

**СИНТЕЗ ПРОФИЛЕЙ ИЗНОШЕННЫХ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПРИВОДОВ ГОРНЫХ МАШИН**

Онищенко В.П., докт. техн. наук,  
Донецкий государственный технический университет

*Рассмотрены способы получения информации о действительной форме профилей изношенных зубьев зубчатых колес и ее математическом представлении при моделировании процесса зацепления.*

*The ways of obtaining of the information about the real form(shape) of structures worn bit of cog-wheels and its mathematical submission are reviewed at simulation of process of engagement.*

Одним из важнейших аспектов проблемы повышения долговечности зубчатых колес приводов горных машин является моделирование процесса зацепления изношенных, в процессе эксплуатации, зубьев. На базе результатов такого моделирования можно оценить влияние степени и характера износа зубьев на кинематические и динамические характеристики зубчатой передачи, а также спрогнозировать ее долговечность [1, 2, 4]. Для решения задачи моделирования зацепления изношенных зубьев, необходимо располагать действительной формой профиля зуба. Информация для установления такой формы может быть получена на основе результатов измерения износа зубьев после испытания колес либо в лабораторных условиях, либо после эксплуатации машины. На основе анализа известных методов измерения износа [3] и с учетом обязательного требования привязки результатов измерений износа к оси вращения зубчатого колеса было установлено, что измерение износа зубьев в лабораторных условиях наиболее целесообразно производить специальным накладным прибором, а в эксплуатационных условиях – применять метод контрастных отпечатков.

**Накладной прибор** является специализированным устройством для измерения износа зуба в фиксированных точках по длине эвольвентного профиля неревверсивных зубчатых передач [4].

Принцип работы прибора основан на двух главных положениях:

- базой прибора в момент измерения является не работающий при данном испытании профиль зуба,
- движение корпуса измерительного устройства осуществля-

ется по дуге окружности, эквидистантной окружности, проходящей через три точки эвольвентного профиля зуба.

Прибор (рисунок 1) состоит из двух частей - основания I и измерительного рычага II. Рычаг установлен в опорах на центрах (кернах) основания и может поворачиваться относительно оси  $O_K$ , положение которой выбрано таким образом, чтобы дуга окружности радиуса  $R_K$  проходила через начальную A, среднюю K (обычно полюс зацепления) и конечную C точки активной части эвольвентного профиля зуба.

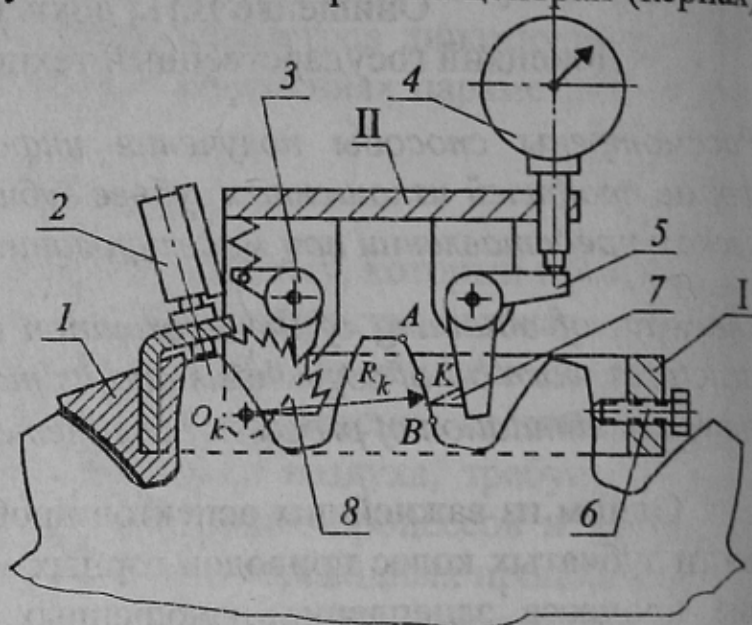


Рисунок 1 - Схема прибора для измерения износа зубьев зубчатых колес

- 1 – слепок, 2 – индикаторы базирования,
- 3- пружинный стопор, 4 – измерительный индикатор, 5 – передаточный рычаг,
- 6 – стопорные болты, 7 – щуп, 8 – храповый сектор

Основание прибора выполнено в виде рамы с шириной, равной ширине зубчатого венца, охватывающей с торцов зубчатое колесо. Левая часть рамы заформована в слепок впадины зуба, выполненный из легкоплавкого металлического сплава с малым коэффициентом усадки. На кронштейне рамы установлены два индикатора базирования (часового типа), смещенные к торцам зубчатого колеса, измерительные наконечники которых опираются на поверхность вершин зубьев. Кроме того, с основанием прибора жестко связан храповый сектор, центр которого совпадает с точкой  $O_K$ . С помощью стопорных болтов основание прибора фиксируется относительно зубчатого колеса. Расстояние между опорной поверхностью слепка и опорными поверхностями болтов 6 определяется длиной общей нормали исследуемого зубчатого колеса.

При повороте измерительного рычага вокруг оси  $O_K$  щуп, скользя по профилю зуба, воздействует посредством рычага на измерительный индикатор, который регистрирует отклонение профиля от дуги радиуса  $R_K$ . Наличие храпового механизма, образованного храповым сектором и стопором, дает возможность снимать показания измерительного индикатора при повторных измерениях в одних и тех

же точках профіля. Разность между показаниями измерительного индикатора, зарегистрированными при обмере неизношенного зуба, а затем при обмере того же самого зуба после испытания под нагрузкой, представляет собой линейный износ в направлении нормали к контактной поверхности в данной точке зуба. Следует иметь в виду, что прибор регистрирует износ в функции криволинейной координаты - длины эвольвенты, в связи с чем при переходе к другой системе координат необходим соответствующий пересчет.

Как показали результаты проведенного анализа, влияние отклонения траектории движения измерительного наконечника щупа от перпендикуляра к эвольвентному профилю на точность измерения износа сравнительно невелико. Погрешность измерений в этом случае в основном зависит от средней кривизны эвольвенты профиля зуба, определяемой числом зубьев колеса  $z$ , и может быть найдена в функции среднеквадратичного отклонения погрешности базирования  $\sigma$  (0.002-0.003 мм) и максимального значения износа  $I_{\max}$  (0.6-1.0 мм)

по формуле:  $\Delta I = (1.3 \dots 1.5) \left( 3\sigma + \frac{30}{z^3} I_{\max} \right)$ . Среднее значение погрешности измерения износа не превышает 0.02 мм.

При применении метода контрастных слепков, работа по сбору информации об износе зубьев в эксплуатационных условиях должна быть организована следующим образом [4].

Угольные комбайны после отработки определенного нормами эксплуатации межремонтного периода либо в случае выхода комбайна из строя поступают для капитального ремонта на специализированный машиностроительный завод. На заводе после частичной разборки редуктора режущей части комбайна производится изготовление слепков впадины зуба, а также по заводскому номеру комбайна и его паспорту устанавливается место эксплуатации и определяется наработка.

Для получения слепков на чистую поверхность впадины зуба в средней части зубчатого венца устанавливается специальная съемная разборная форма, куда заливается гипсовый раствор. После затвердевания гипса и разборки формы получался плоский негативный слепок впадины зуба толщиной 6÷8 мм. В обязательном порядке слепок маркируется специальным шифром с целью его идентификации. Для надежности измерений изготавливаются 2÷3 одинаковых слепка. Полученные слепки помещаются в плоскую ячеистую кассету (размер квадратной ячейки должен быть несколько больше максимального

размера негативного отпечатка), и после нанесения на профильную поверхность отпечатка минерального масла каждая ячейка заливается раствором гипса.

После затвердевания гипса кассета устанавливается на плоскошлифовальный станок и производится шлифование гипсовой поверхности до получения одинаковой шероховатости. Затем негативный и позитивный слепки разделяются и на полученный позитивный слепок зуба переносился индентификационный номер.

Такая технология - шлифование "с подпором" - обеспечивает высокое качество кромки позитивного отпечатка профиля зуба, что оказывает положительное влияние на повышение точности измерения износа при просвечивании отпечатка в проходящем свете. Общий вид негативного и позитивного отпечатков приведен на рисунке 2.

Для каждого типоразмера зуба на специальном планшете из полистирола вычерчивается в масштабе 20:1 эвольвентный профиль зуба с нанесенной масштабной сеткой с постоянным шагом по абсциссе.

Позитивный слепок устанавливался на предметный стол проектора, настроенного на 20-ти кратное увеличение в режиме проходящего света. Увеличенное изображение изношенного профиля проецируется на пластиковый планшет и совмещается с теоретическим профилем.

В связи с тем, что зачастую отсутствует возможность получения нулевого (до начала эксплуатации) отпечатка, базирование изображения изношенного профиля осуществляется на основе выполнения двух условий: эквидистантность дуг окружностей впадин проецируемого и теоретического профилей, расположенных слева и справа от исследуемого зуба, а также симметричность и подобие переходных кривых относительно оси симметрии зуба.

После базирования изображения производится измерение ординат профиля изношенного зуба. На основании многочисленных контрольных измерений установлено, что погрешность метода в диапазоне модулей зацепления  $8 \div 12$  мм составляет 0.04-0.05 мм.

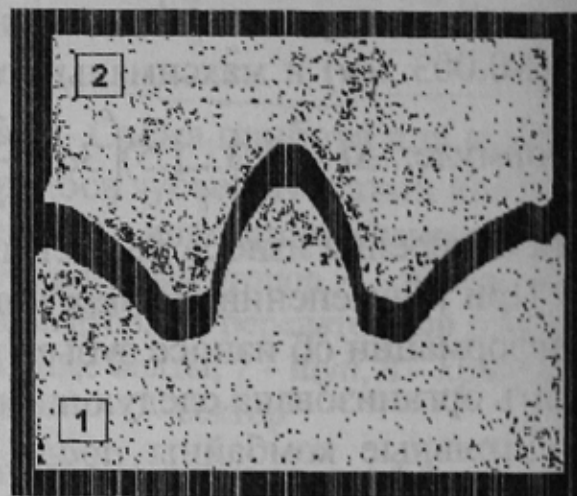


Рисунок 2 - Отпечатки изношенного зуба  
1 - позитивный, 2 - негативный

Для математического описания профильной кривой профиля изношенного зуба наиболее приемлемой является ортогональная система координат, осью абсцисс которой является ось симметрии зуба, а ось ординат проходит через начальную точку  $O_{ev}$  эвольвенты исходного (неизношенного) профиля -  $XOY$  (рисунок 3). Такая система координат обеспечивает возможность сравнения характеристик зацепления профилей изношенных зубьев с их значениями для неизношенных (эвольвентных) профилей. Профиль зуба описывается в пределах половины углового шага зубьев в виде функции  $Y = Y(X)$ .

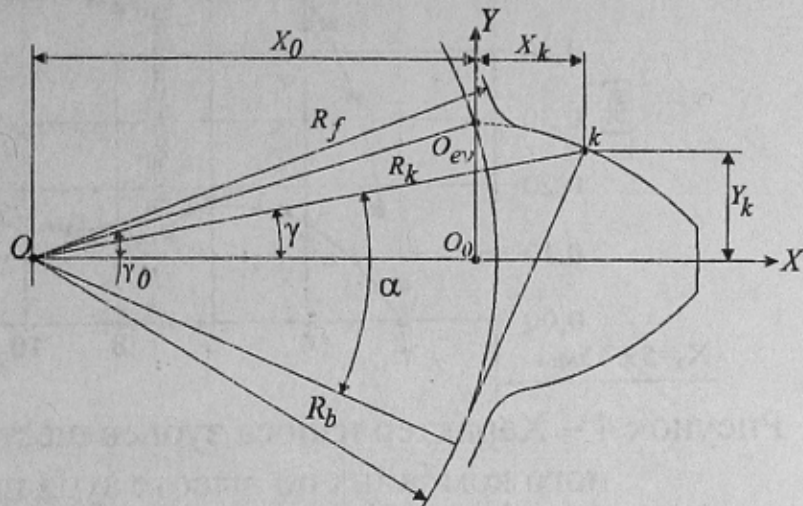


Рисунок 3 - Система координат профиля

Информация о координатах профиля представляет собой множество из  $N$  значений результатов измерений абсцисс  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ , соответствующих множеству ординат  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ . Для того, чтобы иметь возможность вычислять функцию  $Y = Y(X)$  при любом значении аргумента и сгладить возможные отклонения, вызванные погрешностями измерения в процессе эксперимента, необходимо найти соответствующую аппроксимирующую функцию.

Анализ показал, что оптимальным видом базисной функции следует считать степенной полином с нормированным базисом. За минимальное значение степени полинома  $M_{min}$  следует принимать степень, при которой среднеквадратичное отклонение погрешности аппроксимации не превышает погрешность измерения. В качестве максимальной степени полинома  $M_{max}$  можно принимать такую степень, при которой 80-90% точек имеют погрешность аппроксимации меньшую, чем погрешность измерения. Оптимальной степенью полинома следует считать среднее этих двух значений с округлением до целого в меньшую сторону. Обычно этим условиям удовлетворяет степенной полином 4-8 степени [5].

На рисунке 4, в качестве примера, представлены результаты измерений и аппроксимирующие функции износа зуба шестерни привода режущей части угольного комбайна ( $m=8$  мм,  $Z_1=16$ ,  $Z_2=51$ ) с

разной наработкой (количеством угля, добытого за период эксплуатации), которые дают представление о характере изменения износа по высоте зуба.

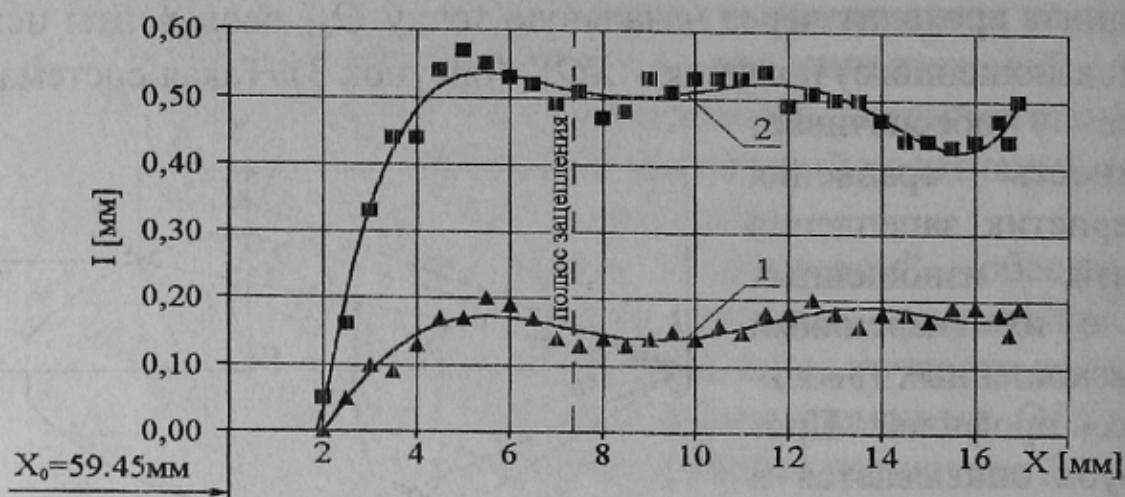


Рисунок 4 – Характер износа зубьев шестерни – I - привода угольного комбайна по высоте зуба после наработки:

1 – 180 млн т, 2 – 457 млн т

Большое количество исследований, проведенных выполненными на основании предложенных технологий измерения износа зубьев зубчатых колес горных машин [4], позволяют утверждать, что подобные технологии являются пригодными для разработки моделей исследования зацепления изношенных зубьев, что позволяет обосновать рекомендации по повышению долговечности зубчатых передач горно-шахтного оборудования.

Список источников.

1. Онищенко В.П. Геометрична модель зачеплення зубчастої передачі із зношеними зубцями // Міжвідомчий науково-технічний збірник "Прикладна геометрія та інженерна графіка", випуск 68. Київський нац. університет будівництва і архітектури. Київ, - 2001. – С. 57-62.
2. Онищенко В.П., Войнаровски Юзеф Кинетика динамической нагрузки в процессе эксплуатации зубчатой передачи. «Доповіді Національної Академії Наук України», №4, 1998. С. 81-88.
3. Хрущев М.М. Лабораторные методы испытания на изнашивание материалов зубчатых колес. М.: «Машиностроение», 1966. – 152 с.
4. Валентин Онищенко Прогнозирование долговечности тяжело нагруженных зубчатых передач на основе моделирования износа зубьев. – Gliwice (Polska): Politechnika Śląska Z. 131 (1410) Mechanika, 1999. – 199 с.
5. Онищенко В.П. Математическое описание профилей зубьев при моделировании их изнашивания // Прогрессивные технологии и системы машиностроения, Международный сборник научных трудов. Выпуск 10. – Донецк: Донецкий государственный технический университет. – 2000. – С. 188-197.