

УДК 620.178: 539.4

В.К. Лобанов, д-р техн. наук,  
Г.И. Пашкова, канд. техн. наук, Харьков, Украина

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ЦАПФ ЗАДНИХ МОСТОВ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

*У роботі виконано дослідження опору втоми цапф заднього моста транспортного засобу «Дозор» різних варіантів виготовлення. Показано, що оптимальними є випробування деталей при спільній дії вигину і крутіння. Встановлено, що місце з'єднання цапфи з насадкою є менш навантаженим і напруженим, ніж шлиці і зона кріплення цапфи до корпусу.*

*В работе выполнено исследование сопротивления усталости цапф заднего моста транспортного средства «Дозор» различных вариантов изготовления. Показано, что оптимальными являются испытания деталей при совместном действии изгиба и кручения. Установлено, что место соединения цапфы с насадкой является менее нагруженным и напряженным, чем шлицы и зона крепления цапфы к корпусу.*

*The study is related to the development of the special vehicle "Dozor". This work presents the researching of the fatigue resistance of rear axles trunnions for the vehicle "Dozor" from different variants of manufacturing. Totally, 20 different constructions of the trunnion, namely welded (11 variants) and mixed (9 variants) ones are examined. Universal testing machine, enabling to generate maximum static load of 500 kN and maximum cyclic load of 250 kN with an accuracy of  $\pm 1\%$  is used for testing. Working load is simulated using loading conditions. It is shown that the test items are optimal under the combined action of bending and torsion. Examples of the tensometry results and final results of all tests are given. It was founded that the connection point of trunnion with nozzle is less loaded and less stressful than splines and zone, where trunnion is connected to the body. Approved test pattern for trunnion under the simultaneous action of the bending and torsional moments is recommended for further use in the development of technologies and standards in percentage check tests of trunnions in serial production for the purpose of intermittent monitoring of the level and stability of the quality of their manufacture.*

**Введение и постановка задачи.** Актуальной задачей современного машиностроения является повышение эксплуатационной надежности транспортных средств. Использование быстроходных двигателей большой мощности обуславливает увеличение нагрузочных режимов основных агрегатов и деталей. При этом необходимо повышение надежности и долговечности этих узлов и деталей. Решение указанных проблем тесно связано с наиболее полным использованием свойств материалов и рациональным конструированием узлов транспортных средств [1].

Для анализа эксплуатационной долговечности узлов транспортных машин используют данные лабораторных и дорожных испытаний. Причем при лабораторных испытаниях иногда не все детали работают в условиях,

аналогичных эксплуатационным, поэтому в процессе испытания агрегата в целом может не выявиться истинная долговечность некоторых деталей. В этом случае соответствующий узел или деталь необходимо испытывать отдельно [1, 2].

Цапфы задних мостов транспортных средств относятся к числу наиболее ответственных деталей, подвергающихся в процессе эксплуатации высоким циклическим нагрузкам. Целесообразно определить влияние конструктивных особенностей изготовления цапф на их сопротивление усталости.

Целью настоящей работы являлась сравнительная оценка сопротивления усталости цапф заднего моста специального транспортного средства «Дозор», изготовленных по различным технологическим схемам, в условиях нагружения, имитирующего эксплуатационное.

Кроме того, представляло интерес исследование напряженного состояния цапф в условиях такого нагружения, и особенно определение значений напряжений в зоне соединения цапфы с насадкой.

**Объекты исследования.** В качестве объектов исследования были использованы натурные цапфы заднего моста сварной или составной конструкции (по способу соединения непосредственно цапфы с насадкой). Общий вид цапф показан на рис. 1, а. Варианты изготовления цапф приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Варианты изготовления цапф

Конструкция цапф	Номер варианта	Характеристика варианта		
		Материал цапфы	Материал насадки	Примечание
1	2	3	4	5
Сварные	1-1	сталь 18X2Н4МА	сталь 18X2Н4МА	–
	1-2	сталь 18X2Н4МА	сталь 18X2Н4МА	с дефектами сварного шва
	1-3	сталь 18X2Н4МА	сталь 12X2Н4А	–
	1-4	сталь 18X2Н4МА	сталь 18X2Н4МА	без термообработки после сварки
	1-5	сталь 25ХГТ	сталь 12X2Н4МА	без термообработки после сварки
	1-6	сталь 25ХГТ	сталь 25ХГТ	без термообработки после сварки
	1-7	сталь 20X2Н4А	сталь 25ХГТ,	–
	3-1	сталь 20X2Н4А	сталь 18X2Н4МА	–
	3-2	сталь 18X2Н4МА	сталь 18X2Н4МА	с дефектами сварного шва
	3-3	сталь 18X2Н4МА	сталь 18ХГТ	–
	3-4	сталь 18X2Н4МА	сталь 20X2Н4А	–

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
Составные	2-1	сталь 18X2H4MA	сталь 18X2H4MA	3 штифта
	2-2	сталь 45	сталь 45X	3 штифта
	4-1	сталь 20X2H4A	сталь 38XC	3 штифта
	4-2	сталь 20X2H4A	сталь 38XC	4 штифта
	4-3	сталь 20X2H4A	сталь 38XC	5 штифтов
	4-4	сталь 38XC	сталь 38XC	2 ряда штифтов по 3 в каждом ряду (6 шт.)
	4-5	сталь 38XC	сталь 38XC	2 ряда штифтов по 2 в каждом ряду (4 шт.)
	4-6*	сталь 20X2H4A	сталь 38XC	3 штифта
	4-7*	сталь 20X2H4A	сталь 38XC	4 штифта

\* – вариант с усиленными шлицами

Сварка цапфы с насадкой осуществлялась с применением сварочной проволоки СВ08Г2С. Для снятия остаточных напряжений в сварном шве зона последнего подвергалась нагреву ТВЧ до температуры 650° С. После закалки и высокого отпуска твердость деталей находилась в пределах 285...341 НВ.

Составные цапфы изготавливали методом горячего прессования с натягом соединяемых поверхностей – 0,3 мм, т.е. сборка осуществлялась за счет разницы температур непосредственно цапфы и насадки. Кроме того, для дополнительной гарантии от проворачивания, обе части соединяли штифтами диаметром 12 мм.

**Техника и методика испытаний и тензометрирования.** Для проведения испытаний использовали универсальную испытательную машину типа МУП-50 (см. рис. 1, б), позволяющую создавать максимальную статическую нагрузку 500 кН и максимальную циклическую нагрузку 250 кН с точностью  $\pm 1\%$ . Испытания осуществляли при знакопостоянном цикле нагружения. База испытаний –  $2 \cdot 10^6$  циклов.

На первом этапе проводили испытания цапф при действии изгибающего момента. Частота нагружения составляла  $500 \text{ мин}^{-1}$ .

Испытаниям при циклическом знакопостоянном изгибе подвергали одновременно две цапфы, расположенные симметрично относительно оси приложения нагружающего усилия (рис. 2).

Цапфы устанавливали в специальное приспособление. Нагрузка через центральный пуансон передавалась на два периферийных пуансона, которые обеспечивали нагружение в местах расположения подшипников качения.

В этом случае цапфы, как и в реальной конструкции, представляли собой консоли с нагрузкой, приложенной в месте расположения колес.

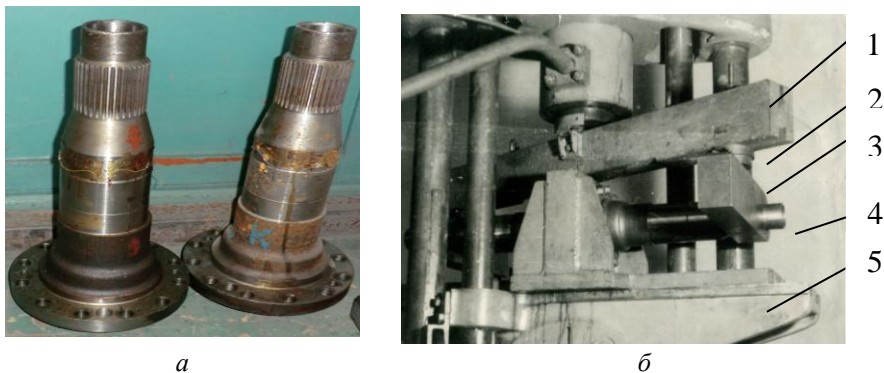


Рисунок 1 – Общий вид: *a* – испытываемые цапфы; *б* – испытательная машины МУП-50 с установленными в приспособление цапфами: 1 – траверса; 2 – пуансон; 3 – рычаг; 4 – испытываемая цапфа; 5 – основание приспособления

Такая схема позволяла оценить как опасные сечения самой цапфы, так и узла ее крепления. Максимальная нагрузка на каждую цапфу составляла 100 кН, минимальная – 40 кН. При разрушении одной из испытываемых цапф до достижения базового количества циклов проводилась замена разрушенной цапфы, и испытания продолжались. При таких параметрах испытывали цапфы вариантов 1 (сварные) и 2 (составные).

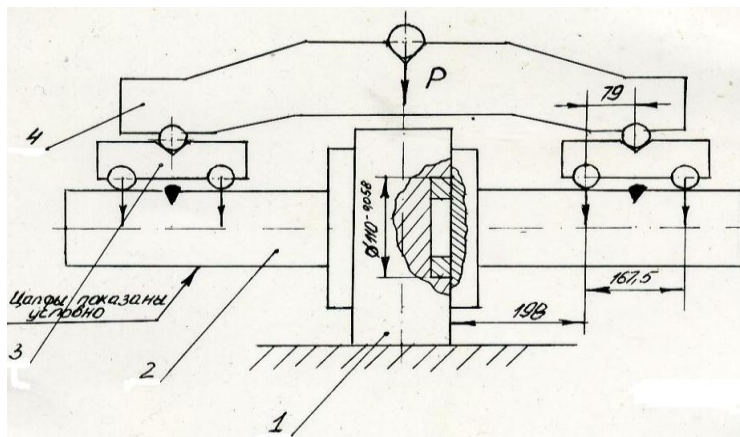


Рисунок 2 – Схема приспособления для циклических испытаний цапф при изгибе: 1 – основание приспособления; 2 – испытываемые детали; 3 – периферийные пуансоны; 4 – центральный пуансон

Перед проведением циклических испытаний производили исследование напряженного состояния цапф методом электротензометрии [3].

При тензометрировании использовали тензорезисторы типа ФКП: для резких переходов сечений и района сварного шва – с базой 3 мм, для гладких участков – с базой 5 мм. Определение деформаций производили с помощью полумостовых измерительных схем подключения тензорезисторов. Выходные сигналы тензорезисторов в исходном состоянии и при нагружении цапфы статическим усилием 100 кН фиксировали с помощью тензометрической системы СИИТ-3 с коэффициентом чувствительности равным  $1,98 \cdot 10^{-6}$  единиц относительной деформации. Расчет напряжений производили по стандартным формулам для плоского напряженного состояния [4].

На втором этапе исследований оценивали работоспособность цапф при совместном действии изгибающего и крутящего моментов, т.е. в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. Общий вид приспособления для проведения таких испытаний, размещенного на машине МУП-50, показан на рис. 1, б.

Две испытываемые цапфы крепились к корпусу приспособления с помощью штатных болтов. На шлицевых частях обеих цапф закрепляли рычаги, через которые посредством пуансонов, установленных в специальную траверсу, нагрузка передавалась на испытываемые детали. Таким образом, цапфы представляли собой консоли, нагруженные одновременно изгибающим и крутящим моментами.

В соответствии с расчетными данными максимальная нагрузка на каждую цапфу составляла 50 кН, минимальная – 15 кН, величина максимального крутящего момента 1000 кгс·м, минимального – 300 кгс·м. Частота нагружения – 500 мин<sup>-1</sup>. Таким образом, испытывали цапфы вариантов 3 и 4 (соответственно сварные и составные).

Схема расположения тензорезисторов и распределение напряжений по длине цапфы сварной конструкции из стали 18Х2Н4МА при испытаниях на изгиб показаны на рис. 3.

Как видно из приведенного графика, наиболее нагруженной зоной в процессе испытаний является участок, прилегающий к месту крепления цапфы, что вполне объяснимо, учитывая консольный характер нагружения.

Однако и в этих местах значения напряжений при заданном уровне максимальной нагрузки, находящиеся в пределах 200...256 МПа, существенно ниже предела выносливости материала цапфы, который составляет от 470 до 540 МПа [5, 6]. Следует также учесть, что величина напряжений в районе сварного шва еще ниже, что гарантирует малую вероятность усталостного разрушения в этой зоне.

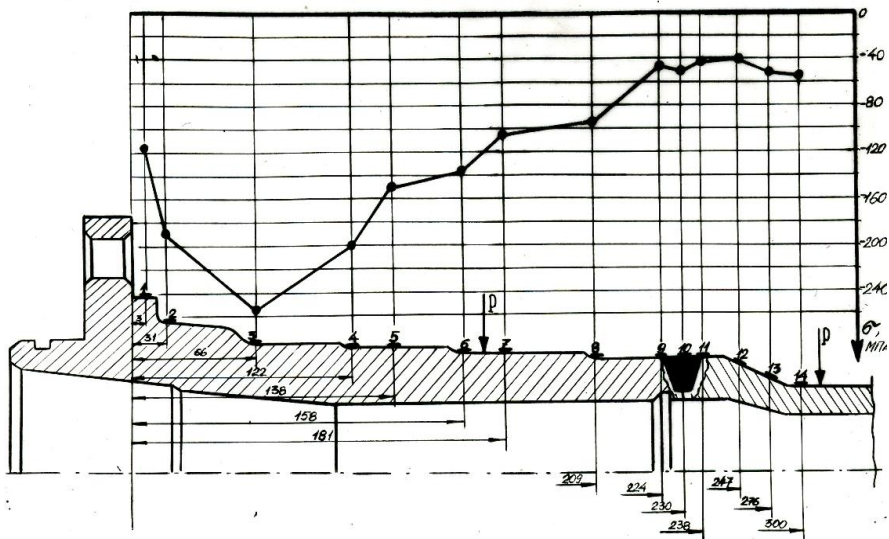


Рисунок 3 – Схема размещения тензорезисторов и распределение напряжений в цапфе сварной конструкции из стали 18Х2Н4МА (при испытаниях на изгиб)

Для тензометрирования при испытаниях на изгиб с кручением тензорезисторы наклеивали в наиболее нагруженном сечении цапф с двух противоположных сторон: по схеме розеток (два тензорезистора под углом  $45^\circ$ ) – для измерения напряжений кручения, и друг напротив друга вдоль оси цапфы – для определения напряжений от изгиба. Значения напряжений рассчитывали по известным формулам [7].

Результаты тензометрирования при испытаниях на изгиб с кручением приведены в таблице 2. При этом экспериментально полученные значения сравнивались с расчетными для балки переменного сечения, подвергнутой изгибу с кручением [8].

Как следует из табл. 2, абсолютные значения напряжений, полученных экспериментальным путем, достаточно близки к расчетным, что свидетельствует о правильном выборе испытательной схемы, обеспечивающей условия нагружения, аналогичные эксплуатационным. При этом их величины также существенно меньше значения предела выносливости материала цапф.

Таблица 2 – Результаты тензометрирования цапф заднего моста при изгибе с кручением

Номера цапф	Номер тензорезистора или розетки	Значения напряжений, МПа			
		экспериментальные		расчетные	
		при изгибе	при кручении	при изгибе	при кручении
Цапфа 1	т/р № 1	+ 137	–	127	190
	т/р № 3	- 126	–		
	роз. 2-2'	–	217		
	роз. 4-4'	–	191		
Цапфа 2	т/р № 5	- 130	–		
	т/р № 7	+ 140	–		
	роз. 6-6'	–	190		
	роз. 8-8'	–	223		

**Основные результаты и обсуждение.** Результаты испытаний на усталость цапф различной конструкции приведены в табл. 3.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что при испытаниях на изгиб практически все цапфы, независимо от конструкции и использованных материалов, а также наличия дефектов сварного шва, выдерживают базовое количество циклов нагружения без разрушения. По-видимому, использованная схема испытаний недостаточно точно отражает характер нагружения цапф в эксплуатации.

Оптимизация схемы и параметров испытаний (совместное воздействие на цапфы изгибающего и крутящего моментов) приводит к принципиальному изменению результатов испытаний на усталость.

Как видно из табл. 3, в большинстве случаев происходит разрушение цапф по шлицам от действия крутящего момента. Такие результаты свидетельствуют о том, что места соединения цапф с насадками (независимо от варианта изготовления и количества штифтов) являются менее нагруженными, чем шлицевое соединение.

Указанный вывод подтверждают данные, полученные при испытаниях составных цапф с усиленными шлицами (варианты 4-6\* и 4-7\*). Все испытанные цапфы выдержали без разрушения базовое количество циклов.

Таблица 3 – Результаты испытаний цапф различной конструкции на усталость

Схема испытаний	Конструкция цапф	Номер варианта	Условные номера цапф	Количество циклов нагружения	Результат испытаний
Изгиб	Сварные	1-1	663-1...663-4	$2 \cdot 10^6$	выдержали
		1-2	667-1...667-4; 668-1, 668-2	$2 \cdot 10^6$	выдержали
		1-3	677-1, 677-2	$2 \cdot 10^6$	выдержали
		1-4	682-1, 682-2	$2 \cdot 10^6$	выдержали
		1-5	685-1, 685-2	$2 \cdot 10^6$	выдержали
		1-6	686-1, 686-2	$2 \cdot 10^6$	выдержали
		1-7	687-1, 687-2	$2 \cdot 10^6$	выдержали
	Составные	2-1	674-1, 674-2	$3 \cdot 10^6$	выдержали
2-2		680-1...680-4	$3 \cdot 10^6$	выдержали	
Совместное действие изгиба и кручения	Сварные	3-1	689-1	489 000	разрушилась по шлицам
			689-2	514 000	разрушилась по шлицам
		3-2	694-1	700 000	разрушилась по шлицам
			694-2	$2 \cdot 10^6$	выдержала
		3-3	704-1	1 112 000	разрушилась по шлицам
			704-2	1 690 000	разрушилась по шлицам
	3-4	706-1, 706-2	1 480 000	разрушились по шлицам	
	Составные	4-1	688-1	350 000	разрушилась по шлицам
		4-2	688-3	418 000	разрушилась по шлицам
		4-3	688-4	443 000	разрушилась по шлицам
		4-4	690-1	790 000	разрушилась по шлицам
			690-2	1 431 000	разрушилась по шлицам
		4-5	693-1	$2 \cdot 10^6$	выдержала
			693-2	945 000	разрушилась по шлицам
		4-6*	695-1, 695-2	$2 \cdot 10^6$	выдержали
4-7*		696-1, 696-2	$2 \cdot 10^6$	выдержали	



**Выводы.** Впервые разработана и реализована в лабораторных условиях методика испытаний на усталость цапф заднего моста транспортного средства «Дозор» с различными вариантами изготовления.

Установлено, что нагружение цапф одновременно изгибающим и крутящим моментами отражает условия работы деталей в эксплуатации.

Данные, полученные при тензометрировании цапф в процессе статического нагружения показывают, что уровень напряжений во всех случаях существенно ниже предела выносливости материала цапф.

Результаты испытаний на усталость свидетельствуют о том, что при совместном действии изгиба и кручения разрушение цапф происходит по шлицам независимо от варианта изготовления деталей. При испытаниях деталей с усиленными шлицами все цапфы выдерживают заданное количество циклов нагружения.

На основе данных тензометрирования и усталостных испытаний, следует заключить, что выбранная схема испытаний цапф при одновременном действии изгибающего и крутящего моментов может служить основой разработки технологии и нормативов для проведения выборочных контрольных испытаний цапф в серийном производстве с целью периодического контроля уровня и стабильности качества их изготовления.

**Список использованных источников:** 1. Гольд Б.В. Основы прочности и долговечности автомобиля / Б.В. Гольд, Е.П. Оболенский, Ю.Г. Стефанович, О.Ф. Трофимов. – М.: Машиностроение, 1967. – 212 с. 2. Кугель Р.В. Испытания на надежность машин и их элементов. – М.: Машиностроение, 1982. – 182 с. 3. Шушкевич В.А. Основы электротензометрии. – Минск: Вышэйшая школа, 1975. – 352 с. 4. Биргер И. А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с. 5. Троценко В.Т., Сосновский Л.А. Сопrotивление усталости металлов и сплавов. – К.: Наукова думка, 1987. – 308 с. 6. Приданцев М.В., Давыдов Л.Н., Тамарина И.А. Конструкционные стали: Справочник. – М.: Металлургия, 1980. – 288 с. 7. Тензометрирование деталей автомобиля / Под ред. И.С. Лунева. – М.: Машгиз, 1962. – 231 с. 8. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наукова думка, 1975. – 704 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gol'd, B. V., E. P. Obolenskij, Yu. G. Stefanovich, and O. F. Trofimov. *Osnovy prochnosti i dolgovechnosti avtomobilja*. Moscow: Mashinostroenie, 1967. Print. 2. Kugel', R. V. *Ispytaniya na nadezhnost' mashin i ih jelementov*. Moscow: Mashinostroenie, 1982. Print. 3. Shushkevich, V. A. *Osnovy jelektrotenzometrii*. Minsk: Vyshhejschaja shkola, 1975. Print. 4. Birger, I. A. *Ostatochnye naprjazhenija*. Moscow: Mashgiz, 1963. Print. 5. Troshhenko, V. T., and L. A. Sosnovskij. *Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov*. Kiev: Naukova dumka, 1987. Print. 6. Pridancev, M. V., L. N. Davydov, and I. A. Tamarina. *Konstrukcionnye stali*. Moscow: Metallurgija, 1980. Print. 7. *Tenzometrirovaniye detalej avtomobilja*. I. S. Luneva, ed. Moscow: Mashgiz, 1962. Print. 8. Pisarenko, G.S., A.P. Jakovlev and V.V. Matveev. *Spravochnik po soprotivleniju materialov*. Kiev: Naukova dumka, 1975. Print.

*Поступила в редколлегию 10.10.2014*