

УДК 621.91. 621.833. 658.58

**В. А. Сидоров**, д-р техн. наук, доцент, **В. П. Цокур**, канд. техн. наук, доцент,  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Россия  
Тел. / Факс: +7 949 312 79 13; E-mail: sidorov\_va58@mail.ru

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ИЗНОСА КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

*В статье приведены результаты исследования причин выхода из строя много модульных зубчатых передач, проанализирована технологическая цепочка изготовления зубчатых передач, приводятся дефекты на зубьях и объясняется причина появления этих дефектов.*

*Ключевые слова:* зубчатое колесо, модуль, отказ, скол.

**V. A. Sidorov, V. P. Tsokur**

### TECHNOLOGICAL CAUSES OF WEAR OF LARGE-MODULE GEARS

*The article presents the results of a study of the causes of failure of large modular gears, the technological chain of gear manufacturing is analyzed, defects on the teeth are given and the reasons for the appearance of these defects are explained.*

*Keywords:* gear wheel, module, failure, chipping, cracks.

#### Введение

Обычно крупно модульные зубчатые передачи находятся в непрерывной эксплуатации несколько десятилетий. Постепенное накопление повреждений позволяет подготовиться и провести плановую замену при проведении капитальных ремонтов. Крупно модульные зубчатые колёса механизмов подъёма литейных кранов, редукторов привода прокатных валков и др. характеризуются индивидуальностью изготовления, передачей значительных крутящих моментов, относительно низкой частотой вращения [1, 2, 3].

Эти реверсивные передачи в открытом исполнении подвержены абразивному износу, влиянию переменных динамических нагрузок. Их следует рассматривать в комплексе конкретных условий эксплуатации, так как от них требуется безотказность, долговечность, что обеспечивает непрерывность технологического процесса [4]. Внезапные отказы передач: поломки и сколы зубьев, ускоренный износ, приводят к аварийной ситуации и увеличивают затраты на ремонт. При эксплуатации зубчатого зацепления с модулем 15...35 мм наблюдается ускоренный износ шестерни, по сравнению с износом колеса из-за различия в циклах нагружения. Для восстановления работоспособности зацепления, заменяют изношенную шестерню, но не всегда новая шестерня обеспечивает необходимую работоспособность. Повторная установка шестерен при ремонтах допускается в случаях, если износ по профилю зуба не превышает 50% предельно допустимого. Возможна установка шестерён с большим износом, если гарантируется, что износ до следующего капитального ремонта не превысит предельно допустимых размеров.

Классификация причин отказов, показанная в работе Ловчиновского Э.В. [5], включает группы причин: ошибки при конструировании, технологические отклонения изготовления и нарушения условий эксплуатации. Некоторые наблюдения в последовательности определения причин неисправностей и форм их проявления относительно крупномодульных зубчатых колёс машин горно-металлургического комплекса приве-

денные в работах [6, 7, 8, 9] не могут охватить всего многообразия поломок.

Некоторые, из возможных технологических причин ускоренного износа крупно модульных зубчатых передач металлургических и горных машин, зафиксированные при эксплуатации оборудования, рассматриваются в данной статье. Технология изготовления крупно модульных зубчатых колёс хорошо изучена и обобщена в работах и диссертациях [10, 11, 12, 13]. Отмечается, что большая часть зубчатых передач ( $\approx 85\%$ ) выходит из строя из-за изнашивания и усталостного разрушения.

Часто «распаровка» зубчатой пары приводит к ускоренному износу при несоблюдении технологии изготовления. Значительные потери, возникающие при этом желательно предупредить тщательной подготовкой к выполнению заказа. Рассмотрению технологических отклонений при изготовлении крупно модульных зубчатых передач, причин и следствий возникновения повреждений посвящена данная работа.

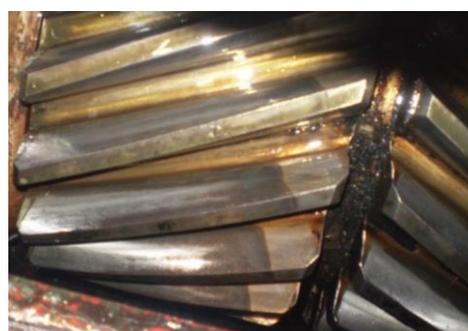
#### **Основное содержание и результаты работы.**

В процессе изготовления зубчатых колёс на точность получения эвольвенты и работоспособность передачи влияют точность расчёта гитары деления, что влияет на величину подрезки зуба, обработки головки и ножки зуба. Следует учитывать изношенность узлов станка и величину подачи фрезы, которая может изменить настройки биения. Накопленная погрешность окружного шага вызывает кинематическую погрешность цепи обката станка. Известны случаи, когда накопленная ошибка окружного шага не совпадает с частотой вращения, тогда будет существовать еще одна дискретная частота, равная частоте этой ошибки [14]. В зависимости от характера погрешности в шаге может иметь место кромочный контакт (по вершинам зубьев) - шаг шестерни меньше шага колеса или срединный (в середине линии зацепления) - шаг шестерни больше шага колеса.

Для увеличения срока службы зубчатых колёс применяют различные виды термической обработки эвольвентного профиля [15]. Износостойкость контактной поверхности зубчатой передачи формируется созданием упрочняющего слоя при термической обработке зубьев – наиболее часто – это поверхностная закалка токами высокой частоты на глубину до 2 мм с твёрдостью HRCэ 56...58, а остальная часть зуба до 35...45 HRCэ. Внутренняя структура остается податливой для гашения вибраций, что обеспечивает изгибную и усталостную прочность. Не соблюдение технологического регламента приводит к неравномерной закалке по длине или высоте зуба и поломкам зубьев (рис. 1).



а)



б)

Рисунок 1. Проявление дефектов термической обработки: а) распространение закалённого слоя по всему объёму зуба; б) неравномерная закалка зуба по длине.

Нарушение пятна контакта иногда происходит при несовпадении углов наклона зубьев шестерни и колеса, изготовленных на разных предприятиях (рис. 2а). Возможны ошибки при изготовлении и отклонениях в геометрии посадочных мест корпусных деталей (рис. 2б). Следствием является повышение контактных напряжений и осповидное выкрашивание на поверхности зубьев.



а)



б)

Рисунок 2. Нарушение пятна контакта: а) несовпадение углов наклона зубьев скиповой лебёдки; б) перекус в редукторе механизма подъёма литейного крана.

Недостаточная контактная прочность поверхности зубьев становится причиной избирательного усталостного выкрашивания рабочих поверхностей (рис. 3). Этому способствует нарушение расположения контактирующих зубьев.



а)



б)

Рисунок 3. Нарушение межцентрового расстояния (а) и осповидное выкрашивание поверхности зуба (б).

Выкрашивание или скол одного из зубьев может быть следствием технологической наследственности – не замеченного методами неразрушающего контроля дефекта заготовки. Визуально обнаружить скрытый дефект невозможно, его проявление происходит через некоторое время после начала эксплуатации и обнаруживается различием в характере шума при изменении направления вращения.

Фиксация единичного скола затруднена при использовании методов спектрального анализа (рис. 4а), проявляется при анализе временных реализаций временного сигнала (рис. 4б) и обнаруживается при визуальном осмотре (рис. 4в) [16]. В качестве

примера рассмотрено повреждение быстроходной зубчатой передачи редуктора привода машины шахтного подъёма. Признаком повреждения – наличие ударов с частотой вращения тихоходного вала при движении вниз.

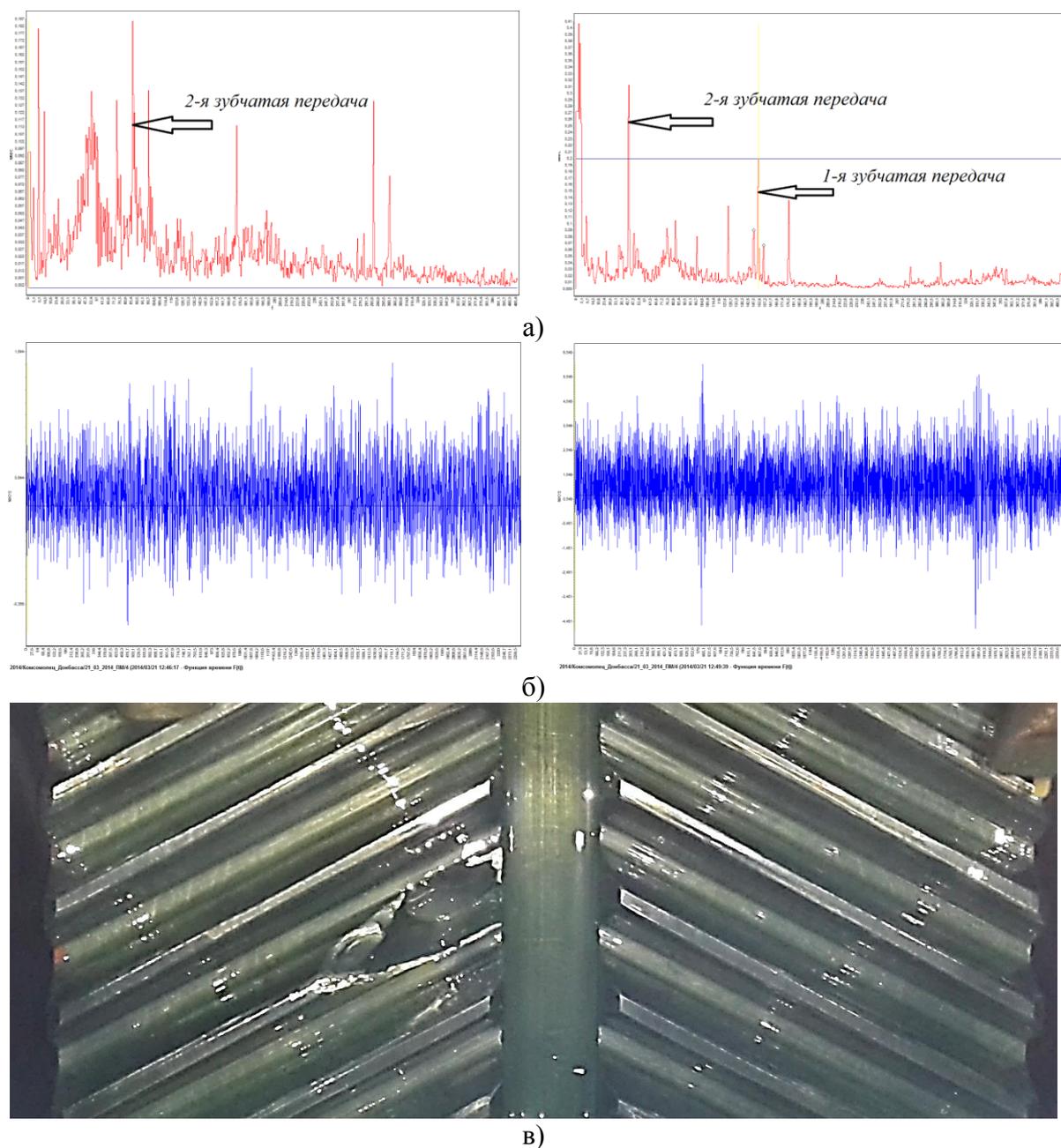


Рисунок 4. Диагностирование скола зуба колеса тихоходной передачи привода редуктора машины шахтного подъёма:

а) примеры спектрального анализа; б) временные реализации вибрационного сигнала при движении вверх и вниз; в) визуальное обнаружения повреждения.

Возможные погрешности при нарезании крупно модульных зубьев [15]:

- большая погрешность профиля зубьев, отклонение шага зацепления;
- накопленная погрешность окружных шагов - разность окружного шага;
- отклонение направления зубьев в одну сторону по обоим профилям или сим-

метричное по профилям конусообразность зубьев;  
- большая шероховатость поверхности зубьев.

Нарезание зубьев инструментом с различным профилем приводит к неожиданно быстрому износу, проявляющемуся в виде схватывания поверхностей (рис. 5а, 5б). Идентифицируется данный вид повреждения по сравнению отпечатков зубьев шестерни и колеса (рис. 5в, 5г). В данном случае – зубчатой передачи привода барабанов подъёма литейного крана несоответствие шага зубьев по внешнему диаметру составило около 8,0 мм.

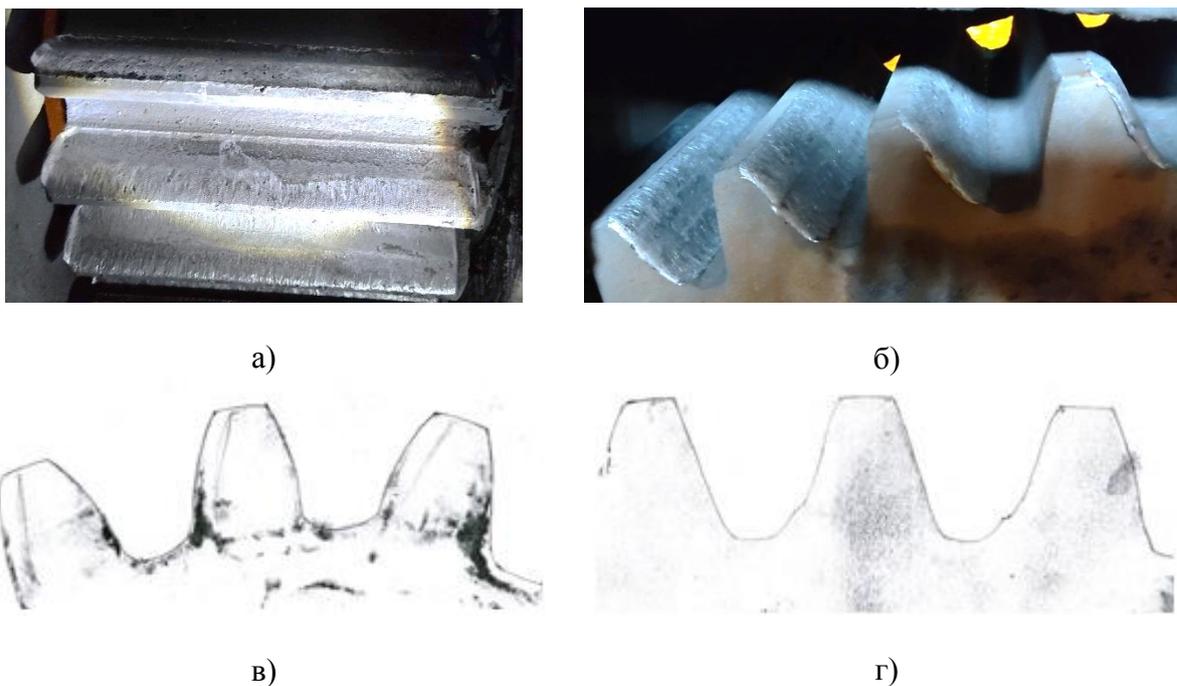


Рисунок 5. Следствие нарушения профиля и шага зуба:  
а) износ зубьев шестерни; б) износ зубьев колеса; в) отпечаток зубьев шестерни;  
г) отпечаток зубьев колеса.

### Заключение.

В первую очередь длительный срок эксплуатации крупно модульных зубчатых колёс обеспечивается строгим соблюдением технологии изготовления – проверкой кинематической точности станка, регулировкой зазоров в узлах станка (при необходимости), использованием одного станка и неизменных настроек при нарезании сопряжённых пар шестерня – колесо, проверкой износа инструмента и др. Особое внимание следует уделять термической обработке, обеспечивающей поверхностную твёрдость и упругость остальной части зуба. Закалка верхней части зуба приводит к возникновению усталостных трещин через 8...12 месяцев эксплуатации.

При выполнении заказа необходимо обеспечить заданную шероховатость поверхности зуба и мест сопряжения с ножкой зуба. Способ получения заготовки должен обеспечивать уменьшение влияния технологической наследственности ошибок обработки.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3 т. Т. 1. Машины и агрегаты доменных цехов. Учебник для вузов / А. И. Целиков [и др.], – 2-е изд., перераб. и

доп. – М.: Металлургия, 1987. – 440 с.

2. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3 т. Т. 2. Машины и агрегаты сталеплавильных цехов. Учебник для вузов / А. И. Целиков [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 432 с.

3. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3 т. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката. Учебник для вузов / А. И. Целиков [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с.

4. Гребеник, В. М. Надёжность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надёжности и долговечности). Справочник / В. М. Гребеник, В. К. Цапко. – М.: Металлургия, 1989. – 592с.

5. Ловчиновский, Э. В. Реорганизация системы технического обслуживания и ремонта предприятий. / Э. В. Ловчиновский. – М.: Рейнжиниринг бизнеса, 2005. – 385с.

6. Кораблёв, А. И. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач / А. И. Кораблев, Д. Н. Решетов. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1968 г. – 146 с.

7. Сидоров, В. А. Повреждения зубчатых передач: классификация / В. А. Сидоров // Международный информационно-технический журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов, серия Металлообработка». – 2010. – №3. – С. 28–34.

8. Сидоров, В. А. Причины неисправностей зубчатых передач металлургических машин / В. А. Сидоров // Журнал «Главный механик». – № 3 (199) март. – 2020. – С. 8-18.

9. Калашников, С. Н. Зубчатые колеса и их изготовление. / С. Н. Калашников, А. С. Калашников. – М.: Машиностроение, 1983. – 630 с.

10. Производство зубчатых колес: справочник. / С. Н. Калашников [и др.]; под общ. ред. Б. А. Тайца. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.

11. Генкин, М. Д. Повышение надёжности тяжело нагруженных зубчатых передач / М. Д. Генкин, М. А. Рыжов, Н. М. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с. – ил.

12. Бочкарев, Н. А. Исследование метода обработки крупномодульных тяжело-нагруженных цилиндрических зубчатых колес. Оборудование, инструмент и оснастка: автореф. дис. ... кандидата технических наук / Н. А. Бочкарев; Экспер. НИИ металлорез. станков. – Москва: 2004. – 26 с.

13. Маликов, А. А. Основы высокоэффективной технологии изготовления цилиндрических зубчатых колес : автореф. дис. ... доктора технических наук / А. А. Маликов; Тул. гос. ун-т. – Тула: 2009. – 39 с.

14. Шамбалова, М. Г. Методика выявления единичных дефектов зубьев и оценка их влияния на динамическую нагруженность привода / М. Г. Шамбалова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – №2(39) – С. 119-129.

15. Обработка зубчатых колес: учебное пособие / сост. Пегашкин В. Ф. – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2016. – 132 с.

16. Сидоров, В. А. Информационные основы виброметрии / В. А. Сидоров // Мир техники и технологий. Международный промышленный журнал. – №1. – 2013. – С. 46-54.

Поступила в редколлегию 28.01.2023 г.