

УДК 620:178.3

А.В. Коноплев, П.И. Греченко, Н.И. Чередарчук, В.О. Сологуб

**ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ КРИВОЙ УСТАЛОСТИ
ПРИ НАПРЯЖЕНИЯХ, БЛИЗКИХ К ПРЕДЕЛУ ВЫНОСЛИВОСТИ**

Рассмотрена проблема построения наклонного участка кривой многоциклового усталости, состоящего из двух частей. Показано, что существующие методы построения нижней части кривой не предусматривают использование экспериментальных данных, а являются экстраполяцией её верхней части с использованием иного уравнения кривой усталости. Предложено нижнюю часть кривой усталости строить с учётом экспериментальных данных, полученных при испытаниях по методу «вверх-вниз». Проведена экспериментальная проверка предложенного подхода на образцах из конструкционной стали.

Ключевые слова: кривая усталости, долговечность до разрушения, предел выносливости.

Розглянута проблема побудови похилої ділянки кривої багатоциклової втоми, що складається з двох частин. Показано, що існуючі методи побудови нижньої частини кривої не передбачають використання експериментальних даних, а є екстраполяцією її верхньої частини з використанням іншого рівняння кривої втоми. Запропоновано нижню частину кривої втоми будувати з урахуванням експериментальних даних, отриманих при випробуваннях за методом «вгору-вниз». Проведена експериментальна перевірка запропонованого підходу на зразках з конструкційної сталі.

Ключові слова: крива втоми, довговічність до руйнування, границя витривалості.

The problem of construction of sloping area of the crooked multisequencing tiredness, two-piece, is considered. It is shown that the existent methods of construction of underbody a curve do not envisage the use of experimental data, and are extrapolation of her overhead part with the use of another equalization of the crooked tiredness. It is suggested to build the underbody of the crooked tiredness taking into account experimental data, got at tests on a method «upwards-downward». The experimental checking offered approach is conducted for standards from construction steel.

Keywords: curve of tiredness, longevity to destruction, limit of endurance.

Введение. Кривые многоциклового усталости традиционной формы представляются в виде ломаной линии, состоящей из наклонного и горизонтального участков.

© Коноплев А.В., Греченко П.И., Чередарчук Н.И., Сологуб В.О., 2017

Точка перелома (пересечения) этих участков определяет переход из области разрушения в область неограниченной долговечности. В действительности этот переход не может быть столь резким, следовательно, участок кривой усталости вблизи предела выносливости не соответствует реальной зависимости долговечности и напряжения.

Из трёх наиболее распространённых моделей кривой усталости (показательного, степенного и Вейбулла) лишь уравнение Вейбулла даёт плавный переход из области разрушения в область неразрушения, поскольку является асимптотическим. При этом следует заметить, что в области малых долговечностей это уравнение хуже соответствует опытным данным, что в итоге приводит к снижению коэффициента корреляции при аппроксимации результатов эксперимента. Один из путей решения данной проблемы предложен в работах [1-2]. В частности, было предложено левую ветвь кривой усталости принимать в виде двухзвенной кривой (рис. 1) [2]. При этом была решена задача по определению точки пересечения A двух частей наклонного участка кривой усталости, т.е. были определены координаты $\lg \sigma_{II}$ и $\lg N_{II}$.

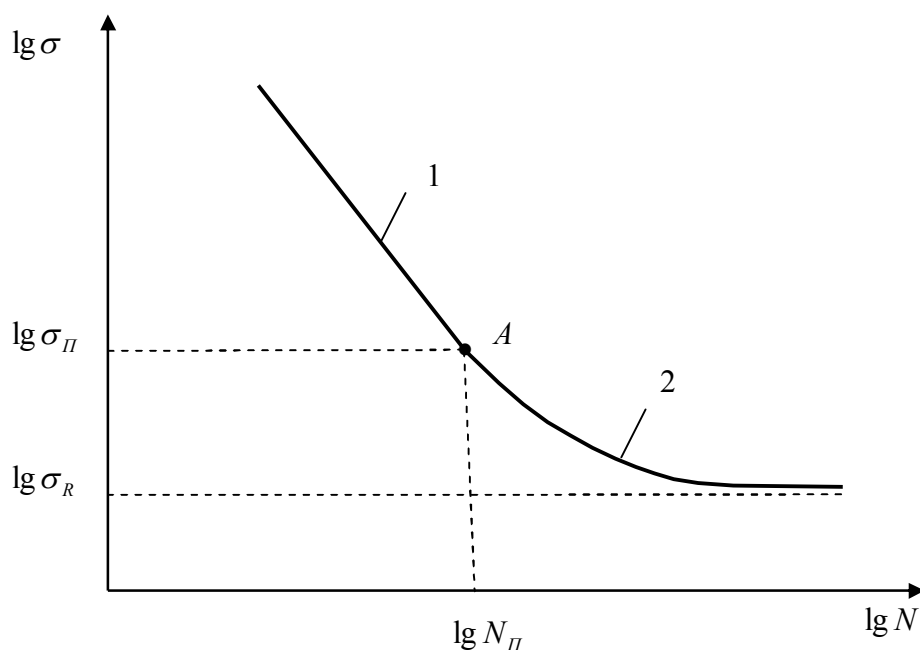


Рис. 1. Схема представления составной кривой усталости в координатах $\lg \sigma - \lg N$

Рассмотренный подход можно отнести к расчётно-экспериментальному методу построения кривой усталости, наклонный участок которой состоит из двух частей: 1 – прямолинейная часть, подчинённая степенному уравнению; 2 – криволинейная, подчинённая уравнению Вейбулла. При этом считается, что полная кривая усталости является индивидуальной, т.е. она построена по результату испытаний одного объекта при стационарной нагрузке.

Недостатком рассмотренного подхода к построению составной кривой усталости является то, что она не может быть построена исключительно по экспериментальным данным, поскольку такие данные при напряжениях, близких к пределу выносливости, определить практически невозможно по той простой причине, что часть испытанных объектов при таких напряжениях просто не разрушится. Кроме того, как было отмечено выше, рассмотренный подход касается построения индивидуальных, а не средневероятных кривых усталости.

Целью статьи является разработка способа экспериментального построения наклонной части средневероятной кривой усталости состоящего из двух участков.

Изложение основного материала. При экспериментальном построении средневероятной кривой многоциклового усталости объектов (образцов, моделей, реальных деталей или конструкций) чаще всего используют метод испытаний на сопротивление усталости с постоянными амплитудами напряжения цикла. Он предполагает проведение испытаний нескольких групп объектов при различных значениях амплитуды напряжения цикла в диапазоне напряжений от предела выносливости до границы малоциклового участка. Как правило, испытывают по 15 и более объектов при четырёх и более уровнях напряжений, при этом самый нижний уровень нагрузки принимают на 15-20 МПа выше ожидаемого предела выносливости. Таким образом, наклонный участок кривой усталости экстраполируют в область больших долговечностей до пересечения его с горизонтальным участком, соответствующем пределу выносливости.

В работе [3] был рассмотрен вопрос о влиянии выбора минимального уровня напряжений на положение наклонного участка кривой усталости. Для уменьшения этого влияния было предложено строить его с учётом экспериментальных данных, полученных при испытании объектов по методу «вверх-вниз», которые, как известно, используются только для оценки средневероятного значения предела выносливости и его распределения. Для построения наклонного участка кривой усталости эти результаты испытаний в виде конкретных долговечностей разрушившихся объектов и соответствующих напряжений использовать некорректно, поскольку это приведёт к искусственному искажению картины распределения долговечностей вблизи предела выносливости (за счёт выбора наименее прочных объектов из общего их количества). Чтобы исключить такой вариант, было предложено провести дополнительные испытания неразрушившихся объектов.

Для рассмотрения сути этого подхода и возможности его использования для построения составного наклонного участка кривой усталости обратимся к методике испытаний объектов по методу «вверх-вниз». Ниже, на рисунке 2 представлена схема испытаний при круговом изгибе 30 гладких образцов из стали 45 согласно этому методу и таблица 1 с результатами их испытаний при трёх уровнях переменных напряжений, превышающих предел выносливости [3].

На схеме чёрные точки соответствуют случаю, когда объект разрушился, а очерченные контуром – случаю, когда объект не разрушился.

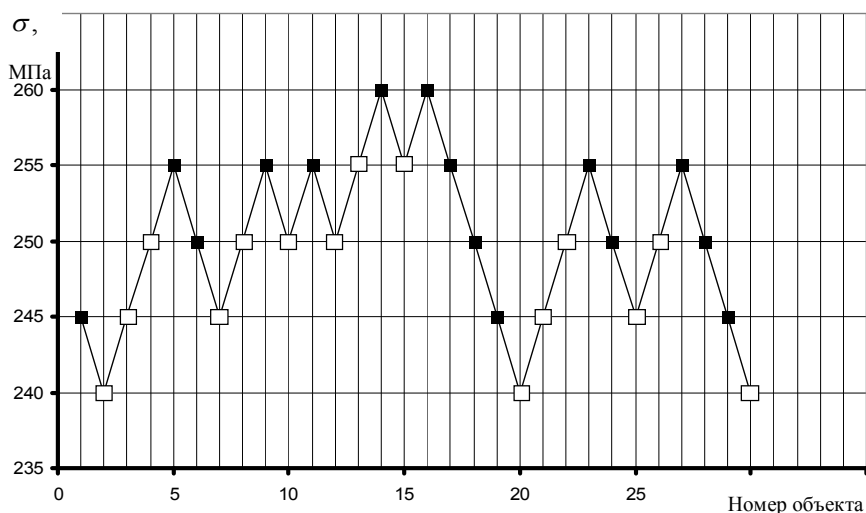


Рис. 2. Схема испытаний по методу «вверх-вниз»

Таблица 1

Номер п/п	σ , МПа	N , Цикл.	$\lg \sigma$	$\lg N$
1	300	72200	2,477	4,859
2	300	86200	2,477	4,936
3	300	98300	2,477	4,993
4	300	113300	2,477	5,054
5	300	199200	2,477	5,299
6	285	206800	2,455	5,316
7	285	206800	2,455	5,316
8	285	299100	2,455	5,476
9	285	308900	2,455	5,490
10	285	394400	2,455	5,596
11	270	336600	2,431	5,527
12	270	362400	2,431	5,559
13	270	547100	2,431	5,738
14	270	602600	2,431	5,780
15	270	703600	2,431	5,847

В результате обработки данных, приведенных в табл. 1, получаем $m_1 = 18,10$; $C = 49,81$. Предел выносливости, определённый с помощью метода «вверх-вниз», оказался равным $\bar{\sigma}_R = 250$ МПа.

Объекты, неразрушившиеся при базовом числе циклов ($N_0 = 10^7$), подвергнем повторным испытаниям при стационарной нагрузке. При этом уровень напряжений каждого объекта будем увеличивать ступенчато относительно первоначально принятого, согласно приведенной схеме до тех пор, пока он не разрушится. Правомерность проведения повторных испытаний теоретически обоснована тем, что накопление усталостных повреждений происходит только при нагрузках, превышающих предел выносливости. Возможным проявлением эффекта тренировки пренебрегаем, поскольку, во-первых, напряжения испытаний незначительно отличаются от предела выносливости, и, во-вторых, база испытаний не велика.

Параметры степенного уравнения, описывающего верхнюю часть наклонного участка кривой усталости, определим при помощи метода наименьших квадратов по данным, приведенным в табл. 1. Для построения нижней её части воспользуемся зависимостью, полученной из условия постоянства коэффициента вариации логарифма долговечности до разрушения [4]

$$\frac{\lg N_i - \lg \bar{N}}{\lg \bar{N}} = \frac{\lg N_{Gi} - \lg \bar{N}_G}{\lg \bar{N}_G}, \quad (1)$$

где N_i – долговечность до разрушения i -ого объекта;

\bar{N} – долговечность до разрушения i -ого объекта по средневероятной кривой усталости;

N_{Gi} – долговечность i -ого объекта на уровне напряжений, соответствующих пределу выносливости;

N_G – абсцисса точки перелома средневероятной кривой усталости.

С помощью зависимости (1) пересчитаем все значения долговечностей N (с учётом дополнительных), полученные при испытаниях по методу «вверх-вниз» и приведенные в работе [3], на уровень предела выносливости. Результаты расчёта представлены в табл. 2.

Полученные результаты дают возможность построить нижнюю часть наклонного участка кривой усталости по двум парам значений $\lg N$ и $\lg \sigma$.

Таблиця 2

Номер образца	σ , МПа	N_i , цикл.	$\lg N_{Gi}$	Номер образца	σ , МПа	N_i , цикл.	$\lg N_{Gi}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	245	4503000	6,492	16	255	1000000	6,149
2	245	3672000	6,406	17	255	1125000	6,201
3	245	2141000	6,177	18	255	1590000	6,355
4	245	2897000	6,305	19	255	1097000	6,190
5	245	1206000	5,934	20	255	2396000	6,538
6	245	2980000	6,317	21	255	1348000	6,282
7	250	1615000	6,208	22	255	2716000	6,593
8	250	1155000	6,063	23	255	1206000	6,232
9	250	1337000	6,126	24	255	1809000	6,413
10	250	1069000	6,029	25	255	1556000	6,346
11	250	1457000	6,163	26	255	866000	6,085
12	250	1215000	6,085	27	260	1834000	6,580
13	250	1848000	6,267	28	260	1004000	6,305
14	250	2109000	6,324	29	260	1020000	6,312
15	255	1420000	6,305	30	260	982000	6,295

Учитывая, что кривая усталости непрерывна, верхние значения $\lg N_1$ и $\lg \sigma_1$ определим из степенного уравнения кривой усталости по параметрам верхней её части, принимая значение напряжения, соответствующее самому нижнему уровню нагрузки, т.е. $\sigma_1=270$ МПа

$$\lg N_1 = C - m \lg \sigma = 49,81 - 18,1 \lg 270 = 5,802. \quad (2)$$

Нижнее значение $\lg \sigma_2$ примем равным логарифму предела выносливости $\lg \sigma_R$, а значение $\lg N_2$ определим как среднее арифметическое значений $\lg N_{Gi}$, приведенных в табл. 2.

$$\lg N_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{Gi}. \quad (3)$$

Таким образом, $\lg N_2 = 6,269$. Параметры нижней части кривой усталости составили $m_2 = 14,15$; $C_2 = 40,20$. Кривая усталости с составным наклонным участком в логарифмической системе координат представлена на рис. 3.

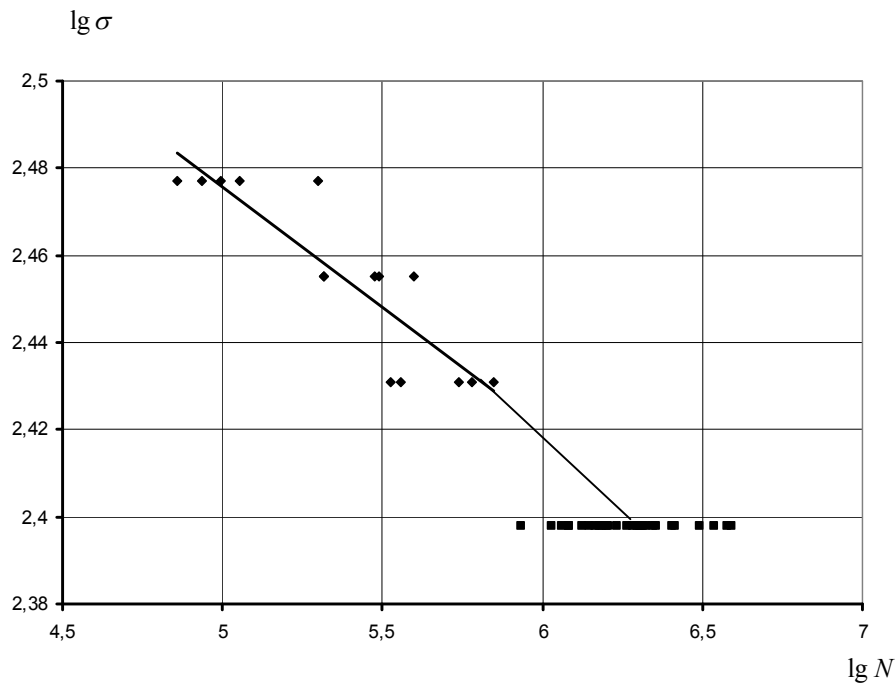


Рис. 3. Кривая усталости с составным наклонным участком в логарифмической системе координат

С целью проведения сравнительного анализа представим кривую усталости с составным наклонным участком в полулогарифмической системе координат. В этом случае оба её участка будут описываться показательным уравнением вида

$$\frac{\sigma}{k} + \lg N = C_{II}, \quad (4)$$

где k и C_{II} – параметры.

В результате расчёта параметры верхней части наклонного участка кривой усталости оказались равными: $k_1 = 36,33$ МПа; $C_{II1} = 13,23$.

По аналогии со степенным уравнением определим параметры k_2 и C_{II2} показательного уравнения. Они соответственно составили 52,63 МПа и 11,02. Кривая усталости с составным наклонным участком в полулогарифмической системе координат представлена на рис. 4.

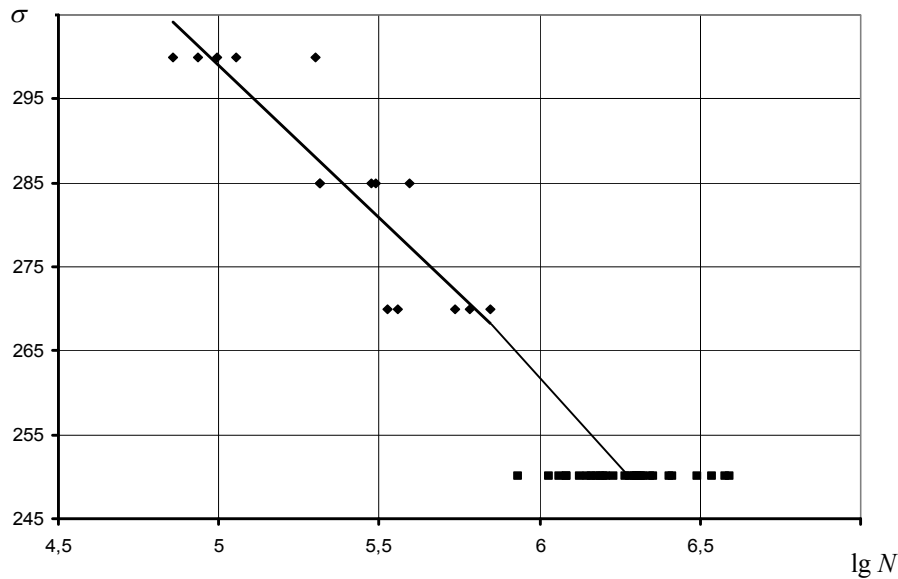


Рис. 4. Кривая усталости с составным наклонным участком в полулогарифмической системе координат

Из рисунков 3 и 4 видно, что положения верхней и нижней частей наклонных участков кривых усталости различны. Во втором случае различие наклонов гораздо меньше, что объясняется логарифмической сеткой координат.

Обращает на себя внимание тот факт, что в сравнении с кривой усталости, изображённой на рис. 1, кривые усталости на рис. 3 и 4 увеличивают свой наклон при переходе к нижней части. Считать это закономерностью пока нет оснований. Однако ясно, что величина относительного наклона зависит, в том числе, и от уравнения кривой усталости.

Выводы

1. Разработан способ построения двухзвенного наклонного участка кривой усталости, основанный на использовании опытной информации, полученной путём доламывания неразрушившихся объектов.

2. Проведена экспериментальная его проверка на образцах, изготовленных из конструкционной стали, подтвердившая возможность строить наклонный участок кривой усталости по результатам эксперимента без экстраполяции кривой усталости в область больших долговечностей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Олійник М.В., Омельченко Ю.М., Немчук О.О. *Конструкційна міцність деталей за результатами випробувань і розрахунків.* – Одеса: Астропринт, 1999. – 150 с.
2. Олейник Н.В. Кобаков А.Г. *Оперативная оценка сопротивления усталости материалов и деталей.* – Одесса: Астропринт, 1998. – 142 с.
3. Коноплєв А.В., Стариков М.А. *О некоторых аспектах построения кривых усталости // Вісник ОНМУ.* – 2006. – № 20. – С. 150-159.
4. Коноплєв А.В. *О двух вариантах расчётного определения долговечности до разрушения // Вісник ОНМУ.* – 2009. – № 28. – С. 88-93.

Стаття надійшла до редакції 17.09.2017

Рецензенти:

кандидат технічних наук, доцент Одеського національного політехнічного університету **С.А. Зелінський**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету **Р.А. Варбанець**