

УДК 621.91.04

АНАЛИЗ СХЕМЫ РОТАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ НЕКРУГЛЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

д-р техн. наук, проф. В.А. ДАНИЛОВ, А.Н. СЕЛИЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрена схема обработки некруглых цилиндрических поверхностей эксцентрично установленным относительно оси вращения круглым резцом. На основе аналитического исследования определена форма образуемой поверхности, исследовано влияние на неё геометрических и кинематических параметров схемы обработки, установлены зависимости для расчета рабочих углов режущей части резца и закономерности их изменения, обусловленные геометрией формируемой поверхности.

Введение

Профильные бесшпоночные соединения все шире применяют вместо шлицевых и шпоночных в трансмиссиях машин и механизмов, а также режущих и вспомогательных инструментах благодаря более высоким эксплуатационным характеристикам при меньшей стоимости изготовления [1]. Однако профильные соединения не нашли широкого применения в машиностроении, что обусловлено, в частности, недостаточной технологической отработкой процессов формообразования профильных поверхностей, а также отсутствием специализированного отечественного металлорежущего оборудования, режущих инструментов и контрольно-измерительных средств, необходимых для изготовления профильных деталей.

В связи с этим актуальна разработка прогрессивных схем формообразования, реализуемых на универсальных станках простыми по конструкции режущими инструментами.

При механической обработке некруглый профиль образуется вследствие непрерывного периодического изменения расстояния между осью вращения обрабатываемой заготовки и формообразующим элементом режущего инструмента. Например, при точении это достигается сообщением резцу возвратно-поступательного движения, согласованного с вращением заготовки. При этом частота возвратно-поступательного движения резца задается в m раз больше частоты вращения заготовки (где m - число выступов некруглого профиля), что создает неудовлетворительные динамические условия работы станка, ограничивает частоту вращения шпинделя и, следовательно, производительность обработки. Более эффективны схемы обработки некруглых профилей без возвратно-поступательных движений, например, вращающимися резцовыми головками, планетарного и ротационного точения [2].

Широкие технологические возможности, простая кинематика формообразования и несложный инструмент обуславливают широкое применение первой схемы, однако присущая ей прерывистость процесса резания отрицательно влияет на производительность и точность обработки.

Заслуживает внимания ротационное точение - высокоэффективный метод механической обработки деталей машин из различных конструкционных материалов, отличающийся высокой стойкостью инструмента. Он достаточно полно исследован применительно к обработке круглых цилиндрических и торцовых поверхностей [3, 4]. Представляют интерес схемы ротационного точения профильных валов некруглым или круглым эксцентрично установленным резцом. В обоих случаях при вращении резца вследствие непрерывного изменения расстояния между осью вращения заготовки и его режущей кромкой образуется некруглая поверхность. Сложность изготовления и заточки некруглых резцов ограничивают их применение, поэтому предпочтительна схема

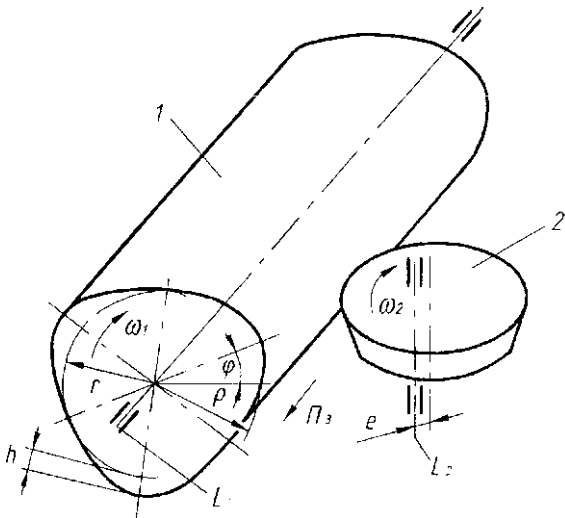


Рис. 1. Схема кинематического образования некруглого профиля

(рис. 1) ротационного точения круглым эксцентрично установленным относительно оси его вращения резцом [5], которая является предметом анализа.

Геометрия формируемого профиля

При сообщении резцу 2, установленному с эксцентриситетом e , и заготовке 1 согласованных вращательных движений вокруг скрещивающихся под прямым углом осей L_2 и L_1 соответственно и угловых

скоростей этих движений ω_2 и ω_1 , причем $\omega_2 / \omega_1 = m$, образуется поверхность, профиль которой описывается зависимостью:

$$r = r_{cp} - e \cos m\varphi, \tag{1}$$

где φ – текущее значение угла поворота резца; r_{cp} – средний радиус некруглого профиля, который определяется как $r_{cp} = r_0 + e$ (r_0 – радиус вписанной окружности) [5].

Величина m определяет количество конгруэнтных участков некруглого профиля.

Важное практическое значение имеет анализ зависимости геометрии формируемого профиля от параметров установки инструмента. Рассмотрим эту задачу.

Из конструктивных и технологических соображений предпочтителен профиль, у которого кривизна в каждой точке положительна. При выпуклой форме профиля отсутствуют ограничения на диаметр шлифовального круга. При наличии же вогнутых участков радиус круга не должен превышать радиус впадины профиля. Аналогичное ограничение имеет место при упрочнении пластическим деформированием с помощью накатного ролика. Кроме того, при выпуклой форме в меньшем диапазоне изменяются углы режущей части резца, что улучшает условия резания. Измерение вогнутой формы профиля также представляет определенные трудности, так как требуется специальный мерительный инструмент.

Определим условие, при котором кривизна в каждой точке положительна.

Формула для вычисления кривизны кривой, заданной уравнением в полярных координатах, имеет вид [6]:

$$K = \frac{\rho^2 + 2\rho'^2 - \rho\rho''}{(\rho^2 + \rho'^2)^{3/2}}, \tag{2}$$

где ρ – уравнение кривой в полярных координатах; ρ' – первая производная от ρ ; ρ'' – вторая производная от ρ .

На основании выражения (1) имеем:

$$\rho' = e \sin(m\varphi)m;$$

$$\rho'' = e \cos(m\varphi)m^2.$$

Подставив полученные значения ρ' и ρ'' в формулу (2), получим

$$K = \frac{(r_c - e \cos(m\varphi))^2 - 2(e \sin(m\varphi)m)^2 - (r_c - e \cos(m\varphi))(e \cos(m\varphi)m^2)}{((r_c - e \cos(m\varphi))^2 + (e \sin(m\varphi)m)^2)^{3/2}}. \tag{3}$$

Кривизна профиля равна нулю, если

$$(r_c - e \cos(m\varphi))^2 - 2(e \sin(m\varphi)m)^2 - (r_c - e \cos(m\varphi))(e \cos(m\varphi)m^2) = 0. \tag{4}$$

Изменение знака кривизны возможно в наименее удаленных от центра точках, в частности при $\varphi = 0$. Тогда формула (4) примет вид:

$$r_c^2 - 2r_c e + e^2 - r_c m^2 e + e^2 m^2 = 0. \tag{5}$$

Разделив выражение (5) на r_c^2 и разрешив его относительно $\frac{e}{r_c}$, получим

$$\frac{e}{r_c} = \frac{1}{m^2 + 1}. \tag{6}$$

Выражение (6) является граничным условием для определения выпуклости или вогнутости некруглого профиля, получаемого эксцентрично установленным ротационным резцом. Если во всех точках профиля $\frac{e}{r_c} < \frac{1}{m^2 + 1}$, то он является выпуклым. В точках, где $\frac{e}{r_c} > \frac{1}{m^2 + 1}$ – профиль вогнутый. Если же

$\frac{e}{r_c} = \frac{1}{m^2 + 1}$, то его кривизна равна нулю.

Рабочие углы инструмента

Для изучения механики стружкообразования и оценки условий работы инструмента с вращающейся режущей кромкой важно знать его рабочие углы. Особенностью ротационного точения некруглых валов (по рассматриваемой схеме) является то, что частота вращения резца в несколько раз больше частоты вращения заготовки (в зависимости от количества конгруэнтных участков некруглого профиля), вследствие чего окружная скорость резца в зоне контакта с заготовкой может превышать ее окружную скорость. При обычном ротационном точении самовращающимися и принудительно вращающимися резцами окружная скорость резца всегда меньше, чем заготовки [3, 4].

Процесс деформирования срезаемого слоя при превращении его в стружку и изнашивание контактных поверхностей инструмента определяется не величиной углов заточки, полученных при его изготовлении, а величиной рабочих углов, образованных при относительном рабочем движении инструмента в процессе резания. Угол наклона режущей кромки ротационного резца относительно вектора скорости резания в рассматриваемом случае зависит от количества выступов некруглого профиля. Это приводит к существенному различию величин рабочих и статических углов инструмента. Их различие настолько велико, что углы заточки ротационного резца не могут определять те физические процессы, которые происходят в зоне резания и на контактных поверхностях инструмента. Определение рабочих углов инструмента даны ниже на основании соответствующих положений кинематики резания.

На рисунке 2 представлена схема обработки некруглой поверхности ротационным резцом с отрицательным статическим углом наклона режущей кромки X , передняя поверхность которого является внутренней конической поверхностью чашки.

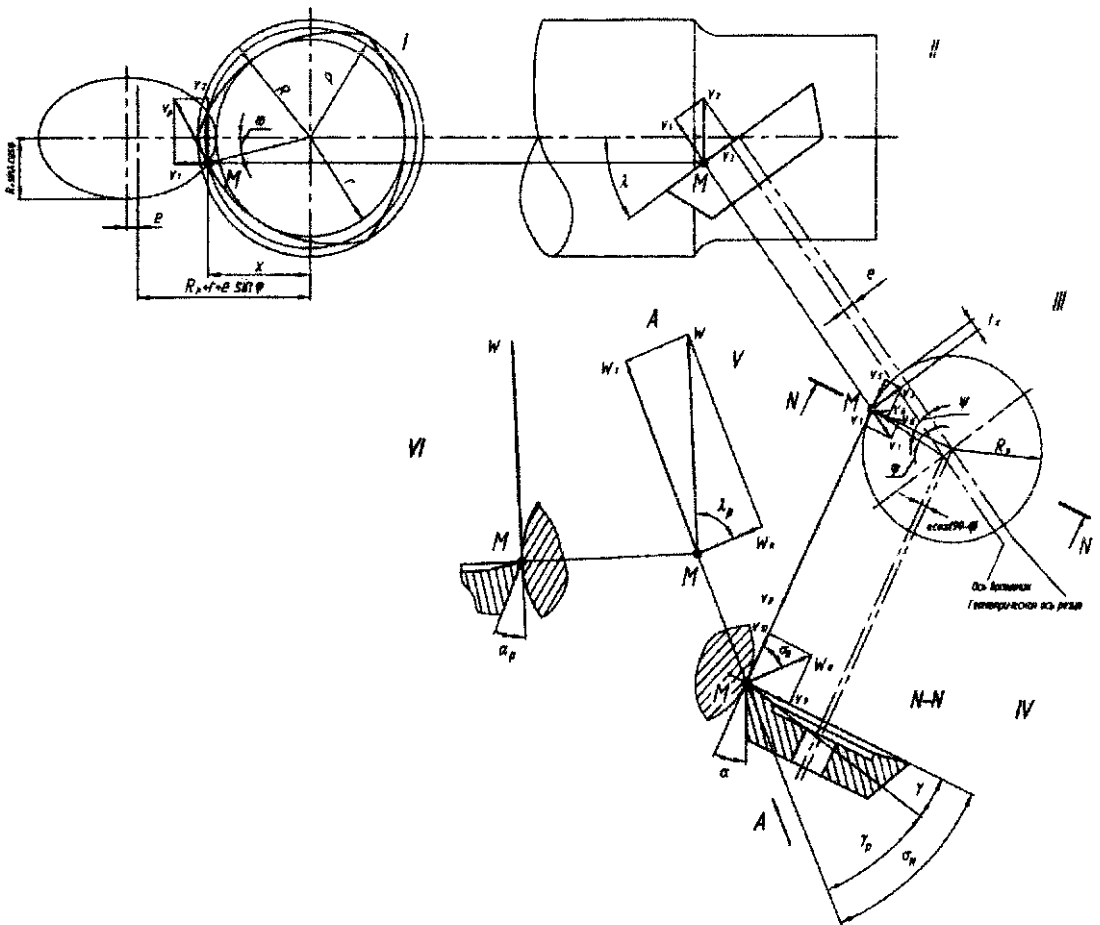


Рис. 2. Рабочие углы ротационного резца с передней внутренней конической поверхностью режущей чашки

Рабочий передний угол γ_p – это угол между плоскостью, перпендикулярной к вектору истинной скорости резания, и касательной к передней поверхности инструмента, проведенной в направлении, нормальном к режущей кромке.

Рабочий задний угол α_p инструмента, измеряемый в направлении вектора истинной скорости резания (направлении, совпадающем с траекторией относительного рабочего движения), представляет со-

бой угол между плоскостью, касательной к задней поверхности инструмента в точке главного лезвия, и плоскостью, касательной к поверхности резания в той же точке. Рабочий угол наклона режущей кромки λ_p – угол между касательной к кромке в данной точке и плоскостью, перпендикулярной к вектору истинной скорости резания [4].

Из рисунка 2 следует:

$$\gamma_p = \sigma_N - \gamma; \tag{7}$$

$$\operatorname{tg} \alpha_p = \operatorname{tg}(\alpha + \sigma_N) \cos \lambda_p. \tag{8}$$

В формулах (7) и (8) угол λ_p является рабочим углом наклона режущей кромки в данной точке кромки, а угол σ_N – вспомогательный, определяющий положение в пространстве проекции на плоскость, перпендикулярную к кромке, касательной к траектории рабочего движения точки режущей кромки.

Выберем произвольную точку M режущей кромки, положение которой определяется расстоянием x относительно линии центров, и углом ω , определяющим ее положение на поверхности резания, и найдем в этой точке рабочие углы α_p , γ_p и λ_p . Любая точка режущей кромки участвует в следующих движениях: вращательном движении резания со скоростью резания \vec{v}_p ; движении подачи со скоростью \vec{s}_v ; вращательном движении резца вокруг оси, не совпадающей с его геометрической осью, со скоростью \vec{v}_r . Скорость вращения резца пропорциональна частоте вращения заготовки n , и определяется зависимостью $\vec{v}_p = 2\pi R_p n_p$, где $n_p = mn$, m – количество выступов обрабатываемого некруглого профиля. Скорость \vec{s}_v , с которой осуществляется движение подачи, имеет небольшое значение по сравнению со скоростями \vec{v}_p и \vec{v}_r , поэтому она не оказывает существенного влияния на изменение рабочих углов и ей можно пренебречь. Вектор \vec{W} представляет собой вектор истинной скорости резания, а векторы \vec{W}_N и \vec{W}_T являются его составляющими в направлениях (нормальном и касательном) к режущей кромке в рассматриваемой точке.

Положение произвольной точки на кромке определяется углом контакта ψ , который в свою очередь определяется через ее абсциссу и радиусы резца, обработанной поверхности или текущую глубину резания t_x :

$$\cos \psi = 1 - \frac{x - r}{R_p} = 1 - \frac{t_x}{R_p}. \tag{9}$$

Вектор \vec{W}_N является проекцией вектора \vec{W} на плоскость MM . Поскольку вектор \vec{W} касателен к поверхности резания на проекции Π , его проекция – вектор \vec{W}_N – будет также касателен к поверхности резания в сечении плоскостью MM . Таким образом, положение касательной к поверхности резания на проекции V определит величину угла σ_N .

Для того чтобы определить угол λ_p , нужно знать величины составляющих \vec{W}_N и \vec{W}_T вектора истинной скорости резания в плоскости, касательной к поверхности резания в рассматриваемой точке режущей кромки.

Тогда углы σ_N и λ_p определяются выражениями:

$$\operatorname{tg} \sigma_N = \frac{\vec{v}_3}{\vec{v}_{10}}; \operatorname{tg} \lambda_p = \frac{\vec{W}_T}{\vec{W}_N}. \tag{10}$$

Угол σ_N , входящий в формулы (7) и (8), а также векторы \vec{W}_N и \vec{W}_T могут быть найдены на основании общего метода определения рабочих (кинематических) параметров режущей части инструментов, предложенного С.С. Петрухиным [7]. Сущность метода состоит в том, что векторы скоростей движений инструмента и направленные отрезки, характеризующие положение в пространстве передней и задней поверхностей и главного лезвия, последовательно ортогонально проектируются с одной проекции на другую. При этом проектируются не сами векторы и направленные отрезки, а их ортогональные составляющие. Тогда при ортогональном проектировании один составляющий вектор изображается в натуральную величину, а другой проектируется в точку. Используем этот метод для решения поставленной задачи. Вектор \vec{v}_p на проекции I раскладываем на векторы \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , которые переносим на проекцию Π . Вектор \vec{v}_2 раскладываем на векторы \vec{v}_3 и \vec{v}_4 и вместе с вектором \vec{v}_1 переносим их на проекцию IV.

Вектор \vec{v}_3 раскладываем на векторы \vec{v}_5 и \vec{v}_6 , а вектор \vec{v}_1 — на \vec{v}_7 и \vec{v}_8 и переносим их на проекцию IV. Кроме этого на проекции IV будет отображаться вектор \vec{v}_p . Найдем векторы $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3 \dots \vec{v}_8$, выразив их через исходный вектор \vec{v}_p . Для того чтобы найти векторы \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , необходимо знать угол, который составляет вектор \vec{v}_p и радиус вектор точки M (рис. 3).

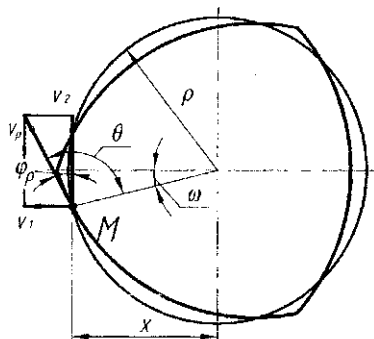


Рис. 3. Схема для определения угла φ_p

Известно [6], что значение производной $\rho' = f'(\varphi)$ равно длине полярного радиуса, умноженной на котангенс угла θ между полярным радиусом и касательной, проведенными к графику функции $\rho = f(\varphi)$ в точке с полярным углом φ .

$$\rho' = \rho \cdot \operatorname{ctg} \theta. \quad (11)$$

Следует отметить, что с возрастанием угла φ радиус ρ возрастает, и под θ понимается острый угол, а если убывает, — то тупой.

Получаемый профиль описывается зависимостью (1). Тогда $\rho' = e \sin(m\varphi) \cdot m = \rho \operatorname{ctg} \theta$, или

$$\operatorname{ctg} \theta = \frac{e \sin(m\varphi) m}{\rho}. \quad (12)$$

Следовательно, угол φ_p между векторами \vec{v}_p и \vec{v}_2 определится как $\varphi_p = \theta - 90^\circ - \omega$. Тогда

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_p \cos \varphi_p; \quad \vec{v}_2 = \vec{v}_p \sin \varphi_p; \quad \vec{v}_3 = \vec{v}_2 \sin \lambda = \vec{v}_p \cos \varphi_p \sin \lambda; \quad \vec{v}_4 = \vec{v}_2 \cos \lambda = \vec{v}_p \cos \varphi_p \cos \lambda;$$

$$\vec{v}_5 = \vec{v}_3 \cos \psi = \vec{v}_p \cos \psi \cos \varphi_p \sin \lambda; \quad \vec{v}_6 = \vec{v}_3 \sin \psi = \vec{v}_p \sin \psi \cos \varphi_p \sin \lambda;$$

$$\vec{v}_7 = \vec{v}_1 \sin \psi = \vec{v}_p \sin \psi \sin \varphi_p; \quad \vec{v}_8 = \vec{v}_1 \cos \psi = \vec{v}_p \cos \psi \sin \varphi_p.$$

На проекции IV векторы \vec{v}_9 и \vec{v}_{10} являются суммой векторов, изображенных на проекциях I и III:

$$\vec{v}_9 = \vec{v}_6 + \vec{v}_8; \quad \vec{v}_{10} = \vec{v}_4.$$

Поэтому тангенс искомого угла σ_N определяется выражением

$$\operatorname{tg} \sigma_N = \frac{\vec{v}_9}{\vec{v}_{10}} = \frac{\vec{v}_p \sin \psi \cos \varphi_p \sin \lambda + \vec{v}_p \cos \psi \sin \varphi_p}{\vec{v}_p \cos \varphi_p \cos \lambda}. \quad (13)$$

Разделив числитель и знаменатель выражения (13) на $\vec{v}_p \cos \varphi_p$, имеем

$$\operatorname{tg} \sigma_N = \frac{\sin \psi \sin \lambda + \cos \psi \operatorname{tg} \varphi_p}{\cos \lambda}. \quad (14)$$

Согласно проекции III, касательная и нормальная составляющие вектора истинной скорости резания определяются выражениями:

$$\vec{W}_T = \vec{v}_p + \vec{v}_7 - \vec{v}_5 = \vec{v}_p + \vec{v}_p \sin \psi \sin \varphi_p - \vec{v}_p \cos \psi \cos \varphi_p \sin \lambda;$$

$$\vec{W}_N = \frac{\vec{v}_{10}}{\cos \sigma_N} = \frac{\vec{v}_p \cos \varphi_p \cos \lambda}{\cos \sigma_N}.$$

Тогда

$$tg\lambda_p = \frac{\bar{W}_T}{\bar{W}_N} = \frac{(\bar{v}_p + \bar{v}_7 - \bar{v}_5)cos\sigma_N}{\bar{v}_{10}} \quad (15)$$

Подставляя значения векторов, получим

$$tg\lambda_p = \frac{(\bar{v}_p + \bar{v}_p sin\psi sin\varphi_p - \bar{v}_p cos\psi cos\varphi_p sin\lambda)cos\sigma_N}{\bar{v}_p cos\varphi_p cos\lambda},$$

или, разделив числитель и знаменатель на \bar{v}_p ,

$$tg\lambda_p = \frac{\left(\frac{R_p}{\rho}m + sin\psi sin\varphi_p - cos\psi cos\varphi_p sin\lambda\right)cos\sigma_N}{cos\varphi_p cos\lambda} \quad (16)$$

Из формулы для определения угла σ_N следует, что изменение рабочих углов резца по сравнению с углами заточки вызвано двумя причинами. Первая – это постоянно изменяющееся направление вектора скорости \bar{v}_p вращательного движения заготовки, которое совершает обрабатываемая деталь. Чем больше отклонение вектора v_p от вертикали, которое определяется углом φ_p , тем больше величина угла σ_N и тем значительнее углы α_p и γ_p отличаются от углов α и γ . В случае, когда вектор \bar{v}_p направлен вертикально ($\varphi_p = 0$), угол σ_N равен нулю и значение рабочих углов становится равным величине углов заточки, т.е. $\alpha_p = \alpha$, $\gamma_p = \gamma$. Вторая причина – это то, что точки лезвия резца могут находиться на разном расстоянии от оси обрабатываемой детали. Чем больше занижение точки лезвия относительно оси детали, тем больше величина угла σ_N и тем больше углы α_p и γ_p .

Анализ формулы для определения угла λ_p показывает, что изменение рабочего угла наклона режущей кромки по сравнению со статическим углом наклона режущей кромки вызвано также двумя причинами. Первая из них, наиболее существенная, – это то, что резец вращается с частотой, в m раз большей частоты вращения заготовки. Чем больше значение m , тем больше величина угла λ_p . Вторая причина – это различное расстояние точки лезвия резца до оси обрабатываемой детали. Чем оно больше, тем больше величина угла λ_p .

Полученные данные позволяют управлять схемой формообразования для получения профиля требуемой геометрии, а также позволяют определить величину рабочих углов в зависимости от параметров обработки, что важно для практической реализации ротационного точения некруглых поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимченко А.И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром: Автореф. дис..д-ра техн. наук: 05.02.08 /Мосстанкин. - М., 1993. - 41 с.
2. Данилов В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием. - Мн.: Вышэйшая школа, 1995.-264 с.
3. Ротационное резание материалов / П.И. Ящерицын, А.В. Борисенко, И.Г. Дривотин, В.Я. Лебедев. - Мн.: Наука и техника, 1987. - 229 с.
4. Бобров В.Ф., Иерусалимский Д.Е. Резание металлов самовращающимися резцами. - М.: Машиностроитель, 1972. - 112 с.
5. Способ точения сложных поверхностей: А.с. 982845 СССР, МКИ ³ В23В 1/00 / В.А. Данилов (СССР); Новопол. политехи, ин-т. - № 2872050/25-08; Заявл. 21.01.80; Опубл. 23.12.82, Бюл. № 47 // Открытия. Изобретения. - 1982. -№ 47. - С. 51.
6. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. - М.: Наука. Главная ред. физ.-мат. лит., 1981.
7. Петрухин С.С. Общий метод определения кинематических геометрических параметров режущей части инструментов // Известия вузов. Сер. Машиностроение. - 1962. - № 10. - С. 112 - 116.