

УДК 621.9.044

А. М. Лахин, канд. техн. наук, доцент

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

Тел./факс: +38(062)3010805; E-mail: lelax@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО - ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В работе рассмотрены возможности повышения качества и эксплуатационных свойств зубчатых колес на основе нанесения функционально-ориентированных покрытий, обеспечивающих равномерный износ рабочих поверхностей в течении всего срока их эксплуатации.

Ключевые слова: износ, зубчатые колеса, качество, долговечность

A. M. Lahin

THE FEATURES OF FUNCTIONAL AND ORIENTED COATINGS DEPOSITION ON GEAR - WHEELS WORKING SURFACE

The paper discusses the possibilities of improving the quality and operational properties of the gears on the basis of functional -oriented coatings deposition that providing uniform wear of working surfaces during their life-time.

Keywords: wear, gearwheels, quality, durability

1. Введение

Зубчатые передачи являются основным типом силовых передач, используемых для передачи и преобразования высоких крутящих моментов в редукторах и коробках скоростей практически всех современных машин. Их применение постоянно увеличивается, что обусловлено их следующими преимуществами: высокий КПД, высокие значения передаваемых моментов и скоростей при малых габаритах и массе, возможность передачи крутящих моментов при параллельных, скрещивающих и пересекающихся осях, низкий шум в работе, высокая долговечность, простота обслуживания и эксплуатации, и другие.

Вместе с тем в современных машинах постоянно повышаются требования к качеству и производительности изготовления изделий с зубчатыми венцами. Это связано с постоянным совершенствованием машин, что выражается требованиями к увеличению их нагрузочной способности, рабочих скоростей и долговечности. Между тем зубчатые колеса являются одними из наиболее трудоемкими в изготовлении, при относительно высоких требованиях к точности и качеству поверхностного слоя. При этом должны соблюдаться требования в обеспечении равной или близкой долговечности по сравнению с остальными элементами машины, и соответствовать долговечности всей машины в целом.

В настоящее время главной проблемой при эксплуатации зубчатых колес является снижение надежности и долговечности вызванное преждевременным и неравномерным износом по рабочим поверхностям зубьев, что является следствием непрерывного изменения кинематических характеристик в различных точках контакта рабочих профилей пар сопряженных зубьев. Это приводит к изменению характера трения по рабочим поверхностям зубьев, которое изменяется с трения качения на трение скольжение, вызывая при этом механический износ зубьев. Величина износа по отдельным участкам рабочих поверхностей различна, и зависит от величины пути трения рабочего профиля зубьев. При длительной эксплуатации зубчатых колес это

может привести к искажению исходного профиля зуба, что в конечном итоге приводит к снижению КПД зубчатой передачи, повышению уровня шума в работе, заеданию, возможности поломки зубьев и преждевременному аварийному выходу из строя механизма с зубчатой передачей.

Таким образом, целью данной работы является разработка методов повышения эксплуатационных свойств зубчатых на базе нанесения покрытий, обеспечивающих изменение свойств в зависимости от особенностей эксплуатации. При этом необходимо решить следующие задачи:

- определить характер действия эксплуатационных функций, приводящих к снижению эксплуатационных характеристик зубчатых колес;
- исследовать возможности обеспечения изменяющихся свойств по рабочим поверхностям зубьев в соответствии с переменным характером действия эксплуатационных функций;
- исследовать влияние технологических параметров нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на достигаемые свойства поверхностных слоев зубьев;
- выполнить исследования работоспособности зубчатых колес имеющих функционально-ориентированные свойства рабочих поверхностей.

2. Основные положения и результаты работы.

Рассмотрим причины неравномерного износа рабочих поверхности зубьев по высоте. Как известно, характерны следующие виды разрушения зубьев: механический износ (рис.1, а), выкрашивание (рис.1, б), заедание (рис.1, в), образование усталостных трещин (рис.1, г) и пластическая деформация зубьев (рис.1, д) [2]. Все указанные виды разрушения, кроме механического износа, являются следствием нарушения условий работы зубчатой передачи, в том числе превышения расчетной нагрузки, нерационального выбора смазочного материала и нарушения технологии термической обработки. В тоже время механический износ является неизбежным практически для всех силовых зубчатых колес. Причем особенностью данного вида износа является его увеличение от полюсной линии к периферии зуба (рис. 1).

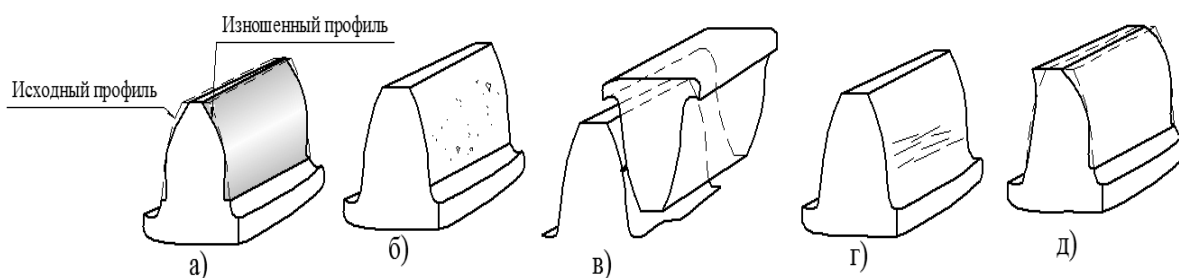


Рисунок 1. Виды износа зубчатых колес

Известно, что в процессе работы зубчатых колес в зоне контакта сопряженной пары зубьев общий вектор скорости в зацеплении складывается из суммы нормальной и тангенциальной составляющих [2]. При перекачивании зубчатых профилей в любой точке контакта сопряженной пары зубьев нормальная составляющая вектора скорости равна для шестерни и колеса, что является необходимым условием зацепления. В то же время касательная составляющая скоростей в зацеплении шестерни и колеса при перекачивании непрерывно изменяет свое направление, совпадая для шестерни и

колеса только в полюсе зацепления. Это вызывает переход от перекатывания зубчатых профилей к проскальзыванию (скольжению) пары сопряженных зубьев. Величина проскальзывания определяется как разница между тангенциальными составляющими скорости в зубчатом зацеплении:

$$\vec{v}_{ск} = \vec{v}_{\tau 2} - \vec{v}_{\tau 1}.$$

Трение скольжения неизбежно вызывает механический износ рабочей поверхности зуба, причем характер данного износа в целом соответствует графику скорости взаимного скольжения [3]. Это выражается в более быстром изнашивании зон у головки и у ножки зуба, в то время как износ полюсной части зуба минимален. Данная особенность проявляется при дальнейшей работе зубчатой передачи, вызывая значительное отклонение изношенного профиля зуба от исходного. При этом увеличивается путь скольжения по участкам профиля зуба и дальнейшее увеличение скорости износа. Также при этом снижается КПД зубчатой передачи, что требует большей мощности привода зубчатых колес.

Известны следующие способы уменьшения механического износа зубьев [4]:

- уменьшение пути трения скольжения за счет использования профиля зубьев, отличного от эвольвентного, например эпициклического;
- подбором материала зубчатых колес с меньшим модулем упругости и большими параметрами фрикционной усталости;
- повышением твердости сопряженных зубьев;
- защитой зоны зацепления от попадания твердых частиц, обеспечением достаточной чистоты смазочного материала;
- подбором смазочных материалов, обеспечивающих наименьший коэффициент трения и достаточную толщину смазочного слоя в сопряжении.

Первый способ предполагает фундаментальные изменения в технологии зубообработки, требуя смены номенклатуры режущего и мерительного инструмента и значительное повышение точности зубчатых колес. Поэтому в настоящий момент для условий серийного и массового производства нецелесообразен. Остальные способы позволяют уменьшить скорость износа, однако не позволяют изменить его характер.

Для обеспечения равномерного износа по высоте зуба при изготовлении зубчатых колес целесообразно использовать функционально-ориентированный подход, сущность которого заключается в адекватном изменении свойств различных участков изделия в зависимости от характера действия эксплуатационных функций, которые определяются особенностями работы машины. При этом технологические операции строятся на основе схем технологического воздействия, которые формируются на базе принципов ориентации технологических воздействий и свойств [1, 6]. В практическом смысле это выражается в том, что участки деталей, испытывающих переменные эксплуатационные функции, обрабатываются таким образом, чтобы обеспечить переменные свойства этих участков в соответствии с особенностями эксплуатации. Таким образом, в изделии достигается равномерный износ всех его компонентов на протяжении всего срока эксплуатации, что позволяет предотвратить внеплановые ремонты по причине преждевременно вышедших из строя деталей.

Для зубчатых колес данный подход может быть применен для обеспечения изменяющихся свойств рабочих поверхностей зубьев вдоль линии профиля.

Рассмотрим следующие схемы обеспечения изменяющихся свойств по высоте зуба (рис.2).

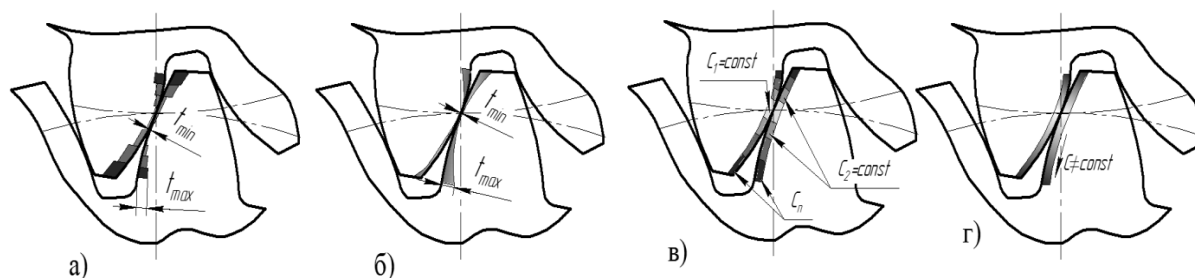


Рисунок 2. Способы обеспечения изменяющихся свойств по высоте зуба посредством нанесения функционально-ориентированных покрытий

Для обеспечения равномерного износа по высоте зуба главной задачей является компенсация повышенного износа участков с наибольшей скоростью взаимного скольжения свойствами участков материала зубчатых колес. Этого можно достичь путем нанесения следующих видов покрытий:

- со ступенчато изменяющейся толщиной (рис.2, а);
- с непрерывно изменяющейся толщиной (рис.2, б);
- со ступенчато изменяющимися свойствами (рис. 2, в);
- с непрерывно изменяющимися свойствами (рис. 2, г).

В первом случае (рис. 2, а) нанесение покрытий производится в несколько этапов. На начальном этапе наносятся покрытия на все рабочие поверхности зубьев. Основное назначение данного покрытия – обеспечение требуемой контактной прочности и предотвращение выкрашивания с поверхностями зубьев. На последующих этапах каждый слой покрытия наносится с использованием защитных масок, которые устанавливаются на зону у полюсной линии, причем на каждом последующем этапе площадь маски увеличивается, расширяясь по направлению к головке и ножке зуба. Таким образом, на крайних поверхностях зуба достигается наибольшее количество слоев и наибольшая общая толщина покрытия, что позволяет в наибольшей степени уменьшить износ участков с наибольшей скоростью взаимного скольжения.

На второй схеме (рис. 2, б) представлено покрытие, толщина которого непрерывно увеличивается по направлению от полюсной линии к головке и к ножке зуба, то есть к зонам с наибольшим скольжением. Характер изменения толщины покрытия соответствует графику скорости взаимного скольжения. Это позволяет уменьшить искажение формы зуба за счет механического износа путем подбора покрытия с высокой стойкостью к механическому износу и малым коэффициентом трения.

На третьей схеме (рис. 2, в) используется покрытие, механические свойства которого (микротвердость и коэффициент трения) дискретно увеличивается от поверхности у полюсной линии, к участкам вершины и впадины зуба. Данные покрытия также наносятся поэтапно, с использованием защитных масок. В отличие от первой схемы (рис. 2, а) каждый последующий этап нанесения предполагает использование защитной маски как для уже нанесенных покрытий, так и для зон, на которые покрытия наносятся на последующих этапах. Это значительно уменьшает

искажение исходной формы профиля зуба, поскольку толщины покрытия каждой зоны примерно равны.

На четвертой схеме (рис. 2, г) используется покрытие с непрерывно изменяющимися механическими свойствами. Для рабочих поверхностей зубчатых колес это выражается в плавном увеличении микротвердости и снижении коэффициента трения от поверхности у полюсной линии к головке и ножки зуба. Это позволяет уменьшить скорость механического износа данных зон, и таким образом, предотвратить или значительно уменьшить искажение исходной формы зуба на протяжении всего срока эксплуатации зубчатых колес. Технологически, данный характер изменения свойств покрытия можно достичь за счет непрерывного изменения состава напыляемой среды, и согласованном перемещении рабочих поверхностей зубьев относительно источника плазмы.

Также обеспечить непрерывно изменяющихся свойства можно за счет непрерывного изменения положения рабочих поверхностей зубчатых колес относительно плазменных потоков в процессе нанесения покрытий. За счет постоянного изменения углов рабочих поверхностей зубьев к нормали потока плазмы, достигается как переменная толщина покрытия по высоте зуба, так и непрерывное изменение механических свойств поверхностных слоев зубьев.

В результате исследования положения зубчатых колес относительно плазменных потоков, в процессе нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий, были определены зависимости толщины покрытия и микротвердости рабочих поверхностей зубьев от геометрических параметров, характеризующих пространственное положение зубчатых колес в вакуумной камере. В ходе исследования осуществлялась установка заготовок зубчатых колес в позициях планетарного стола, согласно схемы (рис.3, а и б). Заготовки устанавливались по трем разным диаметрам расположения их осей и трем различным углам их наклона. Конструкция планетарного стола и схема расположения заготовок в процессе нанесения покрытий представлены на рис.3.

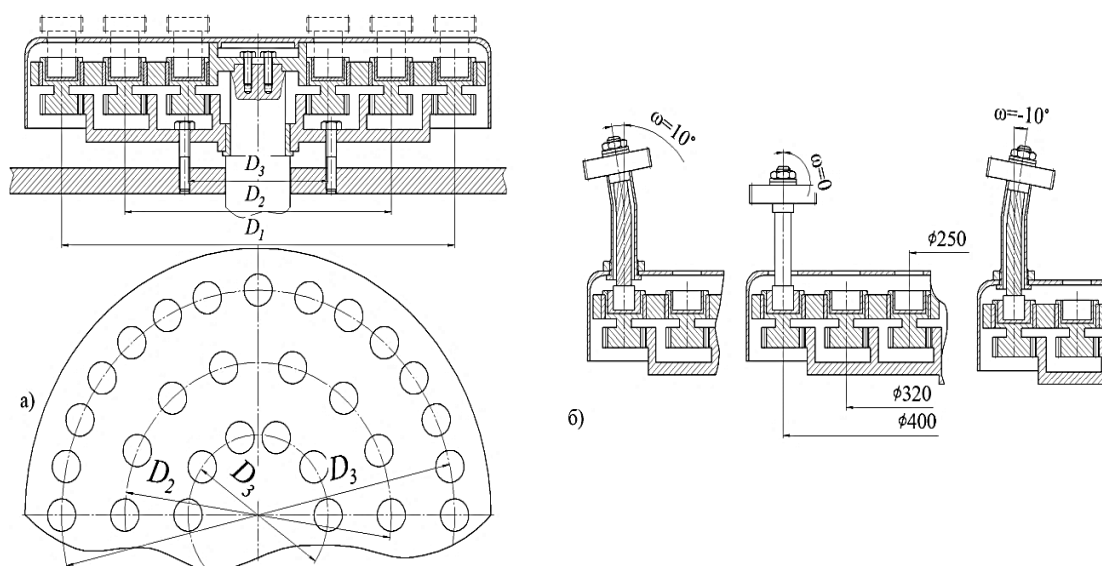


Рисунок 3. Схемы планетарного стола вакуумной камеры (а) и расположения зубчатых колес на планетарном столе (б) в процессе нанесения покрытий

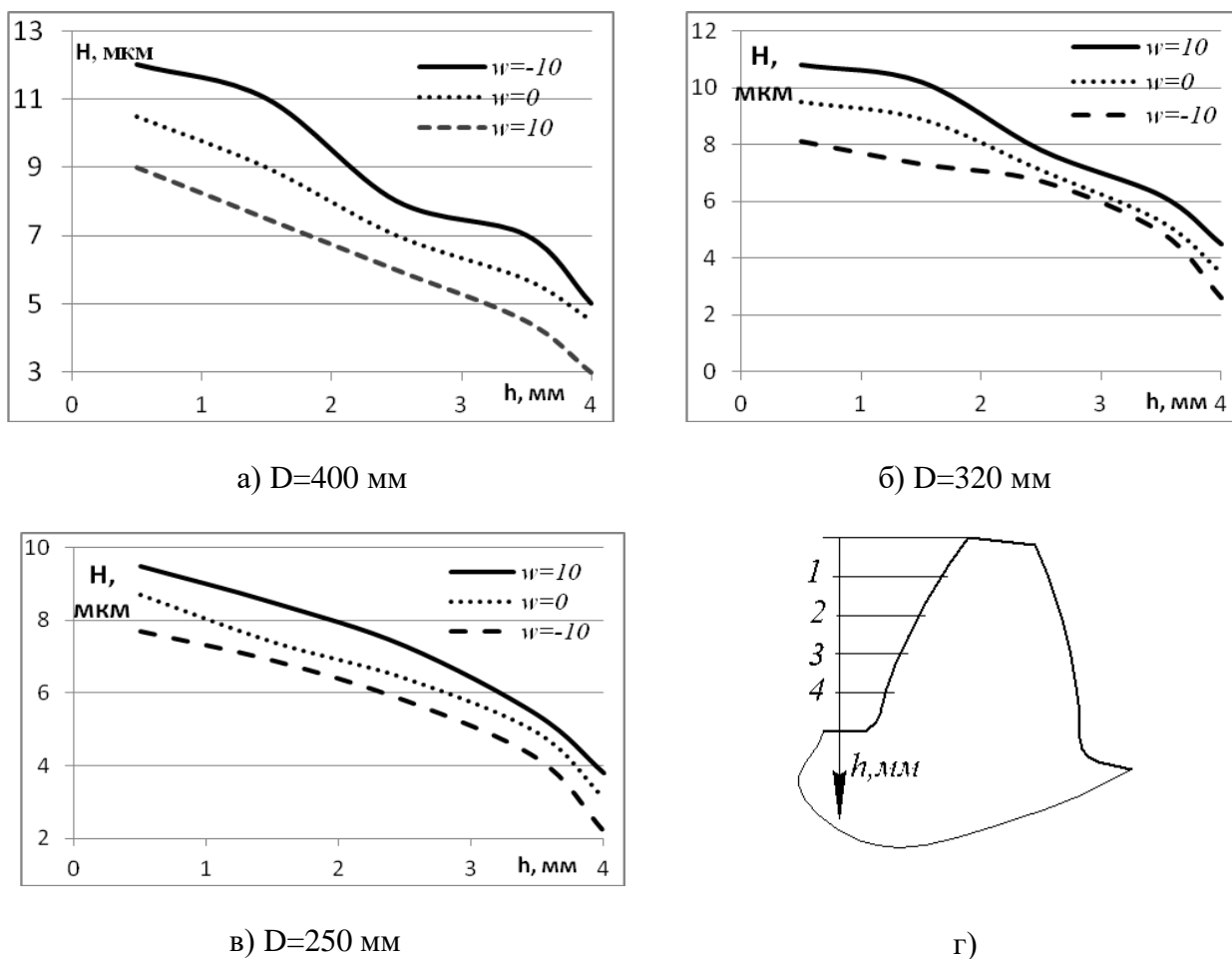


Рисунок 4. Графики зависимости толщины покрытия по высоте зуба: а) при D=400 мм; б) при D=320 мм; в) при D=250 мм; г) точки измерения

Исследования зависимости толщины покрытия, от геометрических параметров расположения зубчатых колес в вакуумной камере представлены графиками (рис. 4, а-в). Данные графики позволяют заметить, что во всех случаях в зонах у вершин зубьев толщина покрытия наибольшая, и плавно уменьшается к впадинам зубьев. Это вызвано появлением теневых зон в участках близких к впадинам зуба, за счет перекрытия данных зон соседними зубьями. В то же время отмечается уменьшение толщины покрытия по мере удаления зубчатых колес от стенок вакуумной камеры и катодов. Это вызвано рассеянием плазменного потока по пути к зубчатым колесам. Во всех случаях зубчатые венцы колес, установленных на разных окружностях планетарного механизма располагались на различной высоте, что исключало образование теневых зон от впереди стоящих заготовок. Исследования толщины покрытия вдоль образующей зуба не выявили значительного колебания толщины покрытия по длине зуба.

Исследования микротвердости поверхностных слоев зубьев позволили выявить подобные зависимости, характерные для толщины покрытия, с колебанием величины микротвердости от 32 ГПа (в точках у вершины зубьев при D=400 мм и $\omega = -10^0$), до 24 ГПа (в точках у впадины зуба при D = 250 мм и $\omega = -10^0$).

Кроме этого проведены ускоренные сравнительные ресурсные испытания зубьев на износ, где выполнено сравнение степени и характера износа исходной пары

зубчатых колес, изготовленных по традиционной технологии, с парой колес с нанесенными функционально-ориентированными покрытиями. Испытания проводились в период приработки пар зубчатых колес. Степень износа оценивалась по изменению толщины зуба относительно исходной. Результаты испытаний выявили уменьшение износа зубьев с покрытиями в 3-5 раз. Кроме этого для зубчатых колес с покрытиями характерен более равномерный износ по высоте зуба. Колебания величины износа по боковой поверхности зубьев от вершины зуба к его основанию составило 3-7 %, тогда как у зубчатых колес без покрытия колебания износа в различных точках зуба составила 40-60%.

Выводы.

Таким образом, выполненные исследования позволили выявить основные особенности изменения свойств рабочих элементов зубчатых колес. На основании анализа условий работы пары зубчатых колес были определены основные технологические пути обеспечения свойств рабочих элементов зубчатых колес в соответствии с особенностями эксплуатации. Выполненные экспериментальные исследования по определению особенностей нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий, позволили установить влияние технологических параметров на толщину покрытия и микротвердость поверхностных слоев зубьев, а также на степень износа и его равномерность по высоте зуба. Полученные данные позволяют разрабатывать рекомендации для разработки технологического обеспечения изготовления зубчатых колес с вакуумными ионно-плазменными покрытиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 346 с.
2. Кудрявцев, В. Н. Зубчатые передачи / В. Н. Кудрявцев. – М.: «Машгис», 1957. – 263 с.
3. Когаев, В. П. Прочность и износостойкость деталей машин. Учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. – М.: Высшая школа, 1991. – 319 с.
4. Гришко, В. А. Повышение износостойкости зубчатых передач / В. А. Гришко. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
5. Онищенко, В. П. Прогнозирование формы профилей зубьев зубчатых передач в результате их износа / В. П. Онищенко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 1998. – Вып. 5. – С. 155–163.
6. Лахин, А. М. Синтез технологического обеспечения функционально-ориентированных свойств рабочих элементов зубчатых колес на базе методов нанесения покрытий / А. М. Лахин // Прогресивні технології і системи машинобудування. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – № 3 (49). – С. 101-107.

Поступила в редколлегию 7.02.2017 г.