

УДК 621.91.01

АНАЛИЗ СХЕМЫ ОБРАБОТКИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭКСЦЕНТРИЧНО УСТАНОВЛЕННЫМ ПРИНУДИТЕЛЬНО ВРАЩАЮЩИМСЯ КРУГЛЫМ РЕЗЦОМ

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

Рассмотрена схема обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей эксцентрично установленным относительно оси вращения круглым резцом, принудительное вращение которого согласовано с вращением заготовки в соответствии с числом граней обработанной поверхности. Аналитически исследовано влияние на геометрию формируемой синусоидальной поверхности геометрических и кинематических параметров схемы обработки, установлены зависимости для расчета рабочих углов резца и закономерности их изменения в процессе обработки, обусловленные геометрией профиля формируемой поверхности.

Ключевые слова: синусоидальная поверхность, схема обработки, геометрия профиля, рабочие углы инструмента.

Введение. Профильные бесшпоночные соединения все шире применяют вместо шлицевых и шпоночных в трансмиссиях машин и механизмов, а также в режущих и вспомогательных инструментах благодаря более высоким эксплуатационным характеристикам при меньшей стоимости изготовления [1]. Однако профильные соединения не нашли широкого применения в отечественном машиностроении, что обусловлено, в частности, недостаточной технологической отработкой процессов формообразования профильных поверхностей, а также отсутствием специализированного металлорежущего оборудования, режущих инструментов и контрольно-измерительных средств, необходимых для изготовления профильных деталей. В связи с этим актуальна разработка и реализация прогрессивных схем формообразования профильных поверхностей, реализуемых на универсальных станках простыми по конструкции режущими инструментами.

При механической обработке профильная поверхность образуется вследствие непрерывного периодического изменения расстояния между осью вращения заготовки и формообразующим элементом режущего инструмента. Например, при точении профильной поверхности призматическим резцом это достигается сообщением ему 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 профиля), что обуславливает неудовлетворительные динамические условия работы станка, ограничивает частоту вращения шпинделя и производительность обработки. Поэтому предпочтительны схемы обработки профильных поверхностей, например, резцовыми головками, планетарным или ротационным точением [2], без возвратно-поступательного движения инструмента.

Более высокая стойкость инструмента, его производительность и качество поверхности при ротационном точении цилиндрических поверхностей [3–5] обуславливают целесообразность применения этого метода для обработки профильных поверхностей. Поэтому заслуживает внимания реализуемая на шлицефрезерном станке [6] схема обработки таких поверхностей некруглым резцом или круглым эксцентрично установленным резцом [7] с торцовой передней поверхностью (Рисунок 1), аналогичная ротационному точению круглых цилиндрических поверхностей самовращающимися или принудительно вращающимися инструментами [4; 5]. При вращении эксцентрично установленного круглого резца 2 (см. Рисунок 1) вследствие непрерывного изменения расстояния между его режущей кромкой и осью вращения заготовки 1, формируется некруглый профиль обработанной поверхности.

От традиционной схемы ротационного точения круглых поверхностей рассматриваемая схема обработки профильных поверхностей отличается, во-первых, эксцентричной установкой круглого резца относительно оси его вращения, при этом величина эксцентриситета e в 2 раза меньше высоты выступов h профиля над вписанной в него окружностью радиусом r_0 , т.е. зависит от геометрии обработанной поверхности. Другое отличие, обусловленное схемой формообразования профиля, заключается в том, что угловая скорость резца в m раз больше угловой скорости заготовки. Поэтому кинематический коэффициент, равный отношению окружных скоростей резца и заготовки, в разы больше, чем при ротационном точении круглых поверхностей [3–5].

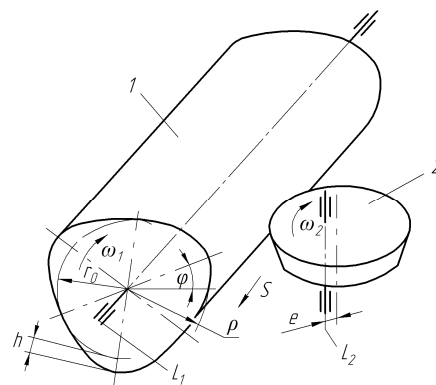


Рисунок 1. – Схема ротационного точения профильной поверхности эксцентрично установленным круглым резцом

Рассмотрим влияние указанных отличительных признаков рассматриваемого метода обработки на геометрию профильной поверхности и рабочие углы инструмента.

Геометрия формируемого профиля. При сообщении резцу 2, установленному с эксцентриситетом e относительно оси L_2 его вращения, и заготовке 1 согласованных вращательных движений вокруг скрещивающихся под прямым углом осей L_2 и L_1 с угловыми скоростями соответственно ω_2 и ω_1 , при $\omega_2 / \omega_1 = m$ образуется поверхность, профиль которой описывается зависимостью [2]

$$r = r_{cp} - e \cos m\varphi, \quad (1)$$

где: φ – текущее значение угла поворота заготовки; r_{cp} – средний радиус некруглого профиля, определяемый по формуле $r_{cp} = r_0 + e$.

Рассмотрим влияние эксцентриситета установки резца e на геометрию формируемого профиля. Из конструктивных и технологических соображений предпочтителен выпуклый профиль, у которого кривизна в каждой точке положительна. В этом случае отсутствуют ограничения на диаметр инструмента при обработке шлифованием или поверхностным пластическим деформированием. При наличии же вогнутых участков радиус инструмента не должен превышать радиус впадины профиля. Кроме того, при выпуклой форме профиля в меньшем диапазоне изменяются рабочие углы режущего лезвия, что улучшает условия резания. Кроме того, контроль вогнутого профиля представляет определенные трудности, так как требуется специальный мерительный инструмент. В этой связи определим условие, при котором кривизна в каждой точке профильной поверхности положительна.

Формула для вычисления кривизны K_p кривой, заданной уравнением в полярных координатах, имеет вид [8]:

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

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

На основании (1) имеем: $\rho' = e \sin(m\varphi)m$; $\rho'' = e \cos(m\varphi)m^2$. Тогда

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

Кривизна K_p равна нулю, если

$$(r_c - e \cos(m\varphi))^2 - 2(e \sin(m\varphi)m)^2 - (r_c - e \cos(m\varphi)) \cdot (e \cos(m\varphi)m^2) = 0. \quad (4)$$

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

$$r_c^2 - 2r_c e + e^2 - r_c m^2 e + e^2 m^2 = 0. \quad (5)$$

Следовательно,

$$K_p = \frac{e}{r_c} = \frac{1}{m^2 + 1}. \quad (6)$$

Выражение (6) определяет граничные условия выпуклости и вогнутости формируемого профиля, получаемого эксцентрично установленным круглым ротационным резцом по рассматриваемой схеме обработки. Если во всех точках профиля $\frac{e}{r_c} < \frac{1}{m^2 + 1}$, он является выпуклым. В точках, где $\frac{e}{r_c} > \frac{1}{m^2 + 1}$,

профиль вогнутый. Если же $\frac{e}{r_c} = \frac{1}{m^2 + 1}$, его кривизна равна нулю.

Рабочие углы инструмента. Процессы деформирования срезаемого слоя при превращении его в стружку и изнашивания контактных поверхностей резца зависят от его рабочих углов, образуемых в процессе резания. Рабочий угол наклона режущей кромки ротационного резца относительно вектора скорости резания в рассматриваемом случае зависит от количества выступов некруглого профиля, что приводит к существенному различию величин рабочих и статических углов инструмента. Определение рабочих углов инструмента рассмотрено ниже в соответствии с известными положениями кинематики резания.

На рисунке 2 представлена схема обработки синусоидальной цилиндрической поверхности при- нудительно вращающимся круглым резцом с внутренней конической передней поверхностью и наружной конической задней поверхностью.

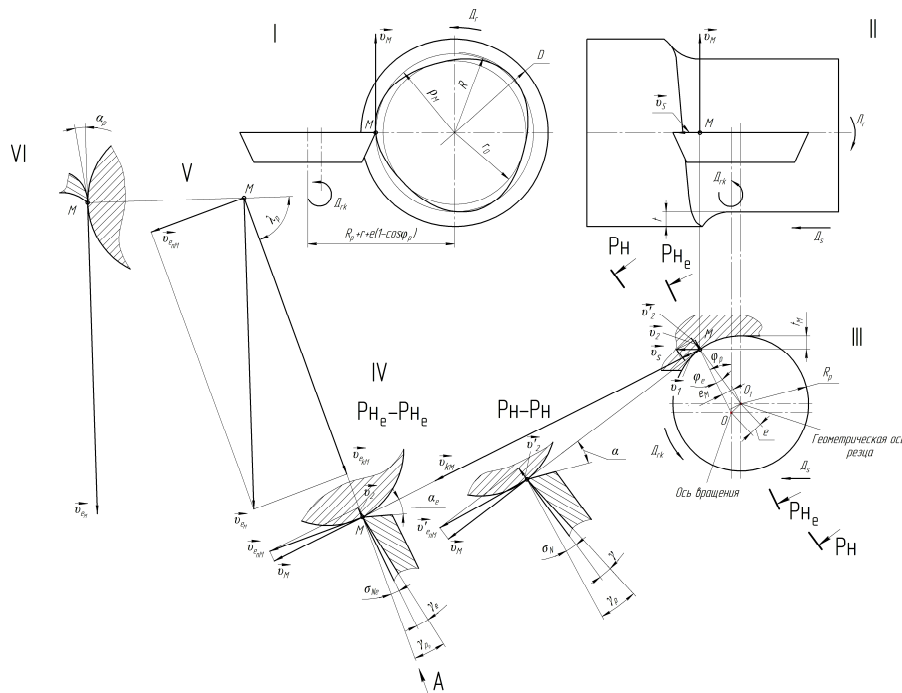


Рисунок 2. – Рабочие углы ротационного реза с передней внутренней конической поверхностью

Резец установлен с эксцентриситетом e и нулевым углом наклона режущей кромки. Рабочий угол наклона режущей кромки λ_p – угол между касательной к ней и плоскостью, перпендикулярной к вектору скорости результирующего движения резания. Рабочий задний угол α_p инструмента, измеряемый в направлении вектора скорости результирующего движения резания, представляет собой угол между плоскостью, касательной к задней поверхности инструмента в рассматриваемой точке режущей кромки и плоскостью, касательной к поверхности резания в той же точке. Рабочий передний угол γ_p – это угол между плоскостью, перпендикулярной к вектору скорости результирующего движения резания, и касательной к передней поверхности инструмента, проведенной в направлении, нормальном к режущей кромке [4]. Поскольку касательная к передней поверхности инструмента проводится в направлении, нормальном к режущей кромке и, учитывая то, что ротационный резец установлен с эксцентриситетом, целесообразно ввести секущую плоскость (обозначим P_{He}), проведенную через рассматриваемую точку режущей кромки и ось вращения инструмента. Обозначим углы, находящиеся в плоскости P_{He} (см. Рисунок 2), γ_e , γ_{pe} , α_e (проекции переднего, переднего рабочего и заднего углов соответственно). Углы σ_{Ne} и σ_N вспомогательные, определяющие положение в пространстве проекции, касательной к траектории результирующего движения точки режущей кромки на плоскости $P_{He}\varphi$ и P_H соответственно.

Определим углы α_p , γ_p и λ_p для рассматриваемой точки M режущей кромки. Каждая ее точка участвует одновременно в следующих движениях: вращательном движении резания со скоростью резания \vec{v}_M , движении подачи со скоростью \vec{v}_s и вращательном (касательном) движении резца вокруг оси, не совпадающей с его геометрической осью, со скоростью \vec{v}_{kM} .

Скорость касательного движения v_{kM} определяется по зависимости

$$v_{kM} = 2\pi[R_p + e(1 - \cos \varphi_p)]n_p,$$

где: $n_p = mn_3$; φ_p – угол контакта, определяемый по формуле

$$\cos \varphi_p = \frac{r_{cp} - \rho}{e}. \quad (9)$$

Из рисунка 2

$$\gamma_{pe} = \sigma_{Ne} + \gamma_e; \quad \gamma_p = \sigma_N + \gamma; \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_p = \operatorname{tg}(\alpha + \sigma_{Ne}) \cos \lambda_p. \quad (8)$$

Вектор \vec{v}_{eM} представляет собой вектор скорости результирующего движения резания, а векторы $\vec{v}_{e_{nM}}$ и $\vec{v}_{e_{kM}}$ – его составляющие в направлениях соответственно нормальном и касательном к режущей кромке в рассматриваемой точке M .

Вектор $\vec{v}_{e_{nM}}$ является проекцией вектора \vec{v}_{eM} на плоскость P_{He} . Поскольку вектор \vec{v}_{eM} можно считать касательным к поверхности резания на проекции II, его проекция (вектор $\vec{v}_{e_{nM}}$) будет также касательной к поверхности резания в сечении плоскостью P_{He} . Таким образом, положение касательной к поверхности резания на проекции IV характеризует величину угла σ_{Ne} .

Для расчета угла λ_p необходимо знать составляющие $\vec{v}_{e_{nM}}$ и $\vec{v}_{e_{kM}}$ вектора скорости результирующего движения резания в плоскости, касательной к поверхности резания в рассматриваемой точке режущей кромки. Тогда углы σ_{Ne} и λ_p определяются из выражений

$$\operatorname{tg} \sigma_{Ne} = \frac{\vec{v}_2}{\vec{v}_M} \varphi; \operatorname{tg} \lambda_p = \frac{\vec{v}_{e_{kM}}}{\vec{v}_{e_{nM}}}. \quad (10)$$

Угол σ_{Ne} и векторы $\vec{v}_{e_{nM}}$ и $\vec{v}_{e_{kM}}$ найдем на основе общего метода определения рабочих (кинематических) параметров режущего лезвия [9], согласно которому векторы скоростей движений инструмента и направленные отрезки, характеризующие положение в пространстве передней и задней поверхностей и режущего лезвия, последовательно ортогонально проектируют 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. Для решения поставленной задачи вектор \vec{v}_s на проекции III раскладываем на векторы \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , которые переносим на проекцию IV. Кроме этого, на проекции IV будет отображаться вектор \vec{v}_M . Выразим векторы \vec{v}_1 и \vec{v}_2 через исходный вектор \vec{v}_s :

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_s \cos \varphi_p; \vec{v}_2 = \vec{v}_s \sin \varphi_p.$$

Тогда искомым углом σ_{Ne} определяется из выражения

$$\operatorname{tg} \sigma_{Ne} = \frac{\vec{v}_2}{\vec{v}_M} = \frac{\vec{v}_s \sin \varphi_p}{\vec{v}_M}. \quad (11)$$

Согласно проекциям III, IV, касательная и нормальная составляющие вектора скорости результирующего движения резания определяются из уравнений:

$$\vec{v}_{e_{kM}} = \vec{v}_{kM} + \vec{v}_1 = \vec{v}_{kM} + \vec{v}_s \cos \varphi_p; \vec{v}_{e_{nM}} = \frac{\vec{v}_M}{\cos \sigma_{Ne}}.$$

Следовательно,

$$\operatorname{tg} \lambda_p = \frac{\vec{v}_{e_{kM}}}{\vec{v}_{e_{nM}}} = \frac{(\vec{v}_{kM} + \vec{v}_s \cos \varphi_p) \cos \sigma_{Ne}}{\vec{v}_M}. \quad (12)$$

Для нахождения связи между углами σ_{Ne} и σ_N , находящихся соответственно в плоскостях P_{He} и P_H , рассмотрим варианты установки ротационного резца с эксцентриситетом и без него (см. Рисунок 2). Тогда

$$\operatorname{tg} \sigma_N = \frac{\vec{v}'_2}{\vec{v}_M}, \quad (13)$$

где: \vec{v}'_2 – составляющая скорости движения подачи \vec{v}_s , определяемая по формуле $\vec{v}'_2 = \vec{v}_s \sin(\varphi_p + \varphi_e)$.

Угол φ_e , образуемый между OM и O_1M , из-за установки круглого резца с эксцентриситетом e определяется по теореме косинусов:

$$\cos \varphi_e = \frac{R_p^2 + e^2 + [R_p + e(1 - \cos \varphi_p)]^2}{2R_p \cdot (R_p + e(1 - \cos \varphi_p))}. \quad (14)$$

Исходя из (11) и (13),

$$\operatorname{tg} \sigma_N = \frac{\sin(\varphi_p + \varphi_e) \operatorname{tg} \sigma_{Ne}}{\sin \varphi_p}. \quad (15)$$

Так как круглый резец установлен с эксцентриситетом e , то вектор скорости касательного движения \vec{v}_{km} направлен перпендикулярно к OM , следовательно, \vec{v}_{km} не перпендикулярен нормали к режущей кромке O_1M . Тогда плоскость P_{He} , проходящая через OM на расстоянии e_M от оси O_1 и параллельная ей, рассекает заднюю коническую поверхность резца по гиперболе, в то время как нормальная секущая плоскость P_H – по прямолинейным образующим, что и обуславливает различие соответствующих углов в плоскостях P_{He} и P_H .

Рассмотрим задачу о соответствии углов заточки ротационного резца, находящихся в плоскости P_H , и их проекций в плоскости P_{He} . Коническая поверхность высотой H (рисунок 3) с вершиной в точке $M_o(0; 0; H)$ описывается уравнением

$$(z-H)^2 = k(x^2 + y^2).$$

При $z=0$ имеем окружность $x^2 + y^2 = R_p^2$, следовательно, $k = \frac{H^2}{R_p^2}$, где R_p – радиус основания (радиус круговой режущей кромки резца).

Таким образом, $(z-H)^2 = \frac{H^2}{R_p^2}(x^2 + y^2)$.

Рассечем коническую поверхность плоскостью $x = e_M$, параллельной оси O_1 и отстоящей от неё на расстоянии e_M , равном высоте треугольника OMO_1 (см. Рисунок 2), проведенной из вершины O_1 . Согласно рисунку 2

$$e_M = \frac{2}{OM} \sqrt{p(p-OM)(p-MO_1)(p-O_1O)}, \tag{16}$$

где: p – полупериметр треугольника OMO_1 , $p = \frac{OM+MO_1+O_1O}{2}$; $OM = R_p + e(1 - \cos \varphi_p)$; $MO_1 = R_p$; $O_1O = e$.

Рассматриваемое сечение конической поверхности является гиперболой MNP , уравнение проекции $M_1N_1P_1$ которой на плоскость YOZ выглядит следующим образом:

$$(z-H)^2 = \frac{H^2}{R_p^2}(e_M^2 + y^2). \tag{17}$$

Дифференцирование (17) по y позволяет определить тангенс угла β_e наклона касательной к кривой MNP в точке M . Имеем

$$2(z-H) \cdot Z'_y = \frac{H^2}{R_p^2} \cdot 2y,$$

откуда

$$Z'_y = \frac{H^2 \cdot y}{R_p^2(z-H)}.$$

Для точки M $z=0$, следовательно, на основании (17)

$$H^2 = \frac{H^2}{R_p^2}(e_M^2 + y^2)^2 \text{ или } y^2 = R_p^2 - e_M^2, y = \pm \sqrt{R_p^2 - e_M^2}.$$

Тогда

$$\operatorname{tg} \beta_e = Z'_y(M) = \frac{H^2(-\sqrt{R_p^2 - e_M^2})}{R_p^2(-H)} = \frac{H\sqrt{R_p^2 - e_M^2}}{R_p^2}. \tag{18}$$

Для определения угла α_e , учитывая, что $H = R_p / \operatorname{tg} \alpha$, имеем

$$\alpha_e = 90^\circ - \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{R_p^2 - e_M^2}}{R_p \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \tag{19}$$

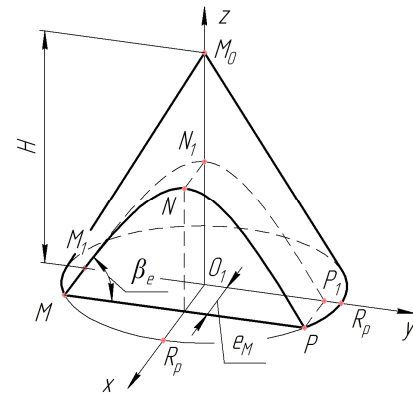


Рисунок 3. – К определению проекций углов

Аналогично для угла γ_e

$$\gamma_e = \arctg \frac{\operatorname{tg} \gamma \sqrt{R_p^2 - e_M^2}}{R_p}. \quad (20)$$

В случае если круглый резец установлен без эксцентриситета ($e = 0$), соответствующие углы в плоскостях P_{He} и P_H равны, т.е. $\alpha_e = \alpha$, $\gamma_e = \gamma$, что свидетельствует о достоверности формул (19), (20).

Заключение. Из формул для определения углов σ_{Ne} и σ_N следует, что их величина не зависит от кинематического коэффициента и количества выступов профиля, поэтому указанные параметры не влияют на значение рабочего переднего угла γ_p , его величина зависит от эксцентриситета e установки ротационного резца, что необходимо учитывать при определении параметров режущего лезвия.

Изменение рабочего угла λ_p наклона режущей кромки обусловлено созданием кинематического наклона режущей кромки в связи с тем, что резец вращается с частотой в m раз большей частоты вращения заготовки. С увеличением числа m выступов профиля поверхности возрастает угол λ_p . Увеличение кинематического коэффициента приводит к уменьшению рабочего заднего угла режущего лезвия α_p .

Результаты исследования позволяют управлять схемой формообразования для получения профиля обработанной синусоидальной цилиндрической поверхности заданной геометрии, а также определить величину рабочих углов круглого эксцентрично установленного резца, что важно для ее практической реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимченко, А.И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / А.И. Тимченко. – М., 1993. – 41 с.
2. Данилов, В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 264 с.
3. Ротационное резание материалов / П.И. Ящерицын [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1987. – 229 с.
4. Бобров, В.Ф. Резание металлов самовращающимися резцами / В.Ф. Бобров, Д.Е. Иерусалимский. – М. : Машиностроение, 1972. – 112 с.
5. Попок, Н.Н. Исследование процесса ротационного резания принудительно вращающимися инструментами : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Н.Н. Попок ; Белорус. политехн. ин-т. – Минск, 1983. – 22 с.
6. Данилов, В.А. Анализ и реализация схем обработки профильных цилиндрических поверхностей ротационным инструментом / В.А. Данилов, А.Н. Селицкий // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 71–82.
7. Ротационный инструмент : пат. ВУ 4541 на полезную модель / В.А. Данилов, А.Н. Селицкий. – Заявка от 08.01.2008.
8. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981.
9. Петрухин, С.С. Общий метод определения кинематических геометрических параметров режущей части инструментов / С.С. Петрухин // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. – 1962. – № 10. – С. 112–116.

Поступила 20.08.2019

ANALYSIS OF THE SINE WAVE PROCESSING SCHEME CYLINDRICAL SURFACES WITH AN ECCENTRICALLY MOUNTED FORCIBLY ROTATING CIRCULAR CUTTER

V. DANILOV, A. SELICKI

The scheme of processing sinusoidal cylindrical surfaces with an eccentric circular cutter installed relative to the axis of rotation, the forced rotation of which is coordinated with the rotation of the workpiece in accordance with the number of faces of the processed surface, is considered. The analysis of practically the influence on the geometry of the generated sinusoidal surface geometric and kinematic parameters of the processing circuit, the dependences for calculation of working angles of the cutter and the regularities of their changes in the process due to the geometry of the profile of the formed surface.

Keywords: sinusoidal surface, the processing circuit, the geometry of the profile working angle of the tool.