

УДК 621.9.044

А. М. Лахин, канд. техн. наук, **А. Н. Михайлов**, докт. техн. наук
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР
Тел./факс: +38(062)3010805; E-mail: lelax@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В работе рассмотрены основные направления повышения эффективности и качества изготовления зубчатых колес на основе функционально-ориентированного подхода. Выполнен анализ причин снижения эксплуатационных функций зубчатых колес, разработаны пути повышения износостойкости и обеспечения равномерного износа зубьев в течении всего срока эксплуатации зубчатых колес. Предложен способ поэтапного нанесения покрытия на рабочие поверхности зубьев, позволяющий обеспечить износ зубьев в пределах толщины покрытия, и обеспечивающий возможность восстанавливать изношенные зубчатые колеса.

Ключевые слова: зубчатые колеса, износ, покрытия, особенности эксплуатации.

A. M. Lahin, A. N. Mikhailov

THE FEATURES FOR INTRODUCTION OF FUNCTIONAL-ORIENTED APPROACH TO GEAR PRODUCTION

The paper considers the main directions of increasing the efficiency and quality of manufacturing gears based on a functionally oriented approach. The analysis of the reasons for the decrease in the operational functions of the gears is made, ways to improve wear resistance and ensure uniform wear of the teeth during the entire life of the gears are developed. A method for the stepwise application of a coating on the working surfaces of the teeth is proposed, which makes it possible to ensure wear of the teeth within the thickness of the coating, and which makes it possible to repair worn gears.

Keywords: gears, wear, coatings, operational features

1. Введение

Зубчатые колеса широко применяются в промышленности и технике, благодаря неоспоримым преимуществам зубчатых передач среди которых: высокая нагрузочная способность, малые габариты, высокий КПД передачи, постоянство передаточного отношения и пр. Разнообразие конструктивных исполнений зубчатых передач позволяет передавать моменты между валами с параллельными, скрещивающимися или пересекающимися осями, а также для преобразования вращательного в поступательное движение в передачах шестерня-рейка. Постоянство передаточного отношения обусловило широкое применение зубчатых колес не только силовых узлах – для передачи нагрузок, но и в кинематических – в делительных механизмах, измерительных приборах и других типах прецизионного оборудования. При этом зубчатые колеса с эвольвентным профилем зуба наиболее распространены ввиду их технологичности и широким возможностям по унификации зуборезного инструмента.

Между тем зубчатые колеса с эвольвентной формой зуба обладают несколькими недостатками, которые впоследствии могут привести к нарушению надежной и безотказной работы механизма с зубчатыми передачами. Отметим основные из них:

- неравномерный механический износ зубьев вследствие различной скорости взаимного скольжения по высоте зуба, что приводит к искажению первоначальной формы зуба и последующему снижению КПД передачи, шуму в работе и заеданию механизма;

- возможность подрезания ножки зубьев для колес с малым количеством зубьев, что требует модификации профиля зуба и его отклонения от номинальной формы;

- возникновение кромочного контакта в зацеплении, что вызывает повышенную концентрацию напряжений на рабочей поверхности зуба и его последующему износу;
- образование усталостных трещин и раковин на рабочих поверхностях зубьев вследствие действия контактных напряжений в зацеплении;
- износ торцев зубьев переключаемых зубчатых колес и блоков коробок скоростей.

Работы, направленные на устранение данных недостатков являются актуальными и требуют дальнейших исследований направленных на повышение эксплуатационных свойств зубчатых колес. Поэтому **целью** данной работы является разработка методов и способов отделочной и упрочняющей обработки рабочих поверхностей зубчатых колес обеспечивающих повышение их эксплуатационных свойств в соответствии с особенностями эксплуатации. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ существующих методов достижения заданных физико-механических свойств рабочих поверхностей зубьев;
- выполнить исследование особенностей эксплуатации рабочих элементов зубьев для определения закономерностей действия эксплуатационных нагрузок на зоны рабочей поверхности зубьев;
- предложить метод обработки, позволяющий компенсировать неравномерный характер износа по рабочей поверхности зуба и позволяющий увеличить надежность и долговечность зубчатых колес.

2. Основные положения и результаты работы.

В настоящий момент для достижения заданных параметров качества зубчатых колес используется ряд конструкторских и технологических методов направленных на повышение точности, качества поверхностей и физико-механических свойств зубьев, среди которых:

- использование дорогостоящих материалов зубчатых колес с более высокими физико-механическими свойствами;
- применение сложной термической и химико-термической обработки зубчатых колес для достижения заданных физико-механических свойств зубьев;
- применение сложных наладок зуборезных станков и уникальных инструментов для получения модифицированных зубьев удовлетворяющих поставленным условиям;
- применение дополнительных операций чистовой и отделочной обработки зубьев для достижения более высокой точности зубчатых колес.

Однако указанные мероприятия значительно увеличивают себестоимость зубчатых колес и машин в целом. При этом зачастую повышение качества и физико-механических свойств достигается также для поверхностей и элементов зубчатых колес, которые не принимают непосредственного участия в работе зубчатой передачи, либо испытывают нагрузки, значительно ниже расчетных. Это связано с тем, что применяемые технологические методы обеспечивают заданные параметры качества и физико-механических свойств укрупненно, для всей детали или протяженных ее участков, тогда как действие нагрузок распространяется на короткие участки поверхностей зубьев, причем неравномерно, подчиняясь некоторым закономерностям. Это требует применения новых подходов, направленных на обеспечения заданных эксплуатационных свойств локально, в соответствии с действием эксплуатационных функций.

Данному условию удовлетворяет функционально-ориентированный подход [1], основанный на точном топологическом соответствии технологических воздействий, оказываемых на функциональный элемент детали, в соответствии с действием на него

эксплуатационных функций и особенностей эксплуатации. Использование подхода позволяет изготавливать изделия изначально адаптированные под конкретные условия эксплуатации. При этом физико-механические свойства достигаются не для деталей в целом, а для их участков и зон в соответствии с действием в них эксплуатационных функций. Это обеспечивает надежную и бесперебойную работу изделия в течение всего срока его эксплуатации.

При рассмотрении зубчатых колес как изделий, в них можно выделить следующие группы элементов [2] (рис.1)

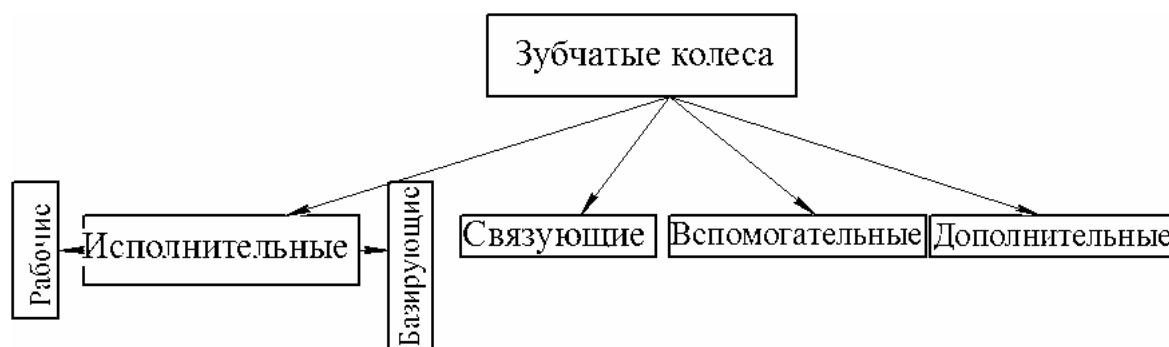


Рисунок 1. Классификация элементов зубчатых колес.

Из указанных элементов наиболее высокие требования к качеству поверхностей и физико-механических свойств поверхностных слоев предъявляются к исполнительным рабочим элементам. Свойства остальных элементов, как правило, обеспечиваются свойствами материала зубчатых колес, чего в большинстве случаев достаточно по условиям эксплуатации. К исполнительным рабочим элементам относятся:

- рабочие поверхности и поверхностные слои зубьев;
- боковые и вершинные кромки зубьев;
- объемные зоны основания и вершины зуба;
- торцы зубьев специальной формы (для переключаемых колес и зубчатых блоков).

В конкретных конструкциях зубчатых колес, их функции могут быть дополнены за счет дополнительных исполнительных рабочих элементов. В частности зубчатые колеса, совмещающие функции кулачковых муфт, или блоки с местами для размещения в них фрикционных дисков. Таким образом, расширяя функционал зубчатых колес, к ним предъявляются требования связанные с условиями эксплуатации дополнительных рабочих элементов.

Действие эксплуатационных функций на каждую группу рабочих элементов различно. Наиболее сложно действие эксплуатационных функций на рабочие поверхности и поверхностные слои зубьев, которые направлены на передачу крутящего момента. Следствием этого является действие таких особенностей эксплуатации, которые впоследствии вызывают механический износ, заедание, выкрашивание с рабочих поверхностей, деформацию зубьев, шум в работе и пр. [3].

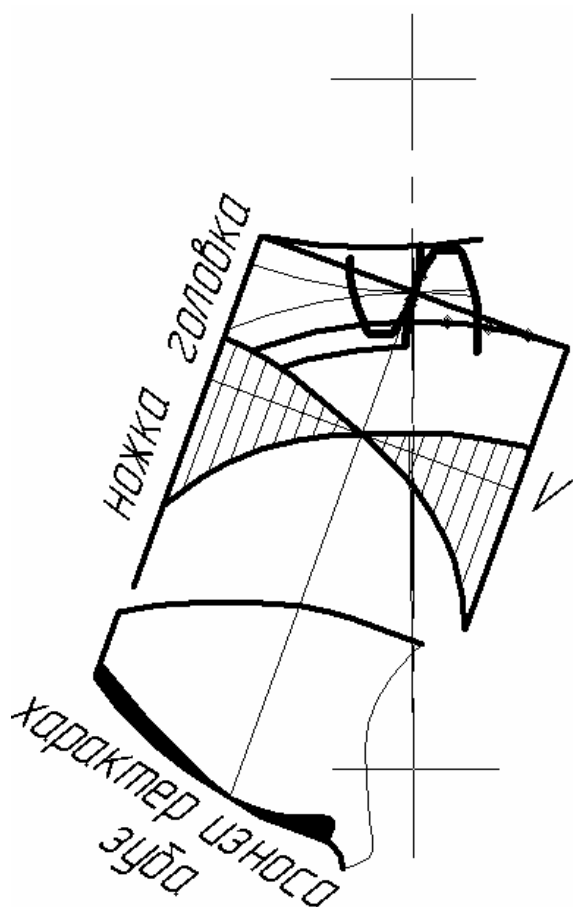


Рисунок 2. Характер износа зуба в зависимости от скорости взаимного скольжения

зубьев в соответствии с характером изменения скорости взаимного скольжения профилей. Как известно [4], износ в местах контакта профилей зубьев зависит от радиусов поверхностей в точке контакта, шероховатостей зубьев, механических свойств материала в зоне контакта, усилия зацепления и значения касательной составляющей скорости в зацеплении. Таким образом, величину износа можно вычислить на основании выражения [4]:

$$h_{1,2} = 2,25 I_{h1,2} \sqrt{P_n \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \frac{v_{ck}}{v_{1,2}} n_{1,2} z_{m1,2} t_{1,2}}$$

В данном выражении величиной, зависящей от физико-механических свойств рабочих поверхностей зубьев, и свойств смазочного материала, является интенсивность износа зубьев I_h :

$$I_h = k \left(\frac{\sigma_H}{HB} \right)^{m_1} \left(\frac{\chi}{h_{cm}} \right)^{m_2} \left(\frac{RT}{Q} \right)^{m_3} \left(\frac{v_{100}}{v_1} \right)^{m_4}$$

Чтобы исключить или уменьшить эти последствия необходимо на этапе технологической подготовки производства обеспечить свойства в соответствии с действием эксплуатационных функций и характером действия нагрузок на элементы зубьев.

Рассмотрим пример обеспечения требуемых свойств рабочих поверхностей зубьев при действии на них скоростей взаимного скольжения.

Как известно, для зубьев с эвольвентной формой профиля [3], в местах контакта пары сопряженных зубьев действует трение, которое, перекачиваясь от полюсной линии, преобразуется из трения качения в трение скольжения. Причем максимальная скорость скольжения достигается в конечной точке зацепления - в месте контакта вершины зуба с ножкой сопряженного колеса. Последующий характер механического износа зубьев соответствует графику скорости взаимного скольжения (рис. 2). Это является причиной искажения изначальной эвольвентной формы профиля зуба, что приводит к повышенному шуму работы передачи, износу и заеданию зубьев.

Для достижения равномерного износа зубьев необходимо обеспечить переменные свойства поверхностных слоев

Как видно из выражения, основным направлением по уменьшению интенсивности износа зубьев, является повышение твердости рабочих поверхностей зубьев в местах наибольшей скорости взаимного скольжения. А плавным изменением физико-механических свойств по высоте зуба можно достичь более равномерного износа зубьев, и исключить искажение первоначальной формы зуба. Это можно обеспечить за счет нанесения покрытий переменной толщины, а также с плавным изменением коэффициента трения и микротвердости от полюса зацепления к головке и ножки зуба. Основной технологической задачей является обеспечения непрерывного изменения свойств поверхностного слоя зуба по его профилю. В работе [2] рассмотрены несколько вариантов обеспечения непрерывно изменяющихся механических свойств поверхностного слоя по высоте зуба, из которых рассмотрим способ нанесения многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий на основе КИБ по зонам рабочего профиля зуба. Основным требованием к покрытию является обеспечение наибольшей микротвердости и низкого коэффициента трения в зонах у головки и ножки зуба, и плавное его уменьшение к полюсной линии. Это можно достичь последовательным нанесением нескольких слоев покрытий (рис.3). Первый слой наносится на всю поверхность зубьев, и служит для предотвращения усталостного выкрашивания зубьев вследствие действия контактных напряжений. Также данный слой требуется для обеспечения достаточной прочности адгезионной связи последующих слоев покрытия с подложкой. Данным условиям удовлетворяет покрытие из чистого титана, при этом его толщина не должна быть более 2-4 мкм. Следующий слой (слой 2) наносится на первый, но не по всей поверхности зуба, а по участкам у границ вершины и ножки зуба, где скорость взаимного скольжения наибольшая. Основным требованием к покрытию данного слоя является наибольшая износостойкость (микротвердость), и низкий коэффициент трения. Толщина этого слоя наибольшая и должна составлять 8-12 мкм. Материал покрытия данного слоя – нитрид титана, обладающий высокой микротвердостью (до 32 ГПа), и низким коэффициентом трения.

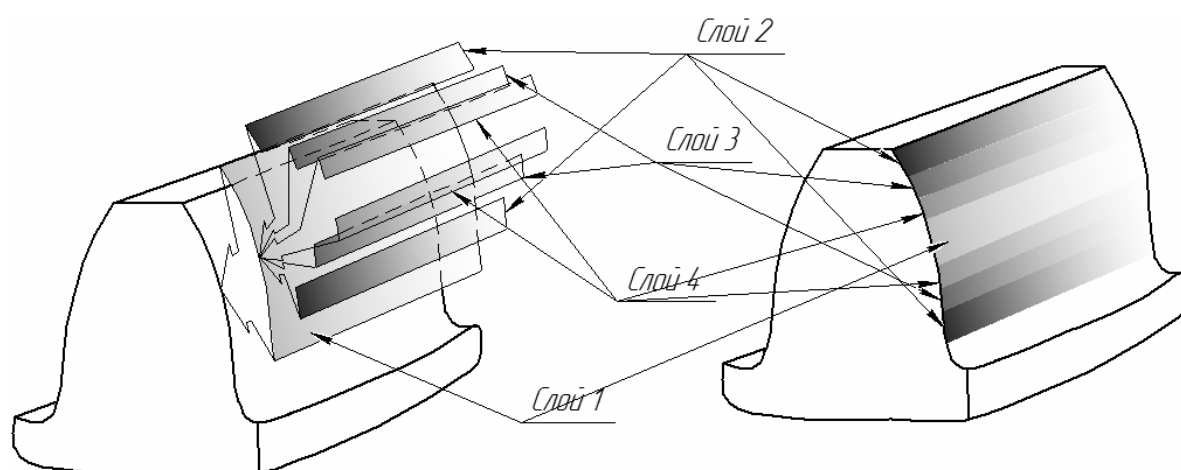


Рисунок 3. Нанесение многослойных покрытий на поверхности зубьев

Последующие слои (слои 3 и 4) должны иметь толщину 6-8 мкм и 4-6 мкм соответственно, и наносится на участки ближе к полюсной линии. Эти слои обеспечивают ступенчатое уменьшение износостойкости и увеличение коэффициента трения. Уменьшение толщины слоев 3-4 необходимо для компенсации более высокой интенсивности износа зубьев на участках с наибольшей скоростью взаимного скольжения,

что позволяет компенсировать искажение формы профиля зуба за счет износа в пределах толщин слоев покрытия, что незначительно повлияет на изначальную, эвольвентную форму профиля зуба. При этом толщина покрытия достаточно мала, и находится в пределах поля допуска на размеры зубьев данного класса точности. Использование данного способа позволяет значительно увеличить ресурс зубчатых колес и дает возможность их восстанавливать после износа отдельных участков покрытия путем очистки и нанесения новых слоев.

3. Выводы.

Таким образом, в работе выполнен анализ особенностей работы зубчатых колес и причин снижения их эксплуатационных функций. Выполнен анализ известных способов повышения надежности и долговечности зубчатых колес, при этом выделены некоторые недостатки применяемых методов. На основе анализа функций элементов зубчатых колес в соответствии с их классификацией выделены способы повышения их эксплуатационных свойств, в частности предложен способ, который позволяет значительно увеличить ресурс зубчатых колес на базе нанесения ступенчатых многослойных покрытий на рабочие поверхности зубьев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 346 с.
2. Михайлов, А. Н. Синтез технологического обеспечения производства зубчатых колес на базе функционально-ориентированного подхода / А. Н. Михайлов, А. М. Лахин, В. А. Соосар // Известия Тульского Государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд.-во: ТулГТУ, 2013. – Выпуск 8. – С. 28-36.
3. Кудрявцев, В. Н. Зубчатые передачи / В. Н. Кудрявцев – М.: «Машгис», 1957. – 263 с.
4. Когаев, В. П. Прочность и износостойкость деталей машин. Учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. – М.: Высш. школа, 1991. – 319 с. – ISBN 5-06-001905-5.
5. Лахин, А. М. Особенности нанесения функционально-ориентированных покрытий на рабочие поверхности зубчатых колес/ А. М. Лахин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Вып. 2 (57). – С. 17-23.

Поступила в редколлегию 5.02.18 г.