

УДК 621.91.04

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПУТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Михайлов Н.В., Лахин А.М. (ФБГОУ ВО ДонНТУ, каф. ТМ, г.  
Донецк)

***Аннотация.** В статье проведен анализ современного состояния вопроса. В процессе эксплуатации зубчатые колеса подвергаются различным видам износа. Определены основные пути совершенствования технологии обработки авиационных зубчатых колес.*

***Ключевые слова:** вакуумные ионно-плазменные покрытия, зубчатые колеса, принцип концентрации, покрытия, дефект поверхностного слоя, функционально-ориентированная технология.*

### 1. Введение

Зубчатые передачи в газотурбинных двигателях (ГТД) современного поколения эксплуатируются в условиях воздействия предельных механических, термических и динамических нагрузок. Проектирование и изготовление этих компонентов справедливо считаются одними из наиболее наукоемких задач в области двигателестроения. В этой связи достижение высочайших показателей качества, надежности и долговечности зубчатых колес становится критически важным условием для создания конкурентоспособных силовых установок.

Опыт восстановления авиационных редукторов показывает, что в ходе эксплуатации зубчатых зацеплений неизбежно возникают дефекты, ограничивающие их потенциальный ресурс. Продолжительность эффективной службы передач в решающей степени зависит от характера рабочих нагрузок, а также от совокупности конструкторских и производственных решений.

Являясь ключевыми элементами силовых передач в машиностроении, зубчатые колеса должны соответствовать строгим нормативам точности и безотказности, которые определяются их функциональным назначением. Наибольшую сложность в производстве представляет формирование зубчатого венца, поскольку этот процесс требует многоступенчатой механической и термохимической обработки для достижения заданных эксплуатационных характеристик.

Следовательно, разработка как конструкторской, так и технологической документации должна базироваться на моделировании реальных условий работы этих ответственных узлов.

### 2. Основное содержание работы

Целью данной работы является исследовать основные методы совершенствования технологии обработки зубчатых колес для обеспечения повышения их эксплуатационных свойств.

Основные пути совершенствования технологии обработки авиационных зубчатых колёс включают развитие методов обработки, модификацию зубьев и использование компьютерного моделирования при проектировании и анализе условий работы.

Повышение качества зубчатых колёс вертолётных трансмиссий возможно с помощью функционально-ориентированного подхода, который позволяет адаптировать

изделие при изготовлении к особенностям его эксплуатации в машине или технологической системе.

Некоторые методы, которые используются для обеспечения функционально-ориентированных свойств рабочих поверхностей зубьев[2]:

– Термическая обработка. Применяется термическое упрочнение поверхностного слоя зубчатого профиля на переменную глубину. Это позволяет увеличить износостойкость участков с наибольшим взаимным скольжением в местах головки и у ножки зуба.

– Обкатка. Рабочие поверхностные слои зубчатого профиля подвергаются наклепу разной степени за счёт воздействия обкатного инструмента с различной силой обката. Усилие обката имеет максимальное значение в местах головки и ножки зуба, что обеспечивает им наибольшую прочность и износостойкость.

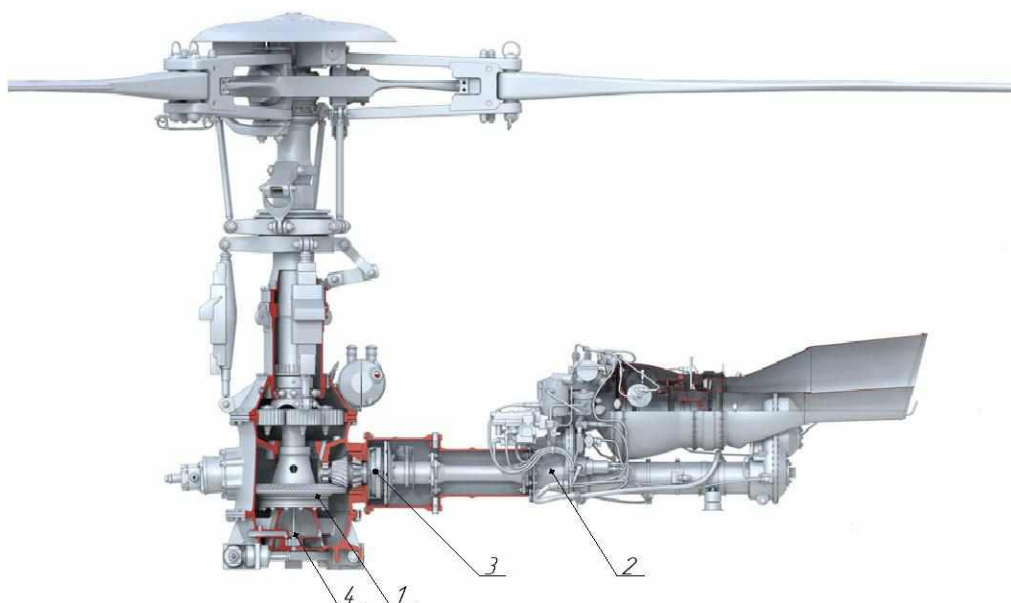


Рис. 1. Общий вид трансмиссии: 1 – главный редуктор; 2 – редукторы двигателей; 3 – муфты включения сцепления и свободного хода; 4 – опоры валов с амортизаторами.

Нанесение покрытий. Свойства наносимых покрытий определяются 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.

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. Регулировка усилия обката позволяет создавать различную степень наклепа где

пиковые значения приходится на зоны максимального скольжения (головка и ножка зуба), что обеспечивает им максимальную прочность. Кинематика и силовое воздействие инструмента задаются посредством копира.

В третьем случае используется нанесение покрытий, в том числе многослойных, на зубчатые поверхности. Свойства наносимых на зубья покрытий должны определяться скоростью взаимного скольжения в зоне контакта. Это требует дифференцированного подхода:

1. В зонах с максимальным скольжением (головка и ножка зуба) необходимы покрытия с высокой стойкостью к абразивному износу и низким коэффициентом трения.

2. В полюсе зацепления, где преобладают контактные напряжения, основным требованием является высокая контактная выносливость (износостойкость).

Наиболее эффективным методом является вакуумное ионно-плазменное напыление. Эта технология обеспечивает требуемые свойства покрытий при относительно низкой себестоимости, не нарушая размерной точности зубьев и параметров зацепления. Для селективного нанесения покрытий на целевые зоны предлагается использовать предохранительные маски, которые защищают поверхности, не подлежащие обработке [3].

В работе [4] рассмотрены основные положения производства зубчатых колес на базе функционально-ориентированных технологий. Представлена классификация зубчатых колес и их элементов по функциональному назначению. Представлены схемы технологического воздействия для рабочих поверхностных слоев зубчатых колес, а также способы реализации данных схем на основе нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий. Рассмотрен способ управления свойствами рабочих поверхностных слоев зубчатых колес на основе нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий, с обеспечением требуемой ориентации и кинематики движений в процессе нанесения покрытий. Данные наработки позволят в дальнейшем улучшить методику нанесения функционально-ориентированных покрытий на рабочие поверхности зубьев по зонам.

Процесс осаждения функциональных покрытий предъявляет два ключевых требования: обеспечение направленного доступа потока напыляемого материала к целевым поверхностям и защиту смежных зон, не предназначенных для обработки.

При нанесении вакуумных ионно-плазменных покрытий на зубчатые колёса для достижения однородности и заданной толщины слоя необходима такая ориентация детали, при которой рабочие поверхности зубьев обращены к источнику потока. Равномерность осаждения по всему зубчатому венцу обеспечивается вращением заготовки.

Технология подразумевает ко-осаждение материала с четырёх катодов, поэтому кинематика движения заготовки должна быть организована таким образом, чтобы обеспечить взаимодействие её поверхности с потоком от каждого источника.

Возможные схемы движения заготовок при этом будет иметь следующий вид (рис. 2). Угол наклона оси заготовки  $\phi$ , определяется в зависимости от положения заготовки относительно боковых катодов и варьируется в процессе нанесения покрытий.

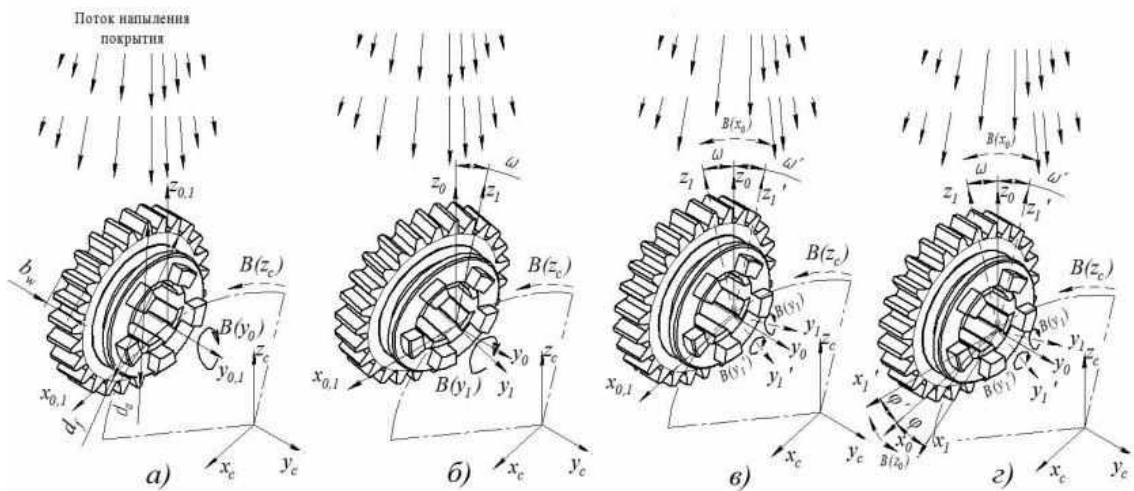


Рис. 2. Варианты движений зубчатого колеса при нанесении покрытия на рабочие элементы: а – вращение вокруг горизонтальной оси; б – вращение вокруг наклонной оси; в – вращение вокруг качающейся оси, г – вращение вокруг двух качающихся осей.

На основе выполненных исследований, можно представить следующие этапы синтеза технологического обеспечения производства зубчатых колёс на базе функционально-ориентированного подхода: [3].

1. Анализ эксплуатационных условий и производственных методов. На данном этапе изучаются условия работы зубчатых передач, причины снижения их эксплуатационных характеристик, а также существующие методы изготовления и повышения качества зубчатых колёс.

2. Функциональная классификация и параметризация. Проводится классификация зубчатых колёс по функциональному признаку, на основании которой определяются необходимые параметры их элементов в соответствии с целевым назначением.

3. Разработка системы технологических воздействий. Для каждой функциональной зоны зубчатых колёс определяется вид, тип, характер и структура технологического воздействия на основе принципов ориентации технологических воздействий и требуемых свойств.

4. Проектирование технологического процесса. Формируется маршрут изготовления зубчатых колёс и разрабатываются операции функционально-ориентированного технологического процесса с использованием как известных, так и новых технологических методов.

5. Внедрение процесса и оценка эксплуатационных характеристик. Осуществляется реализация функционально-ориентированного технологического процесса. Основные эксплуатационные показатели изготовленных зубчатых колёс определяются путём моделирования их работы в условиях, приближенных к реальной эксплуатации в машинах.

6. Сравнительный анализ эффективности. Проводится сравнение технико-экономических показателей зубчатых колёс, изготовленных по функционально-ориентированному подходу, с колёсами, произведёнными по традиционным технологиям.

7. Разработка внедренческих рекомендаций. Формируются практические рекомендации по внедрению технологических процессов производства зубчатых колёс на базе функционально-ориентированного подхода.

8. Внедрение результатов исследования. Реализация полученных результатов включает применение разработанного подхода на машиностроительных предприятиях и использование рекомендаций по проектированию зубчатых колёс в соответствии с их эксплуатационными требованиями.

### 3. Заключение

Таким образом, в работе выполнено исследование основных методов совершенствования технологии обработки, а также разработаны этапы синтеза технологического обеспечения производства зубчатых колес на базе функционально-ориентированного подхода.

**Список литературы:** 1. Дудник В. В. Конструкция вертолетов. – Ростов н/Д: Издательский дом ИУИ АП, 2005. – 158 с. 2. К.В. Кобелева, В. Р. Туктамышев Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия ОБЗОР МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-povysheniya-dolgovechnosti-aviatsionnyh-zubchatyh-peredach>. 3. Лахин А. М., Михайлов А. Н., Фомин И. А. (ДонНТУ, Донецк, Украина) ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА БАЗЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА [Электронный ресурс] // – Режим доступа: [http://ea.donntu.ru:8080/bitstream/123456789/8035/1/108-115\\_%D0%9B%D0%B0%D1%85%D0%B8%D0%BD.pdf](http://ea.donntu.ru:8080/bitstream/123456789/8035/1/108-115_%D0%9B%D0%B0%D1%85%D0%B8%D0%BD.pdf). 4. А. Н. Михайлов, А.М Лахин, В. А. Соосар СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА БАЗЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sintez-tehnologicheskogo-obespecheniya-proizvodstva-zubchatyh-koles-na-baze-funktsionalno-orientirovannogo-podhoda>.