

УДК 621.91.01

Д.А. Малышкин, А.А. Клепцов

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ВОПРОСУ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

При моделировании процесса формирования шероховатости необходимо учитывать, что микропрофиль обработанной поверхности образуется векторным сложением двух составляющих [1]:

$$\vec{h} = \vec{h}_1 + \vec{h}_2, \quad (1)$$

где h_1 – высота микронеровностей, получаемая в процессе копирования режущей части инструмента с учетом кинематических характеристик его движения; h_2 – высота микронеровностей, определяемая колебаниями элементов режущего инструмента.

При определении составляющей h_1 необходимо знать то, что при фрезеровании производящие линии получают методом «следа» (рис. 1), причем направляющая линия поверхности детали состоит из дуг (дискрет), периодически профилируемых зубьями фрезы с частотой, определяемой частотой вращения фрезы.

На рис. 2–5 показаны расчетные схемы обработки выпуклых и вогнутых участков ПСП для различных вариантов движения инструмента относительно заготовки и приведены аналитические зависимости для вычисления высоты гребней микронеровностей h_1 , которые получались путем следующих вычислений:

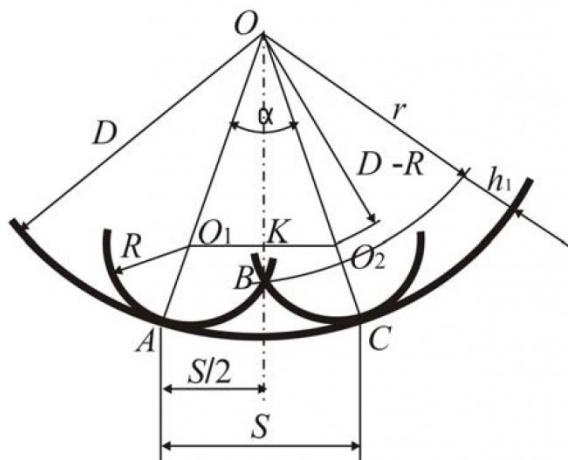


Рис. 1 Вогнутая поверхность. Подача S реализуется поворотом оси фрезы OA на угол α в положение OC

Выход формулы расчета высоты гребней микронеровностей согласно схеме на рис. 1:

$$h_1 = \rho - r; \frac{\alpha}{2} = \arcsin\left(\frac{S}{2\rho}\right); r = \hat{I}\hat{E} + \hat{E}B;$$

$$OK = (\rho - R)\cos\frac{\alpha}{2}; KB = \sqrt{R^2 - (O_1K)^2};$$

$$O_1K = (\rho - R)\sin\frac{\alpha}{2};$$

$$KB = \sqrt{R^2 - \left[(\rho - R)\sin\frac{\alpha}{2}\right]^2};$$

$$r = (\rho - R)\cos\frac{\alpha}{2} + \sqrt{R^2 - \left[(\rho - R)\sin\frac{\alpha}{2}\right]^2};$$

$$r = (\rho - R)\cos\left(\arcsin\frac{S}{2\rho}\right) + \sqrt{R^2 - \left[(\rho - R)\sin\left(\arcsin\frac{S}{2\rho}\right)\right]^2}$$

или

$$r = (\rho - R)\cos\left(\arcsin\frac{S}{2\rho}\right) + \sqrt{R^2 - \left[(\rho - R)\left(\frac{S}{2\rho}\right)\right]^2}$$

$$h_1 = \rho - (\rho - R)\cos\left(\arcsin\frac{S}{2\rho}\right) - \sqrt{R^2 - \left[(\rho - R)\left(\frac{S}{2\rho}\right)\right]^2}.$$
(2)

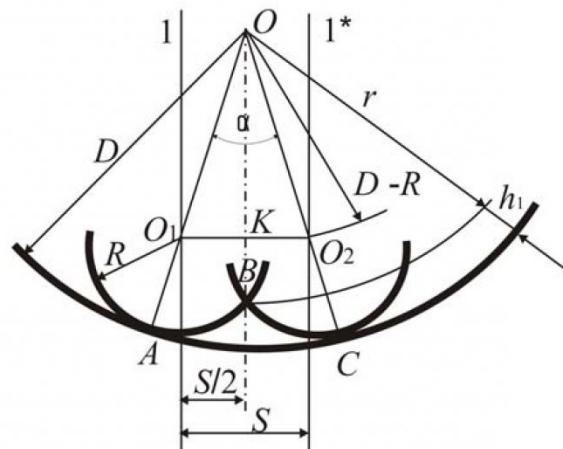


Рис. 2 Вогнутая поверхность. Подача S реализуется поступательным перемещением оси фрезы $1-1^*$

Вывод формулы для расчета высоты гребней микронеровностей согласно расчетной схеме на рис. 2:

$$h_1 = \rho - r; r = OK + KB;$$

$$KB = \sqrt{(O_1B)^2 - (O_1K)^2};$$

$$O_1K = \frac{S}{2}; O_1B = R;$$

$$KB = \sqrt{R^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2}; OK = \sqrt{(\rho - R)^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2};$$

$$r = \sqrt{(\rho - R)^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} + \sqrt{R^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2};$$

$$h_1 = \rho - \left[\sqrt{(\rho - R)^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} + \sqrt{R^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} \right]$$

или

$$h_1 = \rho - \sqrt{(\rho - R)^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} \quad (3)$$

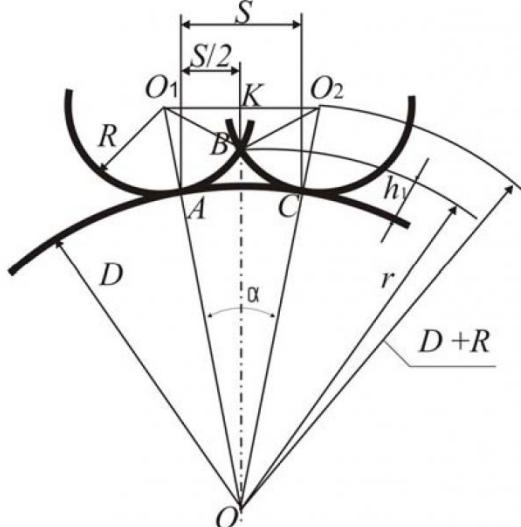


Рис. 3 Выпуклая поверхность. Подача S реализуется поворотом оси фрезы OA на угол α в положение OC

Вывод формулы для расчета высоты гребней микронеровностей согласно расчетной схеме на рис. 3:

$$h_1 = r - \rho; r = OK - KB;$$

$$KB = \sqrt{(O_1B)^2 - (O_1K)^2};$$

$$O_1K = (\rho - R) \sin \frac{\alpha}{2}; O_1B = R;$$

$$KB = \sqrt{R^2 - (\rho + R)^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}};$$

$$OK = (\rho + R) \cos \frac{\alpha}{2};$$

$$r = (\rho + R) \cos \frac{\alpha}{2} - \sqrt{R^2 - (\rho + R)^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}$$

$$h_1 = (\rho + R) \cos \left(\arcsin \frac{S}{2\rho} \right) -$$

$$- \sqrt{R^2 - (\rho + R)^2 \left(\frac{S}{2\rho} \right)^2} - \rho \quad (4)$$

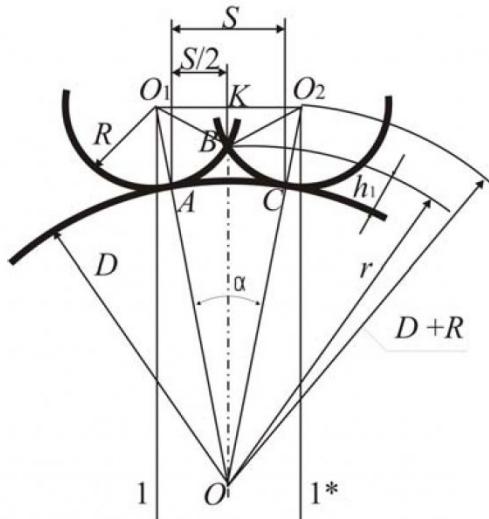


Рис. 4 Выпуклая поверхность. Подача S реализуется поступательным перемещением оси фрезы $O-1^*$

Вывод формулы расчета высоты гребней микронеровностей согласно схеме на рис. 4:

$$h_1 = r - \rho; r = OK - KB;$$

$$OK = \sqrt{(\rho + R)^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2}; KB = \sqrt{R^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2};$$

$$r = \sqrt{(\rho + R)^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2};$$

$$h = \sqrt{(\rho + R)^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} - \rho$$

или

$$OK = O_1O \cos \frac{\alpha}{2} = (\rho + R) \cos \frac{\alpha}{2};$$

$$\frac{\alpha}{2} = \arcsin \left(\frac{S}{2(\rho + R)} \right);$$

$$OK = (\rho + R) \cos \left[\arcsin \left(\frac{S}{2(\rho + R)} \right) \right];$$

$$r = (\rho + R) \cos \left[\arcsin \left(\frac{S}{2(\rho + R)} \right) \right] - \sqrt{R^2 - \left(\frac{S}{2} \right)^2}$$

$$h_1 = (\rho + R) \cos \left[\arcsin \left(\frac{S}{2(\rho + R)} \right) \right] -$$

$$- \sqrt{R^2 - \left(\frac{S}{2} \right)^2} - \rho \quad (5)$$

Предложенные зависимости учитывают влияние на величину среднего арифметического отклонения профиля R_a величины подачи на зуб фрезы (S_z), размера радиусной части инструмента (R), радиуса кривизны поверхности заготовки (ρ)

и закон движения инструмента относительно заготовки. Они дают возможность оценить влияние конструктивно-геометрических параметров режущего инструмента и режимов резания на качество обработанной поверхности (шероховатость).

Для расчета составляющей h_2 , учитывающей влияние колебаний технологической системы на величину микронеровностей, сборный режущий инструмент представляется в виде двухмассовой системы (рис. 5). Система имеет две степени свободы, характеризующиеся двумя независимыми между собой параметрами (обобщенными координатами x_1 и x_2). Для получения дифференциальных уравнений движения элементов режущего инструмента используется теорема об изменении кинетической энергии в обобщенных координатах (уравнениями Лагранжа 2-го рода) [3]. Уравнения составлены по обобщенным параметрам x_1 и x_2 (рис. 5). При этом оси координат, относительно которых происходит движение, проводились из положения статического равновесия тел, входящих в систему.

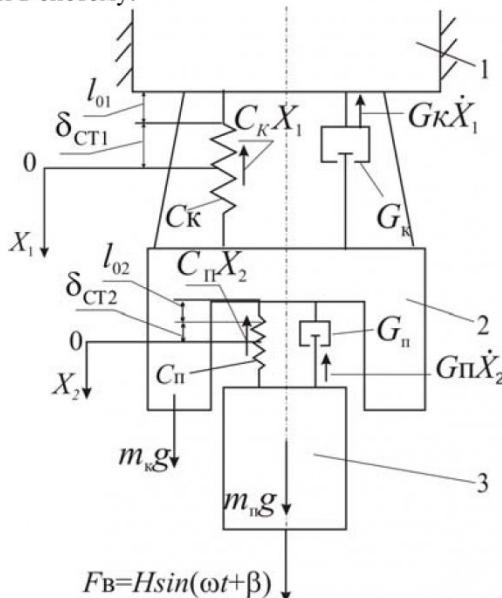


Рис. 5 Расчетная схема для определения составляющей h_2 : 1 - шпиндельный узел; 2 - корпус фрезы; 3 - режущая пластинка

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_1} &= Q_{x_1} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_2} &= Q_{x_2} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где T – кинетическая энергия данной диссипативной системы; \dot{x}_1 и \dot{x}_2 - обобщенные скорости вдоль соответствующих осей; x_1 и x_2 - обобщенные координаты; Q_{x_1} и Q_{x_2} - обобщенные силы, вычисленные по соответствующим обобщенным координатам.

Кинетическая энергия системы:

$$T = \frac{m_k \dot{x}_1^2 + m_n (\dot{x}_1 + \dot{x}_2)^2}{2}, \quad (7)$$

где m_k и m_n - соответственно массы корпуса фрезы и режущей пластинки.

Частная производная от кинетической энергии по обобщенной скорости \dot{x}_1 :

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} = m_{\hat{e}} \dot{x}_1 + m_{\bar{i}} (\dot{x}_1 + \dot{x}_2). \quad (8)$$

Полная производная по времени от частной производной по обобщенной скорости \dot{x}_1 :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) = m_{\hat{e}} \ddot{x}_1 + m_{\bar{i}} (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2). \quad (9)$$

Обобщенная сила, соответствующая обобщенной координате x_1 :

$$Q_{x_1} = \frac{\sum \delta A_{x_1}}{\delta x_1}, \quad (10)$$

где в числителе сумма элементарных работ консервативных сил и сил сопротивления на обобщенной координате x_1 .

$$Q_{x_1} = \frac{[-C_k(x_1 + \delta_{стк}) - G_k \dot{x}_1 + (m_k + m_n)g] \delta x_1}{\delta x_1} \quad (11)$$

где C_k и G_k – соответственно коэффициент жесткости и коэффициент сопротивления (демпфирования) корпуса; $\delta_{стк}$ – статическая деформация корпуса.

Сокращая постоянные слагаемые (силу упругости пружины, соответствующую положению статического равновесия массы m_k , $-C_k \delta_{стк}$ и вес системы $(m_k + m_n)g$, получаем:

$$Q_{x_1} = -C_k x_1 - G_k \dot{x}_1. \quad (12)$$

Частная производная по \dot{x}_2 :

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} = m_{\bar{i}} (\dot{x}_1 + \dot{x}_2). \quad (13)$$

Полная производная по времени от частной производной по \dot{x}_2 :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) = m_{\bar{i}} (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2). \quad (14)$$

Обобщённая сила, соответствующая x_2

$$Q_{x_2} = \frac{\sum \delta A_{x_2}}{\delta x_2}, \quad (15)$$

где в числителе сумма элементарных работ консервативных сил, силы сопротивления и возмущающей силы $P_A = H \sin(\omega t + \beta)$, где H , p – амплитуда и частота возмущающей силы.

$$Q_{x_2} = \frac{[-C_n(\delta_{стп} + x_2) - G_n \dot{x}_2 + (m_n g + H \sin(\omega t + \beta))] \delta x_2}{\delta x_2}, \quad (16)$$

где C_{Π} и G_k – соответственно коэффициенты жёсткости и демпфирования режущей пластинки;

$\delta_{\text{стп}}$ – статическая деформация режущей пластины.

Сокращая постоянные слагаемые (силу упругости – $C_n \delta_{\text{стп}}$, соответствующую положению статического равновесия массы m_{Π} и вес режущей пластины $m_n g$), получаем:

$$Q_{x_2} = -C_{\Pi} x_2 - G_{\Pi} \dot{x}_2 + H \sin(\omega t + \beta). \quad (17)$$

Подставляя найденные значения производных и обобщенных сил в систему уравнений (2.5), окончательно получаем следующие дифференциальные уравнения движения данной диссипативной системы.

$$\begin{cases} (m_k + m_n) \ddot{x}_1 + m_n \ddot{x}_2 + C_k x_1 + G_k \dot{x}_1 = 0 \\ m_n (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + C_n x_2 + G_n \dot{x}_2 = H \sin(\omega t + \beta) \end{cases} \quad (18)$$

Первое уравнение системы (18) является уравнением свободных колебаний данной технологической системы. Второе уравнение системы (18) является уравнением вынужденных колебаний вышеизванной системы.

Расчетная схема, представленная на рис. 5, содержит в себе колеблющиеся массы корпуса фрезы m_k и режущей пластины m_n , причем колебания режущей пластины демпфируются упругим элементом G_{Π} , а колебания корпуса – за счет поглощающих свойств материала, из которого он изготовлен G_k .

Динамическая модель данной диссипативной системы представлена моделью, которая построена при следующих допущениях:

- вынужденные колебания данной системы рассматриваются как линейные колебания малых величин;
- массы корпуса фрезы и режущей пластины являются сосредоточенными в их центрах масс;
- учитываются колебания только в осевом направлении, в котором формируется шероховатость обработанной поверхности;

- колебаниями остальных элементов станка пренебрегаем, в связи с их незначительным влиянием на формирование параметров качества поверхности;

- исходя из линейной постановки задачи, будем считать, что в данной системе демпфирование прямо пропорционально скорости колебаний;

- сила резания изменяется периодически с частотой, равной частоте вращения фрезы;

- упругие деформации элементов технологической системы рассматриваются в пределах выполнения закона Гука.

Сила резания, в системе уравнений (18), рассчитанная по зависимости В. И. Гузеева [2] для случая концевого фрезерования, учитывающей нестабильность процесса фрезерования ПСП (изменение толщины срезаемого слоя во времени), представляется в виде гармоники с амплитудой H , круговой частотой ω и начальной фазой β .

Входы модели: режимы резания (частота вращения фрезы n , подача на зуб фрезы Sz , скорость резания V , ширина фрезерования B), интенсивность напряжений в движущемся объеме деформируемого металла σ_i , угол контакта зуба фрезы ψ , угол сдвига β , угол между линией среза и направлением равнодействующей среза β_1 , угол профиля в рассматриваемой точке режущей кромки ϕ , величина фаски затупления l_3 , длина элементарного участка активной части режущей кромки dL , динамические коэффициенты (m_k , C_k , G_k , m_n , C_n , G_n).

Выходы модели: значения виброперемещений x_1 и x_2 элементов режущего инструмента и параметра Ra .

Данная модель была проверена на адекватность реальному процессу по критерию Фишера [4].

Ее использование на практике позволит прогнозировать значения параметра Ra на этапах подготовки технологической операции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малышкин, Д.А. Повышение производительности обработки пространственно-сложных поверхностей путем управления процессом формирования шероховатости: дис. канд. техн. наук. – Барнаул, 2003. – 139 с.
2. Гузеев, В. И. Теория и методика расчета производительности контурной обработки деталей различной точности на токарных и фрезерных станках с ЧПУ: Автореф. дис. ...д-ра. техн. наук. – Челябинск : ЧГТУ, 1994. – 33 с.
3. Яблонский А.А., Курс теории колебаний / А.А. Яблонский, С.С Норейко. Учебн. для втузов.– 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Вышш.шк., 1966.- 258 с.
4. Вентцель Е. С. Задачи и упражнения по теории вероятностей: Учеб. пособие для студ. втузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – 5-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2003.

Авторы статьи

Малышкин

Дмитрий Александрович
канд. техн. наук, доц каф. технологии машиностроения КузГТУ
e-mail: dmi_y01022007@yandex.ru

Клепцов

Александр Алексеевич
канд. техн. наук, доц. зав. каф. технологии машиностроения КузГТУ
e-mail: kleptsoff@mail.ru