

Модификация поверхности зубьев в редукторах

РЕФЕРАТ. В статье рассмотрены причины, вызывающие необходимость модификации поверхности зубьев в редукторах. Показано, что приемы, используемые для этого в редукторах фирмы MAAG Gear AG, обеспечивают высокую надежность передачи крутящего момента между зубчатыми колесами.

Введение

Зубья передач в редукторных приводах на промышленных предприятиях и в морских силовых установках занимают очень небольшое место. Однако это – очень специфичное место, которое вместе с другими факторами является важнейшим для успешного функционирования предприятия. Оптимальная, высокая надежность передачи крутящего момента между двумя зубчатыми колесами посредством боковой поверхности зуба является ключевым моментом.

Максимально точная шлифовка эвольвентной боковой поверхности зуба, показанная на рис. 1, не является достаточной для достижения такой высокой надежности. Контактный контроль соприкосновения боковых поверхностей зубьев проводится на специальном стенде с использованием берлинской лазури, которая показывает контакт по всей высоте зуба и практически 100% по всей ширине зубчатого венца. Но следует отметить, что геометрически идеальная поверхность может привести к пагубным последствиям при реальных номинальных рабочих условиях.

При передаче крутящего момента зубчатые части рабочего колеса подвергаются упругим деформациям за счет нагрузки зубьев.

К таким деформациям относятся изгиб зубьев, скручивание шестерни и колеса, изгиб и растяжение под действием центробежной силы. В результате потерь на перемешивание

масла и потерь на трение в зубьях и в подшипниках компоненты привода с зубчатыми передачами нагреваются, что добавляет и температурные погрешности. Средняя температура шестерни обычно устанавливается на более высоком уровне, чем температура колеса. Температура не одинакова по всей ширине зубчатого венца. На распределение температуры также оказывает влияние тип смазки зубьев (охлаждение). Поэтому тео-

ретическая форма зубьев должна быть изменена так, чтобы «трапецевидные» вариации нагрузки в направлении контакта и даже распределение нагрузки вдоль направления ширины зубчатого венца при любых нагрузках и температуре масла уменьшали до определенного (номинального) уровня температурное влияние. Кроме того, зубья должны входить и выходить из зацепления с минимально возможными ударами, что соответственно минимизирует шумы передач.

Необходимые модификации относительно малы. Они исчисляются несколькими тысячными или сотыми долями миллиметра. Но даже эти небольшие изменения значительно улучшают пятно контакта зубьев при нагрузке и обеспечивают безопасную передачу мощности. Делаем вывод, что высокая

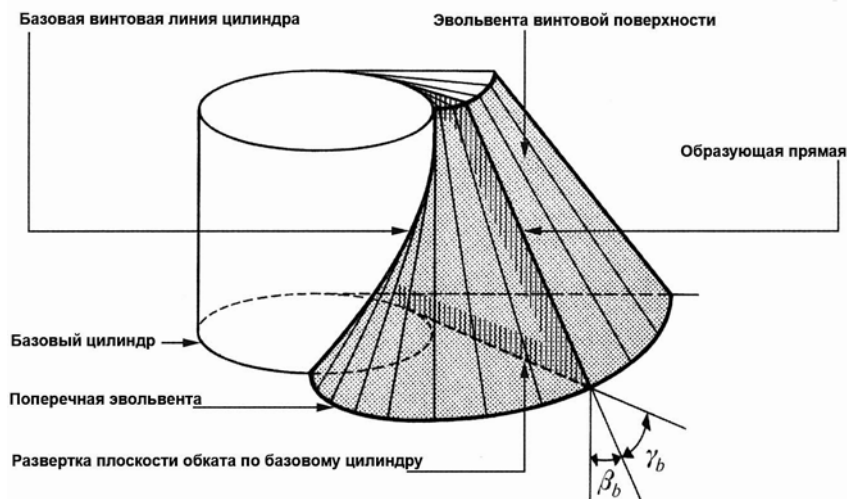


Рис. 1. Эвольвента винтовой поверхности зуба с углом винтовой линии (β_b) и основным углом подъема винтовой линии (γ_b)

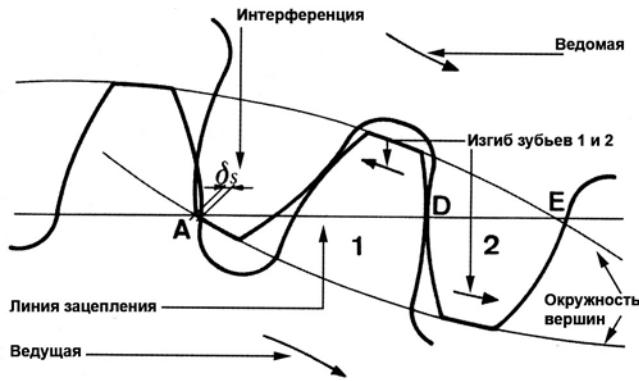


Рис. 2. Деформации и интерференция в зацеплении при нагрузке, эвольвентные зубья без модификации

точность очень важна для производства передач с модифицированными зубьями. Если допуски на изготовление зубьев достаточно грубы и превышают необходимые размеры модификации, то сама модификация теряет смысл.

Чтобы получить все преимущества модификации боковой поверхности зуба, очень важно измерить окончательно обработанные на станке зубчатые колеса. Необходимо проводить измерение не только шага (единичные и суммарные отклонения шага), но также профиля и винтовых контуров.

Форма и степень модификации, изменения влияния факторов определяются отдельно друг от друга. Общая модификация является суммой результирующих модификаций.

Распределение нагрузки на зубья в направлении контакта в поперечном сечении, модификация профиля

В целях предотвращения ударов при входе в зацепление благодаря изгибу зубьев и обеспечению «трапецевидного» распределения нагрузки на зубья в направлении линии зацепления в поперечном сечении, модификация профиля всегда включает в себя модификацию профиля головки и впадины зубьев шестерни или модификацию профиля головки зубьев сопряженных колес. Форма и значения этих модификаций должны быть точно определены по базовой рассчитанной прочности зубьев в зацеплении, а результаты должны быть объединены.

Рис. 2 показывает интерференцию в первой точке контакта (точка А) обычных эвольвентных зубьев без профильной модификации. Эта интерференция вызвана изгибающими деформациями зубьев 1 и 2, которые контактируют друг с другом в точке D. В результате удары производят шум и могут уменьшить прочность зубьев во всех их аспектах, включая масляную пленку на боковой поверхности зубьев с риском образования задиров на головках и впадинах сопряженных зубьев.

Рис. 3 показывает профильную модификацию (профильную диаграмму) шестерни и

«трапецевидное» распределение нагрузки на зуб, обеспечиваемое в направлении контакта без ударов при входе в зацепление применением профильной модификации головки и впадины зуба (А, Н, I, Е).

Равномерное распределение нагрузки в направлении ширины зубчатого венца, модификация поверхности зуба

В целях достижения равномерного распределения нагрузки на зубья в направлении ширины зубчатого венца (фактор нагрузки зубчатого венца $K_{H\beta}$, $K_{F\beta}$ близок к общему) к шестерне всегда применяется модификация поверхности зуба, чтобы скомпенсировать изгибающие деформации, деформации при кручении и тепловые искажения сцепленных

колес. Тщательное рассмотрение тепловых деформаций очень важно для зубчатых передач с окружной скоростью на делительной окружности выше 80 м/с.

Эти деформации возникают вследствие нагревания из-за потерь мощности в зоне сцепления по причине вытеснения смеси воздух/масло из пространства зубьев. В косозубых передачах вытеснение идет в направлении ширины зубчатого венца (эффект архимедова винта) с охлажденной стороны (передний конец колеса) к теплой выходной стороне (задний конец колеса). Сторона, обращенная к ротору, в особенности большая сторона зубчатого колеса, обладает охлаждающим эффектом.

Рис. 4, а показывает типичные измерения с помощью термопар величины температуры высокоскоростной шестерни. Результаты температурных отклонений боковой поверхности зубьев шестерни и колеса имеют ассиметричную бочкообразную форму (рис. 4, б).

Средняя температура шестерни выше, чем средняя температура сопряженного зубчатого колеса. Эта разница температур обусловлена разницей количества зубьев шестерни и колеса, которая должна быть скомпенсирована в поперечном сечении профильной модификацией, а в осевом направлении – модификацией поверхности зуба. Существует простое правило для различия осевого шага.

Если шестерня ведущая (замедляющая передача), то четко выраженное пятно контакта должно находиться ближе к заднему концы колеса; если же шестерня ведомая (по-

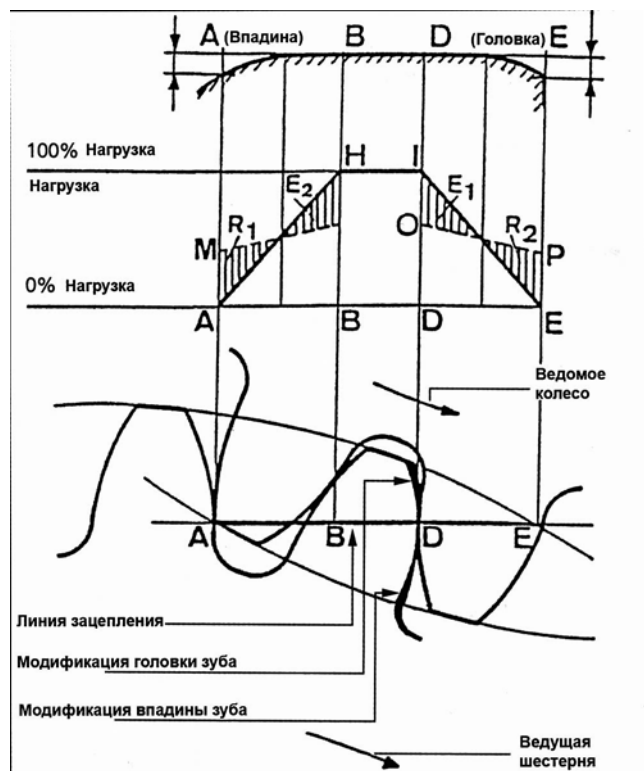


Рис. 3. Распределение нагрузки и профильная диаграмма для эвольвентных зубьев с модификацией головки и впадины

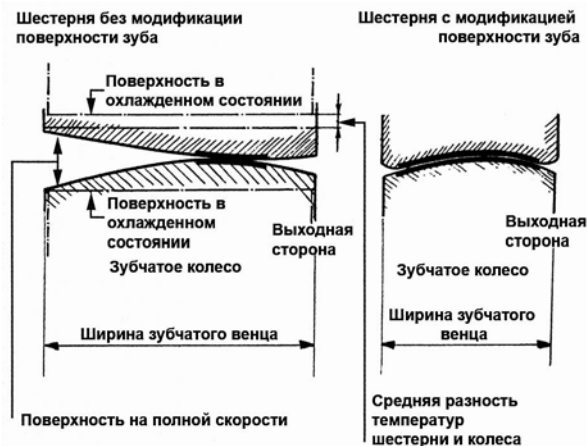
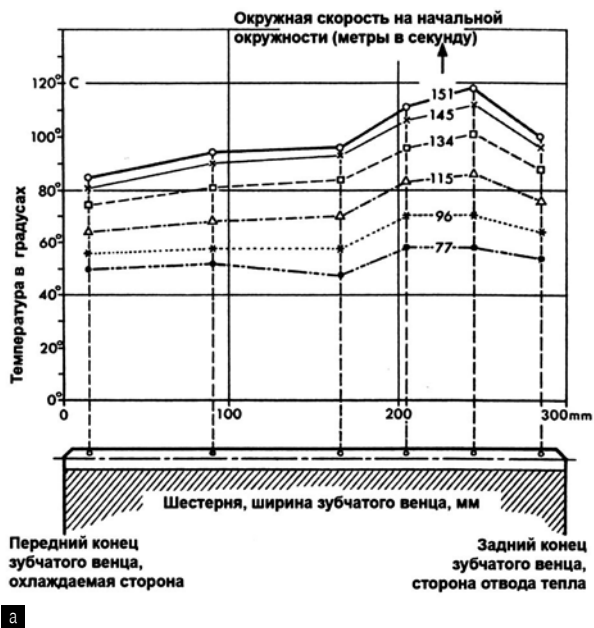


Рис. 4 – Измерения объемной температуры высокоскоростной шестерни; б – зубчатое зацепление при номинальной скорости с/без модификации поверхности зуба

вышающая передача), то четко выраженное пятно контакта должно находиться ближе к переднему концу колеса.

Если эти температурные отклонения не скомпенсированы, то они могут послужить причиной высокой локальной перегрузки между боковыми поверхностями зубьев, что является серьезной опасностью для сохранения работоспособности передачи. Для обеспечения равномерного распределения нагрузки по всей ширине зубчатого венца, боковая поверхность зубьев шестерни име-

ет коническую/седлообразную модификацию поверхности зуба.

Многочисленные тесты, проводимые фирмой MAAG с окружной скоростью на делительной окружности выше 200 м/с с использованием термопар, установленных на рабочих колесах, четко показали, что даже со всеми видами асимметричного впрыска масла в зацепление колес или картер редуктора практически невозможно добиться постоянства температурных отклонений в шестерне и колесе, которого позволяет достичь

коническая/ седлообразная модификация поверхности зуба.

На рис. 5 и 6 отдельно и совместно изображены деформации на изгиб, кручение и тепловые отклонения рабочих колес, как для одиночного косозубого, так и для шевронного высокоскоростного колеса. Форма и значительные величины изгибающих деформаций (угол наклона зубчатых частей) оказывают сильное влияние на модификацию поверхности зуба в шевронных передачах. Рабочая поверхность с такой модификацией поверх-

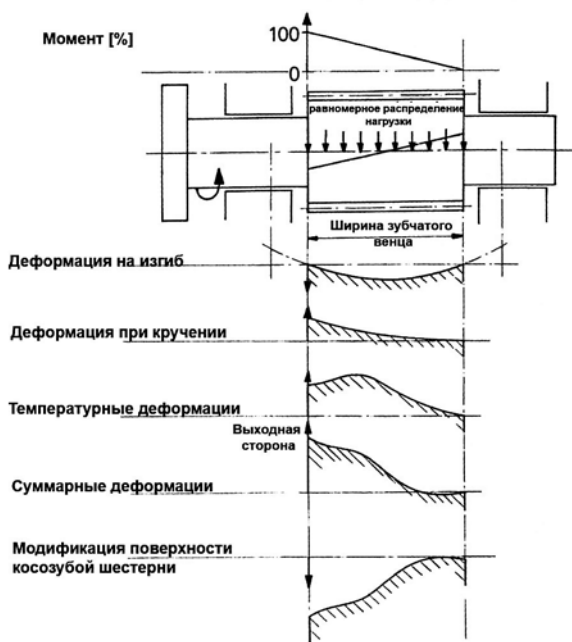


Рис. 5. Одиночное косозубое зубчатое колесо – деформации, температурные деформации и модификация поверхности зуба

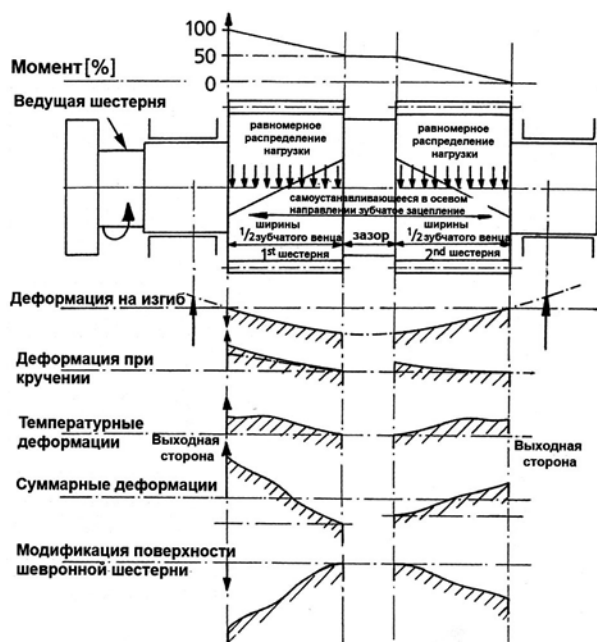


Рис. 6. Шевронное зубчатое колесо – деформации, температурные деформации и модификация поверхности зуба

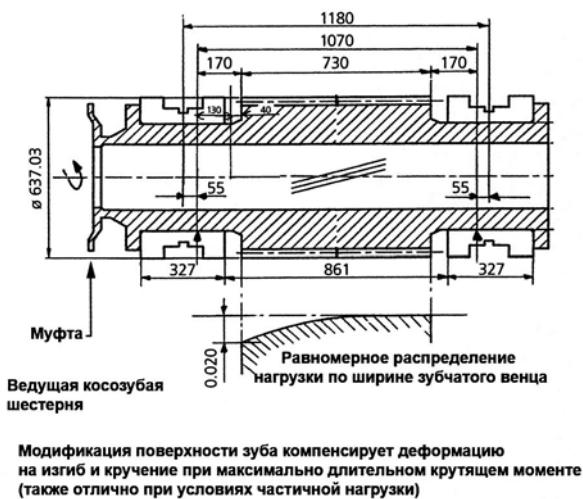


Рис. 7. Модификация поверхности зуба косозубой шестерни

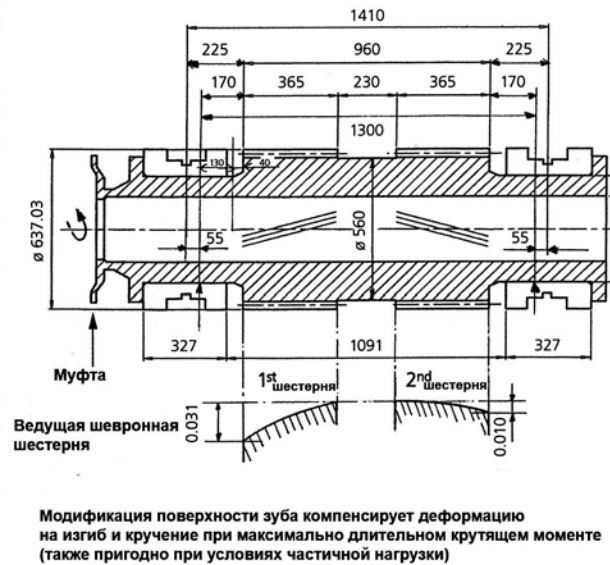


Рис. 8. Модификация поверхности зуба шевронной шестерни



Рис. 9. Реальные деформации, соответствующие модификации поверхности зуба, и проверка зацепления с/без нагрузки и скорости

ности зуба не может быть использована для точной установки колеса, так как пятно контакта зубьев (берлинская лазурь) очень короткое. Поэтому нерабочие поверхности шестерни и колеса шлифуют абсолютно параллельно и используют как базу для точного размещения колес (проверка контакта в корпусе редуктора).

Морские редукторы со специальными низкими шумовыми требованиями работают в основном при частичной нагрузке.

Рис. 7 и 8 показывают модификацию поверхности зуба в одиночной косозубой и шевронной передаче. Преимущество одиночной косозубой передачи, которое является результатом очень долгого контакта

зубьев по всей ширине зубчатого венца – даже без нагрузки – очевидно.

Рис. 9 показывает реальные погрешности и температурные отклонения высокоскоростных турборедукторов MAAG с окружной скоростью на делительной окружности примерно 170 м/с. При такой высокой скорости тепловые отклонения оказывают большее влияние в абсолютных условиях.

Рис. 9 также показывает результирующую модификацию поверхности зуба и пятно контакта зубьев рабочих и нерабочих поверхностей, получаемых во время проверки контакта с помощью берлинской лазури и используемых для выравнивания колес; при полной нагрузке и полной скорости пятно контакта проверяется с помощью метода Dykem Red.

Заключение

Правильно разработанная профильная модификация и модификация рабочей поверхности зуба (а также и нерабочих поверхностей, если требуется) очень важна для надежной и успешной работы редуктора. Эти модификации основаны на многолетних наблюдениях и опыте фирмы MAAG. Но, несмотря на все применяемые расчетные методы, стандарты, помощь компьютеров и станков с ЧПУ, редуктор является, в конечном счете, произведением искусства. Результаты, удовлетворяющие требованиям, существенно зависят от знаний и умений привлеченных людей и больше всего – от их желания совершенствоваться день за днем. Это относится не только к персоналу по термообработке, зубонарезанию, шлифовке зубьев и персоналу отдела технического контроля, но и к персоналу сборочного цеха и другим вне этого перечня.

Редукторы различных производителей могут иметь похожие коэффициенты надежности и условий эксплуатации, зависящие от соответствия редуктора стандартам для расчета их нагрузочной способности, но их надежность тем не менее может значительно отличаться из-за различия в мастерстве производственного персонала. Даже если редуктор правильно разработан и изготовлен, ему может быть нанесен вред, если он будет неправильно установлен в процессе обслуживания.

Таким образом, основное внимание должно быть направлено на зубья передачи.

Хорошо проинформированные покупатели редукторов выбирают только тех производителей зубчатых передач, которым могут полностью доверять.

Материалы статьи предоставлены фирмой MAAG Gear AG