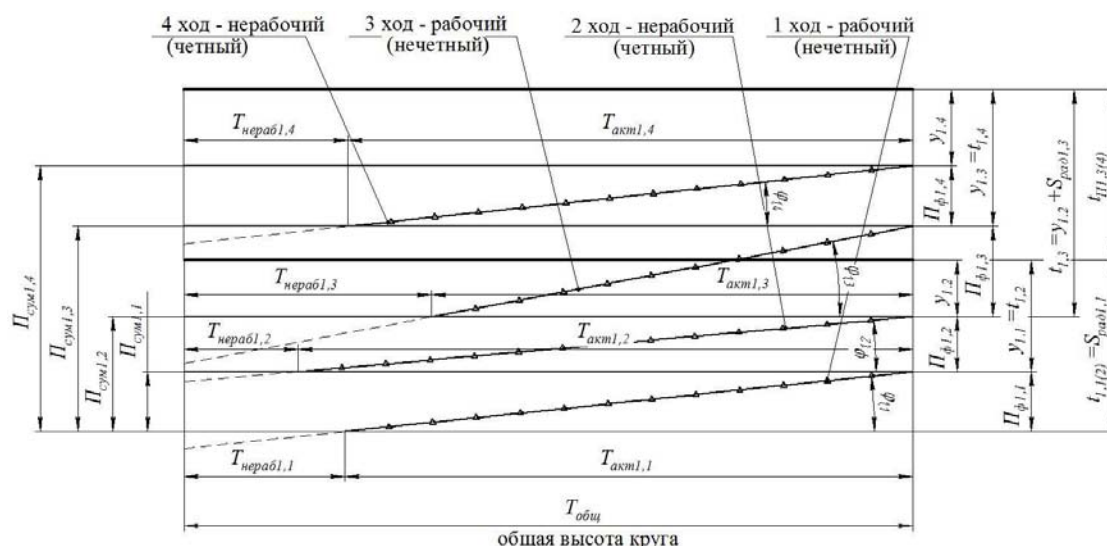


Рис. 3. Схема снятия припуска для 4-х ходов

Выделим три сечения на протяжении всей длине обрабатываемого отверстия: начальное, среднее и конечное сечения. Для учета исходного биения заготовки форма каждого сечения обрабатываемой принимается в виде эллипса, описываемого массивом радиус векторов [6]. Вследствие малости угла поворота (не превышает 1° [7]) величина активной высоты круга и угол наклона режущей кромки для каждого радиуса изменяются по высоте круга незначительно. Рассмотрим подробно методику расчета, позволяющую определить текущего значения b -ого радиуса g -ого сечения в течение всего цикла обработки.

На основании разработанной силовой модели (4), формулы для расчета упругой деформации режущей кромки круга, учитывающая активную часть высоты круга (5, 6), а также размерных схем и формул (9, 10, 11), полученных для различного сочетания ходов выведена формула для расчета величины фактически-снятого припуска с b -ого радиуса g -ого сечения на i -ом ходе z -ой ступени [8]:

$$\Pi_{z,i,g,b} = \left[\frac{-A_4 M_2 W_q}{2(1 + A_4 M_1)} + \sqrt{\left(\frac{A_4 M_2 W_q}{2(1 + A_4 M_1)} \right)^2 + \frac{S_{\text{сум,рад},i} - R_{z,i-1,g,b} + R_{\text{min}}}{1 + A_4 M_1}} \right]^2,$$

где W_q – активная части высота круга для q -ом пересчета, мм; $S_{\text{сум,рад},i}$ –

сумма радиальных подач, мм; R_{\min} – значение минимального радиуса заготовки, мм; $R_{z,i-1,g,b}$ – значение b -ого радиуса g -ого сечения на предшествующем ходе z -ой ступени, мм; M_1 , M_2 – коэффициенты, определяемые по формулам (3) и (4); A_4 – коэффициент, определяемый по формуле:

$$A_4 = \frac{W_q^3 - 12A_1W_q - 12A_3}{12EJ_{x1}},$$

где A_1 , A_3 – коэффициенты, определяемые по формуле (7) и (8).

Величина активной части высоты круга определяется методом математического подбора. Для первого пересчета она принимается равной общей высоте круга, для последующих пересчетов определяется по формуле

$$W_{q+1} = 0.5(W_q + T_{\text{акт}/z,i}),$$

где $T_{\text{акт}/z,i}$ – расчетное значение активной части высоты круга, определяющиеся по формуле:

$$T_{\text{акт}/z,i,g,b} = \frac{\Pi_{z,i,g,b}}{A_2M_1\Pi_{z,i,g,b} + A_2M_2W_q\sqrt{\Pi_{z,i,g,b}}},$$

где A_2 – коэффициент, определяемый по формуле:

$$A_2 = \frac{4A_1 - W_q^2}{4EJ_{x1}}.$$

Количество пересчетов q определяется погрешность расчета активной части высоты круга:

$$\left| \frac{W_q - T_{\text{акт}/z,i,k}}{W_q} \right| \cdot 100\% < 1\%.$$

Основное время является одним определяющих факторов эффективности технологического процесса помимо точности и качества обрабатываемой поверхности. Основное время находится в прямой зависимости по количеству ходов круга. В подавляющем большинстве нормативно-справочной литературе определение количества ходов осуществляется без учета влияния упругих деформаций режущей кромки, т.е. для абсолютно жесткой системы. В результате, по формулам, представленным в нормативно-справочной литературе, невозможно определить основное время и количество ходов, необходимых для снятия заданного припуска, из-за нелинейного изменения фактически-снятого припуска (при постоянном значении программной подачи), вследствие влияния упругих деформаций режущей кромки. Тем более, это невозможно сделать для процесса внутреннего шлифования, где на каждом ходе шлифование ведется при разной полноте кон-

такта круга и силе резания, из-за сложной функциональной связи упругих деформаций с параметрами режимов резания и технологических параметрами. В результате чего можно сделать принципиальный вывод: количество ходов можно только путем пошагового моделирования процесса съема металла.

Выводы

1. Разработанная силовая модель процесса внутреннего шлифования 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, характеристику круга степень затупления зерен круга и т.д.

2. Разработанный математический аппарат позволяет рассчитать количество ходов и время цикла путем моделирования съема металла на каждом ходе при заданных режимах резания, с учетом упругих деформаций и особенностей кинематики резания.

Библиографический список

1. Ардашев, Д.В. Современные проблемы проектирования операций абразивной обработки / Д.В. Ардашев, О.С. Захарова // Международное научное издание «Современные фундаментальные и прикладные исследования». – 2015. – № 1. – С. 25–29.

2. Rowe, W.B. Principles of modern grinding technology / W.B. Rowe. – Liverpool: Elsevier Inc, 2013. – 437 p.

3. Переверзев, П.П. Моделирование и оптимизация управляющих программ для станков с ЧПУ с использованием динамического программирования / П.П. Переверзев, Д.Ю. Пименов // СТИН. – 2014. – № 6. – С. 18–24.

4. Переверзев, П.П. Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с основными технологическими параметрами / П.П. Переверзев, А.В. Попова // Металлообработка. – 2013. – № 3. – С. 24–30.

5. D'yakonov, A.A. Capabilities of internal-grinding wheels / A.A. D'yakonov // Russian Engineering Research. – Vol. 34, iss. 12. – 2015. – Pp. 781–784.

6. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М.: Наука, 1979. – 560 с.

7. Наерман, М.С. Справочник молодого шлифовщика / М.С. Наерман, Я.М. Наерман, А.Э. Исаков. – М.: Высшая школа, 1991. – 207 с.

8. Ваксер, Д.Б. Внутреннее шлифование / Д.Б. Ваксер. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1967. – 99 с.

9. Переверзев, П.П. Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с упругими деформациями технологической системы / П.П. Переверзев, А.В. Попова, Д.Ю. Пименов // СТИН. – 2014. – Вып. 9. – С. 23–27.

[К содержанию](#)