

УДК 621.9.044

А.М. Лахин, ассист.,  
Донецкий национальный технический университет, Украина  
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: lelax@mail.ru

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ С ЗУБЧАТЫМ ВЕНЦОМ

*В работе рассмотрены основы применения функционально-ориентированного подхода для повышения качества исполнительных рабочих элементов зубчатых колес. Выполнен анализ причин снижения эксплуатационных характеристик, связанных с износом рабочих поверхностей зубьев, предложены схемы технологических воздействий для обеспечения требуемых свойств зон у рабочего профиля зуба, технологические методы обеспечения данных свойств на основе нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий.*

**Ключевые слова:** зубчатое колесо, технология, качество, функционально-ориентированный подход, вакуумные ионно-плазменные покрытия.

### Введение

Одной из основных задач современного машиностроения является повышение качества изделий, требования к которым постоянно увеличиваются наряду с повышением требований к эффективности производства и снижения себестоимости готовых изделий. Вместе с тем известные прогрессивные организационно-технологические формы производства изделий машиностроения, среди которых типовые, групповые и модульные [1], имеют ряд ограничений по изготавливаемым изделиям, а также не учитывают особенностей эксплуатации различных элементов деталей в машине или технологической системе.

Изделия с зубчатыми передачами являются наиболее широко распространенными силовыми механизмами, поскольку зубчатые передачи в наибольшей степени удовлетворяют требованиям к силовым передачам. Вместе с тем, для обеспечения конкурентоспособности данных изделий, к зубчатым колесам предъявляются постоянно увеличивающиеся требования, связанные с увеличением долговечности, снижению шума в работе, снижению габаритов при передаче высоких крутящих моментов, возможности работы в условиях сухого трения и пр. Поэтому в настоящий момент при конструировании и изготовлении зубчатых колес, требуются новые подходы, заключающиеся как в совершенствовании конструкции, так и применении новых подходов в создании технологического обеспечения, способствующих повышению их эксплуатационных характеристик.

Одним из новых направлений при создании технологического обеспечения производства изделий, являются функционально-ориентированные технологии [2], целью которых является обеспечение свойств элементов изделия соответствующих условиям их эксплуатации в машине или технологической системе.

В настоящее время основными направлениями развития технологии производства зубчатых колес являются следующие:

- использование модификации зубьев с целью повышения эксплуатационных свойств зубчатой передачи [1];

- применение термической и термо-химической обработок, с целью повышения износостойкости рабочих поверхностей зубчатых колес [2];
- повышение производительности изготовления зубчатых колес за счет интенсификации процесса обработки путем совершенствования инструмента и оборудования.

Данные направления развития технологии производства и повышения качества изделий с зубчатым венцом рассматривают главным образом возможности получения изделия согласно требованиям предъявляемым при конструировании узлов с зубчатыми передачами. При этом не всегда в полной мере учитываются все реальные условия эксплуатации, а готовые изделия, как правило, изготавливаются с несколько завышенными физико-механическими свойствами отдельных элементов, которые участвуют либо частично, либо вовсе не участвуют в процессе работы механизма или узла. В свою очередь исполнительные рабочие элементы, в данном случае элементы зубчатого венца, обычно воспринимают большую часть рабочих нагрузок, а их свойства как правило не учитывают всех условий эксплуатации, что приводит к преждевременному снижению эксплуатационных характеристик и выходу из строя изделия. Таким образом, свойства элементов изделий с зубчатым венцом не обеспечивают равномерного снижения эксплуатационных характеристик в течении срока эксплуатации.

Цель данной работы: повышение качества и эффективности производства изделий с зубчатым венцом, за счет разработки структурного и технологического обеспечения функционально-ориентированных технологий.

На основании поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ условий работы элементов зубчатых колес с точки зрения выполнения эксплуатационных функций, разработать классификации элементов по эксплуатационным признакам;
- разработать схему технологического воздействия для обеспечения свойств элементов зубчатого профиля согласно действию эксплуатационных функций в зоне зацепления;
- предложить возможные варианты реализации данной схемы для рабочих элементов зубчатых колес с целью обеспечения равномерной износостойкости рабочего профиля зуба.

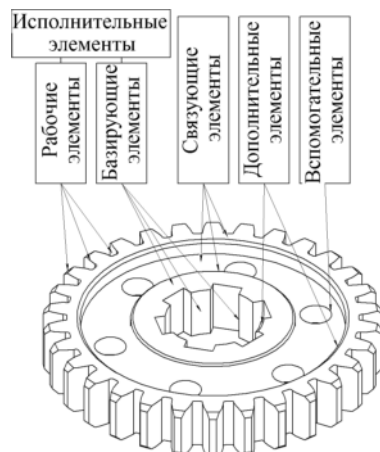


Рис. 1. Классификация элементов зубчатых колес по функциональному назначению

## 2. Основное содержание и результаты работы

Общее многообразие конструктивных исполнений зубчатых колес [4], позволяет определить решаемые конструктивные задачи и служебное назначение, решаемые их применением. При этом каждое зубчатое колесо, независимо от типа, представляет собой совокупность следующих групп элементов (рис. 1): исполнительных (рабочих и базирующих), связующих, вспомогательных и дополнительных, из которых только исполнительные рабочие элементы выполняют функции связанные со служебным назначением зубчатых колес, а именно, передача крутящего момента.

Рассмотрим основные условия работы зубчатых колес, и связанные с ними причины снижения эксплуатационных характеристик (рис. 2).



Рис. 2. Основные причины снижения эксплуатационных характеристик зубчатых колес

Шум в работе зубчатых колес обусловлен возникновением ударов в процессе зацепления, либо трением вследствие взаимного скольжения профилей. Удар возникает в начале зацепления пары зубьев и наиболее характерен для прямозубых колес, в которых зубья входят в зацепление одновременно по всей длине. Дополнительным фактором, определяющим уровень шума, является возможность возникновения кромочного контакта в зубчатом зацеплении, в результате которого возникают удары при контактах боковых или вершинных кромок с поверхностью рабочего профиля зуба. Взаимное скольжение профилей возникает вследствие разницы тангенциальной составляющей скоростей в точке контакта зубьев шестерни и колеса, в результате чего возникает трение скольжения между ними, сопровождающее шумом.

Износ наблюдается главным образом у рабочих профилей зубьев, и по характеру проявления может быть следующих видов:

- абразивный износ вследствие трения рабочих профилей, а также попадания мелких частиц из окружающей среды в зону зацепления;
- выкрашивание поверхностного слоя рабочего профиля вследствие контактных напряжений и гидродинамических явлений в процессе смазки;
- возникновение усталостных трещин на рабочем профиле от действия контактных напряжений и динамических нагрузок различных по величине и направлению;
- деформация поверхностного слоя в результате различия профилей зуба шестерни и колеса, вследствие кромочного контакта и неравномерного распределения нагрузок по длине зуба;
- коррозия и окисление зубьев вследствие работы в агрессивной среде.

Заедание зубчатых колес возникает в результате:

- отклонения формы рабочих профилей зубьев от теоретической;
- попадания посторонних материалов и продуктов износа в зону зацепления;
- перекоса осей колеса и шестерни;
- «схватывания» частиц металла с поверхностного слоя рабочего профиля зуба, профилем сопряженного колеса, и как результат возникновение выступов и борозд на поверхностях сопряженных зубьев.

Поломка зубьев является причиной выхода из строя зубчатых колес, возникает главным образом в результате действия повышенных изгибных напряжений у ножки зуба. Поломка может сопровождаться предварительной пластической деформацией, вызывая заедание колес, после чего носит усталостный характер. Также поломка может быть следствием удара с силой, превышающей допускаемую [5].

Согласно основным положениям функционально-ориентированных технологий, разработка технологического процесса должна осуществляться по уровням глубины технологии, которые предусматривают 7 уровней деления: изделия (детали), части,

составляющие частей, зоны, макрзоны, микрзоны и нанозоны [6]. Зубчатое колесо, на основании данного деления можно представить в виде графа (рис. 3). Здесь представлено деление изделия (зубчатого колеса) до уровня зон исполнительных рабочих элементов. На данном уровне выделяются элементы, свойства которых определяют основные эксплуатационные характеристики зубчатого колеса, а также позволяют определять вид, тип характер и структуру технологических воздействий для достижения свойств требуемых по условиям эксплуатации.

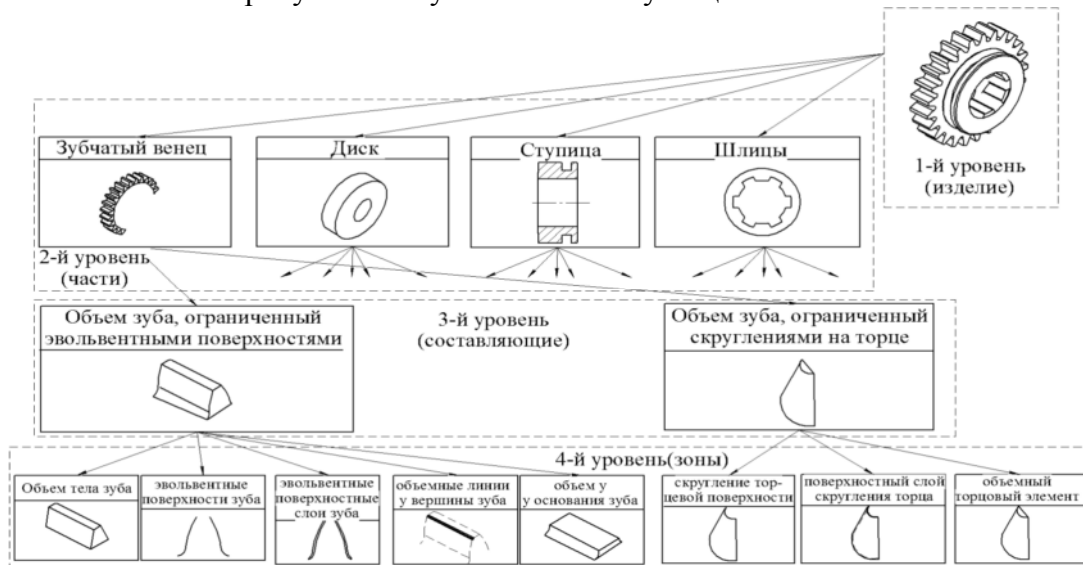


Рис. 3. Деление переключаемого зубчатого колеса по уровням глубины технологии

Требования к исполнительным рабочим элементам предполагают высокую износостойкость профиля зуба, низкий коэффициент трения к сопрягаемым зубьям, низкую шероховатость, высокую точность элементов зубчатого венца, точность

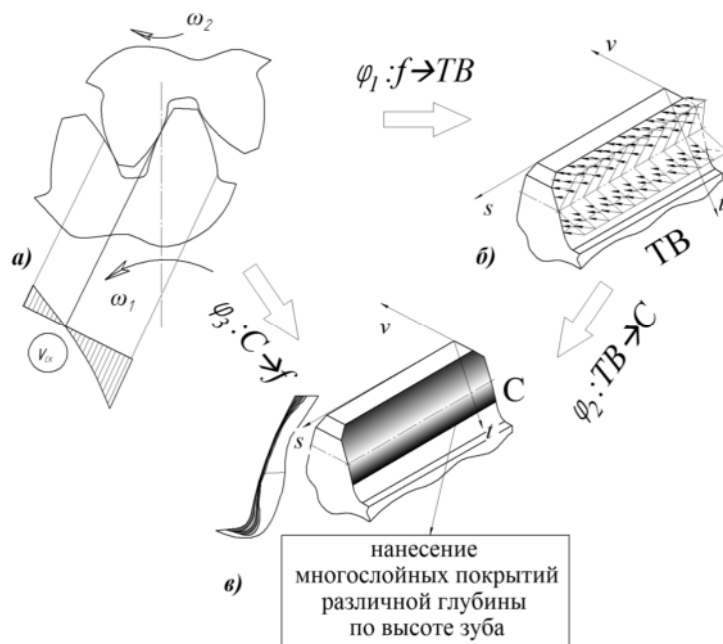


Рис. 4. Реализация технологических воздействий (б) для обеспечения свойств зубчатого профиля (в) в зависимости от условий эксплуатации

взаимного расположения относительно базирующих элементов, а также низкий шум в работе и высокую долговечность. Причем управление свойствами рабочих элементов зубчатых колес связано с действием переменных эксплуатационных функций. Рассмотрим конкретные условия эксплуатации, вызванные взаимодействием пары сопряженных зубьев. В зацеплении зубчатых колес с эвольвентным профилем, в контакте зубьев шестерни и колеса, возникает трение скольжения, скорость которого изменяется от головки к ножке зуба. Это

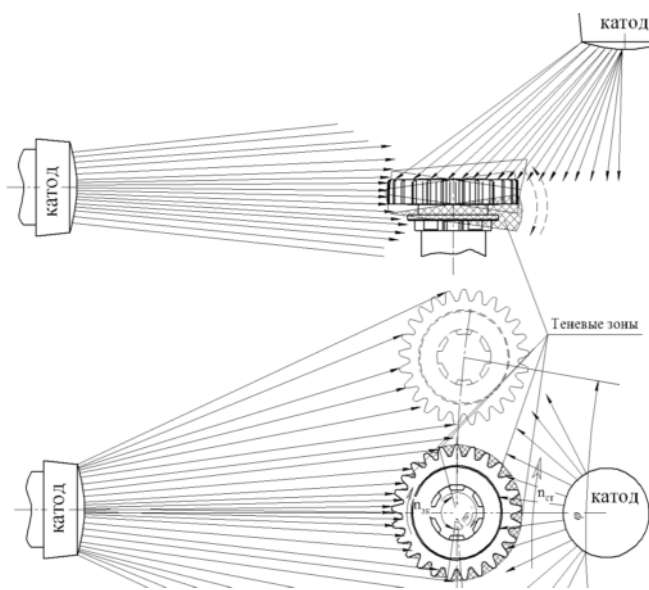


Рис. 5. Теневые зоны в процессе нанесения покрытий на рабочие элементы зубчатых колес

наибольшей скоростью взаимного скольжения. Вариантом подобных технологических воздействий является нанесение многослойных износостойких покрытий переменной толщины, с наибольшей толщиной покрытия в зонах у головки и у ножки зуба (рис. 4).

Среди возможных вариантов нанесения покрытий, для рабочих элементов зубчатых колес особый интерес представляют вакуумные ионно-плазменные покрытия, поскольку данный метод позволяет достигать высоких физико-механических свойств при достаточно малой толщине покрытия, практически не нарушающей размерную точность, с возможностью использования в качестве материала покрытия широкого спектра материалов.

Достижение заданных параметров наносимого покрытия возможно путем обеспечения требуемой кинематики движения заготовок относительно источников напыления (катодов). При этом для равномерного доступа рабочих поверхностей зубчатых колес к потоку напыления и устранения постоянных теневых зон, приводящих к неравномерности толщины покрытия, требуется постоянное перемещения заготовок в процессе нанесения покрытий. Исходя из анализа положения зубчатых колес относительно катодов в процессе нанесения покрытий (рис. 5), можно выделить следующие группы теневых зон: постоянные, включающие участки колес находящиеся в теневых зонах в течении всего цикла нанесения покрытий; и периодические, включающие участки в которых теневые зоны периодически обращаются к потоку напыления.

Обеспечение закономерного изменения толщины покрытия на участках рабочего профиля зуба в соответствии с изменением скорости взаимного скольжения (рис. 4), возможно: как за счет создания «искусственных теневых зон» направленных на участки, требующие меньшую толщину покрытия, так и путем сообщения движения зубчатым колесам с заданной закономерностью по отношению к катодам. В первом случае в вакуумную камеру для нанесения покрытий вводятся элементы, служащие для отражения потока от зон, требующих меньшую толщину покрытий, что предполагает

вызвано различием тангенциальных составляющих вектора скорости точек зубьев шестерни и колеса, учитывая равенство нормальных составляющих скоростей шестерни и колеса в точках контакта, что является условием непрерывности зацепления. Поэтому при однородных свойствах поверхностных слоев зубьев, наибольшая интенсивность износа ожидаема на участках профиля зуба у головки и у ножки. Таким образом, реализация технологических воздействий должна учитывать данную особенность, предусматривая компенсацию износа и заедания за счет снижения коэффициента трения и повышения микротвердости на участках с

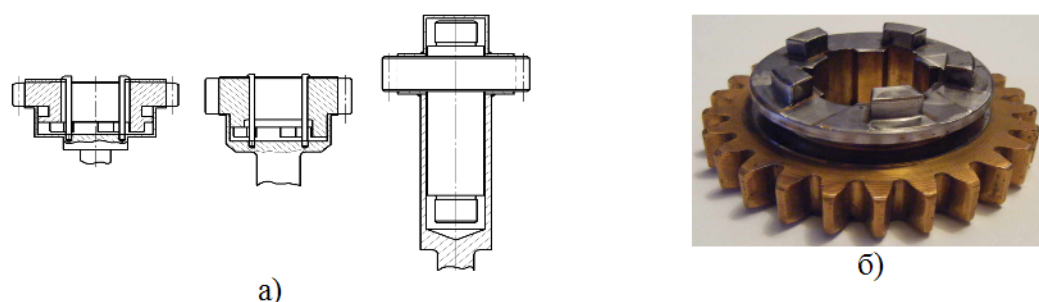


Рис. 6. Оснастка для предохранения участков, не требующих покрытий (а), и результат нанесения покрытий на рабочие элементы зубчатого блока (б)

движение данных элементов вместе с зубчатыми колесами в процессе нанесения, поскольку нанесение покрытий производится при непрерывной смене положения заготовок относительно катодов с целью поочередного нанесения покрытий на все участки зубчатого венца. Во втором случае отражение потока напыления осуществляется элементами самих зубчатых колес за счет непрерывной смены их положения в вакуумной камере, при наличии дополнительных качательных движений относительно осей, перпендикулярных оси вращения колеса [7].

Также в процессе нанесения покрытий возникает задача предохранения участков колес, не требующих покрытий, однако имеющих высокую размерную точность полученную на этапах механической обработки. Предохранение данных участков (торцев, ступиц, отверстий), возможно путем использования специальной оснастки (рис. 6), устанавливаемой в камеру вместе с заготовками зубчатых колес. Однако изготовление данной оснастки целесообразно только при достаточно больших партиях зубчатых колес одного типоразмера, кроме того использование данной оснастки позволяет предохранять достаточно протяженные и простые поверхности, главным образом сочетание плоских и цилиндрических. В случаях, если возникает задача предохранения сложных криволинейных и труднодоступных поверхностей, возможно использование предохранительных масок из сажи, которые впоследствии смываются после нанесения покрытий.

Результаты нанесения покрытий на рабочие элементы зубчатых колес с использованием защитных масок для участков не требующих покрытий представлены графиками изменения толщины покрытия и микротвердости в зависимости от высоты образующей зуба (рис. 7). Данные графики позволяют выделить тенденцию к уменьшению толщины покрытия на профиле у ножки зуба, что свидетельствует о наиболее вероятном образовании теневых зон в данных участках.

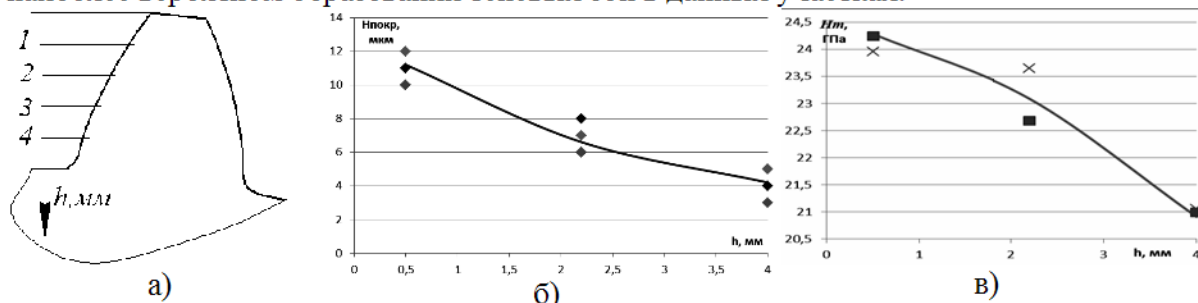


Рис. 7. Результаты измерения толщины покрытия и микротвердости по высоте зуба после нанесения покрытий: а) точки измерения, б) график изменения толщины покрытия, в) график изменения микротвердости

**Заключення**

1. В роботі виконана класифікація і аналіз умов роботи зубчатих колес, які визначають основні причини зниження експлуатаційних характеристик і вихода з строю зубчатих колес.
2. Представлена класифікація елементів зубчатих колес по функціональному призначенню, а також етапи поділу даних елементів по рівню глибини технології.
3. Розглянуті умови роботи робочих елементів зубчатих колес і виникаючі при цьому експлуатаційні функції, на основі яких можливо визначити структуру технологічних впливів. Згідно умов роботи пар спів'язаних зубців, розроблені схеми технологічного впливу, а також варіанти реалізації різних по структурі властивостей.
4. Для можливості реалізації властивостей поверхневих шарів зубчатих колес в залежності від швидкості взаємного ковзання робочих профілів по висоті зуба, запропоновані варіанти технологічних впливів на основі нанесення вакуумних іонно-плазмових покриттів.

**Список літератури:**

1. Косарев О. И. Модифікація зубців косозубих циліндричних передач для зниження вібрацій з зубцевою частотою //Вестник машиностроения, М.: Машиностроение: 2009 г. - №2. - С. 7-9.
2. Веселовский А.А. Підвищення зносостійкості зубчатих колес з високопрочного чугуна термодифузійним ванадіюванням. //Вестник машиностроения, М.: Машиностроение: 2012 г. - №. - С. 52-54.
4. Производство зубчатых колес. Справочник. С.Н. Калашников, А.С. Калашников, Г.И. Коган, и др. Под. ред. Б.А.Тайца. - Изд. 3-е, перераб. и допол.– М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
5. Кудрявцев В.Н. Зубчатые передачи. - М.: «Машгис», 1957. – 263 с.
6. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2008. - 346 с.
7. Лахин А.М., Михайлов А.Н., Товарчи И. С Технологические основы повышения качества исполнительных элементов зубчатых колес на базе функционально-ориентированного подхода// Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. Вип. 40. С. 105 – 112. ISSN 2073-3216.

Надійшла до редакції 04.02.2013.

**О.М. Лахін**

**ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ  
ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОГО  
ПІДХОДУ У ВИРОБНИЦТВІ ВИРОБІВ ІЗ  
ЗУБЧАСТИМ ВІНЦЕМ**

*В роботі розглянуто основи використання функціонально-орієнтованого підходу для підвищення якості робочих елементів зубчастих коліс. Виконано аналіз причин зниження експлуатаційних характеристик, запропоновано схеми технологічних дій а також технологічні методи забезпечення даних властивостей на основі нанесення вакуумних іонно-плазмових покриттів.*

**Ключові слова:** зубчасте колесо, технологія, якість, функціонально-орієнтований підхід, вакуумні іонно-плазмові покриття

**Lahin A.M.**

**FUNCTION-ORIENTED APPROACH IN  
THE MANUFACTURING OF PRODUCTS  
WITH THE GEAR**

*The paper considers the function-oriented approach to improve the quality of the working parts of gears. The causes of declining in performance associated with the wear and tear of tooth surfaces are analysed.*

**Keywords:** gear, technology, quality, function-oriented approach, vacuum ion-plasma coatings