

УДК 621.923.74

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ

А.А. Николаенко

Рассмотрено моделирование операций глубинного шлифования периферией круга для станков с ЧПУ. Приведенная методика моделирования операций глубинного шлифования разработана в соответствии с рекомендациями Международной академии технологии производства (*CIRP*) для механической обработки. Представлены математические модели для расчета сил резания, точности обработки и оптимизации режима резания. Разработанные математические модели введены в компьютерную программу, которая автоматически формирует управляющую программу для шлифовального станка с ЧПУ.

Ключевые слова: математические модели, глубинное шлифование, методика моделирования операций механической обработки.

Для моделирования механической обработки разработан стандарт *ISO 3002* «Основные величины в резании и шлифовании» (*Basic quantities in cutting and grinding*) [1]. Дополнительная терминология представлена в документе Единая терминология *CIRP (CIRP Unified Terminology)* [2].

Аспекты моделирования. Главной целью моделирования процессов механической обработки является разработка системы прогнозирования их выходных параметров и эффективного планирования технологического процесса для достижения его оптимальных показателей: производительности, качества и стоимости.

Параметры процесса механической обработки разделены на две категории:

а) технические аспекты (*technical aspects*): точность формы и размеров, шероховатость обработанной поверхности и свойства поверхностного слоя детали;

б) экономические аспекты (*commercial aspects*), необходимые для управления: машинное время, стоимость обработки, производительность, брак и др.

Моделирование процессов механической обработки, предназначенное для практического применения может состоять из трех этапов.

Этап 1. Разработка моделей переменных процесса резания (моделируются основные явления в процессе образования стружки: напряжения, деформации, температуры, трение, длина контакта и площадь контакта, скорость стружки или усадка и др.).

Этап 2. Разработка моделей показателей процесса резания (моделируются несколько параметров обработки: силы, момент и мощность резания, износ инструмента, форма стружки, шероховатость обработанной поверхности или работоспособность поверхностного слоя и точность детали).

Этап 3. Определение оптимальных условий режима резания.

Цели моделирования: проектирование, оптимизация, управление процессами, имитация процессов, проектирование оборудования.

Рассмотрим основные этапы моделирования операций глубинного шлифования (ГШ) для станков с ЧПУ.

Исходные данные для моделирования операций ГШ включают в себя: параметры режима резания (глубину резания t , ширину резания $S_{\text{поп}}$, скорость круга V) геометрию режущего инструмента (наружный диаметр D), характеристики режущего инструмента (зернистость d_o , степень твердости ВМ1, номер структуры 12), свойства обрабатываемого металла (интенсивность напряжений σ_i), податливость станка с ЧПУ (f_i).

Этап 1. В общем случае при определении равнодействующей силы резания при шлифовании следует исходить в статике из равновесия активных (внешних) и реактивных (внутренних) сил, действующих на режущее зерно.

К реактивным силам относятся:

- сила сдвига от τ_s , действующая в направлении плоскости сдвига β_1 ;
- сила сжатия в направлении нормальных напряжений σ_N ;
- сила трения стружки по передней поверхности зерна;
- сила трения обрабатываемого металла о площадку затупления (рис. 1).

В общем виде работа деформации A_D для объема деформируемого металла W составляет:

$$A_D = \iiint_W \sigma_i \varepsilon_i dW, \quad (1)$$

а в движущейся вместе с инструментом системе координат эту формулу можно представить в следующем виде:

$$N = \frac{A_D}{dt} = \iiint_W \sigma_i \dot{\varepsilon}_i dW, \quad (2)$$

где N – мощность деформаций; $\dot{\varepsilon}_i$ – интенсивность деформаций; ε_i – интенсивность скорости деформаций; σ_i – интенсивность напряжений в движущемся объеме деформируемого металла.

Этап 1. Зависимость для расчета тангенциальной составляющей силы резания единичным зерном:

$$P_z^3 = \frac{k_3 \sigma_i \varepsilon_i \cdot a_s \cdot l_3 \cdot V}{V} + \mu_i k_2 \sigma_i \cdot f_p = \frac{k_3 \sigma_i \varepsilon_i \cdot Q^3}{V} + \mu_i k_2 \sigma_i \cdot f_p. \quad (3)$$

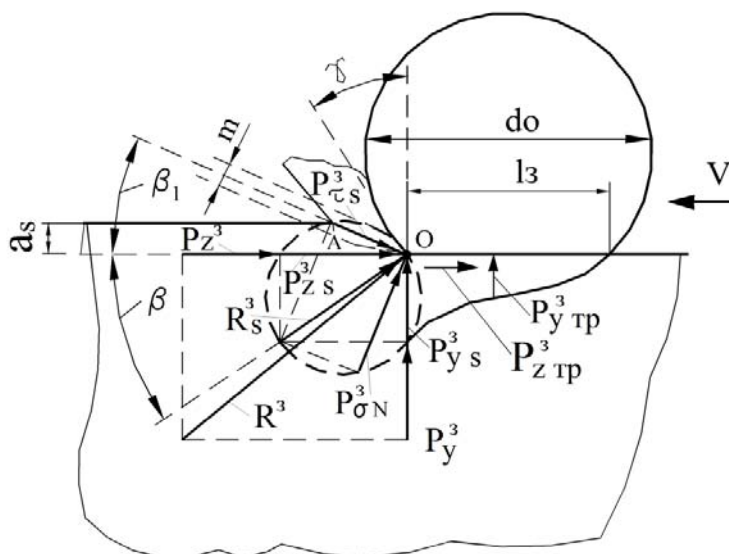


Рис. 1. Схема составляющих силы резания и эпюра напряжений при работе зерна с площадкой затупления

Формула (3) устанавливает зависимость тангенциальной составляющей силы резания зерном с интенсивностью съема металла Q_3 .

Зависимость для расчета радиальной составляющей силы резания кругом:

$$P_{y_i} = \frac{k_1 \sigma_i \varepsilon_i \cdot V_{s_{пр}} t_{\phi} S_x}{V} + \frac{k_2 \sigma_i \pi (k_o d_o)^2 W_3 W_c k_i \cdot \sqrt{Dt_{\phi}} S_x}{(W_3 + W_c + W_{п}) 4 W_{п} d_o^2}, \quad (4)$$

где $V_{s_{пр}}$ – скорость продольной подачи; t_{ϕ} – фактическая глубина резания; S_x – поперечная подача на ход (ширина шлифования).

Зависимость для расчета тангенциальной составляющей силы резания кругом:

$$P_{z_i} = \frac{k_3 \sigma_i \varepsilon_i \cdot V_{s_{пр}} t_{\phi} S_x}{V} + \frac{\mu_i k_2 \sigma_i \pi (k_o d_o)^2 W_3 W_c k_i \cdot \sqrt{Dt_{\phi}} \cdot S_x}{(W_3 + W_c + W_{п}) 4 W_{п} d_o^2}, \quad (5)$$

Таким образом, уравнения (4, 5) устанавливают взаимосвязь составляющих силы резания кругом с режимом резания и характеристиками круга (зернистостью, твердостью, структурой).

Расчет погрешности обработки детали по данному параметру (размеру, отклонениям формы, расположения и т.п.) состоит из трех шагов.

На первом шаге проводят схематизацию реальной операции. На втором шаге выполняют теоретический анализ операции, в результате которого устанавливают зависимости для расчета элементарных и суммарной погрешностей. На третьем шаге экспериментально проверяют полученные соотношения.

Расчетная схема упругих перемещений для ГШ представлена на рис. 2.

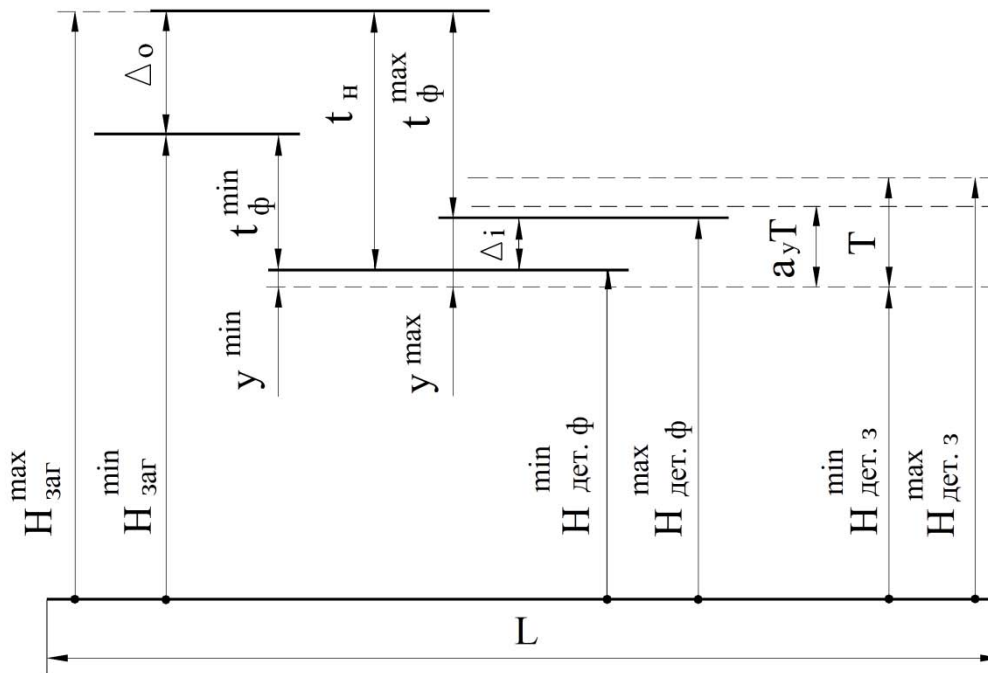


Рис. 2. Расчетная схема для определения упругих перемещений

Здесь $H_{\text{заг}}^{\min}$, $H_{\text{заг}}^{\max}$ – соответственно минимальная и максимальная высота заготовки; $H_{\text{дет.ф}}^{\min}$, $H_{\text{дет.ф}}^{\max}$ – соответственно минимальная и максимальная фактическая высота детали; $H_{\text{дет.з}}^{\min}$, $H_{\text{дет.з}}^{\max}$ – соответственно минимальная и максимальная заданная чертежом высота детали; t_n – номинальная глубина резания; t_0^{\min} , t_0^{\max} – соответственно минимальная и максимальная фактическая глубина резания; y^{\min} , y^{\max} – соответственно минимальное и максимальное упругое отжатие; T – допуск на размер; a_y – часть допуска на размер, отводимая для упругих перемещений.

Этап 3. Математически задача оптимизации режимов резания формулируется следующим образом. Найти вектор $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, оптимизационных параметров, чтобы он:

а) удовлетворял системе ограничений:

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) * f_1^0; \\
 f_k(x_1, x_2, \dots, x_n) * f_k^0; \\
 f_{k+1}(x_1, x_2, \dots, x_n) * f_{kn}^0; \\
 f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) * f_v,
 \end{aligned} \tag{6}$$

где * – один из знаков =, ≠, <, >, ≤, ≥;

б) обеспечивал экстремум функций цели:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \text{extr} \quad (7)$$

Ограничения на режимы резания для операций ГШ делятся на две основные категории:

1) технические (по мощности главного привода и диапазону подачи станка);

2) технологические (по точности и качеству детали);

Технические ограничения

А. Ограничение на режим резания по мощности главного привода станка моделируется исходя из равенства максимальной мощности резания на рабочем ходе $N_{p.x}^{\max}$ и максимально допустимой мощности главного привода станка $[N_{г.л. пр}^{\max}]$:

$$N_{p.x}^{\max} = [N_{г.л. пр}^{\max}] = \text{const}, \quad (8)$$

Максимально допустимая мощность главного привода станка определяется по мощности электродвигателя:

$$[N_{г.л. пр}^{\max}] = N_{э.д} \cdot k_{i.ä} = \text{const}, \quad (9)$$

где $N_{э.д}$ – мощность электродвигателя на главном приводе станка; $k_{i.ä}$ – коэффициент полезного действия.

По максимально допустимой мощности главного привода производится настройка защитных реле станка, которые выключают его, если $N_{p.x}^{\max} > [N_{г.л. пр}^{\max}]$.

С учетом (9) уравнение (8) можно записать следующим образом:

$$[N_{p.x}^{\max}] = N_{э.д} \cdot k_{п.д} = \text{const}. \quad (10)$$

Максимально допустимая мощность, затрачиваемая на резание равна разнице между максимальной мощностью резания на рабочем ходе $N_{p.x}^{\max}$ и мощностью электродвигателя на холостом режиме работы $N_{x.x}$:

$$[N_{рез}^{\max}] = N_{p.x}^{\max} - N_{x.x}, \quad (11)$$

Уравнение (11) показывает, что мощность, затрачиваемая на резание при рассчитанных по ограничениям режимах резания не должна превышать мощности $[N_{рез}^{\max}]$, которая обусловлена мощностью привода станка.

С другой стороны мощность $[N_{рез}^{max}]$ можно рассчитать через предельную тангенциальную силу резания $\left[\sum_{i=1}^n P_{Z_i}^{max} \right]$ и скорость круга V . На операциях ГШ скорость круга принимается по прочности круга. Следовательно, можно записать:

$$\left[N_{рез}^{max} \right] = \left[\sum_{i=1}^n P_{Z_i}^{max} \right] \cdot V = const. \quad (12)$$

Приравняв правые части уравнений (11) и (12), и решая относительно тангенциальной силы резания, получим значение $\left[\sum_{i=1}^n P_{Z_i}^{max} \right]$ по приводу станка:

$$\left[\sum_{i=1}^n P_{Z_i}^{max} \right] = \frac{\left[N_{п.х}^{max} \right] - N_{х.х}}{V} = \frac{\left[N_{рез}^{max} \right]}{V} = const. \quad (13)$$

Условие, при котором будет обеспечена работа станка по мощности его главного привода, запишется следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n P_{Z_i} \cdot V \leq \left[N_{рез}^{max} \right]. \quad (14)$$

Расчет тангенциальной силы резания производится по формуле (5).

Рассмотрим вариант увеличения силы P_{Z_i} за счет изменения скорости продольной подачи. Зная предельное значение тангенциальной силы резания (13) можно, задавая в формуле (15) любую глубину резания (стремясь снять весь припуск за один рабочий ход), рассчитать максимально допустимое (по мощности главного привода) значение скорости продольной подачи. Расчет максимально допустимого значения скорости продольной подачи производится следующим образом.

Формулу (15) для расчета тангенциальной составляющей силы резания P_{Z_i} можно сжато (через коэффициенты) записать как:

$$P_{Z_i} = \frac{V_{сп} \cdot t_{ф.i} \cdot k_4}{V} + \frac{k_5 \sqrt{t_{ф.i}}}{k_6}, \quad (16)$$

где $k_4 = T_i \sigma_i \varepsilon_i k_3$; $k_5 = \sqrt{D_i^{max}} \cdot T_i \mu_i k_2 \sigma_i \pi (k_0 d_0)^2 W_3 W_n k_i$;

$$k_6 = (W_3 + W_c + W_n) 4 W_n d_0^2.$$

Подставляя (16) в (14), получим:

$$\frac{V_{сп} t_{ф.i} k_4}{V} + \frac{k_5 \sqrt{t_{ф.i}}}{k_6} \leq \frac{\left[N_{рез}^{max} \right]}{V}. \quad (17)$$

Решая неравенство (17) относительно $V_{s \text{ пр}}$, получим матмодель для расчета максимально допустимой скорости продольной подачи по мощности главного привода станка

$$V_{s \text{ пр}} \left[N_{\text{рез}}^{\max} \right] \leq \left(\frac{\left[N_{\text{рез}}^{\max} \right]}{t_{\phi, i} k_4} - \frac{V k_5}{\sqrt{t_{\phi, i}} \cdot k_6} \right). \quad (18)$$

При глубине резания равной припуску ($t_{\phi, i} = Z^i$) неравенство (18) позволяет проверить возможность снятия припуска за один рабочий ход.

Аналогично максимально допустимой скорости продольной подачи $V_{s \text{ пр}} \left[N_{\text{рез}}^{\max} \right]$ определяется максимально допустимая (по мощности главного привода) глубина резания:

$$t_{\phi, i} \left[N_{\text{рез}}^{\max} \right] \leq \left\{ \frac{\frac{-k_5 V}{k_6} + V \sqrt{\left(\frac{k_5}{k_6} \right)^2 + \frac{4 V_{s \text{ пр}} k_4 \cdot \left[N_{\text{рез}}^{\max} \right]}{V^2}}}{2 V_{s \text{ пр}} k_4} \right\}^2. \quad (19)$$

Неравенство (19) является матмоделью для расчета максимально допустимой глубины резания по мощности главного привода станка.

Б. Ограничения на режим резания по диапазону скоростей и подач станка записываются следующим образом:

$$V_{s \text{ пр}}^{\min} \leq V_{s \text{ пр}}^i \leq V_{s \text{ пр}}^{\max}, \quad (20)$$

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max}, \quad (21)$$

$$S_x^{\min} \leq S_x^i \leq S_x^{\max}, \quad (22)$$

где $V_{s \text{ пр}}^i$ – скорость продольной подачи для i -ой стадии шлифования; $V_{s \text{ пр}}^{\min}$ и $V_{s \text{ пр}}^{\max}$ – минимальная и максимальная скорости продольной подачи обрабатываемые станком; V – скорость шлифовального круга.

Полученные математические модели введены в компьютерную программу, которая позволяет автоматически сформировать режим резания (рис. 3) и управляющую программу (рис. 4) для любой стадии ГШ.

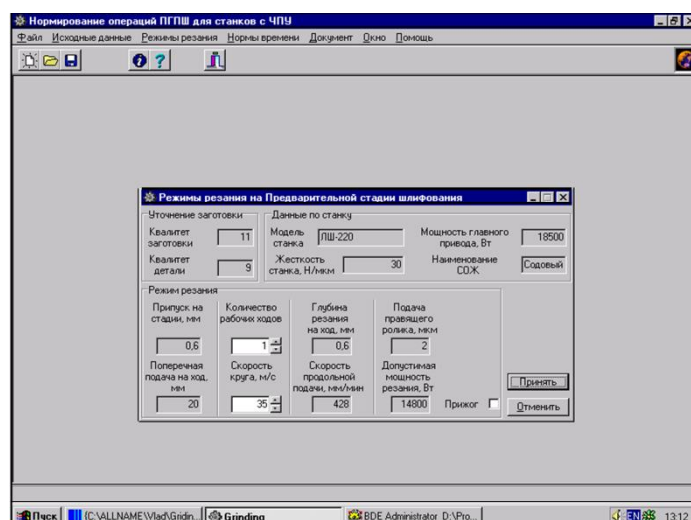


Рис. 3. Окно компьютерной программы для расчета режима резания

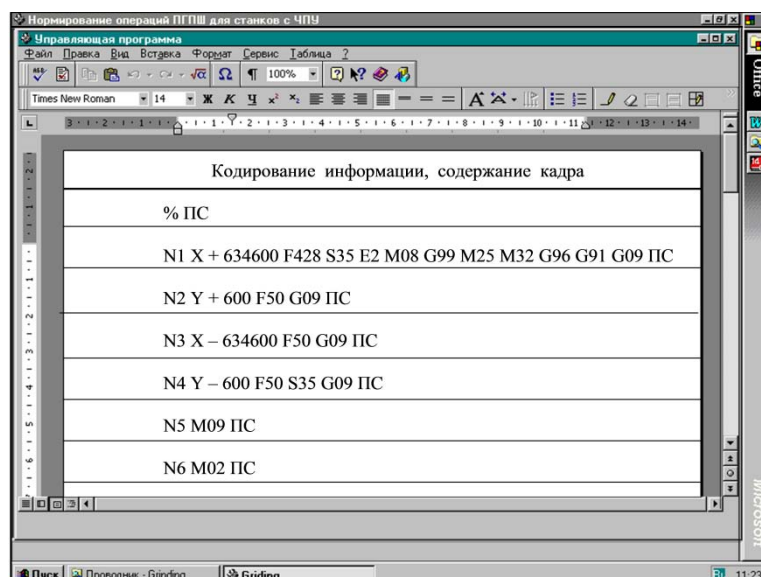


Рис. 4. Окно компьютерной программы с разработанной управляющей программой для шлифовального станка с ЧПУ

Результатом моделирования является рассчитанный режим резания и управляющая программа для станка с ЧПУ.

Библиографический список

1. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:3002:-3:ed-1:v1:en>.
2. URL: https://www.cirp.net/images/cirpfichiers/publicfiles/UnifiedTerminology/unified_terminology_manufacturing_systems.pdf.

[К содержанию](#)