

Ю.Д.НИКИТЕНКО, Лозовский кузнечно-механический завод

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ И УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ФЛАНЦЕВОГО ОКОНЧАНИЯ КОРПУСА МОСТА ТРАКТОРА Т-150К

Розглянуто визначення параметрів навантажень на ведучий міст, діючих при роботі трактора Т-150К. Проведено численні дослідження міцності різних варіантів болтового фланцевого з'єднання та конструкції фланцевого закінчення картера моста. Досягнуте підвищення міцності корпусу моста ведучого та фланцевого болтового з'єднання.

Ведущий мост тракторов типа Т-150К представляет собой широко унифицированный узел, который используется в тракторах Т-155, Т-156, Т-157, Т-158. Наиболее нагруженным является ведущий мост, используемый для фронтальных одноковшовых погрузчиков Т-156, ТО-18А. По полученным результатам эксплуатации тракторов Т-150К, Т-157, Т-158 и Т-156 наиболее существенным недостатком ведущих мостов является низкая надежность фланцевого болтового соединения колесного редуктора с картером ведущего моста, частыми случаями ослабления затяжки и разрушения болтов во время эксплуатации.

Выборочные испытания корпусов ведущих мостов на усталостную прочность показывают на недостаточную надежность сварного соединения фланцев и балки картера моста, а также болтового соединения колесного редуктора и картера моста [1].

В статье рассмотрено определение нагруженности ведущего моста трактора Т-150К и исследования его усталостной прочности при ускоренных стендовых испытаниях.

Ведущий мост установили на одноковшовый фронтальный погрузчик грузоподъемностью 4 тонны (ТО-28).

Испытания проводилось с целью:

- получения данных для разработки методики стендовых испытаний ведущих мостов различных вариантов;
- получения данных для расчетной оценки прочности болтового фланцевого соединения колесных редукторов с картером моста;
- получения данных для расчетной оценки прочности фланцевого окончания картера моста.

При испытаниях определялись вертикальные нагрузки на балку переднего моста погрузчика получением максимальной величины статической и динамической нагрузок при разработке различных материалов, определение величины крутящего момента на входе в передний мост при выполнении технологического цикла. Испытания проводились при разработке трех видов материалов: щебня, грунта, и глины в технологическом цикле работы погрузчика с отсыпкой в отвал. Предъявляемый на испытания погрузчик ТО-28 имел сле-

дующую развеску по мостам: – передний 5300 кГс; – задний 6700 кГс. Суммарный вес погрузчика составил 12000 кГс.

При проведении испытаний измерялись следующие параметры:

– вертикальная нагрузка на левую часть балки моста – $F_{\text{лев}}$;

– вертикальная нагрузка на правую часть балки моста – $F_{\text{прав}}$;

– крутящий момент на карданном валу, соединяющем выходной вал гидромеханической передачи с передним ведущим мостом – $M_{\text{кр}}$.

Для измерений напряжений в балке, передний мост был оборудован тензометрическими датчиками (наклеенными по мостовой схеме), воспринимающими изгиб правой и левой частей балки.

Схема расположения датчиков приведена на рис 1.

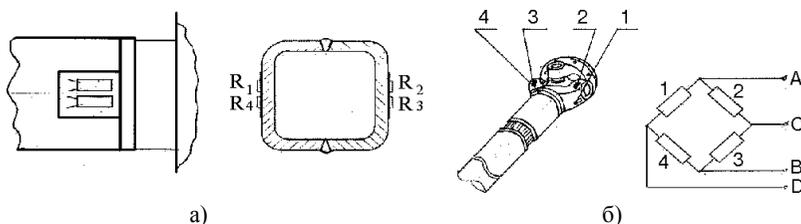


Рис. 1. Схема наклейки тензорезисторов: а) – на балку картера моста; б) – на карданный вал привода моста.

Для измерения крутящего момента на вилке карданного вала были наклеены тензодатчики по мостовой схеме, съем сигнала осуществлялся с помощью бесконтактного преобразователя крутящего момента.

Схема соединения датчиков на карданном валу приведена на рис. 1.б.

Для проведения замеров и обработки данных использовалась телеметрическая система РСМ-216 фирмы АНКЛА (ФРГ), состоящая из передающего и приемного модулей, магнитографа Т1-8 и ПЭВМ. Съем сигнала с вращающегося карданного вала осуществлялся посредством преобразователя крутящего момента фирмы "Аниол и Ханак" (ПНР). Запись процессов производилась на магнитограф Т1-8 и затем вводилась в ПЭВМ. Ввод и обработка измерительной информации осуществлялась с помощью платы сбора данным RCI 20041-3А программного обеспечения фирмы "Boog Brown" (США). Регистрация измерительной информации после обработки осуществлялась на плоттере HP 747SA.

Обработка данных проводилась на ПЭВМ с использованием программного обеспечения "ASYSTANT". Анализ данных тарировки балки моста показал, что максимальная абсолютная погрешность не превышает 5 %.

Максимальная суммарная статическая нагрузка на балку переднего моста составила 16,9 т, а по бортам 8,87 т на левой части и 8,02 т на правой. Результаты определения нагружения переднего моста вертикальными нагрузками при выполнении технологического процесса определялись после обработки записи процессов разработки грунтов на магнитограф.

Таблица 1. Распределение суммарной нагрузки на ведущий мост при разработке различных грунтов.

Уровень	Типы грунтов			
	Щебень		Суглинок	
	$F_{\text{сум}}$, кГс	%	$F_{\text{сум}}$, кГс	%
1	2691,6	4,0	4076,1	1,3
2	4773,5	9,0	5199,1	6,4
3	6055,4	15,0	6321,9	8,3
4	77,37,3	10,0	7444,9	4,8
5	9419,2	7,0	8567,8	3,3
6	11101,0	17,0	9690,7	3,5
7	12782,9	13,0	10813,6	6,7
8	14464,8	12,0	11936,6	14,5
9	16146,9	7,0	13056,5	25,9
10	17828,6	5,0	14182,4	12,1
11	19510,4	1,0	15305,5	7,5
12	21192,3	0,0	16428,3	4,2
13	22874,2	0,0	17551,2	1,1

В табл. 1 приведены $F_{\text{сум}}$ в кГс и проценты их распределения при разработке различных грунтов.

Из анализа полученных данных следует, что нагруженность правой и левой частей балки имеет отличия. При сравнении действующих нагрузок на левую и правую части балки максимальные отличия достигают 1377 кГс при разработке щебня и 3400 кГс при разработке суглинка. Максимальные динамические нагрузки составляют около 18 т, что лишь в 1,075...1,038 раза больше статических, возникающих при статическом вывешивании. Средние значения величины суммарной нагрузки на передний мост при разработке щебня (легкий режим) составило 8,65 т, а при разработке суглинка (тяжелый режим) – 11,56 т, что в 1,34 раза выше.

Результаты нагружения переднего моста крутящим моментом определены после обработки записи величины крутящего момента на входе в передний мост, которые проводились одновременно с записью вертикальных нагрузок.

Из обработки полученных данных следует, что максимальные значения крутящего момента возникают на этапе набора материала и достигают 316 кГм при легком режиме работы и 446 кГм при тяжелом. Средние за цикл величины составляют 27,3 кГм и 24,0 кГм, соответственно. Значительные величины до 2/3 от $m_{\text{тах}}$ крутящих моментов возникают при трогании машины и носят пиковый характер.

Из полученных экспериментальных данных следуют следующие выводы:

1. Максимальная вертикальная суммарная статическая нагрузка на наиболее нагруженный передний мост возникает при вывешивании задних колес погрузчика и составляет 16,9 т. Коэффициент динамичности составляет 1,075.

2. Наибольшие динамические вертикальные нагрузки на балку моста достигаются при разработке тяжелых материалов (глины, суглинков) и составляют 18 т.

3. Наиболее нагруженной является левая часть балки переднего моста. Максимальное отличие вертикальной нагрузки на левую часть балки по сравнению с вертикальной нагрузкой на правую часть балки составляет до 3,4 т. Наибольшая вертикальная нагрузка на левую часть балки составляет 10,7 т.

4. Полигон распределения суммарной величины вертикальной нагрузки имеет ярко выраженный двухгорбый характер. При тяжелом режиме работы время действия нагрузок 13,06 т составляет 25,9 %.

5. Максимальное значение крутящего момента на входе в передний мост достигает 446 кГм со средним значением за цикл 24 кГм в тяжелом режиме работы. Значительные величины до 2/3 от max значений крутящих моментов возникают при трогании машины и носят пиковый характер.

Полученные результаты явились исходными данными для последующих численных и стендовых исследований.

Исследования болтового фланцевого соединения проводился с целью создания конструкции, исключающей потерю затяжки болтов и усталостное разрушение болтов. При серийном исполнении ступица колесного редуктора трактора типа Т-150К крепится к фланцу корпуса восемью болтами М20х1,5. На рис. 2 приведена схема корпуса моста и колея трактора, а на рис. 3. схема болтового соединения.

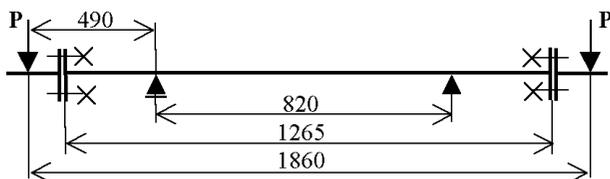


Рис. 2. Схема корпуса моста к расчету болтового соединения.

Для численных исследований болтового соединения принята максимальная статическая суммарная нагрузка на полубалку, равной $P = 88,7$ кН. Прочностной расчет выполнялся по методике [2,3,4]. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Корректность полученных результатов проверялась экспериментальными исследованиями. Болтовые соединения фланцев проверялись с помощью специально разработанной оснастки на электрогидравлической испытательной машине УРС 50/50 с обратной связью.

Построение кривых усталости болтов фланцевого соединения колесного редуктора и корпуса моста проводилось по методу Локати. При испытаниях фланцевых соединений на машине УРС 50/50 принималась схема нагружения показанная на рис. 4. Принимались следующие уровни максимального усилия по трем ступеням $P = 150$ кН, 120 кН, 90 кН.

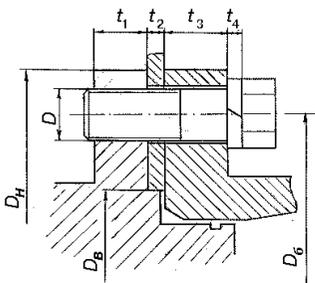


Рис 3. Схема болтового соединения

С целью ускорения испытаний на испытательной машине устанавливались две ступицы колесного редуктора ведущего моста, соединенные двухфланцевой муфтой. Муфта эквивалентна фланцевым окончаниям корпуса моста.

Результаты стендовых ускоренных испытаний помещены в табл. 3.

Уравнение кривой усталости фланцевого соединения болтами М16х1,25 имеет вид:

$$\lg N = 10,89 - 2,387 \lg(Q_{\Sigma max}) \quad (1)$$

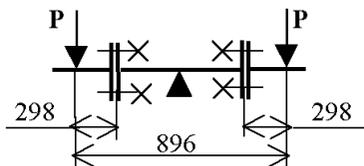


Рис. 4. Схема нагружения болтового соединения.

Таблица 2. Результаты расчетов болтового соединения фланца ступицы колесного редуктора и корпуса моста.

Наименование показателей	Варианты соединений		
	М16х1,5	М16х1,25	М20х1,5
Диаметр расположения болтов Дб, мм	192	192	185
Наружный диаметр фланца Дн, мм	230	230	230
Количество болтов	12	12	8
Материал болтов	40Х	40Х	40Х
Момент затяжки болтов, Нм	226	236	446
Усилие затяжки болтов, кН	70,8	73,9	116,5
Изгибающий момент в соединении, кНм	14,28	14,28	14,28
Максимальное напряжение в болте, МПа	7,41	7,34	10,76
Максимальное напряжение при потере затяжки, МПа	56,7	55,1	78,6
Коэффициент запаса по переменным напряжениям	2,38	2,45	1,67

Уравнение кривой усталости фланцевого соединения болтами М20х1,5 имеет вид:

$$\lg N = 9,88 - 1,306 \lg(Q_{\Sigma max}). \quad (2)$$

Из результатов расчетов видно, что амплитуда переменных напряжений при полной затяжке болтов крепления колесного редуктора превышает предельно допустимую по условию сохранения начальной затяжки, поэтому в процессе эксплуатации ведущих мостов затяжка теряется.

В силу того, что коэффициент запаса по переменным напряжениям при

потере затяжки недостаточный, возможны обрывы болтов вследствие усталостных разрушений.

Таблица 3. Результаты испытаний болтового соединения.

Нагрузка Pmax/Pmin (kN)	Наработка до отказа, тыс.цикл.	
	Соединение M20x1,5 (8 шт)	Соединение M16x1,25 (12 шт)
150/30	374	1738
150/30	565	1374
150/30	427	1452
120/40	627	3235
120/40	873	2855
90/30	2592	4952
90/30	2870	5000
60/20	5000	

Для фланцевого соединения колесного редуктора и корпуса моста болтами M20x1,5 и болтами M16x1,25 средние значения предела выносливости по нагрузкам, для наработки $2 \cdot 10^6$ циклов с коэффициентом асимметрии цикла 0,33, соответственно равны 87 кН и 134 кН.

Проведенные сравнительные ресурсные испытания корпусов ведущих мостов показали, что средняя наработка до отказа фланцевого болтового соединения, выполненного восемью болтами M20x1,5 расположенными на диаметре 185 мм, составляет 256 тыс. циклов, что подтверждается численным расчетом.

Средняя наработка до отказа фланцевого болтового соединения, выполненного двенадцатью болтами M16 x 1,25, расположенными на диаметре 192 мм более чем в два раза больше, чем у серийного варианта.

Решение задачи об оценке напряженно-деформированного состояния фланцевого окончания корпуса вызвано необходимостью изыскания конструктивных решений, направленных на повышение его прочности.

При эксплуатации ведущих мостов, а также при ускоренных ресурсных испытаниях разрушения происходили по сварному шву – при недостаточному провару корня шва или по окончанию внутренней расточке фланца под сварку. При этом начало развития усталостной трещины всегда начиналось с внутренней поверхности. Расчетная оценка прочности фланцевого окончания по теории изгиба показывает на максимальные напряжения по внешнему контуру фланцевого окончания (третья теория прочности [5]). Таким образом таким расчетным путем нельзя выявить причины разрушения фланцевого окончания картера моста [1].

Решение этой проблемы было проведено с помощью метода конечных элементов, позволяющего с высокой степенью точности оценить прочностные свойства исследуемого объекта [6, 7, 8].

Так как фланец картера моста – цилиндрический, то рассматривалась осесимметричная задача с антисимметричным нагружением.

Для конечноэлементного представления модели исследуемого объекта применяли кольцевые конечные элементы [8, 9].

Внешние воздействия приложим следующим образом, используя выражения для узловых сил, запишем силы на единицу длины по окружности в виде (рис. 5):

Разложив внешние воздействия в ряды Фурье по окружной координате θ , применяем только кососимметричное нагружение относительно плоскости $\theta = 0$, учитывая только третьи слагаемые ряда.

Конечноэлементные модели исследуемых участков балки серийного картера моста, а также результаты расчетов рассмотренному подходу использования МКЭ приведены на рис. 6.

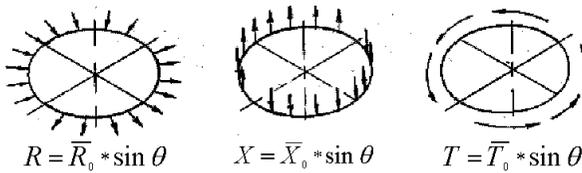


Рис. 5. Схематизация внешних воздействий на кольцевой конечный элемент.

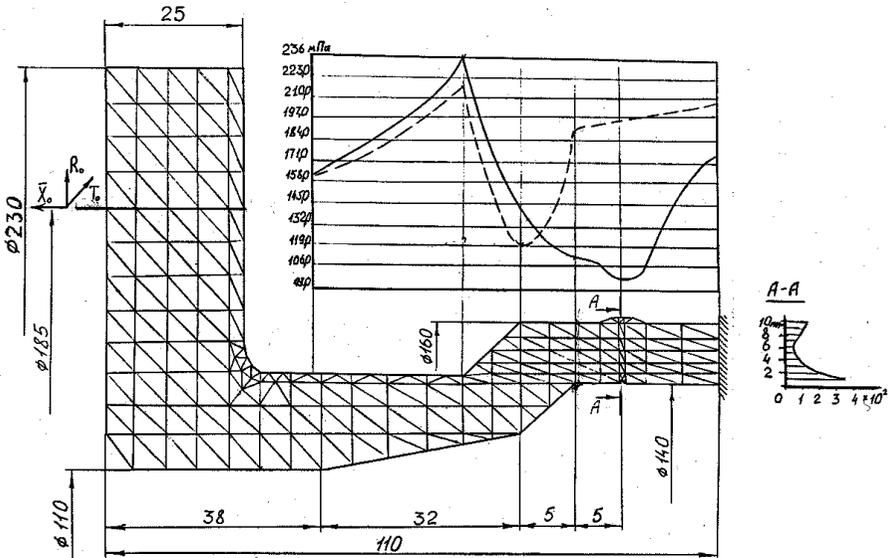


Рис 6. Конечноэлементная модель серийного фланцевого окончания и эпюры нормальных напряжений по длине фланца: — — по теории моментов, — по МКЭ (наружный контур).

Проведенные исследования прочности фланцевых окончаний корпусов мостов показывают, что максимальные напряжения, в корневом сечении сварного шва приварки фланцев к балке картера моста, находятся на

вершине несплавления свариваемых поверхностей и равняются 350 МПа (см. рис. 5).

При испытаниях на усталостную прочность корпусов ведущих мостов, развитие усталостных трещин начинается с внутренней поверхности свариваемых поверхностей фланцев и балки картера моста (при наличии несплавления свариваемых поверхностей) или по окончании внутренней расточки фланца диаметром 140 мм. Наличие проточки диаметром 142 мм вызывает дополнительные напряжения в корне сварного шва.

На основании полученных результатов расчетов и стендовых испытаний разработана конструкция фланцевого окончания корпуса моста, исключая выше указанные недостатки (рис. 6).

Для проверки эффективности принимаемых решений проводились стендовые испытания на усталостную прочность корпусов мостов на универсальной испытательной машине МУП-50.

Режим испытаний определялся схемой испытания нагружения для определения параметров кривой усталости по методу Локати. Принимались следующие уровни максимального усилия по трем ступеням: 150 кН, 120 кН, 90 кН. При необходимости уточнения предела выносливости устанавливается дополнительно уровень нагрузки 60 кН. Коэффициент асимметрии цикла равнялся 0,33. Частота нагружения соответствовала 7,66 Гц.

Результаты испытаний корпусов мостов (серийные, опытные) приведены в табл. 5.

Определение параметров уравнения усталости проводилось по методу Локати.

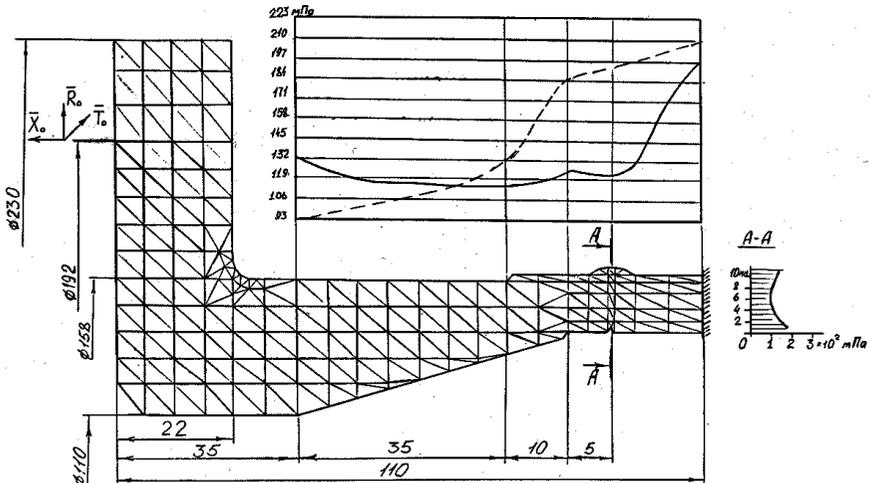


Рис. 7. Конечноэлементная модель опытного фланцевого окончания и эпюры нормальных напряжений: — по длине фланца по теории моментов, — по МКЭ (наружный контур).

Таблица 4. Результаты сравнительных стендовых испытаний корпусов ведущих мостов.

Нагрузка P _{max} /P _{min} , кН	Наработка до отказа по сварному шву приварки фланцев, тыс.цикл.	
	Серийные корпуса	Опытные корпуса
150/50	1374	1600
150/50	866	1897
150/50	707	1264
120/40	1435	3715
120/40	1702	4565
120/40	1228	2844
90/30	3592	5000
60/20	5000	

Уравнение усталости сварного соединения фланцев с балкой моста для серийных корпусов имеет вид:

$$\lg N = 9,745 - 1,716 \lg(Q_{\Sigma max}). \quad (3)$$

Уравнение усталости сварного соединения фланцев с балкой моста для опытных корпусов имеет вид:

$$\lg N = 10,991 - 2,172 \lg(Q_{\Sigma max}). \quad (4)$$

Повышение усталостной прочности фланцевого окончания корпуса моста позволило увеличить его долговечность в 1,6 раза.

Для серийного и опытного сварных соединений фланцев моста с корпусом средние значения пределов выносливости по нагрузкам соответственно равны 32 кН и 49 кН.

В результате проведенных работ удалось достичь повышения наработки на отказ корпуса моста в 1,6 раза и достичь стабильности затяжки болтов фланцевого соединения колесного редуктора и корпуса моста. Результаты внедрены в серийное производство ведущих мостов на ОАО "Лозовский кузнечно-механический завод".

Список литературы: 1. Ресурсные испытания различных вариантов картеров мостов трактора Т-150К. Технический отчет №14-83, ОГК-ЛЖМЗ, 1983. 2. *Биргер И.А., Иосилевич Г.Б.* Резьбовые соединения. – М.: Машиностроение, 1973. – 256 с. 3. *Серенсен С.Б., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М.* Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с. 4. *Анилович В.Я., Гринченко А.С., Литвиненко В.Л., Морозов А.М.* Прогнозирование ослабления затяжки резьбовых соединений. – Вестник машиностроения, 1979, № 8. – С. 31-38. 5. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.: Отв.ред. Писаренко Г.С. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с. 6. *Галлагер Р.* Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 428 с. 7. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. – 541 с. 8. Расчеты машиностроительных конструкций на прочность и жесткость / Шапошников Н.Н., Тарабасов Н.Д., Петров В.Б., Мяченков В.И. – М.: Машиностроение, 1981. – 334 с. 9. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов. Справочник / Мяченков В.И., Мальцев В.П., Майборода В.П. и др. Под общ. ред. В.И. Мяченкова. – М.: Машиностроение, 1989. – 536 с.

Поступила в редколлегию 27.03.2003.