

УДК 621.9

**В.А. Витренко, профессор, д-р техн. наук,
Б.С. Воронцов, профессор, канд. техн. наук,
С.Н. Семянистая**

*Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля,
кв. Молодежный, 20а, г. Луганск, Украина, 91034
voronts@gmail.com*

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВИНТОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА УНИВЕРСАЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ

Рассмотрены винтовые зубчатые колеса, имеющие линейный характер касания зубьев при любом передаточном отношении в механизме. Предлагаются принципиально новые технологии изготовления таких винтовых зубчатых колес на универсальных вертикально фрезерных станках с ЧПУ.

Ключевые слова: Винтовое зубчатое колесо, линейный характер касания, гиперboloидное зубчатое колесо, схемы формообразования, винтовая линия.

В настоящее время конструктора, технологи и производители зубчатых колес не могут создать винтовые зубчатые колеса с линейным характером касания зубьев и малым передаточным отношением. Для того, чтобы характер касания зубьев был линейным, необходимо, чтобы передаточное отношение в зубчатой передаче было больше восьми. Поэтому винтовые зубчатые передачи, к которым относятся червячные, глобоидные и т.д., имеют большие габариты, малую нагрузочную способность и главное большое передаточное отношение. Такое положение объясняется, прежде всего, технологией изготовления таких зубчатых колес. Изготовление зубчатых колес в плоском станочном зацеплении и последующая их работа в пространственном станочном зацеплении негативно влияют на пятно контакта. Кроме того, зуборезный инструмент, в частности червячная фреза из-за ее затыловки по задней и боковой поверхности, имеет несовершенную форму. Несовпадение основной инструментальной поверхности с производящей поверхностью приводит к искажению профиля нарезаемых зубьев, что негативно влияет на характер касания зубьев в передаче.

Для устранения перечисленных недостатков многие исследователи пытаются усовершенствовать схему формообразования винтовых зубчатых колес, что приводит к получению принципиально новых зубчатых колес с отличным от существующих профилем зуба. В этом случае зубчатые колеса изготавливают в пространственном станочном зацеплении, как правило, на стандартном зубообрабатывающем оборудовании. Наиболее распространенные винтовые зубчатые колеса, это глобоидные и квазиглобоидные. Такие зубчатые колеса нарезаются на стандартном зубообрабатывающем оборудовании при помощи радиального врезания инструментального зубчатого колеса в поверхность нарезаемого глобоидного зубчатого колеса. Описанные выше зубчатые колеса могут зацепляться как с прямозубыми так и косозубыми цилиндрическими зубчатыми колесами. Недостаток таких зубчатых колес заключается в том, что они могут зацепляться с зубчатыми колесами, профиль которых полностью соответствует профилю производящего зубчатого колеса. Если геометрия сопрягаемого зубчатого колеса отличается от геометрии производящего зубчатого колеса, то характер касания в передаче будет точечным. Такое положение приводит к усложнению технологии изготовления винтовых зубчатых колес.

Зубчатые колеса, изготовленные на теле вида однополостной гиперboloид, получают в пространственном станочном зацеплении. Их производство осуществляется при помощи производящего цилиндрического прямозубого или косозубого зубчатого колеса. Для упрощения процесса нарезания зубьев в качестве инструментального зубчатого колеса применяется стандартный зуборезный долбяк. Нарезаемое зубчатое колесо 1 и долбяк 2 вращают с угловыми скоростями обратно пропорциональными количеству их зубьев, кроме того нарезаемое колесо движется вдоль оси производящего инструментального зубчатого колеса (долбяка) [1]. Схема такого процесса формообразования представлена на рисунке 1.

В механизме или машине, оси винтовых и сопрягаемых с ними зубчатых колес неподвижны, следовательно, можно сказать, что не соблюдается известный принцип Оливье. Следовательно, характер касания зубьев в проектируемой зубчатой передаче может быть как точечным, так и линейным.

С целью создания винтовых зубчатых колес имеющих линейный характер касания зубьев при любом передаточном отношении, необходимо в процессе формообразования таких зубчатых колес получать их при станочном зацеплении с зубчатой рейкой. В этом случае нарезаются зубья на однополостном гиперboloиде. Современное станочное оборудование не позволяет нарезать зубья на однополостном гиперboloиде при помощи зубчатой рейки, поэтому на практике приходится

имитировать движение зубчатой рейки при помощи цилиндрического инструментального колеса [2]. Схема такого нарезания представлена на рисунке 2.

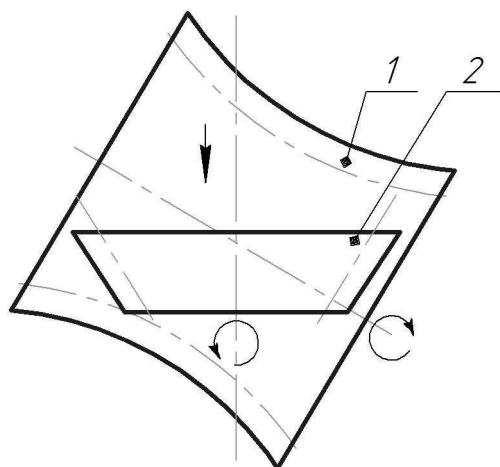


Рисунок 1 – Схема изготовления квазигиперболических зубчатых колес

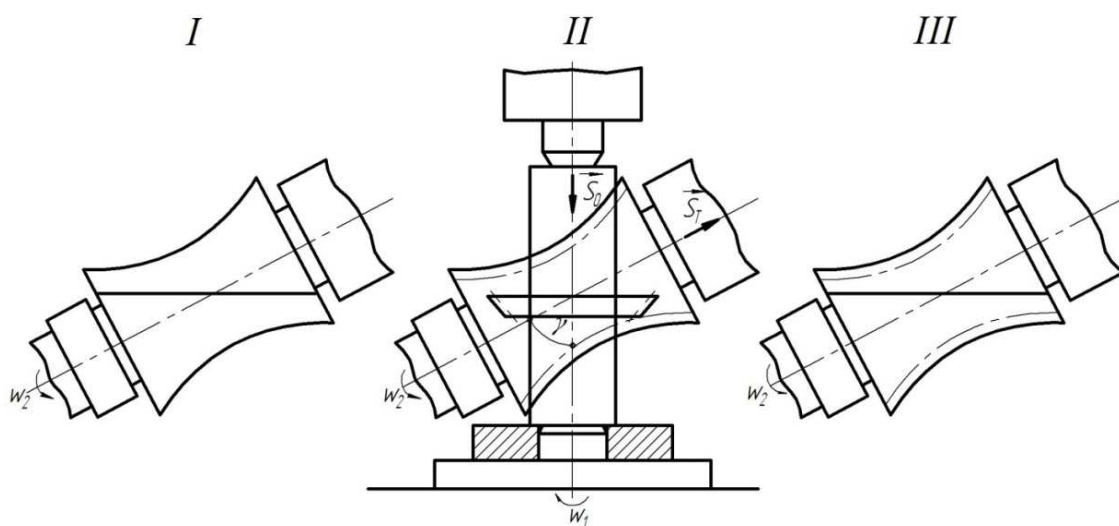


Рисунок 2 – Схема изготовления гиперболических зубчатых колес

При нарезании гиперболических зубчатых колес на зубофрезерном станке, цилиндрическое производящее зубчатое колесо (долбяк) вращается на оправке, установленной на столе зубофрезерного станка с угловой скоростью обратно пропорциональной угловой скорости нарезаемого гиперболического зубчатого колеса. В результате процесса нарезания изготавливаемое гиперболическое зубчатое колесо перемещается из положения I в положение III. Благодаря совокупности перечисленных выше движений, происходит имитация движения зубчатой рейки, что позволяет нарезать зубья на однополостном гиперболическом вращении.

Для нахождения поверхности зубьев таких зубчатых колес, необходимо от известной поверхности рейки (цилиндрического производящего зубчатого колеса бесконечно большого диаметра) перейти к поверхности зубьев нарезаемого гиперболического зубчатого колеса при помощи следующей зависимости:

$$\vec{r}_2 = M_{20} M_{01} \vec{r}_1 = M_{21} \vec{r}_1. \quad (1)$$

Для того, чтобы спроектированная зубчатая пара с линейным характером касания зубьев, отвечала выдвинутым требованиям, необходимо чтобы выполнялось основное уравнение зацепления или другими словами - уравнение непрерывности станочного касания. Это уравнение можно записать в следующем виде:

$$\vec{N} \cdot \vec{V}^{(12)} = 0. \quad (2)$$

Для определения параметров получаемого гиперболоидного зубчатого колеса определим проекцию вектора нормали в точке контакта на производящую поверхность. Условно разобьем поверхность сопряженных зубьев на равные участки при помощи прямых направленных вдоль профиля зуба. Вектора нормали к производящей поверхности для общего случая зацепления винтового зубчатого колеса с зубчатой рейкой можно определить при помощи следующей зависимости:

$$\begin{aligned}\vec{N} &= (\vec{r}_1^\lambda \times \vec{r}_1^\mu), \\ \vec{N} &= (\vec{r}_1^k \times \vec{r}_1^\psi).\end{aligned}\quad (3)$$

Относительная скорость скольжения определяется как разность скоростей на сопрягаемых зубчатых поверхностях в процессе формообразования:

$$\vec{V}^{12} = \vec{V}_1 - \vec{V}_2 = \vec{\omega}_1 \times \vec{r}_1 - \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_2 = \vec{\omega}_1^{(1)} \times \vec{r}_1 - (\vec{\omega}_1^{(2)} \times \vec{r}_1 + m_1 (\vec{\omega}_2)) = \vec{\omega}_1^{(12)} \times \vec{r}_1 - \vec{A} \times (\vec{\omega}_1)^{(2)}. \quad (4)$$

Профиль винтового зубчатого колеса определяется при помощи четырех трансцендентных уравнений в следующем виде:

$$\begin{cases} x_2 = z_1 \cos \phi_2 \sin \gamma + S_1 \cos \phi_2 \cos \gamma + y_1 (-\sin \phi_1 \cos \phi_2 \cos \gamma - \cos \phi_1 \sin \phi_2) + \\ \quad + x_1 (\cos \phi_1 \cos \phi_2 \cos \gamma - \sin \phi_1 \sin \phi_2) - A \sin \phi_2, \\ y_2 = z_1 \sin \phi_2 \sin \gamma + S_1 \sin \phi_2 \cos \gamma + y_1 (\cos \phi_1 \cos \phi_2 - \sin \phi_1 \sin \phi_2 \cos \gamma) + \\ \quad + x_1 (\cos \phi_1 \sin \phi_2 \cos \gamma + \sin \phi_1 \cos \phi_2) + A \cos \phi_2, \\ z_2 = -S_1 \sin \gamma + \sin \phi_1 y_1 \sin \gamma - \cos \phi_1 x_1 \sin \gamma + z_1 \cos \gamma + 1, \\ y_1' (u_{21} z_1 \sin \phi_1 \sin \gamma + u_{21} S_1 \sin \phi_1 \cos \gamma + y_1 (u_{21} \cos \gamma - 1) - u_{21} A \cos \phi_1 \cos \gamma) - \\ - x_1' (u_{21} z_1 \cos \phi_1 \sin \gamma + u_{21} S_1 \cos \phi_1 \cos \gamma + x_1 (1 - u_{21} \cos \gamma) + u_{21} A \sin \phi_1 \cos \gamma) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Чтобы в значительной степени сократить объем дорогостоящих экспериментальных исследований, направленных на исследование пятна контакта, влияющего на работоспособность спроектированной зубчатой передачи, необходимо определить основные геометро-кинематические параметры передачи, от которых в значительной степени зависит ее геометрия, такие как суммарная скорость перемещения контактирующих поверхностей:

$$\begin{aligned}\vec{U} \cdot \vec{q} &= \frac{2F^\phi |\vec{N}| \cdot (\vec{q} \times \vec{l}_1) \cdot (\vec{q} \times \vec{l}_1)}{(\vec{r}_1^\lambda \vec{q}) F^\mu - (\vec{r}_1^\mu \vec{q}) F^\lambda} + \vec{V}^{(12)} \cdot (\vec{q} \times \vec{l}_1) = \frac{2F^\phi}{(\vec{r}_1^\lambda \vec{q}) F^\mu - (\vec{r}_1^\mu \vec{q}) F^\lambda} \cdot \frac{|\vec{N}|}{|\vec{N}|} \cdot (\vec{q} \times \vec{l}_1) = \\ &= \frac{2F^\phi + \vec{V}^{(12)} \cdot (\vec{q} \times \vec{l}_1) \frac{(\vec{r}_1^\lambda \vec{q}) F^\mu - (\vec{r}_1^\mu \vec{q}) F^\lambda}{|\vec{N}|}}{(\vec{r}_1^\lambda \vec{q}) F^\mu - (\vec{r}_1^\mu \vec{q}) F^\lambda},\end{aligned}\quad (6)$$

угол между относительной скоростью скольжения и направлением контактной линии:

$$\begin{aligned}tg V_\tau &= \frac{a [\vec{r}_1^\lambda \times (a \vec{r}_1^\lambda + b \vec{r}_1^\mu)] + b [\vec{r}_1^\mu \times (a \vec{r}_1^\lambda + b \vec{r}_1^\mu)]}{a (\vec{r}_1^\lambda, a \vec{r}_1^\lambda + b \vec{r}_1^\mu) + b (\vec{r}_1^\mu, a \vec{r}_1^\lambda + b \vec{r}_1^\mu)} = \\ &= \frac{ab * [a \vec{r}_1^\lambda + b \vec{r}_1^\mu] + a * b [a \vec{r}_1^\lambda + b \vec{r}_1^\mu]}{aa * (\vec{r}_1^\lambda, \vec{r}_1^\lambda) + ab * (\vec{r}_1^\lambda, \vec{r}_1^\mu) + ba * (\vec{r}_1^\mu, \vec{r}_1^\lambda) + bb * (\vec{r}_1^\mu, \vec{r}_1^\mu)} = \frac{ab * \vec{N} - a * b \vec{N}}{aa * E_1 + bb * G_1} = \frac{ab * -a * b \|\vec{N}\|}{aa * E_1 + bb * G_1},\end{aligned}\quad (7)$$

удельные скольжения на зубьях сопряженных зубчатых колес:

$$\eta_1 = \frac{|\vec{V}^{12}|}{(\vec{V}^{(1)}, \vec{V}^{(12)})} = \frac{|\vec{V}^{12}|^2}{(\vec{V}^{(1)}, \vec{V}^{(12)})}, \quad \eta_2 = \frac{|\vec{V}^{12}|^2}{(\vec{V}^{(2)}, \vec{V}^{(12)})}, \quad (8)$$

приведенная кривизна зубьев сопряженной цилиндрико-гиперболоидной зубчатой пары:

$$K_{ПП} = \frac{\left[(f_1^{12} + f_2^{12}) \left(\frac{dF}{dQ} \right)^2 + \left(\frac{dF}{d\mu} \right)^2 \right] / \sqrt{f_1^{12} + f_2^{12}}}{\left(f_1^{12} + f_2^{12} \right) \frac{df}{d\phi_1} - \frac{dF}{dQ} \left(\bar{V}^{12} \frac{d\bar{r}_1}{dQ} \right) - \frac{dF}{d\mu} \left(f_1^{12} + f_2^{12} \right) \left(\bar{V}^{12} \frac{d\bar{r}_1}{d\mu} \right)}. \quad (9)$$

Нарезанные перечисленным выше методом зубчатые колеса имеют высокую себестоимость, а главное требуется специальное зубообрабатывающее оборудование, которое в настоящее время не находит полной загрузки и часто отсутствует в современных механо-обрабатывающих производствах. Кроме того возникают сложности при обработке винтовых гиперболических зубчатых колес изготовленных из сверхтвердых материалов и винтовых зубчатых колес подвергающихся термической обработке.

Проанализировав геометро кинематические параметры процесса изготовления винтовых гиперболических зубчатых колес можно сделать вывод, что такое изготовление можно осуществлять при помощи инструментальной зубчатой поверхности, которая отличается по профилю от профиля изготавливаемого винтового зубчатого колеса. Например, получение зубьев гиперболического колеса при помощи обкатного инструмента. В своем относительном движении передняя поверхность зуба такого обкатного инструмента движется по огибающей к семейству инструментальных зубчатых поверхностей. Как правило, такая огибающая по своему профилю не совпадает с профилем инструментальной зубчатой поверхности. В этом случае полученное гиперболическое винтовое зубчатое колесо в механизме при зацеплении с парным зубчатым колесом может иметь как точечный, так и линейный характер касания зубьев.

В условиях невозможности изготовления сложного производящего инструмента можно, исходя из технологических соображений, формообразование зубьев производить при помощи производящих линий, под которыми понимаются режущие кромки лезвийного инструмента. На практике такой процесс формообразования можно осуществить при помощи резцов летучек. Однако такой процесс изготовления зубьев является малопроизводительным, кроме того профиль резца и профиль нарезаемого зуба в процессе относительного движения не совпадают друг с другом, а пересекаются или касаются в точке меняющей свое положение на профиле формируемого зуба.

Рассмотрев перечисленные выше положения необходимо отметить, что в настоящее время появляется необходимость изготавливать различные зубчатые изделия на стандартном универсальном оборудовании. Отсутствие в настоящее время общего подхода при обработке зубчатых изделий не может обеспечить оптимальных условий формообразования пространственно сложных поверхностей, препятствует эффективности их обработки. Невозможность создания конструкции одного инструмента, позволяющего вести обработку различных профилей зубьев зубчатых колес не позволяет учитывать кинематические особенности процесса изготовления зубьев, а следовательно тормозит дальнейшее развитие обработки зубьев.

На машиностроительных предприятиях, не имеющих зубообрабатывающего оборудования нарезание винтовых зубьев на гиперболических заготовках можно осуществлять с использованием универсальных вертикально фрезерных станков с ЧПУ. Схема нарезания таких зубьев представлена на рисунке 3.

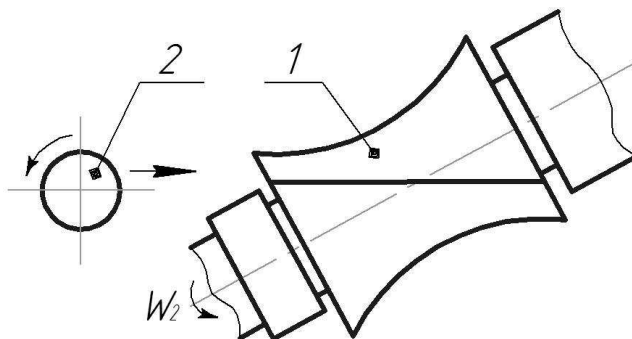


Рисунок 3 – Схема изготовления гиперболических зубчатых колес

Нарезание зубьев на гиперболической заготовке 1 осуществляется при помощи пальцевой фрезы 2. Обрабатываемая заготовка устанавливается на оправке, закрепленной в делительной головке вертикально фрезерного станка, которая в свою очередь закреплена на столе вертикально фрезерного станка. Фреза подается вдоль прямолинейной образующей нарезаемого зубчатого колеса. Ее подача

равна шагу винтовой линии гиперболоидного зубчатого колеса. Режимы обработки зависят от материала обрабатываемого зубчатого колеса, материала модульной пальцевой фрезы, а также требований предъявляемых к зубчатому изделию.

На практике при помощи предложенного способа нарезания зубьев удалось нарезать гиперболоидные зубчатые колеса с $m_n = 1\text{ мм}$ и числом зубьев $z = 17$. В дальнейшем были собраны зубчатые пары, в которых сопрягаемое зубчатое колесо имело число зубьев $z = 50, 68, 100$. Таким образом, передаточное отношение в собранных зубчатых передачах было меньше 8. Обкатка зубьев производилась на специально спроектированном стенде. Для этого использовалась специальная краска. В результате обкатки получился линейный характер касания зубьев в зубчатой передаче состоящей из винтового гиперболоидного зубчатого колеса и цилиндрического прямозубого зубчатого колеса.

Экспериментальное нарезание гиперболоидного зубчатого колеса показало, что наружные диаметры гиперболоидной заготовки по обе стороны от горлового сечения получились разные по величине, то есть заготовка получилась несимметричной. Размеры с правой стороны заготовки от горлового сечения получились большие, чем с левой стороны. Перечисленное выше говорит о том, что при нарезании гиперболоидного колеса с правой стороны от горлового сечения происходит отход сопряженных поверхностей друг от друга, что приводит к нормальному $\square$ резанию и зацеплению. С левой стороны от горлового сечения, происходит приближение контактирующих поверхностей, приводящее к внедрению поверхностей друг в друга, что приводит к подрезанию поверхностей.

В данном исследовании удалось нарезать зубья на однополостном гиперболоиде вращения с использованием универсального вертикально фрезерного станка с ЧПУ. Полученные зубчатые колеса имеют линейный характер касания зубьев при любом передаточном отношении в механизме.

Для достижения цели исследования, т.е. получения винтовых зубчатых колес с линейным характером касания зубьев использовалась производящая инструментальная поверхность, полностью совпадающая с поверхностью изготавливаемых зубьев. Кроме того движение инструментальной поверхности и движение нарезаемого гиперболоидного зубчатого колеса полностью совпадают с движениями инструмента и нарезаемого зубчатого колеса.

Библиографический список использованной литературы

1. Витренко В.А. Повышение производительности зубонарезания цилиндрических зубчатых колес гиперболоидным инструментом за счет совершенствования формообразования резанием: монография / В.А. Витренко, В.В. Белозерова. — Луганск: Ноулидж, 2009. — 147 с.
2. Пат. 34475 Україна, МПК В23F 9/00. Спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс / Вітренко О.В., Вітренко О.С., Кириченко І.О.; заявник і патентовласник Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля. — №200803692; заявл. 24.03.2008; опубл. 11.08.2008, Бюл. №15.
3. Геометрия сопряжённых поверхностей / Н.С. Равская [и др.]. — Житомир: ЖИТИ, 2001. — 319 с.
4. Основы формоутворення поверхонь при механічній обробці / Н.С. Равська, П.Р. Родін, Т.П. Ніколаєнко, П.П. Мельничук. — Житомир: ЖИТИ, 2000. — 169 с.

Поступила в редакцию 27.03.2013 г.

Вітренко В.О., Воронцов Б.С., Сємяніста С.М. Розробка технології виготовлення гвинтових зубчастих коліс на універсальному обладнанні

Розглянуто гвинтові зубчасті колеса, маючи лінійний характер торкання зубців при будь якому передаточному відношенні в механізмі. Пропонуються принципово нові технології виготовлення таких гвинтових зубчастих коліс на універсальному вертикально фрезерному обладнанні з ЧПУ.

Ключові слова: Гвинтове зубчасте колесо, лінійний характер торкання, гіперболоїдне зубчасте колесо, схеми формоутворення, гвинтова лінія.

Vitrenko V.A., Vorontsov B.S., Semyanistaya S.N. Development of screw gears production technology for commercial equipment

Screw gears having linear character of teeth contact at any transmission ratio in a mechanism have been investigated. Principally new technologies of such gears production on commercial NC vertical-milling machine-tools have been suggested.

Keywords: screw gear, linear character of contact, hyperboloid gear, shape-formation scheme, screw line.