

УДК 621.914.2

О РАСЧЕТЕ КИНЕМАТИКИ РОТАЦИОННОГО РЕЗАНИЯ**Краснощек Ю.С., канд. техн. наук***(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко)*

Предложена универсальная методика анализа кинематики резания вращающимся резцом. Это дает возможность сопоставлять технические параметры различных схем ротационного и свободнообкатного резания.

В современной металлообработке применяется большое количество разновидностей режущих инструментов для выполнения различных технологических операций. Большинство этих инструментов работает на принципе скольжения между их режущей частью, сбегаящей стружкой и обработанной поверхностью. Скорость относительного скольжения существенно влияет на энергетические затраты процесса резания, стойкость инструмента, качество обработанной поверхности.

Значительное повышение стойкости инструмента и производительности обработки можно получить за счет уменьшения скорости относительного скольжения в контактных зонах инструмента с обрабатываемым материалом. Это достигается заменой скольжения на качение режущей части инструмента и обработанной поверхности. Принцип качения при резании можно реализовать инструментами, режущая часть которых имеет форму тела вращения. В настоящее время созданы различные конструкции круглых вращающихся резцов.

Среди методов механической обработки с вращающимися резцами известны процессы ротационного резания [1], которое длительное время находит применение в металлообработке, и свободнообкатное резание [2]. Преимуществом ротационного резания в сравнении с традиционными методами лезвийной обработки является повышение стойкости инструмента от 2 до 10 раз [1] вследствие увеличения длины активного участка лезвия инструмента, дополнительного перемещения его режущего лезвия относительно зоны резания, замены в той или иной мере трения скольжения в контактных зонах на трение качения, что активизирует теплоотвод из зоны резания и снижает температуру резания.

Известно множество кинематических схем ротационного резания (РР) отечественных и зарубежных авторов. Проведенный обзор работ [1] показывает, что многие авторы использовали индивидуальный подход к анализу кинематики схем РР; это значительно затрудняет, а чаще делает невозможным сравнение вышеупомянутых схем по количественным и качественным показателям.

Настоящая работа является попыткой авторов провести кинематический анализ простейшей схемы ротационного точения (РТ) методами классической механики [3]. Это, по нашему мнению, позволит другим авторам рассматривать различные схемы РР, а также свободнообкатного резания в единых координатах и параметрах, что значительно упростит кинематические исследования схем РР, свободнообкатного резания и сравнение их по многим техническим параметрам.

Рассмотрим типовую схему РТ (рис.) во фронтальной плоскости. Ось вращения инструмента скрещивается (не пересекается) с осью вращения заготовки под углом ν . Передней поверхностью резца является торец режущей чашки. Такая схема установки резца общепринято названа «обратной» [1]. Для упрощения дальнейшего изложения, угол скрещивания осей ν задаем только во фронтальной плоскости.

Кинематическая модель РТ (рис.) следующая. Ротационный резец 2 чашечной формы с круговой режущей кромкой 4, имеющий возможность свободного вращения в своих опорах, подводят на глубину резания t к обрабатываемой поверхности заготовки 1, которой сообщают вращательное движение круговой подачи $D_{s\text{кр}}$ в положительном направлении (против часовой стрелки), а резцу сообщают движение продольной подачи D_s . После контакта режущей кромки 4 со срезаемым слоем, поверхность резания 3 ведет за собой резец и он совершает равномерное стационарное главное вращательное движение резания D_r в ту же сторону, что и заготовка. При этом не учитываем динамику процесса, а сцепление поверхности резания с режущей кромкой резца считаем идеальным. В результате реализации схемы РТ получаем обработанную поверхность 3 цилиндрической формы.

Правомерность, приведенной выше классификации рабочих движений РТ обоснована при исследовании свободнообкатного резания [4]. Действительно, круговой профиль обработанной поверхности 3 получаем в результате двух обкатных движений – главного вращательного движения резца D_r и движения круговой подачи заготовки $D_{s\text{кр}}$, а образующая поверхности 3 формируется в результате обкатного главного движения резания инструмента D_r и движения продольной подачи инструмента D_s .

Скоростью резания РТ, по аналогии со свободнообкатным резанием [4], считаем скорость проскальзывания режущей кромки относительно поверхности резания в процессе геометрического суммирования векторов скоростей главного вращательного движения резца и круговой подачи заготовки. Такая трактовка скорости резания известна и при других видах обработки, например, при шевинговании.

Для кинематического анализа схемы РТ (рис.) введем декартову систему координат XYZ . Начало отсчета совместим с точкой O , расположенной на оси вращения инструмента в торцевой плоскости режущей кромки. Ось OY направим параллельно оси вращения образующей обработанной поверхности 3 в сторону противоположную подаче D_s , ось OZ – вертикально вверх, а ось OX –

перпендикулярно первым двум, при этом орты i, j, k координатных осей OX, OY, OZ образуют правую тройку.

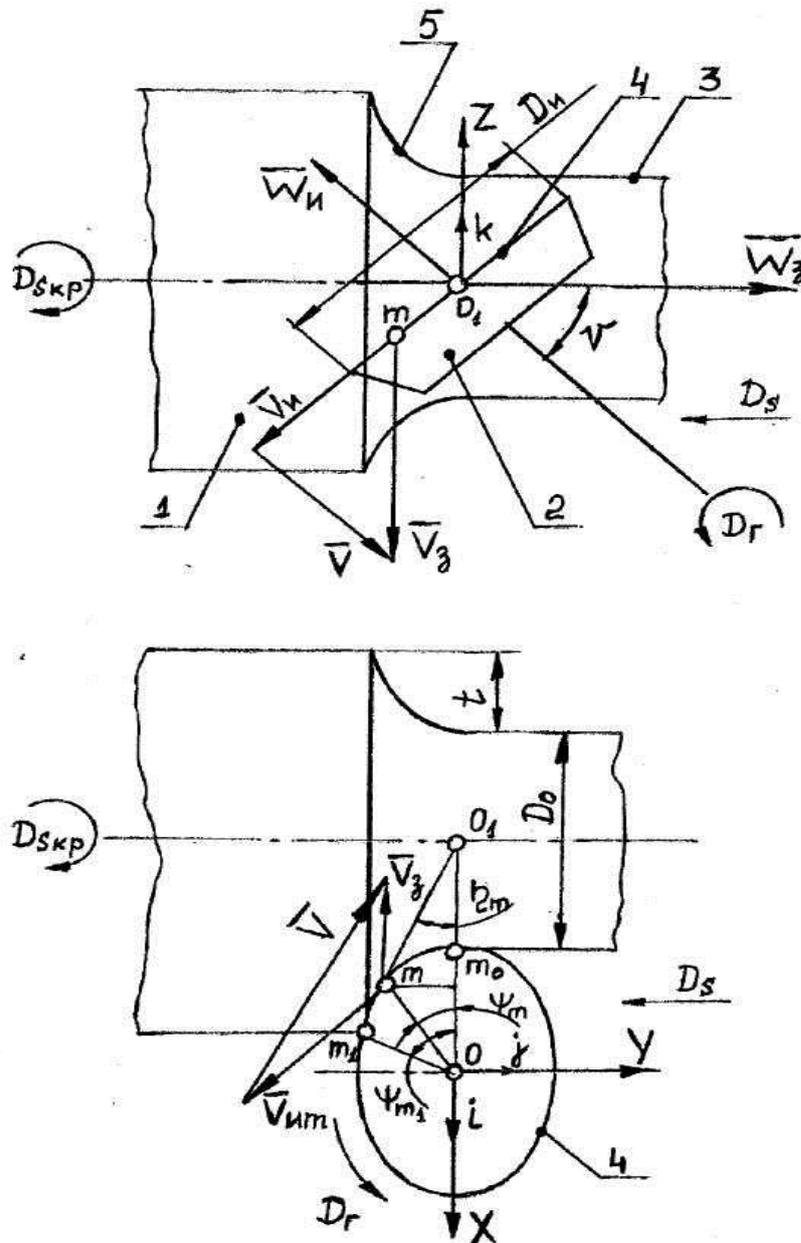


Рисунок 1 - Схема ротационного точения

Рассмотрим перемещение произвольной точки контакта m режущей кромки с поверхностью резания, принадлежащей твердому телу (инструменту), вращающемуся вокруг неподвижной оси с угловой скоростью \overline{W}_u . Положение точки m определяется угловой координатой ψ_m , отсчитанной от своего крайнего поперечного положения m_o (вершины ротационного резца [1]) в сторону вращения инструмента. Радиус-вектор \overline{r} (на рис. не обозначен) проведем из начала отсчета O в рассматриваемую точку m . В результате вращения инструмента вокруг своей неподвижной оси рассматриваемая точка m режущей

кромки имеет окружную скорость, вектор которой \bar{V}_{um} направлен по касательной к траектории точки m .

Желая соединить с понятием угловой скорости представление о направлении оси, вокруг которой происходит вращение инструмента, введем вектор угловой скорости [2], модуль которого определяется как производная от угловой координаты ψ_m по времени τ $|\bar{W}_u| = \frac{d\psi_m}{d\tau}$.

Направление вектора угловой скорости необходимо связать с осью вращения инструмента – единственным неизменным направлением во вращающемся твердом теле, при этом также необходимо указать, в какую сторону по оси вращения направлен вектор \bar{W}_u . Общепринято [3] направлять вектор угловой скорости \bar{W}_u по оси вращения так, чтобы наблюдатель, смотрящий с конца вектора \bar{W}_u , видел вращение инструмента в положительном направлении, т.е. против часовой стрелки, при правой системе координат XYZ . Рассматривая угловую скорость как вектор, откладываемый по оси вращения инструмента, можно определить вектор окружной скорости \bar{V}_{um} произвольной точки контакта m вращающегося тела по «векторной формуле Эйлера», как векторное произведение вектора угловой скорости на радиус-вектор этой точки относительно любой точки на оси вращения, в том числе и начала отсчета – точки O

$$\bar{V}_{um} = \bar{W}_u \times \bar{r}. \quad (1)$$

Векторное произведение (1) можно расписать через определитель вида

$$\bar{V}_{um} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ W_{ux} & W_{uy} & W_{uz} \\ X & Y & Z \end{vmatrix} = i(W_{uy} \cdot Z - W_{uz} \cdot Y) + j(W_{uz} \cdot X - W_{ux} \cdot Z) + k(W_{ux} \cdot Y - W_{uy} \cdot X), \quad (2)$$

где W_{zx} , W_{zy} , W_{xz} - проекции вектора угловой скорости соответственно на оси координат OX , OY , OZ ; а X , Y , Z – координаты конца радиуса-вектора на те же оси (на рис. не показаны).

Таким образом, в (2) сомножители при единичных векторах i, j, k являются проекциями вектора скорости \bar{V}_{um} произвольной точки m контакта режущей кромки соответственно на координате оси OX , OY , OZ

$$V_{umx} = W_{uy} Z - W_{uz} Y, \quad (3)$$

$$V_{umy} = W_{uz} X - W_{ux} Z, \quad (4)$$

$$V_{umz} = W_{ux} Y - W_{uy} X. \quad (5)$$

Проекции вектора угловой скорости \bar{W}_u на координатные оси можно записать в виде

$$\bar{W}_{ux} = 0, \quad W_{uy} = -|\bar{W}_u| \cdot \cos \nu, \quad W_{uz} = |\bar{W}_u| \cdot \sin \nu, \quad (6)$$

а координаты конца радиуса-вектора \bar{r} на те же оси – в виде

$$X = -|\bar{r}| \cdot \cos \psi_m; \quad Y = -|\bar{r}| \cdot \sin \psi_m \cdot \sin \nu; \quad Z = -|\bar{r}| \cdot \sin \psi_m \cdot \cos \nu. \quad (7)$$

Подставляя значения (6) и (7) в (3) ... (5) получим выражения для проекций вектора окружной скорости \bar{V}_{um} точки m на координатные оси в следующем виде:

$$V_{umx} = |\bar{W}_u| \cdot |\bar{r}| \cdot \sin \psi_m, \quad (8)$$

$$V_{umy} = -|\bar{W}_u| \cdot |\bar{r}| \cdot \cos \psi_m \cdot \sin \nu, \quad (9)$$

$$V_{umz} = -|\bar{W}_u| \cdot |\bar{r}| \cdot \cos \psi_m \cdot \cos \nu. \quad (10)$$

где модуль радиуса-вектора равен $|\bar{r}|$ равен

$$|\bar{r}| = 0,5 D_u. \quad (11)$$

Теперь рассмотрим перемещение той же произвольной точки контакта m , но принадлежащей поверхности резания 5 заготовки I (рис.), являющейся твердым телом, вращающимся вокруг своей неподвижной оси с угловой скоростью \bar{W}_3 . На оси вращения заготовки выберем характерную точку O_1 , расположенную нормально к вершине ротационного резца – точке m_o , и из нее проведем радиус-вектор \bar{r}_1 (на рис. не обозначен) в рассматриваемую точку m . Здесь положение точки m определяется угловой координатой η_m , отсчитанной от своего крайнего положения m_o в сторону вращения инструмента. В результате вращения заготовки вокруг своей неподвижной оси рассматриваемая точка m , принадлежащая поверхности резания, имеет скорость, вектор которой \bar{V}_{3m} направлен по касательной к траектории этой точки, представляющей собой сложную спиральную линию, расположенную на поверхности резания.

Проекции вектора \bar{V}_{3m} на координатные оси OX , OY , OZ определим аналогично (3) ... (5)

$$V_{3mx} = W_{3y} \cdot Z_1 - W_{3z} \cdot Y_1, \quad (12)$$

$$V_{3my} = W_{3z} \cdot X_1 - W_{3x} \cdot Z_1, \quad (13)$$

$$V_{3mz} = W_{3x} \cdot Y_1 - W_{3y} \cdot X_1. \quad (14)$$

Проекции вектора угловой скорости \bar{W}_3 на координатные оси будут иметь вид

$$W_{3x} = 0, \quad W_{3y} = |\bar{W}_3|, \quad W_{3z} = 0. \quad (15)$$

Координаты конца радиуса-вектора \bar{r}_1 на те же оси запишем с учетом его направленности, которая к оси OX имеет положительное направление, а к осям OY и OZ – отрицательное

$$X_1 = |\bar{r}_1| \cdot \cos \eta_m; Y_1 = -|\bar{r}_1| \cdot \sin \eta_m \cdot \sin \nu; Z_1 = -|\bar{r}_1| \cdot \sin \eta_m \cdot \cos \nu. \quad (16)$$

Подставляя значения (15) и (16) в (12) ... (14) получим выражения для проекций вектора скорости \bar{V}_{zm} на координатные оси

$$V_{zmx} = -|\bar{W}_3| \cdot |\bar{r}_1| \cdot \sin \eta_m \cdot \cos \nu, \quad (17)$$

$$V_{zmy} = 0, \quad (18)$$

$$V_{zms} = -|\bar{W}_3| \cdot |\bar{r}_1| \cdot \cos \eta_m, \quad (19)$$

где модуль радиуса-вектора равен $|\bar{r}_1|$ равен

$$|\bar{r}_1| = 0,5 \sqrt{[D_o + D_u(1 - \cos \psi_m)] + D_u^2 \cdot \sin^2 \psi_m}, \quad (20)$$

а угол η_m можно выразить через угол ψ_m и геометрические параметры схемы РТ

$$\cos \eta_m = \frac{0,5 [D_o + D_u(1 - \cos \psi_m)]}{|\bar{r}_1|}. \quad (21)$$

В точке контакта m определим вектор скорости проскальзывания \bar{V} поверхности резания 5 относительно режущей кромки 3 (рис.) как геометрическую разность векторов \bar{V}_{zm} (8) ... (10) и \bar{V}_{um} (17) ... (19)

$$\bar{V} = \bar{V}_{zm} - \bar{V}_{um} \quad (22)$$

и запишем ее в виде проекций на координате оси

$$V_x = -\sin \psi_m \left(|\bar{W}_u| \cdot |\bar{r}| - |\bar{W}_3| \cdot |\bar{r}_1| \cdot \frac{\sin \eta_m}{\sin \psi_m} \cdot \cos \nu \right); \quad (23)$$

$$V_y = |\bar{W}_u| \cdot |\bar{r}| \cdot \cos \psi_m \cdot \sin \nu; \quad (24)$$

$$V_z = -\cos \psi_m \left(|\bar{W}_3| \cdot |\bar{r}_1| \cdot \frac{\cos \eta_m}{\cos \psi_m} - |\bar{W}_u| \cdot |\bar{r}| \cdot \cos \nu \right). \quad (25)$$

Рассмотрим составляющую скорости проскальзывания V_x (23), которая расположена в плоскости режущей кромки. Более подробный анализ этой составляющей скорости был проведен при исследовании кинематики свободнообкатного резания [5], где она определена как скорость «стационарного

проскальзivanja». Сама по себе шкоровість «стационарного проскальзivanja» не може являтися складною частиною шкоровості резація, т.к. резація металлов с отходом стружки можливо тільки лише при умови напрямленості шкоровості на режущую кромку (передню поверхню резца), що в данному випадку не виконується.

В характерній точці контакту m_o , коли $\psi_{m_o} = 0$, $\eta_{m_o} = 0$, а $|r_1| = 0,5 D_o$, шкоровість «стационарного проскальзivanja» с учетом (11) и того факта, що математическая неопределенность $\frac{\sin \eta_{m_o}}{\sin \psi_{m_o}} = 1$ примет вид $|\bar{W}_u| \cdot 0,5 D_u - |\bar{W}_z| \cdot 0,5 D_o \cdot \cos \nu = 0$. Откуда определяются зависимости для угловой шкоровості інструмента от геометрических параметров и кинематических условий схемы РТ

$$|\bar{W}_u| = |\bar{W}_z| \frac{D_o}{D_u} \cdot \cos \nu. \quad (26)$$

Абсолютную величину шкоровості резація при РТ для любой точки контакту в зоні резація можно определить в виде

$$V = \sqrt{V_y^2 + V_z^2}. \quad (27)$$

Подставляя в (27) значения проекций шкоровості проскальзivanja (24) и (25), а также учитывая (11) и (26) получим

$$V = |\bar{W}_z| \cdot \cos \psi_m \sqrt{\left(|r_1| \frac{\cos \eta_m}{\cos \psi_m} - 0,5 D_o \cos^2 \nu \right)^2 + (0,5 D_o)^2 \cdot \sin^2 \nu \cdot \cos^2 \nu}. \quad (28)$$

Область существования шкоровості резація (28) при РТ определяется максимальным углом ψ_{m_1} дуги контакту $m_o m_{m_1}$ (рис.) режущей кромки с поверхностью резація, который можно выразить через геометрические параметры схемы

$$\arccos \psi_{m_1} = 1 - \frac{t}{0,5 D_u}. \quad (29)$$

На практике для расчета режимов резація РТ удобно использовать величину шкоровості резація в точке m_o , т.е. на вершине ротационного резца, когда углы $\psi_{m_o} = 0$, $\eta_{m_o} = 0$, а $|r_1| = 0,5 D_o$. При этом (29) примет вид

$$V(\psi_{m_o}, \eta_{m_o}) = |\bar{W}_z| \cdot 0,5 \cdot D_o \cdot \sin \nu. \quad (30)$$

В последней формуле модуль угловой скорости заготовки можно выразить через частоту ее вращения n_3 ,

$$|\overline{W}_3| = 2\pi n_3. \quad (31)$$

Тогда значение скорости резания в традиционном виде с учетом (31), а также коэффициента перевода значения диаметра D_o из миллиметров в метры, будет иметь вид

$$V = \frac{\pi D_o n_3}{1000} \cdot \sin \nu. \quad (32)$$

Для определения истинной скорости резания РТ в выражениях (28) и (32) необходимо учитывать скорость движения продольной подачи D_s и ее направление действия

$$V_s = \frac{|\overline{W}_3| \cdot S}{2\pi} = S \cdot n_3, \quad (33)$$

где S , мм/об – продольная подача резца.

Предложенная выше методика отличается простотой, универсальностью и, по мнению авторов, ее можно применить к любым схемам РР не зависимо от ориентации резцовой чашки и сочетания рабочих движений, что в значительной степени может облегчить сравнение различных схем РР по их техническим параметрам.

Кроме того, изложенный подход позволяет определить кинематические параметры РР в любой точке активной части режущей кромки, а также, при необходимости, любой активной точки на передней и задней поверхностях ротационного резца, что может значительно облегчить исследования динамики, стружкообразования, теплообмена и др. процессов, протекающих в зоне РР.

В дополнение отметим – все полученные кинематические зависимости РТ полностью совпадают с результатами аналогичных исследований, проведенных авторами для нескольких разновидностей схем процесса свободнообкатного резания [5], что свидетельствует об универсальности данной методики.

Список литературы:

1. Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А., Соусь А.В. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов. – Минск: Наука и техника. – 1972. – 272 с.
2. Патент RU 2311991С2, Российская федерация. Добровольский А.В., Дмитриев С.И. Способ высокоточной обработки сферической поверхности. – № 2004137691/02; Заявл. 23.12.2004; Оpubл. 10.12.2007, Бюл. № 34.
3. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. Т. 1. Статика и кинематика. – М.: Наука, 1982. – 352 с.

4. Добровольский А.В., Краснощек Ю.С. Обоснование кинематической модели свободнообкатного резания // Резание и инструмент в технологических системах. Международный научно-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. Вып. 74. – С. 126 ... 132.

5. Добровольский А.В., Краснощек Ю.С. Кинематика свободнообкатного резания с пересекающимися осями для обработки внутренних поверхностей // Резание и инструмент в технологических системах. Международный научно-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. Вып. 74. – С. 116 ... 125.

Аннотация

Про розрахунок кінематики ротаційного різання Ю.С. Краснощок

Запропонована універсальна методика аналізу кінематики різання обертаючим різцем. Це дає можливість порівнювати технічні параметри різних схем ротаційного й вільнообкатувального різання.

Abstract

Calculation of kinematics rotary cutting Krasnoshchok Y.

The Universal methods of kinematics of rotating rolled cutting analyze were suggested. It will make possible to compare the parameters of rotating and freely rolled cutting different schemes.