

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА БАЗЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

Лахин А.М., Михайлов А.Н., Фомин И.А. (ДонНТУ, Донецк, Украина)

**Аннотация.** В работе предложены варианты реализации технологического процесса производства зубчатых колес на основе функционально-ориентированного подхода. Выполнена классификация элементов зубчатых колес по функциональному назначению; представлена структура построения зубчатых колес по функциональным элементам, включающая совокупность исполнительных (рабочих и базирующих), связующих, вспомогательных и дополнительных элементов. Для исполнительных рабочих элементов – кромок зубьев и поверхностей зубьев, предложены варианты обеспечения свойств, требуемых по условиям эксплуатации. Предложены варианты технологических операций для линий кромок зубьев и поверхностных слоев профиля зубьев, обеспечивающих заданные свойства данных элементов в зависимости от особенностей эксплуатации.

**Ключевые слова:** зубчатые колеса, технологический процесс, зацепление.

### 1. Введение.

Зубчатые колеса являются основными элементами силовых передач в машиностроении. К ним предъявляется ряд требований по точности и надежности основных элементов в зависимости от их служебного назначения. Наиболее ответственные и сложные в изготовлении являются элементы зубчатого венца – (исполнительные рабочие элементы [4]), которые требуют большого объема механической и других видов обработки для обеспечения заданных эксплуатационных функций зубчатых колес. Поэтому при создании конструкторского и технологического обеспечения производства зубчатых колес, должны учитываться реальные условия эксплуатации рабочих элементов.

Вопросы производства и повышения качества зубчатых колес подробно рассмотрены в работах [5, 6, 7], из которых видно, что развитие технологии производства и повышения качества зубчатых колес идут в следующих основных направлениях:

- повышение несущей способности зубчатых колес за счет увеличения пятна контакта в зубчатом зацеплении;
- снижения объема металлообработки за счет формирования зубьев на стадии получения заготовок зубчатых колес;
- применения прогрессивного режущего инструмента на зубообрабатывающих операциях.

В данных работах рассматривается общая рационализация и оптимизация, технологических процессов производства зубчатых колес за счет совершенствования наиболее трудоемких операций – зубообработки. При этом не принимается во внимание степень выполнения эксплуатационных функций элементов участвующих в зубчатом зацеплении, рассматривая зубчатые венец в целом, как элемент с

однородными свойствами, без возможности локального управления свойствами в местах выполнения определенных эксплуатационных функций.

Функционально-ориентированный подход, рассмотренный в работах [1, 2, 3], представляет собой технологии, позволяющие адаптировать изделие при его изготовлении к особенностям их эксплуатации в машине или технологической системе.

**Цель** данной работы – повышение эксплуатационных свойств рабочих элементов зубчатых колес на базе функционально-ориентированного подхода.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**: выполнить анализ элементов зубчатых колес по функциональному назначению; предложить схемы технологического воздействия на рабочие элементы зубчатых колес для выполнения заданной структуры функций, предложить варианты обеспечения эксплуатационных функций для рабочих элементов зубчатых колес.

## 2. Основное содержание и результаты работы.

Зубчатые колеса представляют собой совокупность связанных между собой элементов, которые объединяются в группы в зависимости от функций, выполняемым в процессе эксплуатации. Согласно классификации элементов зубчатых колес [4], их можно разделить на исполнительные рабочие, исполнительные базирующие, связующие, вспомогательные и дополнительные. При этом структуру зубчатого колеса по элементам, можно представить следующей схемой (рис. 1).

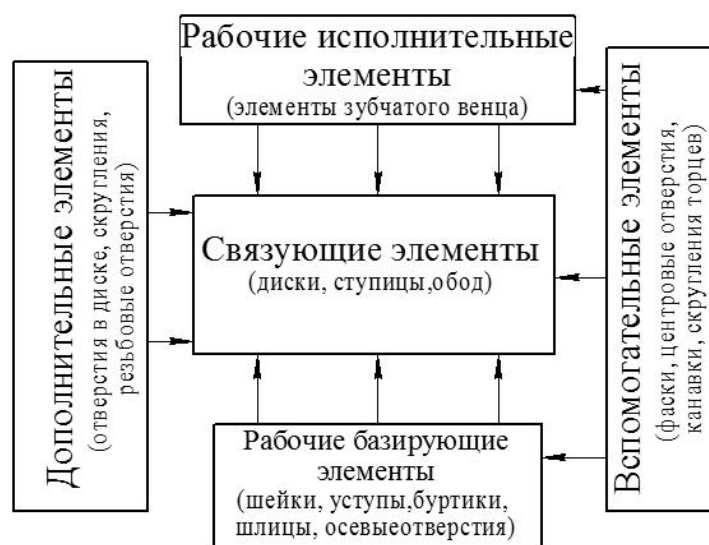


Рис. 1. Структура зубчатого колеса по элементам

Исполнительные рабочие элементы зубчатых колес представляют собой совокупность точек, линий, поверхностей и объемов, составляющих элементы зубчатого венца. При этом линейные, поверхностные и объемные элементы выполняют эксплуатационные функции по назначению зубчатых колес: объемные линии кромки вершины зуба, как правило, являются участком окончания (начала) зацепления, и воспринимают усилие в контакте с поверхностью сопряженных зубьев; поверхности зубчатого профиля являются участками зацепления сопряженной пары зубьев, непосредственно на поверхностях зубчатого профиля возникает трение, вызванное взаимным скольжением профилей. В поверхностном слое в процессе работы возникают контактные напряжения, вызванные давлением сопряженных зубьев. Объемные

участки в теле зуба воспринимают изгибные напряжения, возникающие вследствие окружной силы в зубчатом зацеплении.

Рассмотрим образование и варианты кромочного контакта в зубчатом зацеплении. (рис. 2).

При работе зубчатой передачи, шестерня 1 входит в сопряжение с колесом 2 при действии окружной силы в зацеплении  $F_t$ , вращения  $n$  и осевого перемещения  $s$ , возможны три основных варианта распределения удельной нагрузки.

В первом случае при отсутствии перекаса осей зубчатый колес (рис. 2, а), при  $\omega=0$  (идеальный случай). При данном зацеплении кромочный контакт присутствует в конце зацепления зубчатой пары под действием равномерно действующей по кромке вершины зуба, длиной  $l$ , между точками  $a$  и  $b$ , удельной нагрузки  $q$ , под действием окружной силы  $F_t$ . При этом возникает равномерный износ кромки вершины зуба.

Во втором случае контакта шестерни 1 и колеса 2, существует положительный перекас продольных осей  $\omega>0$  (рис 2, б). При таком взаимодействии у левого торца зубчатого венца колеса 2, возникает кромочный контакт на участке шестерни  $a_1b_1$ . При этом контактная зона действия удельной нагрузки, вследствие упругих и пластических деформаций распространяется на длину  $l_1$ . В данном случае на боковую кромку зуба и соприкасающуюся с ней поверхностью зубчатого колеса, действует максимальная удельная

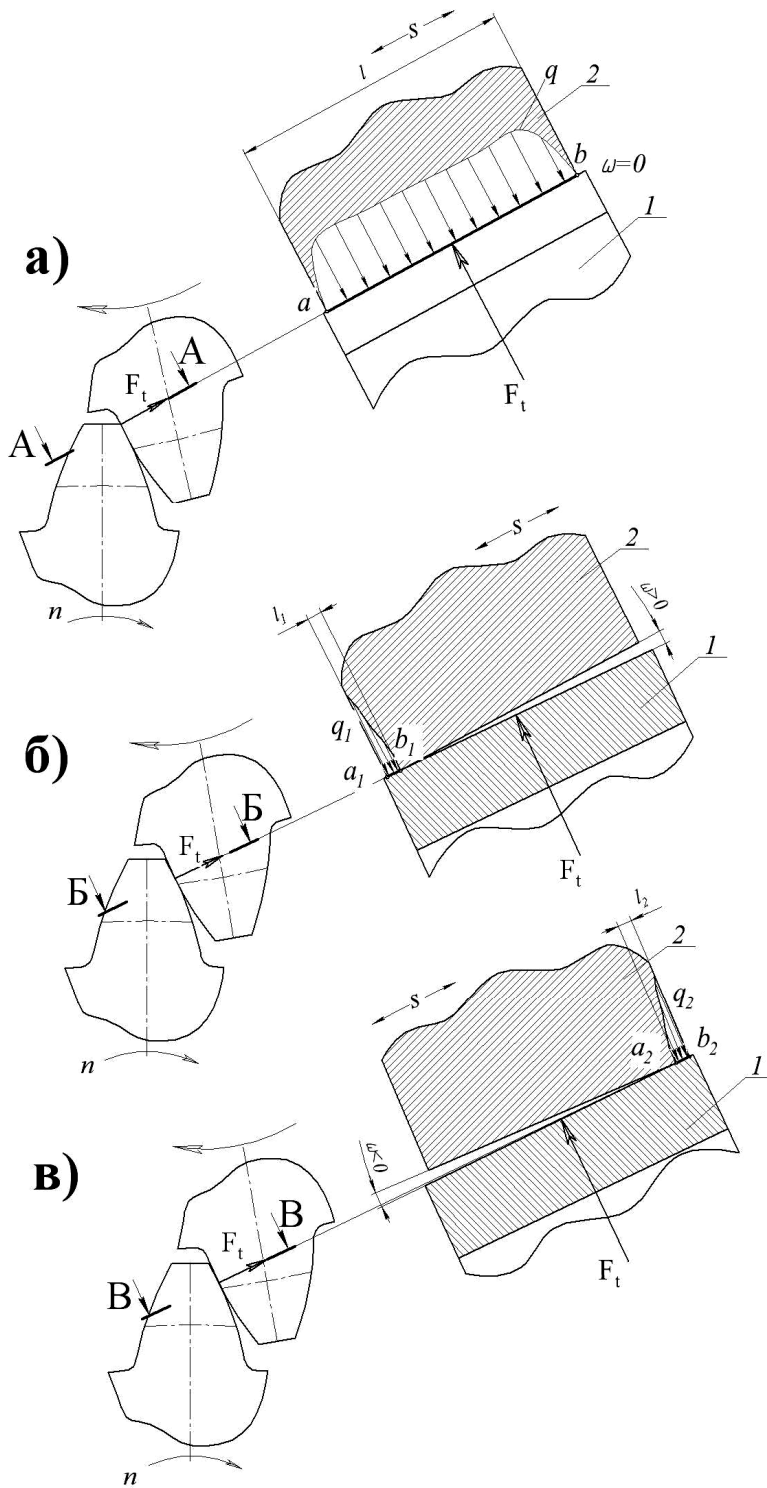


Рис. 2. Схема нагружения зубьев: а – без перекаса осей; б – с положительным перекасом; в – с отрицательным перекасом

нагрузка. При вращении  $n$  и осевом перемещении  $s$  зубчатого колеса 1 и шестерни 2, происходит неравномерный износ поверхностей.

В третьем случае (рис.2,в), в зоне сопряжения зубчатой шестерни и колеса существует отрицательный перекося осей  $\omega < 0$ . При таком взаимодействии зубчатой пары, у правого торца зубчатого венца колеса, возникает кромочный контакт на участке шестерни  $a_2b_2$ . Вследствие упругих и пластических деформаций, контактная зона распространяется на величину  $l_2$ . В данном случае на правую боковую кромку зуба и соприкасающуюся с ней поверхностью зубчатого колеса, действует максимальная удельная нагрузка. При вращении  $n$  и осевом перемещении  $s$  зубчатого колеса 1 и шестерни 2, происходит неравномерный износ поверхностей.

В реальных условиях, рассмотренные случаи комбинируются, что вызвано точностью изготовления сопряженных пар зубьев. Это приводит к преждевременному, неравномерному износу или разрушению зубчатых колес, что является следствием кромочного контакта в зацеплении зубчатых колес.

Схема действия нагрузки от сил в зацеплении, действия контактных напряжений в зонах вершинных кромок, а также варианты обеспечения свойств вершинных кромок, представлены на рис. 3. При этом кромки рассматриваются как объемные линии, прилегающие к вершинным кромкам зубьев и поверхностям, прилегающим к ним.

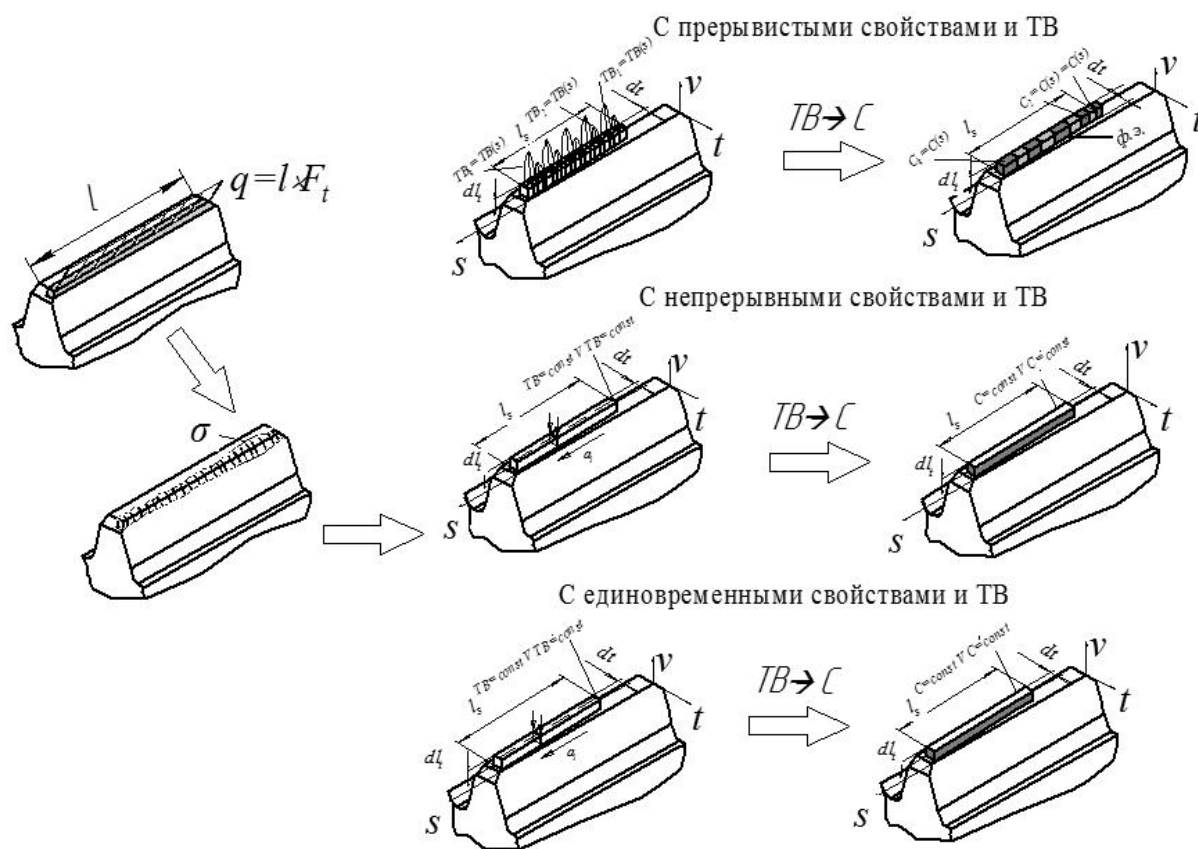


Рис. 3. Формирование свойств вершинных кромок зубьев

Формирование эксплуатационных свойств функционального элемента (объемной линии), осуществляется на основе следующих схем технологического воздействия [1]:

- для обеспечения прерывистых свойств функционального элемента в направлении линии  $s$ , с шириной линии  $dl_t$  и толщиной  $dl_v$ :

$$TB_1^{ПО} \rightarrow \bigvee_{s=1}^k \{ (m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v}), (dl_s \times dl_t \times dl_v) \}$$

где  $k$  – количество точек в направлении  $s$ .

- для обеспечения непрерывных свойств функционального элемента в направлении линии  $s$ , с шириной линии  $dl_t$  и толщиной  $dl_v$ :

$$TB_2^{ПО} \rightarrow \bigwedge_{s=1}^{\infty} \{ (m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v}), (dl_s \times dl_t \times dl_v) \}$$

- для обеспечения единовременных свойств функционального элемента в направлении линии  $s$ , с шириной линии  $dl_t$  и толщиной  $dl_v$ :

$$TB_3^{ПО} \rightarrow \bigwedge_{s=1}^{\infty} \{ (m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v}), dl_s \} \times dl_t \times dl_v$$

В представленных схемах технологических воздействий, элементы кортежей  $(m_{s,t}, e_{s,t}, i_{s,t})$  и  $(m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v})$ , представляют собой технологические воздействия материального, энергетического и информационного характера, могут варьироваться в зависимости от пространственных и временных параметров

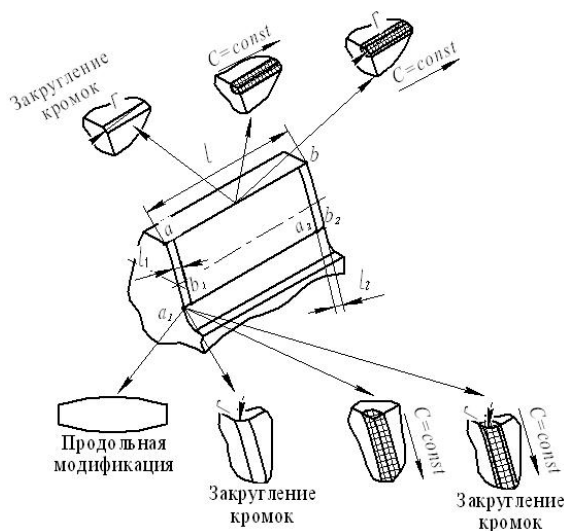


Рис. 4. Варианты обеспечения свойств на боковых и вершинных кромках зубьев

интенсивности на величину  $a_1b_1$  и  $a_2b_2$ ;

- совместное закругления боковых кромок зубчатого венца радиусом  $r$  и обеспечение переменных свойств по боковым кромкам зубчатого венца, за счет технологических воздействий на величину  $a_1b_1$  и  $a_2b_2$ ;
- закругление вершинных кромок зубьев радиусом  $r$ ;
- обеспечение переменных свойств на вершинной кромке зуба ;

Для обеспечения заданных эксплуатационных свойств зубчатых колес, следует предусматривать конструкторские и технологические мероприятия по обеспечению необходимых свойств элементам зубчатых колес. В частности, на рис. 4 представлены основные варианты обеспечения требуемых свойств на кромках зубчатых колес:

- продольной модификации зубьев, что обеспечивает исключение бокового кромочного контакта;
- закругления боковых кромок радиусом  $r$ , что обеспечит контакт поверхности зубьев с плавно изогнутой поверхностью;
- обеспечение переменных свойств по боковым кромкам зубчатого венца путем технологических воздействий различной

- обеспечение закругления вершинных кромок зубьев радиусом  $r$  и переменных свойств по вершинным кромкам зубьев.

Данные способы управления свойствами кромок зубьев, могут быть реализованы различными методами механической, физико-механической, термической и комбинированной обработки, к которым относятся механическая лезвийная обработка, местная закалка в зонах кромок с различной интенсивностью нагрева и охлаждения, направленная пневмоструйная обработка, комбинированная лезвийная обработка и обкатка, нанесение покрытий в местах кромок.

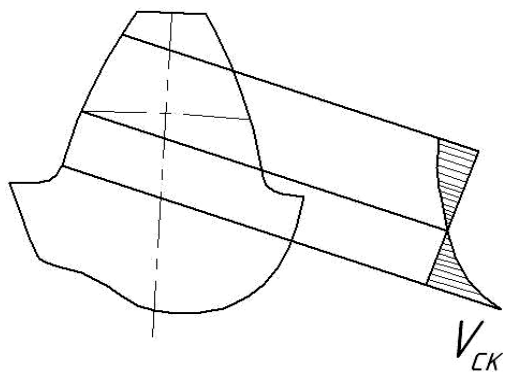


Рис. 5. Действие взаимного скольжения профилей в зубчатом зацеплении

Рассмотрим возможность управления свойствами рабочих исполнительных элементов зубчатых колес – рабочих поверхностей зубьев. Условия эксплуатации предполагают изменение взаимного скольжения профилей зубьев по величине эвольвентной поверхности от головки зуба к полюсу зацепления, и от полюса зацепления к ножке зуба. При этом максимальное скольжение и, как следствие максимальный износ при однородных свойствах материала зубчатого колеса, возникает на ножке зуба, а в полюсе зацепления он равен 0 (рис. 5). Действие взаимного скольжения зубчатых профилей меняется в зависимости от соотношения чисел зубьев

зубчатой передачи, коэффициента смещения исходного контура и угла наклона зубьев.

Обеспечение равномерных эксплуатационных свойств поверхности зубчатого профиля в зависимости от условий эксплуатации, достигается при уменьшении коэффициента трения и увеличении стойкости к абразивному износу в соответствии с

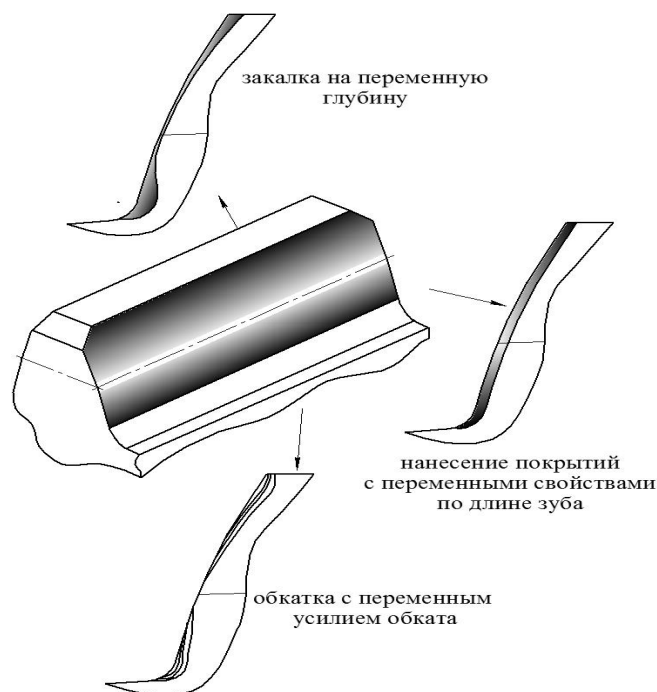


Рис. 6. Варианты обеспечения изменяющихся свойств по эвольвентной поверхности

графиком скорости взаимного скольжения профилей. При этом возможны следующие варианты технологических воздействий на рабочие поверхности зубьев: (рис.6)

- термическая обработка на различную глубину по величине зубчатого профиля, при переменном насыщении поверхностного слоя углеродом (при химико-термической обработке);
- обкатка рабочих поверхностей зубьев с различным усилием обката;
- нанесение покрытий с переменными свойствами в различных местах зубчатого профиля.

В первом случае используется термическое упрочнение поверхностного слоя зубчатого профиля на переменную глубину. Этот вариант позволяет увеличить

износостойкость участков с наибольшим взаимным скольжением в местах головки и у ножки зуба. В полюсе зацепления упрочненный слой имеет наименьшую глубину – достаточную для компенсации контактных напряжений. Для возможности термообработки зубчатых колес, изготовленных из низкоуглеродистых сталей, необходимо насыщение поверхностного слоя углеродом, что достигается цементацией. При этом, в местах зубчатого профиля с наибольшими скольжениями профилей, требуется более интенсивное насыщение поверхностного слоя углеродом, что позволит увеличить стойкость к абразивному изнашиванию.

Во втором случае, рабочие поверхностные слои зубчатого профиля подвергаются наклепу разной степени за счет воздействия обкатного инструмента с различной силой обката. При этом усилие обката имеет максимальное значение в местах головки и ножки зуба (в местах наибольшего взаимного скольжения), что обеспечивает им наибольшую прочность и износостойкость. Данный технологический процесс возможен с использованием специального обкатного инструмента, движение и усилие которому сообщается по копиру.

В третьем случае используется нанесение покрытий, в том числе многослойных, на зубчатые поверхности. Свойства наносимых покрытий определяется скоростью взаимного скольжения в местах контакта пар зубьев. В местах с наибольшим взаимным скольжением, свойства наносимых покрытий должны обеспечить высокую стойкость к абразивному изнашиванию и иметь низкий коэффициент трения, а у полюса зацепления имеет смысл наносить покрытия с более высокой износостойкостью в следствии контактных напряжений. Нанесение покрытий возможно несколькими способами, из которых наиболее эффективно вакуумное ионно-плазменное нанесение, поскольку при относительно низкой себестоимости технологического процесса, позволяет обеспечить требуемые свойства элементам изделия. Для нанесения покрытий требуемых свойств только к определенным зонам зубчатого колеса возможно применение предохранительных масок, которые закроют доступ к элементам не требующих данного технологического воздействия.

Для обеспечения требуемых свойств рабочих элементов зубчатых колес, также могут использоваться комбинации данных технологических методов, или их комбинации с традиционными методами отделочной и отделочно-упрочняющей обработки.

### **3. Выводы.**

Таким образом, в работе выполнен анализ элементов зубчатых колес по функциональному назначению, где установлена структура построения зубчатых колес. На основании условий работы исполнительных рабочих элементов зубчатых колес, разработаны схемы технологического воздействия на объемную линию вершинной кромки и поверхности зубчатого профиля. Выполнен анализ возможных случаев возникновения кромочного контакта, и варианты обеспечения свойств кромок зубьев для снижения или устранения износа элементов зубьев вследствие кромочного контакта. На основании условий работы сопряженной пары зубьев, предложены варианты обеспечения изменяющихся свойств поверхностных слоев рабочих профилей зубьев в зависимости от скорости взаимного скольжения профилей.

Использование функционально-ориентированного подхода в производстве зубчатых колес, позволяет решать комплексные задачи повышения качества зубчатых колес, а также способствуют повышению эффективности их изготовления.

**Список литературы:** 1. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2008. - 346 с. 2. Михайлов А.Н. Повышение качества изделий машиностроения на базе комбинированной функционально-ориентированной отделочной обработки // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XVI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-19 сентября 2009 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2009. Т. 2. С. 246-265. 3. Лахин А.М., Михайлов А.Н., Зантур Сахби, Тарафа Аль-Судани Синтез схем технологического воздействия для функционально-ориентированных технологических процессов производства зубчатых колес // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. Вып. 38. С. 127-132. 4. . Базров Б.М. Модульные технологии. – М.: Машиностроение, 2000. – 368 с. 5. Рубан И.В., Годжаев З.А., Рубан В.М., Зайцев С.Д. Выбор оптимального процесса обработки зубчатых колес// Вестник машиностроения, 2008. - № 10. - С.40 – 41. 6. Копф И.А. Физическая модель контакта эвольвентного зацепления (заедание, износ) // Вестник машиностроения, 1999. - № 8. - С.141 – 144. 7. Гузенков П.Г. Детали машин. М.: Высшая школа, 1986 г. – 359 с.

Надійшла до редколегії 20.01.2010 р.

## **THE IMPROVING OF OPERATIONAL PROPERTIES BY WORKING ELEMENTS GEAR BASED ON FUNCTIONAL-ORIENTED APPROACH**

**Lahin A. M., Mykhailov A.N., Fomin I.A.**

**Abstract.***In work proposed options for the technological process of manufacturing of gears the on functional-oriented approach based. Completed classification of elements of gears on the functional purpose, the structure of the construction of gears on functional elements, including the collection of the executive (the workers and based) binders, support and additional elements. For the executive working elements - edges of teeth and tooth surfaces, proposed variants for the properties required by operating conditions. The variants of the technological operations for the lines and edges of the tooth profile of the surface layers for specifying properties of these elements depending on the specific use.*

**Keywords:** *gearwheel, technological process, entanglement*

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОБОЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗУБЧАТИХ КОЛІС НА БАЗІ ФУНКЦІОНАЛЬНО- ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ**

**Лахін О.М., Михайлов О.М., Фомін І.О.**

**Анотація.***В роботі запропоновано варіанти реалізації технологічного процесу виробництва зубчастих коліс на основі функціонально-орієнтованого підходу. Представлена класифікація елементів зубчастих коліс за функціональним призначенням, представлено структуру побудови зубчастих коліс за їх функціональним елементам, до складу яких входять сукупність виконавчих (робочих та базуючих), зв'язуючи, допоміжних та додаткових елементів. Для виконавчих робочих елементів – кромок зубів та поверхонь зубів, запропоновано варіанти забезпечення властивостей, що потребуються за умовами експлуатації. Запропоновано варіанти технологічних операцій для ліній кромок зубів та поверхневих шарів профілю зубів, що забезпечують задані властивості цих елементів у залежності від умов експлуатації.*

**Ключеві слова:** *зубчасте колесо, технологічний процес, зачеплення*