

ИВАНОВ В. М.,
кандидат технических наук

КОНТАКТНЫЙ ИЗНОС ШЕСТЕРЕН Д03-005 ТРАКТОРА «БЕЛАРУСЬ»

В лаборатории «Автомобили» Белорусского политехнического института под руководством кандидата технических наук доцента Башеева С. М. нами были проведены сравнительные стендовые испытания шестерен на контактный износ. Шестерни были изготовлены из стали 45 (ГОСТ 1050—52) различными методами: одна партия — зубофрезерованием — шевингованием, другая партия — горячей накаткой — шевингованием.

Термообработка фрезерованных зубьев заключалась в нормализации. После термообработки поверхность зубьев имела твердость НВ = 183-217. Поверхность накатанных зубьев имела исходную твердость НВ = 201-219.

Испытуемые шестерни Д03-005 являются ведущими в приводе узла распределительного вала двигателя Д-50. Они работают с числом оборотов $n = 1600$ об/мин и передают крутящий момент $M_{кр} = 6,2$ кГм, развивая окружное усилие 155 кг.

Шестерни имели число зубьев $z = 28$, нормальный модуль $m_n = 2,5$ мм, угол зацепления по нормали $\alpha = 20^\circ$, угол спирали на делительном цилиндре $\beta = 28^\circ 58'$, ширину $b = 34^{-0.34}$ мм и коэффициент высоты зуба $f = 1,0$.

Эксплуатация показывает, что фрезерованная шестерня Д03-005 выходит из строя раньше сопряженных с ней колес. Основным видом разрушения шестерни является контактный износ.

Эксперименты проводились на испытательной машине с замкнутым силовым контуром, в котором нагрузка создавалась закручиванием торсионного вала, связывающего нагружающее устройство с корпусом, где закреплялась испытуемая шестерня. Смазка производилась за счет разбрызгивания дизельного масла сопряженным колесом Д04-С02. Колесо Д04-С02 изготовлено из стали 45, термообработка — закалка, твердость НВ = 513-446. Температура масла в корпусе с испытуемой шестерней не превышала $55 \div 60^\circ$.

Стендовые испытания проводились при таком режиме: нагрузка 10 кгм, которая создавала на диаметре начальной окружности окружное усилие 250 кг, число оборотов шестерни — 1600 об/мин, длительность испытания — 245 часов, что соответствует $2,35 \cdot 10^7$ циклам.

Для выяснения динамики износа через каждые 35 часов стендовых испытаний, т. е. через $3,36 \cdot 10^6$ циклов нагружений, производилось измерение величины износа по изменению профиля рабочей поверхности зуба, регистрировалось изменение твердости HD_{50} на поверхности и в глубину от работающей поверхности зуба. Кроме того, производились контрольные замеры основного и окружного шага, направления и толщины зуба, бисения делительной окружности.

На рис. 1 показана шестерня, на которой цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 отмечены контрольные зубья.

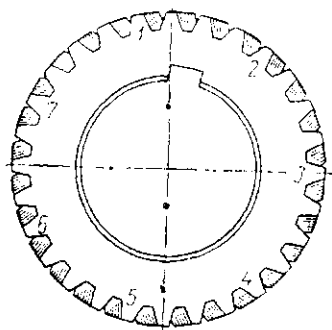


Рис. 1. Испытуемая шестерня.

Стендовые испытания показали, что и у фрезерованных, и у накатанных зубьев в течение первых 35 часов работы ($N = 3,36 \cdot 10^6$ циклов) на боковых поверхностях образуются раковины. Эти раковины возникают прежде всего на тех участках поверхности ножки зуба, которые испытывают большие напряжения. На поверхности головки зуба даже при небольшом увеличении хорошо видны следы износа и пластической деформации в виде борозд и напылов. Последнее наблюдается как на боковой поверхности зубьев, так и над окружностью выступов.

В процессе дальнейшей работы мелкие и средние раковины начинают сливаться. Одновременно идет процесс затягивания раковин за счет пластической деформации материала поверхностей зуба.

Примерно через $105 \div 140$ часов работы ($N = 10,08 \div 13,44 \cdot 10^6$ циклов) у фрезерованных зубьев и через $6,72 \cdot 10^6$ циклов у накатанных зубьев визуально можно обнаружить вмятину — бороздку, расположенную параллельно полной линии.

После $140 \div 175$ часов работы ($13,44 \div 16,80 \cdot 10^6$ циклов) площадь, занимаемая раковинами, достигает $25 \div 33\%$ работающей поверхности и при дальнейшей работе до конца испытаний увеличения площади, занятой раковинами, не наблюдалось.

Необходимо отметить, что раковины образуются и затягиваются непрерывно, однако с течением времени размеры вновь образующихся раковин уменьшаются. Общее же количество раковин, приходящихся на единицу поверхности, увеличивается.

В настоящее время отсутствуют общепринятые критерии по оценке степени контактного износа.

Нам представляется целесообразным оценивать степень контактного износа сравнением общей площади всех раковин и площади, на которой они расположены.

На поверхности головки зуба также иногда образуются отдельные раковины после $16,8 \cdot 10^6 \div 13,44 \cdot 10^6$ циклов, причем эти раковины более крупные, чем на поверхности ножки зуба.

Предельное отклонение накопленной погрешности окружного шага по мере увеличения числа циклов уменьшается как у фрезерованных, так и у накатанных зубьев, причем на ножке отклонение уменьшается более значительно, чем на головке зуба.

Радиальное биение увеличивается обычно на $10 \div 20$ мк.

В процессе работы общее отклонение угла спирали уменьшается и одновременно уменьшается отклонение контактной линии от прямолинейности. Наиболее значительно прирабатываются зубья на поверхности ножек в области питтингообразования и на поверхности головок. Отклонение угла спирали в значительных размерах наблюдается на коротком участке в области образовавшейся канавки — бороздки у полюсной линии.

Упомянутые изменения угла спирали обнаруживаются у фрезерованных зубьев примерно через 140 часов работы ($13,44 \cdot 10^6$ циклов) и через 105 часов работы у накатанных зубьев.

Значительный интерес представляет исследование изменения в процессе работы твердости поверхности зуба и твердости материала в глубину от контактной поверхности.

Измерение твердости производилось на приборе ПМТ-3 при нагрузке 50 г.

Участки зубьев, на которых замерялась твердость, предварительно вырезались из контрольных зубьев.

На контуре зуба (см. рис. 2 и 3) цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 обозначены места, где производились замеры твердости HD_{50} .

Упомянутые точки замеров HD_{50} расположены от окружности выступов зуба соответственно на расстоянии 0,02 ÷ 0,03; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 мм от вершины зуба.

Значения твердости HD_{50} на рабочей поверхности зубьев фрезерованных шестерен приведены в табл. 1.

Как следует из приведенных данных замеров, твердость рабочей поверхности зубьев с увеличением времени стендовых испытаний шестерен, т. е. с увеличением времени работы зубчатой пары, увеличивается. Имеются основания утверждать, что в процессе работы происходит не только разрушение контактной поверхности зубьев, но одновременно протекает и процесс упрочнения ее за счет наклепа.

Более полной картина изменения твердости становится после исследования деформированных объемов в глубину от контактной поверхности. Замеры HD_{50} в этом случае производились на

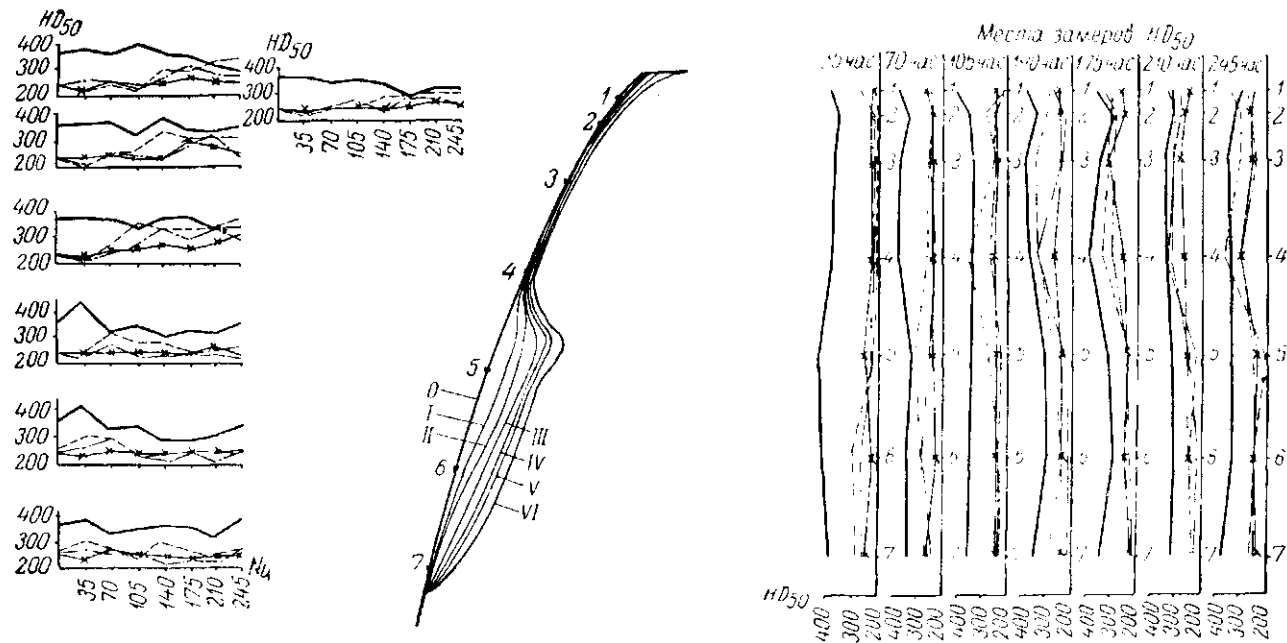


Рис. 3. Изменение профиля и графики твердости HD_{50} накатанного зуба:

0 — поверхность зуба перед работой; I, II, III, IV, V, VI — поверхность зуба соответственно через 70, 105, 140, 175, 210 и 245 часов; — HD на поверхности; - - - на глубине 0,03; — · — на глубине 0,08 и x — x на глубине 0,13 мм.

Таблица 1

Место замера HD ₅₀	Значения твердости HD ₅₀						
	после 3,36 × 10 ⁶ циклов (35 час.)	после 6,72 × 10 ⁶ циклов (70 час.)	после 10,08 × 10 ⁶ циклов (105 час.)	после 13,44 × 10 ⁶ циклов (140 час.)	после 16,80 × 10 ⁶ циклов (175 час.)	после 20,16 × 10 ⁶ циклов (210 час.)	после 23,52 × 10 ⁶ циклов (245 час.)
1	290	336	295	356	369	377	368
2	312	341	312	348	297	341	363
3	306	307	317	334	348	332	372
4	272	300	324	328	354	370	383
5	295	251	310	294	304	279	318
6	312	295	276	296	287	287	295
7	300	290	296	300	312	344	374

прямых, берущих начало в точках: 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7, т. е. там, где производились замеры твердости по рабочей поверхности зуба. Прямая располагалась нормально оси симметрии зуба, а значения HD₅₀ регистрировались на расстоянии 0,03; 0,08 и 0,13 мм от рабочей поверхности зуба. В табл. 2 приведены значения HD₅₀ под поверхностью фрезерованных зубьев.

Данные замеров твердости по глубине также подтверждают, что в процессе работы поверхностный слой зубьев шестерен получает наклеп, который является результатом контактного давления между зубьями сопряженных колес.

Сравнение данных табл. 1 и 2 позволяет сделать вывод, что наклеп наиболее выражен в тонком поверхностном слое (глубиной 0,03 мм). Вместе с тем влияние наклепа обнаруживается и на глубине 0,08 мм.

Обращает внимание, что изменение твердости по высоте зуба фрезерованных шестерен не одинаково. В области питтингообразования — в зоне интенсивного усталостного выкрашивания ниже полюсной линии зацепления твердость снижается по сравнению с твердостью на головке зуба. Это, видимо, объясняется тем, что в зоне интенсивного усталостного выкрашивания преобладает процесс разрыхления и разрушения контактной поверхности над упрочняющим действием нормальных давлений на контактной поверхности зубьев.

Износ можно определять и по изменению профиля рабочей поверхности зуба.

На рис. 2 показан профиль работающей поверхности фрезерованного, а на рис. 3 накатанного зубьев, которые образуются через 70; 105; 140; 175; 210 и 245 часов работы. Профиль зуба выполнен в масштабе 40 : 1, для износа принят масштаб 300 : 1.

В левой части рис. 2 и 3 приведены графики изменения твердости HD₅₀, измеренной на поверхности зуба и под поверхностью на глубине 0,03; 0,08 и 0,13 мм через 35; 70; 105; 140; 175; 210

Таблица 2

Места замеров	Значения HD_{50}																				
	после $3,36 \times 10^6$ циклов (35 час.)			после $6,72 \times 10^6$ циклов (70 час.)			после $10,08 \times 10^6$ циклов (105 час.)			после $13,44 \times 10^6$ циклов (140 час.)			после $16,80 \times 10^6$ циклов (175 час.)			после $20,16 \times 10^6$ циклов (210 час.)			после $23,52 \times 10^6$ циклов (245 час.)		
	0,03	0,08	0,13	0,03	0,08	0,13	0,03	0,08	0,13	0,03	0,08	0,13	0,03	0,08	0,13	0,03	0,08	0,13	0,03	0,08	0,13
1	300	260	246	262	246	238	290	216	253	280	230	220	253	238	224	238	197	224	336	230	224
2	262	246	238	280	246	230	204	238	262	280	238	224	238	230	182	246	193	216	272	272	246
3	238	224	230	272	253	246	253	312	262	272	253	246	262	253	246	260	240	221	262	348	204
4	253	204	246	246	216	230	280	262	246	238	224	246	250	246	234	238	224	224	246	230	238
5	204	204	251	246	197	246	280	253	238	216	210	193	238	238	234	262	204	230	262	246	230
6	204	224	230	193	193	251	230	230	262	224	210	204	238	204	193	253	246	230	260	230	246
7	216	210	246	240	230	246	253	230	246	220	216	246	246	224	230	236	246	238	240	230	230

и 245 часов работы. Графики расположены на уровне тех точек, твердость которых они характеризуют.

В правой части рис. 2 и 3 находятся графики распределения HD_{50} по высоте зуба в местах замеров твердости (1; 2; 3; 4; 5; 6; 7), которая наблюдалась через 35; 70; 105; 140; 175; 210 и 245 часов работы.

На этих графиках (справа) приняты те же условные обозначения, что и на графиках слева от профиля зуба.

Износ фрезерованных зубьев оказывается несколько меньшим на поверхности ножек в течение первых 100 часов работы ($9,6 \cdot 10^6$ циклов), затем ножка фрезерованного зуба начинает изнашиваться более интенсивно (примерно в 2 раза), чем у накатанных зубьев. Поверхности головок фрезерованных зубьев после $100 \div 110$ часов работы начинают изнашиваться примерно в $5 \div 8,5$ раза больше, чем у зубьев накатанных.

Как у фрезерованных, так и у накатанных зубьев ножка зуба изнашивается наиболее значительно у полюсной линии.

Твердость материала менялась различным образом. У фрезерованных зубьев на поверхности головки (точки 1, 2, 3, 4) в течение первых 35 часов работы HD_{50} уменьшалась, а затем возрастала, а под поверхностью контакта оставалась неизменной за исключением HD_{50} на глубине 0,03 мм, которая несколько возрастала.

В точках 5 и 6, т. е. в тех областях, где контактный износ был наиболее значительным, HD_{50} на поверхности уменьшалась по сравнению с исходной твердостью и твердостью на головке зуба, которая устанавливалась в процессе работы. Это распределение HD_{50} на поверхности зуба хорошо просматривается на графиках, расположенных справа от профиля зуба.

У накатанных зубьев HD_{50} уменьшалась на поверхности во всех точках, но это снижение твердости было более значительным в точках 5 и 6.

В глубине от поверхности головки зуба HD_{50} возрастала после $70 \div 105$ часов работы ($6,72 \div 10,08 \cdot 10^6$ циклов). На графиках слева (рис. 3) хорошо видно, что к $210 \div 245$ часам работы в точках 1, 2, 3, 4 твердость материала глубинных слоев приближалась к твердости материала на поверхности. Таким образом, у накатанных зубьев в работе как бы участвуют большие объемы материала по сравнению с зубьями фрезерованными.

В точках 5 и 6 повышение твердости менее заметно и в глубине.

У накатанных зубьев наблюдается подобное распределение твердости по высоте зуба, как и у зубьев фрезерованных, т. е. HD_{50} в точках 5 и 6 минимальная.

Твердость в области точки 7 оставалась более высокой по

сравнению с точками 5 и 6 как у фрезерованных, так и у накатанных зубьев. Износ зуба на этом участке происходил главным образом вследствие пластических деформаций и истирания.

В ы в о д ы

1. Контактный износ накатанных зубьев после 100 часов работы ($9,6 \cdot 10^6$ циклов) в 1,5 ÷ 2 раза меньше, чем износ зубьев фрезерованных.

2. Износ поверхности зуба хорошо может измеряться эвольвентомером. Этот способ позволяет быстро получить надежные результаты для многих участков поверхности зуба.

3. Образование усталостных раковин и их затягивание идет непрерывно в течение всего периода работы колес.

4. Зубчатые колеса, имеющие небольшую твердость (до 350 единиц по Бригеллю), в процессе работы получают упрочнение вследствие пластической деформации контактной поверхности, которая способствует повышению срока службы колес.

5. Эффективным способом упрочнения является горячая накатка зубчатых колес.