

11. Родин П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием. – К: Выща шк. 1981. – 152 с.
12. Методика задания и математического описания исходных формообразующих профилей / А. В. Кривошея, О. У. Петасюк, В. Е. Мельник, Коринец А. В. // Сверхтвердые матер. – 2004. – вып. 1. – с. 52-65.

Поступила 22.05.09

УДК 621.913:621.833

О. А. Розенберг¹, д-р. техн. наук, **В. Я. Рыбак¹**, **А. В. Кривошея¹**, кандидаты технических наук, **В. Е. Мельник¹**, **В. В. Лотоус²**

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

²Полтавский горнообогатительный комбинат, г. Комсомольск на Днестре, Украина

АНАЛИЗ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ

Test results and ways of improving of highly loaded mill gear drives restoration methods are given in the article.

В горно-перерабатывающей промышленности, на мельницах горно-обогатительных комбинатов Украины в приводах механизмов используют зубчатые колеса диаметром 4–12 м, массой 12–16 т. Как правило, колеса сборные и состоят из двух-четырех секторов. Большинство колес косозубые с углом наклона зубьев 5,25°, модуле – 20 мм и шириной зубчатого венца 800 мм. Зубчатые колеса (венцы) закрепляют механически на барабанах мельниц. В процессе эксплуатации венцов в течение 8–12 лет износ зубьев по профилю составляет 7-8 мм. По истечении этого срока колёса разрезают на части и отправляют на переплавку. Учитывая расходы на разрезание, переплавку и механическую обработку этих крупногабаритных деталей, целесообразнее восстанавливать зубья колес. Для восстановления зубьев крупномодульных крупногабаритных колес применяют следующие методы:

- наплавку изношенных поверхностей зубьев металлом и механическую обработку до получения исходных размеров зубчатого венца;
- специальную форму круговой впадины зубьев колеса без применения наплавки, с установлением промежуточных тел, т. е. переходят на зубчатороликовую передачу;
- вместо эвольвентного профиля зубьев с линейным контактом переходят на выпукловогнутый с точечным контактом.

1. Восстановление профиля зубьев венца с применением наплавки

Работы по восстановлению зубчатых венцов мельниц с применением наплавки были начаты в 1997 году по инициативе Ингулецкого Горно-обогатительного комбината (г. Кривой Рог) при участии следующих организаций. ООО «Укркомплект» (г. Кривой Рог) разработал технологию восстановления, осуществлял наплавку изношенных поверхностей зубьев колеса и организацию их механической обработки, Институт электросварки им. Е.О. Патона – электроды для наплавки, Институт сверхтвердых материалов – материал и конструкцию специального твердосплавного режущего инструмента для обработки наплавленных поверх-

ностей зубчатых венцов, в том числе червячными фрезами [1]. Основные технологические операции по восстановлению детали приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технологические операции при восстановлении крупногабаритных зубчатых колес с применением наплавки

Номер операции	Операция	Оборудование	Основной инструмент
1	Наплавка изношенных поверхностей зубьев колес	Специальный стенд	Электроды для ручной наплавки
2	Сборка секторов колеса и установка на зубофрезерном столе	Зубофрезерный станок	Измерительные индикаторы часового типа
3	Зачистка наплавленных поверхностей от флюса		Шлифовальная машинка
4	Фрезерование наплавленного слоя по наружному диаметру		Цилиндрическая твердосплавная фреза
5	Черновое фрезерование впадин зубьев		Комплект дисковых твердосплавных фрез
6	Получистовое фрезерование		Специальная сборная червячная фреза [2]
7	Чистовое зубофрезерование		

По приведенной технологии были восстановлены и установлены на мельницах 12 зубчатых колес диаметром 5,4 м. Шестерни изготавливали новые или использовали изношенные большего размера.

Затраты на восстановление привода оказались в несколько раз меньше, чем на изготовление новой зубчатой пары. Однако и ресурс привода оказался существенно ниже (в 2 раза) по сравнению с новым, предположительно, из-за разной твердости наплавленной и исходной поверхностей зубьев и поводок венца колеса, вызванных термическими напряжениями при наплавке [3]. Поэтому встал вопрос об необходимости разработки методов восстановления привода, исключая операции наплавки.

2. Восстановление привода мельницы путем перехода на зубчато-роликовую передачу (ЗРП).

В 70–80-х годах XX в. появились сообщения о разработке в России и Казахстане приводов мельниц с косозубыми колесами с зубчато-роликовой передачей [4–6] и их преимуществами перед эвольвентными вследствие замены трения скольжения трением качения. Приводились также данные об их испытаниях и высокой эффективности [7]. Принцип этой передачи показан на рис. 1. Впадины косозубой шестерни 1 и косозубого колеса 2 выполнены по кривой в нормальном сечении, близкой к окружности; во впадинах зубчатого колеса размещены подвижно закрепленные в сепараторах ролики 3. Ролики во время вращения колес совершают (из-за косозубости колес) колебательное и вращательное движение, а нагрузка от шестерни 1 к колесу 2 передается посредством роликов 3.

Для ремонта зубчатых колес ЗРП подходит идеально, так как при этом сохраняется межосевое расстояние, не требуется наплавка и, следовательно, отсутствуют вызывающие ее деформации. Большое количество патентов по улучшению надежности подвижного крепления роликов свидетельствует о слабости этого узла. При натурных испытаниях мельницы с ЗРП на Ингулецком горно-обогатительном комбинате узлы крепления роликов интенсивно изнашивались и попытки улучшить их надежность, не дали положительных результатов. Зубчато-роликовые передачи разрушались через несколько десятков часов работы.

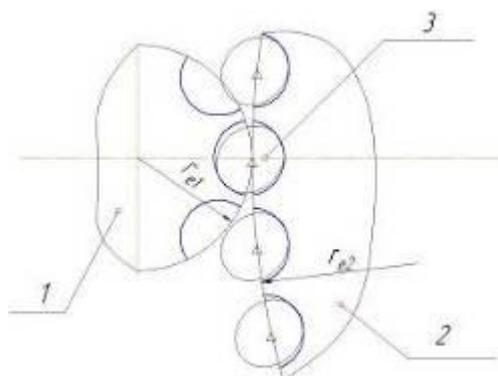


Рис. 1. Схема зубчато-роликовой передачи: r_{e1} , r_{e2} – наружный диаметр соответственно шестерни и колеса; $r_{e1} + r_{e2} < A$, (A – межосевое расстояние)

3. Восстановление привода мельницы путем перехода с эвольвентного профиля зубьев на выпукло-вогнутый.

В 50-е годы XX в. была разработана зубчатая передача для больших мощностей, названная зацеплением Новикова [8]. В этой передаче у одного из зубчатых колес пары, как правило, у шестерни, зубья с выпуклым профилем, а у другого – с вогнутым (рис. 2).

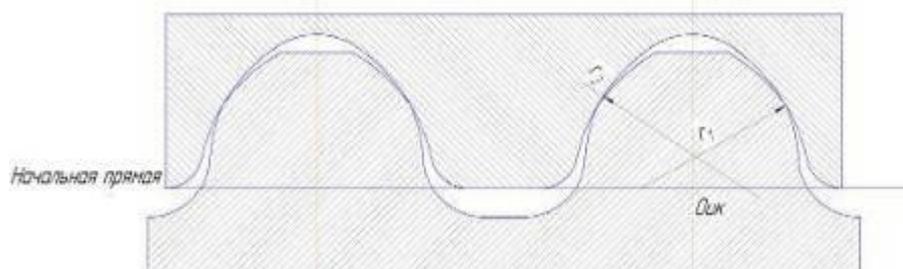


Рис. 2. Схема передачи с зацеплением Новикова

В неприработанной передаче Новикова зубья касаются только в точке, что возможно в случае, когда радиус кривизны вогнутого профиля r_2 больше, чем выпуклого r_1 . Непрерывность контакта зубьев с несопряженными профилями в торцовом сечении возможна только при косозубом зацеплении. При этом зубья касаются в точке, перемещающейся вдоль линии параллельно оси начальной окружности. Высота зубьев в передачах с выпукло-вогнутым профилем при такой же мощности почти в 2 раза меньше, чем с эвольвентным.

Идея восстановления изношенных зубчатых колес привода мельницы путем среза части высоты зуба (по наружному диаметру колеса) и придания соответствующей формы профилю в оставшейся части зубьев колес напрашивалась, но сдерживалась существенными различиями конструктивных и технологических условий, рекомендуемых для передач Новикова и реальной мельницы (табл. 2): смазки, передаточному числу, углу наклона зубьев, модулю.

Таблица 2. Условия работы передачи Новикова

№ п/п	Факторы	Значения и условия	
		Рекомендуемые	В мельнице
1	Передаточное число	До 4,5	10
2	Смазка	Жидкая закрытая передача	Консистентная открытая передача
3	Угол наклона зубьев, град	8 – 22	5,25
4	Модуль нормальный, мм	1,6 – 16	20
5	Термообработка колеса	Без термообработки	Без термообработки

Область рационального применения передач Новикова – низкоскоростные малодеформативные цилиндрические передачи с широковенцовыми, непрямозубыми и неупрочненными колесами [9]. К таким передачам относятся также приводы мельниц горнообогатительных комбинатов. Этот вид зацепления опробовали в реальных условиях впервые в мире.

В Институте сверхтвердых материалов НАН Украины по заказу Ингулецкого ГОКа был осуществлен геометрический расчет передачи, разработаны чертежи и изготовлены специальные оригинальные червячные фрезы для выпуклого и вогнутого профилей зубчатых колес [10]. При участии ООО «Укркомплект» из изношенного колеса с эвольвентным профилем изготовлены зубчатое колесо с вогнутым профилем зуба и новая шестерня с выпуклым профилем зуба.

Привод был собран и установлен на мельнице (фундамент № 53) Ингулецкого горнообогатительного комбината 03.07.08 и с 09.07.08 до 12.04.09 работал с полной мощностью.

За время работы привода наблюдали этап приработки – две недели – до тех пор, пока пятно контакта зубчатой пары распространилось по всей длине зубьев. Работа сопровождалась повышенным шумом до 105 Дб. В течение последующих шести месяцев мельница работала нормально, не отличаясь от других ни по производительности, ни по шуму. Пятно контакта распространялось на всю боковую поверхность контактирующих сторон зубьев. Толщина зуба на шестерни уменьшилась за это время на 2 мм (рис. 3), колеса – на 1 мм.

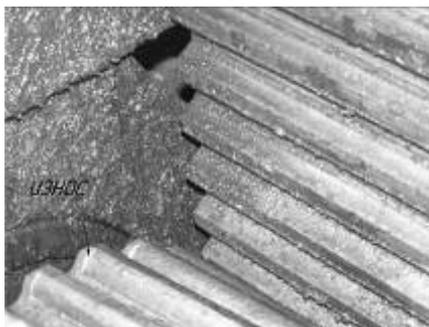


Рис. 3. Фото износа шестерни и колеса

После этого повысился шум передачи, возникли вибрации и появилась трещина в корпусе подшипника шестерни. После замены подшипника износ катастрофически увеличился. За последующие две недели толщина зуба шестерни уменьшилась еще на 2 мм, колеса – на 1 мм (рис. 4). Из-за вибрации и шума испытания прекратили.

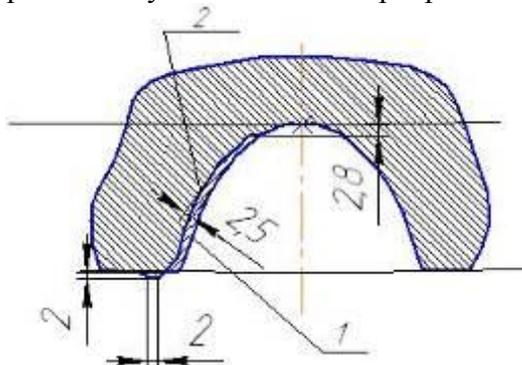


Рис. 4. Схемы контуров зуба зубчатого венца:
1 – исходного, 2 – после семи месяцев работы

В результате осмотра изношенной поверхности выявили наличие на поверхности контактирующих сторон зубьев рисок глубиной 0,1–0,15 мм с интервалом 2–15 мм, направленных поперек длины зубьев, и вырывы частиц металла глубиной до 0,3 мм и площадью до 40

мм². Этот вид износа характерен для поверхности зубьев, работающих в условиях чрезвычайно высоких давлений и температур, когда смазка выжимается полностью и на определенных участках возникает схватывание контактирующих поверхностей сопряженных деталей (рис. 5) [11].

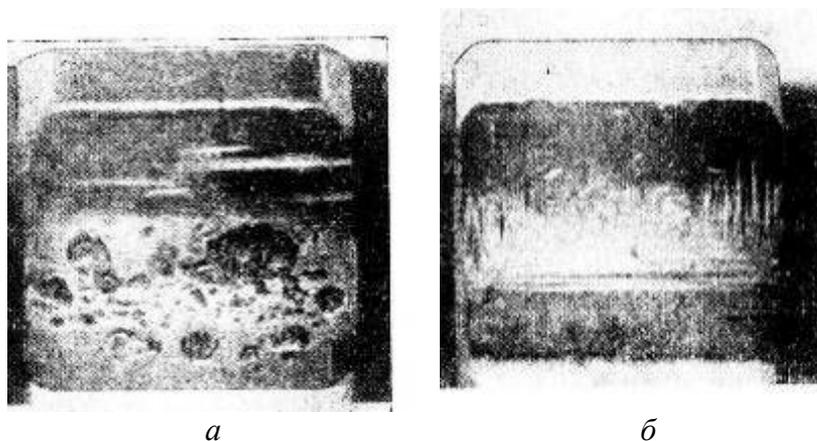


Рис. 5. Фотографии разрушения рабочих поверхностей в результате усталостного выкрашивания (а) и заедания (б)

Схватывание может происходить также при работе на низкой скорости в момент пуска передачи. Даже кратковременное отсутствие смазки вызывает схватывание и разрушение поверхности. Для предотвращения схватывания рекомендуются следующие действия:

1. Использовать смазки с противозадирными присадками: органические соединения серы, хлора и фосфора. В условиях высоких местных давлений, развивающихся в результате сил трения, продукты реакции поверхностно-активных присадок и материала рабочих поверхностей образуют твердые пленки, которые имеют более низкое сопротивление сдвигу, чем металл. Эти пленки, разделяя чистые металлические поверхности, препятствуют возникновению схватывания. Выбор смазки и способ её подачи применительно к условиям работы на мельнице требуют проработки.

2. Модифицировать профиль зубьев зубчатых колес, чтобы не было кромочного контакта зубьев (см. рис. 4). Наличие контакта на кромках и в месте теоретического контакта вызывает увеличение коэффициента перекрытия с 1,1 до 1,5, что не рекомендуется для такого вида передач из-за вибрации и, как следствие, выдавливание масла и схватывание.

3. Провести высотную коррекцию зубьев (на 2–5 мм) с целью уменьшить давление на контактирующие поверхности и снизить распорное усилие между зубчатыми колесами.

Для совершенствования технологии ремонта крупногабаритных цилиндрических зубчатых передач специалисты Института сверхтвердых материалов НАН Украины предложили исследовать возможные варианты формообразования зубчатой передачи из изношенной зубчатой пары шаровой мельницы с учетом допустимого изменения межосевого расстояния (до 20 мм). Для этого необходимо было разработать обобщенную унифицированную программно-реализуемую математическую модель теоретического формообразования цилиндрических зубчатых передач с произвольным профилем, в том числе с эвольвентным, профилем Новикова, циклоидальным, синусоидальным, эволютным и другими как с линейным, так и с точечным контактом. Такая математическая модель была разработана на основе теории отображения аффинного пространства [12].

Анализ износа, а также математической модели формообразования цилиндрических зубчатых передач позволит определить рациональную геометрию цилиндрической зубчатой передачи, которую можно изготовить из изношенной зубчатой передачи шаровой мельницы без наплавки их зубчатых венцов.

Результаты работы показали, что форма зуба многозубого колеса (268), нарезанного червячной фрезой, не зависит от смещения фрезы при его зубофрезеровании. При использо-

вании разработанной математической модели формообразования зубчатых передач с произвольным профилем это позволяет усовершенствовать (повысить эксплуатационные свойства восстановленной передачи) геометрию зацепления передачи Новикова.

По нашему мнению, прежде всего необходимо усовершенствовать апробированное в эксплуатации эвольвентное зацепление, применяя стандартные червячные фрезы, корректируя только смещение фрезы при его зубонарезании, и уточнить новую геометрию зубчатых венцов шестерни и колеса при их восстановлении.

Литература

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. Патент України № 40915 МПК 7B23F21/16. Черв'ячна фреза О. О. Розенберг, В. Я. Рибак, О. А. Микитенко та ін.
3. Технологические предпосылки применения зубчато-роликовых передач в приводах мельниц горно-обогатительных комбинатов / Ю.О. Маховский, О.А. Розенберг и др. // Вісн. ЖІТІ. – 2001. – С. 216 – 222.
4. Беляев А. Е., Зимин А. П. Плоские передачи зацеплением с роликовыми промежуточными элементами. Расчет геометрии. – Томск, 1977.
5. Ерихов М.Л., Костенко С.Г. Исследование рабочего зацепления в зубчато-роликовых передачах, составленных из цилиндрических колес с арочными зубьями. – Курган, 1986. – 18 с.
6. Беляев А.Е. К вопросу об оценке жесткости при исследовании и проектировании роликовых передач // Проблемы совершенствования передач зацеплением: Сб. докл. науч. семинара учеб.-науч. центра зубчатых передач и редукторостроения. – Ижевск Москва.: – 2000. – С. 49–53.
7. Старухин С. В., Чернов Ю. А. Опыт применения зубчато-роликовых передач в металлургии Казахстана // Экспресс-информация. Сер. 10.04. – вып. 70 (704). – Алма-Ата: Изд-во Каз НИИНТИ, 1979. – 26 с.
8. Новиков М. Л. Основне вопросы геометрической теории точечного зацепления, предназначенного для зубчатых передач большой мощности: Дис... д-ра. техн. наук. – М., 1956. – 324 с.
9. Журавлев Г. А. Ошибочность физических основ зацепления Новикова как причина ограниченности его применения // Редукторы и приводы. – 2007. – № 2(04). – С. 36–41.
10. Патент України на корисну модель № 34950 МПК В23F 21/00. / Черв'ячна фреза / О. О. Розенберг, В. Я. Рибак, О. А. Микитенко та ін. Опубл. 26.08.08, Бюл. № 16.
11. Кудрявцев В. Н., Державец Ю. А., Глухарев Е. С. Конструкции и расчет зубчатых редукторов: Справоч. пособие. – Л.: Машиностроение, 1971. – 328 с.
12. Розенберг О. А., Кривошея А. В., Мельник В. Е. Задание, математическое описание и формообразование модифицированных контуров систем зубчатых зацеплений. Машиностроение и техносфера XXI века: В 4 т. // Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 13-18 сент. 2004 г. – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2004. Т. 3. – С. 72–73.

Поступила 25.05.09