

УДК 621.91.01/02

ВЛИЯНИЕ УГЛОВ В ПЛАНЕ РЕЖУЩЕГО ЛЕЗВИЯ ИНСТРУМЕНТА НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ СФЕРЫ

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК; И.П. КУНЦЕВИЧ;
канд. техн. наук Р.С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ; В.С. АНИСИМОВ; Г.И. ГВОЗДЬ
(Полоцкий государственный университет)*

Анализируется изменение величин углов в плане лезвия режущего инструмента при обработке сферических поверхностей деталей на токарном станке с числовым программным управлением и при комбинированной обработке. Приведены формулы для определения параметра шероховатости и угла касания режущего инструмента, перемещающегося по сферической поверхности. Рассмотрено изменение значений углов в плане на переходах врезания и выхаживания при обработке сферической поверхности вращающимся режущим инструментом с поступательным движением подачи.

Ключевые слова: шероховатость, сферическая поверхность, углы в плане лезвия, точение, комбинированная обработка.

Введение. Как известно [1], значения углов лезвия режущего инструмента в процессе резания изменяются из-за кривизны обрабатываемой поверхности детали, направления вектора результирующей скорости резания и т.д. Эти изменения оказывают существенное влияние на физические и технологические характеристики обработки, в частности на шероховатость обработанной поверхности детали. Известно также, что на параметр шероховатости обработанной поверхности наибольшее влияние оказывают углы в плане лезвия и величина подачи. Для острозаточенного лезвия углы в плане имеют следующую функциональную связь с параметром шероховатости поверхности R_z :

$$R_z(\varphi) = S_o \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi}, \quad (1)$$

где S_o – подача на оборот ($S_o = \text{const}$), мм/об; φ – главный угол в плане, рад; φ_1 – вспомогательный угол в плане, град.

Проанализируем данную зависимость применительно к контурной обработке сферической поверхности детали токарным резцом и вращающимся многолезвийным режущим инструментом.

1. Влияние углов в плане лезвия на шероховатость сферической поверхности при контурной обработке на токарном станке с ЧПУ

Преобразуем функцию $R_z = R_z(\varphi)$ к функции, зависящей от φ . Пусть ε – угол при вершине режущего лезвия инструмента, обтачивающего по контуру сферическую поверхность детали (рисунок 1), причём $\varepsilon = \text{const}$.

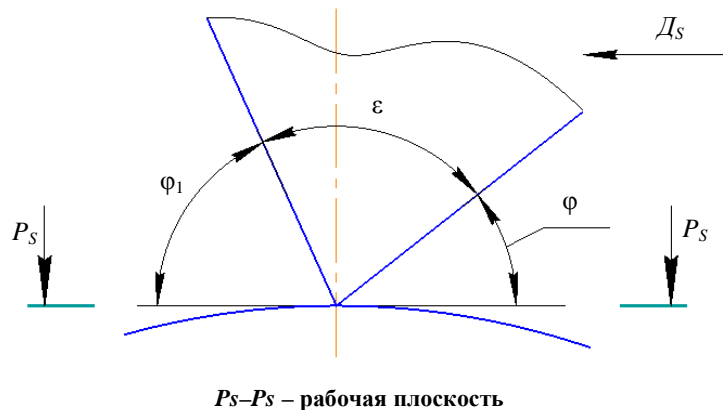


Рисунок 1. – Расположение углов лезвия режущего инструмента φ , ε , φ_1 на сферической поверхности

Получаем $\varphi + \varepsilon + \varphi_1 = \pi$, $\varphi_1 = \pi - (\varphi + \varepsilon)$.

Подставим данное равенство в формулу $Rz = Rz(\varphi)$:

$$Rz(\varphi) = S_o \cdot \frac{\operatorname{tg}(\pi - (\varphi + \varepsilon)) \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg}(\pi - (\varphi + \varepsilon)) + \operatorname{tg} \varphi};$$

$$Rz(\varphi) = S_o \cdot \frac{-\operatorname{tg}(\varphi + \varepsilon) \cdot \operatorname{tg} \varphi}{-\operatorname{tg}(\varphi + \varepsilon) + \operatorname{tg} \varphi};$$

$$Rz(\varphi) = S_o \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg}(\varphi + \varepsilon)}{\operatorname{tg}(\varphi + \varepsilon) - \operatorname{tg} \varphi}.$$

От функции тангенс перейдём к функциям синус и косинус:

$$\begin{aligned} Rz(\varphi) &= S_o \cdot \frac{\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \frac{\sin(\varphi + \varepsilon)}{\cos(\varphi + \varepsilon)}}{\frac{\sin(\varphi + \varepsilon)}{\cos(\varphi + \varepsilon)} - \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}} = S_o \cdot \frac{\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \frac{\sin(\varphi + \varepsilon)}{\cos(\varphi + \varepsilon)}}{\frac{\sin(\varphi + \varepsilon) \cdot \cos \varphi - \cos(\varphi + \varepsilon) \cdot \sin \varphi}{\cos(\varphi + \varepsilon) \cdot \cos \varphi}} = \\ &= S_o \cdot \frac{\sin \varphi \cdot \sin(\varphi + \varepsilon)}{\sin(\varphi + \varepsilon - \varphi)} = S_o \cdot \frac{\sin \varphi \cdot \sin(\varphi + \varepsilon)}{\sin \varepsilon} = \\ &= S_o \cdot \frac{1}{\sin \varepsilon} \cdot \frac{1}{2} \cdot (\cos(\varphi - \varphi - \varepsilon) - \cos(\varphi + \varphi + \varepsilon)) = \frac{S_o}{2 \sin \varepsilon} \cdot (\cos \varepsilon - \cos(2\varphi + \varepsilon)). \end{aligned}$$

Итак,

$$Rz(\varphi) = \frac{S_o}{2 \sin \varepsilon} \cdot (\cos \varepsilon - \cos(2\varphi + \varepsilon)), \quad (2)$$

где $\cos \varepsilon = \text{const}$, $\sin \varepsilon = \text{const}$.

Проведём исследование функции $Rz = Rz(\varphi)$:

$$Rz(\varphi) = \frac{S_o}{2 \sin \varepsilon} \cdot (\cos \varepsilon - \cos(2\varphi + \varepsilon));$$

$$1. D(Rz) = (-\infty; +\infty)$$

Ограничиваемся $\varphi \in (0; \pi)$:

$$\text{а) если } \varphi = 0, \text{ то } Rz(0) = \frac{S_o}{2 \sin \varepsilon} \cdot (\cos \varepsilon - \cos \varepsilon) = 0;$$

$$\text{б) если } \varphi = \pi, \text{ то } Rz(\pi) = \frac{S_o}{2 \sin \varepsilon} \cdot (\cos \varepsilon - \cos(2\pi + \varepsilon)) = 0.$$

2. Найдём точки экстремума:

$$Rz'(\varphi) = \frac{S_o}{2 \sin \varepsilon} \cdot (0 - 2(-\sin(2\varphi + \varepsilon))) = \frac{S_o}{2 \sin \varepsilon} \cdot 2 \sin(2\varphi + \varepsilon) = \frac{S_o \cdot \sin(2\varphi + \varepsilon)}{\sin \varepsilon}.$$

Решаем уравнение: $Rz'(\varphi) = 0$.

$$\frac{S_o \cdot \sin(2\varphi + \varepsilon)}{\sin \varepsilon} = 0;$$

$$\sin(2\varphi + \varepsilon) = 0;$$

$$2\varphi + \varepsilon = \pi k, \quad k \in Z;$$

$$\varphi = \frac{\pi k}{2} - \frac{\varepsilon}{2}, \quad k \in Z.$$

Ограничиваемся только значениями $k = 0, k = 1, k = 2$, то есть

$$k = 0, \quad \varphi = -\frac{\varepsilon}{2};$$

$$k = 1, \quad \varphi = \frac{\pi - \varepsilon}{2};$$

$$k = 2, \quad \varphi = \frac{2\pi - \varepsilon}{2} = \pi - \frac{\varepsilon}{2}.$$

Функция достигает максимума при $\varphi = \frac{\pi - \varepsilon}{2}$ (рисунок 2):

$$R_z \max = R_z \left(\frac{\pi - \varepsilon}{2} \right) = \frac{S_o}{2 \sin \varepsilon} \cdot \left(\cos \varepsilon - \cos \left(2 \cdot \frac{\pi - \varepsilon}{2} + \varepsilon \right) \right) = \frac{S_o (\cos \varepsilon + 1)}{2 \sin \varepsilon};$$

ε увеличивается $\Rightarrow \varphi$ уменьшается;

$\left. \begin{array}{l} \cos \varepsilon \text{ уменьшается} \\ \sin \varepsilon \text{ увеличивается} \end{array} \right\} \Rightarrow R_z \max \text{ уменьшается.}$

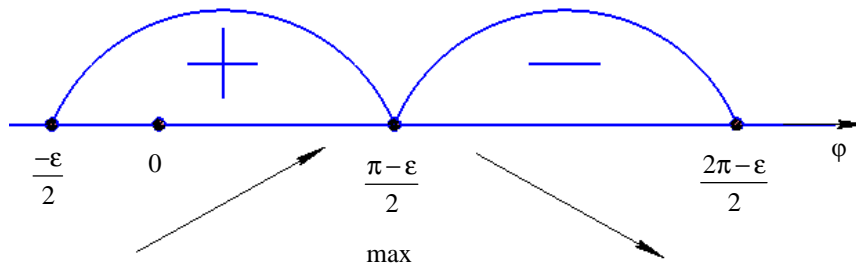


Рисунок 2. – Схема изменения угла φ в связи с углом ε

Как следует из проведенного исследования функции $R_z = R_z(\varphi)$, параметр R_z шероховатости сферической поверхности, образованной лезвием режущего инструмента, перемещающимся по контуру (рисунок 3), достигает максимального значения на участке поверхности от начальной точки обработки H до точки A , то есть при угле $\varphi_A = \frac{\pi - \varepsilon}{2} = 72,5^\circ$ ($\varepsilon \approx 35^\circ$, $\varphi_H \approx 3^\circ$).

Необходимо определить значение угла контакта μ , которому будет соответствовать наименьшая шероховатость поверхности.

Пусть $\angle AOB = \mu$.

$$1. \triangle AOB \text{ – равнобедренный} \Rightarrow \angle OAB = \angle OBA = \frac{\pi - \mu}{2} = \frac{\pi}{2} - \frac{\mu}{2}.$$

2. $\triangle OAC$ – прямоугольный, так как $OA \perp AC$ (OA – радиус окружности, AC – касательная).

$$\text{Значит, } \angle BAC = \frac{\pi}{2} - \angle OAB = \frac{\pi}{2} - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\mu}{2} \right) = \frac{\mu}{2}.$$

По аналогии $\angle ABC = \frac{\mu}{2}$.

3. Рассмотрим $\triangle ABK$:

$\angle AKB = \angle KBK_1 = \varepsilon$ (как внутренние накрест лежащие);

$\angle KAB = \varphi_A + \angle CAB = \varphi_A + \frac{\mu}{2}$;

$\angle ABK = \angle ABC + \angle CBK = \frac{\mu}{2} + \pi - \varepsilon - \frac{\pi}{2} - \varphi_H = \frac{\mu}{2} + \frac{\pi}{2} - \varepsilon - \varphi_H$.

По теореме о сумме углов треугольника $\angle KAB + \angle ABK + \angle AKB = \pi$.

Тогда $\varphi_A + \frac{\mu}{2} + \frac{\mu}{2} + \frac{\pi}{2} - \varepsilon - \varphi_H + \varepsilon = \pi$;

$\mu = \frac{\pi}{2} - \varphi_A + \varphi_H$.

Но $\varphi_A = \frac{\pi}{2} - \frac{\varepsilon}{2}$. Значит, $\mu = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} + \frac{\varepsilon}{2} + \varphi_H = \frac{\varepsilon}{2} + \varphi_H$.

Итак,

$$\mu = \frac{\varepsilon}{2} + \varphi_H. \quad (3)$$

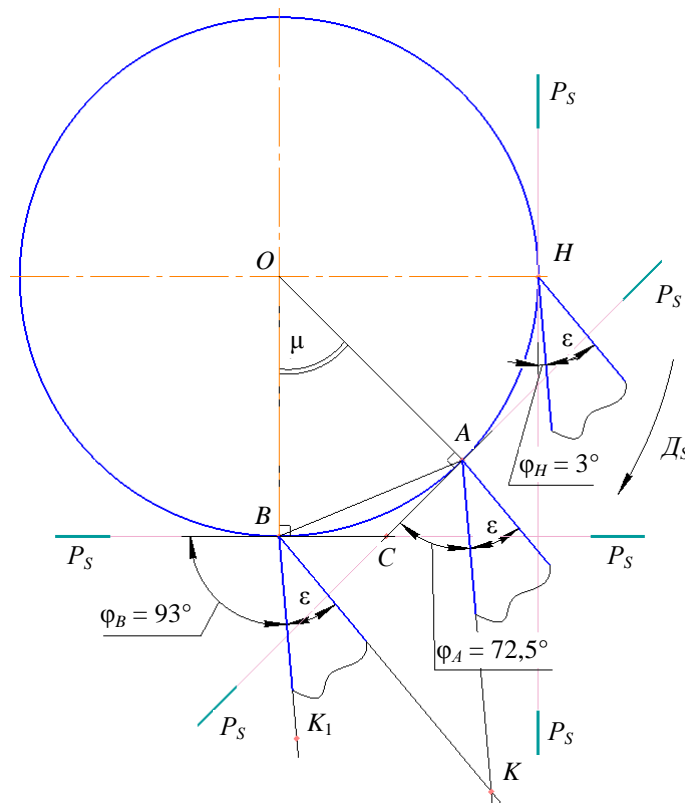


Рисунок 3. – Схема для определения угла контакта μ

Результаты расчетов по формулам (2) и (3) при $\varepsilon \approx 35^\circ$, $\varphi_H \approx 3^\circ$ и подаче 0,2 мм/об свидетельствуют о максимальном значении шероховатости Rz , составляющем 11 мкм, что соответствует достижению угла контакта $\mu \approx 20,5^\circ$. То есть при заданных значениях параметров ε , φ_H и S_o максимальное значение параметра Rz наблюдается на участке сферической поверхности от начальной точки H до точки A на угле контакта $\mu \approx 69,5^\circ$, а минимальное – на участке от точки A до точки B при $\mu \approx 20,5^\circ$.

Для проверки полученных расчетных данных была произведена обработка резцом Rafana SVJCR 2020 сферической поверхности детали диаметром 38 мм на токарном станке модели 16K20Ф3, оснащенный УЧПУ Sinumerik 802D фирмы Siemens. Режимы обработки: $t = 1$ мм; $S_o = 0,2$ мм/об; $n = 1200$ мин⁻¹.

Измерение шероховатости обработанной поверхности производилось на профилографе-профилометре модели «Taylor Hobson precision Form Taly surf 120» и показало, что значения параметра Rz находятся в пределах 6,3...8,0 мкм практически на всей поверхности сферы, за исключением участка поверхности вблизи осевой линии детали, где она достигает значения Rz 20 мкм в связи со снижением скорости резания до нулевых значений и образованием на лезвии нароста, ухудшающего качество обработки.

2. Влияние углов в плане лезвия инструмента на шероховатость сферической поверхности при комбинированной обработке

Определим изменение углов в плане φ и φ_1 лезвия при комбинированной обработке сферической поверхности вращающимся инструментом (рисунок 4) [2].

Ось вращения детали располагается под углом η к горизонтальной оси.

Режущему инструменту сообщается главное вращательное движение D_r , а детали – вращательное движение D_{sv} и поступательное движение D_{sn} .

Углы в плане определяются в основной плоскости между положениями плоскости резания $P_n - P_n$, касательной к режущей кромке, и рабочей плоскости $P_s - P_s$, проходящей через векторы скорости главного движения и движения подачи [1].

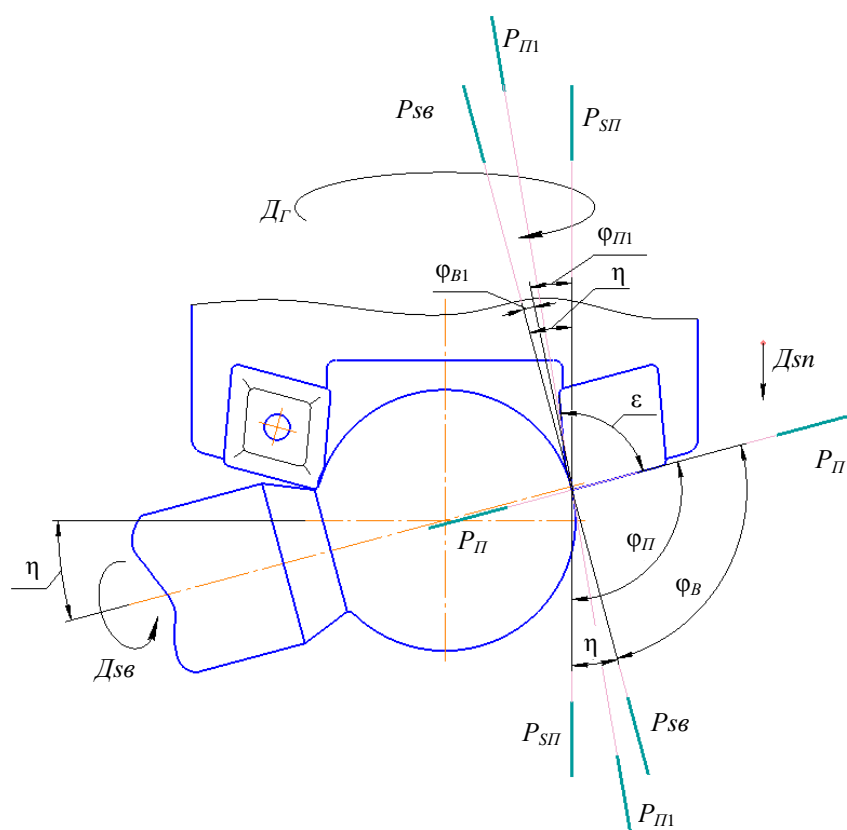


Рисунок 4. – Изменение кинематических главного φ и вспомогательного φ_1 углов в плане лезвия режущего инструмента

Рассмотрим два перехода комбинированной обработки: врезание и выхаживание [3].

При врезании положение отсчётной для определения углов в плане рабочей плоскости $P_{sn}-P_{sn}$ определяется продольной подачей S_n .

При выхаживании положение рабочей плоскости $P_{sv}-P_{sv}$ изменяется и определяется круговой подачей S_v . Изменение положений рабочей плоскости приводит к изменению значений углов в плане.

При врезании инструмента в заготовку за счёт поступательного движения D_{sn} режущая кромка, связанная с углом в плане φ_n , участвует в срезании наибольшей стороны сечения срезаемого слоя, то есть является участком главной режущей кромки. На переходе выхаживания, когда поступательное движение D_{sn} отсутствует и совершается вращательное движение D_{sv} , положение рабочей плоскости ($P_{sv}-P_{sv}$) изменяется и углы в плане φ_B и φ_{V1} принимают меньшее значение по сравне-

нию с φ_{II} и φ_{III} . Известно [1], что такие значения углов φ_B и φ_{B1} приводят к снижению формируемых неровностей на поверхности сферы.

Изменение значений углов в плане лезвия определяется углом наклона оси вращения детали η относительно горизонтальной оси, то есть $\varphi_B = \varphi_{II} - \eta$; $\varphi_{B1} = \eta - \varphi_{III}$. Угол η задается исходя из конфигурации обрабатываемой поверхности детали и может изменяться от 0 до 90°.

Как показывают расчеты, изменения значений передних и задних углов лезвия при изменении частоты вращения инструмента незначительны (в пределах 0,25 град) [4]. Данные расчеты будут справедливы на этапе выхаживания и для углов в плане. Изменения этих углов определяются в основном углом установки η . Для исключения влияния угла установки оси детали η , определяющего схему комбинированной обработки сферической поверхности вращающимся инструментом, на значения углов в плане лезвия φ_B и φ_{B1} предложено подтачивать режущую кромку лезвия с образованием участка длиной 2...4 мм и углом в плане, равным 1...5° [5].

Была произведена обработка партии заготовок вращающимся инструментом и измерена шероховатость полученных сферических поверхностей.

Фрагмент результатов измерений представлен на рисунке 5 в виде профилограммы.

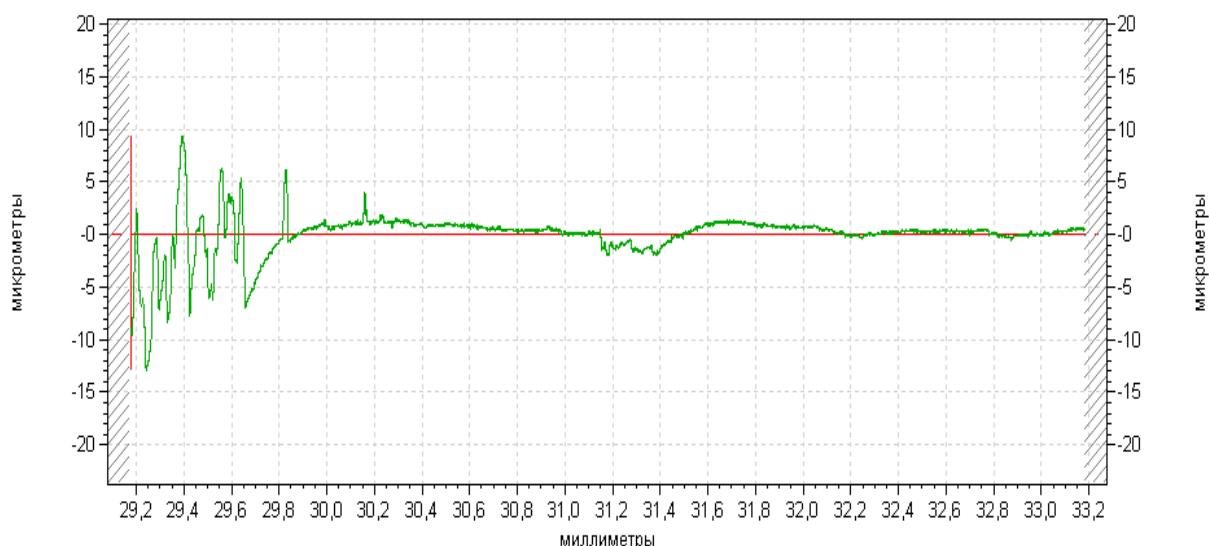


Рисунок 5. – Фрагмент профилограммы сферической поверхности детали, обработанной вращающимся инструментом

Как видно из профилограммы, обработка сферических поверхностей инструментом с углом подточки φ , равным 5°, обеспечивает высоту неровностей в пределах Ra 0,4...1,2 мкм, что соответствует чистовой обработке.

Заключение

1. При контурной обработке сферической поверхности детали на токарных станках с ЧПУ необходимо учитывать изменение углов в плане φ и φ_1 лезвия за счет угла контакта μ , существенно влияющих на шероховатость обработанной поверхности. Для уменьшения высоты неровностей и получения равномерной шероховатости по всей поверхности сферы рекомендуется управлять изменением подачи инструмента.

2. При обработке сферической поверхности детали вращающимся лезвийным инструментом изменение углов в плане лезвия за счет движений инструмента и детали незначительны, что исключает их влияние на шероховатость обработанной поверхности. Влияние угла установки оси детали η на значения углов в плане и шероховатость поверхности рекомендуется компенсировать подточкой участка режущей кромки длиной 2...4 мм и углом $\varphi = 1...5^\circ$, что обеспечивает получение шероховатости поверхности с параметром $Ra = 0,4...1,2$ мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попок, Н.Н. Теория резания : учеб. пособие для студентов машиностроительных специальностей / Н.Н. Попок. – Новополюк : ПГУ, 2006. – 228 с.

2. Влияние круговой подачи на шероховатость сферической поверхности детали / Н.Н. Попок [и др.] // Материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике» (70-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. – Минск : БНТУ, 2017. – Т. 3. – С. 445.
3. Попок, Н.Н. Технологическое обеспечение обработки неполных сферических поверхностей деталей машин / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2018. – № 3. – С. 54–60.
4. Изменение передних и задних углов лезвия фрезы при обработке сферических поверхностей детали / Н.Н. Попок [и др.] // Вестник Барановичского государственного университета. Серия «Технические науки». – 2017. – № 5. – С. 71–77.
5. Хмельницкий, Р.С. Технология скоростной обработки неполных сферических поверхностей деталей машин вращающимся лезвийным инструментом : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / Р.С. Хмельницкий ; Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2017. – 199 л.

Поступила 22.08.2018

INFLUENCE OF TOOL CUTTING EDGE ANGLES AT ROUGHNESS OF THE PROCESSED SURFACE OF THE SPHERE

N. POPOK, I. KUNTSEVICH, R. HMELNICKY, V. ANISIMOV, G. GVOZDZ

The change of tool cutting edge angle when machining spherical surfaces of parts on a CNC lathe and in combination machining is analyzed. Formulas for determining the roughness parameter and the angle of contact of the cutting tool moving along a spherical surface are given. The change of tool cutting edge angles on transitions of piercing and nursing when machining a spherical surface with a rotating cutting tool with a translational feed motion is considered.

Keywords: roughness, spherical surface, tool cutting edge angle, turning, combined processing.