

И.Ш. ЧЕРНЯВСКИЙ, к.т.н., **И.В. ТРАВКИН**, **Ю.К. ШАПОВАЛОВ**,
Харьков, ОАО «Харьковский тракторный завод»

УСКОРЕННЫЕ СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ И ПОДШИПНИКОВ НА МАШИНО- СТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАВОДАХ

Силовые агрегаты, установленные на транспортные средства, работают в широком диапазоне динамических нагрузок, которые условно можно разделить на две группы:

1. усталостного характера;
2. ударного характера.

Для первой группы число циклов нагружения колеблется от $1 \cdot 10^6$ до $1 \cdot 10^9$ циклов. Для второй группы число циклов нагружения – от 1 до $1 \cdot 10^5$ циклов.

Многочисленные экспериментальные исследования на ОАО «ХТЗ» и Кировском заводе при доводке тракторов типа Т-150, К-700 и К-701 показали, что ударные динамические нагрузки могут превышать номинальные в 4 – 5 раз. При ударных нагрузках, достигающих величины, превышающей статическую грузоподъемность подшипника, происходит разрушение за несколько циклов.

Ускоренные испытания коробок передач и мостов на ХТЗ проводятся на стендах, работающих в замкнутых контурах. Нагружающий момент увеличен в 1,6 – 2 раза в сравнении с номинальным. Эти испытания позволяют в кратчайшие сроки выявить наиболее уязвимые по ресурсу силовые детали. В ряде случаев их ресурс ограничен из-за технологических погрешностей при изготовлении, влияния увеличения нагрузок из-за внутренних резонансных явлений, обусловленных воздействием зубчатых передач. Поэтому даже тщательные расчеты не могут исключить ускоренные испытания из этапов доводки машин и контроля их серийного производства.

Для подшипников, выпускаемых заводами СНГ, действует рабочая методика периодических испытаний продукции на девяносто процентный ресурс по ГОСТ 520. Методика определяет режимы и условия стендовых

периодических испытаний конструктивных типов и размерных групп подшипников. Они распространяются на подшипники:

1. шариковые радиальные;
2. роликовые радиальные;
3. роликовые радиально-упорные с коническими роликами с линейным контактом и другие разновидности подшипников.

Для проведения испытаний со сборочного участка цеха берутся 27 – 30 подшипников, принятых ОТК и соответствующих ГОСТ 520 - 3 подшипника контролируется по всем параметрам, 20 подвергаются испытаниям, остальные используются в качестве запасных. 90% ресурс подшипников может быть обеспечен при следующих условиях нагружения:

Таблица 1

№	Типы подшипников	Допустимый расчетный угол поворота сечения вала в месте установки крайних подшипников, рад.
1	Шариковые радиальные и радиально-упорные	0,0030
2	Роликовые радиальные	0,0010
3	Роликовые радиально-упорные с коническими роликами с линейным контактом	0,0010
4	Роликовые радиально-упорные с коническими роликами с модернизированным контактом	0,0020
5	Шариковые радиальные сферические двухрядные	0,0015
6	Роликовые радиальные сферические двухрядные	0,0100

1. Радиальная сила (F_r), а для конических и осевая (F_{oc}), не должны превышать следующих величин
 $[F_r] \leq 0.5C_0$; $[F_{oc}] \approx (0,2 - 0,3)[F_r]$,
2. где C_0 - статическая грузоподъемность подшипника.
3. Частота вращения внутреннего кольца подшипника не должна превышать (0,3 – 0,6) предельную величину, оговоренную в каталоге в зависимости от типа подшипников.

4. Угол поворота сечения от прогиба вала, на который монтируется подшипник, не должен превышать величину, оговоренную в табл.1. Допустимые расчетные углы поворота сечения от прогиба вала, на котором монтируются испытуемые подшипники, не должен превышать величин, указанных в табл.1

Ниже приведены описания и расчетные данные по двум основным агрегатам трансмиссий колесных и гусеничных тракторов Т-150К и Т-150, коробкам передач, внедренным в серийное производство в 1986г. на основании ускоренных стендовых испытаний.

Коробка передач трактора Т-150К (А.с. 979178, патент 15690; А.с.1580067, патент 11820) имеет четыре диапазона по четыре переключаемых на ходу передачи внутри каждого из них. Крутящий момент передается с первичного вала I на вторичный вал II через одну из четырех пар шестерен 23/40, 25/38, 28/36, 33/32, включаемых соответствующей гидроподжимной муфтой. На первом диапазоне – через пары шестерен 31/31, $z=20$, $z=42$ на первичный вал III раздаточной коробки и далее через пару шестерен второго диапазона на выходные валы заднего IV и отключаемого переднего V мостов. Второй и третий диапазоны обеспечиваются соответственно парами шестерен 19/39 и 37/33. Задний ход обеспечивается шестернями $z=44$, $z=32$, $z=22$, $z=42$.

Коробка передач трактора Т-150 (А.с. 1299843, патент 12201; А.с. 1580067, патент 11820) имеет четыре диапазона по три переключаемых на ходу передачи внутри каждого из них. На первом диапазоне крутящий момент передается с первичного вала через пару шестерен 19/42 на промежуточный вал II. Второй и третий диапазоны обеспечиваются соответственно парами шестерен 25/35 и 33/28, размещенных на валах I и II. Шестерни $z=25$ и $z=33$ установлены на роликовых подшипниках 6644916Е. Задний ход обеспечивается шестернями $z=24$, $z=31$, $z=26$, $z=33$. Включением одной из трех гидроподжимных муфт, расположенных на двух вторичных валах III, обеспечиваются три передачи каждого диапазона.

В коробках передач применен модуль $m=5\text{мм}$, угол зацепления $20^\circ - 24^\circ$, длина зуба $b=30\text{мм}$, в раздаточной коробке $b=37\text{мм}$. Стендовые ресурсные испытания коробки передач Т-150К проводились в форсированном режиме:

1. Под нагрузкой $M_{кр}=900\text{Нм}$ на первичном валу коробки передач на всех передачах 2-го рабочего и 3-го транспортного диапазонов.
2. Под нагрузкой 650Нм на первичном валу на 1 передаче заднего хода Т-50К.
3. Под нагрузкой 760Нм на первичном валу на 4-й передаче ходоуменьшителя (1 диапазон) – Т-150К

Мощность двигателя на тракторе Т-150К составляет $N=165$ л.с., число оборотов $n=2100$ об/мин. Расчетная нагруженность коробки передач приведена в таблицах 2 и 3.

Время испытаний 1440 час, причем в режиме IV передачи I диапазона 140 час, I и II передачи II диапазона 380 и 240 час, I передачи заднего хода – 140 час. В результате испытаний установлено, что большинство силовых элементов коробки передач обеспечивает высокий ресурс. При ускоренных испытаниях на стенде коробки передач Т-150К крутящий момент передается с первичного вала раздаточной коробки на вал привода заднего моста, затем на вал привода переднего моста. При этом резко возрастает нагрузка на передние опоры валов привода, а также на шестерни.

Вал привода заднего моста, подшипник 12311: $F_{rA}=24 \cdot 1,7=40,8$ кН, $C_o/F_{rA}=67/40,8=1,642$.

Вал привода переднего моста, подшипник 313: $F_{rA}=19,2 \cdot 1,7=32,64$ кН, $C_o/F_{rA}=56/32,64=1,715$.

Шестерни $z_1=33$, $z_2=33$: $M=3000$ Нм, $\sigma_{изг}=820$ МПа.

Высокие нагрузки на опоры и шестерни (увеличены в 3,4 раза на стенде в сравнении с трактором) наглядно показали, что они недопустимы для нормальной работы в условиях эксплуатации. Замена пары $(z_1=33)/(z_2=33)$, m5 на $(z_1=2)/(z_2=20)$, m8 и увеличение длины зуба с $b=30$ на $b=50$ дает увеличение долговечности в 10 и более раз.

Мощность двигателя на тракторе Т-150 составляет $N=150$ л.с., число оборотов $n=2000$ об/мин. Расчетная нагруженность коробки передач приведена в таблицах 4 и 5. Ускоренные стендовые испытания подтвердили высокий ресурс коробки передач.

Испытания зубчатых колес «Кировец» на надежность проводятся в два этапа [10]. Первый этап испытаний включает сравнительные испытания зубчатых колес на изгиб. Испытания проводятся на гидропульсаторе типа ГРМ-1. Нагрузка прикладывается к головке зуба по асимметричному циклу с максимальной составляющей 80 кН и минимальной 20 кН, частота пульсации 400 циклов в минуту. Зубчатые колеса испытываются до набора базового числа циклов нагружений ($5 \cdot 10^6$ циклов) или до разрушения зуба.

Второй этап испытаний зубчатых колес трансмиссии трактора «Кировец» осуществляется в условиях, максимально приближенных к эксплуатации. Испытания проводятся на стенде ускоренных испытаний на контактную выносливость рабочих поверхностей зубьев непосредственно в коробке передач трактора. Вращающий момент на коробку передач передается от вала коробки передач 1450 об/мин. Два гидротормоза позволяют проводить ускоренные испытания под нагрузкой, в 1,35 раза превышающей вращающий момент двигателя трактора.

Таблица 2

Нагруженность шестерен коробки перемены передач трактора Т-150К												
Обозн.	Передача	I	II	III	IV	I	I	I	IV	IV	II	II
	Наименование											
Z ₁	Число зубьев шестерни	23	25	28	33	19	37	33	31	20	44	22
Z ₂	Число зубьев колеса	40	38	36	32	39	33	33	31	42	32	42
M	Момент на шестерне, Нм	562,6	562,6	562,6	562,6	959	959	963	535	524	821	584
n	Частота вращения, об/мин	2100	2100	2100	2100	1208	1208	589,3	2165	2165	1382	1900
v	Окружная скорость, м/с	12,66	13,76	15,41	18,16	7,22	11,71	5,09	17,58	11,34	15,93	10,95
P/b _{min}	Удельная суммарная нагрузка в зацеплении, Н/см	4464	4395	4380	4579	5915	4349	4179	4826	4457	5939	4308
σ _{и1}	Напряжения изгиба в корне зуба при приложении нагрузки в вершине зуба, МПа	293	288	342	350	374	316	317	371	318	436	312
σ _{и2}		297	291	319	351	357	330	317	348	334	444	318
σ _к	Контактные напряжения, МПа	1058	1033	1114	1189	1290	1059	1128	1163	1196	1191	1153

Таблица 3

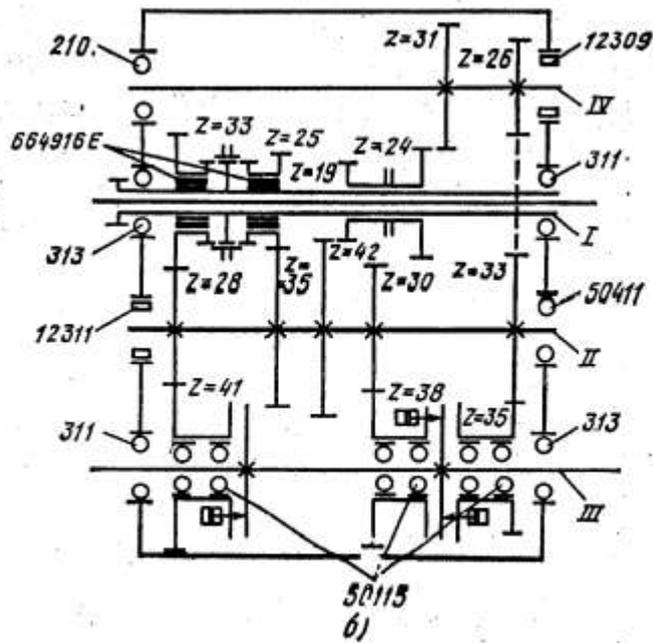
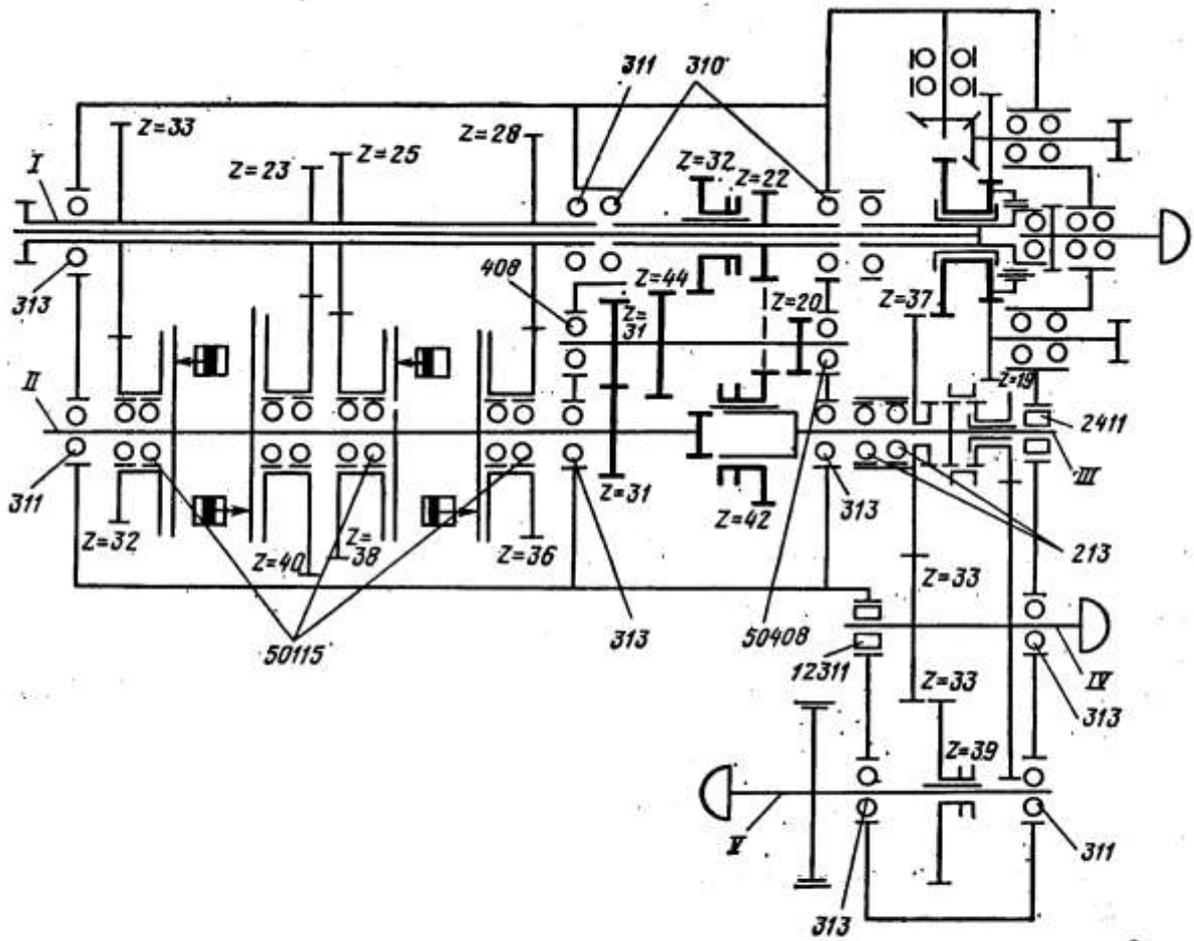
Нагруженность валов коробки перемены передач трактора Т-150К						
Обозначение	Наименование	Первичный вал коробки передач,	Вторичный вал коробки передач	Вал ходоуменьшителя	Вал заднего хода	Первичный вал раздаточной коробки
$F_{гА}$	Максимальная нагрузка на опорах, кН	6,84	6,23	5,48	10,48	18,05
$F_{гВ}$		8,198	7,99	9,41	9,38	14,94
Q_A	Углы поворота сечения вала под опорами, рад.	0,00107	0,000962	0,000505	0,000216	0,000153
Q_B		0,00101	0,000897	0,00158	0,00232	0,000212
y	Максимальный прогиб вала, см	0,0146	0,0132	0,00158	0,00112	0,001018
$\sigma_{см}$	Напряжения смятия в шлицах, МПа	14,06	23,0	81,6	-	-

Таблица 4

Нагруженность шестерен коробки перемены передач трактора Т-150									
Обозн.	Передача	I	II	III	1	2	3	3/x	
	Наименование							1-3	
Z_1	Число зубьев шестерни	19	25	33	28	30	33	24	26
Z_2	Число зубьев колеса	42	35	28	41	38	35	31	33
M	Момент на шестерне, Нм	537	537	537	368	368	368	537	680
n	Частота вращения, об/мин	2000	2000	2000	1428	1428	1428	2000	1548
v	Окружная скорость, м/с	9,956	13,1	17,29	10,48	11,23	12,35	12,6	10,55
P/b_{\min}	Удельная суммарная нагрузка в зацеплении, Н/см	4464	4079	4461	2867	3101	3031	5435	5315
$\sigma_{и1}$	Напряжения изгиба в корне зуба при приложении нагрузки в вершине зуба, МПа	309	267	291	203	216	202	383	415
$\sigma_{и2}$		299	270	347	195	214	230	426	379
σ_k	Контактные напряжения, МПа	1173	1015	1147	887	871	897	1330	1210

Таблица 5

Нагруженность валов коробки перемены передач трактора Т-150					
Обозначение	Наименование	Первичный вал коробки передач	Промежуточный вал коробки передач	Вторичный вал коробки передач	Вал заднего хода
F_{rA}	Максимальная нагрузка на опорах, кН	6,905	7,495	0,772	3,157
F_{rB}		5,829	13,085	6,898	16,16
Q_A	Углы поворота сечения вала под опорами, рад.	0,00122	0,00108	0,00019	0,003
Q_B		0,001154	0,00109	-	0,0011
y	Максимальный прогиб вала, см	0,0167	0,0142	0,02707 (хвостовик)	0,00950



Обобщения материалов стендовых ускоренных испытаний позволяют рекомендовать следующие критерии при выборе режимов:

1. Нагрузки на подшипники, шестерни, валы не должны превышать допустимые, обеспечивающие расчетный ресурс при ускоренных испытаниях.
2. Необходимо оценить внутренние динамические нагрузки, возможные резонансные режимы.
3. Критерии ресурса для зубчатых передач – питтинговые выкрашивания; подшипников – величины радиального и осевого зазоров, потеря посадки.

Допустимые напряжения шестерни по изгибу и контакту определяются числом циклов работы силового элемента.

Список литературы: 1. «Ускоренная оценка ресурсов узлов и агрегатов трактора в стационарных условиях», журнал «Механика и машиностроение», №1, 1998г., Академия наук высшей школы Украины, отделение механики и машиностроение, ХГПУ. 2. «Методика расчета шестерен, разработанная ассоциацией изготовителей зубчатых передач США». Экспресс-информация. Тракторостроение №20, 26 мая 1965г. 3. «Динамические модели трансмиссии трактора типа Т-150 и эффективность их применения», «Тракторы и сельхозмашины», №12, 1988г. 4. «Высокочастотные нагрузки в коробках передач трансмиссий». Сборник научных трудов «Тракторная энергетика в растениеводстве». Серия «Тракторостроение», Харьков, 1999г., ХГТУСХ. 5. «Повышение ресурса главных передач». «Тракторы и сельхозмашины», №2, 1999г. 6. «Повышение ресурса конечных передач тракторов типа Т-150». «Тракторы и сельхозмашины», №9, 1984г. 7. Методика расчета долговечности подшипников шестерен постоянного зацепления коробок передач. Журнал «Тракторы и сельхозмашины», №2, 1980г. 8. «Исследования влияния посадок подшипников тракторных трансмиссий на долговечность». Сб. МИИСП том XV вып.12, 1978г., Москва. 9. Каталог WL 41510/3 Издание 1993г. Подшипники качения. Стандартная программа. 10. Шувалов Е.А. Повышение работоспособности трансмиссий тракторов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1986г.