

УДК 620:178.3

**УТОЧНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ  
ДЛЯ ОБЪЕКТОВ С НИЗКИМИ ПРЕДЕЛАМИ ВЫНОСЛИВОСТИ**

**А.В. Конопльов**

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Машиноведение»

**О.Н. Кононова**

ст.преподаватель кафедры «Машиноведение»

**А.Г. Кобаков**

к.т.н., доцент кафедры «Машиноведение»

*Одесский национальный морской университет*

***Аннотация.** Проведен анализ факторов, влияющих на точность оценки коэффициента относительной долговечности. В качестве исходных данных для его проведения были использованы корреляционные зависимости между параметрами степенного уравнения наклонного участка кривой усталости и пределом выносливости.*

*Показано, что систематическая погрешность определения коэффициента относительной долговечности минимальна для объектов с пределами выносливости, находящимися в интервале напряжений 300-500 МПа. Для объектов с низкими значениями пределов выносливости (до 300 МПа) необходима его корректировка.*

*Предложен подход, позволяющий корректировать величину данного коэффициента за счёт уточнения положения точки пересечения наклонных участков кривых усталости.*

***Ключевые слова:** коэффициент относительной долговечности, предел выносливости, кривая усталости.*

**УТОЧНЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВІДНОСНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ  
ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ З НИЗЬКИМИ МЕЖАМИ ВИТРИВАЛОСТІ**

**А.В. Конопльов**

д.т.н., професор, завідувач кафедри «Машинознавство»

**О.М. Кононова**

ст.викладач кафедри «Машинознавство»

**О.Г. Кобаков**

к.т.н., доцент кафедри «Машинознавство»

*Одеський національний морський університет*

***Анотація.** Проведено аналіз факторів, що впливають на точність оцінки коефіцієнта відносної довговічності. В якості вихідних даних для його проведення були використані кореляційні залежності між параметрами степенного рівняння похилої ділянки кривої втоми і границею витривалості.*

---

© Конопльов А.В., Кононова О.Н., Кобаков А.Г., 2018

*Доведено, що систематична похибка визначення коефіцієнта відносної довговічності мінімальна для об'єктів з границями витривалості, що знаходяться в інтервалі напруг 300-500 МПа. Для об'єктів з низькими значеннями границь витривалості (до 300 МПа) необхідно його коригування.*

*Запропоновано підхід, який дає можливість коригувати величину даного коефіцієнта за рахунок уточнення положення точки перетину похилих ділянок кривих втоми.*

**Ключові слова:** коефіцієнт відносної довговічності, границя витривалості, крива втоми.

**UDC 620:178.3**

**SPECIFICATION OF THE COEFFICIENT OF RELATIVE LONGEVITY  
FOR OBJECTS WITH LOW ENDURANCE LIMITS**

**A.V. Konoplev**

Doctor of technical sciences, Professor, head of the department «Machine Science»

**O.N. Kononova**

Senior lecturer of the department «Machine Science»

**A.G. Kibakov**

Ph.D., associate Professor of the department «Machine Science»

*Odessa National Maritime University*

***Abstract.** The analysis of factors influencing the accuracy of the estimation of the coefficient of relative durability is carried out. As initial data for its implementation, correlation dependencies between the parameters of the power equation of the oblique portion of the fatigue curve and the endurance limit were used.*

*It is shown that the systematic error in determining the coefficient of relative longevity is minimal for objects with endurance limits that are in the stress range 300-500 MPa. For objects with low values of the endurance limit (up to 300 MPa), its correction is necessary.*

*An approach is proposed that allows to adjust the value of this coefficient due to the refinement of the position of the intersection point of the inclined sections of the fatigue curves.*

**Keywords:** coefficient of relative longevity, endurance limit, fatigue curve.

**Постановка проблеми.** В работе [1] был рассмотрен вопрос о соотношении долговечностей до разрушения объектов, подвергнутых сравнительным испытаниям на сопротивление усталости при одинаковом уровне циклических напряжений, и получена следующая зависимость:

$$\frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg N_2} = k_\gamma, \quad (1)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  – долговечности до разрушения двух объектов, испытанных при одинаковом циклическом напряжении;

$k_\gamma$  – коэффициент относительной долговечности.

Для описания зависимости долговечности до разрушения от величины напряжения было принято степенное уравнение, которое в общем случае записывается в виде

$$\sigma^{m_C} N = \sigma_R^{m_C} N_G = \sigma_{d_C}^{m_C} = 10^{C_C}, \quad (2)$$

где  $\sigma_R$  – предел выносливости;

$\sigma_{d_C}$  – начальная ордината наклонного участка кривой усталости в логарифмической системе координат;

$\sigma$  и  $N$  – текущие напряжения и долговечность до разрушения соответственно;

$N_G$  – абсцисса точки перелома кривой усталости;

$m_C$  и  $C_C$  – параметры, значение которых можно определить с помощью корреляционных зависимостей [2]

$$m_C = f_C(\sigma_R) = a_C \sigma_R + b_C; \quad (3)$$

$$C_C = F_C(\sigma_R) = \alpha_C (m_C + 1) \lg \sigma_R + \beta_C, \quad (4)$$

где  $a_C$ ,  $b_C$ ,  $\alpha_C$  и  $\beta_C$  – эмпирические коэффициенты, которые были приняты равными

$$a_C = 0,027; b_C = 1,4; \alpha_C = 0,997; \beta_C = 4,25.$$

Зависимость (1) справедлива в случае, когда параметр  $\sigma_{d_C}$  одинаков для сравниваемых кривых усталости. Другими словами эти кривые усталости, не зависимо от предела выносливости, должны иметь общую начальную ординату в логарифмической системе координат. Исходные данные в виде формул (2)-(4) позволяют получить зависимость параметра  $\sigma_{d_C}$  от предела выносливости  $\sigma_R$ , и установить тенденцию изменения коэффициента  $k_\gamma$  в рамках всего диапазона реальных значений  $\sigma_R$ .

**Цель и задачи исследования.** Целью статьи является определение диапазона значений пределов выносливости, для которого коэффициент относительной долговечности  $k_\gamma$  стабилен, а также разработка подхода к корректировке данного коэффициента в диапазоне значений  $\sigma_R$ , в котором она необходима.

**Основной материал исследования.** Чтобы установить тенденцию изменения параметра  $\sigma_{dC}$  в зависимости от предела выносливости, запишем выражение для его определения, пользуясь зависимостями (2), (3) и (4)

$$\sigma_{dC} = \left[ 10^{\alpha_C(m_C+1)\lg\sigma_R+\beta_C} \right]^{\frac{1}{a_C\sigma_R+b_C}}. \quad (5)$$

Задавая ряд значений пределов выносливости в реальном диапазоне его изменения (100-500 МПа), определим по формуле (5) величины параметра  $\sigma_{dC}$  (табл. 1). Для наглядности представим результаты расчёта также в виде соответствующего графика (рис. 1).

*Таблица 1*

*Расчётные значения параметров  $m_C, C_C, \sigma_{dC}$*

$\sigma_R$ , МПа	100	200	300	400	500
$m_C$	4,10	6,80	9,50	12,20	14,90
$C_C$	14,29	22,15	29,93	38,25	46,80
$\sigma_{dC}$ , МПа	3287,96	1804,95	1502,77	1429,53	1434,62
$\lg \sigma_{dC}$	3,52	3,26	3,18	3,16	3,16

Из приведенного на рис. 1 графика видно, что величина  $\sigma_{dC}$  сначала круто уменьшается до значения предела выносливости равно примерно 300 МПа, а затем становится практически постоянной. График не даёт информации о том, где реально пересекаются кривые усталости между собой. Тем не менее, смещение точек пересечения, особенно при низких значениях пределов выносливости, оказывает влияние на погрешность оценки коэффициента относительной долговечности по формуле (1).

В связи с этим более информативной будет зависимость  $\lg \sigma_{dC}$  от  $\lg N$ , которая позволяет, кроме того, наблюдать тенденцию смещения точек пересечения кривых усталости друг с другом (рис. 2).

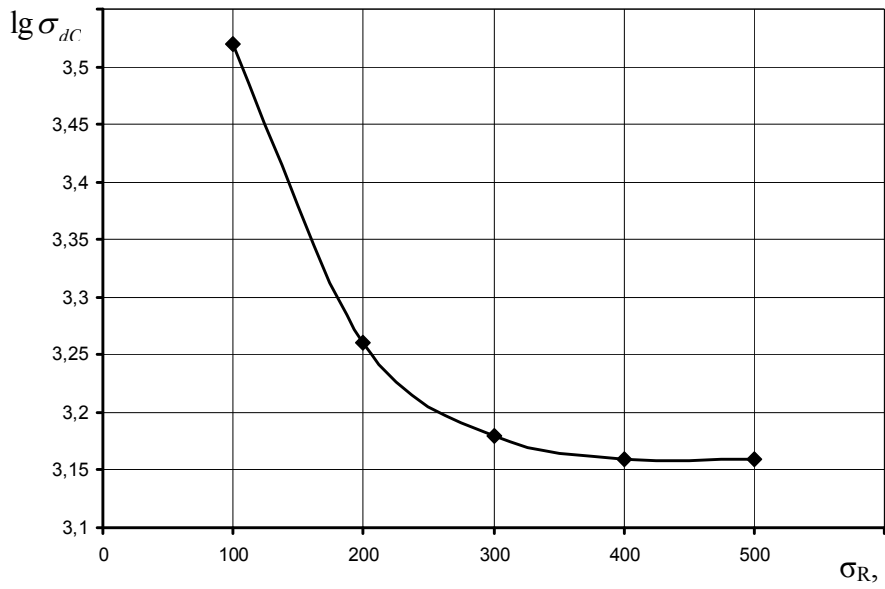


Рис. 1. Зависимость  $\lg \sigma_{dC}$  -  $\sigma_R$

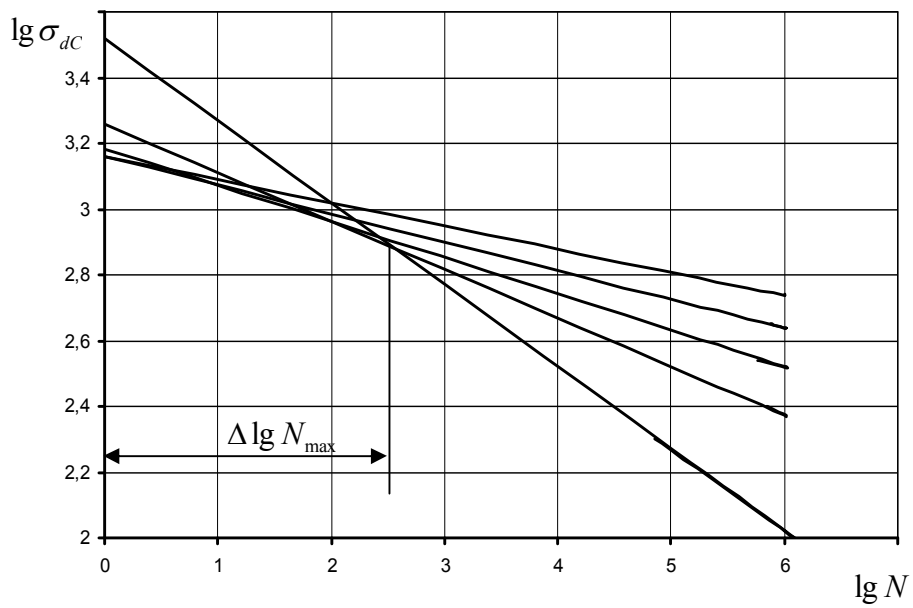


Рис. 2. Семейство наклонных участков кривых усталости  
в координатах  $\lg N$  -  $\lg \sigma$

Приведенный выше график позволяет определить интервал точек пересечения  $\Delta \lg N_{\max}$ . Крайняя левая абсцисса равна нулю, поскольку ордината  $\lg \sigma_{dC}$  для двух значений предела выносливости ( $\sigma_R = 400$  МПа и  $\sigma_R = 500$  МПа), как видно из табл. 1, является общей. Значение крайней правой абсциссы определим, решая систему двух уравнений, составленных для пределов выносливости 100 МПа и 200 МПа с учётом данных табл. 1 и зависимости (2), т.е.

$$\begin{cases} 4,1 \lg \sigma + \lg N = 14,29 \\ 6,8 \lg \sigma + \lg N = 22,15 \end{cases}$$

откуда  $\lg N = 2,35$  ( $N = 224$  цикла).

Несмотря на столь незначительное смещение абсцисс точек пересечения наклонных участков кривых усталости, их начальные ординаты изменяются в достаточно широком диапазоне, который составляет 1866 МПа. Диапазон значений  $\Delta \lg \sigma_{dC}$  формируется, как видно из рисунка 2, путём определённого сочетания кривых усталости. Очевидно, что при сравнении начальных ординат кривых усталости, пределы выносливости которых близки, например, при проведении сравнительных испытаний объектов, их отличие будет тем меньше, чем меньше разница между их пределами выносливости. В этом случае коэффициент относительной долговечности  $k_\gamma$  будет определён с большей точностью, однако некоторая систематическая погрешность сохранится. Свести к минимуму эту погрешность можно за счёт определения смещения абсциссы  $\Delta \lg N$  (рис. 1). В этом случае (1) уравнение запишется в виде

$$k_\gamma = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg N_2 - \Delta \lg N}. \quad (6)$$

Значение  $\Delta \lg N$  можно выразить через параметры  $m_C$  и  $C_C$ , решая систему двух уравнений (2), записанных для двух наклонных участков кривых усталости, пересекающихся в одной точке т.е.

$$\begin{cases} m_{C1} \sigma + \Delta \lg N = C_{C1} \\ m_{C2} \sigma + \Delta \lg N = C_{C2} \end{cases}, \quad (7)$$

откуда

$$\Delta \lg N = \frac{m_{C1} C_{C2} - m_{C2} C_{C1}}{m_{C1} - m_{C2}}. \quad (8)$$

С учётом (8) зависимость (6) перепишем в виде

$$k_{\gamma} = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg N_2 - \frac{m_{C1}C_{C2} - m_{C2}C_{C1}}{m_{C1} - m_{C2}}}. \quad (9)$$

Зависимость (9) предполагает, что параметры наклонных участков  $m_{C1}$ ,  $m_{C2}$ ,  $C_{C1}$  и  $C_{C2}$  известны. Однако в случае сравнительных испытаний они известны только для объектов, с которыми осуществляется сопоставление характеристик сопротивления усталости, т.е. известными являются параметры  $m_{C2}$  и  $C_{C2}$ .

Существует несколько способов определения параметров наклонного участка кривой усталости по результатам испытаний одного объекта [2]. Применительно к решаемой задаче эти параметры можно определить с высокой точностью путём совмещения долговечностей исходной средневероятной кривой усталости и испытанного объекта, перемещая её вдоль оси ординат. При этом параметры для нового положения экспериментальных данных определяем с помощью метода наименьших квадратов. В качестве примера применения предложенного подхода рассмотрим результаты испытаний на сопротивление усталости образцов с концентратором напряжений из стали 45 [3]. В процессе испытаний они вращались и нагружались чистым изгибом (табл.1).

По найденным в результате статистической обработки экспериментальных данных параметрам  $m_C$  и  $C_C$  определим из уравнения (2) логарифм долговечности при напряжении 270 МПа

$$\lg N = C_C - m_C \lg \sigma = 36,674 - 13,038 \cdot 2,431 = 4,979.$$

Будем полагать, что объект, характеристики сопротивления усталости которого необходимо сравнить с исходными, испытан при напряжении  $\sigma = 270$  МПа и его долговечность  $N_1$ , превышает долговечность по кривой усталости в 10 раз, т.е.  $N_1 = 952796$  циклов ( $\lg N_1 = 5,979$ ). В этом случае согласно формуле (1) коэффициент относительной долговечности  $k_{\gamma}$  будет равен

$$k_{\gamma} = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg N_2} = \frac{5,979 - 4,979}{4,979} = 0,201.$$

Сместим кривую усталости вверх на величину напряжения, равного

$$\Delta\sigma = 270 - \left(\frac{10^{C_C}}{N}\right)^{\frac{1}{m_C}} = 270 - \left(\frac{10^{36,674}}{952796}\right)^{\frac{1}{13,038}} = 39 \text{ МПа}.$$

Таблиця 1

*Результаты испытаний образцов из стали 45  
при симметричном круговом изгибе*

Номер п/п	$\sigma$ , МПа	$N$ , Цикл.	$\lg \sigma$	$\lg N$	$\bar{\sigma}_R$ , МПа
Сталь 45, образцы с концентратором напряжений					
Параметры степенного уравнения: $m_C = 13,038$ ; $C_C = 36,674$ .					
1	270	77300	2,431	4,888	204,0
2		87300		4,941	
3		103000		5,012	
4		115900		5,064	
5		146900		5,167	
6	250	197100	2,398	5,295	
7		232900		5,367	
8		262300		5,419	
9		304400		5,483	
10		370300		5,569	
11	230	588700	2,362	5,770	
12		708800		5,851	
13		740700		5,870	
14		835100		5,921	
15		1100500		6,041	
16	210	1237700	2,322	6,093	
17		1240200		6,094	
18		2784800		6,445	
19		2806300		6,448	
20		3931800		6,595	

Определим параметры  $m_C$  и  $C_C$  для смещённой кривой усталости на величину  $\Delta\sigma$  с помощью метода наименьших квадратов по данным, приведенным в табл. 1. В результате получаем:  $m_C = 15,129$ ;  $C_C = 42,648$ . По формуле (8) находим значение  $\Delta \lg N$

$$\Delta \lg N = \frac{m_{C1}C_{C2} - m_{C2}C_{C1}}{m_{C1} - m_{C2}} = \frac{15,129 \cdot 36,674 - 13,038 \cdot 42,648}{15,129 - 13,038} = -0,574.$$

Отрицательное значение  $\Delta \lg N$  указывает на то, что точка пересечения кривых усталости лежит слева от оси ординат, что допустимо, поскольку она не имеет физического смысла и является вспомогательным безразмерным параметром.



Уточнённое значение  $k_\gamma$  согласно формуле (6) будет равно

$$k_\gamma = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg N_2 - \Delta \lg N} = \frac{5,797 - 4,979}{4,979 + 0,574} = 0,147.$$

Полученное таким образом уточнённое значение коэффициента  $k_\gamma$  позволяет проводить сравнительную оценку долговечностей для общего диапазона напряжений сравниваемых объектов.

#### **Выводы**

1. На основе корреляционных зависимостей между параметрами наклонного участка кривой усталости и пределом выносливости определён диапазон его значений, для которого коэффициент относительной долговечности  $k_\gamma$  стабилен (300-500 МПа).

2. Разработан новый подход к корректировке данного коэффициента для диапазона значений  $\sigma_R$ , в котором она необходима (100-300 МПа).

#### **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Олейник Н.В., Коноплев А.В., Кобаков А.Г. О соотношении долговечностей до разрушения при их рассеянии в зависимости от уровня нагрузки при испытаниях на усталость // *Нові технології навчання в навчальних закладах України.* – Одеса: Друк, 2001. – Вип. 7. – С. 41-45.
2. Олейник Н.В. *Высокопроизводительные испытания на усталость и оценка индивидуальных характеристик сопротивления усталости.* – Одесса: Астропринт, 1999. – 182 с.
3. Олейник Н.В., Коноплев А.В., Кобаков А.Г. *Методы ускоренного определения характеристик сопротивления усталости в практических приложениях.* – Одесса: Астропринт, 2000. – 138 с.

*Стаття надійшла до редакції 12.11.2018 р.*

#### **Рецензенти:**

кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри «Технічне обслуговування і ремонт суден» Одеського національного морського університету **Ю.О. Никифоров**

кандидат технічних наук, доцент кафедри «Підйомно-транспортні машини та інжиніринг портового технологічного обладнання» Одеського національного морського університету **О.О. Немчук**