

Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Материалы 9-й практической конференции 10-13.04.2007 г. Санкт-Петербург, Изд. Политехнического ун-та. Санкт-Петербург.2007. Ч.2. - С. 290-299

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЗУБЧАТЫХ КОЛЁСАХ

**ХМЕЛЕВСКАЯ В.Б., ЛАЗАРЕВ С.Ю., АЛЕКСЕЕВ С.Б., КОЗЛОВ Ф.В.,
ПОРОЗОВ В.А.**

Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций, ВМА им Н.Г. Кузнецова, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время накоплен большой положительный опыт по модификации поверхностей зубьев крупных зубчатых передач минеральными материалами. Эта технология позволяет снижать интенсивность изнашивания поверхностей зубьев на один – два порядка, восстанавливать поверхность зуба при её повреждении, в определённых пределах и при определённых условиях наращивать толщину зуба.

Данная работа выполнялась применительно к потребностям шлюзового хозяйства с целью выявления свойств минеральных покрытий на крупных зубчатых колёсах и оценки перспектив восстановления поверхностей и прекращения дальнейшего изнашивания зубьев.

Исследования выполнялись на основании разработок [1] и патентов ВМА силами студенческого научного общества СПбГУВК под руководством д.т.н. В.Б. Хмелевской.

1. Характеристики зубчатых колёс приводных механизмов шлюзов

На шлюзах используются как типовые цилиндрические и цилиндрикоконические редукторы, так и крупные открытые колёсные пары с диаметром колеса до 6 метров. Используются также и реечные механизмы. Тип зубчатых зацеплений – в основном, прямозубые, эвольвентные.

Материал колёс открытых передач – обычно сталь Ст45 и сталь Ст40Х в нормализованном виде. В редукторах используется азотирование и цементация поверхностей зубьев шестерён.

Основными видами разрушения поверхности зубьев являются:

- питтинг, возникающий с появлением масляного клина, способствующий развитию трещин;
- микропиттинг, возникающий на вершинах микронеровностей, связанный с тем же механизмом;
- заедания, возникающие при превышении рабочими давлениями в контакте их допустимой величины;

- общий износ контактирующих поверхностей, связанный с усталостными процессами;

- отслаивание частиц поверхности, связанное с высокими тангенциальными напряжениями.

Основными видами износа являются для эвольвентных зубьев общий износ и различные виды питтинга.

Изгиб зуба для зубчатых колёс с эвольвентным зацеплением не является критичным, ибо такой тип зубьев имеет очень большой запас по изгибу. Условие прочности по изгибу используется как один из критериев определения минимально допустимой толщины изношенного зуба.

2. Данные исследований

Исследования свойств поверхностей из различных материалов проводились на машине трения и на опытных шестернях. В качестве дополнения приведены данные по модификации станочных и редукторных зубчатых колёс, выполнявшиеся ранее.

В данном исследовании испытания образцов проводились на машине трения СМЦ-2; опытные шестерни эксплуатировались в составе механизмов металлорежущих станков.

2.1. Испытания образцов с покрытиями

Первая серия опытов на машине трения

Исследовались: один вид серпентинита и чистые материалы образцов.

Режим испытаний: пара ролик-ролик - 9 часов при нагрузке 100 кгс и 300 об/мин, после чего определялись износ обоих роликов. После этого давалась нагрузка 200 кгс и испытания продолжались при тех же скоростях в течение 3-х часов. В конце испытаний замерялся коэффициент трения. Смазка – 6 капель в минуту. Износ измерялся на интервале 9 и 3 часа.

Перед испытаниями на ролике с покрытием склерометрическим методом измерялось напряжение среза материала покрытия.

В качестве материалов роликов использовались сталь 40 и сталь 40Х.

Методы нанесения покрытия из минеральных материалов (ГМ):

- клеевой метод (10% силикатного клея + 90% минерала) с последующей полировкой по патенту [6];

- напрессовка состава (30% масла + 70% минерала) с последующей полировкой.

Результаты опытов приведены в табл. 1.

Вторая серия опытов на машине трения.

Для сравнения были проведены испытания по тому же режиму покрытия, полученного методом осаждения из паровой фазы.

Испытания проводились 9 часов при одной нагрузке в 100 кгс и тех - же скоростях. Материал покрытия – алмазоподобное покрытие на основе оксикарбонитрида кремния, нанесенное методом финишного плазменного упрочнения (ФПУ).

Отдельно определялась нагрузка схватывания.

Результаты приведены в табл.2.

Таблица 1. Испытания минеральных материалов

Материал вращающегося ролика.	Материал неподвижного ролика	Напряже-ние среза покрытия, Н\мм ²	Износ за 9 час (3 час). испытаний, мм.		Кoeffи-циент трения при нагрузке 200 кгс
			Вращаю-щийся образец	Неподвиж-ный образец	
Сталь 40	Сталь 40X	--	0,5 (0,3)	0,3 (0,3)	0,095
Сталь40+ ГМ, клеевой метод	Сталь 40X	20	0,02 (0,03)	0,2 (0,25)	0,073
Сталь 40	Сталь40X+ГМ, клеевой метод	25	0,90 (0,40)	0,02 (0,02)	0,070
Сталь40+ ГМ, клеевой метод	Сталь40X+ГМ, клеевой метод	25	0,02 (0,02)	0,02 (0,03)	0,068
Сталь40+ ГМ, масло	Сталь40X+ГМ, масло	25	0,02 (0,02)	0,02 (0,025)	0,064
Сталь40+ ГМ, масло	Сталь40X+ГМ, масло	25	0,02 (0,02)	0,03 (0,025)	0,070
Сталь40	Сталь40X+ГМ, масло	25	0,3 (0,3)	0,02 (0,02)	0,074

Таблица 2. Испытания алмазоподобного покрытия, нанесенного ФПУ

Материал вращаю-щегося ролика.	Материал непод-вижного ролика	Адгезион-ная прочность покрытия, кгс\см ²	Износ за 9 час испытаний, мм.		Нагрузка схваты-вания, кгс	Кoeffи-циент трения при нагрузке 100 кгс
			Вращаю-щийся образец	Непод-вижный обра-зец		
Сталь40+ покр	Сталь 40X	26	0,01	0,02	250	0,095
Сталь40+ покр	Сталь40+ покр	20	0,01	0,01	360	0,073

Третья серия опытов на машине трения

В данной серии опытов использовалась пара: вращающийся образец сталь 40X с различными покрытиями - сталь 40X чистая.

Скорость вращения образца – 200 об/мин. Нагрузка повышалась через каждые 15 минут. Износ образца определялся на каждом 15-минутном интервале.

Данные приведены в табл.3.

Таблица 3. Износ различных покрытий

Материал и вид покрытия.	Износ образца (мм) в процессе действия нагрузки Р (кгс)				
	10	25	50	100	150
Сталь 40X с минералом	--	0,01	0,02	0,01	0,02
Сталь 40X с алмазоподобным покрытием (метод ФПУ)	--	0,01	0,01	0,01	0,01
Сталь 40X с плазменным напылением порошком ВСНГН	--	0,01	0,01	0,01	0,01
Сталь 40X с азотированием	--	0,01	0,02	0,02	0,02

Коэффициент трения, фиксировавшийся в конце каждого интервала, принимал значения, указанные в табл.4.

Таблица 4. Изменение коэффициентов трения

Материал и вид покрытия.	Коэффициент трения при нагрузке Р (кгс)				
	0	10	25	50	100
Сталь 40X с минералом	0,08	0,08	0,075	0,07	0,07
Сталь 40X с алмазоподобным покрытием (ФПУ)	0,05	0,056	0,065	0,02	0,02
Сталь 40X с плазменным напылением порошком ВСНГН	0,064	0,06	0,05	0,05	0,05
Сталь 40X с азотированием	0,02	0,02	0,068	0,068	0,068

Четвёртая серия опытов на машине трения

В данной серии опытов использовалась пара: вращающийся образец сталь 40 с различными покрытиями - сталь 40 чистая.

Режим сохранялся таким же, как и в третьей серии опытов. При формировании покрытия минералами и плазменным напылением применялся ультразвук.

Данные приведены в табл.5.

Таблица 5. Износ различных покрытий

Материал и вид покрытия.	Износ образца (мм) в процессе действия нагрузки Р (кгс)				
	10	25	50	100	150
Сталь 40 с минералом + УЗ	--	0	0	0	0
Сталь 40 с алмазоподобным покрытием (ФПУ)	--	0	0	0	0,01
Сталь 40 с плазменным напылением ВСНГН + УЗ	--	0	0	0	0,01
Сталь 40 с азотированием	--	0,01	0,02	0,03	0,05

Раздельная проверка нагрузки схватывания, величины остаточных напряжений и разрушающей нагрузки дала результаты, приведённые в табл. 6.

Таблица 6. Триботехнические характеристики некоторых покрытий

Материал и вид покрытия.	$P_{схв}$, кгс	Остаточные напряжения σ , МПа	Разрушающая нагрузка P , кгс
Сталь 40X с минералом	Не обнаружено.	-50	200
Сталь 40X с алмазоподобным покрытием (ФПУ)	300	-50	300
Сталь 40X с плазменным напылением ВСНГН	350	-350	350
Сталь 40X с азотированием	200	-300	300

2.2. Результаты эксплуатации натуральных образцов зубчатых колёс

2.2.1. Для опытной эксплуатации выбраны две сменные бывшие в эксплуатации станочные шестерни из стали 45 с числом зубьев 26 и из стали 40X с числом зубьев 15. Поверхность зубьев освидетельствована. На поверхности зубьев было нанесено серпентинитовое покрытие методом напрессовки с полировкой, после чего качество поверхности также подверглась освидетельствованию и была измерена толщина зуба тангенциальным зубомером. До нанесения покрытия и после этого определена твёрдость поверхности склерометрическим способом. Эксплуатационный период продолжался 24 дня, после чего произвели проверку толщины зубьев. Данные приведены в табл. 7.

Таблица 7. Результаты опытной эксплуатации шестерён

Шестерня	Состояние поверхности		Твёрдость до/после нанесения покрытий, кгс/мм ²	Износ после 24 суток эксплуатации
	до нанесения покрытия	после нанесения покрытия		
Ст45, Z=26	Питтинг, коррозия, риски	Поверхность имеет серовато-матовый цвет; риск не обнаружено.	126/146	Не обнаружен
Ст40X, Z=15	Незначительные следы износа. Толщина зуба уменьшена на 0,2 мм от номинала	Цвет поверхности – матовый; заусенецы сглажены.	161/187	То же.

2.2.2. Опытная эксплуатация редуктора ЦО-75 и привода шаровой мельницы ШБМ-25 на Апатитской ТЭЦ [2]

Привод шаровой мельницы состоит из электродвигателя, редуктора ЦО-75 и промежуточного вала на двух подшипниках. Обработке подверглись: подшипники электродвигателя, подшипники и зубчатые передачи редуктора, подшипники промежуточного вала.

Амплитуды вибрации определялись электронным индикатором вибрации в микронах до и после обработки в различных точках привода. Данные по замерам приведены в табл. 8. Кроме этого, был проведён визуальный контроль состояния поверхности зубчатых передач до и после формирования покрытия. Эти данные приведены в табл. 9.

Приведённые данные свидетельствуют о том, что на поверхностях зубьев сформировался защитный слой. При этом, снижение уровня вибрации показывает, что шероховатость поверхностей деталей, составляющих пары трения, снизилась. Эти выводы подтверждаются и данными визуального осмотра поверхностей зубьев редуктора. Кроме этого, обнаруживается, что в ходе формирования поверхностного слоя происходит также устранение дефектов поверхности.

Таблица 8. Уровни амплитуд вибрации в различных точках привода шаровой мельницы

Точки замера амплитуд вибрации	Амплитуда до обработки, мкм	Амплитуда после обработки, мкм
Электродвигатель:		
горизонтальные вдоль вала	150	90
вертикальные на опоре 1	90	36
вертикальные на опоре 2	90	60
горизонтальные на опоре 2	60	45
Редуктор:		
Вертикальные на подшипнике у двигателя	120	100
Вертикальные на подшипнике выходного вала	300	200
Подшипники промежуточного вала в вертикальной плоскости:		
у редуктора	180	40
у мельницы	190	45

Таблица 9. Оценка состояния поверхностей зубьев редуктора при визуальном контроле

Поверхность	Исходное состояние	Состояние с покрытием
Зубья вала-шестерни	Выработка 1-1,5 мм по толщине зуба со стороны двигателя, на поверхности зубьев имеются раковины 1 x 4 мм	Зубья имеют сероватоматовый цвет поверхности по всей длине зуба, особенно ярко выраженный в зоне контакта. Количество раковин и их размеры уменьшились примерно на 30%.
Ведомая пара	На шестерне присутствуют раковины; на вершине головок зубьев колеса и шестерни имеются заусеницы размером 1-1,5 мм в продольном направлении зуба.	Цвет поверхности зубьев аналогичен предыдущему случаю. Количество раковин уменьшилось. Заусеницы получили притупленную форму.

2.2.3. Цилиндрические зубчатые передачи листогибочных вальцев [3-5]

Трёхвалковые листогибочные вальцы модели ВМ-3 фирмы «Эшер» Германия имеют в своём составе двухступенчатый редуктор, 6 открытых зубчатых пар и 11 подшипников скольжения. Общий механический КПД всего агрегата, указанный в паспорте, составлял 0,622. Перед модификацией поверхности трущихся пар производился замер потребляемой мощности на холостом ходу. Такой же замер при аналогичных условиях произведён после формирования минеральных покрытий на поверхностях пар трения и двухнедельной эксплуатации.

Обнаружено, что потребляемая мощность агрегата снизилась с 27,54 кВт до 19,87 кВт, то есть на 7,7 кВт или на 28%. При этих условиях произведён расчёт повышения механических КПД подшипников и зубчатых передач исходя из паспортного КПД и рекомендуемых значений КПД отдельных пар – подшипника и зубчатого зацепления. Полагалось, что снижение механических потерь в отдельных узлах происходит пропорционально их исходным величинам.

Расчётное значение КПД одной зубчатой передачи повысилось в среднем с 0,980 до 0,986; КПД редуктора – с 0,830 до 0,877.

2.2.4. Испытания редуктора рольганга [3-5]

Редуктор привода подающего рольганга линии АЛБТС АО «Ижорасталь» испытывался на долговечность в условиях работы без смазки с 28 июля 1993 года по 13 октября 1994 г.

Характеристики привода: мощность двигателя 0,5 кВт; частота вращения редуктора – 505 об/мин.; редуктор одноступенчатый, модуль 2,5 мм., передаточное отношение 2,73.

После приработки поверхности масло из редуктора было слито полностью и в таком состоянии редуктор проработал 15 месяцев. На зубьях сохранилась только тонкая масляная плёнка. Загрузка редуктора составляла 8-10 час в сутки, при этом при максимальной нагрузке – 35% рабочего времени.

В ходе испытаний регулярно проводились замеры толщины зуба стандартным зубомером и зазора в зацеплении. Какого либо износа данным методом измерения не выявлено. По прошествии 15 месяцев наблюдение за редуктором прекращено по организационным причинам.

4. Расчётные характеристики зубчатых передач

Новые коэффициенты полезного действия мы будем рассматривать на основании теоретических зависимостей [7] на основании имеющегося практического опыта и данных исследований. Данный источник выбран потому, что работы проф. Н.И. Колчина в области механики являются фундаментальными. Можно также использовать и более ранние, например, немецкие, источники [8], но там нужные сведения носят более отрывочный характер.

КПД зубчатой эвольвентной передачи

По [6] полный КПД зубчатой передачи представляется в виде:

$$\eta = 1 - (\varphi_{\text{ц}} + \varphi_3) = 1 - [f_{\text{ц}} (d_1/r_1 + d_2/r_2) / 2 \cos \alpha + \pi f_3 (1/z_1 + 1/z_2) \epsilon / 2]$$

где: $\varphi_{\text{ц}}$ – коэффициент потерь на трение в цапфах; φ_3 – коэффициент потерь на трение в зубьях; $f_{\text{ц}}$ – коэффициент трения в цапфах; f_3 – коэффициент трения в зубьях; d_1 и d_2 – диаметры цапф; r_1 и r_2 – радиусы делительных окружностей шестерни и колеса; z_1 и z_2 – числа зубьев шестерни и колеса; $\cos \alpha = \cos 20^\circ$ – угол зацепления; ϵ – коэффициент перекрытия.

Сравнение величины КПД обычной передачи и передачи с минеральными покрытиями проведём на конкретном примере. В качестве примера возьмём данные по обычной открытой зубчатой передаче на подшипниках скольжения.

Принимаем: $d_1 = 50$ мм; $d_2 = 70$ мм; $r_1 = 125$ мм; $r_2 = 500$ мм; $z_1 = 16$; $z_2 = 64$; $\epsilon = 1,7$; $\cos \alpha = \cos 20^\circ = 0,9397$.

При этом получаем:

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - [f_{\text{ц}} (0,40 + 0,14) / 2 \cos \alpha + \pi f_3 (0,0625 + 0,015625) 0,85] = \\ &= 1 - (0,287 f_{\text{ц}} + 0,209 f_3) \end{aligned}$$

В случае открытой передачи в условиях периодической смазки $f_{ц} = 0,1$ а $f_{з} = 0,2$ и общая величина КПД составляет $\eta = 0,93$.

В случае передачи с минеральными покрытиями пар трения для упрощения примем коэффициент трения в цапфах и зубьях одинаковым

При $f_{ц} = f_{з} = 0,04$ величина КПД машины составляет $\eta = 0,98$.

При $f_{ц} = f_{з} = 0,07$ величина КПД машины составляет $\eta = 0,965$.

При формировании покрытия с нужными качествами, при постоянной смазке в штатном режиме величина КПД становится ещё большей, чем и объясняются эффекты зубчатых передач, полученные при их эксплуатации.

Выводы

1. Испытания показали, что формирование минеральных покрытий на поверхности снижает износ детали в 15 ... 45 раз.
2. Использование ультразвуковой обработки позволяет повысить качество минеральной поверхности и улучшить её свойства: по износу в этом случае испытанный минеральный материал оказался (в соответствии с данными табл. 5) на первом месте из всех испытанных материалов и способов формирования поверхностных слоёв.
3. Испытания алмазоподобного покрытия, полученного с использованием финишного плазменного упрочнения, показали, что износ и коэффициент трения у этого материала незначительно ниже, чем у применённого минерального материала. Однако, при этом следует учитывать давление, при котором получены эти результаты. У минеральных материалов оно может быть несколько выше. Как показали исследования [9] при одинаковых давлениях плёночное алмазоподобное покрытие (ФПУ) имело более высокий коэффициент трения, нежели чем минеральное покрытие:
пара сталь ШХ15 с покрытием – сталь 38ХМЮА при давлении $32,6 \text{ кгс/мм}^2$ при тонкоплёночном покрытии $K_{тр} = 0,090$, при минеральном покрытии $K_{тр} = 0,060$;
пара сталь ШХ15 с покрытием – алюминиевый сплав АО20 при том же давлении при тонкоплёночном покрытии $K_{тр} = 0,065$, при минеральном покрытии $K_{тр} = 0,060$.
4. Покрытие, образованное плазменным напылением, имеет более низкие характеристики, нежели два вышеуказанных вида, а азотирование только несколько уменьшает износ, не давая качественного сдвига.
5. Наиболее дешёвым способом из всех рассмотренных является использование технологии минеральных материалов, которая позволяет изменять характеристики зубчатой пары даже в процессе

эксплуатации при минимальных затратах. Если учесть, что выбор минеральных материалов весьма широк (более сотни видов), то возможность подбора материала под требуемые характеристики представляется весьма вероятной.

Литература

1. Зуев В.В. Лазарев С.Ю., Лавров Ю.Г., Денисов Г.А., Маринич Т.Л., Половинкин В.Н., Соловьёв А.П., Холин А.Н. Свойство энергоплотных минеральных веществ изменять параметры триботехнических систем. Открытие № 323
2. Лазарев С.Ю., Зуев В.В., Холин А.Н. Повышение надёжности оборудования горнорудных предприятий за счёт геоактивации пар трения. Обогащение руд. 2000 № 4. - С.39-42
3. Холопов Ю.В., Лазарев С.Ю. О некоторых результатах повышения эксплуатационных параметров станочного оборудования при использовании ультразвука и минеральных покрытий пар трения. Металлообработка. 2002. №2. - С.43-44
4. Холопов Ю.В., Лазарев С.Ю. О возможности использования геоминералов и ультразвука в станкостроении. Технология ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. Материалы 4-й Всероссийской практической конференции. СПб, 16-18 апреля 2002 г. - С. 246-249
5. Лазарев С.Ю. Применение технологии минеральных покрытий при ремонте и модернизации металлообрабатывающего оборудования. Металлообработка. 2003. № 3. - С.46-47
6. Тезисы док. семинара «Ремонт и модернизация металлообрабатывающего оборудования». СПб, 18-20 февраля 2003 г.
7. Патент RU 2262553 Лазарев С.Ю., Энгельке М.В., Кузякин Ю.И. Способ формирования минеральных покрытий поверхностей деталей и сплавов
8. Колчин Н.И. Механика машин, т. 2. М-Л. МАШГИЗ, 1963. - 534 с.
9. Проф. Р. Дуб. Краностроение. Т.1 и 2. ОНТИ НКТП СССР, 1937.
10. Хмелевская В.Б., Лазарев С.Ю., Порозов В.А.. Методика оценки триботехнических параметров покрытий применительно к деталям судовых механизмов и гидротехнических сооружений шлюзов. Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Материалы 8-й Международной практической конференции-выставки. СПб, 11-14 апреля 2006 г. Часть 2. - С.134-143