

1. Квазианалоговые испытания штамповых сталей // Производство и исследование быстрорежущих и штамповых сталей /Б.Ф.Трахтенберг, И.И.Векслин, М.С.Кенис и др. М.: Металлургия, 1970. С.98-103.
2. Трахтенберг Б.Ф., Котельников Г.А., Подколзин М.И. и др. Квазианалоговый подход при исследовании твердых сплавов для инструмента горячего деформирования // Твердые сплавы и тугоплавкие металлы. М.: Металлургия, 1973. С.136-140.
3. Ларин М.Н. Вопросы рациональной эксплуатации сверл. //Спиральные сверла. М., 1966. С. 5-22.
4. Басов В.В., Берляев Б.В., Черемисин А.С. Исследование обрабатываемости автоматных сталей АС35Г2 и АС11 на Волжском автомобильном заводе //Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов /Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1976. С. 21-23.
5. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1974. 240 с.
6. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математическая статистика в технике. М.: Наука, 1969. 512 с.

УДК 621.91.01

В.И.Петров, М.А.Никитин, А.Л.Меньшов

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МНОГОГРАННЫХ ОТВЕРСТИЙ
МЕТОДОМ ВРЕЗАНИЯ

Изложены основные положения разработанной теории обработки многогранных отверстий в нежестких конструкциях. Рассмотрены различные варианты такой обработки и показана возможность оптимизации режимов резания и геометрических и динамических параметров технологической системы.

ВАН 5-230-16902-8. Методы обработки авиаматериалов. Самара, 1991

Проблема формирования большого числа некруглых правильных многогранных отверстий в жестких конструкциях корпусов летательных аппаратов методом врезания сводится к разработке режущего инструмента и малогабаритной планетарной передачи, обеспечивающей требуемую кинематику. Заданная форма таких отверстий может быть получена лишь при вращении инструмента вокруг своей оси, которая, в свою очередь, вращается вокруг неподвижной оси, ей параллельной [1].

Теорию обработки многогранных отверстий в обечайках летательных аппаратов рассмотрим на примере четырехгранного отверстия. Для его получения необходимо, чтобы векторы переносной $\bar{\omega}$ и относительной $\bar{\omega}_1$ угловых скоростей режущих кромок инструмента были связаны соотношением

$$\bar{\omega} = -3\bar{\omega}_1. \quad (1)$$

Такой закон движения может быть реализован с помощью планетарной передачи, состоящей из водила и двух шестерен с внутренним зацеплением: сателлита, на оси которого закреплен инструмент, и неподвижного эпицикла. В этом случае с учетом (1) параметрические уравнения траекторий точек режущих кромок, расположенных по радиусу фрезы, будут иметь вид

$$\begin{aligned} x(t) &= e \sin \omega t - z \sin(\omega_1 t + 2\pi(i-1)/3), \\ y(t) &= -e \cos \omega t + z \cos(\omega_1 t + 2\pi(i-1)/3), \end{aligned} \quad (2)$$

где e - смещение (эксцентриситет) оси инструмента относительно оси шпинделя; z - расстояние от оси инструмента до рассматриваемой точки i -й ($i = 1, 2, 3$) режущей кромки, $0 < z < R$, где R - наружный радиус фрезы по вершинам режущих кромок; t - время.

Эксцентриситет e следует оптимизировать, взяв за целевую функцию среднее квадратическое отклонение сформированного профиля отверстия от профиля, заданного чертежом:

$$4\Phi = \left(\frac{1}{\tau_1} \int_0^{\tau_1} (a - y(t))^2 dt + \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \int_{\tau_1}^{\tau_2} (\rho - \sqrt{(x(t) - a - \rho)^2 + (y(t) - a + \rho)^2})^2 dt \right)$$

где $x(t), y(t)$ - координаты профиля, определяются по (2) при $z=R$; a - длина стороны отверстия; $\tau = 3\pi/4\omega$; τ_1 - момент времени, в который вершина режущей кромки находится в точке сопряжения прямолинейного участка профиля с дугой окружности радиуса ρ в углах отверстия, является корнем уравнения

$$4e \sin^3(\omega t/3) - (3e+R) \sin(\omega t/3) + a - \rho = 0.$$

При этом диапазон изменения определяется неравенством

$$e \leq (\sqrt{2}-1)(a-2\rho)/4,$$

а радиус R связан с эксцентриситетом e соотношением

$$R = (\sqrt{2}+1)e / (\sqrt{2}-1) + \rho.$$

На основании уравнений (2) проекции вектора скорости резания на координатные оси x и y по длине режущих кромок изменяются по закону

$$\dot{x}(t) = e\omega \cos \omega t - z\omega_1 \cos(\omega_1 t + 2\pi(i-1)/3), \quad (3)$$

$$\dot{y}(t) = e\omega \sin \omega t - z\omega_1 \sin(\omega_1 t + 2\pi(i-1)/3).$$

Таким образом, с учетом (1) и (3) модуль вектора скорости резания

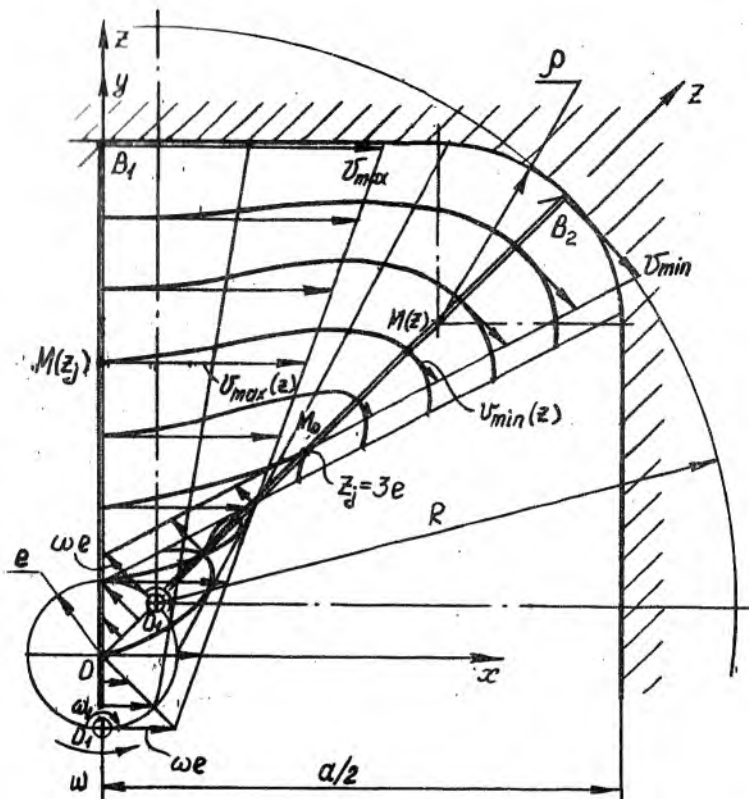
$$v^*(z) = \omega \sqrt{e^2 + \frac{2}{3} e z \cos \frac{4\varphi + 2\pi(i-1)}{3} + \frac{z^2}{9}}, \quad (4)$$

где $\varphi = \omega t$.

Анализ зависимости (4) показывает, что экстремальные значения скорости резания (рис. 1)

$$v_{max} = \omega(z/3 + e), \quad (5)$$

$$v_{min} = \omega(z/3 - e). \quad (6)$$



Р и с. 1. Эпюры максимальных и минимальных скоростей резания соответствуют угловым расположениям режущих кромок, определяемым по формулам

$$\varphi(v_{max}) = (3n + 1 - i)\pi/2; \quad \varphi(v_{min}) = (6n + 5 - 2i)\pi/4.$$

$$n = 0, 1, \dots$$

Далее из (6) вытекает, что в точке M_0 , координата которой $x = 3e$, скорость резания равна нулю и при переходе через эту точку меняет знак

Таким образом, резание будет реализовано, если расстояния режущих кромок от оси инструмента удовлетворяют неравенствам

$$[R] < z \leq R,$$

где $[R] = \beta e$.

Однако может оказаться, что для обрабатываемого материала процесс резания удовлетворителен только в тех случаях, если допустимая минимальная скорость резания, реализуемая в точках режущих кромок с координатами $z > [R]$, не более чем в κ раз меньше максимальной скорости резания в точках с координатой $z = R$. Тогда область рабочих скоростей резания

$$v_{max}(R)/\kappa \leq v \leq v_{max}(R),$$

а соответствующая ей нижняя граница рабочего участка режущих кромок (минимальное расстояние их вершин от оси фрезы) равна

$$z = (\beta e (\kappa - 1) + R) / \kappa. \quad (7)$$

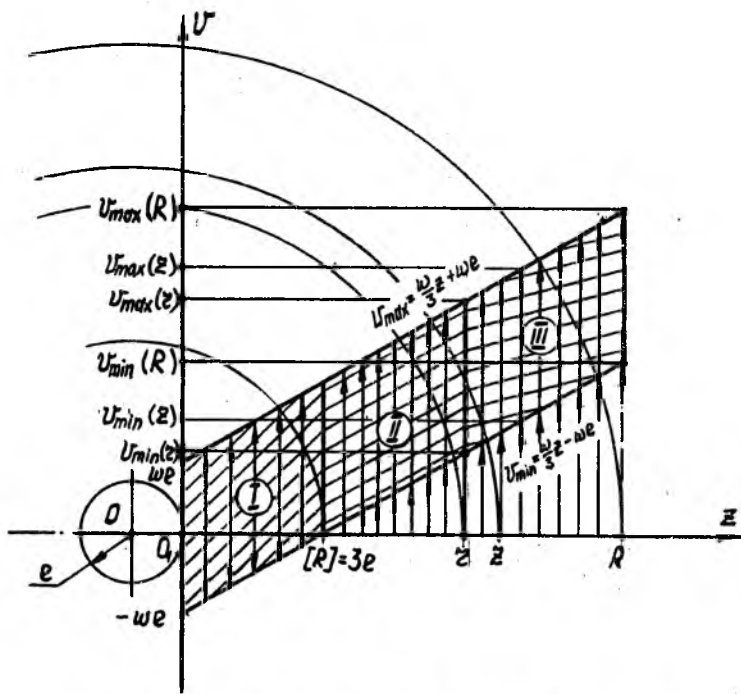
На основании вышеизложенного, с учетом формул (5), (6) и (7), всю область возможных скоростей резания можно разбить на три области (рис. 2): в области I, определяемой координатами $0 < z < [R]$, наличие режущих кромок недопустимо; в области II, для которой $[R] < z < z$, резание возможно, но нежелательно, и в области III с координатами

$$z \leq z \leq R \quad (8)$$

имеют место оптимальные скорости резания.

Изложенные выше особенности реализации оптимальных скоростей резания приводят к двум возможным вариантам формирования многогранных отверстий (рис. 3). Первый вариант предусматривает работу трехперого инструмента в гладкой обечайке, при этом в резании участвует вся режущая кромка, координаты z точек которой удовлетворяют неравенству (8). Во втором варианте в обечайке предварительно, например специальным зенкером, формируется круглое отверстие радиусом

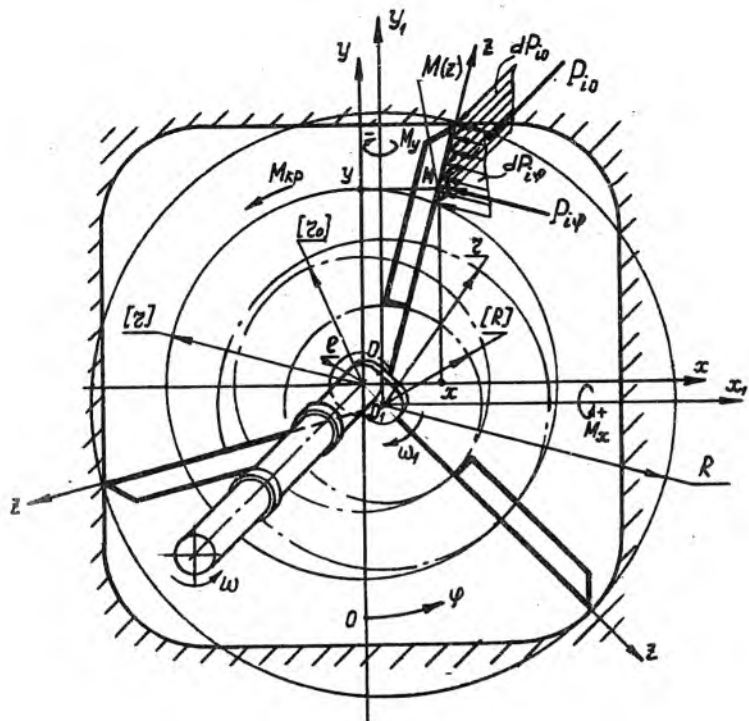
$$[z] = z + e,$$



Р и с. 2. Область возможных скоростей резания

где Z параметр определяется по формуле (7). При этом длина рабочего участка режущей кромки является величиной переменной. Однако в обоих случаях возникающие силы резания изменяются во времени.

Действующую на каждую режущую кромку силу резания можно разложить на тангенциальную, радиальную и осевую составляющие. При обработке многогранных отверстий методом врезания радиальная составляющая значительно меньше тангенциальной и осевой, поэтому в первом приближении ее можно исключить из рассмотрения. Тогда выражения для определения законов изменения сил резания и моментов от этих сил относительно выбранных координатных осей Z и Y будут иметь вид



Р и с. 3. Схема сил резания

$$P_{\varphi}(t) = \sum_{i=1}^3 \int_{a_i(t)}^R C_{P_{\varphi}}(v(z)) S_z^{\mu(v(z))} dz,$$

$$P_0(t) = \sum_{i=1}^3 \int_{a_i(t)}^R C_{P_0}(v(z)) S_z^{\mu(v(z))} dz,$$

$$M_{кр}(t) = \sum_{i=1}^3 \int_{a_i(t)}^R z C_{P_{\varphi}}(v(z)) S_z^{\mu(v(z))} dz,$$

$$M_{x\varphi}(t) = \sum_{i=1}^3 \int_{a_i(t)}^R y C_{P_0}(v(z)) S_z^{\mu(v(z))} dz,$$

$$M_y(t) = \sum_{i=1}^3 \int_{a_i(t)}^R x C_{p0}(\psi(z)) S_z^{\mu(\psi(z))} dz. \quad (9)$$

Здесь $C_{p\varphi}$, C_{p0} и μ — параметры, характеризующие обрабатываемость материала обечайки, зависят не только от его физико-механических свойств, но и скорости резания v . Скорость резания, также как и координаты x и y текущей точки i -й режущей кромки, являются функциями координаты z и времени t и определяются по формулам (4) и (2) соответственно. Осевая подача на зуб фрезы S_z численно равна толщине среза.

Верхний предел интегрирования в (9) всегда постоянен и равен радиусу фрезы R , а нижний предел $a_i(t)$ в общем случае является функцией угловой координаты $\varphi = \omega t$. Причем если обработка ведется по второму варианту, т.е. в обечайке предварительно сформировано круглое отверстие радиусом $[z]$, то a_i определяется из квадратного уравнения

$$a_i^2 - 2a_i e \cos \frac{4\varphi(t) + 2\pi(i-1)}{3} + e^2 - z^2 = 0.$$

Из двух корней этого уравнения имеет смысл лишь положительный корень.

Если же инструмент работает по первому варианту (без предварительного отверстия), то $a_i(t) = z_{min}$. Здесь z_{min} — минимальное расстояние точек режущих кромок от оси фрезы, которое в зависимости от конструктивного исполнения инструмента может лежать в диапазоне от $[R]$ до z . Это означает, что если $z_{min} = R = 3e$, то скорость резания ближней к оси фрезы вершины режущей кромки равна нулю, а при $z_{min} = z$, если z определяется по формуле (7), скорость $v = v_{max}(R)/\kappa$. Траектория этой величины описывается уравнениями (2), в которые вместо x в первом случае следует подставить $x = [R]$, во втором — $x = z$.

Динамичность законов (9) определяет уровень вибраций инструмента, фрезерной головки и обрабатываемой нежесткой обечайки и характеризует виброактивность зоны резания, которую при формировании

четырёхгранных отверстий рассматриваемым методом врезания количественно можно оценить средней мощностью колебательного процесса сил резания и порождаемых ими крутящего и изгибающего моментов:

$$\tilde{M}_{KP}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T M_{KP}^2(t) dt, \quad \tilde{P}_0^2 = \frac{1}{T} \int_0^T P_0^2(t) dt, \dots$$

где $T = 60/n$ — время одного оборота волила планетарной передачи, соответствующее трем оборотам режущего инструмента, а n — частота вращения волила.

В тех случаях, когда известны динамические параметры модулей технологической системы и в том числе обрабатываемой обечайки, для оценки виброактивности зоны резания можно воспользоваться, например, критерием спектра [2]. Этот спектр определяется агрессивными гармоническими составляющими сил резания, частоты которых наиболее близки к доминирующим частотам модулей технологической системы.

Таким образом, используя полученные выше кинематические и силовые зависимости, можно определиться не только с оптимальными режимами резания, но и с геометрическими и динамическими параметрами технологической системы, применяя для оценки ее виброустойчивости коэффициенты относительной жесткости, диссипации и антирезонанса [2].

Библиографический список

1. К о к и ч е в В.Н. Современные способы изготовления многогранных отверстий. Л.: Судпромиздат, 1955.
2. П е т р о в В.И. Критерии оценки виброактивности зоны резания и виброустойчивости фрезерных технологических систем //Прогрессивные инструменты и методы обработки резанием авиационных материалов: Сб. науч. тр. /Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989.