

Доан Ван Тинь, В. А. Мамонтов

ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СУДОВЫХ ВАЛОВ С ТРЕЩИНАМИ ОТ НАЧАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ТРЕЩИН

В процессе эксплуатации судовые валы приобретают дефекты в виде усталостных трещин, которые являются сильными концентраторами напряжений и приводят к усталостному разрушению.

Российский морской регистр судоходства предъявляет жесткие требования к судовым валам с трещинами, поэтому валы бракуются при обнаружении в них трещин любых размеров.

При наличии трещин малых размеров перед судовладельцем возникают задачи прогнозирования долговечности судовых валов с трещинами и оценки их работоспособности до разрушения [1, 2].

Имеется ряд исследований этой проблемы для различных деталей, материалов и условий нагружения, а также условий возникновения трещин. Однако для судовых валов эти сведения отсутствуют, что и определяет актуальность поставленной задачи.

Прогнозирование долговечности судовых валов с трещинами позволило бы определить остаточный ресурс и тем самым продлить их эксплуатационный период, выполнить подготовку к ремонту, сократить вынужденные простои судна и уменьшить затраты на ремонт и сроки его выполнения.

Современный анализ развития трещин базируется на концепциях механики разрушения. Согласно этой концепции, макроскопическое разрушение тела является результатом развития трещин, которые возникают либо в процессе его изготовления, либо как результат его деформации во время испытания образца или эксплуатации детали. Учитывая наличие трещин, механика разрушения устанавливает количественную связь между действующим на тело напряжением, формой и размерами трещин и сопротивлением материала стабильному и нестабильному развитию этих трещин [3, 4].

Установлено, что стадию распространения трещины от зарождения до полного разрушения образца или детали можно разделить на три характерных этапа, различающихся механизмом ее роста. Первый этап характеризуется небольшой скоростью, т. к. трещина еще мала, а ее продвижение происходит преимущественно вдоль полос скольжения. Основную часть составляет второй этап, когда трещина растет с примерно постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном наибольшему нормальному напряжению. На третьем этапе, когда трещина имеет уже достаточно большие размеры, скорость ее роста быстро увеличивается, и происходит практически мгновенное хрупкое разрушение. Такое поэтапное развитие трещины получило название стадийности усталостного разрушения.

В механике разрушения, согласно теории Д. Ирвина, трещина представляется в виде эллипса с острыми краями (рис. 1). Край трещины является очень сильным концентратором напряжения, от которого зависит развитие трещины, а скорость развития трещины зависит от коэффициента интенсивности напряжений (КИН).

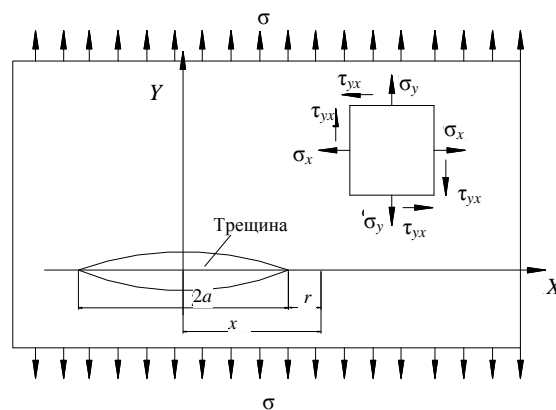


Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние в вершине трещины

Механика разрушения является развитием теории хрупкого разрушения Гриффитса, на основании которой Д. Ирвин установил зависимость между длиной трещины в бесконечной пластине и напряжением в вершине трещины. Эти параметры были связаны коэффициентом интенсивности напряжений [3]:

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi \cdot a}, \quad (1)$$

где K_1 – коэффициент интенсивности напряжений; σ – номинальное напряжение в сечении брутто, МПа; a – полудлина трещины, мм.

П. Пэрис и Ф. Эрдоган, обобщив большое количество экспериментальных результатов, прирост длины трещины за цикл выразили зависимостью

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K_1)^n, \quad (2)$$

где l – длина трещины, мм; N – число циклов; c и n – константы, определяемые экспериментально. Значения n обычно находятся в пределах $2 < n < 6$, хотя известны и значительные отклонения.

Графической интерпретацией уравнения (2) является кривая разрушения (рис. 2). Кривую принято делить на три характерных участка: A , B и C . Нижняя часть кривой на участке A асимптотически приближается к пороговому значению коэффициента интенсивности напряжений ΔK_m , ниже которого трещины не развиваются или растут с такой малой скоростью, что обнаружить их экспериментально не удастся. Режимы нагружения на участке A принято называть припороговыми. К участку B относится прямолинейная часть кривой, описываемая уравнением Пэриса (2). Для этого участка характерны средние скорости роста трещин – $10^{-6} \dots 10^{-3}$ мм/цикл. Участок C характеризуется повышенной скоростью роста трещин; это участок нестабильного роста трещин, или катастрофического разрушения. На этом участке K_1 близок к вязкости разрушения при статической нагрузке K_{1c} [5].

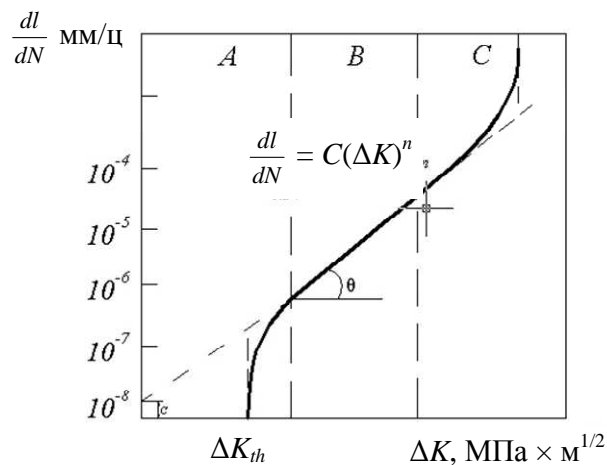


Рис. 2. Кривая усталостного разрушения

Диаграмма усталостного разрушения является основной характеристикой развития трещины в течение всего периода ее существования. Наибольший интерес с точки зрения прогнозирования, а также влияния на развитие трещины представляет средний участок диаграммы – период стабильного роста, когда наблюдается линейная зависимость в логарифмических координатах между скоростью развития трещин и размахом КИН. Этот участок кривой наиболее точно описывается уравнением Пэриса.

В исследовании поставлена задача построить кривую усталостного разрушения круглых образцов (рис. 3) из стали 35 по ГОСТ 1050–88. Форма и материал образцов выбраны в результате физического моделирования условий нагружения и материала натуральных судовых валов.

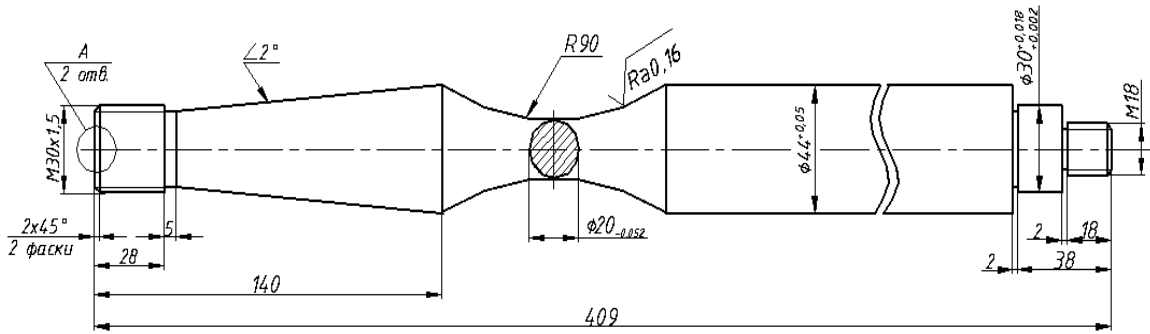


Рис. 3. Образец для испытаний

Скорость роста трещин определяли при усталостных испытаниях образцов круговым консольным изгибом (рис. 4) на экспериментальной установке. В процессе испытаний фиксировали длину трещин по окружности сечения l и соответствующее ей количество циклов нагружения N . Производилось двухступенчатое нагружение: при высоком уровне напряжений $\sigma_1 = 295$ МПа происходило зарождение трещины, при низком – $\sigma_2 = 265$ МПа – непосредственное развитие, при котором определялись параметры скорости роста трещины l и N .

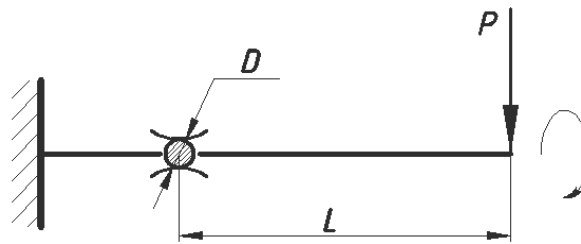


Рис. 4. Схема нагружения образца

Коэффициент интенсивности напряжений для данного вида образцов определяли по формуле

$$K_1 = \frac{32 \cdot P \cdot L}{\pi \cdot D^{5/2}} \cdot M, \quad (3)$$

где P – нагрузка на образец; L – расстояние от точки приложения нагрузки до опасного сечения; D – диаметр опасного сечения; M – параметр, определяемый по формуле

$$M = [(0,4 \cdot \lambda + 2,61 \cdot \lambda)^2 + (0,0096 \cdot \lambda + 0,0056 \cdot \lambda^2)^{1/3}]^{1/2}, \quad (4)$$

λ – геометрический параметр:

$$\lambda = \frac{l}{\pi \cdot D}. \quad (5)$$

Параметры диаграммы рассчитывали на ЭВМ. В результате расчета получены значения $\lg \frac{dl}{dN}$ и $\lg \Delta K_1$, на основе которых построен средний участок диаграммы усталостного разрушения моделей судовых валов (рис. 5).

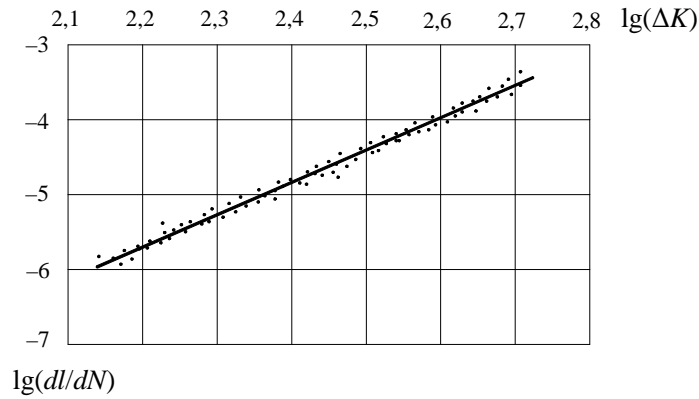


Рис. 5. Средний участок диаграммы усталостного разрушения экспериментальных образцов

Этот участок кривой усталостного разрушения позволяет определить основные характеристики уравнения Пэриса (2). Коэффициент n вычисляется по следующей формуле:

$$n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^I (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (6)$$

где $x = \lg \Delta K_I$ – значения по оси абсцисс диаграммы; $y = \lg \frac{dl}{dN}$ – значения по оси ординат диаграммы;

$\bar{x} = \frac{1}{I} \cdot \sum_{i=1}^I x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{I} \cdot \sum_{i=1}^I y_i$ – средние значения абсцисс и ординат диаграммы;

I – число точек в расчетном интервале.

Коэффициент c определяется по формуле

$$\lg c = \bar{y} - n\bar{x}. \quad (7)$$

В результате расчетов были получены средние значения: $n = 4$; $c = 1,6 \cdot 10^{-15} (\text{МПа} \cdot \sqrt{\text{мм}})^{-n} \cdot \text{мм/цикл}$.

Методика расчета долговечности основывается на приведенном выше выражении Пэриса, в котором прирост длины трещины за цикл выражается зависимостью (2).

Согласно модели Д. Ирвина, коэффициент интенсивности напряжений является функцией напряжения и длины трещины:

$$K = y \cdot \sigma_3 \cdot \sqrt{\pi \cdot a}, \quad (8)$$

где σ_3 – эквивалентное напряжение в сечении брутто, МПа; a – полудлина трещины, мм; y – функция, учитывающая геометрию трещины.

Из формул (3) и (8) получаем формулу для определения функции y :

$$y = \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot a}} M. \quad (9)$$

Из формулы (2) скорость роста трещин может быть представлена в виде

$$\frac{dl}{dN} = f(\Delta K). \quad (10)$$

Отсюда получим число циклов (долговечность):

$$N = \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{f(\Delta K)}, \quad (11)$$

где l_0 – начальный размер трещины, мм; l_k – конечный размер трещины, мм.

Из формул (2), (8), (10) и (11) долговечность определяется как

$$N = \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{c(\Delta K)^n} = \int_{a_0}^{a_k} \frac{2da}{c(y \cdot \Delta\sigma_3 \cdot \sqrt{\pi a})^n}. \quad (12)$$

Проинтегрировав выражение (12), получим

$$N = \frac{4}{(n-2)c\pi^{n/2} \cdot y^n \cdot \Delta\sigma_3^n} \left[\frac{1}{a_0^{n-2/2}} - \frac{1}{a_k^{n-2/2}} \right], \quad (13)$$

где $\Delta\sigma_3$ – размах напряжения, МПа; $\Delta\sigma_3 = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$; при циклическом нагружении $\Delta\sigma_3 = 2\sigma_3$.

Эквивалентные напряжения σ_3 в материале гребного вала на кормовой дейдвудной опоре определяются по формуле [3]:

$$\sigma_3 = \sqrt{\sigma_a^2 + \left(\frac{b}{L_0} \tau_{кр} \right)^2 + \alpha^2 \cdot (\tau_{кр}^э)^2}, \quad (14)$$

где L – длина судна между перпендикулярами, м; $L_0 = L/100$ – относительная длина судна; $\tau_{кр}$ – касательные напряжения, МПа; $\tau_{кр}^э$ – эквивалентные напряжения с учетом крутильных колебаний, МПа; σ_a – амплитуда переменных напряжений изгиба, МПа; b – коэффициент, отражающий характер наклона кривой усталости материала гребного вала; α – отношение пределов выносливости материала гребного вала при изгибе и кручении.

Результаты расчета долговечности гребных валов с трещинами (изготовленных из стали 35) танкера дедвейтом 1 000 т вьетнамской постройки в зависимости от начальных размеров трещин приведены в таблице и на рис. 6.

Исходными условиями для расчета являются начальная длина трещины, равная 0,1 мм (это минимальная длина трещины, обнаруживаемая цветным и магнитным методами дефектации), и конечная длина трещины, которая определяется критическим размером трещины, она составляет 0,2D. Критическим размером трещины считается конечная длина, при достижении которой гребные валы быстро ломаются [1].

Долговечность гребного вала с трещинами танкера дедвейтом 1 000 т вьетнамской постройки в зависимости от начального размера трещин

Начальная полудлина трещины a_0 , мм	Конечная полудлина трещины a_k , мм	Размах эквивалентных напряжений $\Delta\sigma^3$, МПа	Долговечность N , ч
0,05	25	29,51	10 529,83
0,1	25	29,51	9 834,93
0,2	25	29,51	9 254,04
0,5	25	29,51	7 795,71
1,0	25	29,51	6 910,42
1,5	25	29,51	6 299,43
2,0	25	29,51	5 817,72
2,5	25	29,51	5414,15
3,0	25	29,51	5063,99
3,5	25	29,51	4753,19
4,0	25	29,51	4472,89
4,5	25	29,51	4217,10
5,0	25	29,51	3981,56
5,5	25	29,51	3 763,12
6,0	25	29,51	3 559,38
6,5	25	29,51	3 368,45
7,0	25	29,51	3 188,81

Начальная полудлина трещины a_0 , мм	Конечная полудлина трещины a_c , мм	Размах эквивалентных напряжений $\Delta\sigma^*$, МПа	Долговечность N , ч
7,5	25	29,51	3 019,24
8,0	25	29,51	2 858,72
8,5	25	29,51	2 706,39
9,0	25	29,51	2 561,53
9,5	25	29,51	2 423,50
10,0	25	29,51	2 291,79
11,0	25	29,51	2 045,42
12,0	25	29,51	1 819,29
13,0	25	29,51	1 610,90
14,0	25	29,51	1 418,20
15,0	25	29,51	1 239,53
16,0	25	29,51	1 073,47
17,0	25	29,51	918,82
18,0	25	29,51	774,55
19,0	25	29,51	639,75
20,0	25	29,51	513,63

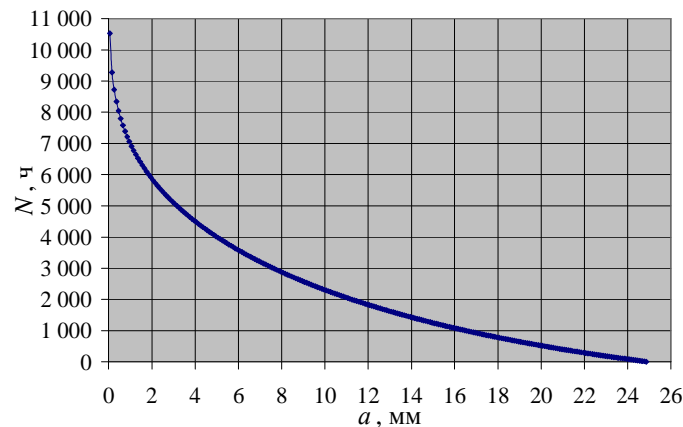


Рис. 6. Зависимость долговечности гребного вала с трещинами танкера дедвейтом 1 000 т вьетнамской постройки от начального размера трещин

Результаты расчета долговечности гребных валов с трещинами показывают, что можно прогнозировать долговечность гребных валов с трещинами до поломки при известных начальных размерах трещин. Долговечность гребных валов с трещинами значительно зависит от начальных размеров трещин. Результаты расчета долговечности гребного вала с трещинами танкера дедвейтом 1 000 т вьетнамской постройки (табл.) показывают, что при начальной полудлине трещины 0,1 мм долговечность гребного вала с трещинами составляет 9 835 часов, а при начальной полудлине трещины 0,2 мм – 9 254 часов. Это означает, что долговечность уменьшается на 6–7 % при развитии полудлины трещины на 0,1 мм. При развитии полудлины трещины на 0,5 мм долговечность уменьшается на 15–16 %.

Полученные результаты найдут применение при проектировании судовых валов, а также при их ремонте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балацкий Л. Т., Филимонов Г. И. Повреждения гребных валов. – М.: Транспорт, 1970. – 141 с.
2. www.vinashin.vn.
3. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
4. Комаров В. В., Курьлев А. С. Валопроводы рыбопромысловых судов. Ч. I. Конструкция, эксплуатация и общие вопросы проектирования. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 1997. – 166 с.
5. Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справ.: в 2 ч. Ч. 1. – Киев: Наук. думка, 1987. – 510 с.

Статья поступила в редакцию 9.07.2009

**ESTIMATION OF DEPENDENCE
OF DURABILITY OF SHIP SHAFT WITH CRACKS
ON THEIR INITIAL SIZES**

Doan Van Tinh, V. A. Mamontov

The technique of calculation of durability of ship shaft with cracks is considered depending on the initial sizes of cracks. The information on the development of cracks is given and the way of definition of the factor of pressure intensity for experimental samples made of 35 steel is described. The diagram of the endurance failure is drawn on the basis of the results of the experimental researches. The basic constants of the material n and c are determined. The results of calculation of durability of the propeller shaft with cracks of the tanker with 1 000 T deadweight of the Vietnamese construction are given depending on the initial sizes of cracks.

Key words: ship shaft, durability, crack, factor of pressure intensity, diagram of endurance failure, basic constants of the material.