

УДК 621.83

DOI: 10.30987/article_5d6518cd9430f8.31219856

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

Особенности формообразования венца комбинированного инструмента для шевингования-прикатывания цилиндрических колес с круговыми зубьями

Приведено описание математической модели, позволяющей установить основные геометрические параметры, характеризующие взаимодействие инструментов второго порядка и обрабатываемого ими зубчатого венца шевра-прикатника, для всех стадий его формообразования: от черновой до отделочной.

Ключевые слова: шевр-прикатник; круговые зубья; инструмент второго порядка; зубообработка; формообразование.

A.A. Malikov, Dr. Sc. Tech., **A.V. Sidorkin**, Can. Sc. Tech., **S.L. Rakhmetov**, Post graduate student
(Tula State University, 92, Lenin Avenue, Tula, 300012)

Peculiarities in combined tool rim formation for shaving-attaching of cylindrical gears with circular teeth

The description of the simulator allowing the definition of basic geometrical parameters characterizing the interaction of the second order tools and a ring gear machined by them of a shaver-roller for all stages of its shaping: from roughing to finishing is shown.

Keywords: shaver-roller; circular teeth; second-order tool; tooth processing; shaping.

Одним из направлений научных исследований, проводимых кафедрами «Инструментальные и метрологические системы» и «Технология машиностроения» Тульского государственного университета является теоретико-экспериментальное исследование комбинированных (режущо-деформирующих) процессов зубообработки цилиндрических зубчатых колес, в том числе и с круговыми зубьями (ЦККЗ) [1 – 3]. Эти процессы являются частью технологической схемы, предложенной и теоретически обоснованной в работах [2, 4, 5].

Данная технологическая схема базируется, в частности, на обработке незакаленных колес шевингованием-прикатыванием, последующей их термообработке, и обработке уже закаленных колес алмазным или электроалмазным зубохонингованием [1]. Исходными заго-

товками при этом являются колеса с зубьями, накатанными малоотходными и высокопроизводительными методами пластического деформирования, или предварительно нарезанными [5].

При формообразовании венца шевра-прикатника возникают технологические ограничения, связанные с процессами зубообработки, поэтому определение основных геометрических параметров инструментов второго порядка на различных стадиях зубообработки является важной задачей.

Отделочная стадия зубообработки подразумевает окончательную раздельную зубообработку выпуклой и вогнутой сторон круговых зубьев шевра-прикатника и осуществляется после термообработки.

В зависимости от выбранной технологиче-

ской схемы может осуществляться зубошлифование, либо двухстадийная обработка сначала концевым твердосплавным инструментом, а затем, комбинированная электрохимико-механическая обработка. Схема осуществления описываемого процесса представлена на примере зубошлифования (рис. 1).

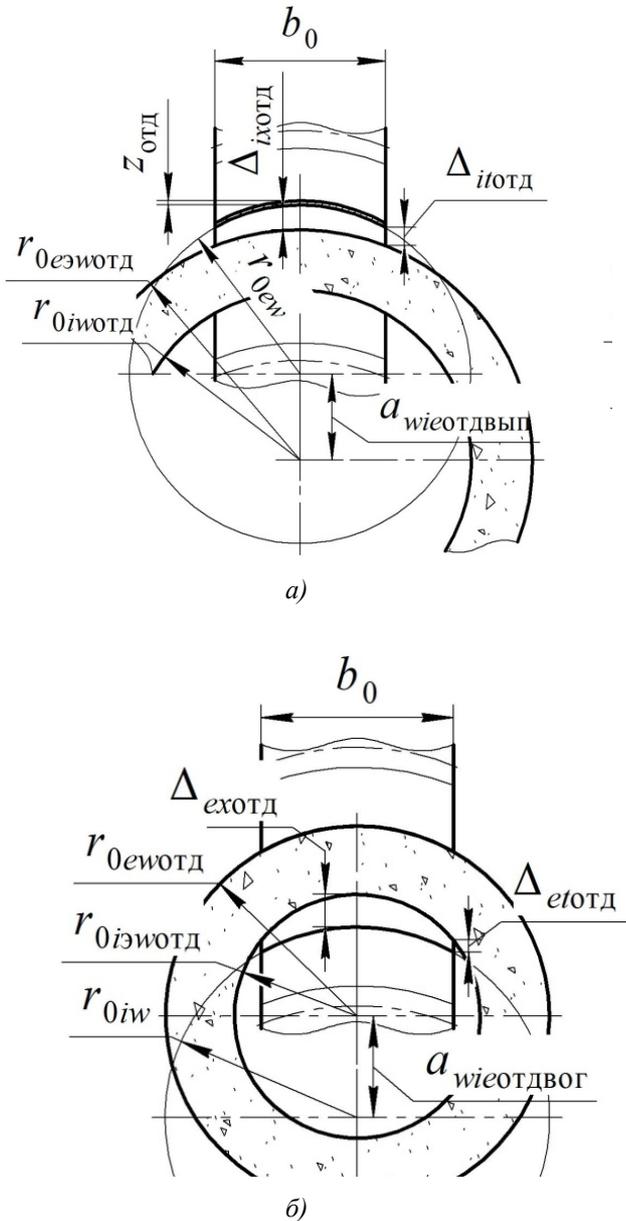


Рис. 1. Схема к определению зазоров в осевой и торцевой плоскостях на отделочной стадии зубообработки на примере зубошлифования:

а – выпуклой стороны зуба шевера-прикатника;
б – вогнутой стороны

Следует отметить, что как для зубошлифования, так и для электрохимико-механической обработки механизмы определения основных геометрических параметров идентичны. Раз-

ница заключается во входных ограничивающих данных. Для первого варианта обработки минимальная толщина на вершине рекомендуется:

$$S_{a0отд} \geq 0,5m, \quad (1)$$

для второго варианта:

$$S_{a0отд} \geq 0,25m. \quad (2)$$

С учетом припуска $z_{отд}$, предназначенного для отделочной стадии зубообработки, радиус инструмента второго порядка, формообразующий выпуклые стороны зубьев шевера-прикатника и радиус его нерабочей стороны, определяются в соответствии с зависимостями, приведенными ниже.

Радиус производящей поверхности инструмента, формообразующий выпуклую сторону зуба, при определенном габаритном радиусе шевера-прикатника [4]:

$$r_{0iвотд} = r_{0iw}. \quad (3)$$

Радиус поверхности инструмента не участвующей в формообразовании:

$$r_{0езвотд} = r_{0iвотд} + S_{a0отд} + h_3 [\text{tg}(\alpha_{0i}) + \text{tg}(\alpha_{0ез})], \quad (4)$$

где $S_{a0отд}$ – толщина зуба на вершине отделочного инструмента; $\alpha_{0ез}$ – угол профиля нерабочей стороны зуба инструмента второго порядка при обработке выпуклой стороны.

Радиусы инструмента второго порядка, формообразующего вогнутые боковые поверхности зубьев шевера-прикатника, определяются в соответствии со следующими зависимостями:

– радиус производящей поверхности инструмента, формообразующий вогнутую сторону зуба:

$$r_{0евотд} = r_{0ев}. \quad (5)$$

– радиус поверхности инструмента не участвующей в формообразовании:

$$r_{0iэвотд} = r_{0евотд} - [S_{a0отд} + h_3 (\text{tg}(\alpha_{0е}) + \text{tg}(\alpha_{0iэ}))], \quad (6)$$

где $\alpha_{0е}$ – угол профиля рабочей стороны зуба инструмента второго порядка при обработке вогнутой стороны; $\alpha_{0iэ}$ – угол профиля нерабочей стороны зуба инструмента.

В торцевой плоскости обрабатываемого зубчатого венца, в целях исключения касания нерабочей стороной инструмента второго порядка соседнего зуба, необходимо обеспечить зазоры $\Delta_{iотд}$ и $\Delta_{етотд}$.

Для выпуклой стороны (рис. 1, а) зазор на торце $\Delta_{iотд}$ зуба шевера-прикатника определяется в соответствии:

$$\Delta_{iотд} = \sqrt{r_{0евотд}^2 - (0,5b_0)^2} - \sqrt{r_{0езвотд}^2 - (0,5b_0)^2} + a_{wieотдвып}, \quad (7)$$

где b_0 – ширина венца шевера-прикатника [5];

$a_{w_{ieотд.вып}}$ – расстояние между осью вращения отделочного инструмента и осью окружности, описывающей вогнутую сторону кругового зуба с учетом припуска $z_{отд}$ на отделочную стадию зубообработки.

Межосевое расстояние $a_{w_{ieотд.вып}}$ определяется по следующей зависимости:

$$a_{w_{ieотд.вып}} = 0,5\pi m + r_{0i_{wотд}} - r_{0e_{wотд}} - z_{отд} \cdot (8)$$

$$\Delta_{etотд} = \sqrt{r_{0i_{эwотд}}^2 - (0,5b_0)^2} - \sqrt{r_{0i_{wотд}}^2 - (0,5b_0)^2} + a_{w_{ieотд.двог}}, \quad (10)$$

где $a_{w_{ieотд.двог}}$ – расстояние между осью вращения отделочного инструмента и осью окружности, описывающей выпуклую сторону кругового зуба.

Межосевое расстояние $a_{w_{ieотд.двог}}$ определяется по следующей зависимости:

$$a_{w_{ieотд.двог}} = 0,5\pi m + r_{0i_{wотд}} - r_{0e_{wотд}}, \quad (11)$$

Зазор в осевом сечении $\Delta_{exотд}$ шевера-прикатника определяется в соответствии:

$$\Delta_{exотд} = r_{0i_{эwотд}} + a_{w_{ieотд.двог}} - r_{0i_{wотд}} \cdot (12)$$

Чистовая стадия подразумевает раздельную зубообработку выпуклой и вогнутой сторон круговых зубьев шевера-прикатника и осуществляется после черновой стадии. В зависимости от выбранной технологической схемы может реализовываться фрезерованием зуборезными резцовыми головками (ЗРГ) или твердосплавными сферическими концевыми фрезами.

Схема осуществления процесса представлена на примере раздельного зубофрезерования выпуклой и вогнутой сторон двумя ЗРГ на рис. 2. В случае обработки впадины твердосплавным концевым сферическим инструментом, максимальный его диаметр рекомендуется ограничить исходя из условия минимальной толщины на вершине инструмента на отделочной стадии зубообработки (3).

Математическая модель процесса для первого случая представлена ниже, а схема его осуществления – на рис. 2.

С учетом совокупного припуска $z_{отд}$ и $z_{ч}$ на отделочную и чистовую стадии зубообработки соответственно и переднего угла $\gamma_{0ч}$ [8], радиус рабочей стороны зуба инструмента второго порядка – ЗРГ, формообразующей выпуклые стороны зубьев шевера-прикатника и радиус его нерабочей стороны определяются в соответствии с зависимостями, приведенными далее.

Рекомендуемая минимальная толщина на вершине зуба:

$$S_{a0ч} \geq 0,25m. \quad (13)$$

Радиус производящей поверхности ЗРГ, формообразующий выпуклую сторону зуба:

Зазор в осевом сечении $\Delta_{iотд}$ шевера-прикатника определяется в соответствии:

$$\Delta_{iотд} = r_{0e_{wотд}} + a_{w_{ieотд.вып}} - r_{0e_{эwотд}} \cdot (9)$$

Для вогнутой стороны (рис. 1, б) зазор на торце $\Delta_{iотд}$ шевера-прикатника определяется в соответствии:

$$r_{0i_{wч}} = r_{0i_{w}} \cdot (14)$$

Радиус поверхности ЗРГ, не участвующей в формообразовании:

$$r_{0e_{эwч}} = \sqrt{A^2 + r_{0i_{wч}}^2 - 2Ar_{0i_{wч}} \cos(\pi - \gamma_{0ч})}, \quad (15)$$

где A – вспомогательный параметр, определяется в соответствии с зависимостью:

$$A = S_{a0\gammaч} + h_3(\text{tg}(\alpha_{0i\gamma}) + \text{tg}(\alpha_{0e\gamma})), \quad (16)$$

где $\alpha_{0\gamma}$ – угол профиля рабочей стороны в передней плоскости; $\alpha_{0e\gamma}$ – угол профиля нерабочей стороны в передней плоскости.

Определим углы боковых сторон зуба ЗРГ в передней плоскости с учетом его переднего угла для того, чтобы при вращении ЗРГ производящая поверхность в осевой плоскости обеспечивала у рабочей стороны угол α_0 порядка 20° , а у нерабочей – угол $\alpha_{0э}$ который, как правило, меньше [6]. Угол $\alpha_{0i\gamma}$ определяется по следующей зависимости:

$$\alpha_{0i\gamma} = \frac{B\alpha_{0i}}{\sqrt{B^2 + r_{0i_{wч}}^2 - 2Br_{0i_{wч}} \cos(\pi - \gamma_{0ч})} - r_{0i_{wч}}}, \quad (17)$$

где B – вспомогательный параметр, определяется как:

$$B = S_{a0\gammaч} + h_3(\text{tg}(\alpha_{0ex}) + \text{tg}(\alpha_{0iэх})), \quad (18)$$

где α_{0ex} – угол профиля рабочей стороны в осевой плоскости; $\alpha_{0iэх}$ – угол профиля нерабочей стороны в осевой плоскости. Определяются в соответствии с равенствами:

$$\alpha_{0ex} = \alpha_{0e} \cdot (19)$$

$$\alpha_{0iэх} = \alpha_{0iэ} \cdot (20)$$

Угол $\alpha_{0e\gamma}$ определяется по следующей зависимости:

$$\alpha_{0e\gamma} = \frac{B\alpha_{0e}}{\sqrt{B^2 + r_{0i_{wч}}^2 - 2Br_{0i_{wч}} \cos(\pi - \gamma_{0ч})} - r_{0i_{wч}}}. \quad (21)$$

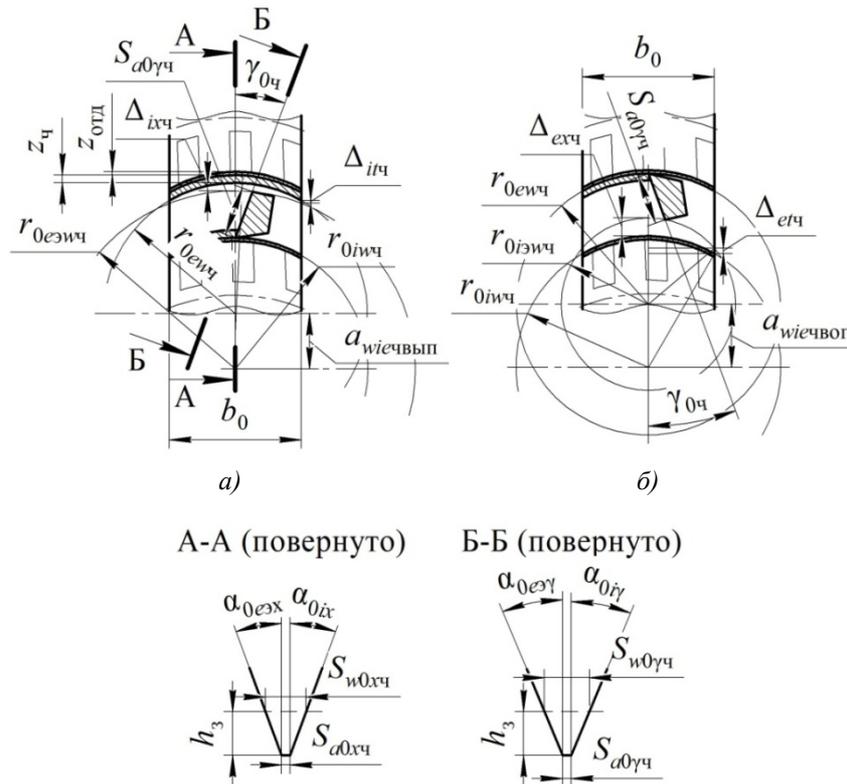


Рис. 2. Схема к определению зазоров в осевой и торцевой плоскостях на чистовой стадии зубообработки на примере формообразования односторонней ЗРГ:

a – выпуклой стороны зуба шевра-прикатника; *б* – вогнутой стороны

Радиус инструмента второго порядка, формообразующий вогнутые стороны зубьев шевра-прикатника и радиус нерабочей стороны определяются в соответствии со следующими зависимостями:

– радиус производящей поверхности ЗРГ, формообразующий вогнутую сторону зуба:

$$r_{0eич} = r_{0ew} \cdot \quad (22)$$

– радиус поверхности ЗРГ, не участвующей в формообразовании:

$$r_{0iэич} = r_{0eич} - S_{и0хч} \cdot \quad (23)$$

Толщина зуба в осевой плоскости на развертке начального цилиндра определяется по зависимости:

$$S_{и0хч} = \sqrt{A^2 + r_{0иэич}^2 - 2Ar_{0иэич} \cos(\pi - \gamma_{0ч})} - r_{0иэич} \cdot \quad (24)$$

В торцевой плоскости зуба обрабатываемого венца заготовки, в целях исключения касания нерабочей кромкой инструмента, необходимо обеспечить зазоры $\Delta_{ixч}$ и $\Delta_{etч}$.

Для выпуклой стороны (см. рис. 2, *a*) зазор на торце $\Delta_{ixч}$ шевра-прикатника определяется в соответствии с формулой:

$$\Delta_{ixч} = \sqrt{r_{0eич}^2 - (0,5b_0)^2} - \sqrt{r_{0эич}^2 - (0,5b_0)^2} + a_{иэчвып}, \quad (25)$$

где $a_{иэчвып}$ – расстояние между осью чистового инструмента и центром окружности, описывающей выпуклую сторону кругового зуба, с учетом припуска на отделочную и чистовую обработки.

Межосевое расстояние $a_{иэч.вып}$ определяется по следующей зависимости:

$$a_{иэчвып} = 0,5\pi m + (r_{0иэич} - r_{0eич}) - 2z_{отд} - z_{ч} \cdot \quad (26)$$

Зазор в осевом сечении $\Delta_{ixч}$ шевра-прикатника определяется по формуле:

$$\Delta_{ixч} = r_{0eич} + a_{иэчвып} - r_{0эиэич} \cdot \quad (27)$$

Для вогнутой стороны (см. рис. 2, *б*) зазор на торце $\Delta_{etч}$ шевра-прикатника определяется в соответствии:

$$\Delta_{etч} = \sqrt{r_{0iэиэич}^2 - (0,5b_0)^2} - \sqrt{r_{0иэиэич}^2 - (0,5b_0)^2} + a_{иэчвог}, \quad (28)$$

где $a_{иэчвог}$ – расстояние между осью вращения чистового инструмента и осью окружности, описывающей выпуклую сторону кругового зуба, с учетом припуска на отделочную обработку.

Расстояние a_{wiewog} определяется по следующей зависимости:

$$a_{wiewog} = 0,5\pi m + (r_{0iwч} - r_{0ewч}) - 2z_{отд}. \quad (29)$$

Зазор в осевом сечении $\Delta_{exч}$ шевера-прикатника определяется в соответствии:

$$\Delta_{exч} = r_{0iэwч} + a_{wiewog} - r_{0iwч}. \quad (30)$$

Черновая стадия зубообработки подразумевает, как правило, одновременное формообразование выпуклой и вогнутой сторон круговых зубьев шевера-прикатника. В зависимости от выбранной технологической схемы она может осуществляться зубофрезерованием ЗРГ или твердосплавными сферическими концевыми фрезами. Следует отметить, что во втором случае, при фрезеровании впадины рекомендуется последовательное ступенчатое уменьшение диаметра инструмента, что обеспечивает очевидную экономию дорогостоящих твердосплавных инструментов [7 – 9]. Диаметр инструмента рекомендуется ограничить, исходя из условия минимальной толщины вершины зуба ЗРГ (3).

Математическая модель процесса для первого случая представлена ниже, а схема его осуществления приведена на рис. 3.

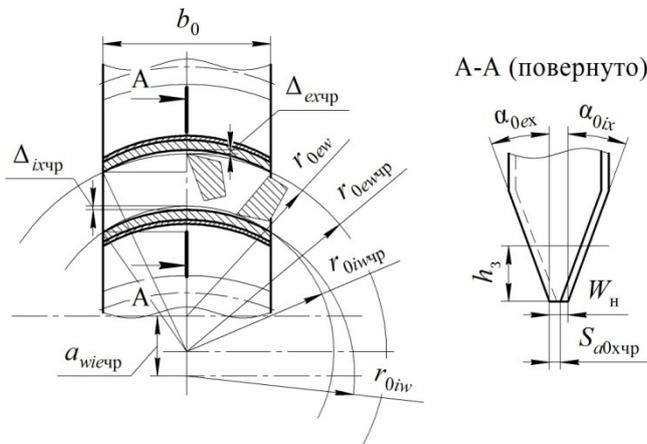


Рис. 3. Схема обеспечения равномерного припуска для черновой стадии зубообработки венца шевера-прикатника

С учетом совокупного припуска $z_{отд}$ и $z_ч$ на отделочную и чистовую стадии зубообработки и развода $W_н$ резцов черновой ЗРГ [10], радиусы инструмента второго порядка определяются в соответствии с зависимостями, приведенными ниже.

Минимальная толщина на вершине рекомендуется:

$$S_{α0чр} \geq 0,25m. \quad (31)$$

Радиус производящей поверхности ЗРГ, формообразующей выпуклую сторону зуба:

$$r_{0iwчр} = \sqrt{\left(\sqrt{r_{0iw}^2 - (0,5b_0)^2} - \frac{a_{wiewчр}}{a_{iчр}}\right)^2 + (0,5b_0)^2}, \quad (32)$$

где $a_{wiewчр}$ – расстояние между осями окружностей, описывающих вогнутую и выпуклую стороны кругового зуба, с учетом припуска на отделочную и чистовую стадии зубообработки; r_{0iw} – радиус окружности, описывающей выпуклую сторону кругового зуба с учетом припуска на отделочную и чистовую стадии зубообработки; $a_{iчр}$ – коэффициент, определяющий радиус точки, лежащей на пересечении режущей кромки, профилирующей выпуклые стороны зубьев инструмента и делительной прямой.

Расстояние $a_{wiewчр}$ определяется по следующей зависимости:

$$a_{wiewчр} = 0,5\pi m + (r_{0iw} - r_{0ew}) - 2z_{отд} - 2z_ч. \quad (33)$$

Радиус производящей поверхности ЗРГ, формообразующей вогнутую сторону зуба:

$$r_{0ewчр} = \sqrt{\left(\sqrt{r_{0ew}^2 - (0,5b_0)^2} - \frac{a_{wiewчр}}{a_{eчр}}\right)^2 + (0,5b_0)^2}, \quad (34)$$

где r_{0ew} – радиус окружности, описывающей вогнутую сторону кругового зуба с учетом припуска на отделочную и чистовую стадии зубообработки; $a_{eчр}$ – коэффициент, определяющий радиус точки, лежащей на пересечении режущей кромки, профилирующей вогнутые стороны зубьев инструмента и делительной прямой.

Для выпуклой стороны зазор в осевом сечении $\Delta_{ixчр}$ шевера-прикатника определяется по формуле:

$$\Delta_{ixчр} = r_{0iwчр} + \frac{a_{wiewчр}}{a_{iчр}} - r_{0iw}. \quad (35)$$

Для вогнутой стороны – $\Delta_{exчр}$:

$$\Delta_{exчр} = r_{0ewчр} + \frac{a_{wiewчр}}{a_{eчр}} - r_{0ewчр}. \quad (36)$$

Коэффициенты $a_{iчр}$ и $a_{eчр}$ определяются из условия:

$$\Delta_{exчр} = \Delta_{ixчр}. \quad (37)$$

Глубина прорезания впадины для обеспечения равномерного припуска на последующие стадии зубообработки рассчитывается по следующей зависимости:

$$h_{чр} = \frac{r_{0ewчр} - r_{0iwчр} - W_н}{2\text{tg}\alpha}. \quad (38)$$

Таким образом, разработанная математическая модель направлена на определение основных параметров процессов формообразования круговых зубьев и ключевых парамет-

ров инструментов второго порядка для осуществления двух вариантов маршрутов зубообработки венцов комбинированного инструмента с учетом технологических ограничений присущих им.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Malikov, A.A., Sidorkin, A.V.** Heat liberation in the shaving of cylindrical gears // *Russian Engineering Research*. – 2015. Volume 35, Issue 8, – pp. 631-634.
2. **Маликов, А.А., Сидоркин, А.В., Ямников, А.С.** Динамические характеристики шевингования-прикатывания цилиндрических колес с круговыми зубьями // *Технология машиностроения*. – 2012. – № 2. – С. 19 – 23.
3. **Валиков, Е.Н., Индан, А.А., Попов, А.Л.** Экспериментальное исследование точности шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес на токарном станке с ЧПУ // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2014. – Вып. 5. – С. 11-17.
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. **Маликов, А.А., Сидоркин, А.В., Рахметов, С.Л.** Определение степени влияния основных параметров стружечной канавки шевера-прикатника на его ширину // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2018. – №11(89). – С. 9 – 14.
6. **ГОСТ 13755-81.** Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходный контур. Введен 30.06.1981. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 5 с.
7. **Марголит, Р.Б., Штрыков, А.К., Липатов, С.И.** Технические и экономические предпосылки производства и применения арочных зубчатых передач // *Технические науки – от теории к практике*. – 2015. – № 47. – С. 44 – 55.
8. **Kawasaki K., Tsuji I., Abe Y., Gunbara H.** Manufacturing method of large-sized spiral bevel gears in cyclo-palloid system using multi-axis control and multi tasking machine tool // *Gear technology*. – 2011. August, – pp. 56 – 61.
9. **Kloke F., Brumm M., Staudt J.** Quality and surface of gears manufactured by free-form milling with standard tools // *Gear technology*. – 2015. January/February, – pp. 64 – 69.

10. **ГОСТ 11902-77.** Головки зуборезные для конических и гипоидных зубчатых колес с круговыми зубьями. Основные размеры. Введен 01.01.1979. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 10 с.

REFERENCES

1. **Malikov, A.A., Sidorkin, A.V.** Heat liberation in the shaving of cylindrical gears // *Russian Engineering Research*. – 2015. Volume 35, Issue 8, – pp. 631-634.
2. **Malikov, A.A., Sidorkin, A.V., Yamnikov, A.S.** Dynamic characteristics of shaving-rolling of cylindrical gears with circular teeth // *Engineering Technique*. – 2012. – No.2. – pp. 19-23.
3. **Valikov, E.N., Indan, A.A., Popov, A.L.** Accuracy experimental investigation of cylindrical gear shaving-rolling on NC lathes // *Proceedings of TulaSU. Engineering Sciences*. – 2014. – Issue 5. – pp. 11-17.
4. **Malikov, A.A., Sidorkin, A.V., Rakhmetov, S.L.** Definition of parametric correlation mechanism of shaver-roller diameter with diameter of cylindrical gear with circular teeth processed by it // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.9 (87). – pp. 39-44.
5. **Malikov, A.A., Sidorkin, A.V., Rakhmetov, S.L.** Definition of basic parameter influence degree of shaver-roller chip groove upon its width // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.11 (89). – pp. 9-14.
6. **RSS 13755-81. Interchangeability Basic Standards. Cylindrical Involute Gears. Initial Contour.** Introduced: 30.06.1981. – М.: Standards Publishers, 1981. – pp. 5.
7. **Margolit, R.B., Shtrykov, A.K., Lipatov, S.I.** Engineering and economic prerequisites of manufacturing and application of arched gears // *Engineering Sciences – from Theory to Practice*. – 2015. – No.47. – pp. 44-55.
8. **Kawasaki K., Tsuji I., Abe Y., Gunbara H.** Manufacturing method of large-sized spiral bevel gears in cyclo-palloid system using multi-axis control and multi tasking machine tool // *Gear technology*. – 2011. August, – pp. 56 – 61.
9. **Kloke F., Brumm M., Staudt J.** Quality and surface of gears manufactured by free-form milling with standard tools // *Gear technology*. – 2015. January/February, – pp. 64 – 69.
10. **RSS 11902-77. Gear-shaping Cutter Heads for Tapered and Hypoid Gears with Circular Teeth. Basic Dimensions.** Introduced: 01.01.1979. – М.: Standards Publishers, 1985. – pp. 10.

Рецензент д.т.н. В.Д. Артамонов