

УДК 621.771

**В. С. ГАПОНОВ**, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**Ю. Д. МУЗЫКИН**, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**В. В. ТАТЬКОВ**, канд. техн. наук, вед. научн. сотр., НТУ «ХПИ»;  
**А. Ю. ПУТНОКИ**, канд. техн. наук, эксперт-консультант, НТУ «ХПИ»;  
**А. И. ВОЙТОВИЧ**, механик ЦГПТЛ, ОАО «Запорожсталь», Запорожье;  
**И. М. ФЕДОРЕНКО**, научный сотрудник НТУ «ХПИ».

## **ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗНОСА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ**

Рассмотрены причины разрушения зубчатых передач прокатного оборудования и показано, что наиболее просто уровень их работоспособности можно фиксировать по величине износа боковой поверхности зубьев с помощью предлагаемого измерительного комплекса.

**Ключевые слова:** зубчатая передача, виды разрушения, надежность и долговечность, боковой зазор, измерительный комплекс.

**Введение.** Широкое использование зубчатых передач в механических приводах прокатных станов объясняется не только их высокими эксплуатационными показателями, но и высокой степенью адаптации к изменению условий работы. Надежность их работы оценивается вероятностью сохранения рабочих характеристик в течение заданного срока службы, когда многие технологические параметры прокатки могут существенно изменяться как по объективным, так и субъективным причинам, то есть носят случайный характер. Учесть весь спектр параметров, влияющих на надежность работы зубчатой передачи, и оценить количественно каждый из них не представляется возможным. [1, 2].

Существующие традиционные методы расчета зубчатых передач на усталостную прочность согласно ГОСТ 21354-87 в большинстве случаев можно рассматривать только как первое приближение к реальной картине разрушения, которая в каждом конкретном случае требует уточнения в соответствии с реальными условиями эксплуатации [3, 4].

Опыт эксплуатации зубчатых передач в прокатном оборудовании, а также мониторинг отказов, имевших место на металлургических комбинатах ОАО «Запорожсталь» и ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог» показывает, что причиной разрушения зубчатых колес являются различные виды износа, которые в зависимости от конкретного вида оборудования и технологических особенностей его эксплуатации могут приводить к различным видам разрушения: механическому, молекулярно-механическому, коррозионно-механическому. Характер доминирующего вида разрушения зависит от многих, часто не детерминированных параметров эксплуатации, и поэтому указать точно, какой вид разрушения имеет место в конкретном зубчатом сопряжении, в большинстве случаев не представляется возможным.

**Цель работы, постановка задачи.** Используемый в подавляющем большинстве случаев расчет на контактную и изгибную прочность зубчатых

передач согласно ГОСТ 21354-87, который регламентирует механическую прочность, связанную с отказами из-за усталостного выкрашивания и поломок, не является универсальным. Так, с уменьшением скорости при постоянном числе циклов нагружений, ухудшением условий смазки, наличием перегрузок и так далее роль усталостных разрушений в общем балансе повреждений падает, а молекулярно-механического изнашивания – растет. В то же время, когда параметры работы зубчатой передачи изменяются в широком диапазоне, а используемые смазки выбраны для конкретных условий работы, возникает коррозионно-механическое изнашивание, при котором появляется возможность контакта ювенильных поверхностей зубьев, приводящая к их быстрому износу [5, 6].

Таким образом, все расчеты на прочность следует рассматривать только в вероятностной постановке, так как в большинстве случаев невозможно точно установить параметры нагружения зубчатой передачи и их взаимное влияние друг на друга. В результате нарушается принцип суперпозиции, который положен в основу линейного суммирования накопленных повреждений, а это в ряде случаев может привести к существенным ошибкам в расчетах. Поэтому в таких случаях целесообразно выбрать такой оценочный параметр, который является интегральным показателем состояния зубчатой передачи и который в процессе работы можно объективно контролировать.

Так как условия работы зубчатого зацепления определяют степень изнашивания зубьев, то есть изменение их линейных размеров, в качестве определяющего параметра можно принять боковой зазор (люфт) в окружном направлении зубьев. Постоянный контроль и мониторинг данного показателя за весь период устойчивой работы зубчатого соединения позволяет не только фиксировать реальное состояние зубчатой пары, но и прогнозировать остаточный ресурс, а, следовательно, устанавливать плановые ремонтные работы с целью предупреждения аварийных случаев выхода из строя.

**Материалы исследования.** В качестве примера возможности реализации предложенного метода контроля состояния зубчатого зацепления был разработан и испытан измерительный комплекс для периодической фиксации износа зубьев без разборки зубчатых муфт МЗ-20, которые установлены на тонколистовом стане горячей прокатки «1680» ЦГПТЛ металлургического комбината ОАО «Запорожсталь». Многолетние наблюдения за работой зубчатых муфт показали, что имевшие место усталостные поломки зубьев, а также в ряде случаев их разрушения из-за недогрева металла либо превышения тоннажа сляба не являются определяющими.

Доминирующими видами разрушения для зубчатых муфт являются: молекулярно-механическое, приводящее к схватыванию и заеданию, а также коррозионно-механическое, приводящее к фреттингкоррозии. Причина этих разрушений связана с осциллирующим относительным перемещением сопряженных поверхностей зубьев, а также с циклическим характером изменения контактных напряжений. Результат повреждения зубьев проявляется в их утонении с последующей поломкой в ослабленном сечении.

С целью предупреждения аварийных ситуаций, связанных с внезапной поломкой предельно изношенных зубьев, ведомственным документом «Правила технической эксплуатации механического оборудования непрерывных широкополосных станов горячей прокатки» [7] предписывается демонтаж зубчатых муфт, у которых износ зубьев по толщине на уровне делительной окружности превышает 30% первоначального размера. Инструментальный обмер зубьев необходимо производить не реже одного раза в 15 суток.

В реальных условиях эксплуатации стана «1680» данные рекомендации в установленные сроки не выполняются вследствие высокой трудоемкости операций разборки и сборки муфт, требующих продолжительной остановки стана. Поэтому создание измерительного комплекса, позволяющего производить контроль износа зубьев в зубчатых муфтах без их разборки, а также архивировать полученную информацию с целью определения остаточного ресурса работы, безусловно, является актуальной разработкой для совершенствования условий обслуживания прокатного оборудования.

Измерительный комплекс предусматривает возможность диагностирования величины износа зубьев в муфтах, эксплуатируемых в линиях главных приводов прокатного стана «1680», в том числе МЗП-15,

МЗП-16, МЗ-20, МЗ-21, МЗ-23. Определение износа зубьев, согласно действующей инструкции [7], проводится при плановых остановках оборудования, но не реже одного раза в 15 суток. за счет кратковременного реверса муфты на угол  $5...10^\circ$  с пульта оператора или посредством вспомогательных механических средств. В зависимости от величины износа зубьев, втулка зубчатой муфты совершит поворот по отношению к обойме на величину холостого хода. Измерение этого угла поворота является основной функцией, а следовательно, принципом работы измерительного комплекса. Реально фиксируемый боковой зазор в зубчатом зацеплении муфты позволяет перевести случайные параметры эксплуатации прокатного стана в строго детерминированную величину износа зубьев.

Измерительный комплекс включает два преобразователя. Первичный преобразователь состоит из датчика угловых перемещений типа Д1-01 и механического привода, которые монтируются непосредственно на муфте и представляют собой быстросъемные элементы. Вторичный преобразователь является автономным устройством, которое работает совместно с первичным преобразователем только в момент измерений. Измерительной базой для исследования величины износа зубчатого зацепления является угловой люфт между поверхностью ступицы втулки и корпусом муфты в момент ее кратковременного реверса.

Первичный преобразователь – датчик угловых перемещений представляет собой резистор линейного типа, достоинствами которого являются возможность получения больших значений выходного сигнала без применения дополнительных усилительных устройств и наличие незначительного реактивного сопротивления.

Механический привод первичного преобразователя обеспечивает не только кинематическую связь между подвижными элементами измерительного комплекса, но и существенно повышает разрешающую способность выбранного метода измерений за счет масштабного коэффициента и наличия одноступенчатой зубчатой передачи. Принципиальная схема механического привода первичного преобразователя представлена на рисунке.

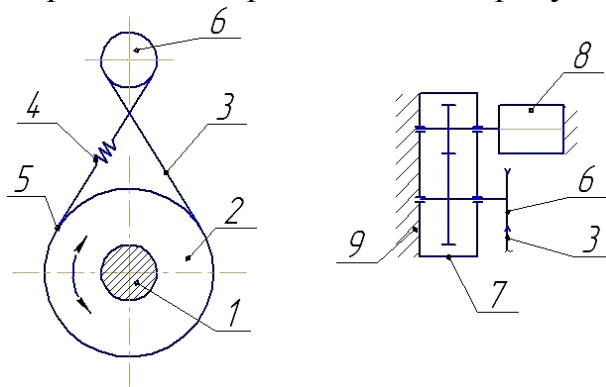


Рис. – Кинематическая схема измерительного комплекса:

- 1- вал зубчатой муфты; 2 - ступица втулки; 3 – гибкая связь; 4 – пружина;  
 5 – прижимы-фиксаторы; 6 – промежуточный ролик; 7 – мультипликатор;  
 8 – датчик угла поворота; 9 – крышка зубчатой муфты.

При повороте ступицы втулки 2 на угол смещения, лимитируемый боковым зазором в зубчатом зацеплении, гибкая связь 3, выполненная в виде троса  $\varnothing 1,6$  мм по ГОСТ 2172-80, и пружины 4, обеспечивающей предварительное натяжение, передает движение на промежуточный ролик 6, установленный на корпусе зубчатой муфты 9. Поворот промежуточного ролика через мультипликатор 7, выполненный в виде зубчатой передачи, передается на датчик угловых перемещений 8, который является первичным преобразователем. На датчике установлены шкала и стрелка (на схеме не показаны) для визуальной оценки угла поворота, а также настройки прибора при его монтаже на муфте.

Характеристики настройки измерительного комплекса применительно к зубчатой муфте МЗ-20, установленной на чистовой клети № 5 тонколистового стана горячей прокатки «1680», показаны ниже. Реальная толщина зуба по хорде делительной окружности втулки и обоймы практически одинаковая и составляет 21,99 мм. Предельное значение бокового зазора, соответствующее максимально разрешенному износу зубьев, согласно нормативному документу составляет 13,2 мм, что вызывает угловое смещение по диаметру делительной окружности зубьев  $d = 1036$  мм на угол  $\varphi_m = 1,46^\circ$ . С учетом соотношения линейных размеров ступицы втулки  $d_{ст} = 850$  мм и промежуточного ролика  $d_p = 40$  мм, а также передаточного числа мультипликатора  $U_m = 5$ , максимальный угол поворота ролика составит  $\varphi_p = 31^\circ$ , а вала датчика угловых перемещений  $\varphi_d = 155^\circ$ .

Вторичный преобразователь представляет собой мобильный переносной прибор, предназначенный для регистрации и сохранения во встроенной долговременной памяти необходимого количества аналоговых и дискретных

характеристик с возможностью просмотра и анализа зафиксированной информации на встроенном графическом ЖКИ дисплее, а также копирования информации на другие ПК. Учитывая, что при измерении износа зубьев необходимо произвести кратковременный реверс в работе зубчатой муфты, соответствующий углу поворота на  $5...10^\circ$ , данная технологическая операция может рассматриваться как ударная нагрузка, приложенная к зубьям. В этом случае при измерении угла смещения фиксируется не только величина бокового зазора в зубчатом зацеплении, но и упругая деформация всех элементов, участвующих в кинематической передаточной схеме. Чтобы увидеть весь процесс смещения и оценить непосредственно составляющую, связанную с наличием бокового зазора, необходимо, чтобы как вторичный преобразователь, так и его программное обеспечение позволяло фиксировать быстропротекающие, в том числе аварийные, процессы и осуществлять их анализ и архивирование. Наиболее полно указанным требованиям отвечает измерительный диагностический комплекс КСП-12.

Основные технические характеристики механической и электронной части измерительного комплекса применительно к зубчатой муфте МЗ-20:

1. Максимальный угол поворота ролика -  $45^\circ$ .
2. Передаточное отношение гибкой связи - 21, 25.
3. Передаточное число мультипликатора - 5.
4. Максимальный угол поворота первичного преобразователя -  $225^\circ$ .
5. Выходной сигнал «угол-ток» первичного преобразователя – 0–5 мА.
6. Количество входов вторичного преобразователя - 2.
7. Уровень входного сигнала вторичного преобразователя - 0–5 мА.
8. Напряжение питания - 12–24 В.

**Выводы.** Опыт эксплуатации зубчатых передач и мониторинг их отказов на металлургических заводах показали, что надежность работы зависит от условий эксплуатации, которые изменяются в широком диапазоне и могут привести к различным видам разрушений. Наиболее характерным параметром, регламентирующим вероятность разрушения, следует признать износ боковой поверхности зубьев, измерение которого без разборки зубчатого соединения можно выполнить, фиксируя величину люфта в сопряжении.

Для реализации данного метода прогнозирования разрушений и определения остаточного ресурса работы, применительно к зубчатой муфте МЗ-20, установленной в главном приводе прокатного стана «1680», был изготовлен измерительный комплекс. Он включает первичный преобразователь угловых перемещений, приводимый в действие механической передачей, фиксирующей люфт в сопряжении зубчатых поверхностей, и вторичный преобразователь, представляющий результаты измерений в цифровом и аналоговом виде.

Эффективность использования прибора состоит не только в существенном снижении трудоемкости технических осмотров и, соответственно, времени простоя прокатного оборудования, а также, за счет архивирования результатов измерений и проведения сопоставительного анализа динамики износа, в предупреждении возникновения внезапных отказов муфты вследствие поломки зубьев.

Предложенный измерительный комплекс можно рассматривать как базовую модель прибора, предназначенного для объективной фиксации технического состояния зубчатого зацепления в режиме «online» для прокатного и другого металлургического оборудования.

**Список литературы:** 1. Коновалов Ю.В., Налча Г.И., Савранский К.Н. Справочник прокатчика. – М.: Металлургия, 1977.– 310 с. 2. Полухин П.И. Прокатное производство. – М.: Металлургия, 1982.– 696 с. 3. Кудрявцев В.Н. Детали машин. – Л.: Машиностроение, 1980.– 464 с. 4. Решетов Д.Н. Детали машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с. 5. Айрапетов Э.Л., Мирзаджанов Д.Б. Зубчатые соединительные муфты. – М.: Наука, 1991.– 249 с. 6. Притыкин Д.П. Надежность, ремонт и монтаж металлургического оборудования. – М.: Металлургия, 1985. – 368 с. 7. Правила технической эксплуатации механического оборудования непрерывных широкополосных станов горячей прокатки. ВНИИ механизации труда черной металлургии и ремонтно-механических работ. – Днепропетровск, 1982. – 87 с.

Надійшла до редколегії 25.10.2013

УДК 621.771

**Измерительный комплекс для определения износа боковой поверхности зубьев / Гапонов В. С., Музыкин Ю. Д., Татьков В. В., Путники А. Ю., Войтович А. И., Федоренко И. М. //Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ».– 2013. № 43 (1016). – С. 51–56. Бібліогр.:7 назв.**

Розглянуті причини руйнування зубчастих передач прокатного обладнання і показано, що найбільш просто фіксувати рівень їх працездатності можливо за розміром зносу бокової поверхні зубців, котра фіксується за допомогою запропонованого вимірювального комплексу.

**Ключові слова:** зубчаста передача, види руйнування, надійність та довговічність, боковий зазор, вимірювальний комплекс.

Reasons of destruction of gearings of rental equipment of and are considered it is rotined that it is most simple to fix the level of their capacity possibly in size of tearing down of lateral surface of indents, which is fixed by the offered measuring complex.

**Keywords:** gearing, types of destruction, reliability and longevity, sidelash, measuring complex.

УДК 621.762.047

**Э. П. ГРИБКОВ**, канд. техн. наук, докторант, доц., ДГМА, Краматорск;  
**В. А. ДАНИЛЮК**, аспирант, ДГМА, Краматорск.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПОРОШКОВЫХ ЛЕНТ**

В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса изготовления порошковых электродных лент методом прокатки. Установлено, что для исключения просыпания порошкового сердечника из металлической оболочки при транспортировке и плавлении, целесообразно использование технологии производства порошковых лент, которая заключается в предварительной прокатке компонентов сердечника перед засыпкой последующего слоя в металлическую оболочку, что позволяет увеличить относительную плотность сердечника и сохраняет при этом размер фракции порошка.

**Ключевые слова:** порошковая лента, сердечник, деформация, сила прокатки, плотность.

**Введение.** Для наплавки износостойких сплавов применяются в больших объемах порошковые электродные ленты, которые имеют в сечении форму, близкую к прямоугольнику [1-3]. Порошковая электродная лента имеет оболочку, состоящую из одной или двух металлических лент, заполненную порошковым наполнителем, в некоторых случаях в сердечник вводят легированную проволоку или ленту. Изготавливают такие ленты