

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ МЕТОД ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ПИТТИНГА ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ

*Белорусско-Российский университет
Могилёв, Беларусь*

Явление питтинга волнует инженерный мир около ста лет. Проблема нерешена до сих пор, а накопленный по ней экспериментальный и теоретический материал оказался с изъяном – формула Герца хорошо отражает явление питтинга, но применяется некорректно – недооценивают, что эксплуатационно-нормальные износы, включая и казалось бы, идеальные условия лабораторных испытаний, приводят к существенному (в 2-5 и более раз) возрастанию кривизн в околополусных зонах.

Эксплуатационно-нормальные износы, это те искажения боковых поверхностей зубьев, которые в литературных источниках принято называть «ничтожно малыми износами», т.е. при которых в наиболее изношенных точках профилей (середины ножек) зубья оказываются утонёнными всего на 0,005-0,01 первоначальной своей толщины (т.е. при модулях 10 мм, речь идёт о максимальных износах порядка 0,07...0,15 мм).

Факт существенного снижения приведенных кривизн поверхностей зубьев в околополусных зонах при незаметных на глаз износах уже был замечен - [1], [2], [3], [4], [5], [6] и др. Явление это парадоксально, но публично не оспаривается.

Первое практическое использование явления повышения контактных напряжений в процессе эксплуатации зубчатых передач изложено в [6]. В середине 60-х годов ушедшего столетия в комбинате «Луганскуголь» (46 шахт) было установлено: после капитального ремонта угольные комбайны «Кировец» не отработывают свой межремонтный цикл - вместо 7,5 отказы наступают через 2-4 месяца. Главная причина - поломка зубчатой пары «К-4-0002» - «К-4-0053» (изготовитель - Горловский машзавод; $Z_1=11$, $Z_2=29$, $m=9$ мм; сталь 18ХГТ, цементация на 1,5 мм, закалка).

Обследования (на Кадиевском рудоремонтном заводе) радиусов кривизны в околополусных зонах подвергшихся питтингу зубьев на колёсах «К-4-0053» специально созданным радиусомером [1] позволили установить: математическое ожидание критических значений радиусов кривизны в околополусной зоне (при которых имел место прогрессирующий питтинг) - 20,5 мм, что в 2,7 раза было меньшим доэксплуатационного (56 мм) его значения; признак «критическое значение радиуса кривизны» распределялся по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением $S = 3,2$ мм. Было принято решение: те зубчатые колёса пар «К-4-0002» - «К-4-0053», которые выглядели как только что приработавшиеся, но у которых в околополусных зонах колёс «К-4-0053» радиусы кривизны оказывались менее 30 мм (15–20–25–30), ставить на зубошлифовальный станок и снимать поверхностный слой на глубину 0,2-0,4 мм (глубина отсчитывалась от точек профилей, соответствующих полюсу зацепления).

Решение оказалось правильным - главная причина преждевременного отказа вышедших из капитального ремонта комбайнов «Кировец» была ликвидирована.

В настоящее время нами проводятся исследования двух объектов по расширению первого опыта эксплуатационного метода повышения долговечности зубчатых передач.

На Могилёвском ОАО «Химволокно» эксплуатируются компрессоры «DEMAG» VK-25С. Прогрессирующий питтинг активных профилей зубьев мультипликаторов в

феврале 2004 г. явился причиной вынужденной остановки двух из них. Расходы по восстановлению работоспособности одного компрессора «DEMAG» VK-25C, вышедшего по причине отказа мультипликатора, оцениваются несколькими десятками тысяч долларов США. Краткие сведения о мультипликаторе «DEMAG» VK-25C: зацепление косозубое, модуль $m=4,5$ мм; угол наклона зубьев 21° ; ширина зубчатого венца ведущего колеса 150 мм, ведомых 148 мм. Числа зубьев: у ведущего зубчатого колеса 285, у ведомых 46 и 30. Поверхности зубьев на глубину 0,8-1,2 мм имеют твердости 50-55 HRC. Первоначальное значение радиуса кривизны в околополюсной зоне рабочего профиля зуба ведущего зубчатого колеса (225 ± 15) мм.

Установленные методом непосредственных обмеров действительные значения радиусов кривизны в опасной по питтингу зоне у большого зубчатого колеса представлены графиками на рис. 1.

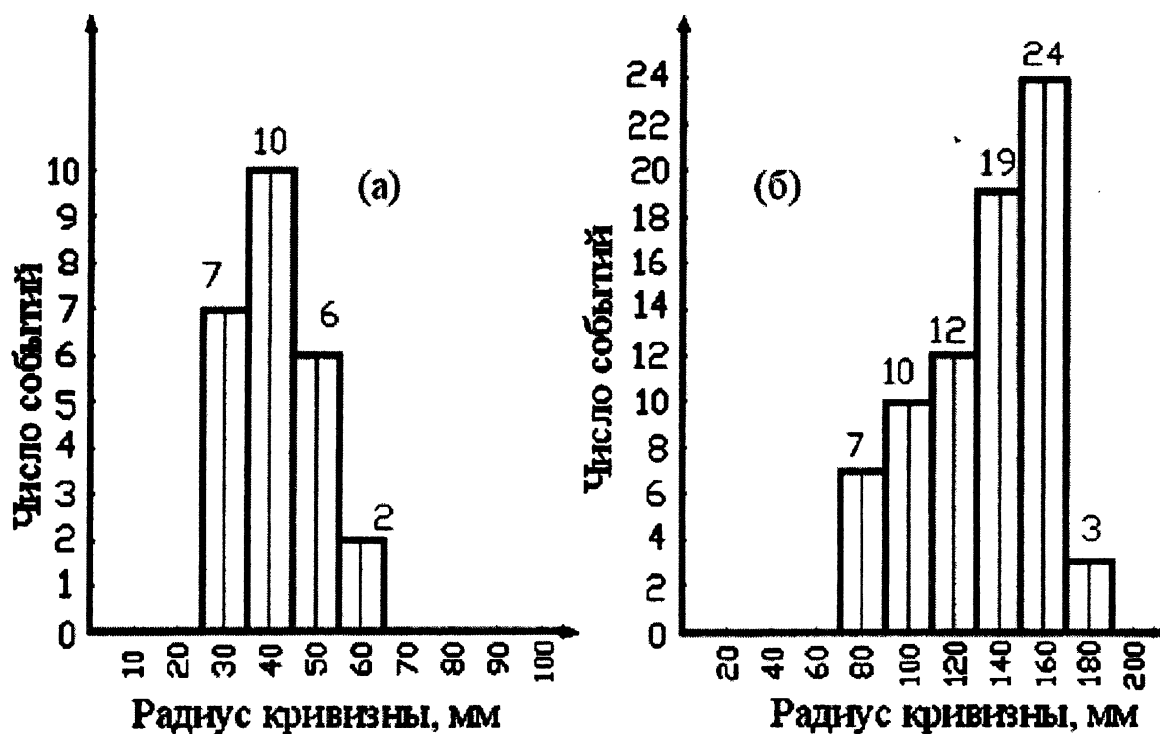


Рис. 1. Радиусы кривизны в околополюсных зонах активных профилей зубьев ведущего зубчатого колеса ($Z=285$) мультипликатора «DEMAG» VK-25C.

а - замеры на рабочих поверхностях зубьев, в местах отсутствия оспин, в непосредственной от них близости (2-5 мм); б – замеры на обратных, практически не работавших, боковых поверхностях зубьев.

Математическое ожидание критического радиуса кривизны в опасной по питтингу зоне оказалось равным 40,8 мм. Т.е. радиусы кривизны профилей на участках, подвергшихся питтингу, оказались уменьшенными по сравнению с начальным значением в 5,1-5,9 раза. Были уменьшенными в два раза и радиусы кривизны на подверженных питтингу участках у ведомого зубчатого колеса с числом зубьев 36.

Эксплуатационникам корректировать искажившиеся профили зубьев крупногабаритных зубчатых колёс удобно не установкой на зубошлифовальные станки, а ручным механизированным инструментом с базировкой по зубчатым венцам, позволяющий с целью корректировки искажившихся профилей сошлифовывать появляющиеся в околополюсных зонах выступы.

В рамках метода рекомендуем использовать следующую терминологию.

Отклонение активной части профиля зуба от начально-теоретической его формы (сокращённо – износ профиля) - это непрерывная совокупность нормальных к эвольвенте отрезков, расположенных между действительным и начально-теоретическим (эвольвентой) профилями.

Эксплуатационно-нормальный износ - это происходящий во времени допиттинговый процесс отклонения активной части профиля зуба от начально-теоретической его формы в закрытой хорошо смазываемой зубчатой передаче, работающей с соблюдением технических условий на правильную её эксплуатацию.

Явление мелкого питтингообразования – это наблюдаемое в начале эксплуатации зубчатых колёс и быстро проходящее явление разрушения хребтообразных выступов на поверхностях зубьев; наблюдается на зубьях, не подвергавшимся при изготовлении финишным обработкам (на их поверхностях невооружённым глазом просматриваются следы от кромок режущего инструмента).

Явление кромоного питтингообразования - это явление разрушения поверхностных слоёв в окрестностях точек профилей зубьев, сопрягающихся в начале и конце зацепления; приводит к небольшому понижению коэффициентов перекрытия зацепления; для прямозубых передач не опасно, если коэффициент перекрытия, подсчитанный для математической модели, превышает значение 1,15; для косозубых передач не опасен и при меньших торцовых их значениях.

Явление прогрессирующего питтинга (сокращённо – питтинг) - это наблюдаемое в различные моменты эксплуатации зубчатых колёс явление разрушения поверхностных слоёв зубьев в окрестностях точек профилей, сопрягающихся в полюсе зацепления и приводящее к отказу передачи или к существенному искажению профилей, порождающему недопустимо большую динамику в системе.

Отклонение активной части профиля зуба от начально-теоретической его формы (сокращённо – износ профиля) - это непрерывная совокупность нормальных к эвольвенте отрезков, расположенных между действительным и начально-теоретическим (эвольвентой) профилями.

Эксплуатационно-нормальный износ - это происходящий во времени допиттинговый процесс отклонения активной части профиля зуба от начально-теоретической его формы в закрытой хорошо смазываемой зубчатой передаче, работающей с соблюдением технических условий на правильную её эксплуатацию.

Полюсная точка профиля – это точка пересечения профиля с начальной окружностью зубчатого колеса (которому профиль принадлежит).

Полюсная окрестность профиля зуба – это часть профиля зуба, длиной 0,3 модуля зацепления, серединой которого является полюсная точка.

Хорда полюсной окрестности профиля зуба (δ ; сокращённо - хорда) – это длина отрезка прямой, соединяющего начало и конец полюсной окрестности профиля зуба.

Стрелка полюсной окрестности профиля зуба (f ; сокращённо - стрелка) – это наибольшая длина отрезка из непрерывной их совокупности, проводимых перпендикулярно к хорде до пересечения со стягиваемым ею участком профиля зуба.

Радиус кривизны профиля зуба в околополюсной зоне (ρ) – это радиус окружности, у которой при хорде длиной δ стрелка оказывается равной f , где δ и f - хорда и стрелка полюсной окрестности профиля зуба.

k -тое случайное значение критического радиуса кривизны j -того зубчатого колеса с i -той характеристикой (Θ_{ijk}) - это соответствующее одному (k -тому) обследованному участку значение радиуса кривизны в околополюсной зоне, при котором наблюден питтинг на поверхностях зубьев j -того зубчатого колеса с i -той характеристикой.

Характеристика зубчатого колеса - это комплекс, состоящий из описания места установки зубчатого колеса, с указанием всех значимых для него признаков - модуля зацепления, числа зубьев, коэффициентов смещения, материалов, химико-термических обработок этого и сопряжённого с ним зубчатых колёс и т.д.

Критический радиус кривизны j -того зубчатого колеса с i -той характеристикой (Θ_{ij}) - это среднеарифметическое значение критических радиусов кривизны, измеренных на j -том зубчатом колесе с i -той его характеристикой.

Критический радиус кривизны зубчатого колеса с i -той характеристикой (Θ_i) - это математическое ожидание значения радиуса кривизны, при котором на зубьях зубчатого колеса с i -той характеристикой появляется питтинг.

Текущий радиус кривизны профиля зуба в околополюсной зоне j -того зубчатого колеса с i -той характеристикой ($\bar{\rho}_{ij}$); сокращённо - текущий радиус кривизны ($\bar{\rho}$) - это среднеарифметическое его значение по трём-пяти замерам на различных, равномерно распределённых по окружности зубьях j -того зубчатого колеса с i -той характеристикой.

Допускаемое значение радиуса кривизны профиля зуба в околополюсной зоне для зубчатого колеса с i -той характеристикой ($[\rho_i]$); сокращённо - допускаемый радиус кривизны ($[\rho]$) - это величина, превышение которой текущим радиусом кривизны создаёт высокую вероятность появления на зубьях зубчатой пары с i -той характеристикой питтинга в ближайший месяц-два предстоящей её эксплуатации.

Зубчатая пара с накопленной базой данных по питтингу - это зубчатая пара, для которой допускаемое значение радиуса кривизны получено в результате эксплуатационно-статистических обследований.

Зубчатая пара с ненакопленной базой данных по питтингу - это пара, для которой эксплуатационно-статистические обследования не проводились, а родственные пары с накопленной базой данных по питтингу не найдены.

Родственные зубчатые пары - это пары, имеющие одинаковые комплексы их характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 225479 СССР, Кл. 42в, 26/02. Радиусомер /Р.М.Игнатищев, А.Ф.Побицкий. - Опул. 29.08.1968, Бюл. N 27.;
2. Игнатищев Р.М. Исследование контактной прочности эвольвентных цилиндрических передач: Дис... канд. техн. наук: 161 (машиноведение и детали машин).- Защищена 26.11.68; - М.: ВЗПИ, 1967.- Т.1 (текст, библиогр.), 176с.; Т.2 (ил.), 181 с.;
3. Егоров В.И., Ким С.Н., Мальшев Г.Д. Исследование фактической геометрии эвольвентных прямозубых передач.- С.49-55 в сб. «Прочность и надёжность механического привода/ Под ред. В.Н.Кудрявцева и Ю.А.Державца.- Л.: Машиностроение, 1977.- 240с.»;
4. Патент на изобретение 2072059 Российской Федерации, МКИ F 16 Н 1/00. Способ повышения долговечности зубчатых колёс/ Р.М.Игнатищев.- Опул. 20.01.97, Бюл. N 2.;
5. Машин Ю.В. Опыт промышленного использования эксплуатационного метода предупреждения питтинга в эвольвентных зубчатых передачах. /Ю.В. Машин, О.Н. Кутас; Могилев. Белорусско-российский ун-г. -Могилев, 2003.-9с.: ил. -Библиогр.: 7 назв. Деп. в БелИСА 6.10.2003, №Д 200378;
6. Игнатищев Р.М., Захаров Е.П., Трубицын Д.А. Увеличение надёжности и долговечности зубчатых передач// Горные машины и автоматика. - М.: Недра, 1967.- Вып. 9 (90). - С.73-75.