

ные сдвиговые деформации, а значит, и глубину упрочненного слоя по сравнению с применением смазки типа сульфифрезол.

Литература

1. Кузнецов А.М. Технологические основы создания методов обработки в машиностроении. Дисс на соискание ученой степени д.т.н. М., МАМИ, 1975г.
2. Кузнецов В.А. Исследование качества поверхностного слоя при деформирующе-режущем протягивании. Дисс. на соискание ученой степени к.т.н. М., МАМИ, 1985г. 211с.
3. Проскуряков Ю.Г. Объемное дорнование отверстий. М., Машиностроение, 1984г., 222с.
4. Розенберг А.М. Физические явления при деформирующем протягивании и резание пластических металлов. Киев, Институт сверхтвердых материалов АН УССР, 1978г. 187с.

Влияние метода зубонарезания на изгибную прочность зубьев цилиндрических колёс автомобилей и тракторов

к.т.н. доц. Виноградов В.М., к.т.н. доц. Черепяхин А.А.
МГТУ «МАМИ»

Зубчатые колёса автотракторных трансмиссий работают в широком диапазоне окружных скоростей: шестерни коробок передач, раздаточных коробок и коробок отбора мощности в пределах 2...20 м/с для тракторов, и до 40 м/с для автомобилей, шестерёны бортовых передач тракторов в пределах 0,4...1,5 м/с.

Основными причинами выхода из строя трансмиссионных зубчатых колёс в эксплуатации является поломка зубьев из-за недостаточной усталостной прочности их на изгиб и выкрашивание боковых поверхностей зубьев вследствие усталости металла под действием контактных напряжений. В большинстве случаев несущая способность тяжело нагруженных зубчатых колёс бортовых передач тракторов и ведущих мостов автомобилей ограничивается изгибной прочностью зубьев, которая определяется их формой и размерами и во многом зависит от формы переходной кривой, определяющей концентрацию напряжений и размеры зубьев у основания.

При обработке зубчатых колёс в настоящее время широко применяются самые разнообразные методы формообразования впадин между зубьями, которые в значительной мере определяют содержание, длительность и качественные показатели зубообрабатывающих операций.

Формообразование впадин между зубьями цилиндрических колёс может осуществляться одним из трёх методов: копированием, огибанием и обкаткой.

При обработке зубьев колёс по методу копирования профиль впадин между зубьями обрабатываемого колеса является копией профиля производящих кромок инструмента, а процесс зубообработки осуществляется путём последовательного формирования впадин между соседними зубьями колеса при единичном делении после обработки каждой впадины.

Метод огибания заключается в том, что профиль впадины между зубьями образуется как огибающая различных положений производящих кромок инструмента. После получения профиля одной впадины между двумя зубьями заготовка поворачивается на один шаг, и путём огибания начинает формироваться профиль следующей впадины и так далее, то есть данный метод сочетается с единичным делением. Иногда этот метод в технической литературе называют методом бесцентроидного огибания.

Метод обкатки или центроидного огибания является частным случаем метода огибания. Сущность его заключается в том, что обработка зубьев цилиндрического колеса осуществляется за счёт воспроизводства зацепления сопряжённых деталей зубчатой пары, из которых одна деталь является заготовкой обрабатываемого зубчатого колеса, а другая – инструментом.

Производящие кромки обкатного инструмента, занимая последовательно различные положения на линии зацепления воспроизводимой пары, снимают во впадине заготовки оп-

ределённые слои металла и формируют боковую поверхность зубьев как огибающую последовательного положения производящих кромок инструмента.

В процессе обработки зубьев заготовка и инструмент воспроизводят движение соответствующей пары. Это движение обеспечивают соответствующие кинематические цепи станка, работающего методом обкатки. Метод обкатки может выполняться непрерывно или с индивидуальным делением.

Наибольшее распространение в практике зубообработки цилиндрических трансмиссионных зубчатых колёс получил метод обкатки. Это объясняется тем, что первоначально метод копирования реализовывался на практике с помощью дисковых зуборезных фрез и имел низкую точность, обусловленную неточностью делительных головок, профилирования и изготовления фрез, неточностью установки фрезы и неточностью станков, на которых обычно производилось зубонарезание. Эти обстоятельства привели к тому, что метод копирования в принципе стал считаться технически устаревшим по сравнению с методом обкатки.

Впервые подробный сравнительный анализ метода копирования и метода огибания при зубонарезании сделал Матюшин В.М. [1]. На основании этого анализа он наметил пути повышения точности и производительности метода копирования, которые впоследствии были реализованы в нашей стране при разработке и практическом использовании кругового протягивания зубьев цилиндрических колёс, а также при долблении зубьев резцовыми головками.

Основными направлениями повышения точности обработки при методе копирования являются: применение вместо обычных делительных головок приспособлений с прямым делением при помощи делительных дисков; профилирование инструментов не по номерам фрез, а применительно к точному числу зубьев нарезаемого колеса; использование вместо универсальных станков более точных специальных зуборезных станков. Что касается производительности зубонарезания по методу копирования, то она может значительно превысить производительность, например, зубофрезерования червячными фрезами за счёт применения инструментов больших диаметров (550...630 мм), многопозиционной обработки, ускорения обратных ходов, применения автоматического деления, оснащения инструмента твёрдыми сплавами, улучшения геометрических параметров их режущих элементов. Кроме того, метод копирования таит в себе принципиальные возможности повышения производительности труда за счёт большой суммарной длины режущих кромок, одновременно участвующих в процессе резания, а также возможности одновременного нарезания всех зубьев колеса, что полностью исключено при методе огибания. Значительные преимущества имеет метод копирования и для получения зубчатых колёс с модифицированным профилем зубьев, так как при методе огибания производство зуборезного модифицированного инструмента значительно усложняется и соответственно удорожается.

Так как в большинстве случаев нагрузочная способность зубчатых передач ограничивается изгибной и контактной прочностью зубьев, зависящих от формы переходной кривой зубьев и качества поверхности их боковых сторон, то метод формообразования впадин между зубьями играет решающую роль в повышении долговечности зубчатых колёс.

Геометрия переходной кривой (рис. 1) формируется при зубонарезании и поэтому зависит от типа применяемого зуборезного инструмента, геометрии его зубьев и параметров нарезаемого колеса. При использовании для зубонарезания метода копирования переходная кривая идентична с профилем кромки зуба инструмента. При методе обката переходная кривая нарезаемых зубьев и кривая кромки зуба инструмента являются взаимно огибаемыми и их геометрия подчиняется общим закономерностям плоского зацепления. В случае непритупленной кромки зуба обкатного инструмента переходная кривая является отрезком удлиненной или укороченной эвольвенты, а при использовании стандартного исходного контура она является эквидистантой названных кривых (рис. 1, а). Следовательно, при нарезании зубчатых колёс по методу обкатки переходная кривая в разных точках по высоте зуба имеет раз-

личную кривизну. В точке сопряжения кривой с окружностью впадин радиус кривизны r переходной кривой имеет наименьшую величину и при удалении рассматриваемой точки кривой от окружности впадин монотонно возрастает. Зубчатые колёса, обработанные по методу копирования, имеют форму переходной кривой зубьев с постоянным радиусом кривизны r (рис. 1, б).

При работе зубчатых передач напряжения, возникающие в основании зубьев колёс, характеризуются величиной теоретического коэффициента концентрации напряжений K_α , значения которого зависят от формы и размеров переходных кривых. Использование при нарезании колёс режущего инструмента с возможно большими радиусами закругления вершин зубьев может при прочих неизменных условиях существенно уменьшить концентрацию напряжений в основании зубьев. С технологической точки зрения увеличение радиуса закругления головки режущих зубьев инструмента крайне благоприятно сказывается на повышении стойкости инструмента и его работоспособности. Особенно это важно при круговом протягивании зубьев, когда используется дорогостоящий режущий инструмент.

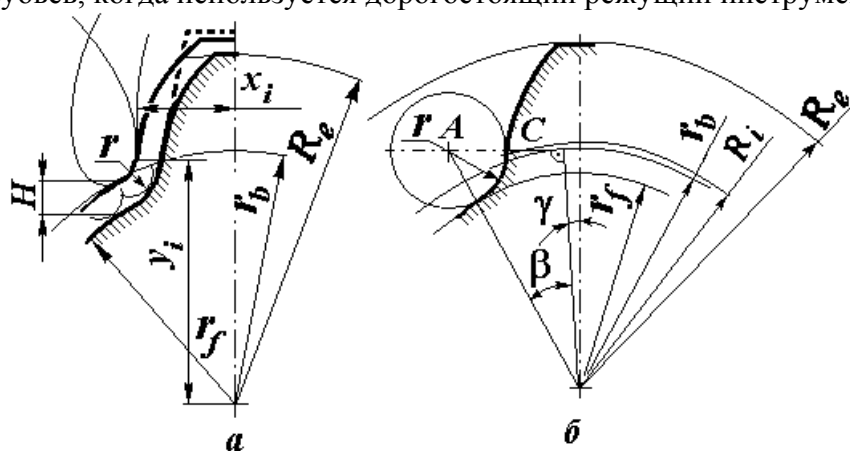


Рис. 1. Характер переходных кривых зубьев в зависимости от метода обкатки (а) и копирования (б): r – радиус окружности переходной кривой

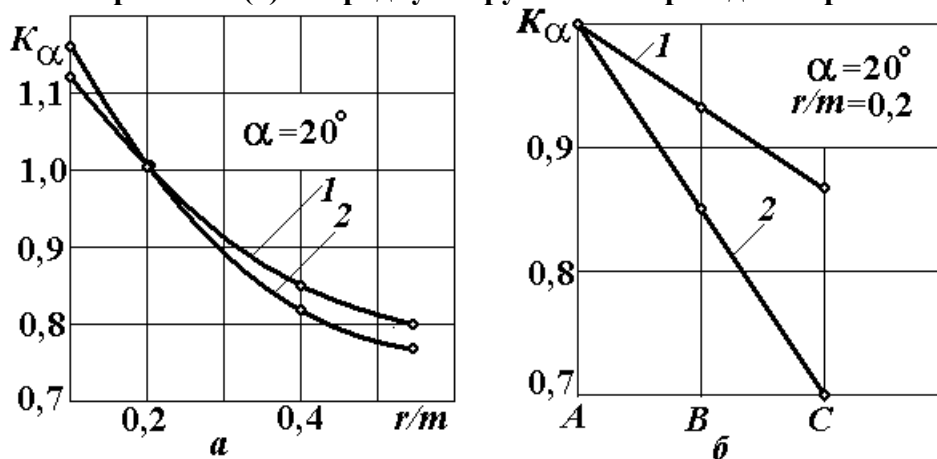


Рис. 2. Зависимость коэффициента концентрации напряжений (K_α) от материала зубчатого колеса (а) и от вида зубообрабатывающей операции (б): А – фрезерование червячной фрезой; В – фрезерование червячной фрезой с последующей зачисткой; С – фрезерование червячной фрезой с последующим шлифованием;
1 – для цементованной стали; 2 – для улучшенной стали

Анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований, выполненных отечественными исследователями, показывает, что напряжения σ в основании зубьев обратно пропорциональны радиусу r_p переходной кривой зуба в опасном сечении ($\sigma = 1/\mu$). Показатель степени при r по данным ряда авторов колеблется в пределах 0,12...0,5. Большие ко-

лебания значений μ объясняются влиянием на концентрацию напряжений в зубьях материала зубчатых колёс, шероховатости переходных поверхностей зубьев, а также характером движения режущей кромки инструмента при зубонарезании.

Это хорошо видно из графиков на рис. 2, где показаны изменения коэффициента концентрации напряжений K_α от величины отношения r/m для различных материалов зубчатых колёс (рис. 2, а) и различных операций (рис. 2, б), используемых при обработке зубьев. Радиус кривизны переходной кривой зуба в опасном сечении можно определить по формуле:

$$r = m \left(\frac{r_0}{m} + \frac{1 - \xi - e}{0,5z \cos^3 \varphi + (1 - \xi - e) \cos \varphi} \right) \quad (1)$$

где: m - модуль нарезаемых зубьев;

r_0 - радиус основной окружности нарезаемого колеса;

ξ - коэффициент коррекции исходного контура при профильном угле α ;

e - коэффициент смещения исходного контура инструмента:

$$e = r_{\text{и}} \sin \frac{a}{m}, \quad (2)$$

где: a - смещение исходного контура из-за скругления вершины зуба инструмента;

$r_{\text{и}}$ - радиус скругления вершины зуба инструмента;

φ - угловой параметр, определяющий опасное сечение зуба (определяется из рис. 3).

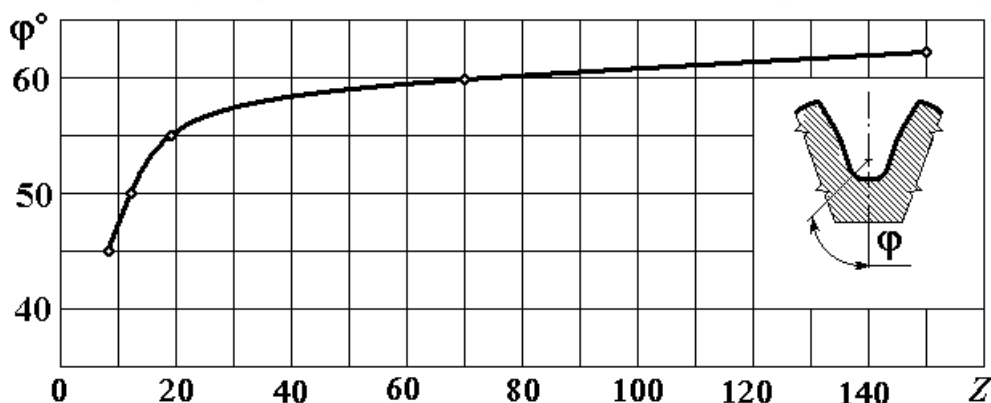


Рис. 3. График для определения координат опасного сечения зуба при изгибе, в зависимости от числа нарезаемых зубьев

При зубофрезеровании червячной фрезой увеличения радиуса кривизны переходной кривой зубьев можно достичь полным скруглением вершин зубьев рейки по радиусу, величина которого может быть определена по формуле:

$$r_{\text{и. max}} = m(0,25\pi - 1,25\text{tg}\alpha)\text{tg} \frac{90 + \alpha}{2}. \quad (3)$$

Для стандартного исходного контура с $\alpha = 20^\circ$ и $r_{\text{и max}} = 0,4712 m$ дальнейшее увеличение $r_{\text{и}}$ ведёт к искажению основных геометрических параметров стандартного исходного контура. Червячные фрезы усовершенствованной геометрии с $r_{\text{и}} = 0,47 m$ внедрены на ЗИЛе, что повысило нагрузочную способность зубчатых колёс трансмиссий автомобилей и стойкость червячных фрез.

Переходная кривая зубьев колеса, нарезанного по методу копирования, представляет собой дугу радиуса $r_{\text{и}}$, касающуюся с одной стороны эвольвентного профиля зуба в переходной точке «L» на радиусе R_L и с другой – окружности впадин (рис. 4). Радиус кривизны этой дуги постоянен и равен радиусу закругления вершин зубьев инструмента, оптимальная величина которого может быть определена путём рассмотрения характерных форм реальных переходных кривых автотракторных зубчатых колёс.

Радиус окружности (R_L), на которой находится точка L , определяется по формуле:

$$R_L = \sqrt{r_{b1}^2 + (A \sin \alpha_0 - \sqrt{R_{l2}^2 - r_{b2}^2})^2}, \quad (4)$$

где: r_{b1} и r_{b2} - радиусы основной окружности нарезаемого и сопряжённого колеса;

A – межосевое расстояние нарезаемого и сопряжённого колёс;

R_{l2} - радиус окружности выступов сопряжённого колеса.

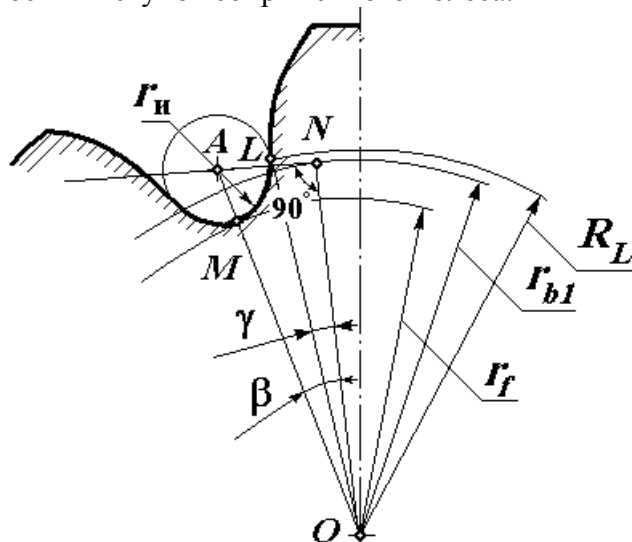


Рис. 4. Схема формирования переходной кривой при нарезании зубьев методом копирования

Центр радиуса r_f переходной кривой лежит в точке пересечения продолжения радиуса окружности впадин и касательной к основной окружности, проходящей через граничную точку L . Для определения величины r_{b1} воспользуемся треугольниками OAN и OLN .

Из их рассмотрения можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} r_{b1} = (r_f + r_{b1}) \cos \beta \\ r_{b1} = (\tan \beta - \tan \gamma) r_{b1} \\ r_{b1} = R_L \cos \gamma \end{cases}, \quad (5)$$

где: r_f – радиус окружности впадин;

α_0 – угол исходного контура.

После решения первых двух уравнений получим:

$$\sin \beta = \frac{r_{b1}^2 - (r_f - r_{b1} \tan \gamma)^2}{r_{b1}^2 + (r_f - r_{b1} \tan \gamma)^2} \quad (6)$$

и, подставив в последнее уравнение значение γ из последнего уравнения системы, определим угол β .

После подстановки значений углов γ и β в любое из первых двух уравнений системы получим величину r_{b1} .

Из анализа уравнений системы можно заключить, что на величину радиуса кривизны переходной кривой оказывают влияние радиусы окружностей: основной, впадин и граничной точки. Они в свою очередь определяются числом зубьев нарезаемого и сопряжённого колёс, величинами их коэффициентов коррекции профиля и величиной модуля зуба. Кроме того, перечисленные параметры определяют и форму переходной кривой, которая может состоять из дуги постоянной кривизны или из дуги и прямого участка.

Для сравнения радиусов кривизны переходных кривых в опасном сечении зубьев колёс, нарезанных по методу обкатки червячной фрезой со стандартным исходным контуром и по

методу копирования, круговой протяжкой, были выполнены соответствующие расчёты по определению r/m и K_α применительно к зубчатым колёсам автомобилей, тракторов и комбайнов, имеющих различные числа зубьев, модули и степень корригирования. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Зависимость радиуса кривизны переходной кривой от параметров зубчатого колеса и метода формообразования впадин между зубьями

Параметры нарезаемого зубчатого колеса	Зубофрезерование		Круговое протягивание		Увеличение радиуса кривизны, %
	r/m	K_α	r/m	K_α	
$z = 20, m = 4,25 \text{ мм}$ $\xi = 0,305$	0,515	0,803	0,793	0,711	50
$z = 45, m = 4,25 \text{ мм}$ $\xi = 0,517$	0,888	0,689	1,2	0,633	35
$z = 30, m = 4,5 \text{ мм}$ $\xi = 0$	0,623	0,749	0,82	0,694	31,5
$z = 40, m = 4 \text{ мм}$ $\xi = 0$	0,618	0,776	0,75	0,733	23
$z = 71, m = 4,5 \text{ мм}$ $\xi = 0$	0,522	0,787	0,634	0,745	22

Из таблицы следует, что при замене операции зубонарезания цилиндрических прямозубых колёс червячными фрезами (по методу обкатки), круговым протягиванием (по методу копирования) радиус кривизны переходной кривой в опасном сечении зуба можно увеличить на 25...50 % в зависимости от параметров нарезаемых колёс. Такое увеличение радиуса кривизны переходной кривой зуба позволит снизить концентрации напряжений в основании зубьев и соответственно повысить изгибную прочность зубьев на 20...25 %.

Как показали экспериментальные исследования, выполненные в технологической лаборатории МГТУ «МАМИ», при замене зубофрезерования круговым протягиванием точность зубонарезания увеличивается на одну степень, а шероховатость поверхности впадин между зубьями улучшается на один класс. Всё это позволяет снизить концентрацию напряжений в опасном сечении ещё на 10...15 % и соответственно повысить изгибную прочность зубьев колёс.

Выводы

Применение метода копирования вместо обката позволяет повысить изгибную прочность зубьев трансмиссионных колёс автомобилей и тракторов на 20...30 %.

Литература

1. Вулгаков Э.Б. Новое поколение эвольвентных зубчатых передач. «Вестник машиностроения», 2004, № 1, с. 3-6.
2. Вулгаков Э.Б. О выборе параметров исходного контура. «Вестник машиностроения», 1992, № 12, с. 7-13.
3. Вулгаков Э.Б., Аммосов В.Н. Влияние перекрытий на динамическую нагруженность зубчатой передачи. «Вестник машиностроения», 1990, № 1, с. 12-16.

Колебания при режуще-деформирующей обработке нежестких валов

д.т.н. проф. Максимов Ю.В., к.т.н. доц. Анкин А.В.
МГТУ «МАМИ»

В современном машиностроении проблема создания высокоэффективных технологических процессов механической обработки с учетом выполнения требований ресурсо-, энерго-сбережения и экологии является одной из наиболее важных. При высоких требованиях к качеству деталей и узлов большое значение в технологическом процессе их изготовления иг-