

АНАЛІЗ ДІАГРАМ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглянуто питання оцінки характеру зміни співвідношення між амплітудою та кількістю циклів навантаження до руйнування зразків з вуглецевої сталі.

Рассмотрены вопросы оценки характера изменения соотношения между амплитудой и числом циклов нагружения до разрушения образцов углеродистой стали.

The questions of estimation of change character of relationship between amplitude and number of loading cycles up to fracture of specimens of carbon steel are considered.

Аналіз характеру поведінки металів під час циклічного навантаження вказує на визначену залежність не тільки від параметрів самого навантаження, а і від особливостей їх внутрішньої будови. Накопичення експериментальних даних по впливу окремих факторів на циклічну міцність металевих матеріалів вимагає розробки аналітичних методів оцінки опору зародженню осередків руйнування.

До одного із напрямків вирішення наведеного питання необхідно віднести використання емпіричних залежностей, заснованих на існуванні співвідношень між міцнісними характеристиками при статичних, односпрямованих і циклічних навантаженнях [1]. Найбільш відомі залежності мають вигляд:

$$\sigma_{-1} \sim A \cdot \sigma_b, \quad (1)$$

де σ_{-1} – межа втомлення; σ_b – межа тимчасового опору руйнуванню; A – коефіцієнт пропорційності.

Використання кореляційних співвідношень типу (1) має достатньо обмежений характер і може бути застосоване тільки для оціночних розрахунків при поточному виробництві, при незмінних хімічному складі, структурному стані та ін. Окрім цього, хибність такого підходу обумовлена ще і значними розбіжностями по характеру розвитку процесів структурних змін під час навантаження при втомленні та статичному деформуванні. Таким чином, виникає необхідність виведення більш універсальних співвідношень, які б дозволяли досліджувати характер поведінки металів і сплавів з урахуванням визначених умов навантаження.

Величина межі втомлення, як показано в дослідженнях [2 – 4], залежить від великої кількості чинників, які мають визначений характер впливу. Причому, саме вплив має свій відбиток

на характері зміни реакції досліджуваного металу в процесі навантаження.

Розглядаючи діаграму циклічного навантаження як інтегрально залежну від різноманітних впливів, вивід аналітичного співвідношення, яке дозволить прогнозувати хід кривої, особливості її будови може розглядатися як достатньо перспективний напрямок дослідження процесів втомлення. Щодо вигляду самого співвідношення, то, у першому наближенні, характер залежності кількості циклів навантаження до руйнування зразка (N) від амплітуди навантаження (σ), наведений на рис. 1, може бути описаний рівнянням типу [5]:

$$\sigma = K \cdot N^{-n}, \quad (2)$$

де K – постійна величина; n – показник ступеня.

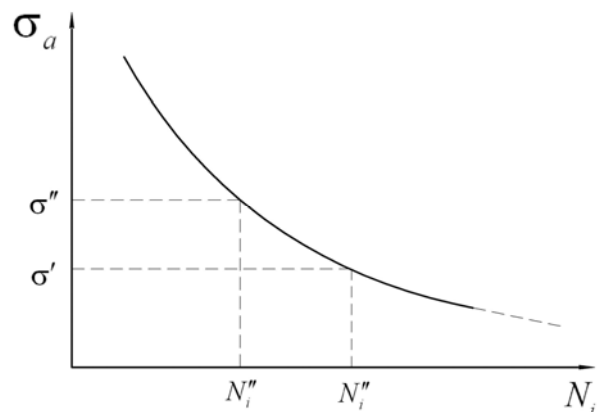


Рис. 1. Крива втомлення з обмеженою витривалістю ($\sigma'' > \sigma'$, $N_i'' > N_i'$)

Враховуючи, що наведена діаграма відноситься до діаграм втомлення з обмеженою витривалістю, зменшення амплітуди навантаження супроводжується закономірним зростанням кількості циклів, які витримує метал до руйну-

вання. Розглядаючи можливі межі зміни параметрів рівняння (2), визначимо, що, наприклад, показник ступеня (n) змінюється в інтервалі $0 < n < n'$, де n' – деяке значення, яке залежить від досліджуваного впливу. За $n \rightarrow 0$, $\sigma \rightarrow K$ аналогічні умови можуть бути досягнуті й при $N=1$. На підставі цього можна бути впевненим, що величина K представляє собою напруження циклу, коли після першого навантаження виникають осередки з субмікротріщинами, спроможними до прискореного росту.

Асимптотичне наближення кривої до осі абсцис являє собою ознаку, яка вказує на можливість використання рівняння (2) для аналізу кривих втомлення наведеного типу. З іншого боку, пошук можливих зв'язків характеристик, які входять до рівняння (2), з параметрами внутрішньої будови металу, особливостями навантаження дозволить більш детально їх аналізувати. Однією з таких характеристик може бути відношення, яке засноване на впливі темпу зниження амплітуди до збільшення швидкості зростання циклів навантаження, які витримує метал до руйнування. З цією метою, проведення диференціювання співвідношення (2) приведе до наступного:

$$d\sigma = -n \cdot K \cdot N^{-(n+1)} \cdot dN, \quad (3)$$

$$\frac{d\sigma}{dN} = -n \cdot K \cdot N^{-(n+1)}. \quad (3a)$$

Після перетворень, залежність (3a) приймає вигляд:

$$\frac{d\sigma}{dN} = \frac{-n \cdot K \cdot N^{-n}}{N}. \quad (4)$$

Враховуючи, що $\sigma = K \cdot N^{-n}$, після підстановки (2) в (4) остаточно отримаємо:

$$\frac{d\sigma}{dN} = -\frac{n \cdot \sigma}{N}. \quad (5)$$

Аналіз наведеного співвідношення (5) показує, що величина $\frac{d\sigma}{dN}$, являючи собою тангенс кута нахилу дотичної в точці на кривій втомлення з визначеними координатами, в значній ступені залежить від показника ступеня n . Враховуючи, що розвиток процесів структурних перетворень, під час циклічного навантаження, відбувається послідовно і у відповідності з умовами навантаження, представляє неабиякий інтерес оцінити інтервал можливого використання співвідношення (2). Для цієї мети розглянемо умови навантаження, яким відпові-

дають структурні перетворення в металі, коли релаксаційні процеси спроможні компенсувати збільшення щільності дефектів кристалічної будови при циклічному деформуванні. За такими умовами $N \rightarrow \infty$, а величина $\sigma \rightarrow 0$. Підставляючи наведені значення ($N \rightarrow \infty, \sigma \rightarrow 0$) в співвідношення (5) отримаємо:

$$\frac{d\sigma}{dN} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{-n \cdot 0}{\infty}. \quad (6)$$

Для визначення значення $\frac{d\sigma}{dN}$ за цими умовами скористуємося правилом Лопіталя [6]:

$$\frac{d\sigma}{dN} = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \sigma \rightarrow 0}} -\frac{n \cdot (\sigma)'}{(N)'} = -n. \quad (7)$$

Таким чином, можна вважати, що мінімально значення величини $\frac{d\sigma}{dN}$, що спостерігаються, повинні дорівнювати за абсолютною величиною показнику ступеня n . Можливість використання співвідношення (2) для аналізу поведінки металу при циклічному навантаженні, було перевірено на прикладі кривої Велера при навантаженнях за схемою згин з обертанням. Матеріал для дослідження – вуглецева сталь з кількістю вуглецю 0,45 %. На рис. 2 наведений вигляд діаграми циклічного навантаження.

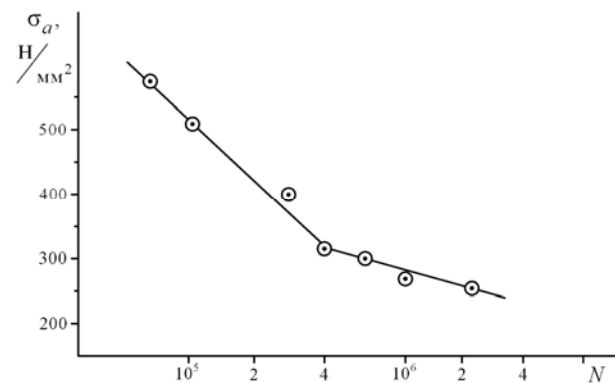


Рис. 2. Крива циклічного навантаження сталі 45 за схемою згин з обертанням

Визначення параметрів рівняння (2) проведемо після логарифмування попередньо переписаного співвідношення $\sigma = K \cdot \left(\frac{1}{N}\right)^n$:

$$\lg \sigma = \lg K + n \lg \left(\frac{1}{N}\right). \quad (8)$$

Вигляд кривої Велера, побудованої в логарифмічних координатах $\lg \sigma - \lg \left(\frac{1}{N} \right)$, наведений на рис. 3.

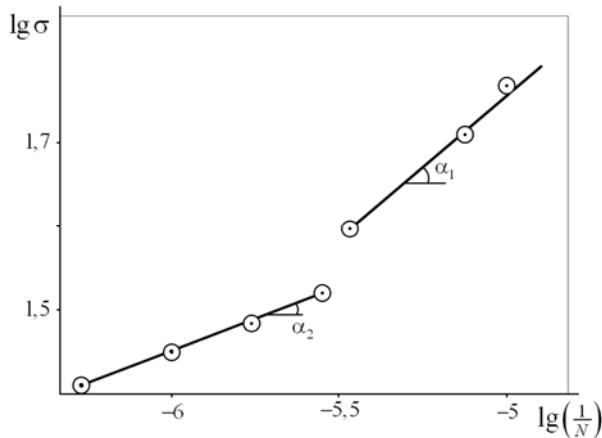


Рис. 3. Крива циклічного навантаження сталі 45 в логарифмічних координатах

Із аналізу логарифмічної кривої визначаємо показник ступеня n , який являє собою тангенс кута нахилу досліджуваної ділянки:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \lg \sigma}{\Delta \lg \left(\frac{1}{N} \right)}. \quad (9)$$

Враховуючи, що досліджувана крива циклічного навантаження складається тільки з двох частин (відсутня третя частина, яка обумовлена необмеженою витривалістю), показник ступеня має відповідні два значення. Для області малоциклового втомлення (I) $n_1 = 0,375$, для багатоциклового $n_2 = 0,16$. На підставі існування двох ділянок з різними значеннями показника ступеня можна вважати, що зміна n обумовлена, в першу чергу, зміною механізму формування мікротріщини під час циклічного навантаження. Так, дійсно, якщо основним механізмом зародження мікротріщини в області I є формування фрагментів, на які підрозділяється зерно фериту, а потім по межах фрагментів зростає тріщина втоми, то для області II меха-

нізм інший [1]. В цьому випадку більш повільніший темп накопичення дефектів кристалічної будови, разом з розвитком релаксаційних процесів, приводить до стрибкоподібної зміни величини n . Крім цього, будова діаграми втомлення в логарифмічних координатах дозволяє визначити існування точки розриву (значення (-5,5) по шкалі абсцис), чого неможливо було спостерігати на кривій в звичайних координатах (рис. 2).

Таким чином, наведений аналіз кривих циклічного навантаження є достатньо перспективним в напрямку визначення характеру структурних змін у сталевих виробках, які мають різний структурний стан після різноманітних термічних та термомеханічних зміцнюючих обробок.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Трошенко, В. Т. Усталость и неупругость металлов [Текст] / В. Т. Трошенко. – К.: Наук. думка, 1971. – 267 с.
2. Вакуленко, И. А. Влияние морфологии и дисперсности цементита на усталостную прочность углеродистых сталей [Текст] / И. А. Вакуленко, О. Н. Перков // *Металлы (РАН)*. – 2008. – № 3. – С. 52-55.
3. Вакуленко, И. А. О механизме влияния размера зерна феррита на усталостную прочность углеродистой стали [Текст] / И. А. Вакуленко, О. Н. Перков, В. Г. Раздобреев // *Металлы (РАН)*. – 2008. – № 3. – С. 56-59.
4. Вакуленко, И. О. Анализ структурных змін в металлі залізничних коліс при їх експлуатації [Текст] / И. О. Вакуленко, М. А. Грищенко // *Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. – 2008. – Вип. 22. – Д.: Видво ДНУЗТ, 2008. – С. 168-171.
5. Медведев, С. Ф. Циклическая прочность металлов [Текст] / С. Ф. Медведев. – М.: Машгиз, 1961. – 303 с.
6. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике [Текст] / М. Я. Выгодский. – М.: Наука, 1975. – 871 с.

Надійшла до редколегії 02.02.2009.