

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

О ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРОВ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ МОЩНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Розроблені методика та параметри натурних відсіків колінчастих валів транспортних дизелів для випробувань на втому у лабораторних умовах. Показано, що запропонована структура відсіків є оптимальною та відображує реальні умови навантаження колінчастих валів в процесі експлуатації.

Разработаны методика и параметры натурных отсеков коленчатых валов транспортных дизелей для испытаний на усталость в лабораторных условиях. Показано, что предложенная структура отсеков является оптимальной, и отображает реальные условия нагрузки коленчатых валов в процессе эксплуатации.

The method and parameters of compartments of model crankshafts of transport diesel engines was developed for tests on a fatigue in laboratory terms. Was shown that the offered structure of compartments is optimum and reflects the real terms of lading of crankshafts in the process of exploitation.

Повышение эксплуатационной надежности и ресурса работы двигателей внутреннего сгорания, в том числе мощных транспортных дизелей, тесно связано с работоспособностью коленчатых валов, которые являются наиболее ответственными и дорогостоящими деталями двигателей [1, 2].

Выявленные в процессе эксплуатации транспортных дизелей овальность и радиальный износ шеек определяют знакопеременный изгиб коленчатого вала при работе, ведущий к возникновению и развитию на галтелях сопряжения шеек со щеками усталостных трещин, пересекающих в дальнейшем все сечение щеки и приводящих к разрушению валов. Напряжения, создаваемые кручением, имеют для таких валов второстепенное значение, если нет заметных резонансов крутильных колебаний от действующих усилий в диапазоне рабочих частот вращения двигателя [3]. Поэтому при проведении испытаний валов схема нагружения должна предусматривать создание циклических изгибающих нагрузок.

Надежность изделия зависит от большого количества факторов: материала, технологии изготовления, видов упрочняющей обработки, условий эксплуатации и т. д. Повышение эксплуатационной надежности коленчатых валов предполагает применение конструктивных мероприятий и упрочняющих обработок, влияние которых оценивается путем испытаний валов на усталость. Проведение подобных испытаний связано чаще всего с использованием специализированных испытательных стендов. Учитывая сложность создания такого оборудования, а также высокую стоимость

коленчатых валов мощных транспортных дизелей (от 20 до 40 тыс. грн./шт.), оценку влияния конструктивно-технологических мероприятий на эксплуатационную надежность валов целесообразно производить путем испытаний отсеков валов в лабораторных условиях на универсальных испытательных машинах с гидропульсаторами.

В этой связи большой научный и практический интерес представляет определение параметров испытаний на усталость, обеспечивающих максимальное приближение к условиям работы коленчатого вала в эксплуатации.

Необходимо отметить, что действительные нагрузки на деталь, обусловленные спецификой эксплуатации, особенно при аварийных и нештатных режимах, могут существенно отличаться от априорно принятых при проектировании. Кроме того, в ряде случаев при сложной конфигурации деталей и узлов и различных сочетаниях воздействующих нагрузок численные методы могут оказаться неэффективными для расчета напряженно-деформированного состояния из-за существенных и часто необоснованных упрощений. Поэтому для определения реальной нагруженности деталей машин большое значение приобретают методы экспериментальной механики и, в частности, тензометрия. Натурная тензометрия позволяет определить действительные значения напряжений и деформаций в машинах и конструкциях, а также их изменения в рабочих условиях, т. е. получить надежные данные для оценки прочностных и ресурсных характеристик [4, 5].

Целью настоящей работы являлось определение оптимальных параметров нагружения при испытаниях на усталость при изгибе коленчатых валов с различными вариантами изготовления.

В качестве объектов исследования выбрали чугунные коленчатые валы транспортных дизелей типов Д100 и Д80, основные параметры которых приведены в таблице 1.

Для проведения исследований использовали универсальную испытательную машину типа МУП-100, позволяющую создавать максимальную статическую нагрузку 1000 кН и максимальную циклическую нагрузку 500 кН с точностью $\pm 1\%$. Испытания проводили при знакопостоянном цикле нагружения. База испытаний составляла $5 \cdot 10^6$ циклов.

Проведение специальной работы [6] позволило установить, что параметры отсека, включающего одну шатунную и две коренных шейки (рис.1,а) не отражают в процессе испытания реальные условия нагружения коленчатого вала. Поэтому для испытаний были использованы другие типы отсеков: включающие три коренных и две шатунных шейки (1 тип – рис.1,б) и состоящие из 4-х коренных и 3-х шатунных шеек (2 тип – рис.1,в).

Таблица 1 – Основные параметры коленчатых валов дизелей типов Д100 и Д80

Тип двигателя	Длина вала, мм	Масса вала, кг	Диаметр коренной шейки, мм	Длина коренной шейки, мм	Диаметр шатунной шейки, мм	Длина шатунной шейки, мм	Радиусы переходной галтели, мм
10Д100	3862	1200	203,88	89	171,88	108	R8, R2,5
1Д80Б	3995	1683	250	125 – широкие, 95 – узкие	200	140	R10, R3

При проведении испытаний были использованы специально спроектированные и изготовленные приспособления. Отсек 1-го типа устанавливали на две цилиндрические опоры таким образом, что одна из шатунных шеек располагается в вертикальной плоскости. Нагрузка прикладывается к центральной коренной шейке с помощью пуансона с цилиндрической контактной поверхностью. Таким образом, отсек коленчатого вала испытывается на изгиб в плоскости одного из кривошипов. Частота испытаний составляла 7,5 и 9,8 Гц. Коэффициент асимметрии цикла принят равным 0,25.

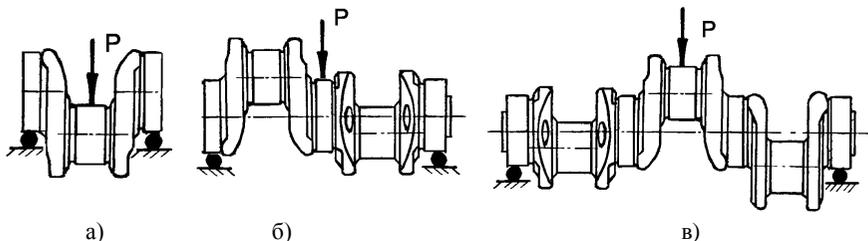


Рисунок 1 – Схемы испытаний на усталость и параметры отсеков коленчатых валов различной жесткости

При испытании таких отсеков очаг усталостного разрушения располагается, как правило, на галтели коренной шейки, а разрушение проходит по щеке и заканчивается в зоне галтели шатунной шейки, расположенной в плоскости изгиба. Таким образом, испытания на усталость отсеков коленчатых валов, содержащих две шатунные шейки, путем воздействия на коренную не отражают в полной мере режим их нагружения в процессе работы двигателя, так как не позволяют получить разрушения валов, аналогичные наблюдаемым в процессе эксплуатации дизелей.

Использование при проведении испытаний отсеков 2-го типа позволило существенно уменьшить жесткость испытываемой системы. При этом на цилиндрические опоры приспособления устанавливаются крайние

коренные шейки, а отсек располагается так, чтобы нагрузка была приложена к центральной шатунной шейке, расположенной в вертикальной плоскости. Испытания проводили при частоте 7,5 Гц и коэффициенте асимметрии цикла равном 0,3.

Применение таких отсеков позволяет проводить испытания при большем значении максимальной циклической нагрузки, а, следовательно, при более высоком уровне напряжений. Получаемый вид усталостного разрушения аналогичен наиболее распространенному в эксплуатации – от галтели шатунной шейки через щеку.

Из каждого коленчатого вала можно вырезать три отсека 1-го типа и два отсека 2-го типа. Форма отсеков даже одного типа несколько отличается из-за разного взаимного расположения кривошипов, следовательно, различна и их жесткость, а значит, и абсолютные значения максимальных напряжений в нагруженной шейке. Кроме того, допускаемые отклонения линейных размеров также могут приводить к некоторым отличиям в величине напряжений.

Поэтому каждый отсек перед испытаниями на усталость подвергали тензометрированию с целью выбора нагрузки для создания заданного уровня напряжений. Определение деформаций для расчета значений напряжений производили методом электротензометрии при ступенчатом статическом нагружении отсека в интервале от 100 до 400 кН с шагом 50 кН.

Для этого на максимально нагруженной шейке в плоскости изгиба в зоне растяжения зачищали площадку и наклеивали тензорезисторы типа КФ5П1-10-100-Б12 с коэффициентом тензочувствительности равным 2,0...2,02. Наклейку производили клеем циакрин ЭО согласно инструкции АЖВ2.782.001 ТО. Термокомпенсационные тензорезисторы наклеивали аналогично рабочим на пластины из того же материала, что и коленчатые валы. Для определения деформаций были использованы полумостовые измерительные схемы подключения тензорезисторов. Выходные сигналы тензорезисторов в ненагруженном состоянии и при нагружении отсека фиксировались с помощью измерительной тензометрической системы СИИТ-3. Сбор и обработка информации, получаемой от тензорезисторов, осуществлялись с использованием специально сформированного информационно-измерительного комплекса, структура которого приведена на рис. 2. Использование такого комплекса позволяет производить накопление и хранение данных и статистически их обрабатывать.

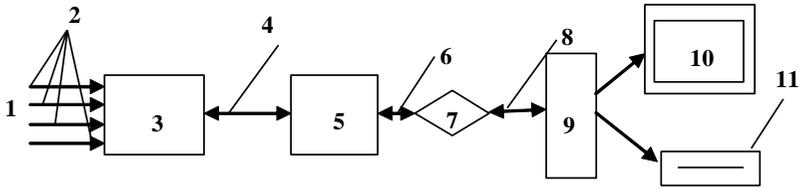


Рисунок 2 – Схема информационно-измерительного комплекса:

- 1 – тензорезисторы, наклеенные на шейку; 2 – монтажные кабели длиной 5 м;
- 3 – блок дистанционного релейного переключения (БДРП) системы СИИТ-3;
- 4 – соединительный кабель между БДРП и БИ; 5 – блок измерений (БИ) системы СИИТ-3; 6 – кабель С-А (длиной 1 м); 7 – адаптерное устройство АУС-СП;
- 8 – кабель А-ПК; 9 – системный блок персонального компьютера (ПК);
- 10 – монитор ПК; 11 – принтер

Расчет напряжений производился по формуле:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где σ – значение максимального напряжения;

ε – деформация тензорезистора, имеющая наибольшую величину;

E – модуль упругости материала вала;

Деформации тензорезисторов представляют собой разницу численных показаний системы СИИТ-3 при нагружении (П2) и в ненагруженном (П1) состоянии:

$$\varepsilon = k(П2 - П1), \quad (2)$$

где ε – деформация тензорезистора; k – коэффициент чувствительности системы СИИТ-3, равный $1,98 \cdot 10^{-6}$ единиц относительной деформации.

Проведение большого количества экспериментальных исследований (на 40 отсеках 1 типа и 18 отсеках 2 типа) позволило установить, что значения деформаций при одинаковом режиме нагружения существенно отличались как для отсеков, вырезанных из одного вала, так и для однотипных отсеков различных валов. Это подтвердило необходимость тензометрирования перед испытаниями каждого отсека коленчатого вала. В качестве определяющей рассматривалась деформация тензорезистора, имеющая наибольшее значение.

Статистическая обработка полученных результатов показала, что зависимость средних значений деформаций от величины статической нагрузки имеет линейный характер, однако с повышением величины нагрузки увеличивается разброс значений деформаций для отсеков с различным расположением кривошипов.

Это подтверждается данными, приведенными в таблице 2.

Таблица 2 – зависимость средних значений деформаций (для отсеков 1-го типа с различным расположением кривошипов) от величины статической нагрузки

Величина статической нагрузки, кН	Значения деформации $\varepsilon \cdot 10^{-5}$, относит. ед.		Рассеяние значений деформаций, %
	наименьшая	наибольшая	
100	21	26	23,8
150	32	39	21,9
200	42	53	26,1
250	53	67	26,4
300	62	80	29,0
350	74	94	27,0
400	85	118	38,8

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что рассеяние значений деформаций в зависимости от величины статической нагрузки составляет от 23,8 до 38,8 %.

Абсолютные значения максимальных напряжений в нагруженной шейке для отсеков обоих вариантов также существенно отличаются между собой. Полученные результаты приведены в таблице 3.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что рассеяние значений напряжений для отсеков 1-го типа с различным расположением кривошипов при одинаковой величине статической нагрузки достигает 30,2 %. Для отсеков 2-го типа это значение несколько ниже и составляет 3,1...17,4 % для отсеков, вырезанных из валов двигателей 10Д100, и 13...14,4 % для отсеков, изготовленных из валов двигателей 1Д80Б. Из полученных данных следует также, что отсеки 2-го типа являются более податливыми, поскольку создание достаточно высокого уровня напряжений обеспечивается статической нагрузкой меньшей величины.

Разработанная методика с использованием предварительного тензометрирования применена при проведении испытаний на усталость при изгибе различных вариантов отсеков коленчатых валов. Была подтверждена необходимость проведения тензометрирования, поскольку, например, для отсеков 2-го типа одинаковый уровень напряжений в нагружаемой шейке (230 МПа) обеспечивался величиной нагрузки от 319 до 419 кН в зависимости от расположения кривошипов.

Таблица 3 – Значения напряжений в нагруженной шейке для отсеков с различным расположением кривошипов

№ п/п	Тип отсека	Тип двигателя	Номер и тип нагружаемой шейки	Номера кривошипов	Величина максимальной нагрузки при тензометрировании, кН	Значения напряжений, МПа			Рассеяние значений напряжений, %
						наименьшее	наибольшее	среднее	
1	1	10Д100	2 коренная	1, 2	400	151,5	159	154,5	5,0
2	1	10Д100	4 коренная	3, 4	400	130,5	167	149,3	28,0
3	1	10Д100	5 коренная	4, 5	400	127,5	165	151,5	29,4
4	1	10Д100	7 коренная	6, 7	400	146	166	156	13,7
5	1	10Д100	8 коренная	7, 8	400	147	177	163	20,4
6	1	10Д100	10 коренная	9, 10	400	129	168	151	30,2
7	2	10Д100	5 шатунная	4, 5, 6	300	197	203	201	3,1
8	2	10Д100	9 шатунная	8, 9, 10	300	184	216	204	17,4
9	2	10Д100	6 шатунная	5, 6, 7	300	191	206	200	7,9
10	2	10Д100	2 шатунная	1, 2, 3	300	189	212	205	12,2
11	2	1Д80Б	3 шатунная	2, 3, 4	350	184,5	211	199	14,4
12	2	1Д80Б	7 шатунная	6, 7, 8	350	192	217	208	13,0

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что разработанная методика и параметры отсеков, состоящих из четырех коренных и трех шатунных шеек, являются оптимальными для осуществления испытаний на усталость при изгибе отсеков натуральных коленчатых валов транспортных дизелей в лабораторных условиях.

Список использованных источников: 1. Кудрявцев И.В., Наумченков Н.Е., Саввина Н.М. Усталость крупных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 237 с. 2. Повышение надежности и долговечности коленчатых валов транспортных дизелей / Е.Т. Стеценко, Л.М. Школьник, Т.В. Ларин, В.И. Шахов и др. – М.: Транспорт, 1965. – 139 с. 3. Салтыков М.А., Горбунов М.Н., Гинзбург М.А. Развитие методов и средств исследования прочности основных несущих деталей и узлов // Развитие комбинированных двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1974. – С. 103-170. 4. Дайчик М.Л., Пригоровский Н.И., Хуришудов Г.Х. Методы и средства натурной тензометрии. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с. 5. Шушкевич В.А. Основы электротензометрии. – Минск: Вышэйшая школа, 1975. – 352 с. 6. Лобанов В.К., Пашкова Г.И. Оптимизация испытаний на усталость коленчатых валов транспортных дизелей // Механiка та машiнобудуваннiя. – 2004. – № 1. – С. 32-35.

Поступила в редакцию 15.05.2010