

КРИТЕРИЙ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 45 ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

м.т.н. ¹ Лис И.Н.

¹ Лидский колледж УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Лида

Долговечность образцов, работающих в условиях циклического нагружения при наибольшей амплитуде изгибающих напряжений σ_{\max} , принято оценивать количеством циклов N до предельного состояния. Для этого проводят длительные усталостные испытания. Для ускорения испытаний повышают частоту нагружения. Однако, долговечность образцов, испытанных при разных частотах нагружения f , может отличаться на 1-3 порядка [1]. Значит циклы нагружения при разных частотах оказывают различное повреждающее воздействие. Сопоставление долговечностей при статическом и циклическом нагружениях и вовсе считается сложной задачей.

В данной работе рассматривается новый подход к оценке долговечности с применением критерия предельного состояния при статическом и циклическом нагружении. В качестве критерия предельного состояния предлагается использовать площадь A (размерность МПа·с) под кривой функции напряжений от времени $\sigma(t)$ (рис.1), которая имеет смысл затраченной на повреждение или разрушение механической энергии.

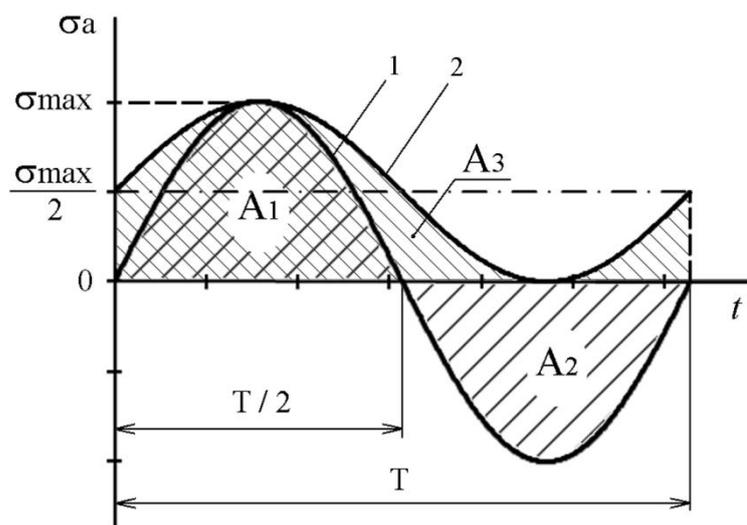


Рис. 1. Формы симметричного 1 и отнулевого 2 циклов нагружения в координатах «напряжение σ – время t »

Предварительный анализ площадей на рисунке 1 позволяет объяснить общеизвестный факт – симметричный цикл нагружения является более опасным, чем, например, отнулевой при одинаковом значении наибольшей амплитуды изгибающих напряжений σ_{\max} . Площадь $(A_1 + A_2)$ на 27% больше, чем площадь A_3 .

Увеличение частоты симметричного цикла в n раз сопровождается уменьшением в n раз площади под кривой напряжения. Известно [1-3], что образцы, испытанные при большей частоте нагружения, имеют больший (в количестве циклов) ресурс.

Площадь полуволны $A_1 = A_2$, МПа·с, (см. рис. 1) для симметричного цикла нагружения с периодом одного цикла $T = 1 / f$ определяли из выражения:

$$A_1 = \int_0^{\frac{1}{2 \cdot f}} \sigma_{max} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt = \frac{\sigma_{max}}{\pi \cdot f}. \quad (1)$$

Тогда площадь за цикл нагружения:

$$A_1 + A_2 = \frac{2 \cdot \sigma_{max}}{\pi \cdot f}. \quad (2)$$

Умножив (2) на число циклов N до разрушения, получим общую площадь:

$$A = \frac{2 \cdot \sigma_{max}}{\pi \cdot f} \cdot N. \quad (3)$$

Наработку (время до разрушения) t , с, определяли по формуле:

$$t = \frac{N}{f}. \quad (4)$$

Таблица 1 – Сведения об образцах из Стали 45

Номер точек на рис. 2	Термообработка	Схема нагружения	Примечание	Источник данных
1	сведения отсутствуют	высокоскоростное растяжение на вертикальном копре	диаметр рабочей части образца 4мм, длина 10мм	[4]
2	закалка 850°C в воду, отпуск при 650°C	растяжение	стандартный образец с диаметром 8мм, длиной 40мм	[3]
3	нормализация 840-860°C, 30мин	симметричное растяжение-сжатие	диаметр рабочей части образца 5мм, длина 15мм	[5]
4	нормализация 840-860°C, 30мин	симметричное растяжение-сжатие	диаметр рабочей части образца 5мм, длина 15мм	[6]
5	сведения отсутствуют	консольный изгиб с вращением	диаметр рабочей части образца 10мм	ЛИИ
6	закалка 850°C в воду, отпуск при 650°C	симметричное растяжение-сжатие	полированные образцы, диаметр рабочей части 7мм, температура охлаждающей воды 8°C	[3]

Исходные данные для расчетов взяты из результатов испытаний в Лаборатории износоусталостных испытаний ЛИИ (ПО «Гомсельмаш») и литературных источников (см. таблицу 1). В таблице представлены образцы Стали 45, испытанные при статическом (при разной скорости) и циклическом (при разной частоте) нагружении.

Результаты расчетов площади A по формуле 3 в зависимости от наработки t по формуле 4 для образцов, испытанных на усталость (№3-6 в таблице 1), в двойных логарифмических координатах показаны на рисунке 2.

Площадь под кривой напряжений при статическом нагружении рассчитывали следующим образом.

Начальная длина стандартного образца с диаметром рабочей части 8мм составляет $l_0 = 40$ мм. Относительное удлинение $\delta = 25,1\%$ [3]. Значит образец удлинился на 10мм. При скорости нагружения 0,01 мм/с этот процесс занял около 1000 с. Время увеличения нагрузки до предела текучести (482 МПа) составило около 10 с, что составляет 1% от времени до разрушения, поэтому этой величиной можно пренебречь. Определили площадь трапеции с первой точкой в начале координат, вторая с координатой (0; 482), третья – (1000; 754) (от предела текучести до предела прочности провели прямую линию), четвертая – (1000; 0). Получили точку 2 на рисунке 2. Точка достаточно далеко отстоит от скопления точек 3-6, что можно связать с недостаточной точностью расчета площади под кривой статического нагружения.

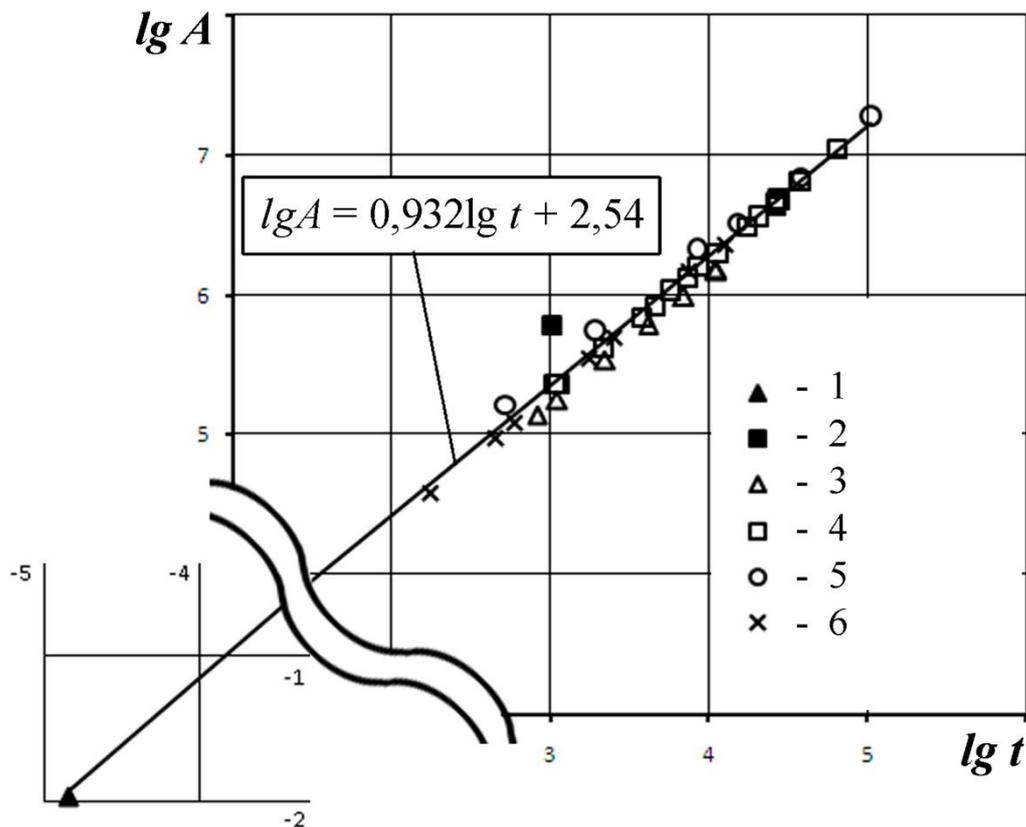


Рис. 2. Нарботка (время до разрушения) t , с, образцов из Стали 45 в зависимости от площади под кривой нагружения A , МПа·с:
статическое нагружение со скоростью: 1 – 300м/с; 2 – 0,01мм/с; циклическое нагружение с частотой: 3 – 36Гц; 4 – 36Гц; 5 – 50Гц; 6 – 20 000Гц

Для образца, растяжение которого происходило на вертикальном копре [4] со скоростью 300 м/с, время до разрушения определяли аналогично ($t = 14,3 \cdot 10^{-6}$ с). Линию изменения нагрузки приняли горизонтальной прямой с ординатой, равной пределу прочности 750 МПа. Получили точку 1 на рисунке 2.

Полученная зависимость (прямая на рисунке 2) в общем виде может быть описана уравнением:

$$\lg A = a \cdot \lg t + b, \quad (5)$$

где $a = 0,932$, $b = 2,54$ – постоянные.

Площадь A может быть определена по формуле:

$$A = \sigma_{\text{ред}} \cdot t, \quad (6)$$

где σ_{cp} – среднее напряжение, МПа.

Подставим (6) в (5) и выразим наработку t до предельного состояния:

$$t = \left[\frac{10^b}{\sigma_{\bar{n}0}} \right]^{1-a}. \quad (7)$$

Уравнение (7) качественно согласуется с положением кинетической теории прочности [7] – чем меньше величина приложенной нагрузки, тем больше времени потребуется до разрушения. Если среднее напряжение σ_{cp} стремится к нулю, то время до разрушения стремится к бесконечности.

Для симметричного цикла нагружения можно найти число циклов N до разрушения, учитывая (3), (4), (6), (7), получим:

$$N = f \cdot \left[\frac{\pi \cdot 10^b}{2 \cdot \sigma_{max}} \right]^{1-a}. \quad (8)$$

Выражая из (8) значение наибольшей амплитуды изгибающих напряжений σ_{max} и подставляя вместо N значение базы испытаний при частоте нагружения f получим значение предела выносливости:

$$\sigma_{-1} = \frac{\pi}{2} \cdot 10^b \cdot \left[\frac{N}{f} \right]^{(a-1)}. \quad (9)$$

Например, для базы испытаний $N = 10^7$ циклов при частоте нагружения $f = 50$ Гц находим предел выносливости $\sigma_{-1} = 237$ МПа (210...275 МПа в условиях экспериментов [5, 6] и результатов ЛИИ ПО «Гомсельмаш»). Для базы испытаний $N = 10^9$ циклов при частоте нагружения $f = 20\,000$ Гц – $\sigma_{-1} = 261$ МПа (285 МПа в условиях эксперимента [3]). Расчетные значения по формуле (9) получаются в запас прочности.

Наличие зависимости (5) для анализируемых данных дает право предположить, что специально поставленный эксперимент на статическое растяжение с измерением напряжения и времени до разрушения, позволит получить сведения о пределе выносливости материала без проведения длительных усталостных испытаний. Необходимо получить как минимум три точки на графике (как на рис.2) при разных скоростях нагружения, предположительно отличающихся друг от друга на порядок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Троценко, В.Т. *Сопротивление усталости металлов и сплавов : справочник : в 2 ч. / В.Т. Троценко, Л.А. Сосновский ; АН УССР, Ин-т пробл. прочности. – Киев : Наук. думка. – Ч. 1. – 1987. – 503 с.*
2. Фридман, Я.Б. *Механические свойства металлов : в 2 ч. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1974. – Ч. 2 : Механические испытания : Конструкционная прочность. – 367 с.*
3. Афонин, А.И. *К вопросу о влиянии частоты нагружения на усталостную прочность металлов / А.И. Афонин, В.А. Кузьменко, А.Д. Шевчук // Проблемы прочности. – 1972. – № 4. – С. 62–74.*
4. Степанов, Г.В. *Упруго-пластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок / Г.В. Степанов. – Киев : Наук.думка, 1979. – 268 с.*
5. Троценко, В.Т. *Закономерности накопления усталостного повреждения в сталях 45 и IX13 в условиях программного изменения нагрузки / В.Т. Троценко, Ю.И. Коваль // Проблемы прочности. – 1973. – № 12. – С. 9–15.*
6. Троценко, В.Т. *Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В.Т. Троценко. – Киев : Наук. думка, 1981. – 343 с.*
7. Регель, В.Р. *Кинетическая природа прочности твердых тел : монография / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М. : Наука, 1974. – 560 с.*