

– М.: Машиностроение, 1983. – 264с. **20.** Производство зубчатых колес: [Справочник под общей редакцией *Б.А. Тайца*. 3-е изд. перераб. и дополн.]. – М.: Машиностроение, 1990. – 464с. **21.** *Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов М.Н.* Повышение надежности тяжелонагруженных зубчатых передач. – М., 1981. – 322с. **22.** *Заблонский К.И.* Анализ факторов, влияющих на нагрузку в зацеплении, и их отражение в расчетах зубчатых передач // Vortragsband Tagung "Zahnradgetriebe Dresden 1989". – Dresden: TUD, 1989. – S.44-59. **23.** *Кириченко А.Ф., Павлов А.И.* Подальший розвиток теорії зацеплень для побудови силових зубчастих передач // Машинознавство. – Львів. – 2003. **24.** *Устиненко В.Л.* Напряженное состояние зубьев цилиндрических прямозубых колес. – М.: Машиностроение, 1972. – 92с. **25.** *Павлов А.И.* Современная теория зубчатых зацеплений. – Харьков: ХНАДУ, 2005. – 100с. **26.** *Данильченко Ю.М., Кривошея А.В., Сторчак М.Г.* Проектирование формообразующего оборудования и инструментальных систем для обработки зубчатых колес // Теория и практика зубчатых передач: Сборник трудов Международного симпозиума. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2014. – С.484-489. **27.** *Устиненко А.В.* Математическое моделирование процессов усталостного разрушения зубьев // Вестник НТУ "ХПИ": Сб. науч. трудов. Тем. вып. "Машиноведение и САПР". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2012. – №22. – С.170-175. **28.** *Воронцов Б.С.* Интерактивное управление синтезом зубчатых передач // Вестник НТУ "ХПИ": Сборник научных трудов. Тем. вып. "Проблемы механического привода". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2005. – №40. – С.182-187.

Bibliography (transliterated): **1.** *Medvedev F.V., Nagaev I.V.* Avtomatizirovannoe proektirovanie i proizvodstvo detalej slozhnoy geometrii na baze programmnogo kompleksa PowerSolution: Ucheb. posobie / Pod obshh. red. *A.G. Gromasheva*. – Irkutsk: Izd. IrGTU, 2005 – 167p. **2.** *Ternyuk N.E., Dudukalov Yu.V., Fedchenko V.V., Gladka N.N.* Sistemno-processnoe modelirovanie tehniceskikh sistem v CALS-tehnologiyah // Otkrytye informacionnye i komp'yuternye integrirovannye tehnologii, 2011, No49. – P.124-133. **3.** *Litvin F.L.* Gear Geometry and Applied Theory. – Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994. – 724p. **4.** *Erihov M.L.* Principy statistiki, metody analiza i voprosy sinteza zubchatykh zacepleniij: Diss. dokt. tehn. nauk. – Khabarovsk, 1972. – 324p. **5.** *Kolchin N.I.* Analiticheskij raschet ploskih i prostranstvennykh zacepleniij – Moscow: Mashgiz, 1949. **6.** *Sheveleva G.I.* Teoriya formoobrazovaniya i kontakta dvizhushihysya tel. – Moscow: Izd. "Stankin", 1999. – 494p. **7.** *Shishov V.P.* Teoriya, matematicheskoe obespechenie i realizaciya sinteza vysokonagruzhennykh peredach zacepleniem dlya promyshlennogo transporta: diss. dokt. tehn. nauk. – Lugansk, 1994. – 525p. **8.** *Vulgakov E.B.* Teoriya evol'ventnykh zubchatykh peredach. – Moscow: Mashinostroenie, 1995. – 264p. **9.** *Rodin P.R.* Osnovy formoobrazovaniya poverhnoy reziem. – Kiev: Vyshha shk., 1977. – 192p. **10.** *Lashnev S.L., Yulikov M.I.* Proektirovanie rezhushhey chasti instrumenta s primeneniem EVM. – Moscow: Mashinostroenie, 1980. – 208p. **11.** *Granovskij G.I.* Kinematika rezaniya. – Moscow: Mashgiz, 1948. – 199p. **12.** *Cvis Yu.V.* Profilirovanie rezhushhego obkatnogo instrumenta – Moscow: Mashgiz, 1961. – 155p. **13.** *Perpelica B.A.* Otbrazhenie affinnogo prostranstva v teorii formoobrazovaniya poverhnoy reziem. – Khar'kov: Vyshha shk., 1981. – 152p. **14.** *Babichev D.T.* Razvitiye teorii zacepleniij i formoobrazovaniya poverhnoy na osnove novykh geometro-kinematicheskikh predstavlenij: Diss. dokt. tehn. nauk: 05.02.18 Teoriya mehanizmov i mashin. – Tyumen', 2005. – 424p. **15.** *Ljushin V.S.* Teoriya vintovykh poverhnoy v proektirovanii rezhushhih instrumentov. – Moscow: Mashinostroenie, 1967. – 372p. **16.** *Radzevich S.P.* Formoobrazovanie slozhnykh poverhnoy na stankah s ChPU. – Kiev: Vishha shkola. – 192p. **17.** *Reshetov D.N., Portman V.T.* Tochnost' metallovezhushhih stankov – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 336p. **18.** *Segal' M.G.* Vidy lokalizovannogo kontakta v konicheskikh i gipoidnykh peredachah // Mashinovedenie. – Moscow, 1970. – No1. – P.56-63. **19.** *Kalashnikov S.N., Kalashnikov A.S.* Zubchatye kolea i ih izgotovlenie – Moscow: Mashinostroenie, 1983. – 264p. **20.** Производство зубчатых колес: [Справочник под обшей редакцией *Б.А. Тайца*. 3-е изд. перераб. и дополн.]. – Moscow: Mashinostroenie, 1990. – 464p. **21.** *Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов М.Н.* Повышение надежности тяжелонагруженных зубчатых передач. – Moscow, 1981. – 322с. **22.** *Заблонский К.И.* Анализ факторов, влияющих на нагрузку в зацеплении, и их отражение в расчетах зубчатых передач // Vortragsband Tagung "Zahnradgetriebe Dresden 1989". – Dresden: TUD, 1989. – P.44-59. **23.** *Кириченко А.Ф., Павлов А.И.* Подальший розвиток теорії зацеплень для побудови силових зубчастих передач // Машинознавство. – Львів. – 2003. **24.** *Устиненко В.Л.* Напряженное состояние зубьев цилиндрических прямозубых колес. – Moscow: Mashinostroenie, 1972. – 92с. **25.** *Павлов А.И.* Современная теория зубчатых зацеплений. – Khar'kov: HNADU, 2005. – 100p. **26.** *Данильченко Ю.М., Кривошея А.В., Сторчак М.Г.* Проектирование формообразующего оборудования и инструментальных систем для обработки зубчатых колес // Теория и практика зубчатых передач: Сборник трудов Международного симпозиума. – Ижевск: Изд. ИжГТУ, 2014. – С.484-489. **27.** *Устиненко А.В.* Математическое моделирование процессов усталостного разрушения зубьев // Вестник НТУ "ХПИ": Сб. науч. трудов. Тем. вып. "Машиноведение и САПР". – Khar'kov: NTU "KhPI", 2012. – No22. – P.170-175. **28.** *Воронцов Б.С.* Интерактивное управление синтезом зубчатых передач // Вестник НТУ "ХПИ": Сб. науч. трудов. Тем. вып. "Проблемы механического привода". – Khar'kov: NTU "KhPI", 2005. – No40. – P.182-187.

Поступила (received) 26.04.2015

УДК 621.9

Н.Н. КУЗЬМЕНКО, к.т.н., доцент каф. метрологии и приборов
ВНУ им. В. Даля, Северодонецк

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ КВАЗИГЛОБОИДНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В статье рассмотрена технология изготовления зубьев квазиглобoidных зубчатых колес разной геометрии с помощью новой схемы формообразования, когда передние режущие грани не находятся в одной плоскости, в которой находится и ось вращения квазиглобoidной заготовки, что приводит к повышению точности изделия. Проведено исследование суммарного пятна контакта квазиглобoidной червячной зубчатой передачи. Определена площадь суммарного пятна контакта квазиглобoidных зубчатых передач.

Ключевые слова: квазиглобoidное зубчатое колесо, инструментальное колесо, зубонарезание, формообразование.

Актуальность задачи. Многолетний опыт производства и эксплуатации зубчатых передач показал большое влияние технологических факторов на динамику, виброактивность, ресурс и надежность работы передач. Технология производства "бесшумных" передач повышенного ресурса эксплуатации должна обеспечивать: высокую точность изготовления базовых поверхностей и всех элементов зацепления; высокое качество химико-термического упрочнения рабочих поверхностей зубчатых колес; оптимальную модификацию рабочих поверхностей зубьев, обеспечивающую снижение динамических нагрузок и вибраций в зацеплении и исключающую заедание зубьев в работе зубчатых пар; низкую шероховатость рабочих поверхностей зубьев; снижение затрат на изготовление зубчатых колес.

Сложность поставленных перед технологией производства зубчатых колес задач требует комплексного подхода к их решению, основой которого является разработка базовых технологических процессов механической и химико-термической обработки, оснащение производства высокоточным и производственным оборудованием, современными комплексами вычислительной техники и программными продуктами.

Основная часть. Разработка технологического процесса изготовления зубчатых колес начинается и ведется параллельно с разработкой конструкции зубчатой передачи, при этом определяется возможность их изготовления в условиях конкретного серийного производства. Технологический процесс (маршрут), устанавливающий последовательность выполнения операций обработки, строится в зависимости от многих конструктивно-технологических особенностей зубчатого колеса, определяющей из которых является выбор вида химико-термического упрочнения его рабочих поверхностей.

Работоспособность зубчатых колес в значительной степени зависит от правильного выбора геометрии зацепления (формы и величины модификации рабочих поверхностей зубьев), точности изготовления и качества поверхностного слоя зубьев. Эксплуатационные свойства зависят от воздействия на поверхностный слой зубьев комплекса технологических и металлургических факторов, которые тесно взаимодействуют между собой.

Для совершенствования производства зубчатых колес требуется разработка единой системы управления процессом изготовления деталей, затрудня-

© Н.Н. Кузьменко, 2015

ющей проявление отрицательных факторов технологической системы обработки (технологической наследственности).

Станочное зацепление цилиндрического производящего колеса с квазиглобoidным колесом (червяком) характеризуется следующими тремя основными параметрами:

- углом скрещивания осей инструмента и изделия;
- межосевым расстоянием a_w в горловом сечении;
- передаточным числом u .

Прежде чем нарезать зубья на квазиглобoidном колесе необходимо иметь квазиглобoidную заготовку (рисунок 1). Такие заготовки могут быть изготовлены при помощи круглого резца [1, 2].

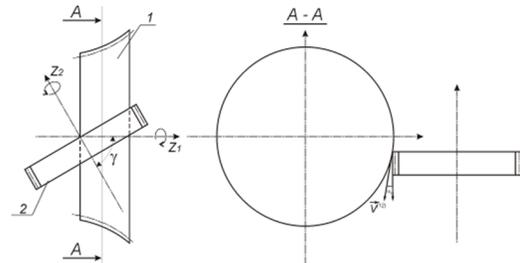


Рисунок 1 – Схема формообразования квазиглобoidной заготовки

Вращение заготовки 1 и круглого резца 2 кинематически увязываются в зависимости от диаметров d_1 и d_2 (в горловом сечении) и угла наклона β по следующей зависимости:

$$u_{21} = \frac{d_2}{d_1 \cos \beta}.$$

Вращения $\bar{\omega}_1$ и $\bar{\omega}_2$ направлены по часовой стрелке.

При изготовлении квазиглобoidной заготовки круговая режущая кромка описывает цилиндрическую производящую поверхность.

После получения квазиглобoidной заготовки производят нарезание зубьев методом обкатки при помощи цилиндрических обкаточных инструментов (рисунок 2). Главным движением резания является относительная скорость скольжения $\bar{V}^{(12)}$ передних режущих граней цилиндрического обкаточного инструмента 2 о поверхности зубцов на квазиглобoidной заготовке 1. Относительное скольжение получается за счет скрещивания осей квазиглобoidной заготовки и цилиндрического обкаточного инструмента. Чем больше угол наклона зуба β , тем больше скорость $\bar{V}^{(12)}$, тем лучше условия резания.

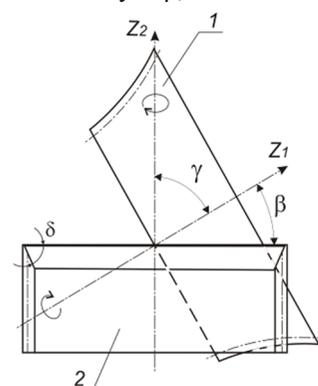


Рисунок 2 – Схема изготовления квазиглобoidного колеса

Вращения цилиндрического инструментального колеса и заготовки происходят по направлению часовой стрелки и согласуются при помощи гитары деления [3, 4,] путем подбора сменных шестерен по формуле:

$$\frac{a \cdot c}{b \cdot d} = \frac{m \cdot z_2}{z_1}, \quad (1)$$

где a, b, c, d – расчетные зубчатые колеса гитары деления; m – характеристика зубофрезерного станка; z_1 – число зубьев квазиглобoidного нарезаемого червяка (колеса); z_2 – число зубьев прямозубого или косозубого обкаточного резца.

Нарезание квазиглобoidного зубчатого червяка (колеса) иллюстрируется рисунками 2 и 3 Базовой поверхностью для установки глубины ре-

зания является наружная поверхность горлового (минимального диаметра) сечения заготовки. После включения станка, заготовку и обкаточный резец сближают до их соприкосновения. Затем производят постепенное сближение обкаточного резца и квазиглобoidной заготовки на требуемую глубину резания и производят нарезание искомого зубчатого колеса.

Изготовление зубьев квазиглобoidных зубчатых колес осуществлялось на ХК "Лугансктепловоз" на серийных зубофрезерных станках Pfauter и Modul (характеристики станков – 6 и 12) при помощи спроектированного прямозубого или косозубого обкаточного резца (рисунки 2 и 3).



Рисунок 3 – Изготовление квазиглобoidного колеса

Изготовим квазиглобoidное колесо $z_1=20$, с углом наклона зуба в горловом сечении $\beta_r=60^\circ$. Нарезаемое зубчатое колесо будет косозубым с переменным углом наклона β . Минимальный угол наклона будет в горловом сечении, т.е. $\beta_{\min}=\beta_r$. Угол наклона определяется конструктором в зависимости от диаметра конструируемого колеса в горловом сечении, а также нормального модуля m_n .

Определим геометрические параметры нарезаемых квазиглобoidных зубчатых колес со следующими параметрами: $z_1=20$; $m=1,5$; $\beta=60^\circ$.

В качестве режущего инструмента возьмем прямозубый обкаточный резец с $z_1=68$; $m_n=1,5$.

Высота нарезаемого зуба:

$$h_z = 2,25 \cdot m_n = 2,25 \cdot 1,5 = 3,375 \text{ мм}.$$

Торцовый модуль квазиглобoidного зубчатого колеса:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos 60^\circ} = \frac{1,5}{0,5} = 3 \text{ мм}.$$

Диаметр делительной окружности квазиглобoidного зубчатого колеса в горловом сечении [5]:

$$d_d = m_t \cdot z_2 = 3 \cdot 20 = 60 \text{ мм}.$$

Наружный диаметр квазиглобoidного зубчатого колеса в горловом сечении:

$$d_a = d_d + 2m_n = 60 + 2 \cdot 1,5 = 63,00 \text{ мм}.$$

Внутренний диаметр квазиглобoidного зубчатого колеса в горловом сечении [6]:

$$d_f = d_d - 2,5m = 60 - 2,5 \cdot 1,5 = 56,25 \text{ мм}.$$

Для нарезания зубьев необходимо настроить гитару деления и по таблицам выбрать сменные шестерни:

$$u_{c.d.} = \frac{k \cdot z_2}{z_1} = \frac{6 \cdot 20}{68} = 1,76$$

где k – характеристика зубофрезерного станка, $k=6$.

Требуется подобрать сменные колеса гитары для передаточного отношения $u_{c.d.}=1,76$. Находим обратную величину $1/u_{c.d.} = 1/1,76 = 0,57$, тогда



Рисунок 4 – Квазиглобоидное колесо с $z_1=20$; $m=1,5$; $\beta=60^\circ$

$$u_{z.d.} = \frac{53 \cdot 95}{41 \cdot 70}$$

На рисунке 4 изображено квазиглобоидное колесо с геометрическими параметрами $z_1=20$; $m=1,5$; $\beta=60^\circ$, изготовленное цилиндрическим обкаточным резцом с параметрами $z_1=68$; $m_r=1,5$.

Обкатка квазиглобоидной червячной зубчатой пары осуществлялась с помощью приспособления к зубофрезерному станку, которое позволяет найти пятно контакта в разработанной зубчатой паре. Схема этого устройства представлена на рисунке 5.

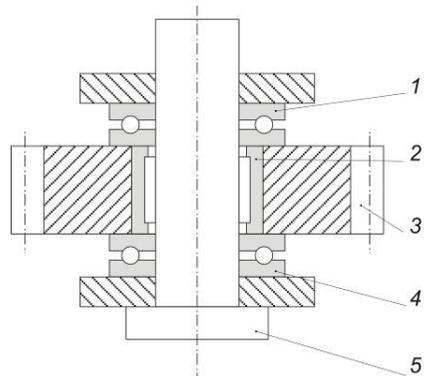


Рисунок 5 – Схема приспособления для обкатки зубчатых колес

Приспособление работает следующим образом: стандартная оправка 5 устанавливается на стол станка, на нее крепятся два упорных шариковых подшипника 1 и 4, между которыми установлен игольчатый подшипник 2, на котором закреплено обкатываемое цилиндрическое прямозубое (или косозубое) зубчатое колесо 3. Квазиглобоидное зубчатое колесо, установленное на инструментальной оправке зубофрезерного станка зацепляется с зубчатым колесом 3, и приводит его в движение (вращение), которое установлено на инструментальной оправке зубофрезерного станка. Поскольку вращение квазиглобоидного и цилиндрического зубчатых колес независимы, то при обкатке зубчатых пар гитару деления зубофрезерного станка настраивать не требуется. С помощью такого приспособления можно обкатывать квазиглобоидные зубчатые пары с любыми габаритами, передаточным отношением, количеством зубьев.

При проектировании квазиглобоидных зубчатых колес на величину пятна контакта будут влиять количество заходов (витков) зубчатых колес, их диаметр, а также передаточное отношение в проектируемой передаче.

При экспериментальном исследовании определения пятна контакта проводилась обкатка зубчатых пар при зацеплении квазиглобоидных зубчатых колес разной геометрии с косозубыми цилиндрическими колесами.

Теоретическое и экспериментальное пятно контакта в передачах представлены на рисунке 6.

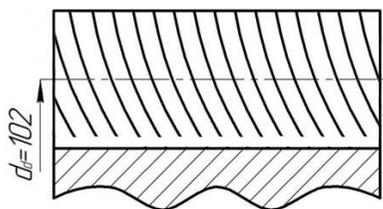


Рисунок 6 – Пятно контакта на зубе парного зубчатого колеса



Вывод: Синтезированы квазиглобоидные зубчатые колеса за счет усовершенствования схемы формообразования резанием. Экспериментально получены квазиглобоидные зубчатые передачи, состоящие из квазиглобоидных колес сопрягающиеся с цилиндрическими колесами. Определена площадь суммарного пятна контакта квазиглобоидных зубчатых передач.

Список литературы: 1. Геометрия зв'язаних поверхонь / Равская Н.С., Родин П.Р., Николаенко Т.П., Мельничук П.П., Выготовський Г.Н. – Житомир: ЖИТИ, 2001. – 319с. 2. Калашников С.Н., Калашников А.С. Зубчасті колеса та їх виготовлення. – М.: Машинобудування, 1983. – 264с. 3. Заблонський К.І. Зубчасті передачі. – Київ: Техніка, 2000. – 208с. 4. Вулгаков Е.Б. Узагальнена теорія і проектування. – М.: Машинобудування, 2004. – 264с. 5. Вітренко О.М. Дослідження геометрії і кінематики циліндро-гіперболоїдних передач: Дисс. канд. техн. наук: 01.02.02. – Ворошиловград, 1975. – 214с. 6. Кириченко І.О., Вітренко В.О., Вітренко О.В. Зубчасті передачі на валах, що схрещуються // Міжнародна збірка наукових праць "Прогресивні технології і системи машинобудування". – Донецьк: ДГУ, 2002. – Випуск №19. – С.83-88.

Bibliography (transliterated): 1. Geometry of the attended surfaces / Ravskaya N.S., Rodin P.R., Nikolaenko T.P., Mel'nychuk P.P., Vygotovskiy G.N. – Zhitomir: ZHITI, 2001. – 319p. 2. Kalashnikov S.N., Kalashnikov A.S. Gear-wheels and their making. – Moscow: Engineer, 1983. – 264p. 3. Zablonskiy K.I. Zuchchatye transmissions. – it is Kiev: Technique, 1977. – 208p. 4. Vulgakov E.B. The Generalized theory and planning. – Moscow: Engineer, 1974. – 264 p. 5. Vitrenko A.M. The study of geometry and kinematics of hyperboloid cylinder-over-cotages: Diss. candidate. techn. Science 01.02.02. – Voroshilovgrad, 1975. – 214p. 6. Kirichenko I.O., Vitrenko V.O., Vitrenko O.V. Gearing on billows, that skhre-schuyut'sya, // International collection of scientific labours "Progressive technologies and systems of engineer". – it is Donetsk: DGTU, 2002. – No19. – P.83-88.

Поступила (received) 08.04.2015

УДК 681.12.08:534.09

А.В. МАМОНТОВ, старший преподаватель каф. ОТ ХНУРЭ, Харьков

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ АВТОРСКОГО И ДОРЕЗОНАНСНОГО МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДИСБАЛАНСА РОТОРОВ

Приводится оценка метрологической точности авторского способа измерения статической неуравновешенности жестких роторов в сравнении с дорезонансным способом. Выводятся формулы для расчета составляющей относительной погрешности измерения, вызванной линейным трением. Результат анализа свидетельствует о том, что по точности измерения, авторский способ не уступает традиционному дорезонансному способу и может быть реализован на операциях балансировки роторов различных машин и механизмов.

Ключевые слова: балансировка, дисбаланс, жесткий ротор, дорезонансный, относительная погрешность, свободные колебания, линейное трение.

Введение. Актуальность задачи. Одной из важных задач в технологии машиностроения по-прежнему остается уравновешивание роторов различных машин и механизмов (балансировка).

В настоящее время существует ряд методов измерения неуравновешенности роторов и широкий спектр реализующих их устройств. Однако все они имеют недостатки, к числу которых относится влияние трения на точность измерения, а также дороговизна и сложность конструкции балансировочного станка. Это снижает эффективность балансировки роторов, что неуклонно ухудшает эксплуатационные характеристики различных машин и механизмов, в состав которых они входят. Этим объясняется *актуальность* задачи.

© А.В. Мамонтов, 2015