

УДК 621.9.044

А. М. Лахин, канд. техн. наук

ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», ДНР

E-mail: lelax@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ НА ОСНОВЕ НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО - ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

В работе выполнен анализ причин нарушения эксплуатационных характеристик зубчатых передач, а также предложена структура и технология нанесения многослойных функционально-ориентированных покрытий обеспечивающих выравнивание износа и повышение ресурса работы зубчатых передач.

Ключевые слова: зубчатое колесо, покрытие, износ, технология

A. Lakhin**INCREASING GEAR RESOURCE BASED ON THE APPLICATION OF FUNCTIONAL-ORIENTED COATINGS**

The paper analyzes the reasons for the violation of the operational characteristics of gears, and proposes a structure and technology for applying multilayer functionally oriented coatings that provide wear leveling and an increase in the service life of gears.

Keywords: gear wheel, coating, wear, technology

1. Введение

В современных машинах все более широкое распространение получают зубчатые передачи, которые имеют ряд достоинств по сравнению с остальными видами силовых передач. Среди основных достоинств отметим: высокие КПД и нагрузочная способность при малых габаритах передачи, постоянство передаточного отношения, многообразие конструкций, позволяющих передавать момент между параллельными, пересекающимися и скрещивающимися осями, а также возможность преобразовывать вращательное в поступательное движение и наоборот. При этом для изготовления деталей зубчатых передач чаще всего применяется метод обкатки, позволяющих изготавливать зубчатые колеса одного модуля и широкого диапазона габаритных размеров одним зуборезным инструментом. Между тем, для надежной и длительной работы зубчатой передачи требуется использование высококачественного смазочного материала высокой чистоты, высокопрочный материал зубчатых колес и его термообработка, предъявляются высокие требования к точности монтажа, а для высокоскоростных тяжело нагруженных зубчатых передач характерен неравномерный износ зубьев, в результате которого возникают люфты в кинематических цепях, нарушается кинематическая точность передачи, и значительно снижается прочность зубьев, что в конечном итоге может привести к заеданию, поломке и заклиниванию механизма.

В настоящее время широкое применение нашли новые подходы повышения качества и эксплуатационных свойств деталей основанные на нанесении более прочного износостойкого материала на рабочую поверхность изделия. Это позволяет экономить на дорогостоящем конструкционном материале и его термообработке, а также обеспечивать высокие физико-механические свойства как постоянные по всей поверхности изделия, так и изменяющиеся в соответствии с действием эксплуатационных функций. Последние – являются функционально-ориентированными [4], и достигаются за счет нанесения нескольких слоев покрытия. Однако ввиду малого распространения нанесения функционально-ориентированных покрытий на рабочие поверхности зубьев требу-

ется разработка технологического обеспечения позволяющего повысить эффективность нанесения покрытий и качество рабочих поверхностей зубьев.

Целью данной работы является повышение качества и ресурса работы зубчатых колес за счет нанесения функционально-ориентированных покрытий на рабочие поверхности зубьев.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить исследование и анализ причин нарушения эксплуатационных характеристик зубчатых колес;
- разработать структуру функционально-ориентированного покрытия;
- предложить технологию нанесения функционально-ориентированных покрытий на рабочие поверхности зубьев.

2. Основное содержание и результаты работы.

Все механизмы, использующие зубчатые передачи условно разделяются на силовые и кинематические.

Главное назначение силовых механизмов с зубчатыми передачами – передача и преобразование высоких крутящих моментов и нагрузок без значительных требований кинематической точности. К зубчатым колесам (ЗК) таких механизмов предъявляются повышенные требования контактной и изгибной прочности, износостойкости, антизадириных свойств и постоянного доступа смазочного материала. При этом наибольшие требования точности таких передач – по нормам пятна контакта – для обеспечения высокой нагрузочной способности, а также плавности работы, которые связаны с необходимостью в безударной работе высокоскоростной зубчатой передачи. К рабочим поверхностям таких зубчатых колес предъявляются наиболее высокие требования к износостойкости и ударной прочности.

Основное назначение кинематических механизмов с зубчатыми передачами является обеспечение точного взаимного перемещения звеньев в соответствии с передаточным отношением механизма. Такие механизмы являются частью измерительных приборов, делительных устройств, кинематических цепей металлорежущих станков, дозаторов и др. К зубчатым передачам таких механизмов предъявляются требования кинематической точности и плавности работы, малых зазоров в зацеплении и отсутствия механического износа. Малонагруженные кинематические зубчатые передачи как правило работают при относительно небольших рабочих скоростях.

Для обоих видов зубчатых передач характерны следующие нарушения эксплуатационных характеристик (рис.1), в большей степени характерных для силовых зубчатых передач:

- механический износ зубьев;
- заедание колес;
- повышенный шум в работе;
- поломка отдельных зубьев.

Износ зубьев вызван уменьшением исходных размеров рабочего профиля в результате механического или химического воздействия на рабочую поверхность зубьев. По характеру возникновения он может быть следующих видов [2]:

1) Абразивный или механический – в результате взаимного трения рабочих поверхностей или при наличии посторонних частиц между трущимися поверхностями зубьев. Данный вид износа может быть прогнозируемым и определяться ресурсом передачи и случайным, вызванным попаданием абразивных частиц извне или при нарушении условий смазки.



Рисунок 1. Виды нарушения эксплуатационных характеристик зубчатых колес

2) Выкрашивание с рабочих поверхностей зубьев в результате превышения контактных напряжений или гидродинамических явлений в процессе смазки. Данный вид износа вызван главным образом нарушениями условий упрочнения зубьев или образованием и схлопыванием пузырьков смазочного материала на поверхности зубьев [5], и как правило носит случайный характер.

3) Пластическая деформация поверхностного слоя зубьев в следствии кромочного контакта и неравномерного пятна контакта. Этот вид износа вызван нарушением точности изготовления зубчатых колес.

4) Коррозия и окисление зубьев при работе зубчатой передачи в условиях действия агрессивной среды. Характерно для открытых зубчатых передач и при попадании агрессивной среды в смазочный материал. Данный вид износа также случайный, а в случае для открытых зубчатых передач должен быть исключен за счет рационального подбора материала ЗК.

Заедание ЗК проявляется в дополнительном сопротивлении вращению зубчатых колес и возникает в результате: значительных отклонения формы рабочих профилей от теоретической; попадания посторонних частиц и продуктов износа в зону зацепления; перекоса осей колеса и шестерни; «схватывания» материала с поверхности зуба сопряженного колеса и как следствие возникновение выступов и борозд на поверхностях зубьев входящих в зацепление. Заедание вызвано нарушениями регламентируемых условий работы зубчатых колес и точности их изготовления.

Шум в работе ЗК вызван возникновением ударов в процессе зацепления либо в результате сухого трения при скольжении профилей. Удары происходят вследствие повышенных боковых зазоров в зацеплениях и их неравномерных величинах, а также из-за зазоров в подвижных частях при общих вибрациях в механизмах. В большей степени это характерно для прямозубых ЗК. Шум в результате сухого трения поверхностей помимо затрудненного доступа смазочного материала может быть вызван в результате кромочного контакта и при наличии выступов на поверхности. Как правило, возникновение шума при длительно работающей зубчатой передаче вызвано механическим износом профилей и, как результат увеличением боковых зазоров и микроударов зубьев.

Поломка зубьев является причиной повышенных изгибных напряжений в зоне у ножки зуба и может происходить при критическом износе и уменьшении толщины зуба в данной зоне, или при значительных импульсных знакопеременных нагрузках, когда напряжения превышают предел выносливости. Поломка зубьев является аварийной ситуацией и должна быть предупреждена.

Из рассмотренных видов нарушения работы зубчатых передач только абразивный (механический) износ, при соблюдении всех условий эксплуатации и технических требований на машину, является неизбежным. Большинство остальных видов нарушения являются следствием механического износа. Поэтому основной задачей повышения эксплуатационных характеристик ЗК является применение технологических методов позволяющих снизить механический износ и увеличить регламентированный ресурс работы зубчатой передачи.

Применение функционально-ориентированного подхода при производстве зубчатых колес основано на следующих признаках [5]:

- возможности использования на местном уровне в зависимости от пространственных условий реализации;
- точности реализации в зависимости от уровня применения;
- зависимость технологических воздействий от эксплуатационных параметров, при этом технологические воздействия определяются анализом условий эксплуатации функциональных зон и элементов ЗК;
- реализация по уровням глубины технологии, согласно которым предусмотрено деление изделия на деталь, части, составляющие, зоны, макро- и микрзоны.
- ориентация технологических воздействий на основе принципов.

Согласно картине зубчатого зацепления [2], и анализа направления векторов скоростей зубьев ведущего и ведомого ЗК (рис.2), причиной взаимного скольжения профилей является разность касательных составляющих скоростей, что вызывает трение в зонах у головки и ножки зуба].

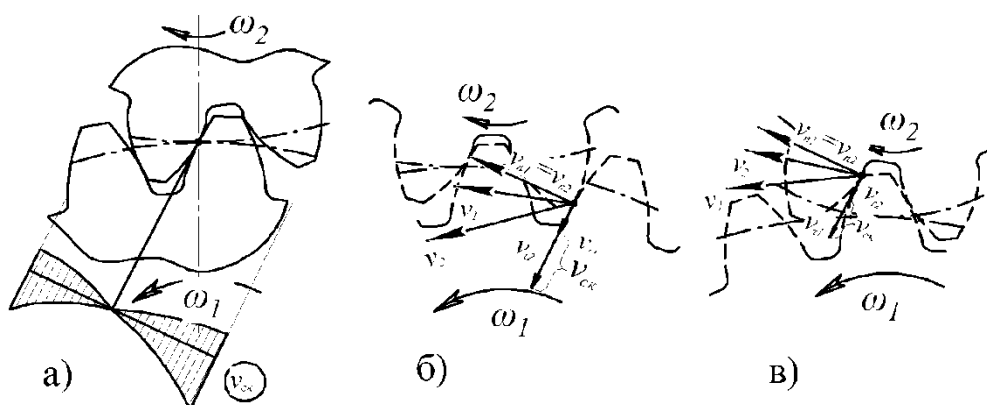


Рисунок 2. Возникновение скорости взаимного скольжения профилей в зубчатом зацеплении: а) график изменения скорости взаимного скольжения; б) скорости в начале зацепления; в) скорости в конце зацепления.

В результате действия переменной скорости взаимного скольжения профилей зубьев возникает износ, причем наибольшая его величина наблюдается у головки и ножки зуба, что вызывает увеличение бокового зазора и как следствие шума в работе, а также ослабляет зуб у основания [3]. Это может привести к изгибу или поломке зуба.

Характер изменения скорости взаимного скольжения профилей имеет некоторые закономерности и изменяется в соответствии с графиком (рис. 2, а).

Как известно [1], интенсивность износа зависит от твердости поверхностного слоя, а износ в местах контакта профилей зубьев зависит от радиусов поверхностей в месте контакта, шероховатостей, физико-механических свойств материалов ЗК, и зна-

чения касательной составляющей скорости в зацеплении. Таким образом, величина износа зубьев шестерни и колеса определяется по формуле [1]:

$$h_{1,2} = 2,25I_{h1,2} \sqrt{P_n \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \frac{v_{ск}}{v_{1,2}} n_{1,2} z_{n1,2} t_{1,2}}$$

Величина, зависящая от физико-механических свойств рабочих поверхностей зубьев и свойств смазочного материала, является интенсивность износа зубьев I_h []:

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

Важнейшая задача при нанесении функционально-ориентированных покрытий, на рабочие поверхности зубьев является обеспечение плавного изменения свойств (износостойкости) в соответствии с изменением скорости взаимного скольжения профилей. Этого можно достичь следующими способами:

- обеспечением плавного изменения микро твердости поверхностного слоя при постоянной толщине покрытия;
- обеспечение плавного изменения толщины покрытия от зон с наибольшим износом зуба (у головки и ножки зуба) с уменьшением к полюсной линии. При этом толщина покрытия, ввиду особенностей вакуумных ионно-плазменных покрытий не более 12 мкм;
- нанесением покрытий в несколько слоев с уменьшением количества слоев к участкам с наименьшим взаимным скольжением профилей.

Реализация первого способа на данном этапе развития технологии нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий достаточно затруднительно, требует повышенных затрат материалов и энергии, а также требует тщательного подбора режимов нанесения покрытий. Второй способ может быть реализован при использовании специальной технологической оснастки для сообщения изделиям сложной кинематики движения при нанесении покрытий и требует дальнейших исследований.

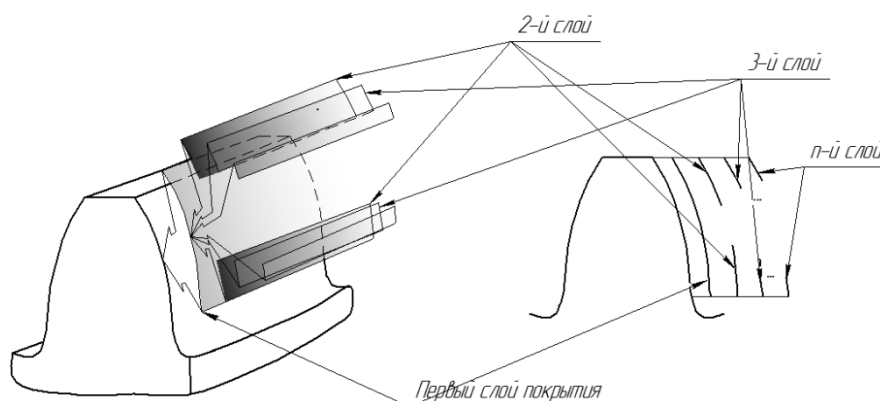


Рисунок 3. Многослойные функционально-ориентированного покрытия на рабочих поверхностях зубьев.

Нанесение нескольких слоев покрытий может быть реализовано поэтапно (рис. 3), в несколько слоев, причем большее количество слоев наносится на участки с наибольшим ожидаемым износом. Общая толщина всех слоев покрытия не должна превышать 20-25 мкм и должны находиться в пределах поля допуска на толщину зуба.

Применение данных покрытий может быть использовано для ответственных тяжело нагруженных зубчатых колес требующих максимального ресурса работы. При этом технология нанесения покрытий может быть реализована в соответствии со следующей схемой (рис.4). На начальном этапе выполняется обработка всех поверхностей ЗК в соответствии с базовым технологическим процессом для достижения заданных параметров точности поверхностей. Затем выполняется ряд подготовительных этапов, связанных с подготовкой поверхностей под нанесение покрытий, включающие: полирование до требуемой шероховатости, ультразвуковую чистку а также мойку и обезжиривание. После этого выполняется нанесение первого слоя покрытия, который наносится на все рабочие поверхности ЗК, поэтому не требует защитных масок.

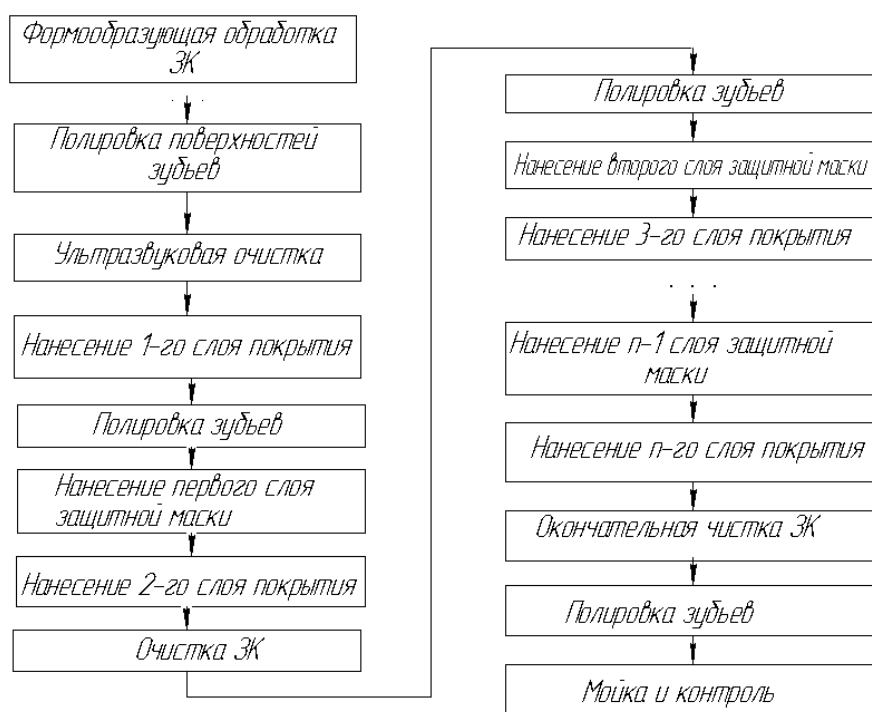


Рисунок 4. Последовательность нанесения многослойного покрытия на рабочие поверхности зубьев.

Далее осуществляется полирование поверхностей с покрытием, которое для предотвращения разрушения или снятия покрытия, выполняется по технологии высотного-сглаживающего полирования мягким микрошлифпорошком зернистости М5...М10. При этом должна быть достигнута шероховатость не более $Ra = 0.06 \text{ мкм}$.

После этого, в соответствии с требуемыми границами последующего слоя покрытия, на необработываемые участки наносится защитная маска. Данный процесс, при обработке партий ЗК может быть автоматизирован, а защитные маски могут наноситься методом напыления защитного технологического покрытия с последующей корректировкой границ. Сразу после этого этапа выполняется нанесение второго слоя (рис.3) границы которого определяют защитные технологические маски. После нанесения вто-

рого слоя выполняется чистка и мойка поверхностей от остатков защитных масок, после чего выполняется полирование второго слоя покрытия. Трудоемкость полирования в данном случае ниже, поскольку включает обработки только зон 2-го слоя покрытия. Далее снова наносятся защитные маски в соответствии с границами 3-го слоя покрытия, после чего повторяется процесс нанесения покрытия для последующих n слоев. После нанесения последнего слоя покрытия выполняется окончательная чистка ЗК от остатков защитных масок и полирование поверхностей зубьев для устранения дефектных участков покрытия и достижения требуемой шероховатости поверхностей зубьев.

3. Выводы

Таким образом, в работе на основании исследования условий работы зубчатых колес, определили, что основной причиной нарушения эксплуатационных характеристик зубчатых передач является механический износ зубьев который распределяется неравномерно по высоте зуба, проявляясь в большей степени на участках у основания и у головки зуба. Для выравнивания величины износа зуба по высоте и повышения ресурса работы зубчатой передачи предложена структура функционально-ориентированного покрытия основанного на увеличении количества слоев на участках с наибольшим ожидаемым механическим износом. Разработана технология нанесения многослойного функционально-ориентированного покрытия основанная на поэтапном нанесении слоев на участки зубьев с наибольшим ожидаемым износом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. 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.
2. Кудрявцев, В. Н. Зубчатые передачи. – М.: «Машгис», 1957. – 263 с.
3. Лахин, А. М. Особенности нанесения функционально-ориентированных покрытий на рабочие поверхности зубчатых колес / А. М. Лахин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: – Донецк: ДонНТУ, 2017. – № 2(57). – С.17-23.
4. 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. – № 8. – С. 28-36.
5. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

Поступила в редколлегию 05.05.2021г.