

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ДВС

Введение

Постоянное увеличение уровня форсирования двигателей предъявляет повышенные требования к прочностным, в том числе и усталостным характеристикам деталей. В силу выраженной случайной природы усталостных поломок необходима статистическая оценка выносливости высоконагруженных деталей.

1. Формулирование проблемы

В настоящее время основным методом оценки усталостной прочности деталей ДВС является детерминистический метод оценки по коэффициентам запаса. Его повсеместное применение обусловлено относительной простотой и наглядностью. Но данная методика не позволяет определить рассеяние параметров и с помощью нее невозможно оценить повреждаемость детали по мере выработки ресурса, а значит и её остаточный ресурс.

2. Решение проблемы

2.1. Использование методики ГОСТ 25.504-82

В представленной работе представлен способ оценки усталостной прочности детали по ГОСТ 25.504-82 [1]. Данный метод основан на определении повреждаемости детали за некоторый выбранный временной промежуток, называемый блоком нагружения. Затем по полученному значению повреждаемости определяется вероятность появления усталостной трещины от времени работы детали.

Блок нагружения необходимо выбирать так, чтобы он включал в себя все режимы работы двигателя, пропорциональные по времени относительной продолжительности работы на каждом режиме для реального двигателя. Затем определяется повреждаемость детали, подверженной нагрузкам в течение блока на-

гружения, по следующей формуле:

$$a_p = \frac{\sigma_{a_max}^{\zeta - k_a} \cdot \sigma_{-1Д}}{\sigma_{a_max}^{-k_a} \cdot \sigma_{-1Д}} = \frac{\sum_{i=1}^m \sigma_{ai}^{t_i - k_a} \cdot \sigma_{-1Д}}{\sigma_{a_max}^{t_i - k_a} \cdot \sigma_{-1Д}} \quad (1)$$

Здесь σ_{a_max} – максимальная амплитуда в блоке, σ_{ai} – i -я амплитуда в блоке, t_i – относительное число циклов действия амплитуды σ_{ai} в программном блоке, $0 < k_a < 1$ – постоянное число, определяющее границу повреждающих напряжений (по опытным данным $k_a = 0,5$), т. е. допускается, что амплитуды $\sigma_{ai} < k_a \cdot \sigma_{-1Д}$ не оказывают влияния на процесс усталостного разрушения и не учитываются при определении a_p .

Так как нагрузки, которым подвержены детали ДВС, могут носить случайный характер, то для правильного их учета необходимо произвести схематизацию нагрузок. Существует несколько способов схематизации. Одним из них является так метод дождевого потока [5]. Результатом схематизации является функция распределения амплитуд по относительной продолжительности работы двигателя на той, или иной амплитуде.

Формула для определения числа блоков до разрушения имеет вид:

$$\lambda = \frac{a_p \cdot \sigma_{-1Д} \cdot N_0}{\sum_{\sigma_{ai} \geq \sigma_{-1Д}} \sigma_{ai}^m \cdot \nu_{iб}} \quad (2)$$

Здесь a_p – повреждаемость детали для блока нагружения, N_0 – базовое число циклов, $\nu_{iб}$ – число циклов в блоке нагружения для амплитуды σ_{ai} , m – показатель, характеризующий наклон кривой усталости материала.

По формуле (2) подсчитывается усталостная долговечность детали, выраженная числом блоков нагружения, или наработкой L .

Непосредственное использование уравнения (2) затруднено тем, что в деталях, рассчитываемых на длительный срок службы, уровень напряжений достаточно низок, т. е. значения амплитуд σ_{ai} обычно ниже среднего значения предела выносливости детали $\sigma_{-1д}$. Поэтому в сумме, стоящей в знаменателе выражения (2), не остается слагаемых, и вероятность разрушения для конечных наработок определяется по случайным вариациям амплитуд напряжений σ_{ai} , и пределам выносливости $\sigma_{-1д}$. Чтобы избежать этой трудности, вводится коэффициент n_p , характеризующий относительный уровень нагруженности детали:

$$n_p = \sigma_{amax} / \sigma_{-1д} \quad (3)$$

После преобразований формулы (2) получается следующая зависимость:

$$\frac{N_{сум}}{N_0} = \frac{a_p}{n_p^m \sum_{\frac{\sigma_{ai} \geq 1}{\sigma_{amax} n_p}} \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}}\right)^m \cdot t_i} \quad (4)$$

Выражение (4) является функцией долговечности при случайном (или, в общем случае, нерегулярном) нагружении, которая характеризует зависимость долговечности $N_{сум}$ от относительного уровня амплитуд напряжений. Как показывают экспериментальные данные [3] по эксплуатационной нагруженности, функцию распределения случайных величин, входящих в уравнение (2), можно считать не зависящей от случайных факторов для определенных условий эксплуатации. Таким образом, вариациями a_p и суммы, стоящей в знаменателе выражения (4), можно пренебречь и полагать, что рассеяние относительной долговечности $N_{сум}/N_0$ получают за счет случайных вариаций $\sigma_{-1д}$ и σ_{amax} , входящих в n_p .

Расчет вероятности разрушения по напряжениям наиболее просто получается при использовании нормального закона распределения пределов выносливости и амплитуд напряжений. Формула для определения квантиля вероятности разрушения:

$$u_p = \frac{-\sigma_{-1дср} \cdot \sigma_{амплс}}{\sqrt{(S_{\sigma_{-1д}})^2 + (S_{\sigma_a})^2}} \quad (5)$$

Здесь $S_{\sigma_{-1д}}$ - дисперсия предела выносливости детали, S_{σ_a} - дисперсия максимальной амплитуды.

Пусть $n = \sigma_{-1д ср} / \sigma_{аср}$ - условный коэффициент запаса прочности по средним значениям $\sigma_{-1д ср}$, $\sigma_{аср}$, тогда:

$$u_p = \frac{1-n}{\sqrt{n^2 (v_{\sigma_{-1д}})^2 + (v_{\sigma_a})^2}}, \quad (6)$$

где $v_{\sigma_{-1д}}$, v_{σ_a} - вариации предела выносливости и амплитуды соответственно.

Зная коэффициенты вариации и n по уравнению (6) можно определить квантиль u_p , по которому находится вероятность разрушения P по следующей формуле:

$$P(u_p) = \int_{-\infty}^{u_p} \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (9)$$

Тем самым, последовательность расчета функции распределения усталостной долговечности сведена к следующему: по данным об эксплуатационной нагруженности строится функция распределения амплитуд напряжений в относительном виде в ступенчатой форме $(\sigma_{ai} / \sigma_{amax}, t_i)$, и определяется среднее значение максимальной амплитуды блока нагружения $\sigma_{amax ср}$, суммарное число циклов в блоке v_b и коэффициент вариации амплитуды напряжений. По результатам натурных усталостных испытаний или расчетным путем определяются расчетные характеристики сопротивления усталости $\sigma_{-1дср}$, $v_{\sigma_{-1д}}$, N_0 и m . Для ряда значений $N_{сум}$ по формуле (4) находятся соответствующие значения n_p и далее значения n , n_1 и значения квантилей u_p по (6). По полученным значениям квантиля u_p определяются вероятности разрушения P (%) [2]. Совокупность пар чисел $(N_{сум}/P)$ и определяет функцию распределения усталостной долговечности.

2.2. Расчетное определение коэффициентов вариации.

Методика оценки усталостной прочности, опи-

санная выше, требует в качестве исходных данных значения вариаций пределов усталости и амплитуды. Определение вариаций предела выносливости – достаточно трудоемкая задача, требующая большого количества усталостных испытаний. В связи с этим можно использовать значения в пределах интервала 0,05 – 0,3 [2]. Причем величины вариации больше 0,2 характеризуют недостаточно высокий уровень технологии изготовления деталей.

Коэффициент вариации можно получить расчетным способом, с помощью программы ANSYS, реализующей метод конечных элементов. Для этого в программе существует набор инструментов, называемый Probabilistic design, позволяющий производить расчеты с учетом статистических характеристик исходных параметров [6].

Каждый из исходных параметров, используемых программой при расчете напряженно-деформированного состояния, может быть задан в виде той, или иной функции плотности распределения. К ним относятся: модуль упругости первого рода (модуль Юнга), действующие силы или давления, геометрические размеры детали. Анализируя данные о нагруженности детали, можно, например, разбить весь диапазон нагружений на интервалы, и для каждого из них определить свою функцию плотности распределения. Затем производится расчет НДС детали, результатом которого будут значения напряжений, представленные в виде некоторого набора значений. Этот набор значений можно представить вначале в виде гистограммы, и затем ее описать как функцию плотности вероятности.

В результате будет получен набор функций плотности распределения напряжений в детали, из которого получаются значения коэффициентов вариации напряжений [4].

2.3. Проведение расчетов.

Расчет производился для прицепного шатуна тепловозного двигателя типа (12 ЧН 26/26 Весь спектр

режимов работы двигателя, установленного на тепловозе, был условно разбит на 5 интервалов, для каждого из которых приведены значения относительной продолжительности времени работы (см. табл. 1).

Таблица 1. Спектр режимов работы двигателя

п, об/мин	Время работы на режиме, %	Эффективная мощность, кВт	Эффективная мощность, %
1000	5	2944	100
895	20	2208	75
757	20	1472	50
619	5	736	25
350	50	15	х. х

Затем были определены нагрузки, действующие на шатун: силы давления газов F_r , силы инерции F_j , суммарные силы F_c , равные разности газовых сил и сил инерции. Значения сил инерции F_j были пересчитаны для каждого режима. Значения мощности и P_z для каждого рассматриваемого режима получены с помощью программы DIESEL RK, позволяющей производить расчеты основных параметров рабочего процесса двигателя. Итоговые значения действующих сил приведены в таблице 2.

Таблица 2. Значения нагрузок на исследуемых режимах

п, об/мин	P_z , бар	$F_{j\text{тек}} \times 10^3$, Н	$F_r \times 10^3$, Н	$F_c \times 10^3$, Н
1000	140,21	90	744,515	654,515
895	97,79	72,09	519,265	447,175
757	84,90	51,57	450,819	399,249
619	66,65	34,48	353,912	319,432
350	36,05	11,02	191,425	180,405

Далее эти нагрузки используются в качестве исходных данных при расчете напряженно - деформированного состояния шатуна. На рис. 1 представлена расчетная схема прицепного шатуна.

Результатом расчета напряженно - деформированного состояния стал набор значений напряжений в наиболее опасном участке шатуна (см. рис. 2).

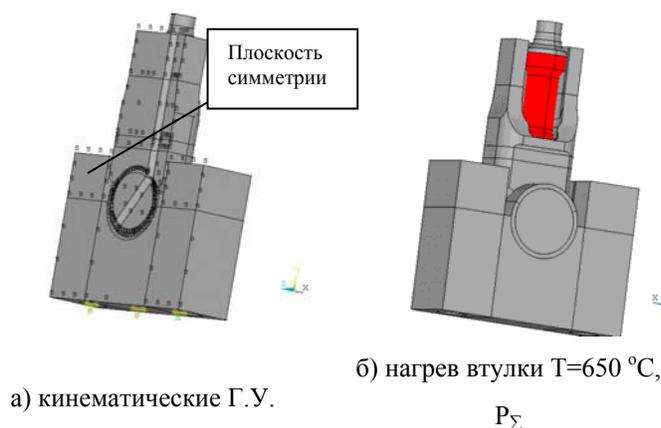


Рис. 1. Расчетная схема прицепного шатуна для определения рабочих напряжений

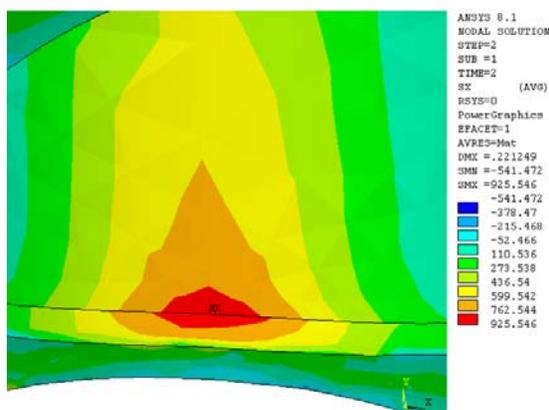


Рис. 2. Участок, в котором возникают максимальные напряжения

Параметры материала шатуна: марка стали - 40ХН2М, предел выносливости σ_{-1} – 447 МПа, предел прочности $\sigma_{вр}$ – 1100 МПа. Предел выносливости материала выше предела выносливости детали, которая изготовлена из этого материала, что связано с наличием концентраторов напряжений, масштабного фактора. В работе использовалось значение предела выносливости детали $\sigma_{1д}$, равное 410 МПа, полученное в ходе экспериментов по определению НДС прицепного шатуна.

В качестве сравнения была проведена дополнительная оценка ресурса для того же двигателя, но при форсировании до уровня максимального давления цикла $p_z=18$ МПа. Так как действующие напряжения изменяются по асимметричному циклу, то предварительно произведено вычисление амплитуд, эквива-

лентных по своему действию при симметричном нагружении. Распределение напряжений в наиболее опасном участке шатуна для форсированного и нефорсированного двигателя приведено в таблице 3.

Таблица 3. Распределение амплитуд напряжений в шатуне по спектру режимов работы для форсированного и нефорсированного мотора

Эффективная мощность, %	Нефорс. $\sigma_{\text{экв}}$, МПа	Форс. $\sigma_{\text{экв}}$, МПа	Количество циклов за 1 час работы.
100	344,98	427,02	3000
75	259,725	319,462	10700
50	237,354	291,222	9084
25	206,022	253,407	1858
х. х	165,306	203,326	10500

2.3. Результаты и обсуждение

Результатом расчета на выносливость является функция распределения вероятности возникновения усталостной трещины для наиболее опасного участка детали. Методика определяет эту функцию в виде набора пар чисел ($N_{\text{сум}}/P$), по которому можно построить диаграмму. Результирующая диаграмма распределения вероятности появления усталостной поломки прицепного шатуна приведена на рис.3.

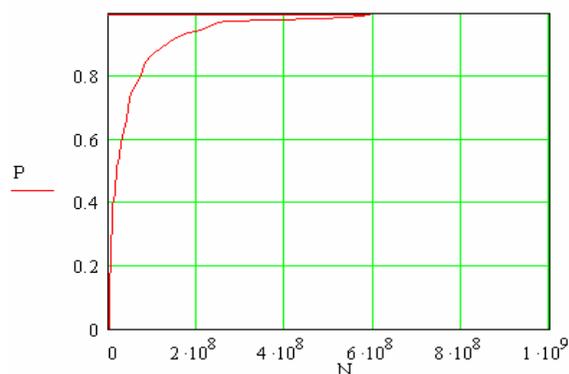


Рис. 3. Функция плотности вероятности возникновения усталостной трещины в прицепном шатуне среднеоборотного двигателя от наработанного ресурса

Отличие феноменологического метода расчета на усталость и вероятностного метода состоит в том, что результатом расчета и критерием оценки в первом

случае является значение коэффициента запаса, а во втором случае – значение вероятности появления усталостной трещины в детали при той, или иной продолжительности работы с помощью функции плотности вероятности.

Данная функция позволяет проанализировать процесс накопления повреждений в детали в зависимости от времени работы, в частности, она позволяет определить вероятность выхода из строя детали при некотором заявленном суммарном ресурсе двигателя, определить время, при котором с высокой долей вероятности наступит усталостная поломка. Так, наиболее характерными могут быть значения времени работы шатуна при 99-процентной вероятности не появления усталостной трещины N_{01} (величина, обратная 1-процентной вероятности возникновения усталостной поломки), при 99,9995-процентной вероятности N_{0005} и значение вероятности возникновения усталостной поломки в момент достижения гарантированного ресурса двигателя $P_{гар}$. Для расчета прицепного шатуна, проводимого в рамках данной работы получены следующие результаты: $N_{01}=2,2 \cdot 10^6$ часов $N_{0005}=3,5 \cdot 10^5$ часов, при суммарном гарантированном ресурсе двигателя $N=60000$ часов $P_{гар}=1,4 \cdot 10^{-3} \%$.

Расчет на выносливость шатуна при форсировке двигателя дал следующие результаты: $N_{01}=86\ 000$ часов $N_{0005}=13000$ часов, при суммарном гарантированном ресурсе двигателя $N=60000$ часов $P_{гар}=0,053\%$.

Расчет показал, что в случае форсировки двигателя до уровня $p_z=18$ МПа ресурс прицепного шатуна значительно уменьшается.

Заключение

Разработана методика оценки выносливости шатунов двигателей внутреннего сгорания. Также было показано, что уточнение исходных параметров в расчете на живучесть, таких как коэффициент вариации амплитуд напряжений, может быть получено с помощью метода конечных элементов, реализованного в программе ANSYS.

Результаты расчета на выносливость могут использоваться при доводке двигателей и отдельных деталей ШППГ, а также в качестве предварительной оценки при проектировании.

Список литературы:

1. ГОСТ 25.504-82 Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. 81 с.
2. Коваленко И. Н., Филипова А. А. Теория вероятностей и математическая статистика. –М.: Высшая школа, 1973. 476 с.
3. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. –М.: Машиностроение, 1977. 232 с.
4. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. –М.: Машиностроение, 1990. 448 с.
5. Коллинз Дж. Повреждение материалов конструкций. –М.: Мир, 1984. 678 с.
6. ANSYS documentation.