

Доан Ван Тинь, В. А. Мамонтов

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СУДОВЫХ ВАЛОВ С ТРЕЩИНАМИ

Судовые валы являются ответственными деталями судовых энергетических установок, к которым предъявляются особые требования по надежности и долговечности. В процессе эксплуатации в валах возникают дефекты в виде усталостных трещин, которые являются сильными концентраторами напряжений и приводят к усталостному разрушению.

При освидетельствовании Морским регистром судоходства, а также при ремонте судовых валов и в других случаях обнаружения трещин возникают задачи прогнозирования долговечности судовых валов с трещинами и оценки работоспособности судовых валов до разрушения.

В литературе имеются подобные работы по изучению этой проблемы для других деталей, материалов и условий нагружения, а также условий возникновения трещин [1, 2]. Однако для судовых валов такие сведения отсутствуют, вследствие чего проблема прогнозирования долговечности судовых валов с трещинами является актуальной.

Судовые валы в процессе работы подвергаются воздействию напряжений, переменных во времени (крутящий момент, развиваемый главным двигателем; реактивный момент и упор винта). Если уровень переменных напряжений превосходит определенный предел, то в материале валов происходит постепенное накопление повреждений, которые приводят к образованию субмикроскопических трещин. Трещина, постепенно развиваясь и ослабляя сечение, вызывает в некоторый момент времени внезапное разрушение валов, нередко сопровождаемое авариями.

В мировой практике эксплуатации крупнотоннажных судов систематически наблюдаются повреждения и поломки гребных валов. Причины повреждений весьма разнообразны. Наиболее опасными повреждениями в валах являются усталостные трещины [3, 4]. Усталостная трещина зарождается в поверхностных слоях и затем развивается в глубь детали, образуя острый надрез.

Конус гребного вала считается одним из его наиболее уязвимых мест, что связано с сосредоточением в зоне, где действует значительный изгибающий момент, таких эффективных концентраторов, как посадка ступицы гребного винта (причем в непосредственной близости от кормового конца насаженной облицовки) и наличие шпоночного паза [3].

По данным классификационных обществ, в торговых флотах всех стран наблюдается частый выход из строя гребных валов из-за образования трещин в районе большого основания конуса и у переднего конца шпоночного паза и коррозионно-усталостных трещин у кормового конца облицовки [3, 4].

В зависимости от причин возникновения на конусе гребного вала могут быть повреждения:

- вблизи шпоночного паза у его носового конца;
- под носовым концом ступицы гребного винта и под концами облицовок;
- между ступицей винта и кормовым торцом облицовки;
- облицовки и вала под ней.

Процесс усталостного разрушения валов можно разделить на две основные стадии [2]: стадию зарождения магистральной усталостной трещины и стадию ее развития. Стадия развития трещины составляет 70–90 % долговечности валов.

Стадия зарождения магистральной усталостной трещины (она может быть названа также стадией рассеянного усталостного повреждения) характеризуется наличием большого количества локальных пластически деформированных объемов, являющихся источниками возникновения микроскопических трещин, одна (или несколько) из которых может перерасти в магистральную трещину.

Вторая стадия усталостного разрушения – *стадия развития магистральной усталостной трещины*.

Развитие усталостной трещины зависит от комплекса условий (материал, среда, режим нагружения). Поэтому способы определения скорости роста усталостной трещины могут быть различными. В общем случае скорость роста трещины определяется по формуле

$$v = \frac{dl}{dN} = \frac{\Delta l}{\Delta N}, \quad (1)$$

где l – длина трещины, мм; N – число циклов.

В качестве примера приведены кривые скорости роста трещины (рис. 1) для разных условий (материал, среда и режим нагружения).

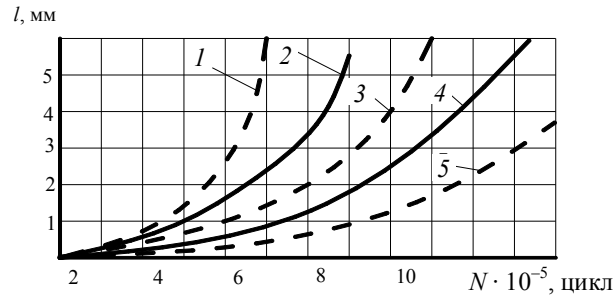


Рис. 1. Кривая скорости роста трещины

П. Пэрис и Ф. Эрдоган прирост длины трещины за цикл выразили зависимостью [1]:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n, \quad (2)$$

где C и n – постоянные величины материала (значения n обычно находятся в пределах $2 < n < 6$, хотя известны и значительные отклонения); K – коэффициент интенсивности напряжений (КИН), ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений.

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}.$$

Коэффициент интенсивности напряжения является параметром, определяющим напряженно-деформированное состояние материала в окрестности вершины трещины.

Согласно модели Д. Ирвина, для бесконечной пластины K является функцией напряжения и длины трещины:

$$K = \sigma \sqrt{\pi \cdot l},$$

где σ – номинальное напряжение в сечении брутто; l – длина трещины.

Циклическое нагружение характеризуется максимальным (σ_{\max}) и минимальным (σ_{\min}) напряжениями, используя которые по формуле (3) определяют K_{\min} и K_{\max} .

Графической интерпретацией формулы (2) является диаграмма усталостного разрушения (рис. 2), характеризующая сопротивление развитию трещины.

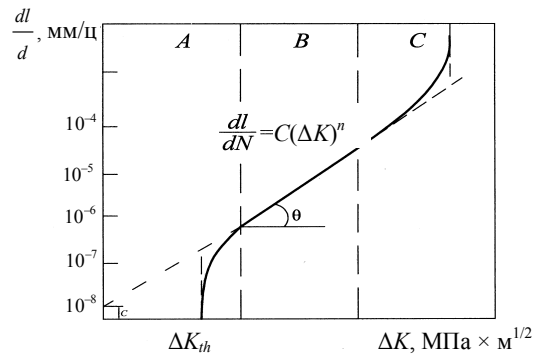


Рис. 2. Диаграмма усталостного разрушения

По этой диаграмме можно определить ΔK_{th} – пороговый КИН и ΔK_C – критический КИН, а также величины C и n .

Как видно из диаграммы, трещина претерпевает три периода развития: период A – зарождение, B – стабильный рост (описываемый уравнением Пэриса) и C – критический рост (долом).

Существенное влияние на закономерности сопротивления стабильному развитию усталостных трещин, в конечном счете определяющих длительность периода их роста до критического размера, оказывают конструктивные (размеры, концентраторы напряжений) и эксплуатационные (температура, частота нагружения, среда, режим циклического нагружения) факторы.

Влияние размеров деталей (или масштабный фактор) проявляется при испытаниях на усталость в том, что крупные детали обладают существенно более низким пределом выносливости, чем мелкие. Скорость роста усталостной трещины с увеличением размеров деталей, как правило, уменьшается.

В местах изменения формы и размеров деталей возникает значительная концентрация напряжений, существенно превышающая номинальные напряжения. Радиус при вершине концентратора напряжений является одной из основных характеристик, определяющих условия возникновения усталостных трещин. Чем меньше радиус вершины концентратора напряжений, тем больше градиент номинальных напряжений, который приводит к увеличению скорости развития усталостных трещин.

Одним из основных параметров циклического деформирования, оказывающим существенное влияние на сопротивление усталости материалов, является асимметрия цикла нагружения. Это влияние можно наблюдать на обеих стадиях усталости: до образования усталостной трещины и при ее развитии. В общем случае увеличение коэффициента асимметрии цикла нагружения приводит к более раннему возникновению усталостных трещин и уменьшению скорости их развития. С увеличением асимметрии цикла нагружения увеличивается также пороговое значение амплитуды коэффициента интенсивности напряжений, ниже которого не происходит роста усталостных трещин.

Температура среды по-разному влияет на закономерности стабильного развития усталостных трещин в конструкционных сталях на всех трех участках диаграммы роста усталостных трещин и на условия перехода от усталостного к хрупкому разрушению в различных температурных диапазонах. Стабильное развитие усталостных трещин характеризуется длительностью периодов развития, скоростью распространения усталостных трещин, величиной порогового коэффициента интенсивности напряжений K_{th} и т. п.

Повышение температуры среды для сталей приводит к увеличению скорости роста трещин, возрастающей с увеличением значений ΔK .

В настоящее время накоплен большой экспериментальный материал по влиянию различных коррозионных сред на развитие усталостных трещин в металлических материалах. Влияние коррозионной среды – морской воды – на трещиностойкость существенно различно для различных материалов. Скорость роста трещины для сталей и сплавов существенно различна. В сталях она гораздо ниже – в среднем в 10 раз как на воздухе, так и в растворе морской соли. Пороговые размахи коэффициента интенсивности напряжений в коррозионной среде существенно ниже, чем на воздухе для всех материалов.

Как видно из обзора, для судовых валов, отличающихся особыми условиями эксплуатации (среда, уровень и характер действующих нагрузок), сведения о воздействии различных факторов на трещиностойкость в литературе отсутствуют. В связи с этим задачей последующих исследований станет изучение влияния различных эксплуатационных факторов на трещиностойкость валов, изготавливаемых из стали 35.

Результаты исследования позволят установить закономерности развития усталостных трещин в судовых валах, оценить работоспособность судовых валов с трещинами различного размера и прогнозировать срок их службы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справ. Ч. 1. – Киев: Наук. думка, 1987. – 339 с.
2. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
3. Балацкий Л. Г., Бегагоен Т. Н. Эксплуатация и ремонт дейдвудных устройств морских судов. – М.: Транспорт, 1975. – 160 с.
4. www.vinashin.vn.

Статья поступила в редакцию 25.01.2008

**ESTIMATION OF SERVICEABILITY
OF SHIP SHAFT WITH CRACKS**

Doan Van Tinh, V. A. Mamontov

The reasons and places of fatigue cracks occurrence in ship shaft are described. The information about kinetics of crack development in various materials and the technique of definition of the stress intensity factor is given. The influence of the constructive and operational factors on the speed of fatigue crack development is examined.

Key words: ship shaft, durability, crack, fatigue failure, growth rate of a fatigue crack, stress intensity factor, constructive and operational factors, service life.