

управлении рабочей поверхностью токопроводящего кола в автономной зоне. Этот процесс имеет довольно широкие технологические возможности, что позволяет предполагать наличие еще нераскрытых его потенциальных возможностей.

Ключевые слова: поликристаллические сверхтвердые материалы, поликристаллические сверхтвердые материалов на основе алмаза, лезвийный инструмент.

I.Yu. Botsman, student, A.V. Kalashnikov, Ph.D., Associate Professor

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

COMBINED EFFICIENCY OF DIAMOND GRINDING POLYCRYSTALLINE SUPERFIRM MATERIALS

It is known that the most effective method of surface treatment, diamond grinding, but it is known that the quality of the surface depends on the quality of surface preparation of cutting tools. For the surface preparation of these unique for its physical and mechanical properties of materials, you must use the combined process facilities in continuous electrochemical control surface conductive coke in the autonomous zone. This process has a pretty wide technological possibility that allows you to suggest a still undisclosed, his potential.

Keywords: polycrystalline super hard materials, polycrystalline diamond on superhard materials, edge tools.

УДК 621.914.1

В.А. Гайдар, начальник отдела программной обработки

ПАО «Полтавский турбомеханический завод», концерн «Укрросметалл», г. Полтава

С.Г. Ясько, ст. преп.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ КОНЦЕВЫМИ И ТОРЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ С ПОСТОЯННЫМ ВО ВРЕМЕНИ КОЛИЧЕСТВОМ СНИМАЕМОГО МАТЕРИАЛА

Приведена методика расчета по программе «Turbo_Profile.Section_30» зависимостей между количеством снимаемого металла в единицу времени, параметрами фрезы, углом атаки фрезы при обработке, шагом между строками обработки, толщиной снимаемого слоя и режимами резания. Такой расчет необходим при подготовке управляющих программ для станков с ЧПУ при режиме обработки с постоянным во времени объемом снимаемого материала заготовки для получения стабильного (по нагрузке на инструмент) и оптимального (по времени обработки) фрезерования детали. Указанный режим фрезерования обладает высокой эффективностью при черновой обработке, когда толщина снимаемого слоя может существенно изменяться.

Ключевые слова: турбинная лопатка, фрезерование, режим обработки, технология, программа, станок, управление.

Цели и задачи. Повышение производительности механообработки при стабильном обеспечении требуемого качества поверхности детали является приоритетным направлением современного машиностроения. Стабильность качества достигается внедрением новых и более эффективных технологических процессов.

В современном машиностроении большое значение имеют такие критерии оптимизации как производительность и себестоимость, которые включают в себя зависимости времени обработки и стойкости инструмента от параметров резания. В результате оптимизации по этим критериям находятся условия, которые обеспечивают оптимальные значения данных критериев.

В работе рассмотрен явно первый критерий оптимизации и косвенно – второй, так как стойкость инструмента существенно повышается при режиме обработки с постоянной величиной съема материала.

Для расчета оптимальных (по качеству и времени обработки концевой или торцевой фрезой) технологических параметров при заданной заранее величине гребешка H (рис. 1) и площадей (а значит и объемов) съема материала $S1$, $S2$ (рис. 2 и рис. 3) необходимо знать уравнения кривых, описывающих следы фрезы в металле при фрезеровании.

В статье [1] были получены уравнения таких кривых (1) (кривых Персея) и их производных (2) в параметрической форме:

$$\begin{cases} x(t) = x + \left(\frac{D}{2} - r\right) \cdot \cos(t) + \frac{r \cdot \sin(at)}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + \sin^2(at)}} \\ y(t) = y + \left(\frac{D}{2} - r\right) \cdot \sin(at) \cdot \sin(t) + \frac{r}{\sqrt{1 + \sin^2(at) \cdot \operatorname{ctg}^2(t)}} \end{cases} \quad \text{при } t \in [0, 2\pi], \quad (1)$$

$$\begin{cases} x(t)' = \left(r - \frac{D}{2}\right) \cdot \sin(t) - r \cdot \sin(at) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + \sin^2(at)}}\right)^3 \cdot \frac{\operatorname{tg}(t)}{\cos^2(t)} \\ y(t)' = \left(r - \frac{D}{2}\right) \cdot \sin(at) \cdot \cos(t) + r \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \sin^2(at) \cdot \operatorname{ctg}^2(t)}}\right)^3 \cdot \frac{\operatorname{ctg}(t)}{\sin^2(t)} \end{cases} \quad \text{при } t \in [0, 2\pi], \quad (2)$$

где D – диаметр фрезы; r – радиус скругления режущей кромки фрезы; at – угол атаки фрезы; Z – направление движения фрезы (рис. 4); t – эксцентрический угол внешней эквидистанты эллипса; x_0, y_0 – координаты центра фрезы (точка пересечения оси фрезы и плоскости, проходящей через центры окружностей, образованных кромками). Здесь: $(D/2 - r)$ – большая полуось, $(D/2 - r) \cdot \sin(at)$ – малая полуось эллипса, полученного проецированием на фронтальную плоскость окружности (перпендикулярную Z – общему направлению движения фрезы), проходящей через центры дуг окружностей скругления кромок (радиусом r). Внешняя эквидистанта данного эллипса (на величину r) и есть искомая кривая.

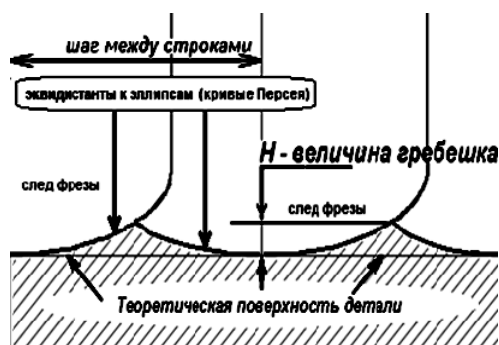


Рис. 1. Схема образования «гребешков»

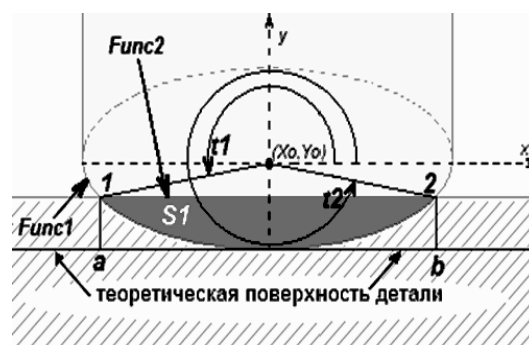


Рис. 2. Расчетная схема определения площади сечения срезаемого слоя $S1$

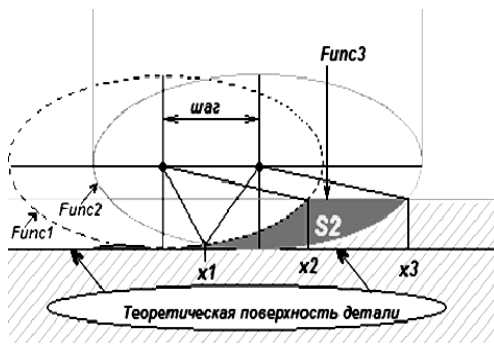


Рис. 3. Расчетная схема определения площади сечения срезаемого слоя $S2$

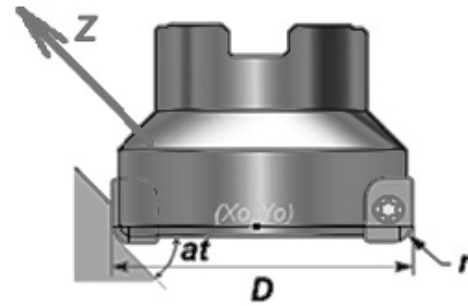


Рис. 4. Технологические параметры фрезы и обработки

Рассмотрим (рис. 2) декартову систему координат XY с центром в точке (x_0, y_0) .

Площадь снимаемого материала при первом проходе фрезы $S1(z)$ (на рис. 2 выделена темной заливкой) в сечении с координатой z определяется из выражения:

$$S1(z) = \int_a^b (Func2(x, z) - Func1(x)) dx = \int_a^b Func2(x, z) dx - \int_a^b Func1(x) dx, \quad (3)$$

где $y = Func2(x)$ – функция, определяющая геометрию заготовки в текущем сечении (рис. 2), а $y = Func1(x)$ – функция, определяющая кривую Персея (1) в декартовых координатах.

Пределы интегрирования a и b находим из выражений: $a = x(t1)$; $b = x(t2)$, где $x(t)$ – зависимость из (1), а $t1$ и $t2$ находятся численным итерационным методом половинного деления как корни определяющей функции, следующего вида:

$$Def_Func1(t) = Func2(x(t), z) - y(t),$$

где $x(t)$ и $y(t)$ – зависимости из (1).

Определенный интеграл $\int_a^b Func1(x) dx$ из выражения (3) преобразуем к виду:

$$\int_a^b Func1(x) dx = \int_{t1}^{t2} y(t) x'(t) dt, \quad (4)$$

где $y(t)$ и $x'(t)$ – зависимости из (1) и (2) соответственно.

Учитывая зависимости (1), (2) и (3) выражение (3) приобретает вид:

$$\begin{aligned} S1(z) &= \int_a^b Func2(x, z) dx - \int_{t1}^{t2} y(t) x'(t) dt = \\ &= \int_a^b Func2(x, z) dx - \int_{t1}^{t2} \left(y + \left(\frac{D}{2} - r \right) \cdot \sin(at) \cdot \sin(t) + \frac{r}{\sqrt{1 + \sin^2(at) \cdot \operatorname{ctg}^2(t)}} \right) \times \\ &\quad \times \left(\left(r - \frac{D}{2} \right) \cdot \sin(t) - r \cdot \sin(at) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + \sin^2(at)}} \right)^3 \cdot \frac{\operatorname{tg}(t)}{\cos^2(t)} \right) dt. \end{aligned} \quad (5)$$

При плоскопараллельном движении фрезы в направлении Z и постоянной (вдоль Z) функции глубины съема, т. е. при $\partial Func2(x, z) / \partial z = 0$, а значит и $\partial S1(z) / \partial z = 0$ количество снятого материала $V1$ при движении фрезы из точки $z1$ в точку $z2$ определяется простой формулой:

$$V1 = S1(z) \cdot Z2 - S1(z) \cdot Z1, \quad (6)$$

где $S1(z)$ – постоянная величина площади съема (5).

Количество снятого материала в единицу времени в данном случае будет равно:

$$V1 = S1(z) \cdot F, \quad (7)$$

где $S1(z)$ – величина площади съема (5), а F – скорость подачи фрезы.

Для реализации режима фрезерования с постоянным значением количества снимаемого материала $V1$ в соответствующем месте управляющей программы для станка с ЧПУ нужно установить скорость подачи равную: $F = V1/S1(Z)$.

При плоскопараллельном движении фрезы в направлении Z и переменной (вдоль Z) функцией глубины съема, т. е. при $\partial Func2(x, z)/\partial z \neq 0$, а значит и $\partial S1(z)/\partial z \neq 0$ количество снятого материала $V1$ при продвижении фрезы из точки $z1$ в точку $z2$ определяется выражением:

$$V1 = \int_{z1}^{z2} S1(z) dz, \quad (8)$$

где $S1(z)$ – переменная величина площади съема (5).

На практике зависимость $S1(z)$ (5) в общем (аналитическом) виде получить, как правило, сложно. Поэтому значения функции $S1(z)$ можно вычислить в некоторых контрольных сечениях и произвести линейную или нелинейную аппроксимацию, после чего воспользоваться формулой (8).

Площадь съема материала при следующих проходах фрезы $S2$ (на рис. 3 отмечена темной заливкой) определяется аналогично:

$$S2(z) = \int_{x1}^{x2} (Func1(x) - Func2(x)) dx + \int_{x2}^{x3} (Func3(x, z) - Func2(x)) dx, \quad (9)$$

где $y = Func2(x)$ – функция, определяющая текущую кривую Персея (1) в декартовых координатах; $y = Func1(x)$ – функция, определяющая предыдущую кривую Персея (1) в декартовых координатах; $y = Func3(x)$ – функция, определяющая геометрию заготовки в текущем сечении (рис. 3).

Предел интегрирования $x1$ находится посередине между центрами кривых $y = Func1(x)$ и $y = Func2(x)$ и определяется полусуммой абсцисс точек их центров. Можно видеть, что $t11$ и $t12$ как эксцентрисические углы для $Func1$ и $Func2$ в выражении (1) определяется по известному $x1$ из условия пересечения $Func1$ и $Func2$.

Пределы интегрирования $x2$ и $x3$ определяются аналогично первому варианту расчета:

$x2 = x(t21)$, где $x(t)$ – зависимость (1) для $Func1$, а $t21$ находится методом половинного деления из условия пересечения $Func1$ и $Func3$.

$x3 = x(t3)$, где $x(t)$ – зависимость (1) для $Func2$, а $t3$ находится из условия пересечения $Func2$ и $Func3$.

Аналогично $t21$ и $t22$ как эксцентрисические углы для $Func1$ и $Func2$ в выражении (1) определяется по известному $x2$ из условия пересечения $Func1$ и $Func3$, а также $Func2$ и $Func3$ соответственно.

Для выражения (9) сделаем преобразования:

$$\int_{x1}^{x2} Func1(x) dx = \int_{t11}^{t21} y_1(t) x'_1(t) dt, \quad (10)$$

где $y_1(t)$ и $x'_1(t)$ – зависимости из (1) и (2) соответственно для $Func1$

$$\int_{x1}^{x2} Func2(x) dx = \int_{t12}^{t22} y_2(t) x'_2(t) dt, \quad (11)$$

$$\int_{x2}^{x3} Func2(x) dx = \int_{t22}^{t3} y_2(t) x'_2(t) dt, \quad (12)$$

где $y_2(t)$ и $x'_2(t)$ – зависимости из (1) и (2) соответственно для $Func2$.

Отсюда, с учетом (10), (11) и (12) выражение (9) принимает вид:

$$S2(z) = \int_{t11}^{t21} y_1(t)x'_1(t)dt - \int_{t12}^{t22} y_2(t)x'_2(t)dt + \int_{x2}^{x3} Func3(x, z)dx - \int_{t22}^{t3} y_2(t)x'_2(t)dt. \quad (14)$$

Подставив в (14) выражения для $y_1(t)$ и $x'_1(t)$ из (1) и (2) для $Func1$, а также выражения для $y_2(t)$ и $x'_2(t)$ из (1) и (2) для $Func2$ можно получить окончательную (и очень громоздкую) формулу для функции $S2(z)$.

Все остальные формулы, определяющие количество снимаемого материала $V2$ при последующих проходах фрезы, абсолютно идентичны уже рассмотренным выше формулам для первого прохода:

$$V2 = S2(z) \cdot Z2 - S2(z) \cdot Z1, \quad (15)$$

$$V2 = S2(z) \cdot F, \quad (16)$$

$$V2 = \int_{z1}^{z2} S2(z)dz. \quad (17)$$

Полученные зависимости между такими технологическими параметрами как: D – диаметр фрезы, r – радиус скругления режущей кромки фрезы, at – угол атаки фрезы, F – скорости подачи фрезы, S и V – площади и объема снимаемого материала, а также функциями, описывающими геометрию заготовки, были использованы при создании программного модуля «Turbo_Profile.Section_30».

При использовании данной программы, технолог-программист при задании исходных данных для обработки детали фрезами указанного вида имеет возможность:

1. Задав параметры фрезы, угол атаки, шаг между строками фрезерования, функции глубины съема материала и скорость подачи определить количество снимаемого материала в единицу времени для первого и последующих проходов фрезы.
2. Задав параметры фрезы, угол атаки, шаг между строками фрезерования, функции глубины съема материала и количество снимаемого материала в единицу времени определить необходимую для этого скорость подачи для первого и последующих проходов фрезы.
3. Определить угол атаки или шаг между строками таким образом, чтобы при заданной скорости подачи количество снимаемого материала в единицу времени было определенной величины.

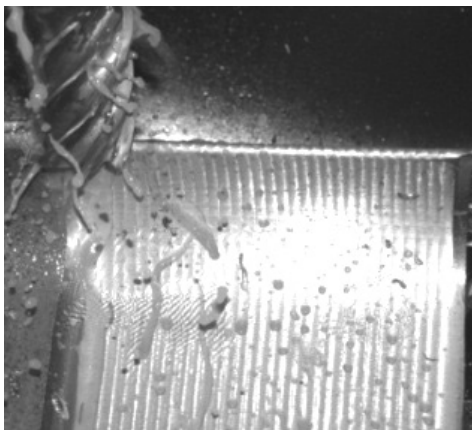


Рис. 5. Вид обработанной рабочей поверхности турбинной лопатки

Все расчеты можно произвести как для первого, так и для последующих проходов фрезы.

Выводы. Применение программного модуля «Turbo_Profile.Section_30» позволяет разработчику управляющих программ уменьшить машинное время обработки, без снижения качества рабочей поверхности за счёт близких к оптимальным технологическим параметров. Например, при обработке турбинной лопатки (см. рис. 5) машинное время обработки снижено на 10...15 %. Повышение производительности обработки, при одновременном обеспечении требуемого качества обрабатываемой поверхности и стойкости инструмента, зависит от многих параметров и, являясь достаточно сложной задачей, требует дальнейших исследования.

Литература

1. Гайдар, В.А. Автоматический расчет технологических параметров фрезерной обработки турбинных лопаток [Текст] / В.А. Гайдар // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 4 (10). – С. 54–56.

2. Савелов, А.А. Плоские кривые: Систематика, свойства, применения [Текст] / А.А. Савелов. – М.: Физматгиз, 1960. – 293 с.
3. Марчук, Г.И. Методы вычислительной математики [Текст] / Г.И. Марчук. – М.: Наука, 1989. – 390 с.
4. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 408 с.
5. Бахвалов, Н.С. Численные методы [Текст] / Н.С. Бахвалов. – М.: Наука, 1973. – 283 с.
6. Пиеничный, Б.Н. Численные методы в экстремальных задачах [Текст] / Б.П. Пиеничный, Ю.М. Данилин. – М.: Наука, 1975. – 320 с.

© В.А. Гайдар, С.Г. Ясько

В.О. Гайдар, начальник відділу програмної обробки

ПАТ «Полтавський турбомеханічний завод», концерн «Укрросметалл», м. Полтава

С.Г. Ясько, ст. викл.

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК КІНЦЕВИМИ І ТОРЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ З ПОСТІЙНОЮ У ЧАСІ КІЛЬКІСТЮ МАТЕРІАЛУ, ЩО ЗНИМАЄТЬСЯ

Наводиться методика розрахунку у програмному модулі «Turbo_Profile.Section_30» залежності між: кількістю знятого металу за одиницю часу, параметрами фрези, кутом атаки фрези при обробці, кроком між проходами обробки, товщиною шару, що зрізується, та режимами різання. Такий розрахунок необхідний при підготовці керуючих програм для верстатів з ЧПК при режимі обробки з постійним у часі об'ємом знятого матеріалу заготовки для отримання стабільного (по навантаженню на інструмент) та оптимального (за часом обробки) фрезерування деталі. Вказаний режим фрезерування є ефективним при чорновій обробці деталі, коли товщина знятого шару може суттєво змінюватись.

Ключові слова: турбінна лопатка, фрезерування, режим обробки, технологія, програма, верстат, керування.

V.A. Gaidar, Head of the Department of Software Processing

PJSC «Poltava Turbomechanical plant», concern «Ukrrosmetall», Poltava

S.G. Yasko, Senior Lecturer

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk

CALCULATION OF OPTIMUM CONDITIONS FOR MILLING END MILLS AND FACE MILLS FOR CNC MACHINES WITH A CONSTANT AMOUNT OF CUT MATERIAL PER UNIT OF TIME

Methodology is given in calculating software module «Turbo_Profile.Section_30» relationship between: the number of captured metal per unit time, the parameters of cutter, angle cutter attack in the processing step of processing between passes, thickness of layer, trimmed and cutting conditions. This calculation requires the preparation of programs for CNC machines for processing mode with time constant volume of footage for sustainable harvesting (the load on the tool) and optimal (time processing) milling parts. The specified mode is effective for milling roughing treatment details when skim layer thickness can vary significantly.

Keywords: turbine shoulder-blade, milling, mode of treatment, technology, program, machine-tool, management.