

А.Л. СИЛИЧ, д-р техн. наук, ТюмГНГУ

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОЛЕС ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ НОВИКОВА

Розроблені математичні моделі засобів обробки зубчатих колес на базі дискового шструментального колеса. Відображені особливості верстатного заціплення і пропонувані результати експериментальних досліджень по шевингованию колес, які показали, що процес дозволяTM у 1,5-2,5 разів підвищити точність і у 5-10 разів знизити шероховатість робочих поверхонь зубів.

The authors have developed mathematical models for the manufacture of Novikoff gears using disk tool gear. Peculiarities of machine-tool fastening are described in the article as well as the results of gear shaving tests which proved the possibility of improving gear accuracy 1.5 to 2.5 times and reduce roughness of active surfaces 5 to 10 times.

Постановка проблемы. Цилиндрические передачи Новикова имеют ряд преимуществ перед эвольвентными косозубыми передачами: более высокую нагрузочную способность, меньшие потери на трение, высокую износостойкость. Приводы с передачами Новикова более компактны. При неизменных габаритах привода возрастает его долговечность. Внедрение передач Новикова в ответственных и точных механизмах сдерживается недостаточным технологическим обеспечением их производства, а именно: отсутствием финишных методов обработки зубчатых колес.

Цель статьи. Доказать возможность теоретически точного формообразования боковых поверхностей зубьев колес цилиндрических передач Новикова с помощью дискового зубчатого инструмента, рассмотреть особенности контактирования зубьев в станочном зацеплении и привести результаты экспериментальных исследований по шевингованию колес.

Доказательство теоретически точного формообразования колес. При аналитическом доказательстве возможности обработки колес передач Новикова использовался обобщенный исходный контур представленный на рис. 1. С ним связана система координат $S_p(X_p, Y_p)$. Цифрами в кружках обозначены номера участков исходного контура. Переход от обобщенного исходного контура к конкретному исходному контуру осуществляется путем соответствующего задания параметров исходного контура. Уравнения производящей поверхности зубьев рейки в проекциях на оси координатной системы S_p представлены в следующем виде: криволинейные участки:

$$\left. \begin{aligned} X_{pi} &= p_i \sin \nu_i + b_i; \\ Y_{pi} &= p_i \cos \nu_i + c_i; \\ Z_{pi} &= u_i; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

прямолинейные участки:

$$\left. \begin{aligned} X_{pi} &= (\tau_i - \varpi_i) \cos \alpha_0; \\ Y_{pi} &= (\tau_i - \varpi_i) \sin \alpha_0 + f_i; \\ Z_{pi} &= u_i; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где ν_i , τ_i , и u_i - независимые параметры (i -го участка производящей поверхности), p_i , b_i , c_i , - радиус и координаты центра кривизны круговых участков исходного контура в системе координат S_p , α_0 - угол профиля прямолинейного участка, ϖ_i - расстояние от начала прямолинейного участка до делительной прямой.

При выборе геометро-кинематической схемы (ГКС) станочного зацепления и обоснования возможности ее использования для обработки колес необходимо учитывать ряд условий:

- геометрия инструмента должна быть сопоставима по сложности с геометрией обрабатываемых колес;
- ГКС должна воспроизводиться на современном оборудовании;
- ГКС должна удовлетворять условию универсальности;
- ГКС должна обеспечивать в станочном зацеплении коэффициент перекрытия достаточный для реализации методов свободного обката.

Финишная обработка зубчатых колес может реализоваться как по схеме винтового зацепления, так и по схеме зацепления пары колес при параллельных осях. Зубья инструмента могут быть либо прямыми, либо косыми.

При доказательстве возможности теоретически точного образования зубьев колес цилиндрических передач Новикова применялись методы одно- и двухпараметрического формообразования поверхностей разработанные в теории зубчатых зацеплений [1,2]. Уравнения боковой поверхности зуба инструмента полученного с помощью производящей поверхности рейки в системе координат связанной с инструментом, когда ось Z_u является осью вращения, для круговинтовых участков выглядят следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} X_{ui} &= (p_i \sin \nu_i + b_i - r_u - X_u) \cos \psi_u + (p_i \sin \nu_i + b_i - X_u) \cos \beta_u \operatorname{ctg} \nu_i \sin \psi_u; \\ Y_{ui} &= -(p_i \sin \nu_i + b_i - r_u - X_u) \sin \psi_u + (p_i \sin \nu_i + b_i - X_u) \cos \beta_u \operatorname{ctg} \nu_i \cos \psi_u; \\ Z_{ui} &= -p_i \cos \nu_i \sin \beta_u + (b_i - X_u) \cos \beta_u \operatorname{ctg} \beta_u \operatorname{ctg} \nu_i - c_i / \sin \beta_u + r_u \psi_u \operatorname{ctg} \beta_u; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где β_u - угол наклона зубьев инструмента, r_u - делительный радиус инструмента, X_u - смещение исходного контура инструмента.

Уравнения боковой поверхности зуба колеса образованного с помощью производящей поверхности рейки в системе координат, связанной с колесом, когда ось Z_k является осью вращения, для круговинтовых участков имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} X_{ki} &= (p_i \sin \nu_i + b_i + r_k + X_k) \cos \psi_k - (p_i \sin \nu_i + b_i + X_k) \cos \beta_k \operatorname{ctg} \nu_i \sin \psi_k; \\ Y_{ki} &= (p_i \sin \nu_i + b_i + r_k + X_k) \sin \psi_k + (p_i \sin \nu_i + b_i + X_k) \cos \beta_k \operatorname{ctg} \nu_i \cos \psi_k; \\ Z_{ki} &= -p_i \cos \nu_i \sin \beta_k + (b_i + X_k) \cos \beta_k \operatorname{ctg} \beta_k \operatorname{ctg} \nu_i - c_i / \sin \beta_k + r_k \psi_k \operatorname{ctg} \beta_k; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где β_k - угол наклона зубьев колеса, r_k - делительный радиус колеса, X_k - смещение исходного контура колеса.

Формообразование боковых поверхностей зубьев колес **К** с помощью производящих поверхностей инструментального колеса **И** осуществлялось по схеме винтового зацепления при наличии двух независимых параметров относительного движения инструмента: поступательного перемещения S и вращательного движения φ_k . Было доказано [4], что при выбранной схеме формообразования инструмента боковая поверхность зубьев колес воспроизводится теоретически точно и описывается системой уравнений (4) с учетом уравнений связи параметров:

$$\varphi_u = \psi_u; \quad (5)$$

$$\psi_u = (r_u \cos \beta_u)^{-1} (c_i - (x_u + x_k) m_n \operatorname{ctg} \nu_i \cos \beta_k \sin \beta_u) / \sin \gamma - (b_i - X_u) \operatorname{ctg} \nu_i - S \sin(\gamma + \omega) \quad (6)$$

где $\gamma = \beta_k \pm \beta_u$ - межосевой угол (знак "+" принимается тогда, когда линии зубьев колеса и инструмента одного направления, в противном случае принимается знак "-"); φ_k - угол поворота колеса; ω - угол между направлением подачи и осью инструмента, отсчитываемый от оси Z_u по направлению хода часовой стрелки; Z_u - угол поворота инструмента.

Полученные уравнения зацепления устанавливают связь между криволинейными координатами ν_i и ψ_u производящей поверхности инструмента и параметрами относительного движения φ_k и S при образовании соответствующих участков теоретической поверхности зубьев колеса.

Подставим решения уравнения (5) в уравнение (6), заменим $\sin \gamma$ выражением $\sin \gamma = \sin \beta_k \cos \beta_u - \cos \beta_k \sin \beta_u$ и, проведя преобразования, уравнение связи между параметрами представим в следующем виде:

$$\varphi_u = 2 / (m_n z_u) (c_i - (kX_k - X_u(1-2k) + b_i(1-k)) \operatorname{ctg} \nu_i / (1-k) - S \sin(\gamma + \omega)) \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что значения углов входа и выхода по соответствующим участкам зубьев не зависят в отдельности от углов β_k и β_u , а зависят от отношения тангенсов этих углов.

Следовательно, на базе такой математической модели возможна разработка финишных способов (шевингование и абразивное хонингование) обработки колес передач Новикова, а также процесс накатывания колес.

Особенности контактирования зубьев в станочном зацеплении. Теоретические исследования математической модели формообразования зубьев колес передач Новикова с помощью инструментального колеса позволили установить условия возникновения линейного контакта по круговинтовым участкам, наличие многоточечного контакта в станочном зацеплении, а также тот факт, что значения углов входа и выхода из зацепления по соответствующим участкам зубьев не зависят в отдельности от углов β_k и β_u , а зависят от отношения тангенсов этих углов. Для примера на рис.2 приведена диаграмма зависимости углов входа φ_{in} в зацепление и выхода φ_{ik} (i - номер участка исходного контура) из зацепления по различным участкам боковой поверхности зуба в зависимости от коэффициента смещения x_u исходного контура инструмента. Сплошные утолщенные линии на рис.2 соответствуют углам входа φ_{in} и выхода φ_{ik} . Значения углов φ_u на рис.2 получены для метода шевингования, когда перемещение S инструмента осуществляется в направлении, параллельном оси колеса. Согласно геометрокинematicкой схеме зацепления в этом случае $\omega = -\gamma$. При таком способе шевингования активная действующая линия не перемещается вдоль зуба инструмента, занимая одно и то же положение вне зависимости от величины перемещения S . Положение линий φ_{in} и φ_{ik} зависит в основном от величин k , x_k и

x_u и при этом точки пересечения этих линий соответствуют линейному касанию в станочном зацеплении по i -тому участку, т.е. т. Д пересечения линий φ_{1k} и φ_{1n} соответствует линейному касанию на 1-ом участке. При значениях x_u находящихся левее т. Д и правее т. В, наступает двухточечный контакт в зацеплении. При значениях x_u , лежащих левее т. А и правее т. С, наступает трехточечный контакт, а при x_u , лежащих левее т. Е и правее т. F, -четырёхточечный. Точка F есть пересечение линий φ_{4k} и φ_{1n} , а т. E - линий φ_{1k} и φ_{4n} . На рис.2 области двух-, трех- и четырехточечного контакта имеют соответствующую штриховку, а области одноточечного контакта изображены без штриховки.

Значения углов φ_u , при которых возникает линейный контакт на зубьях, строго фиксировано для каждого участка исходного контура и зависит от k , x_k , x_u и числа зубьев инструмента. Поэтому на рис.2 характерные точки А, В, С, D, E и F получены при значениях $x_k = 0,4$, а точки А', В', С, D', E' и F' - при значениях $x_k = -0,4$. Смещение характерных точек происходит по тонким штриховым линиям. При диагональной подаче инструмента, т.е. при $\omega \neq -\gamma$, тонкие штриховые линии будут наклонены под некоторым углом к горизонту в зависимости от значения угла ω .

Для финишной обработки колес широкое применение нашли инструменты в виде зубчатых колес, реализующие метод огибания без жесткой кинематической связи в станочном зацеплении при коэффициенте перекрытия большего единицы. Это достигается применением колеса, либо инструмента со смещением исходного контура. На основе созданной математической модели станочного зацепления и проведенных исследований была разработана методика проектирования инструментов в виде зубчатого колеса.

Экспериментальные работы. Экспериментальные работы по оценке эффективности шевингования колес передач Новикова проводились в четыре этапа:

1 этап - выбор рациональных режимов при одностороннем способе шевингования колес; 2 этап - оценка эффективности одностороннего способа шевингования колес при рациональных режимах обработки; 3 этап - оценка эффективности двухстороннего способа шевингования колес в производственных условиях; 4 этап - оценка эффективности двухстороннего способа шевингования колес в лабораторных условиях при рациональных режимах обработки.

На 1 и 2 этапах использовался шевр с исходным контуром ЮТЗ-65. На 3 и 4 этапах использовались шевры с исходным контуром НИИМ и ПМ-5А, фотографии которых представлены на рис. 3. Способ шевингования зубчатых колес передач Новикова реализован на существующем технологическом оборудовании, предназначенном для обработки эвольвентных колес. В качестве примера на рис. 4 показан момент шевингования колес передач Новикова с исходным контуром ЮТЗ-65.

Результаты проведенных лабораторных и заводских испытаний шевингования колес с исходным контуром НИИМ и ПМ-5А, представлены в таблицах 1 и 2. В этих таблицах X_{φ}^* и X_{u}^* это средние значения контролируемых параметров колес после фрезерования и шевингования соответственно при нормальном законе распределения случайной величины и медианы при восстановленном эмпирическом законе, D_{φ} , и D_u – диапазоны рассеяния случайной величины. В последних двух колонках таблицы приведены отношения величин, которые позволяют количественно оценить исправляемость колес после шевингования. Для объективной оценки результатов экспериментов отклонения точностных параметров зубчатых колес были подвергнуты статистической обработке путем восстановления функции плотности распределения случайной величины [3,4].

Таблица 1

Доверительные интервалы показателей точности в предположении нормального закона распределения случайной величины при двухстороннем риске 5%

Показатели в мкм	Фрезерованных колес	D_{φ}	Шевингованных колес	D_u	X_{φ}^*/X_{u}^*	D_{φ}/D_u
Первая серия опытов по обработке зубчатых колес						
F_{rr}	$88,2 \leq 107,6 \leq 127$	38,8	$77,0 \leq 92,3 \leq 107,5$	30,5	1,17	1,27
V_{pr}	$88,2 \leq 107,6 \leq 127$	18,2	$42,9 \leq 51,3 \leq 59,7$	16,8	1,16	1,08
V_{pxr}^{np}	$88,2 \leq 107,6 \leq 127$	26,6	$41,3 \leq 49,8 \leq 58,2$	16,9	0,97	1,57
V_{pxr}^l	$88,2 \leq 107,6 \leq 127$	22,3	$35,7 \leq 44,0 \leq 52,4$	16,7	1,16	1,34
Вторая серия опытов по обработке вал-шестерн						

F_{rr}	$68,3 \leq 94,2 \leq 120$	51,9	$30,8 \leq 38,8 \leq 46,9$	16,1	2,43	3,22
V_{pxr}^{np}	$27,5 \leq 37,9 \leq 48,3$	20,8	$19,3 \leq 30,5 \leq 41,7$	22,4	1,24	0,93
V_{pxr}^l	$28,6 \leq 38,6 \leq 48,6$	20,0	$18,0 \leq 25,3 \leq 32,6$	14,6	1,53	1,37
Третья серия опытов по обработке зубчатых колес						
F_{rr}	$42,7 \leq 69,4 \leq 96,0$	53,3	$12,4 \leq 29,8 \leq 47,1$	34,7	2,33	1,54
V_{pr}	$24,2 \leq 41,0 \leq 57,8$	33,6	$12,4 \leq 23,9 \leq 35,4$	23,0	1,72	1,46
F_{pr}	$12,8 \leq 21,3 \leq 29,7$	16,9	$5,8 \leq 8,4 \leq 10,9$	5,1	2,54	3,31

Таблица 2

Доверительные интервалы показателей точности после восстановления эмпирического закона распр. случайной величины при двухстороннем риске 5%

Показатели в мкм	Фрезерованных колес	D_ϕ	Шевингованных колес	$D_{ш}$	$X_{\phi}^*/X_{ш}^*$	$D_\phi / D_{ш}$
Первая серия опытов по обработке зубчатых колес						
F_{rr}	$51,8 \leq 104,0 \leq 170$	118,0	$42,2 \leq 82,6 \leq 144,0$	102,	1,26	1,16
V_{pr}	$36,1 \leq 57,6 \leq 91,0$	55,1	$22,2 \leq 49,7 \leq 74,1$	51,9	1,16	1,06
V_{pxr}^{np}	$16,5 \leq 46,1 \leq 107$	90,7	$15,2 \leq 47,3 \leq 73,7$	58,5	0,97	1,55
V_{pxr}^l	$17,0 \leq 52,5 \leq 98,6$	81,6	$17,6 \leq 43,1 \leq 70,4$	52,8	1,22	1,55
Вторая серия опытов по обработке вал-шестерн						
F_{rr}	$23,0 \leq 81,0 \leq 202,$	179	$21,1 \leq 42,9 \leq 85,8$	64,7	1,89	2,77
V_{pxr}^{np}	$7,4 \leq 32,8 \leq 82,8$	75,4	$5,9 \leq 22,6 \leq 90,9$	85,0	1,45	0,89
V_{pxr}^l	$11,9 \leq 30,4 \leq 84,6$	72,7	$5,8 \leq 21,6 \leq 51,5$	45,7	1,41	1,59
Третья серия опытов по обработке зубчатых колес						
F_{rr}	$32,3 \leq 56,7 \leq 108,$	75,6	$13,7 \leq 27,8 \leq 57,8$	44,1	2,04	1,71
V_{pr}	$14,9 \leq 32,7 \leq 62,1$	47,2	$5,7 \leq 20,3 \leq 43,0$	37,3	1,61	1,27
F_{pr}	$9,4 \leq 17,8 \leq 31,4$	22,0	$4,2 \leq 8,0 \leq 12,8$	8,6	2,23	2,56

Выводы. 1. Теоретически доказана возможность точного формообразования колес передач Новикова инструментом в виде зубчатого колеса.

2. Определены условия возникновения линейного и многоточечного контактов в станочном зацеплении колеса с инструментом.

Лабораторные и заводские испытания шевингования колес передач Новикова показали, что:

3. Шевингование при оптимальных режимах улучшает точностные показатели колес в 1,5-2,5 раза по сравнению с точностными показателями фрезерованных колес, а также значительно уменьшает разброс этих величин.

4. После шевингования значительно уменьшается шероховатость рабочих поверхностей зубьев ($R_z 10-20$ у фрезерованных до $R_a 1,25-0,4$ у шевингованных).

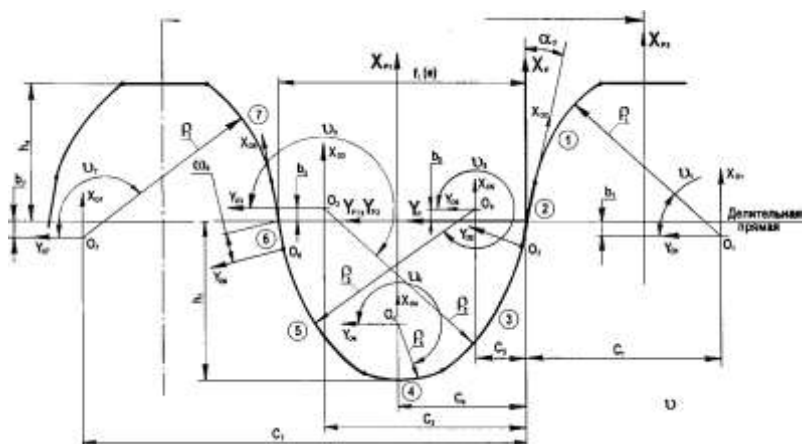


Рис. 1. Обобщенный исходный контур

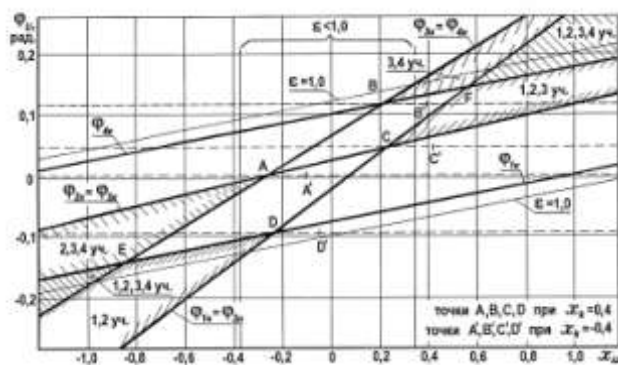


Рис.2. Диаграмма углов входа и выхода из зацепления по различным участкам.

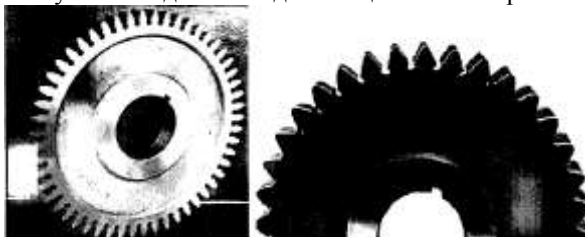


Рис.3. Шеверы с исходными контурами ЮТЗ-65 и НИИМ и ПМ-5А.



Рис.4. Шевингование колес на станке модели.

Список литературы: 1.Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений.-2-е изд., перераб. и доп. - М: Наука, 1968. - 584 с. 2.Ерихов М.Л. Применение принципа огибания с двумя независимыми параметрами к анализу и синтезу зубчатых зацеплений. Дисс....канд. техн. наук. - Л.,1965. 3.Силич А.А., Ерихов М.Л., Голофаст Л.М. О финишных методах обработки зубчатых колес цилиндрических

передач Новикова// Международная научно-техническая конференция "G-96".- Познань,1996. -С.317-321. 4.Силич А.А. Разработка геометрической теории проектирования передач Новикова и процесса формообразования зубьев колес. Автореф. ...докт.техн.наук. - Ижевск, 1999. - 32с.

Поступила в редакцию 26.04.2007