

АНАЛІТИЧНИЙ ОПИС КРИВОЇ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

У статті викладено результати досліджень з метою математичного опису кривої циклічного навантаження вуглецевої сталі.

В статье представлены результаты исследований с целью математического описания кривой циклического нагружения углеродистой стали.

In the article the research results of mathematical description of curve of cyclic loading of carbon steel are presented.

Використання аналітичних залежностей, які дають змогу прогнозувати характер поведінки металу під час циклічного навантаження, обумовлює необхідність розробки методичного забезпечення стосовно визначення параметрів рівнянь. Як показано в [1], використання кореляційних співвідношень, які засновані на пошуку зв'язків між характеристиками циклічного та статичного навантажень має, у більшості випадків, достатньо обмежене використання. Обумовлене це суттєвими розбіжностями між характером розвитку процесів структурних перетворень в металах та сплавах під час циклічного навантаження та за умови односпрямованого статичного деформування. Підтверджують наведене положення результати структурних досліджень як в процесі самого навантаження, так і під час фрактографічного аналізу поверхонь руйнування, після статичного та циклічного деформування.

Якісно інший підхід спостерігається, коли застосовують аналітичні співвідношення, які дозволяють прогнозувати хід кривих циклічного навантаження. В цьому випадку особливого значення набувають питання щодо визначення параметрів, які входять до співвідношень та які, в свою чергу, можуть бути зв'язані з процесами структурних перетворень при навантаженні металу [2].

З урахуванням зовнішнього вигляду кривої циклічного навантаження та з метою її опису найбільшого розповсюдження набули рівняння у вигляді ступеневих функцій [3] типу:

$$\sigma = KN^{-n}, \quad (1)$$

де K – постійна величина, n – показник ступеня, σ – амплітуда та N – кількість циклів навантаження. Аналіз співвідношення (1) показує, що величина K може представляти собою зна-

чення амплітуди навантаження, коли $N=1$. За цими умовами характер поведінки металу повинен наближуватися до такого, що спостерігається при статичному навантаженні. З іншого боку, розглядаючи як можливий випадок, коли $n \rightarrow 0$, K може представляти амплітуду при необмеженому втомленні. Але з урахуванням вигляду співвідношення (1), досягнення умов коли n буде дорівнювати нулю, скоріш за все не укладається у межі практичного використання рівняння.

Метою роботи явилася оцінка можливості застосування співвідношення (1) для аналізу кривих циклічного навантаження.

Матеріалом для дослідження була обрана вуглецева сталь з кількістю вуглецю 0,45 %, яка використовується для виготовлення залізничних осей колісних пар. Виготовлені зразки піддавали циклічному навантаженню за схемою «згин з обертанням» [3].

На рис.1 наведений вигляд експериментальної кривої циклічного навантаження вуглецевої сталі з 0,45 % С після гарячої прокатки. Представляючи окремі ділянки кривої у вигляді прямих відрізків, можна з визначеною точністю визначити положення границі, яка відділяє область багато циклового втомлення від малоциклового: місце перетину прямих (рис. 1).

Для знаходження параметрів рівняння (1), проведемо логарифмування, після чого отримаємо:

$$\log \sigma = \log K - n \log N. \quad (2)$$

Однак, з урахуванням того, що рівняння (1) в значній ступені подібне співвідношенню, яке використовується для опису кривої статичного односпрямованого навантаження: $\sigma = K\varepsilon^n$, де σ , ε – істинні напруження і деформація відповідно, K – коефіцієнт, n – показник ступеня [1],

вважається доцільним представити (1) у вигляді:

$$\sigma = K \left(\frac{1}{N} \right)^n \quad (3)$$

Такий підхід дозволить у подальшому проводити порівняльну оцінку абсолютних значень подібних характеристик кривих статичного і циклічного навантаження, хоча умови деформування суттєво відрізняються.

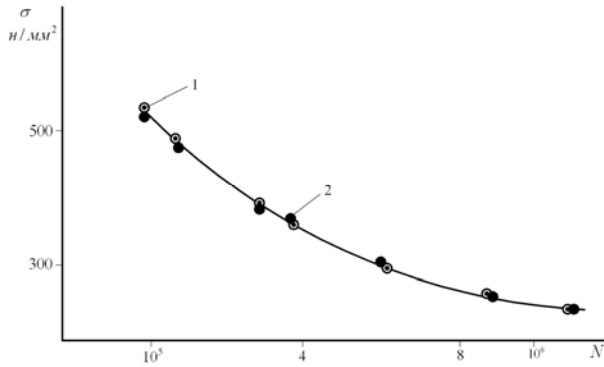


Рис. 1. Криві циклічного навантаження вуглецевої сталі з 0.45 % С, експериментальна (1), розрахована (2) за рівнянням (3)

Так, після логарифмування співвідношення (3) отримаємо:

$$\log \sigma = \log K + n \log \left(\frac{1}{N} \right) \quad (4)$$

Результат будови кривої циклічного навантаження досліджуваної сталі в координатах $\log \sigma - \log \left(\frac{1}{N} \right)$ наведений на рис. 2. Існування двох ділянок на кривій указує на якісно різну поведінку металу при навантаженні. Так, при амплітудах від 500 до 300 Н/мм² поведінка металу відповідає малоциклового втомленню, для якого характерною ознакою є механізм зародження тріщин по границях виникаючих фрагментів в середині зерен структурно вільного фериту. Для ділянки більш низьких амплітуд (менше 300 Н/мм²) спостерігається значно повільніше накопичення дефектів кристалічної будови, що приводить до закономірної зміни механізму зародження тріщини. В цьому випадку в місцях концентрованого зсуву формуються порожнини, які після коалесценції перетворюються у мікротріщини.

Визначення величин K і n проводили для двох ділянок кривої навантаження (рис. 2). Так, величину K визначали екстраполяцією ділянки мало- та багатоциклового втомлення до пере-

тину з ординатою, коли $\log \left(\frac{1}{N} \right) = 0$. Отримані величини K склали значення: для багатоциклової ділянки (K_1) 5623 Н/мм², для малоциклової – (K_2) 251 Н/мм². Показник ступеня визначали як тангенс кута нахилу для відповідної ділянки (рис. 2) за співвідношенням:

$$\operatorname{tg} \alpha = n = \frac{\Delta \log \sigma}{\Delta \log \left(\frac{1}{N} \right)} \quad (5)$$

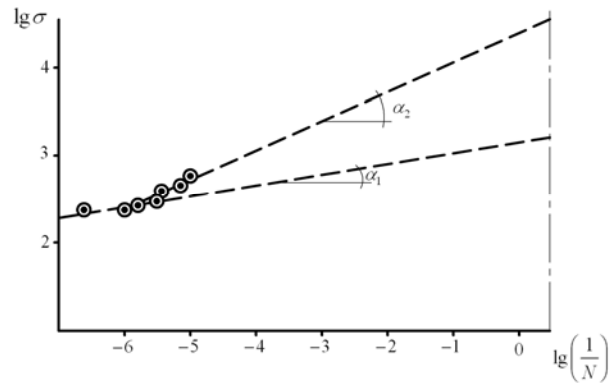


Рис. 2. Експериментальна крива циклічного навантаження в логарифмічних координатах

Після визначення пар характеристик (K_1), n_1 та (K_2), n_2 була проведена перевірка можливості використання співвідношення (1) з конкретними значеннями K і n для опису кривої циклічного навантаження. Для ділянки малоциклового втомлення за умови $10^5 < N < 3,3 \cdot 10^5$ співвідношення (1) приймає вигляд $\sigma = 5623 \cdot N^{-0,4}$, для багатоциклового: $\sigma = 251 \cdot N^{-0,16}$. Підставляючи випадкові значення кількості циклів в наведені співвідношення, були розраховані відповідні значення амплітуди σ . Вигляд експериментальної і розрахованої кривих циклічного навантаження наведені на рис. 1. Враховуючи існування немонотонностей на експериментальній кривій циклічного навантаження, які можуть бути усунені інтерполяцією, для деяких точок спостерігали відхилення до 8 % від абсолютних величин σ . Але, в середньому відхилення знаходились на рівні 5 %, при мінімальних 2 %. В першому наближенні можна вважати, що використання наведеної методики оцінки величин K і n може бути корисним для прогнозування поведінки металу при більш значному числі циклів. Так, після підстановки $N = 8 \cdot 10^6$, яка була базою при натурному випробуванні залізничної осі,

розрахункове значення амплітуди навантаження, за співвідношенням $\sigma = 251 \cdot N^{-0,16}$, склало значення 197 Н/мм^2 . В той час як величина амплітуди в момент руйнування вісі після $8 \cdot 10^6$ циклів дорівнювала 195 Н/мм^2 . Порівняльний аналіз показує достатньо високий збіг експериментальних і розрахованих значень при оцінці витривалості металу на визначеній базі.

Таким чином, можна вважати, що використання залежності (1) дозволяє, з визначеною точністю за експериментальними даними для малоциклового втомлення, робити оціночний прогноз поведінки металу в області малих амплітуд навантаження.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Одинг, И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов

[Текст] / И. А. Одинг. – М.: Машгиз, 1962. – 260 с.

2. Медведев, С. Ф. Циклическая прочность металлов [Текст] / С. Ф. Медведев. – М.: Машгиз, 1961. – 303 с.
3. Вакуленко, І. О. Дослідження етапів зародження та зростання тріщин при натурному випробуванні на втомленість [Текст] / І. О. Вакуленко, М. А. Грищенко, О. М. Перков. – Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 21. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 266-268.
4. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали [Текст] / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Д.: Маковецкий, 2008. – 196 с.

Надійшла до редколегії 04.03.2009.