

УДК 621.83

DOI: 10.30987/article_5bd8aa88331c73.67303669

А.А. Маликов, д.т.н.,

А.В. Сидоркин, к.т.н.,

С.Л. Рахметов, аспирант

(Тульский государственный университет, 300012 г. Тула, пр. Ленина, 92)

E-mail: andrej-malikov@yandex.ru

Определение степени влияния основных параметров стружечной канавки шевера-прикатника на его ширину

Приведено описание математической модели стружечной канавки шевера-прикатника, содержащей параметрическое представление ее винтовых поверхностей. Выстроена методика определения запаса по ширине инструмента, позволяющая обеспечить достаточную стойкость во время обработки в зацеплении «инструмент – заготовка».

Ключевые слова: шевер-прикатник; стружечная канавка; ширина инструмента; архимедова спираль; зубообработка; арка зуба.

A.A. Malikov, Dr. Sc. Tech.,

A.V. Sidorkin, Can. Sc. Tech.,

S.L. Rakhmetov, Post graduate student

(State University of Tula, 92. Lenin Avenue, Tula, 300012)

Definition of basic parameter impact of shaver-roller chip groove upon its width

The description of the simulator of a shaver-roller chip groove having a parameter presentation of its helical surfaces is shown. A procedure for the definition of tool width life allowing the assurance of a sufficient strength during machining in a “tool-blank” engagement is formed.

Keywords: shaver-roller; chip groove; tool width; Archimedean spiral; tooth machining; tooth arch.

Группа исследователей, изучающих процесс шевенгования-прикатывания цилиндрических колес [1, 2], в том числе и с круговыми зубьями (ЦККЗ), в своих работах не достаточно акцентировали внимание на вопросе определения минимально необходимой ширины режуще-деформирующего инструмента b_0 и изучении влияния на нее комплекса основных параметров стружечной канавки, таких как: угол наклона боковых поверхностей $\theta/2$, заданного в осевой плоскости и число заходов z_c . Этот вопрос является весьма актуальным, т.к. задает область конструкторско-технологических ограничений, определяющих возможность эффективного изготовления шевера-прикатника для зубообработки ЦККЗ в условиях инструментального производства и его применения при производстве таких колес с большим объемом выпуска [3, 4].

Винтовая канавка на цилиндрической поверхности шевера-прикатника необходима для образования множества режущих кромок инструмента и, по сути, она является передней

поверхностью его режущих зубьев. В работе [5] показано, что число заходов стружечной канавки не влияет на результат обработки боковых поверхностей зубьев заготовки и их шероховатость.

Настоящее исследование направлено на определение влияния угла наклона боковых поверхностей стружечной канавки $\theta/2$ и число ее заходов z_c на ширину шевера-прикатника b_0 в осевой плоскости с использованием параметрического задания поверхностей, образующих стружечную канавку.

Как известно, выпуклая и вогнутая поверхности зуба шевера-прикатника должны быть конгруэнтны (взаимно дополнять друг друга), с вогнутой и выпуклой поверхностями зуба заготовки [6]. Это, в свою очередь, накладывает ограничения на конструкцию инструмента второго порядка и минимальный радиус кривизны арки зуба шевера-прикатника $r_{0e \min}$. Увеличение ширины b_0 усугубляет сложившееся положение и вносит дополнительные ограничения в область вариантов конструкций

зубчатых передач, что приводит к увеличению радиуса $r_{0e\ min}$ [3, 7].

Очевидно, что ширина шевера-прикатника b_0 должна быть больше ширины обрабатываемого колеса b_1 . Это необходимо для того, чтобы обеспечивать гарантированные условия для равномерного удаления слоев металла по всей длине зубьев обрабатываемой заготовки и исключить преждевременные сколы и выкрашивания зубьев инструмента, расположенных ближе к его торцам. Соблюдение данного требования позволяет получить качественные результаты обработки зубьев заготовки по всей их длине.

В связи с вышеизложенным, зададимся запасом шевера-прикатника по ширине $b_{0\ доп}$, равным половине толщины его зуба, в нормальной плоскости к витку.

Входными параметрами для расчета стружечной канавки являются: модуль m , число заходов z_c , угол наклона $\theta/2$, ширина венца обрабатываемого колеса b_1 (рис. 1) [5, 6]. Совокупное рациональное сочетание параметров стружечной канавки инструмента должно обеспечивать следующие условия: необходимую минимальную толщину зуба на вершине $S_{a0n\ min}$, определяемую нормально к винтовой линии стружечной канавки; достаточную рабочую высоту зуба. На рис. 1, а представлена развертка начальной окружности заготовки 1 в станочном зацеплении с шевером-прикатником 2.

При проектировании шевера-прикатника внеполюсного зацепления, необходимо обеспечивать минимальную толщину зуба при вершине $S_{a0} \geq 0,25 m$ [6, 7]. Учитывая характер формообразования стружечной канавки инструмента, представляющей собой геликоид, образованный вращением плоских кривых вокруг некоторой оси с заданным винтовым параметром, возникает необходимость определения толщины зуба на окружности вершин, в плоскости, нормальной к витку S_{a0n} . Для этого используется параметрическое представление поверхности, когда положение ее текущей точки определяется вектором с двумя переменными величинами, описываемое следующим векторным уравнением [8, 9]:

$$r(u, v) = x(u, v)i + y(u, v)j + z(u, v)k,$$

где i, j, k – орты координатных осей; u и v – независимые параметры уравнения поверхности.

Для систематизации и упрощения расчетов зададим четыре взаимосвязанные координатные системы:

$S_i(x_i, y_i, z_i)$ – определяющую координаты точек архимедовой спирали;

$S_R(x_R, y_R, z_R), S_L(x_L, y_L, z_L)$ – определяющие координаты, повернутые относительно S_i на половину угловой ширины впадины, для определения координат точек правой и левой архимедовых спиралей;

$S_0(x_0, y_0, z_0)$ – задающую координаты точек поверхности стружечной канавки.

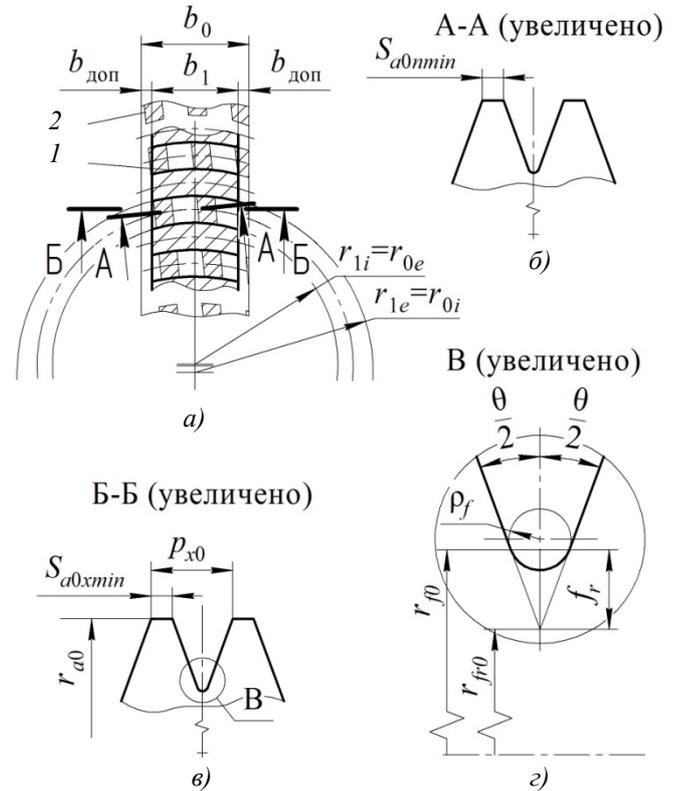


Рис. 1. К расчету геометрических параметров стружечной канавки:

а – развертка начальных окружностей шевера-прикатника и обрабатываемого им ЦКЗ в станочном зацеплении; б – сечение стружечной канавки в плоскости, нормальной к ее витку; в – сечение стружечной канавки в осевой плоскости шевера-прикатника; г – геометрия дна стружечной канавки

В расчетах используем архимедову спираль, параметры которой заданы для достаточного обеспечения точности обработки и стойкости инструмента, а также наиболее технологичную с точки зрения процесса ее формообразования, например, на токарно-винторезных станках [8]. Таковая представляется уравнением:

$$\left. \begin{aligned} x &= \pm u \cos(\theta/2) \cos(v), \\ y &= p_{zx0} v - u \sin(\theta/2), \\ z &= u \cos(\theta/2) \sin(v). \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где знак «+» принимается для правозаходной, а «-» – для левозаходной стружечной канавки, p_{zx0} – винтовой параметр.

Винтовой параметр определяется из следующей зависимости:

$$p_{zx0} = \frac{P_{x0}}{2\pi}, \quad (2)$$

где r_0 – делительный радиус; γ_{m0} – делительный угол подъема.

Осевой шаг винтовой стружечной канавки шевера-прикатника будет задаваться значением a из стандартного ряда [10], при этом, минимальное значение не должно быть меньше m , а максимальное не больше $5m$. Учитывая число заходов винтовой канавки, получим:

$$p_{x0} = z_c a. \quad (3)$$

Делительный радиус определяется как:

$$r_0 = \frac{mz_0}{2}, \quad (4)$$

где z_0 – число зубьев шевера-прикатника.

Определение делительного угла подъема осуществляется по формуле

$$\gamma_{m0} = \arctg\left(\frac{z_c m}{2r_0}\right). \quad (5)$$

Радиус окружности вершин определяется следующим выражением:

$$r_{a0} = a_w - (r_{f2} + 0,25m), \quad (6)$$

где a_w – межосевое расстояние в станочном зацеплении.

Радиус окружности впадин с учетом коэффициента смещения инструмента χ_0 :

$$r_{f0} = r_0 - \frac{(h_0 - \chi_0)m}{2}, \quad (7)$$

где h_0 – коэффициент высоты витка.

Радиус вспомогательной окружности сопряжения эвольвентных кривых с учетом запаса на радиус скругления у дна стружечной канавки (см. рис. 1, з):

$$r_{fr0} = r_{f0} - f_r, \quad (8)$$

где f_r – запас на радиус скругления, определяется из зависимости:

$$f_r = \frac{\rho_f \cos^2(\theta/2)}{\sin(\theta/2)}, \quad (9)$$

где ρ_f – радиус окружности, сопряженный с исходным контуром; $\rho_f = 0,38 m$ [9].

Преобразование координат при переходе из S_i в $S_{R/L}$ представлено матрицей, структура которой в общем виде отражена в работах [8, 9]. Для рассматриваемого случая примет вид:

$$M_{R/L,i} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_{frR/L} & 0 & \sin \varphi_{frR/L} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_{frR/L} & 0 & \cos \varphi_{frR/L} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Основываясь на выражениях, представленных в [8, 9], для рассматриваемого случая, запишем зависимость угла поворота для правой и левой архимедовых спиралей соответственно:

$$\varphi_{frR} = -\frac{u_{fr0R} \sin(\theta/2)}{P_{zx0}}, \quad (11)$$

$$\varphi_{frL} = \frac{u_{fr0L} \sin(\theta/2)}{P_{zx0}} + \pi. \quad (12)$$

В торцовом сечении уравнение архимедовой спирали имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= -\frac{P_{zx0} v_i}{\sin(\theta/2)} \cos(\theta/2) \cos(v_i), \\ z_i &= \frac{P_{zx0} v_i}{\sin(\theta/2)} \cos(\theta/2) \sin(v_i). \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Используя уравнение (13) и зависимость (3) для винтового параметра, получим уравнение координат точек правой и левой архимедовых спиралей в системе S_i (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} x_i &= \pm u_i \cos(\theta/2) \cos(v_i), \\ y_i &= P_{zx0} v_i - u_i \sin(\theta/2), \\ z_i &= u_i \cos(\theta/2) \sin(v_i). \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где знак «+» принимается для правозаходной, а «-» – для левозаходной стружечной канавки.

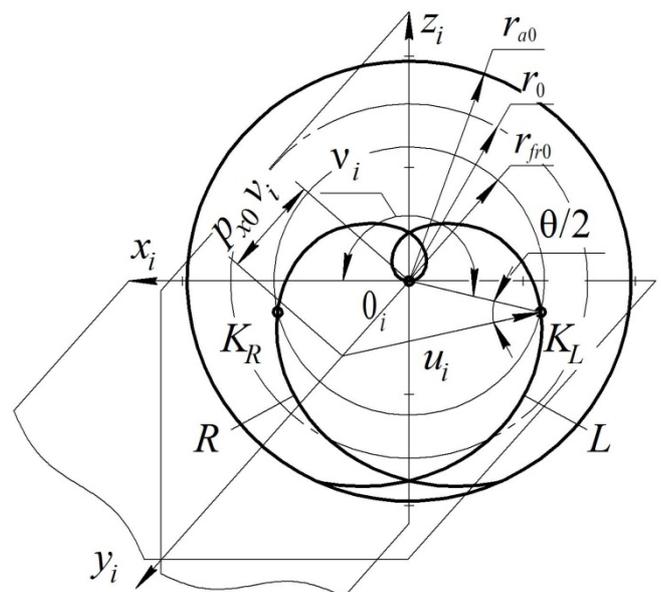


Рис. 2. Иллюстрация параметров архимедова червяка в торцовом сечении шевера-прикатника в координатной системе S_i

Проекция архимедовой спирали на плоскость $x_i O_i z_i$ представляет собой раскручивающуюся линию. Для расчета стружечной канавки шевера-прикатника необходимо рассматривать участок архимедовой спирали, ограниченный цилиндрами, заданными окружностями с радиусами r_{a0} и r_{f0} .

Если проекции пересекают окружность r_{f0} в одной точке K (рис. 3), то ширина стружечной канавки будет стремиться к нулю, с учетом заданного радиуса сопряжения на окружности впадин r_{f0} , а толщина зуба на окружности вершин r_{a0} будет при этом максимально возможной.

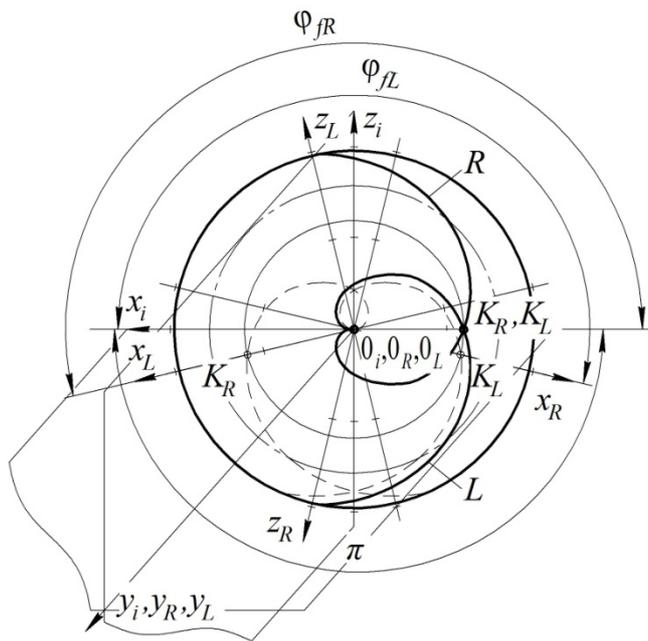


Рис. 3. Координатные системы S_i, S_R и S_L

Для обеспечения необходимой ширины стружечной канавки определим координаты точек архимедовых спиралей в системах S_R и S_L (рис. 3), задавая положение последних относительно S_i , повернув их вокруг оси y_i соответственно на угол φ_{fR} и φ_{fL} , путем совместного решения матрицы (10) и уравнения (14):

$$r_{R/L}(u_{R/L}, v_{R/L}) = \begin{vmatrix} x_{R/L}(u_{R/L}, v_{R/L}) \\ y_{R/L}(u_{R/L}, v_{R/L}) \\ z_{R/L}(u_{R/L}, v_{R/L}) \end{vmatrix} = M_{R/L,i} \cdot \begin{vmatrix} x_i(u_i, v_i) \\ y_i(u_i, v_i) \\ z_i(u_i, v_i) \end{vmatrix} \quad (15)$$

Таким образом, в рассматриваемом случае, точки K_R и K_L , принадлежащие правой и левой

архимедовым спиральям, совпадут и будут находиться на оси $O_i x_i$ (см. рис. 3).

В сокращенной записи матричное равенство (15) примет вид:

$$r_{R/L}(u_{R/L}, v_{R/L}) = M_{R/L,i} \cdot r_i(u_i, v_i).$$

Преобразование координат при переходе из S_R и S_L в S_0 представлено матрицей, структура которой, в общем виде отражена в работах [8, 9], а для рассматриваемого случая такая примет вид:

$$M_{0,R/L} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_i & 0 & \sin \varphi_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{\pm 0,5 p_{x0} \varphi_i}{\pi} \\ -\sin \varphi_i & 0 & \cos \varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (16)$$

где знак «+» принимается для правозаходной, а «-» – для левозаходной стружечной канавки.

Рассмотрим винтовое движение, описываемое матрицей (16), систем S_R и S_L , заданных матричным равенством (15), вокруг оси y_i , которым принадлежат плоские кривые L и R таким образом, чтобы ось вращения была перпендикулярна плоскости, которой принадлежат кривые L и R . В этом движении кривые L и R образуют поверхности стружечной канавки шевера-прикатника (рис. 4), которые описаны системой координат S_0 :

$$r_0(u_0, v_0) = \begin{vmatrix} x_0(u_0, v_0) \\ y_0(u_0, v_0) \\ z_0(u_0, v_0) \end{vmatrix} = M_{0,R/L} \cdot \begin{vmatrix} x_{R/L}(u_{R/L}, v_{R/L}) \\ y_{R/L}(u_{R/L}, v_{R/L}) \\ z_{R/L}(u_{R/L}, v_{R/L}) \end{vmatrix} \quad (17)$$

В сокращенной записи матричное равенство (17) примет вид:

$$r_0(u_0, v_0) = M_{0,R/L} \cdot r_{R/L}(u_{R/L}, v_{R/L}).$$

Область между цилиндрами, заданными окружностями с радиусами r_{a0} и r_{f0} , определяет положение стружечной канавки шевера-прикатника. Расстояние u_i для окружности вершин, делительной окружности и окружности впадин определяется соответственно по зависимостям (18), (19), (20), структура которых, в общем виде представлена в работах [8, 9]. Для рассматриваемого случая примет вид:

$$u_{a0} = \frac{r_{a0}}{\cos(\theta/2)}; \quad (18)$$

$$u_0 = \frac{r_0}{\cos(\theta/2)}; \quad (19)$$

$$u_{fr0} = \frac{r_{fr0}}{\cos(\theta/2)}. \quad (20)$$

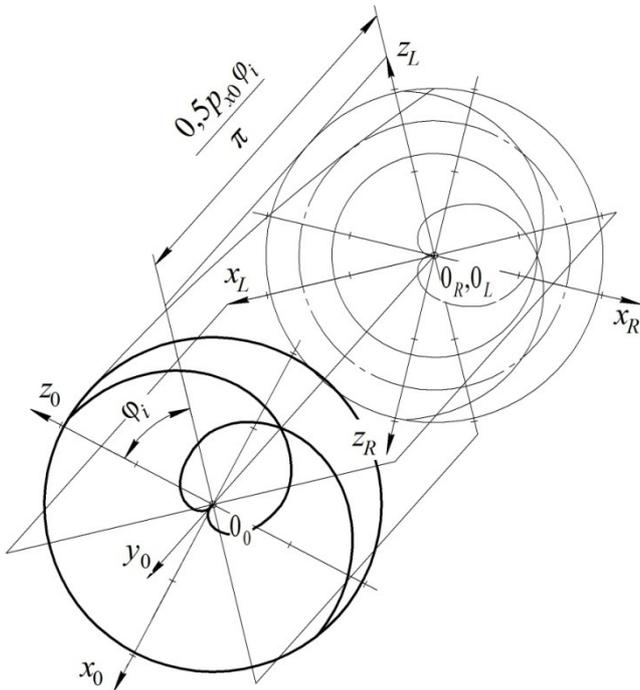


Рис. 4. Координатные системы S_R , S_L и S_0

Преобразование координат при переходе в осевую плоскость S_0 представлено матрицей:

$$M_\zeta = \begin{vmatrix} \cos \zeta_0 & 0 & \sin \zeta_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{\pm 0,5 p_{x0} \zeta_0}{\pi} \\ -\sin \zeta_0 & 0 & \cos \zeta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (21)$$

Угловое смещение точек, рассматриваемых в осевой плоскости, по винтовой линии, рассчитывается из зависимости:

$$\zeta_0 = \arctg\left(\frac{z_0}{x_0}\right). \quad (22)$$

Используя матрицу координат точек стружечной канавки (21) и матричное равенство (17) получим уравнение, описывающее правую и левую стороны стружечной канавки, в осевой плоскости:

$$r_{0x}(u_{0x}, v_{0x}) = \begin{vmatrix} x_{0x}(u_{0x}, v_{0x}) \\ y_{0x}(u_{0x}, v_{0x}) \\ z_{0x}(u_{0x}, v_{0x}) \end{vmatrix} = M_\zeta \cdot \begin{vmatrix} x_{f0}(u_{f0}, v_{f0}) \\ y_{f0}(u_{f0}, v_{f0}) \\ z_{f0}(u_{f0}, v_{f0}) \end{vmatrix}. \quad (23)$$

Для определения запаса шевера-прикатника по ширине b_0 доп необходимо последователь-

но решить представленные выше зависимости для параметров, определяющих координаты точек, лежащих на окружности вершин инструмента r_{a0} .

Тогда получится, что толщина вершины зуба шевера-прикатника на окружности вершин инструмента $2 r_{a0}$ в осевой плоскости определится по следующей зависимости:

$$S_{a0x} = y_{a0xR} - y_{a0xL}. \quad (24)$$

Толщина витка на окружности вершин $2 r_{a0}$ в сечении нормальном к витку, определяется как:

$$S_{a0n} = S_{a0x} \cos(\gamma_{ma0}), \quad (25)$$

где γ_{ma0} – угол между осевой и нормальной плоскостями, определяется по формуле:

$$\gamma_{ma0} = \arcsin\left(\frac{z_c m}{2r_{a0}}\right). \quad (26)$$

Определение дополнительной ширины b_0 доп инструмента в плоскости, нормальной к витку, осуществляется по следующей зависимости:

$$b_{0 \text{ доп}} = \frac{0,5 p_{x0} \Phi_{0 \text{ доп}}}{z_c \pi}, \quad (27)$$

где $\Phi_{0 \text{ доп}}$ – угол поворота, задающий смещение по оси 0_{0x0} , определяется как:

$$\Phi_{0 \text{ доп}} = \frac{S_{f0x} \cos \gamma_{mf0} \pi}{0,5 p_{x0}}, \quad (28)$$

где S_{f0x} – толщина витка стружечной канавки в нормальной плоскости к нему на окружности впадин r_{f0} , определяется по зависимости:

$$S_{f0x} = y_{f0xR} - y_{f0xL}, \quad (29)$$

где γ_{mf0} – угол между осевой и нормальной плоскостями, определяется как:

$$\gamma_{mf0} = \arcsin\left(\frac{z_c m}{2r_{f0}}\right). \quad (30)$$

В результате исследования получена математическая модель, которая может иметь дальнейшее развитие в виде алгоритма и быть программно реализована, что позволяет рассчитывать оптимальные параметры стружечной канавки шевера-прикатника, такие как угол наклона боковой поверхности $\theta/2$ и число заходов z_c , обеспечивающие достаточную ширину шевера-прикатника b_0 для эффективной зубообработки ЦККЗ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ямников, А.С., Маликов, А.А., Валиков, Е.Н. Сидоркин, А.В. Ресурсосберегающие технологии изготовле-

ния цилиндрических зубчатых колес // Технология машиностроения. – 2008. – №7. – С. 7-10.

2. **Маликов, А.А., Сидоркин, А.В.** Комбинированная технология шевингования-прикатывания зубьев цилиндрических колес // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – №12(18). – С. 23-26.

3. **Маликов, А.А., Сидоркин, А.В., Рахметов, С.Л.** К вопросу о технологических ограничениях, обусловленных конструкцией инструмента, используемого в процессе шевингования-прикатывания цилиндрических колес с круговыми зубьями // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – Вып. 1. – С. 165-171.

4. **Маликов, А.А., Сидоркин, А.В., Рахметов, С.Л.** Определение механизма параметрической взаимосвязи диаметра шевера-прикатника с диаметром обрабатываемого им цилиндрического колеса с круговым зубом // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – №9(87). – С. 39-44.

5. **Валиков, Е.Н., Белякова, В.А.** Режущее-деформирующая чистовая обработка боковых поверхностей зубьев зубчатых колес: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 216 с.

6. **Маликов, А.А., Сидоркин, А.В., Ямников, А.С.** Инновационные технологии обработки зубьев цилиндрических колес: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 335 с.

7. **Коганов, И.А.** Прогрессивная обработка зубчатых профилей и фасонных поверхностей. – Тула: Приокское книжное издательство, 1970. – 184 с.

8. **Litvin F.L., Fuentes A.** Gear geometry and Applied theory. Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York, 2004, 800 pp.

9. **Radzevich, S.P.** Gear Cutting Tools: Science and Engineering, 2nd Edition, Boca Raton, Florida, 2017, 564 p.p.

REFERENCES

1. Yamnikov, A.S., Malikov, A.A., Valikov, E.N., Sidorkin, A.V. Resource-saving technologies for manufacturing cylindrical cog-wheels // *Engineering Technique*. – 2008. – No.7. – pp. 7-10.

2. Malikov, A.A., Sidorkin, A.V. Combined technique for shaving-rolling cylindrical cog-wheel teeth // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – No.12(18). – pp. 23-26.

3. Malikov, A.A., Sidorkin, A.V., Rakhmetov, S.L. On problem of technological limitations caused by design of tool used in shaving-rolling cylindrical cog-wheels with circular teeth // *Transactions of TulaSU. Engineering Sciences*. – 2018.-Edition 1. – pp. 165-171.

4. Malikov, A.A., Sidorkin, A.V., Rakhmetov, S.L. Definition of parameter interconnection mechanisms of shaver-roller diameter with diameter of round toothed cylindrical cog-wheel machined by shaver-roller // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2019. – No.9(87). – pp. 39-44.

5. Valikov, E.N., Belyakova, V.A. *Cog-Wheel Side Surface Cutting-Deforming Finishing*: monograph. – Tula: Publishing House of TulaSU, 2011. – pp. 216.

6. Malikov, A.A., Sidorkin, A.V., Yamnikov, A.S. *Innovation Technologies in Cylindrical Cog-Wheel Teeth Machining*: monograph. – Tula: Publishing House of TulaSU, 2011. – pp. 335.

7. Koganov, I.A. *Gear Profile and Formed Surface Efficient Machining*. – Tula: Priokskoe Publishing House, 1970. – pp. 184.

8. Litvin F.L., Fuentes A. Gear geometry and Applied theory. Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York, 2004, 800 pp.

9. Radzevich, S.P. Gear Cutting Tools: Science and Engineering, 2nd Edition, Boca Raton, Florida, 2017, 564 p.p.

Рецензент д.т.н. С.Я. Хлудов

УДК 621.9

DOI: 10.30987/article_5bd8aa88927ea5.47195677

М.Ю. Куликов, д.т.н., М.В. Ягодкин, аспирант
(Институт конструкторско-технологической информатики РАН,
127055 Москва Вадковский пер. 18, стр. 1а),

А.А. Крапостин, к.т.н.
(ОАО «Завод им. К.Г. Королева, 153003, Ивановская обл., г. Иваново, ул. Зверева, 22)
E-mail: muk.56@mail.ru

Влияние концентрации электролита и напряжения в цепи на надёжность процесса нарезания резьбы метчиком в отверстиях сверхмалого диаметра с применением анодно-механической обработки

Статья рассматривает влияние концентрации электролита и напряжения в цепи на надёжность процесса нарезания резьбы метчиком в отверстиях сверхмалого диаметра с применением анодно-механической обработки (АМО). Показано влияние изменения массовой доли хлорида натрия в растворе электролита и влияние подаваемого напряжения в процессе обработки резьбовых отверстий сверхмалого диаметра ($\leq M1,4$) с применением АМО.

Ключевые слова: нарезание резьбы; сверхмалый диаметр; надёжность процесса; формирование момента; электрохимическая обработка.