

УДК.621.01

А. М. Лахин, канд. тех. наук, доцент

Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия

Тел: +7 949 3189801; E-mail: l Relax@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ С ЗУБЧАТЫМ ВЕНЦОМ

В работе рассмотрены и исследованы эксплуатационные особенности работы деталей зубчатых передач и предложены варианты повышения эксплуатационных характеристик за счет обеспечения функционально-ориентированных свойств рабочих поверхностей зубьев.

Ключевые слова: зубчатое колесо, технология, качество, функционально-ориентированный подход

A. M. Lakhin

INCREASING THE PERFORMANCE PROPERTIES OF PRODUCTS WITH GEAR

The paper considers and investigates the operational features of the operation of gear parts and suggests options for improving operational characteristics by providing functionally oriented properties of the working surfaces of the teeth.

Keywords: gear wheel, technology, quality, function-oriented approach

1. Введение.

В настоящее время зубчатые передачи получили наиболее широкое применение среди всех видов силовых передач. Такие передачи, благодаря их конструктивному многообразию, способны передавать крутящие моменты между деталями с параллельными, пересекающимися, скрещивающимися осями, преобразовывать вращательное в поступательное движение или наоборот, использоваться для передачи жидкостей, изменения скоростей и направлений движения. Это обусловлено их неоспоримыми преимуществами, такими как: высокая нагрузочная способность, широкие диапазоны передаваемых скоростей и крутящих моментов, постоянство передаточного отношения, высокий КПД, малые габариты передачи, высокая надежность в работе и другие.

Между тем, для обеспечения всех преимуществ зубчатых передач требуются высокие трудозатраты, связанные с изготовлением зубчатых колес, также зачастую требует применения дорогостоящих конструкционных материалов и термической обработки зубчатых колес. Также зубчатые передачи требуют высокого качества и чистоты смазочного материала, особенно для высокоскоростных зубчатых колес. Кроме того, с увеличением окружных скоростей повышаются требования к степени точности зубчатых колес, охватывающие ряд параметров зубьев, которые должны быть выполнены с более высокой точностью.

В последнее время с развитием аддитивных технологий и технологий нанесения износостойких покрытий получил развитие новый подход в обеспечении эксплуатационных свойств изделий, связанный с обеспечением требуемых свойств не всей детали, а только ее части, выполняющей непосредственные функции, связанные со служебным назначением данной детали. Этот подход, кроме обеспечения требуемых физико-механических свойств участков и зон рабочих элементов, также направлен на изменение конструктивных особенностей элементов изделия для более полной адаптации к условиям его эксплуатации. Функционально-ориентированные технологии, разработанные проф. Михайловым А. Н. [1] определяют теоретические основы реализации данного подхода для различных изделий машиностроения, и представляют собой но-

вый вид технологий в которых свойства элементов изделия обеспечиваются в соответствии с условиями их эксплуатации в машине или технологической системе, а технологические воздействия определяются параметрами требуемых свойств изделия.

На основании вышесказанного целью данной работы является повышение эксплуатационных характеристик зубчатых колес на базе обеспечения функционально-ориентированных свойств рабочих элементов зубьев.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ особенностей работы зубьев зубчатых колес и причин износа рабочих поверхностей зубьев;
- выполнить анализ элементов зубчатых колес эксплуатационным признакам;
- исследовать варианты схем технологического воздействия для обеспечения заданных эксплуатационных свойств рабочих поверхностей зубьев;
- предложить технологические методы реализации данных схем технологического воздействия.

2. Основное содержание и результаты работы.

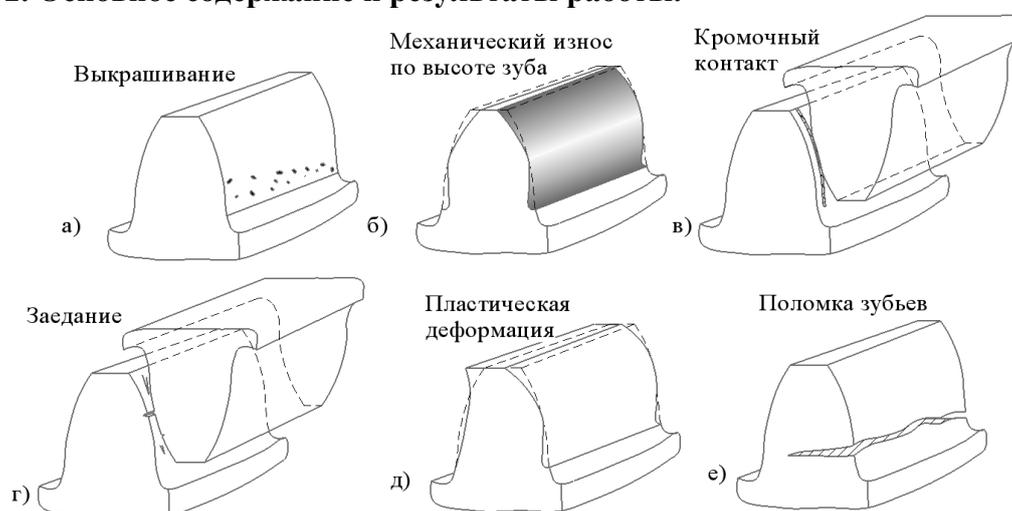


Рисунок 1. Основные виды повреждения зубьев при эксплуатации зубчатых передач

При эксплуатации зубчатых передач встречаются следующие повреждения и выхода из строя зубчатых колес (рис.1).

Выкрашивание зубьев (рис.1, а), которое возникает вследствие контактных напряжений в зацеплении и проявляется как правило, в начальный период приработки зубьев (микровыкрашивание), а также после продолжительной эксплуатации высоконагруженных зубчатых колес. Данный вид износа зависит от состояния поверхностного слоя, а также правильности геометрической формы рабочей поверхности зуба.

Механический или абразивный износ зубьев (рис.1, б) возникает после длительной эксплуатации зубчатой передачи, и вызван, при достаточной чистоте смазочного материала, разностью скоростей взаимного скольжения профилей в зацеплении [2]. Характер данного износа неравномерен по высоте зуба, он уменьшается ближе к полюсной линии и увеличивается в зонах у головки и ножки зуба. Неравномерность данного износа нарушает правильность зацепления, увеличивает тангенциальный зазор и является причиной возникновения шума при работе зубчатой передачи.

Кромочный контакт (рис.1, в) появляется в результате погрешностей направления зуба, монтажных погрешностей, а также вследствие разности ширин зубчатых венцов у шестерни и колеса из-за чего наибольшие контактные напряжения распределяются у краев зуба более узкого зубчатого венца. Кромочный контакт вызывает появление впадин и забоин на поверхностях зубьев, ухудшает качество рабочих поверхностей и в дальнейшем приводит к выкрашиванию и образованию усталостных трещин на поверхностях зубьев.

Заедание зубьев (рис.1, в) возникает вследствие схватывания и адгезии частиц выкрашиваемого материала зубьев на одном из колес, и образования лунок на зубьях другого колеса. Это приводит к сопротивлению при перекачивании профилей зубьев из-за попадания налипшего материала в лунки сопряженного зуба. Из-за этого значительно снижается КПД зубчатой передачи и увеличивается последующий износ зубьев вследствие наличия концентраторов напряжений.

Пластическая деформация зубьев (рис.1,г) возникает по причине превышения изгибных напряжений у ножки зуба и чаще всего появляется из-за превышения номинальных нагрузок или недостаточной степени упрочнения основания зуба. В дальнейшем деформация зубьев изменяет формы впадин и может стать причиной поломки зубьев.

Поломка зубьев (рис.1, д) происходит чаще всего вследствие развития усталостных трещин у основания зуба и носит усталостный характер. Проявляется главным образом при ударных знакопеременных нагрузках и в большей степени характерно для прямозубых зубчатых колес.

Рассмотрим структуру изделия с зубчатым венцом, на примере зубчатого блока (рис. 2).

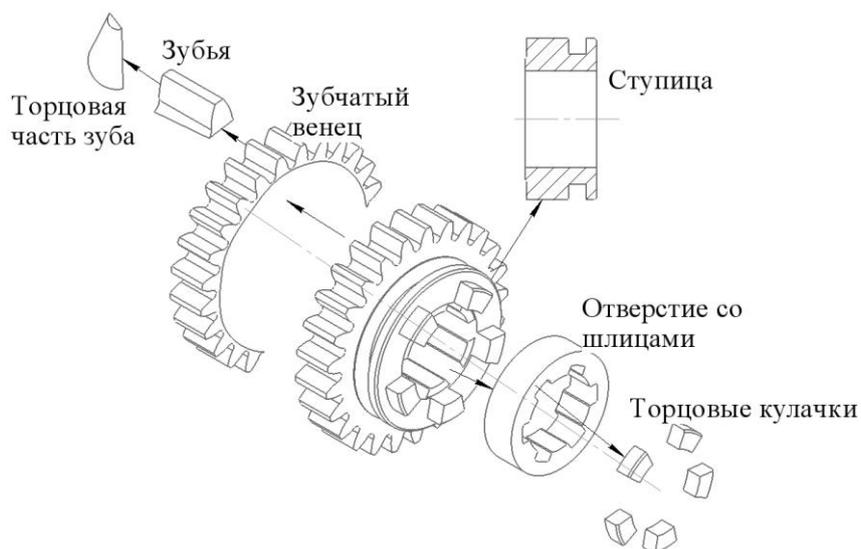


Рисунок 2. Структура изделия (зубчатый блок)

Ранее установлено [3], что любая деталь может быть представлена совокупностью исполнительных (рабочих и базисуемых), связующих, дополнительных и вспомогательных элементов. Изделие с зубчатым венцом, помимо функции по передаче крутящего момента посредством зацепления зубьев, может выполнять ряд дополнительных функций, определяемых его служебным назначением.

Согласно классификации, связующими элементами является ступица зубчатого блока, объединяющая на себе все элементы детали. Исполнительные базирующими элементами являются шлицевое отверстие с наружным или внутренним диаметром (в зависимости от способа центрирования) и боковыми стенками шлицев; а также торцы детали, определяющие положение зубчатого блока в осевом направлении.

Вспомогательными элементами являются фаски на поверхностях, паз на ступице для вхождения вилки переключения скоростей, а также закругленные части на торцовых поверхностях зубьев. Они служат для предотвращения заклинивания и облегчения вхождения в зацепление при переключении скоростей.

Рабочими исполнительными элементами являются зубчатый венец с отдельными зубьями, выполняющий передачу крутящего момента посредством вхождения в зацепление зубьев; торцовые кулачки выполняющие передачу момента посредством вхождения в зацепление с соосной деталью; и шлицевое отверстие, посредством которого выполняется осевое перемещение зубчатого блока при переключении.

Приведем требования к наиболее ответственным группам элементов (табл.1.).

Таблица 1. - Требования к основным группам элементов детали зубчатый блок

Элементы		Требования
Базирующие	Торцы	Размерная точность
		Точность ориентации
	Отверстие	Размерная точность
		Точность формы и взаимного расположения
	Боковые стенки шлицев	Точность размеров
		Контактная выносливость
Рабочие	Зубья	Контактная прочность
		Изгибная прочность
		Способность воспринимать динамические нагрузки
		Низкий коэффициент трения
		Стойкость к неравномерному износу
		Не склонность к адгезионному схватыванию
	Шлицы	Прочность среза
		Прочность смятия
		Низкий коэффициент трения
	Торцовые кулачки	Изгибная прочность
		Прочность среза
		Способность входить в зацепление без заклинивания
Вспомогательные	Закругленные торцы зубьев	Износостойкость
		Способность входить в зацепление без заклинивания
		Низкий коэффициент трения

Рассмотрим основные способы обеспечения свойств элементов зубчатого венца (рис. 3).

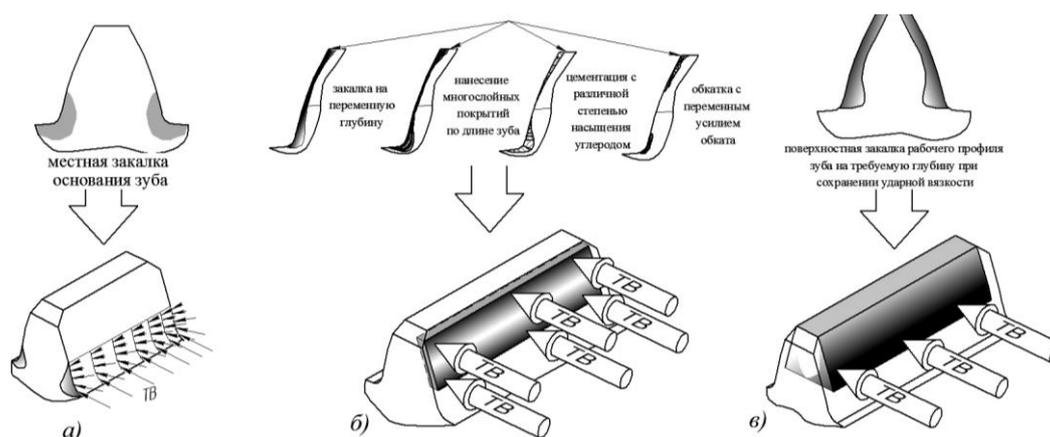


Рисунок 3. Технологические схемы обеспечения эксплуатационных свойств для предупреждения следующих видов разрушения: а) поломки зубьев; б) неравномерного механического износа по рабочей поверхности; в) усталостного выкрашивания.

Поскольку пластическая деформация зубьев и их поломка возникает чаще всего по причине длительного действия знакопеременных окружных сил в зонах у головки зуба излом происходит в зоне у основания зуба. Наиболее характерен данный вид износа для колес с малым числом зубьев, у ножки которых при нарезании образовалось сужение. Для избегания поломки зуба, объемным зонам у основания зуба необходимо обеспечивать более высокую прочность изгиба, причем данные свойства должны изменяться по объемному участку зуба и иметь наибольшую прочность у наружной поверхности. Это можно обеспечить за счет использования местной закалки, в частности закалки ТВЧ со специальным сердечником, выполненным по форме впадины зуба, с плавной регулировкой температуры нагрева и интенсивности охлаждения (рис.3, а).

Повреждения вследствие механического износа (рис.3, б) а также неравномерность износа зубьев вызваны взаимным скольжением профилей зубьев [2]. Вследствие изменения касательной составляющей скорости в зацеплении при перекачивании зубьев возникает трение с различной интенсивностью, которое при однородных свойствах материала зубчатого колеса, вызывает повышенный износ на участках у головки и ножки зуба. При этом в полюсе зацепления он минимален. Основной технологической задачей при этом является обеспечение свойств участков поверхностного слоя зуба в зависимости скорости взаимного скольжения в точке контакта, что может быть достигнуто при изменении свойств сопрягаемых поверхностей в соответствии со скоростью взаимного скольжения [4]. Возможным вариантом является плавное уменьшение коэффициента трения и увеличению стойкости к механическому износу в соответствии с графиком скорости взаимного скольжения профилей. Это можно достичь следующими вариантами технологических воздействий на рабочие поверхности зубьев:

- термической обработкой на переменную глубину по высоте зуба за счет изменения скорости прогрева и охлаждения в отдельных участках профиля зуба;
- обкаткой рабочих поверхностей зубьев с различным усилием обката, таким образом обеспечивая различную степень наклепа по зонам зубьев;
- нанесением многослойных покрытий с постепенным уменьшением количества слоев от головки и ножки к полюсной линии зуба;
- химико-термической обработкой с различной интенсивностью насыщения поверхностного слоя упрочняющими элементами по зонам рабочего профиля зуба.

Выкрашивание материала с поверхности зубьев (рис. 3, в) обусловлено действием контактных напряжений при взаимодействии пары зубьев. Для устранения данного вида разрушения технологические воздействия должны быть направлены на повышение контактной прочности зубьев в зонах у ножки и полюсной линии с дальнейшей отделочной механической обработкой для достижения заданного параметра шероховатости.

Выбор конкретного способа отделочной и упрочняющей обработки элементов зубчатого венца должен быть обоснован конкретными условиями эксплуатации, включающими величину рабочих нагрузок, окружные скорости в зацеплении, конструктивные особенности зубчатой передачи, допускаемые температуры, условия смазки и другие особенности.

3. Заключение

Таким образом, в работе на основе исследования основных причин разрушения и выхода из строя зубчатых колес, определены технологические способы повышения эксплуатационных свойств зубчатых колес на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств рабочих поверхностей зубьев. Для повышения ресурса износостойкости элементов зубчатых колес необходимо выполнять технологические воздействия на зоны и участки зубьев, испытывающие наибольшие эксплуатационные нагрузки. Для этого в работе предложены способы, направленные на: предотвращение неравномерного механического износа по высоте зуба; на исключение поломки зубьев вследствие пластической деформации и динамических нагрузок на зуб; а также на уменьшение или устранение усталостного выкрашивания с рабочих поверхностей зубьев.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов, А. Н. Михайлов. – Донецк: Технополис, 2009. – 346 с. – ISBN 9667907244.
2. Кудрявцев, В. Н. Зубчатые передачи. – М.: «Машгис», 1957. – 263 с.
3. Лахин, А. М., Особенности внедрения функционально-ориентированного подхода при изготовлении зубчатых колес / А. М. Лахин, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 1 (60). – С. 50 - 55.
4. Лахин, А. М. Повышение ресурса зубчатых передач на основе нанесения функционально - ориентированных покрытий / А. М. Лахин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – Вып. 4 (75). – С. 35 - 41.
5. Лахин, А. М. Повышение качества зубчатых колес с функционально-ориентированными покрытиями / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XIX межд. научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека» Екатеринбург, 20 – 21 мая 2021 г. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2021. – С. 326-329.

Поступила в редколлегию 25.01.23 г.