

УДК 621.9

**В.А. Витренко, профессор, д-р техн. наук,
И.А. Кириченко, профессор, д-р техн. наук,
М.Н. Кузнецова, ассистент**

*Восточноукраинский национальный университет им. В.Даля
кв. Молодежный 20а, г. Луганск, Украина 91034,
uni@snu.edu.ua*

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ МНОГОЗАХОДНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ОТДЕЛКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Разрабатывается принципиально новый многозаходный гиперболоидный инструмент, предназначенный для нарезания зубьев цилиндрических зубчатых колес.

Ключевые слова: *формообразование, геометро-кинематические параметры, затылование, обработка, угол подъема, зуботочение.*

Изготовление зубьев цилиндрических зубчатых колес является одним из самых трудоемких и дорогостоящих процессов в полном цикле получения таких деталей. Стандартная обработка зубьев при помощи червячных фрез – низкопроизводительная операция, что обусловлено геометрией инструмента, кинематикой процесса, а также применением затылованных фрез. Все это объясняется тем, что обработка зубьев осуществляется согласно схемы формообразования третьего класса, а зуборезный инструмент получен в плоском станочном зацеплении. Кроме того, такой инструмент имеет высокую себестоимость, низкую стойкость и точность.

В представленной работе предлагается получать зуборезный инструмент в пространственном станочном зацеплении как огибающую обрабатываемого цилиндрического зубчатого колеса согласно схемы формообразования третьего класса. Известны схемы формообразования такого инструмента, в основу которого положены различные тела, базирующиеся на однополостном гиперboloиде. Все эти инструменты могут быть получены при одно- и двухпараметрическом огибании.

Процесс формообразования инструмента при скрещенных валах инструмента и производящего колеса, как правило, осуществляется при помощи цилиндрического инструментального зубчатого колеса [1], а для упрощения процесса применяются стандартные прямозубые зубчатые долбяки. Это обусловлено кинематикой процесса нарезания, которая обеспечивает автоматическое получение кинематических задних углов, величина которых доходит до 20°. Этот процесс можно представить как относительное скольжение режущих кромок инструментального зубчатого колеса вдоль поверхности нарезаемых зубьев винтового многозаходного зубчатого инструмента.

В промышленности существуют две наиболее распространенные схемы формообразования такого инструмента. Согласно первой схеме формообразования можно получить инструмент, наружная поверхность которого представляет собой "квазигиперboloидную" поверхность [2]. Такой инструмент получается при помощи радиального врезания инструментального зубчатого колеса в нарезаемый гиперboloидный инструмент. При обработке зубчатых колес такой инструмент работает при радиальной подаче. Он может обрабатывать тонкие зубчатые колеса, поэтому не нашел широкого распространения в промышленности. Описанный выше способ получения квазигиперboloидных зубчатых колес применяется для нарезания колес для винтовой зубчатой передачи.

Более распространенным способом получения гиперboloидного инструмента является способ нарезания инструмента на заготовках вида "однополостной гиперboloид". Суть способа заключается в том, что нарезаемое тело вида "однополостной гиперboloид" формообразуется при помощи подачи вдоль оси стола станка. В результате такого относительного движения получается исходная инструментальная поверхность, являющаяся огибающей цилиндрического производящего зубчатого колеса. Зуборезный инструмент, полученный описанным выше образом, может обрабатывать зубчатые колеса, геометрические параметры которых полностью соответствуют геометрическим параметрам инструментального зубчатого колеса. Кроме того, при проектировании различных зубообрабатывающих инструментов их можно выбирать из различных сечений однополостного гиперboloида, что позволяет управлять качеством обработанных зубьев.

В представленной работе предлагается разработать гиперboloидный многозаходный зубчатый инструмент, способный обрабатывать зубчатые колеса любой геометрии. Следовательно, основная инструментальная поверхность такого инструмента базируется на однополостном гиперboloиде. Теоретически доказано, что такой инструмент должен зацепляться с инструментальной рейкой. Станочное зацепление сопряженных зубьев представляет собой зацепление прямоочной рейки с гиперboloидным зубчатым колесом. В этом случае относительное движение гиперboloидной заготовки должно быть в плоскости, перпендикулярной оси вращения стола зубофрезерного станка. Кроме того, оси вращения стола станка и нарезаемой гиперboloидной заготовки скрещиваются и имеют согласованные вращения. Системы координат, связанные с обрабатываемым зубчатым колесом и гиперboloидным инструментом, представлены на рисунке 1.

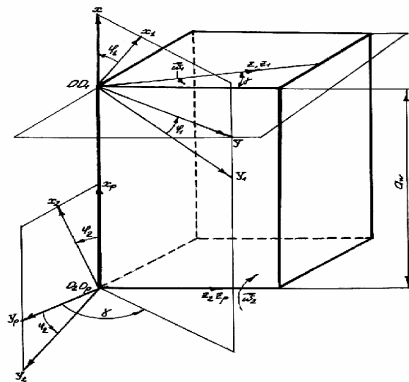


Рисунок 1 – Системы координат

Для нахождения профиля зуба гиперboloидного зубообрабатывающего инструмента, получаемого как огибающая зуборезной рейки, запишем профиль зуба рейки, при помощи которой будет происходить формообразование такого многозаходного зубчатого инструмента, в виде:

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_1(v, \psi) = \begin{pmatrix} x_1(v) - r \\ y_1(v) \\ z_1(\psi) \end{pmatrix} = [x_1(v) - r]\vec{i} + y_1(v)\vec{j} + z_1(\psi)\vec{k},$$

где $x_1(v)$ и $y_1(v)$ – необходимое число раз дифференцируемые по параметру v функции; $r = \text{const}$ – радиус окружности; ψ – текущая координата по оси O_1Z_1 .

Переход от системы координат, связанной с зуборезной рейкой, к системе координат, связанной с нарезаемой гиперboloидной заготовкой, осуществим при помощи матричного исчисления:

$$\vec{r}_2 = M_{2p} M_{po} M_{o1} \vec{r}_1, \quad \vec{r}_2 = M_{21} \vec{r}_1.$$

В результате преобразований получим семейство поверхностей, описывающих многозаходную гиперboloидную фрезу в системе координат, связанной с этим инструментом, в следующем виде:

$$\begin{aligned} x_2 &= (x_1 - r)(\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \gamma \sin \varphi_1 \sin \varphi_2) + y_1(-\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + \\ &\quad + \cos \gamma \cos \varphi_1 \sin \varphi_2) - z_1 \sin \gamma \sin \varphi_2 + A_v \cos \varphi_2, \\ y_2 &= (x_1 - r)(-\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \gamma \sin \varphi_1 \cos \varphi_2) + y_1(\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \\ &\quad + \cos \gamma \cos \varphi_1 \cos \varphi_2) - z_1 \sin \gamma \cos \varphi_2 - A_v \sin \varphi_2, \\ z_2 &= (x_1 - r) \sin \gamma \sin \varphi_1 + y_1 \sin \gamma \cos \varphi_1 + z_1 \cos \gamma. \end{aligned}$$

Полученная в аналитическом виде гиперboloидная инструментальная поверхность может быть основой таких инструментов, как фрезы, накатники, хоны, притиры и многие другие. Процесс станочного зацепления такого инструмента с обрабатываемым зубчатым колесом будет зависеть от геометро-кинематических параметров зацепления, которые будут определять вид технологической операции [3]. Это обозначает, что один зубообрабатывающий инструмент необходимо конструировать как зуборезную фрезу, другой – как многозаходный гиперboloидный шлифовальный круг, третий – как винтовой накатник и т.д. Основные геометро-кинематические параметры изготовления зубчатых колес при помощи гиперboloидного инструмента это:

1. Относительная скорость скольжения:

$$\begin{aligned} \vec{V}^{(12)} &= \{y_1(U_{21} \cos \gamma - 1) - z_1 U_{21} \sin \gamma \cos \varphi_1 - A_v U_{21} \cos \gamma \sin \varphi_1; \\ &\quad (x_1 - r)(1 - U_{21} \cos \gamma) + z_1 U_{21} \sin \gamma \sin \varphi_1 - A_v U_{21} \cos \gamma \cos \varphi_1; \\ &\quad U_{21} \sin \gamma [(x_1 - r) \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1 + A_v]\}. \end{aligned}$$

2. Суммарная скорость перемещения контактирующих поверхностей:

$$\begin{aligned} U_{\vec{r}} &= \left\{ 2 \frac{\partial F}{\partial \varphi_1} [(x'_1)^2 + (y'_1)^2] + \frac{\partial F}{\partial v} \left(\frac{\partial \vec{r}^1}{\partial v} \vec{V}^{(12)} \right) + [(x'_1)^2 + (y'_1)^2] \frac{\partial F}{\partial \psi} \left(\frac{\partial \vec{r}^1}{\partial \psi} \vec{V}^{(12)} \right) \right\} / \\ &\quad / \sqrt{[(x'_1)^2 + (y'_1)^2] \left\{ [(x'_1)^2 + (y'_1)^2] \left(\frac{\partial F}{\partial \psi} \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial v} \right)^2 \right\}}. \end{aligned}$$

3. Угол между вектором относительной скорости скольжения и направлением контактных линий:

$$\operatorname{tg} v_{\tau} = \left\{ -\frac{\partial F}{\partial \psi} \left(\frac{\partial \bar{r}^1}{\partial \psi} \bar{V}^{(12)} \right) \left[(x'_1)^2 + (y'_1)^2 \right] - \frac{\partial F}{\partial v} \left(\frac{\partial \bar{r}^1}{\partial v} \bar{V}^{(12)} \right) \right\} / \left\{ \frac{\partial F}{\partial v} \left(\frac{\partial \bar{r}^1}{\partial \psi} \bar{V}^{(12)} \right) - \frac{\partial F}{\partial \psi} \left(\frac{\partial \bar{r}^1}{\partial v} \bar{V}^{(12)} \right) \right\} \sqrt{(x'_1)^2 + (y'_1)^2}$$

4. Удельное скольжение на обрабатываемом зубчатом колесе:

$$\eta_1 = \left\{ -\left(\bar{V}^{(12)} \frac{\partial \bar{r}^1}{\partial \psi} \right) \left[(x'_1)^2 + (y'_1)^2 \right] \frac{\partial F}{\partial \psi} - \left(\bar{V}^{(12)} \frac{\partial \bar{r}^1}{\partial v} \right) \frac{\partial F}{\partial v} \right\} / \frac{\partial F}{\partial \varphi} \left[(x'_1)^2 + (y'_1)^2 \right].$$

5. Удельное скольжение на зубообрабатывающем инструменте:

$$\eta_2 = 1 - \left\{ \frac{\partial F}{\partial \varphi} \left[(x'_1)^2 + (y'_1)^2 \right] \right\} / \left\{ \frac{\partial F}{\partial \varphi} \left[(x'_1)^2 + (y'_1)^2 \right] - \left(\bar{V}^{(12)} \frac{\partial \bar{r}^1}{\partial \psi} \right) \left[(x'_1)^2 + (y'_1)^2 \right] \frac{\partial F}{\partial \psi} - \left(\bar{V}^{(12)} \frac{\partial \bar{r}^1}{\partial v} \right) \frac{\partial F}{\partial v} \right\}.$$

6. Приведенная кривизна контактирующих поверхностей:

$$x_{\eta\rho} = \frac{\left[(x_1'^2 + y_1'^2) (F''^w)^2 + (F''^v)^2 \right] \frac{1}{\sqrt{x_1'^2 + y_1'^2}}}{(x_1'^2 + y_1'^2) F''^{\varphi 1} - F''^v \left(V^{(12)} r_1^v \right) - F''^w \left(x_1'^2 + y_1'^2 \right) \left(r_1^w V^{(12)} \right)}.$$

Найденные в работе геометро-кинематические показатели обработки зубьев при помощи гиперболоидных инструментов позволяют управлять качеством протекания процесса. Путем изменения этих параметров можно определять вид зубообработки. Например, при увеличении скорости скольжения происходит более интенсивное выглаживание обрабатываемых зубьев, следовательно, на этой основе следует проектировать зубообкатные инструменты. С уменьшением угла между вектором скорости скольжения и направлением контактных линий улучшается процесс резания металла, поэтому в этом случае необходимо проектировать зуборезные фрезы. Удельные скольжения на зубе инструмента и обрабатываемого изделия характеризуют интенсивность и степень их износа. Приведенная кривизна определяет усилие в зоне обрабатываемых зубьев.

Далее возникает вопрос изготовления многозаходного инструмента на серийном зубообрабатывающем оборудовании. При таком изготовлении в качестве главного движения резания и отделки их боковых поверхностей используется относительное скольжение режущих кромок формообразующего зуборезного инструмента по нарезаемым зубьям.

При конструировании гиперболоидных накатников, обкатников, хонов, притиров, шлифовальных кругов необходимо подобрать диаметр делительной окружности инструмента в горловом сечении. Так для накатников целесообразно этот диаметр выбирать в пределах от 120 до 180 мм, для притиров – в пределах 40...250 мм, для хонов – в пределах 240...370 мм, т.е., предусмотренных стандартом для серийных цилиндрических накатников, обкатников, хонов, притиров. После подбора наружного диаметра предлагаемого инструмента в горловом сечении, конструктор находит скорость скольжения и угол между вектором скорости скольжения и направлением контактных линий в зависимости от угла скрещивания осей, модуля зацепления, межцентрового расстояния, количества зубьев на цилиндрическом зубчатом колесе и гиперболоидном инструменте.

Применение предлагаемого гиперболоидного инструмента позволяет в значительной степени менять режимы обработки. Это объясняется тем, что скорость скольжения будет постоянной по всему профилю обрабатываемых зубьев. Так, например, при обкатке зубьев колес на зубообрабатывающих станках при помощи цилиндрических обкатников, скорость вращения инструментального шпинделя лежит в пределах 140...500 мин⁻¹. В производстве станки настраивают на минимальную частоту вращения, т.е. на 140 мин⁻¹. При обработке зубчатых колес гиперболоидными обкатниками частоту вращения необходимо брать максимальной, т.е. 500 мин⁻¹. Такое положение приемлемо также при притирке и хонинговании. Что касается припуска на обработку, то он может быть увеличен с 0,005...0,003 мм до значений 0,1...0,3 мм.

Библиографический список

1. Витренко В.А. Гиперболоидные инструменты для обработки и отделки цилиндрических прямозубых зубчатых колес: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Витренко Владимир Алексеевич. — Луганск, 1995. — 304 с.
2. Цвис Ю.В. Исследование процесса зуботочения цилиндрических зубчатых колес: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Цвис Юрий Владимирович. — М., 1956. — 262 с.
3. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Ф.Л. Литвин. — М.: Наука, 1968. — 584 с.

Поступила в редакцию 21.03.2010 г.