

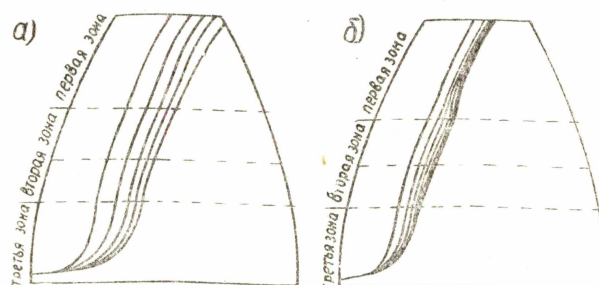
НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНОСА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Ю. С. СЕМЕНОВ

(Представлено научным семинаром кафедры прикладной механики)

За характеристику износа рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес обычно принимается удельная работа трения или пропорциональное ей удельное скольжение [1]. Если следовать этому положению, то нельзя объяснить, например, износа зубьев в околополюсной зоне рабочей поверхности, поскольку в этой зоне указанные выше величины весьма малы. В связи с этим некоторые авторы, например [2], пытаются ввести новый параметр, характеризующий износ, который лишен физического смысла, но обеспечивает лучшее совпадение теоретических расчетов с опытными данными по износу в околополюсной зоне.

В настоящей статье на примере анализа профилей изношенных зубьев реальной передачи, подвергшейся испытаниям [3], будет показано, что удельная работа трения может являться характеристикой, определяющей изменение геометрии профилей эвольвентных

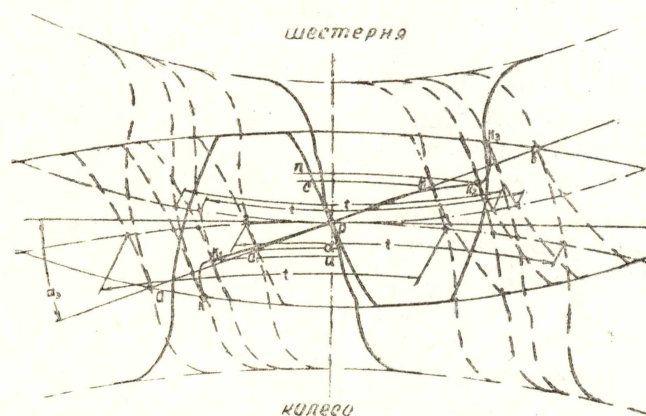


Фиг. 1. Изменение профилей зубьев в процессе износа. При нагрузке и соответствующей контактной напряженности $\sigma_k = 10500 \text{ кг см}^2$ а) зуб ведущего колеса; б) зуб ведомого колеса.

зубьев при износе в том случае, если будет учтено изменение этой характеристики в связи с изменением геометрии зацепления в процессе износа [4].

Наши наблюдения за состоянием рабочих поверхностей и геометрией профилей зубьев в процессе испытаний на износ позволили

установить три характерные зоны¹⁾ на рабочих поверхностях (фиг. 1), отличающиеся видом поверхности и очертанием профиля. Первая зона (в области головки) зуба имеет всегда выпуклый профиль и гладкую блестящую поверхность с небольшими рисками в направлении скольжения, вторая зона (в области полюса зацепления) может иметь как выпуклый, так и вогнутый профиль, поверхность ее матовая; третья зона (на ножке зуба) имеет всегда вогнутый профиль и поверхность, подобную поверхности первой зоны. Границы этих трех



Фиг. 2. Зацепление экспериментальных зубчатых колес, быстро приработавшихся при износе. Контактное напряжение $\sigma_k = 8700 \text{ кг/см}^2$. Зона однопарного зацепления зуба колеса до износа cd , после износа pi .

зон четко выражены и совпадают с точками на профиле, соответствующими началу и концу однопарного зацепления (фиг. 2).

Закономерности изменения геометрической формы профилей зубьев целесообразно рассматривать для первой и третьей зон совместно, а для второй отдельно.

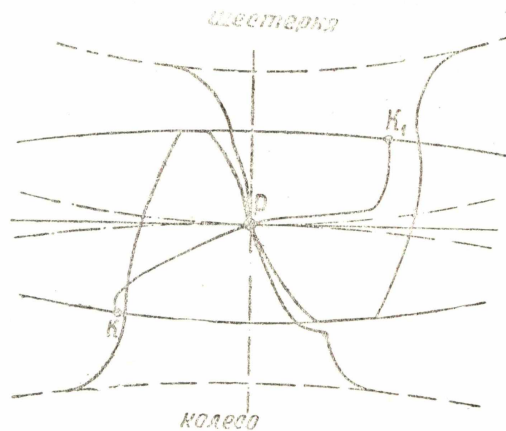
Износ первой и третьей зон

В первый период работы эвольвентного зацепления на ножках зубьев обеих колес зубчатой пары величина удельной работы трения имеет резко выраженный максимум [1], поэтому поверхности ножек зубьев подвергаются наибольшему износу и на этом участке профиля возникает вогнутость. Поскольку кинематика зубчатого зацепления такова, что кривые профилей пары взаимодействующих зубьев являются сопряженными, то на головках зубьев, вступающих в контакт с вогнутым профилем ножек зубьев, обязательно образуются выпуклости. Следовательно, при формировании профилей зубьев на участках первой и третьей зон, профиль ножек зуба является определяющим.

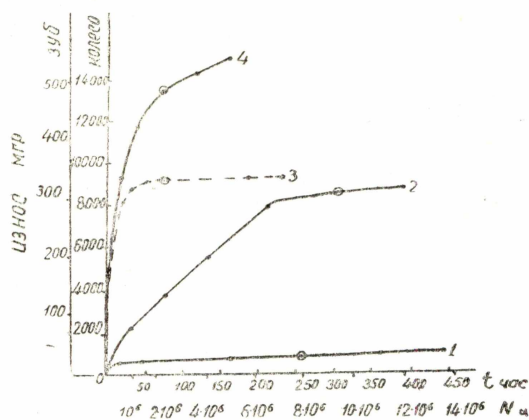
Если принять во внимание, что удельная работа трения на ножке зуба шестерни значительно больше, чем на ножке зуба колеса, то можно заключить, что впадина на ножке зуба шестерни и выпуклость на головке зуба колеса будут более четко выражены, чем вогнутость впадины ножки зуба колеса и выпуклость головки зуба шестерни. Сказанное подтверждается нашими опытами (фиг. 2 и 3).

¹⁾ Аналогичные зоны наблюдались другими авторами, в частности Б. И. Костецким [5].

По мере изменения геометрии профилей зубьев распределение величины удельного скольжения и удельной работы трения по профилю зуба выравнивается, максимумы их уменьшаются и постепенно перемещаются в сторону полюса зацепления [4]. Поэтому место максимального износа перемещается в том же направлении, отсюда и границы впадины на ножке зуба, а соответственно и выпуклости на головке сопряженного зуба все более расширяются в сторону околополюсной зоны (фиг. 1). Однако вследствие сглаживания неровностей на рабочих поверхностях зубьев, а также указанного выше перераспределения величин удельного скольжения и удельной работы трения, скорость износа все более замедляется, пока наконец не приобретает характер равномерного (монотонного) износа. И в этот период имеют место указанные выше закономерности, но, в связи с замедлением скорости интегрального (общего) износа, они проявляются значительно слабее; впадина ножки зуба и выпуклость головки зуба хотя и расширяются в сторону околополюсной зоны, но интенсивность их нарастания значительно снижается. Сказанное иллюстрируется геометрией профилей, представленных на фиг. 1а, 1б, для различных этапов износа соответствующих во времени точкам, нанесенным на кривых 4 и 3 фиг. 4.



Фиг. 3. Зацепление экспериментальных зубчатых колес медленно приработавшихся при износе. Контактное напряжение $\sigma_k = 8700 \text{ кг/см}^2$.



Фиг. 4. График износа зубьев колес, представленных на фиг. 1, 2, 3. Сплошные линии—ведущие колеса; пунктирная линия—ведомое колесо. Кружками отмечено начало прогрессивного выкрашивания околополюсной зоны.

Износ второй зоны

Вслед за изменением геометрической формы профилей зубьев в первой и третьей зонах, величины удельных скольжений и удельной работы трения во второй зоне нарастают и максимумы их все больше сдвигаются в сторону полюса зацепления. Отсюда износ участков зубьев второй зоны постепенно усиливается, характер изменения геометрии профилей в большой степени зависит от соотношения твердостей сопряженных поверхностей, времени приработки и величины износа в этот период. Профиль менее твер-

дой поверхности (в нашем случае профиль зуба колеса) в этой зоне может быть очерчен как выпуклой (фиг. 1 и 2), так и вогнутой (фиг. 3) кривой, сопряженный же профиль зуба шестерни (более твердая поверхность) в обоих случаях будет являться выпуклой кривой.

Если период приработки сравнительно кратковременный (кривые 4, 3, 1 фиг. 4 и соответственно фиг. 1 и 2) и если шестерня в этот период сравнительно мало изнашивается, а профиль ее зубьев в околополюсной зоне мало отличается от эвольвенты, то величины удельного скольжения и удельной работы трения хотя и будут больше первоначальных, но максимумы этих величин еще не сместятся в околополюсную зону и, следовательно, впадина ножки зуба еще не распространяется на околополюсный участок зуба. В этом случае профиль зуба колеса во второй зоне будет очерчен выпуклой кривой (фиг. 1 и 2).

В период монотонного (установившегося) износа хотя и имеется тенденция смещения максимумов удельного скольжения и удельной работы трения к полюсу зацепления, но вследствие малой интенсивности общего износа в этот период максимумы указанных величин смещаются медленно, поэтому профили второй зоны остаются выпуклыми.

Появление в периоде равномерного износа прогрессивного выкрашивания околополюсной зоны хотя и способствует износу и несколько снижает выпуклость профиля этой зоны, но не вносит коренных изменений в характер кривой профиля зуба.

Если период приработки сравнительно длителен (кривая 2 фиг. 4 и соответственно фиг. 3), то уже в этот период максимумы величин удельного скольжения и удельной работы трения постепенно перемещаются непосредственно в близполюсную зону; впадина ножки зуба также распространится в эту область и профиль зуба колеса во второй зоне будет очерчен вогнутой кривой. Следующий за тем период равномерного износа, а также и наступающее в этом периоде выкрашивание околополюсной зоны тоже не меняют заметно характера кривых профилей зубьев. Поэтому следует отметить, что наблюдаемое в наших опытах прогрессивное выкрашивание околополюсной зоны не оказывает существенного влияния на износ зубьев исследуемых зубчатых колес. Однако при износе, вследствие расширения зоны однопарного зацепления и увеличения сил трения на участках профилей зубьев, отдаленных от полюса, снижается контактная прочность поверхности этих участков [4]. Так, в наших опытах [3] при достаточно большой нагрузке наблюдался целый ряд случаев выкрашивания головок зубьев ведущих и ножек зубьев ведомых колес. При этом головки зубьев ведущих колес изнашиваются вплоть до заострения (фиг. 1а), изгибаются и отламываются. В процессе изнашивания сечение зуба, опасное по напряжениям изгиба, постепенно перемещается в направлении от ножки к головке зуба.

Таким образом, при оценке работоспособности зубчатой передачи важно знать не только интегральную величину износа зубьев в виде кривой, отражающей процесс износа во времени, но и связь ее с изменением геометрической формы профилей зубьев, так как только в этом случае можно более полно судить о факторах, оказывающих в данном конкретном случае преобладающее влияние на износ профиля зуба. При этом по форме изношенного профиля можно судить о характере кривой интегрального износа в функции времени и наоборот, по виду кривой износа можно заключить о характере геометрической формы изношенного профиля. При сравнении различных параметров, определяющих характер износа профилей зубьев, необходимо учитывать динамику износа зубчатого зацепления, так как сами параметры не остаются постоянными, а наоборот непрерывно изменяются вместе с изменением формы профилей зубьев при износе. Удель-

ное скольжение и удельная работа трения, как это следует из проведенного анализа, могут быть параметрами, определяющими характер изменения геометрической формы профилей изношенных зубьев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Х. Ф. Кетов, Н. И. Колчин. Теория механизмов и машин, Машгиз, 1939.
 2. А. Д. Невский. К вопросу об износе зубьев. Научные доклады высшей школы, Машиностроение и приборостроение, № 2, 1959.
 3. Ю. С. Семенов. Результаты экспериментального исследования износа зубчатых колес редукторов горных электросверл, Известия ТПИ, том 108, Исследование бурильных машин, Metallurgizdat, Свердловск, 1959.
 4. Ю. С. Семенов. Изменение параметров зубчатого зацепления при износе (публикуется в настоящем сборнике).
 5. Б. И. Костецкий. Износостойкость деталей машин, Машгиз, Киев—Москва, 1950.
-