

УДК 621.833.389; 621.914.5

Е.С.Трубачев, профессор, д-р техн. наук,

С.Е. Логинов, аспирант,

К.В. Богданов, аспирант

ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

ул. Студенческая, 7, г. Ижевск, УР, Россия, 426069, truba@istu.ru

РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ НАРЕЗАНИЯ ЗУБЬЕВ СПИРОИДНЫХ КОЛЕС

Представлены результаты разработки нового высокопроизводительного метода обработки спиральных зубьев, реализуемого с помощью плоской резцовой головки на токарно-винторезном станке с ЧПУ. Даны основы расчёта станочной наладки и расчёта геометрии нарезаемых зубьев. Рассмотрены модернизация токарно-винторезного станка с ЧПУ и конструкции элементов технологической оснастки, необходимые для практического использования.

Ключевые слова: спироидная передача, нарезание спиральных зубьев.

Введение. В серийном производстве спироидные колёса традиционно нарезают с помощью спироидных червячных фрез. Для этого метода характерна сравнительно низкая производительность из-за невысокой жёсткости инструмента, плохих условий для теплоотвода из зоны резания, сравнительно плохих условий для схода стружки, возможности переточки фрез лишь по передней поверхности. В настоящей статье рассмотрены некоторые результаты разработки нового метода зубообработки спироидных колёс, позволяющего преодолеть эти недостатки и впервые предложенного в [1]. В этом методе применяется более жёсткий многозубый инструмент – плоская резцовая головка, совершающая сложное движение относительно заготовки колеса.

Целью данной статьи является представление принципиальных положений методики расчёта для нового метода и важных результатов первых расчётов, рассмотрение вариантов практической реализации нового метода, рассмотрение основных требований к применяемому зуборезному инструменту.

Основное содержание работы. Основанием для предложения новой схемы нарезания послужили известные свойства цилиндрической спироидной передачи: постоянство осевого шага червяка и вытянутость поля зацепления вдоль оси последнего (рис. 1а). Это означает, что хорошее приближение к сопряженной поверхности зубьев колеса можно получить, если равномерно перемещать производящую линию (режущую кромку резца) вдоль оси червяка и пропорционально вращать нарезаемое колесо, или (почти аналогично) если вращать резцовую головку согласованно с вращением заготовки колеса и подавать её согласованно с дополнительным поворотом заготовки (рис. 1б). Каждый резец головки, сменяя предыдущий и осуществляя непрерывное деление, прорезает каждую последующую впадину.

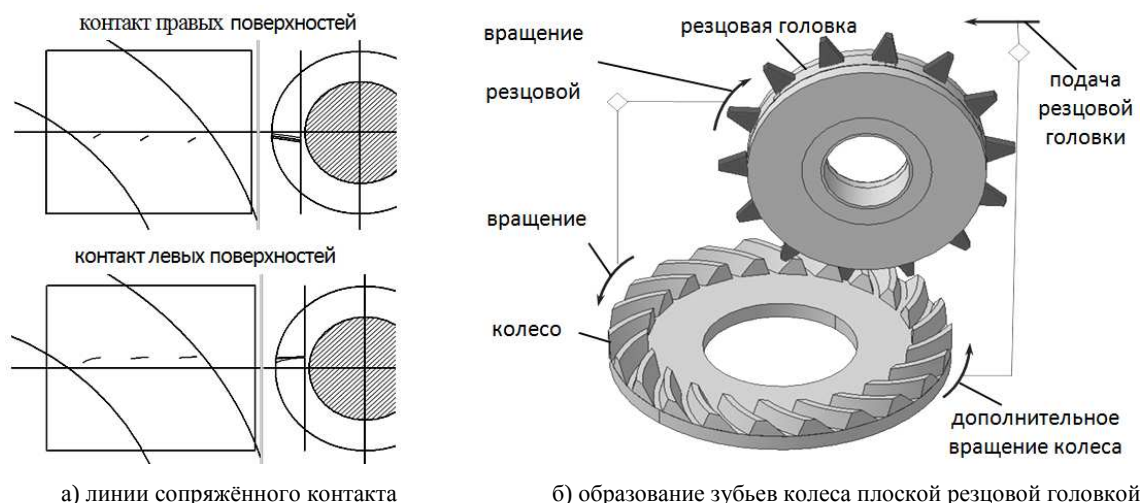


Рисунок 1 – Предпосылка и схема нового метода нарезания зубьев спироидных колёс

Сформированные боковые поверхности зубьев есть результат двухпараметрического огибания производящих линий – режущих кромок резцов. Первый параметр огибания есть угол φ_{01} поворота резцовой головки, второй – изменяющееся в ходе формообразования межосевое расстояние a_{w0} .

В сравнении с традиционной новая схема обеспечивает большую жёсткость инструмента, более эффективный теплоотвод от зоны резания, лучшие условия для схода стружки и её удаления из зоны резания, лучшие возможности для применения твердосплавных резцов, большее удобство в

изготовлении и переточке резцов, большую универсальность: одна и та же резцовая головка может быть использована для нарезания колес, различающихся по размеру и модулям сопряженных червяков.

Основные параметры новой схемы формообразования следующие (рис. 2):

- расчётное число $z_{(0)}$ резцов в резцовой головке
- (передаточное отношение в движении деления – $i_{02}=z_{(2)}/z_{(0)}$, где $z_{(2)}$ – число зубьев колеса);
- отношение $p_0=p/\Delta\omega_2$ скоростей подачи (p) и доворота колеса ($\Delta\omega_2$);
- угол Σ_0 между осями колеса и резцовой головки;
- диаметр d_0 резцовой головки;
- смещение B_0 резцовой головки от станочной межосевой линии;
- углы α_0 и ширина s_0 профиля резца.

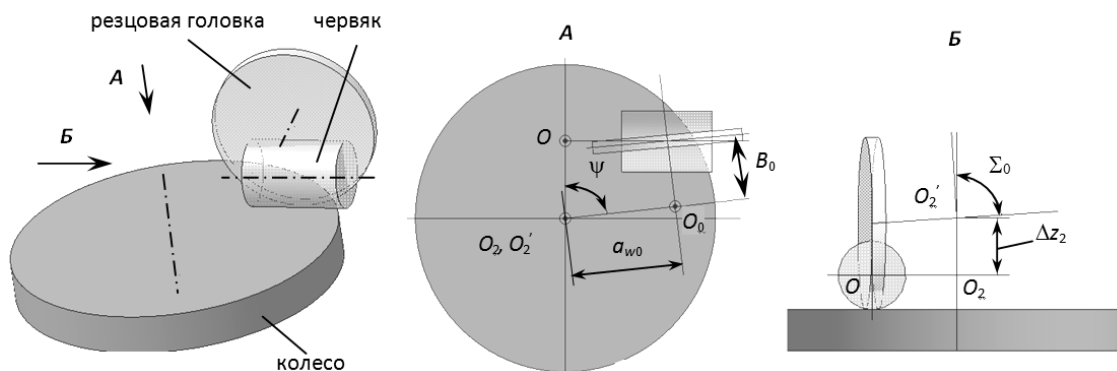


Рисунок 2 – Воображаемое общее зацепление червяка, колеса и резцовой головки

Выражения для расчёта этих параметров удобно получить, рассматривая воображаемое общее зацепление червяка и колеса передачи и резцовой головки в расчётных точках, выбранных в сопряжённом зацеплении для каждой из разноименных боковых поверхностей зубьев. В этих точках необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

- ортогональность известной общей нормали n к главным поверхностям зубьев и векторов скоростей $v_{02}^{(1)}$ и $v_{02}^{(2)}$ в двух независимых относительных движениях:

$$n v_{02}^{(1)} = 0; \quad (1)$$

$$n v_{02}^{(2)} = 0. \quad (2)$$

- ортогональность известной нормали n и вектора f , касательного к режущей кромке резца:

$$n f = 0 \quad (3)$$

Дополнительно к перечисленным параметрам станочной наладки при решении уравнений (1)-(3) определяются следующие параметры расположения элементов такого зацепления: станочное межосевое расстояние a_{w0} , при котором происходит формирование зуба в расчётной точке, угловое (ψ) и линейное (Δz_2) смещения межосевых линий OO_2 и O_0O_2' , рабочего и станочного зацеплений вокруг и вдоль оси колеса (рис. 2).

После задания набора параметров схемы формообразования (параметров наладки) координаты точек поверхности зубьев колеса, формируемой в станочном зацеплении, можно найти, исходя из условия компланарности трех векторов – f , $v_{02}^{(1)}$ и $v_{02}^{(2)}$:

$$[f, v_{02}^{(1)}, v_{02}^{(2)}] = 0 \quad (4)$$

Это же условие применимо для поиска точек переходного и подрезанного участков зуба, образуемых вершиной резца, которая представляется в виде дуги окружности малого радиуса, сопрягающей вершинную и боковые режущие кромки [2].

Расчёт параметров нарезания реализован в программном комплексе «SPDIAL+» исследования и проектирования спиральных передач [3]. Первые расчёты показали, что, применяя предложенную схему, действительно, можно получить хорошее приближение к сопряжённой поверхности зуба (рис. 3), причём имеется ещё одно преимущество новой схемы: профильную (высотную) локализацию контакта в передаче можно обеспечить при прямом профиле инструментов, образующих и витки червяка, и зубья колеса, и регулировать её степень, меняя диаметр резцовой головки. В то же время обнаружились и некоторые сложности:

- резцы, образующие разноимённые поверхности зубьев, нужно располагать в двух разных плоскостях (задавать для них разные параметры $B_0 - B_{0R}$ и B_{0L});

– для формообразования разноимённых боковых поверхностей зубьев следует задавать разные параметры p_0 подачи инструмента.

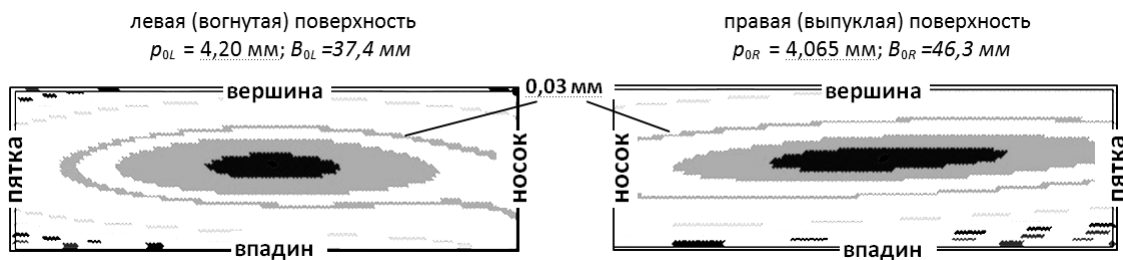


Рисунок 3 – Поля модификаций на развёртке зуба при прямолинейной подаче инструмента

Если первый недостаток является вполне терпимым, то второй фактически означает, что необходимо выполнять два хода инструмента, и это, разумеется, увеличит время обработки. Это послужило мотивом для усовершенствования схемы обработки, а именно – для введения подачи инструмента по дуге окружности радиуса ρ (рис. 4) [4], благо что на токарно-винторезном станке с ЧПУ это движение обеспечивается уже имеющимися приводами. В этом случае вторым независимым параметром огибания станет угол γ (рис. 4), а текущее значение станочного межосевого расстояния можно рассчитать по выражению:

$$a_{w0} = a_{w0}^{(0)} - \rho \sin \gamma, \quad (5)$$

где $a_{w0}^{(0)}$ – начальное значение станочного межосевого расстояния – среднее из полученных значений a_{w0R} и a_{w0L} для разноименных поверхностей в расчёте по (1), (2).

Это усовершенствование очевидно обеспечивает увеличение степени модификации боковых поверхностей, благодаря чему удаётся получать нужную геометрию за один ход инструмента.

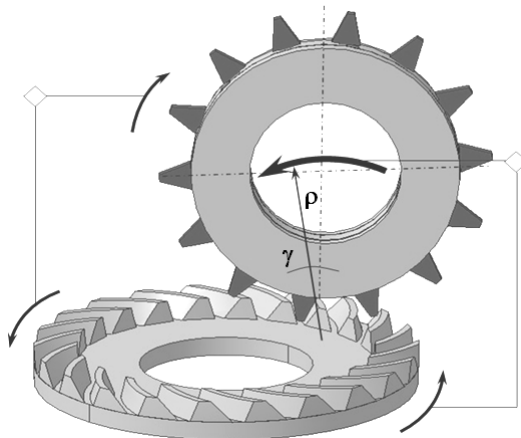


Рисунок 4 – Модификация схемы нарезания – введение подачи по дуге окружности

Наиболее перспективной является реализация схемы на токарно-винторезном станке с ЧПУ при сравнительно небольшой его модернизации – введении привода, управляющего дополнительной координатой – вращением резцовой головки [5]. Такая реализация является достаточно простой и, вместе с тем, обеспечит высокую производительность нарезания. Схематично реализация нового метода на токарно-винторезном станке показана на рис. 5 и 6. Заготовку колеса предполагается устанавливать в патрон 1 шпинделя. Резцовая головка 2 с приводом 3 и вертикальным суппортом 4 с помощью кронштейна 5 устанавливается на поперечный суппорт 6 станка, с которого предварительно убран резцедержатель. Использование нетрадиционного для токарных станков режущего инструмента (резцовой головки) и необходимость согласования многих движений при обработке требует некоторой модернизации механической части и системы числового программного управления.

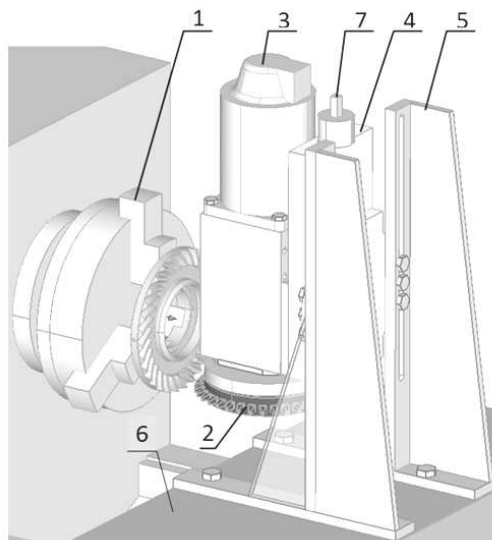


Рисунок 5 – Реализация нового метода на токарно-винторезном станке с ЧПУ

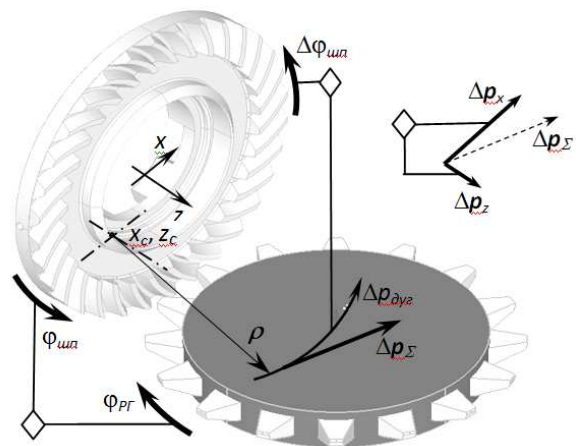


Рисунок 6 – Схема обработки

Можно выделить следующие группы требований к модернизации станка:

- требования к монтажу и относительному положению элементов;
- требования к жёсткости и прочности элементов станочной наладки с учётом специфичности их нагружения;
- требования к точности движений, выполняемых при обработке.

К числу установочных наладочных параметров при обработке относятся:

- расстояние B_0 от плоскости резцов головки до оси заготовки (оси центров) – регулируется вращением винта 7 вертикального суппорта 4, в качестве которого можно использовать, например, каретку суппорта универсального токарно-винторезного станка;
- станочный межосевой угол Σ_0 (угол между осями заготовки и резцовой головки; в самом распространённом частном случае этот угол равен 90°) – обеспечивается регулировкой при монтаже кронштейна 5 на суппорте 6 станка;
- положение центра (x_c, z_c) и радиус ρ дуговой траектории подачи резцовой головки;
- начальное и конечное станочное межосевое расстояние aw_0 .

Резцы головки испытывают нагружение главным образом перпендикулярно своим передним плоскостям, то есть осевая составляющая силы резания, действующей на РГ, является доминирующей. В качестве основного варианта, обеспечивающего большую жёсткость и надёжное прижатие к направляющим станины станка силами резания, выбрано обращение передних плоскостей резцов вверх и расположение резцовой головки ниже оси центров станка.

В процессе формообразования зубьев при новой схеме одновременно применяется поперечная и продольная подача (круговая интерполяция) резцовой головки, что требует согласования трех пар движений на станке (рис. 6):

- а) вращения резцовой головки и вращения заготовки колеса;
- б) подачи резцовой головки и дополнительного вращения заготовки колеса;
- в) поперечной и продольной подачи.

Следует отметить, что существуют токарные обрабатывающие центры, имеющие все необходимые связи движений, однако стоимость такого оборудования значительно превосходит стоимость токарно-винторезных станков с ЧПУ. На большинстве токарных станков с ЧПУ можно осуществить согласование вращения шпинделя с подачей поперёк оси, с подачей вдоль оси, или линейной подачей вдоль образующей.

Для совместной реализации первых двух пар согласованных движений с точки зрения программирования и технологии удобно выполнять не сложение вращений шпинделя (рис. 7а), а одновременное увязывание углов его поворота с подачей и вращением резцовой головки (рис. 7б), которое должно осуществляться сервоприводом.

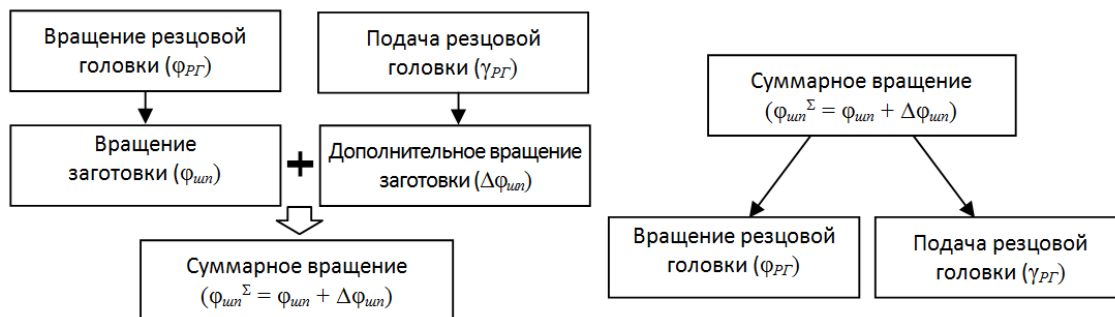


Рисунок 7 – Согласование движений при обработке

С помощью обычных для токарно-винторезных станков циклов можно реализовать нарезания резьбы на цилиндре, плоскости (резьба-спираль) или конусе. Особенностью рассматриваемой схемы является то, что вращение шпинделя должно быть согласовано с круговой подачей инструмента. Для преодоления этой сложности предлагается разбить круговую траекторию подачи инструмента на ряд достаточно малых линейных участков.

В качестве режущего инструмента для нового метода нарезания зубьев спироидных колес используется резцовая головка с радиальными пазами, в которых установлены призматические резцы (рис. 8). Сборная конструкция инструмента даёт следующие преимущества:

- режущие элементы (резцы) могут быть изготовлены из быстрорежущей стали или твердого сплава, а остальные детали головки – из более дешёвой конструкционной стали;
- существенно упрощены производство и переточка инструмента, в частности, заточку резцов можно производить вне корпуса резцовой головки по отдельности или группами.

В общем случае при изготовлении сборного инструмента следует стремиться максимизировать число режущих элементов – это позволит обеспечить максимальную производительность обработки. С другой стороны, при использовании резцовой головки для новой схемы формообразования можно оснастить резцами лишь некоторые (вплоть до единственного) пазы, что сокращает подготовку единичного производства.

Для точного позиционирования резцов резцовой головки в окружном, осевом и радиальном направлениях необходимо жестко регламентировать шаг между боковыми стенками пазов корпуса, обеспечивать надежное прижатие резцов к базировочным поверхностям, обеспечивать единообразное профилирование резцов при их переточке.

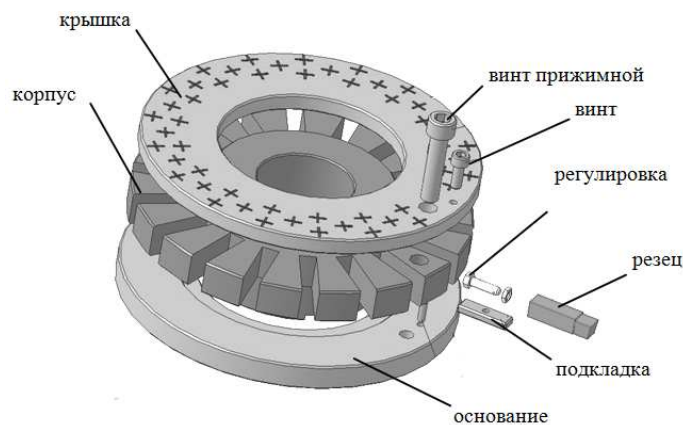


Рисунок 8 – Резцовая головка

В обычном программном обеспечении для токарной обработки имеется возможность одновременного согласованного управления тремя координатами – перемещениями вдоль координатных осей x и z , и круговой координатой шпинделя (в частности, как было отмечено выше, такое управление позволяет реализовать нарезание резьбы на конической поверхности). Управление дополнительно вводимым вращением режущего инструмента, на наш взгляд, можно осуществить тремя альтернативными способами:

- использованием программного обеспечения, применяемого в токарных обрабатывающих

центрах, где ведётся управление 4-5 координатами одновременно (в частности, и углом поворота приводного инструмента, аналогом которого можно считать резцовую головку);

– использованием широко распространённого программного обеспечения для фрезерной обработки, в котором обычно ведётся управление 4-5 координатами;

– введением в циклы управления нарезанием резьбы дополнительного согласованного параметра, задающего скорость вращения резцовой головки.

Выводы и перспективы дальнейших исследований в данной области. Спиральная (спиралевидная) форма зубьев применяется в конических и гипоидных передачах с равновысокими зубьями формы (форма III по ГОСТ 19325-73). Метод обработки спиралевидных зубьев, основанный на предложенной схеме, на наш взгляд, имеет перспективы стать альтернативой для известных и весьма производительных способов зубообработки колес таких передач – обработки при непрерывном делении с помощью торцовых резцовых головок (способы Oerlicon [6] и Face hobbing [7]) или спирально-дискового инструмента [8], обладая возможностью достаточно простой реализации на существующих широко распространенных и доступных токарно-винторезных станках с ЧПУ.

Библиографический список использованной литературы

1. Трубачев Е.С. Новая схема формообразования зубьев спироидных колес / Е.С. Трубачев, П.А. Злобина, С.Е. Логинов // Интеллектуальные системы в производстве. — Ижевск: Изд. ИжГТУ, 2011. — № 3. — С. 178-184.

2. Бабичев Д.Т. Исходная инструментальная поверхность лезвийных инструментов / Д.Т. Бабичев // Теория и практика зубчатых передач: тр.междунар. конф. – Ижевск, 1996. – С. 412-421.

3. Goldfarb V.I. Development and Application of Computer-Aided Design and Tooth Contact Analysis of Spiral-Type Gears With Cylindrical Worms / V.I. Goldfarb, E.S. Trubachev // Technical Paper for AGMA FTM, 2002, USA. – P.17-21.

4. Трубачев Е.С. Новый метод нарезания зубьев спироидных колёс / Е.С. Трубачев, С.Е. Логинов // Теория и практика зубчатых передач: сб.тр. Международного симпозиума, 21-23 января, 2014 г., Россия, Ижевск. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2013. — 580 с. ISBN 978-5-7526-0629-8.

5. Логинов С.Е. Подготовка зубообработки спироидных колёс с помощью плоской резцовой головки / С.Е. Логинов, К.В. Богданов // Сборник трудов Международного симпозиума, 21-23 января, 2014 г., Россия, Ижевск. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2013. – 580 с. ISBN 978-5-7526-0629-8.

6. Производство зубчатых колес. Справочник / Под общ. ред. Тайца Б.А. – М.: Машиностроение, 1990. – 463 с.

7. Stadtfeld H.J. Gleason Bevel Gear Technology / H.J. Stadtfeld // Manufacturing, Inspections and Optimization: Collected Publications 1994/95. The Gleason Works, Rochester. – New York (USA), 1995. – 202 p.

8. Сызранцев В.Н. Анализ зацепления конических колес, образованных спиральным инструментом / В.Н. Сызранцев // Теория и расчёт передаточных механизмов: сб. науч. тр. / Хабар. политехн. ин-т. – 1975. – С. 32 – 41.

Поступила в редакцию 15.01.2014 г.

Трубачев Є.С., Логінов С.Є., Богданов К.В. Розробка нової технології нарізування зубів спироїдних коліс

Представлені результати розробки нового високопродуктивного методу обробки спіральних зубів, що реалізується з допомогою плоскої різцевої головки на токарно-гвинторізному верстаті з ЧПК. Дані основи розрахунку верстатній наладки і розрахунку геометрії нарізання зубів. Розглянуто модернізація токарно-гвинторізного верстата з ЧПК і конструкції елементів технологічної оснастки, необхідні для практичного використання.

Ключові слова: спироїдна передача, нарізування спіральних зубів.

Trubachev E. S., Loginov S. E., Bogdanov K.V. Development of a new tooth cut technology for spiroid gearwheels

Results of developing a new high-performance method of spiroid gearwheels teeth cutting are proposed. Cutting process is realized by the plane cutting head with a continuous indexing on the lathe CNC machine. Modernization of the machine and design of tooling elements needed to implement a new tooth cutting method with a plane cutting head for spiroid gearwheels are suggested.

Keywords: spiroid gear, spiral teeth cutting.