

А.В. Кривошея, канд. техн. наук, В.Я. Рыбак, канд. техн. наук,
 А.А. Микищенко, В.Е. Мельник, В.Р. Коробко, Киев, Украина
 В.С. Надеин, канд. техн. наук, Кировоград, Украина

АНАЛИЗ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИЗНОШЕННЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

У статті на конкретному прикладі розкриті особливості формування зношених крупногабаритних циліндричних зубчатих коліс.

В статті на конкретному прикладі розкриті особливості формування зношених крупногабаритних циліндричних зубчатих коліс.

In this paper a specific example disclosed features of formation of large worn spur gears.

Актуальность. Крупномодульные крупногабаритные цилиндрические зубчатые передачи 8-ой-9-ой степени точности используются в приводах шаровых мельниц на горно-обогатительных комбинатах (ГОКах) Украины. Так, на Ингулецком ГОКе в приводе шаровой мельницы используется зубчатая передача 9-ой степени точности модулем 20мм, числами зубьев 268 и 26, шириной зубчатого венца 800 мм и углом наклона линии зубьев 5°15'.

В результате эксплуатации в течении 8-9 лет величина износа по нормали к профилю зубьев большего зубчатого колеса составляет 7-8 мм.

Для такой степени точности зубчатых колес окончательной технологической операцией по формообразованию их зубьев является зубофрезерование червячными фрезами.

Учитывая, что стоимость нового большого зубчатого колеса диаметром более 5 метров составляет около 1 млн. гривен экономически обоснованным является восстановление функциональных и эксплуатационных характеристик такого зубчатого колеса после его износа, используя изношенное зубчатое колесо как заготовку, что является важной народно-хозяйственной задачей.

Анализ литературы. Для восстановления крупногабаритных изношенных зубчатых колес Институтом сверхтвердых материалов совместно с Институтом электросварки был разработан и внедрен способ восстановления таких зубчатых колес заключающийся в наплавке на зубчатый венец более 2-ух тонн специальной наплавки и последующего зубофрезерования специальными сборными твердосплавными червячными фрезами до восстановления прежних размеров зубчатого колеса [1]. И хотя этот способ был экономически оправданным, все же был трудоемким и дорогостоящим. В то же время особенность конструкции привода шаровых мельниц, позволяющую в широких пределах изменять межосевое расстояние в зубчатой передаче, анализ

величины и формы износа зубчатых венцов позволяют предположить о возможности восстановления крупногабаритного зубчатого колеса без применения наплавки, путем повторного формообразования с применением смещения исходного контура, его модификации или с применением новых видов профиля типа Новикова-Вильдагера [2].

Цель работы. Целью данной работы является анализ способа повторного формообразования изношенных крупногабаритных зубчатых колес без наплавки и его реализации.

Задачи работы. Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Разработать обобщенную математическую модель формообразования цилиндрических зубчатых колес с различным профилем.
2. Выполнить анализ формообразования и определить рациональную форму профиля исходной формообразующей рейки для различной величины износа.
3. Разработать конструкцию и изготовить специальную сборную крупномодульную червячную фрезу.
4. Испытать один из вариантов технологического формообразования крупногабаритного зубчатого колеса.

Следует отметить, что при обработке зубчатых колес 8-ой 9-ой степени точности профиль червячной фрезы в сечении нормальном к линии зуба на начальном диаметре соответствует профилю исходной формообразующей (производящей) рейки. Поэтому анализ формообразования зубчатых колес достаточно провести при анализе плоской системы зубчатых зацеплений [3].

Кинематическая схема формообразования цилиндрических зубчатых колес исходной формообразующей рейкой представлена на рис.1, [4].

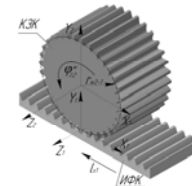


Рисунок 1 – Кинематическая схема формообразования, т.е. относительного движения исходного формообразующего реечного контура в системе координат заготовки контура зубчатого колеса (для наглядности изображена объемная модель пары рейка-колесо)

Согласно схеме изображенной на рис.1. исходный формообразующий реечный контур движется параллельно оси X_1 с параметром l_{x1} и вместе с системой X_1Y_1 вращается вокруг системы X_2Y_2 с параметром φ_{22}^w . Между па-

раметрами движения существует связь, так как они происходят одновременно, т.е. $l_{x1} = K_{lx1} \varphi_{22}^w$, где, $K_{lx1} = -r_w(2-1)$.

Параметр относительной установки (параметр относительного расположения) систем координат равен: $C_{y12} = -r_w(2-1)$.

В соответствии с теорией отображения аффинного пространства [5] запишем уравнение движения профиля ИФК относительно заготовки в системе координат заготовки (1):

$$m_{rПБ}(\varphi_z^w, \varphi_z^u) = m_\phi(\varphi_z^w) \cdot m(C_y^u) \cdot m_1(\varphi_z^w) \cdot m_{rП1}(\varphi_z^u) \quad (1)$$

где, $m_{rП1}(\varphi_z^u)$ – матричное уравнение профиля зуба исходного формообразующего реечного контура собственной системе координат X_1Y_1 ; $m_{rПБ}(\varphi_z^w, \varphi_z^u)$ – матричное уравнение движения профиля исходной формообразующей рейки в системе координат контура заготовки X_2Y_2 .

В матричном виде уравнение относительного движения запишется следующим образом (2):

$$m_{rПБ}(\varphi_z^w, \varphi_z^u) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_{z2}^w) & -\sin(\varphi_{z2}^w) & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & l_{x1}^w \\ \sin(\varphi_{z2}^w) & \cos(\varphi_{z2}^w) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(\varphi_z^w) \\ y(\varphi_z^w) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Для определения формообразованного профиля зубчатого колеса будем использовать кинематический способ формообразования, при котором в системе координат заготовки, точка движущего ИФК будет формообразующей, если вектор нормали в этой точке будет перпендикулярен аналогу вектора относительной скорости этой точки.

Тогда уравнение формообразования можно представить в виде (3):

$$NV = 0 \quad (3)$$

где,

$$N(\varphi_z^w, \varphi_z^u) = \frac{d}{d\varphi_z^w} m_{rП1}(\varphi_z^w, \varphi_z^u) \quad (4)$$

$$V(\varphi_z^w, \varphi_z^u) = \frac{d}{d\varphi_z^w} m_{rПБ}(\varphi_z^w, \varphi_z^u) \quad (5)$$

Решая данное уравнение найдем для каждой точки профиля ИФК параметр движения при котором она будет формообразующей. После чего подставив значение параметра движения в уравнение движения (1) найдем точки формообразованного профиля впадины зубчатого контура.

Следовательно классическая математическая модель формообразования состоит из уравнения относительного движения ИФК в системе координат заготовки, уравнений связи между параметрами относительного движения (1)

и уравнения формообразования (уравнения зацепления) и запишется в соответствии с методикой изложенной в [4] следующим образом (6).

$$\left\{ \begin{aligned} m_{rПБ}(\varphi_z^w, \varphi_z^u) &= m_\phi(\varphi_z^w) \cdot m(C_y^u) \cdot m_1(\varphi_z^w) \cdot m_{rП1}(\varphi_z^u) \\ l_{x1} &= K_{lx1} \varphi_{z2}^w \\ -\frac{\pi}{4} &\leq \varphi_{z2}^w \leq \frac{\pi}{4} \\ K_{lx1} &= r_w(2-1) \\ C_{y12} &= r_w(2-1) \\ NV &= 0 \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Следовательно для решения вопросов формообразования необходимо составить матричное уравнение исходного формообразующего реечного контура с различным профилем. В данной работе при анализе формообразования мы используем эвольвентный профиль и профиль Новикова.

В соответствии с принятой во всем мире системой расчета при теоретическом формообразовании цилиндрических зубчатых колес решается обратная задача формообразования, т.е. задается исходный реечный контур и как его контршаблон - исходный формообразующий реечный контур. Для эвольвентных цилиндрических зубчатых передач для зубчатого колеса и шестерни существует единый исходный и единый исходный формообразующий контур регламентированный ГОСТ 13755-81, (рис.2).

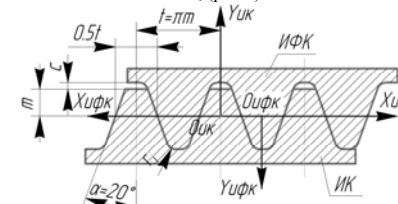


Рисунок 2 – Стандартный исходный реечный контур и совпадающий исходный формообразующий реечный контур не модифицированной цилиндрической эвольвентной зубчатой передачи

Для разработки математической модели и анализа формообразования необходимо математически описать каждый участок профиля зуба исходного формообразующего реечного контура в собственной системе координат $X_1 Y_1$.

Математическая модель исходного формообразующего контура в соответствии с методикой изложенной в [6] запишется следующим образом (7):

$$F(\varphi^u) = \begin{cases} m_{r11}(-\varphi^u - (0.5\pi - x_c) + (\alpha - \frac{\pi}{2} + \phi_1) + p) \\ \text{if } -(0.5\pi - x_c) + (\alpha - \frac{\pi}{2} + \phi_1) \leq \varphi^u \leq \phi_1 + (\alpha - \frac{\pi}{2}) \\ m_{rR1}(R_r - \varphi^u + (\pi + \alpha) + \phi_1) + v_c \text{ if } \phi_1 + (\alpha - \frac{\pi}{2}) \leq \varphi^u \leq \phi_1 \\ m_{r12}(\varphi^u) + 0.25\pi \text{ if } \phi_1 \leq \varphi^u \leq -\phi_1 \\ m_{rR2}(R_r \varphi^u + \alpha) + \phi_1 + q_c \text{ if } -\phi_1 \leq \varphi^u \leq -\phi_1 - (\alpha - \frac{\pi}{2}) \\ m_{r13}(-\varphi^u - (\alpha - \frac{\pi}{2} + \phi_1) - (x_c + 0.5\pi)) + w \\ \text{if } -\phi_1 - (\alpha - \frac{\pi}{2}) \leq \varphi^u \leq -(\alpha - \frac{\pi}{2} + \phi_1) - (x_c + 0.5\pi) \end{cases} \quad (7)$$

Для профилей отличных от эвольвентного для каждого зубчатого колеса передачи необходимо задавать свой исходный и свой исходный формообразующий контур.

Исходные формообразующие речные контура для шестерни и колеса зубчатой передачи с профилем Новикова представлены на рис. 3.

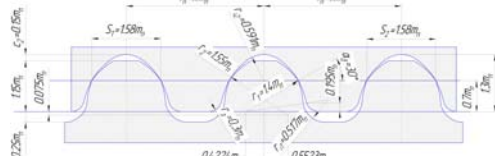


Рисунок 3 – Исходные формообразующие контура для зубчатого колеса и шестерни зубчатой передачи с профилем Новикова

Математические модели исходных формообразующих контуров зубчатой передачи с профилем Новикова запишутся следующим образом:

Для зубчатого колеса (8):

$$m_{r11}(\varphi^u) = \begin{cases} 27.95 \cos(\varphi^u) - 40.16 \\ 27.95 \sin(\varphi^u) - 5 \\ 0 \\ 1 \\ 11.92 \cos(\varphi^u) + \frac{17\pi + \pi}{18} + 0.896 \\ 11.92 \sin(\varphi^u) + \frac{17\pi + \pi}{18} - 11.923 \\ 0 \\ 1 \\ -\varphi^u + \frac{25}{18}\pi + 0.896 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{cases} \text{ if } 1.883 \leq \varphi^u \leq \frac{17}{18}\pi \quad (8)$$

Для шестерни (9):

$$m_{r11}(\varphi^u) = \begin{cases} \varphi^u \cos(\frac{7}{12}\pi) + 30.943 \cos(\frac{\pi}{12}) - 11.026 \\ \varphi^u \sin(\frac{7}{12}\pi) + 30.943 \sin(\frac{\pi}{12}) - 1.5 \\ 0 \\ 1 \\ 30.943 \cos(\varphi^u + \frac{\pi}{12}) - 11.026 \\ 30.943 \sin(\varphi^u + \frac{\pi}{12}) - 1.5 \\ 0 \\ 1 \\ 11.798 \cos(\varphi^u - 1.671) \\ 11.798 \sin(\varphi^u - 1.671) + 14.152 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{cases} \text{ if } -7.328 \leq \varphi^u \leq 0 \quad (9)$$

Примеры формообразованных эвольвентного профиля и профилей с зацеплением Новикова представлены на рис. 4.

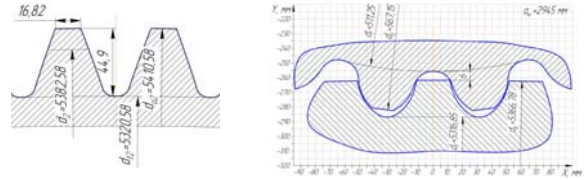


Рисунок 4 – Эвольвентный профиль колеса и профили зацепления Новикова

Проведенный анализ формообразования показал, что до величины износа 5 мм можно использовать при формообразовании изношенных зубчатых колес эвольвентный профиль, а для величин износа более 5 мм и до 8 мм необходимо использовать профиль Новикова.

Для реализации процесса формообразования изношенных зубчатых колес были спроектированы специальные сборные червячные фрезы, объемные модели которых представлены на рис. 5, а узел крепления пластин-зубьев на рис. 8.



Рисунок 5 – Объемные модели червячных фрез для зацепления Новикова (а) и эвольвентного зацепления (б).

После чего исходя из приведенных расчетов и объемных моделей были сделаны червячные фрезы при помощи которых были обработаны крупногабаритные зубчатые колеса и введена в эксплуатацию передача с выпуклым профилем на Ингульце ГОКЕ рис. 6, [7].



Рисунок 6 – Червячная фреза для обработки зубчатого колеса с профилем Новикова (а) и изготовленная зубчатая передача (б).

Особенностью червячной фрезы является то, что ее, делают сборной, т.е. в корпусе в прямых пазах расположены режущие элементы, которые прижаты со стороны передней поверхности в направлении опорной поверхности пазов при помощи прижимных элементов. Режущие элементы выполняются в виде клиньев, при этом одна сторона этих клиньев непосредственно взаимодействуют с опорной поверхностью прямых пазов, а противоположная сторона передняя поверхность поджимается прижимным элементом при помощи клина. Клинья в сборе создают ступеньки, угол наклона которых соответствует углу подъема винтовой линии фрезы на ее расчетном диаметре начального цилиндра рис. 7, [8].

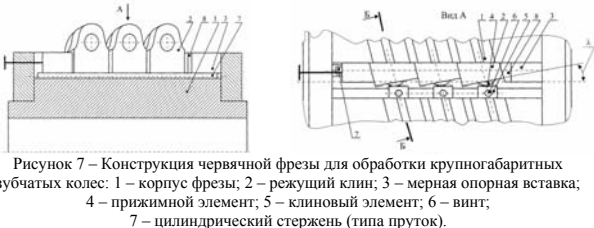


Рисунок 7 – Конструкция червячной фрезы для обработки крупногабаритных зубчатых колес: 1 – корпус фрезы; 2 – режущий клин; 3 – мерная опорная вставка; 4 – прижимной элемент; 5 – клиновидный элемент; 6 – винт; 7 – цилиндрический стержень (типа прутков).

Благодаря установке типовых режущих элементов вдоль прямого паза, а не в ступенчатую рейку уменьшается количество баз установки режущих элементов, в следствии чего увеличивается точность обработки.

Нижние поверхности режущих элементов для базирования в радиальном направлении взаимодействуют с цилиндрическими стержнями, заложенными в поперечные угловые канавки на дне прямых пазов рис. 8.

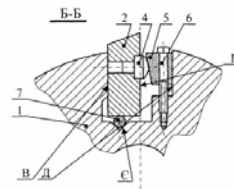


Рисунок 8 – Узел крепления режущего элемента червячной фрезы для обработки крупногабаритных зубчатых колес

Благодаря базированию режущих элементов в радиальном направлении при помощи цилиндрических стержней (типа прутков), которые заложены в продольные угловые канавки на дне прямых пазов, улучшается технологичность червячной фрезы.

Выводы.

1. Эксплуатация зубчатой передачи в течении 6 месяцев показала перспективность направления восстановления крупномодульных зубчатых колес методом формообразования изношенных зубчатых колес без наплавки

2. В дальнейшем необходимо исследовать возможность формообразования изношенных зубчатых колес с износом до 8 мм с использованием эвольвентного модифицированного профиля.

Список использованных источников: 1. Вторую жизнь крупногабаритным зубчатым колесам во многом обеспечил комплект твердосплавных фрез / О.А. Розенберг и др. // Инструмент. Світ. – 2000. – № 9. – с. 4-7. 2. Ношиков М.Л. Основные вопросы геометрической теории точечного зацепления, предназначенного для зубчатых передач большой мощности: Дис. – Дра. Техн. наук. – М., 1956. – 324 с. 3. А.В. Кривошея, В.Е. Мельник, С.И. Сташкевич. Совершенствование обобщенной структурной схемы теоретического формообразования плоских контуров цилиндрических зубчатых колес с различным профилем 478 - 484 с. 4. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сборник научных трудов. – Вып. 12 – Киев: ИСМ им. В.Н.Бакуля, НАН Украины, 2009. – 544 с. 5. Кривошея А.В., Мельник В.Е., Коринец А.В. Математические модели формообразования звеньев плоских систем зубчатых зацеплений. Сверхтвердые материалы. – Киев, 2003 г., вып. 5, 60-76. 6. Перепелица Б. А. Обращение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием. – Харьков: Выша шк., 1981. – 107с. 7. Мельник В.Е. Совершенствование методики математического описания исходных формообразующих профилей системы зубчатых зацеплений. Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004 – Вып. 66 – 247 с. 8. С.97-108. 7. О.А. Розенберг, В.Я. Рыбак, А.В. Кривошея, В.Е. Мельник, В.В. Лотоус. Анализ и пути совершенствования восстановления крупногабаритных крупномодульных зубчатых передач шаровых мельниц горно-обогатительных комбинатов 484 - 490 с. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сборник научных трудов. – Вып. 12 – Киев: ИСМ им. В.Н.Бакуля, НАН Украины, 2009. – 544 с. 8. Патент Украины на корисну модель № 34950 МПК В23F 21/00. / Червячная фреза / О.О. Розенберг, В.Я. Рыбак, О.А. Микищенко та ін. Опубл. 26.08.08, Бюл. № 16.

Поступила в редакцию 06.05.2012