

Определение функции распределения ресурса барабана котла высокого давления Суходоева А. А.¹, Суходоев С. С.², Буров А. В.³, Кокшаров П. А.⁴, Дудецкий С. В.⁵

¹Суходоева Алла Алексеевна / Sukhodoeva Alla Alekseevna – кандидат технических наук, доцент,
кафедра общинженерных дисциплин,
Пермский военный институт внутренних войск МВД РФ;

²Суходоев Сергей Семенович / Sukhodoev Sergey Semenovich – эксперт,
ООО «Авикур»;

³Буров Андрей Валерьевич / Burov Andrey Valerevich – директор;

⁴Кокшаров Петр Александрович / Koksharov Peter Aleksandrovich – заместитель директора по производству;

⁵Дудецкий Сергей Васильевич / Dudeski Sergey Vasilevich – инженер I категории,
«РЦ ЭХО», г. Пермь

Аннотация: с использованием критерия подобия усталостного разрушения рассмотрен пример расчета конструкции с концентратором напряжения, и на его примере определена функция распределения остаточного ресурса барабана котла высокого давления.

Ключевые слова: функция распределения, долговечность, предел выносливости, кривая усталости, амплитудные напряжения, изгиб, концентраторы напряжений, критерий подобия.

Расчет на долговечность машиностроительных конструкций, в том числе в энергетике, работающих в условиях циклически меняющихся во времени повышенных температур и давлений, проводят с использованием вероятностных методов [2].

Для описания влияния различных факторов, таких как: концентрация напряжений, масштабный фактор, форма поперечного сечения, вид нагружения на средние значения и коэффициенты вариации пределов выносливости реальных деталей, была разработана статистическая теория подобия усталостного разрушения [1]. Суть статистической теории подобия заключается в том, что если образцы и реальные детали имеют различные размеры состояния поверхности, но сходные значения критерия подобия L/\bar{G} , то для них функции распределения пределов выносливости и функции распределения амплитудных значений напряжений будут одинаковы.

В соответствии с данной теорией функция распределения предела выносливости при неоднородном напряженном состоянии, когда есть концентраторы напряжений, такие как отверстия или трещины, имеет вид [1]:

$$I = \frac{L}{\bar{G} \cdot F_0} \cdot \frac{1}{m+1} \cdot \left(\frac{u}{\sigma_0}\right)^m \cdot \frac{(\xi-1)^{m+1}}{\xi} = \lg \ln\left(\frac{1}{1-P}\right),$$

где $\xi = \frac{\sigma_{max}}{u}$; $\bar{G} = G/\sigma_{max}$ - относительный максимальный градиент первого главного напряжения; L - часть периметра поперечного сечения; σ_{max} - максимальное напряжение в зоне концентрации; u - предел выносливости; m - показатель наклонной ветви кривой усталости; σ_0 - предел выносливости при пульсационном цикле; P - вероятность разрушения.

При работе барабан котла высокого давления испытывает различную по величине нагрузку на стенки: от 100 МПа при рабочем внутреннем давлении, до 520 МПа при тепловом ударе. Это приводит не только к растяжению стенок барабана, но и к их изгибу, что более опасно.

На примере пластинки с отверстием (рис. 1) из стали 22К на базе 10^7 циклов при знакопеременном изгибе

$$\sigma_m \pm \sigma_a = 300 \pm 200 \text{ МПа}$$

определяется функция распределения ресурса.

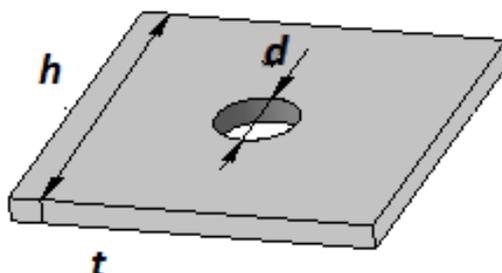


Рис. 1. Расчетная схема

Предел прочности при заданной температуре $\sigma_B = 520$ МПа. Коэффициент вариации предела выносливости и действующей амплитуды равны друг другу и не зависят от базы испытаний: $\gamma_\sigma = 0,1$, параметр $\nu_\sigma = 0,1$. Коэффициент чувствительности к асимметрии цикла составляет $\varphi_\sigma = 0,4$. Предел выносливости на базе 10^7 циклов для стали 22К $\sigma_{-1} = 320$ МПа.

В соответствии с теорией подобия усталостного разрушения, находится параметр подобия

$$\frac{L}{\bar{\sigma}} = 0,011 \cdot t \cdot d = 1,75,$$

далее определяется коэффициент концентрации напряжений для заданной базы и вероятности $P=0,5$ [1]:

$$\frac{K_{\sigma}}{\varepsilon_{\sigma}} = \frac{1,72}{0,5 \left(\frac{1}{88,3} \cdot 1,75 \right)^{-0,1}} = 1,39,$$

а с учетом влияния качества поверхности: $K_{\sigma D} = 1,61$.

Среднее или медианное (для вероятности $p=0,5$) значение предела выносливости $\bar{\sigma}_{-1d} = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma D}} = 199$ МПа.

Далее выбираются параметры кривой усталости в виде:

$$\sigma_a^m \cdot N = \bar{\sigma}_{-1d}^m \cdot N_0,$$

$$\text{где } m = \frac{c}{K_{\sigma D}} = \frac{20}{1,61} = 12,4;$$

$c = 12 \div 20$ – для углеродистых сталей;

$c = 20 \div 35$ – для легированных сталей;

$N_0 = (1 \div 3) \cdot 10^6$ – точка перелома на кривой усталости.

Дальнейшая процедура определения вероятности разрушения при случайном нагружении сводится к следующему: по заданным величинам N , N_0 , m и по диаграмме распределения амплитудных напряжений (рис. 2) определяется величина коэффициента запаса выносливости при заданной вероятности n_p .

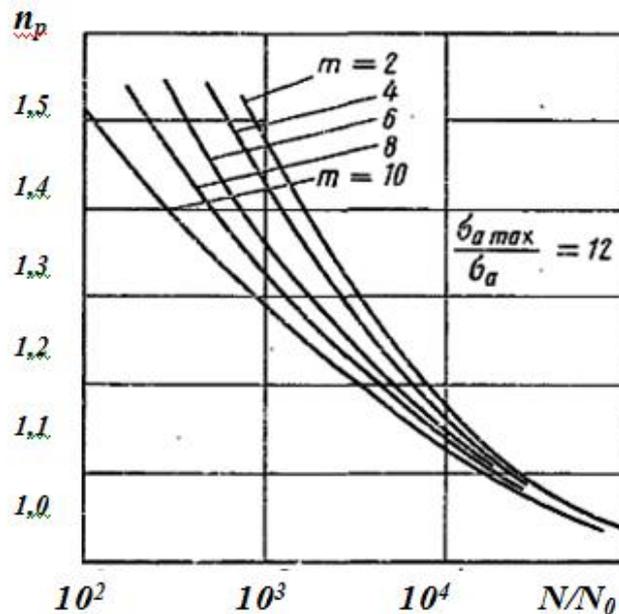


Рис. 2. График для определения n_p при экспоненциальном законе распределения амплитудных напряжений

Для данной задачи:

$$\frac{N}{N_0} = 25, \quad n_p = 1,05, \quad \bar{n} = \frac{n_p}{n} = 0,75,$$

$u_p = \frac{1-0,75}{\sqrt{(0,75-0,081)^2+0,1^2}} = 2,15$, вероятность безотказной работы определяется в зависимости от выбранного закона распределения, $p=0,96$.

Таким образом, при определении функции распределения ресурса усталостные повреждения суммируют: $a_p = \frac{\sum \bar{n}_i}{N_i}$, амплитудные и предельные величины напряжений заменяют их средними значениями и находят медианный ресурс, выраженный количеством часов работы оборудования:

$$L = \frac{a_p \cdot \bar{\sigma}_{-1d}^m \cdot N_0}{v_{\sigma} \cdot \sum \sigma_{ai}^m \cdot t_i}$$

Литература

1. Козаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977.
2. Суходоева А. А., Суходоев С. С. Использование вероятностных методов расчета при усталостном нагружении ротора турбины. // International Science Review № 6 (7), 2015. С. 17-19.