

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Ю. И. ШАГАЕВ, М. Г. СТАКЯН, Н. С. ИСАХАНИАН

ИЗМЕРЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ В ПРОЦЕССЕ
УСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

При анализе усталостных повреждений конструкционных сталей одной из основных задач является определение уровня нагружения разрушенной детали. Имеющиеся рекомендации [1] позволяют оценивать действующую на деталь нагрузку по площади зоны долома или моменту сопротивления сечения с трещиной. Для анализа эксплуатационных разрушений можно применить также метод электронной фрактографии, однако он сложен и требует дальнейшего совершенствования [2].

Для оценки напряженно-деформированного состояния материалов, благодаря своей надежности и доступности большое распространение получил метод измерения микротвердости. Это объясняется тем, что микротвердость хорошо отражает все стадии процесса усталостного разрушения и вместе с тем является тонким и надежным методом физико-механического анализа, позволяющим установить связь микротвердости с другими механическими характеристиками материалов. Для изломов деталей из высокопрочных и закаленных до высокой твердости сталей, где характерные зоны развития усталостных трещин в меньшей степени проявляются или визуально не обнаруживаются, метод измерения микротвердости остается основным для изучения причин усталостного разрушения. Была предпринята также попытка применения этого метода к количественному определению напряжений при изломе [3]. Выявлен характер изменения микротвердости при напряжениях, ниже или равных пределу выносливости жаропрочных сплавов при температурах (770—970) К [4].

Целью настоящей работы является выяснение характера изменения микротвердости и физико-механических свойств материала в зависимости от уровня циклических перенапряжений в процессе избирательного развития усталостных трещин и после окончательного разрушения материала.

Испытывались образцы из стали 36Г2С ($\sigma_{-1} = 300 \text{ Н/мм}^2$) на усталостной машине МУН-6000 при пяти уровнях перенапряжений. Замер микротвердости осуществлялся через $N = 2 \cdot 10^4$ циклов и повторялся, примерно, 15 раз до окончательного разрушения. Измерения микро-

твёрдости проводились на приборе ПМТ-3 при нагрузке на микроиндентор 1 Н. согласно ГОСТ 9450—76. Распределение микротвёрдости $H_{\text{мк}}$ изучалось в 30 точках вдоль оси образца по шести образующим периметра в зоне минимального диаметра образца, в пределах полированного пояса, приготовленного как металлографический шлиф.

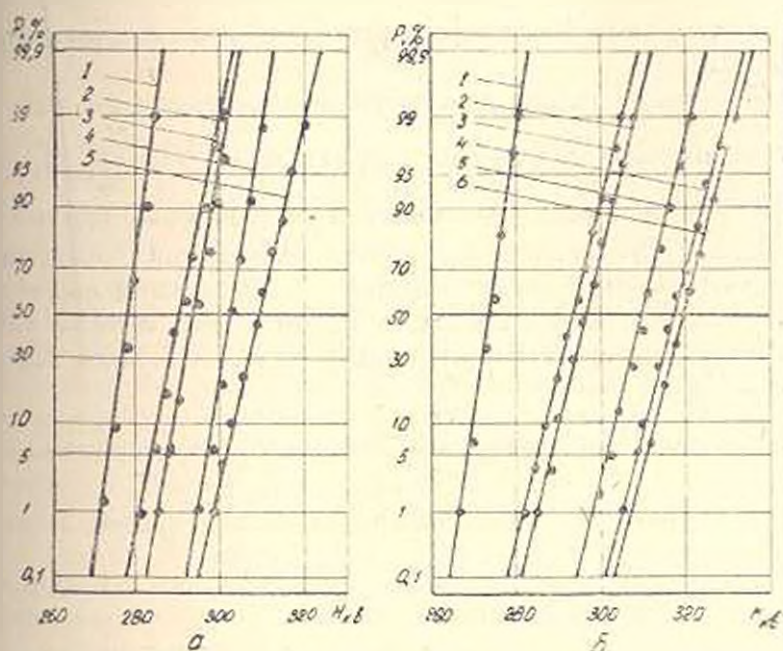


Рис. 1 Изменение среднего значения микротвёрдости в зависимости от циклической долговечности: а) при $\sigma = 340 \text{ Н.мм}^2$: 1 — $N_p = 0$; 2 — $N_p = 3,5 \cdot 10^3$; 3 — $N_p = 4,4 \cdot 10^3$; 4 — $N_p = 8,1 \cdot 10^3$; 5 — $N_p = N_p = 9,6 \cdot 10^3$; б) при $\sigma = 400 \text{ Н.мм}^2$: 1 — $N_p = 0$; 2 — $N_p = 1,1 \cdot 10^3$; 3 — $N_p = 1,5 \cdot 10^3$; 4 — $N_p = 3 \cdot 10^3$; 5 — $N_p = 4 \cdot 10^3$; 6 — $N_p = N_p = 4,5 \cdot 10^3$.

Для уменьшения разброса данных измерений и повышения достоверности полученных результатов после каждой стадии циклического нагружения измерения проводились на слегка протравленных образцах. Это позволило производить замеры на идентичных или равноценных зернах феррита в процессе усталостного разрушения и получить достоверные медианные значения $\bar{H}_{\text{мк}}$. Замеры микротвёрдостей проводились на пяти уровнях перенапряжений $\sigma = 320, 240, 360, 380$ и $4^{\text{мк}} \text{ Н.мм}^2$. Для сравнительного анализа на рис. 1 представлены измерения (медианные значения $\bar{H}_{\text{мк}}$) при низком и высоком ($\frac{\sigma}{\sigma_p} = 1,06$ и $1,33$) уровнях перенапряжения в зависимости от относительной накопленной циклической долговечности $\frac{N_i}{N_p}$.

Измерения показывают, что независимо от $\frac{\sigma_c}{\sigma_{-1}}$ и $\frac{N_i}{N_p}$ распределение микротвердости подчиняется нормальному закону и тем самым подтверждаются ранее полученные результаты [5]. Взаимное расположение эмпирических функций распределения $H_{\kappa, i}$ свидетельствуют о постоянстве дисперсий микротвердостей для рассмотренных случаев измерений.

Проследим за ходом изменения микротвердости по мере накопления циклической долговечности в интервале $0 \leq \frac{N_i}{N_p} \leq 1$. В начальной стадии увеличение значений $H_{\kappa, i}$ вызвано упрочняющими процессами, протекающими в наиболее напряженных поверхностных слоях из-за микропластических сдвигов в неблагоприятно ориентированных зернах поликристаллического твердого тела, которым являются углеродистые конструкционные стали, а также из-за несовершенства в кристаллической решетке.

При достижении уровня $\frac{N_i}{N_p} = 0,1-0,15$ рост микротвердости замедляется и при дальнейшем увеличении $\frac{N_i}{N_p}$ иступает в силу процесс разупрочнения деформированных микрообъемов металла, распространяющийся на всю большую глубину, в связи с чем значения $H_{\kappa, i}$ несколько падают. На основании данных, полученных методом рентгеноструктурного анализа, а также другими физическими методами контроля усталостной повреждаемости, можно сделать вывод о том, что первое уменьшение значений $H_{\kappa, i}$ связано с возникновением на поверхности шлифа неустойчиваемого образца первых линий микросдвигов.

Очередное увеличение микротвердости предшествует нарушению сплошности материала и появлению первых субмикроскопических трещин, а затем — началу развития трещин критических размеров, приводящих к окончательному разрушению образца.

Несмотря на волнообразное изменение $H_{\kappa, i}$, их медианные значения в зависимости от $\frac{N_i}{N_p}$ имеют тенденцию роста. Этот эффект в значительной степени проявляется при высоких переапряжениях и, по-видимому, отражает также воздействие сопутствующих вспомогательных процессов — контактного смятия берегов трещины, приводящего к монотонному росту микротвердости в период избирательного развития трещин и особенно в последней стадии разрушения, когда амплитуда раскрытия трещин на поверхностных слоях становится значительной.

Волнообразное изменение микротвердости от циклической долговечности косвенным путем отражает последовательные стадии накопления циклических повреждений, приводящих к изменению физико-меха-

нических свойства напряженных микрообъемов металла, а затем — возникновению и скачкообразному развитию в них усталостных микротрещин. Это изменение $H_{\text{кн}}$ хорошо согласуется с ранее проведенными аналогичными исследованиями [4, 6], но в отличие от них в проведен-

ной работе, благодаря уменьшению шага $\frac{N_i}{N_p}$, увеличению объема измерений и системному подходу, полнее выявлен весь спектр изменения $H_{\text{кн}}$, что позволяет разработать критерии для прогнозирования процесса возникновения и развития усталостных повреждений в деталях. Для этого возникает необходимость экспериментальной проверки и уточнения корреляции $H_{\text{кн}}$ от рассмотренных процессов и другими физическими методами. Наиболее доступным и эффективным для этой цели является метод вихревых токов, т. к. потери на вихревые токи тесно связаны с изменением магнитной проницаемости и удельной электропроводности в металле. Изменение этих параметров в поверхностных слоях или нарушение сплошности в металле вызывает уменьшение потерь на вихревые токи, вследствие чего амплитуда сигнала перед началом разрушения значительно возрастает.

Зоны с накопленными усталостными повреждениями определялись применением специально разработанных высокочувствительных преобразователей, работающих на частоте 2750 Гц. Рабочие частоты выбирались такими, на которых глубина проникновения электромагнитного поля в материал меньше толщины поверхностного слоя, где протекают усталостные процессы, связанные с зарождением трещины (инструментальная техника и методика проведения опытов подробно описаны в [7]).

Комплексное исследование ряда физико-механических параметров ферромагнитных материалов в процессе усталостного нагружения образцов представлено на рис. 2. Проведенные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что зависимость электромагнитных характеристик от степени усталостных повреждений носит немонотонный характер и отражает отдельные процессы, происходящие на разных стадиях усталостного разрушения. Так, например, до достижения момента зарождения первых субмикроскопических трещин удельная электропроводность материала ρ остается неизменной, но после появления трещин и в стадии их развития наблюдается заметное возрастание значений ρ .

Аналогичное изменение в зависимости от циклической долговечности имеет и магнитная вязкость. Любые изменения удельной электропроводности и магнитной проницаемости приводит к срыву генерации и появлению звукового сигнала или тока в цепи стрелочного индикатора (для этой цели разработан токовихревой прибор ПВД-1М).

Как видно из рис. 2, экспериментальные точки кривых микротвердости и большинства рассмотренных параметров по циклической долговечности, в основном, совпадают, что является доказательством применимости метода микротвердости для оценки степени повреждаемости деталей, работающих при переменных напряжениях. Некоторый сдвиг

экстремумов, объясняется инструментальными возможностями и особенностями принятых методов измерения — если кривые микротвердости оценивают необратимые изменения механических свойств материала в отдельных микрообъемах, то кривые магнитной проницаемости и магнитной вязкости учитывают интегральный эффект повреждения всего объема образца, подвергнутого циклическому нагружению.

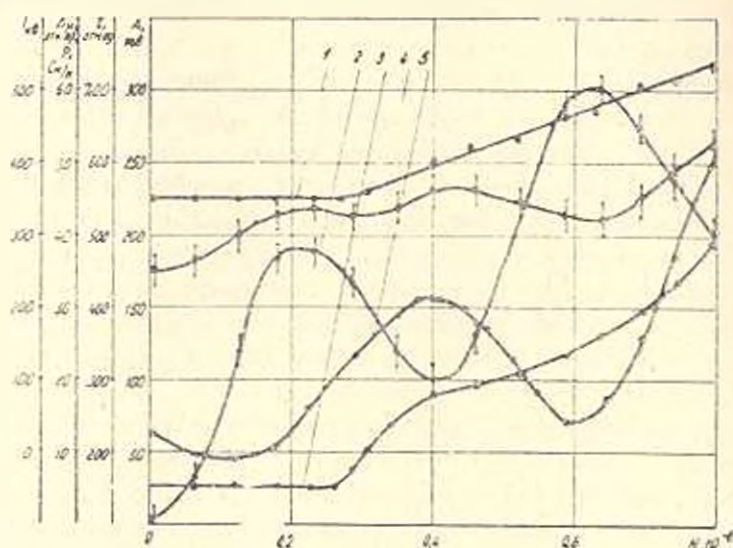


Рис. 2. Изменение физико-механических свойств в зависимости от циклической долговечности ($\sigma = 3,0 \text{ Н.мм}^{-2}$): 1 — микротвердости H_{00} ; 2 — магнитной проницаемости $\Delta\mu$; 3 — удельной электропроводности ρ ; 4 — магнитной вязкости; 5 — приращение амплитуды сигнала ЭДС второй гармоники с феррозондового преобразователя А.

Экстремальные точки кривых микротвердости, полученные при измерении на поверхности образца непосредственно в процессе циклического нагружения, могут стать надежным источником информации для определения продолжительности действия различных стадий усталостного повреждения деталей. Совмещая кривые микротвердости и усталости по окончательному разрушению и соединяя абсциссы экстремальных точек на разных уровнях перенапряжений, получаем линии равной повреждаемости, а в целом — новую диаграмму усталости, которая по сравнению с аналогичными обладает большей информативностью и позволяет производить дифференцированную оценку циклической долговечности на разных уровнях перенапряжений от начала циклического воздействия напряжений до окончательного разрушения. На рис. 3 представлена эта диаграмма, в которой даны линии равной повреждаемости: A, A_1 — упрочнения; B, B_1 — разупрочнения; C, C_1 — появления субмикроскопических трещин; D, D_1 — появления трещин критических размеров, приводящих к окончательному разрушению (кривая усталости).

Неизбежное рассеяние данных измерений, связанное с комплексным воздействием ряда факторов (металлургического, технологического

го, инструментального, временного, условий испытаний и измерений и др.) несколько затрудняет и вносит определенные погрешности при определении экстремальных точек на кривых микротвердости. Поэтому необходимо применение современных приемов теории вероятностей и математической статистики для оценки надежности вывода полученных результатов, методика которой и настоящее время разработана в достаточно полной мере [8].

Рис. 3. Изменение микротвердости при пяти уровнях перенапряжений:
 $\tau = 320, 340, 360, 380$ и 400 т/см².

ИПФ АИ БССР,
ЕрПН им К. Маркса

ՀԱՐԻ. Ք. ՇԱՐԳԻՆԻՉ, Մ. Դ. ՍՏԵՑԻՆ, Ն. Ո. ԻՍԻՔԱՆՈՎ

Դիտարկվում է ռեկրեկարմոթյան և մի շարք ֆիզիկա-մեխանիկական պարամետրերի (մաշնխանյան բախումը, լիտության և մածուցիկության, տեսա-

կարար էլեկտրահզորականության, ֆերոդինդային փոխակերպիչի վրա II հարմոնիկի 1. 2. ու. -ի ազդանշանի ամպլիտուդային աճի) փոփոխումը հոգնածային քայքայման պրոցեսում՝ կախված վնասվածքների ազդման աստիճանից: Բացահայտված է փորձանմուշի մակերևույթի վրա միկրոկարծրության ալիքաձև փոփոխման բնույթը ցիկլային երկարակեցությունից: Միկրոկարծրության և հոգնածային կորերի համատեղմամբ ստացված է նոր դիագրամ, որը թույլ է տալիս զննատեղ տմրացման և ամրախորման պրոցեսների ընթացքը լարումների ցիկլային ներդրումառն ակզրից մինչև վերջնական քայքայումը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Олейник Н. В., Бельс В. В. Исследование усталостных изломов закаленных сталей.— В сб.: Детали машин, Киев: Изд-во «Техника», 1973, вып. 16, с. 73—77.
2. Кудрявцев Н. В., Бегман А. И. Исследование усталостных изломов углеродистых сталей.— Машиноведение, 1971, № 5, с. 36—40.
3. Крамarenko О. Ю., Куликовская О. В. Оценка накопления усталостного повреждения при кручении по изменению усталостных свойства и микротвердости.— Заводская лаборатория, 1972, № 9, с. 1126—1128.
4. Погоребник А. Д., Желудовский А. В. К вопросу об оценке сопротивления усталости жаропрочных материалов на основе измерения микротвердости. Сообщ. 1.— Проблемы прочности, 1983, № 12, с. 27—31; Сообщ. 2.— Там же, 1984, № 6, с. 71—74.
5. Крамarenko О. Ю., Куликовская О. В. Применение метода микротвердости при оценке усталостного повреждения.— Заводская лаборатория, 1972, № 1, с. 80—85.
6. Беляев В. И. Исследования процесса усталости металлов.— Минск: Наука и техника, 1962.— 86 с.
7. Шегин Ю. П. Выявление усталостной повреждаемости клановых пластин комприматоров.— Изв. АН БССР (сер. физ. техн. наук), 1980, № 3, с. 105—109.
8. Стойков М. И. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник.— М.: Машиностроение, 1985.— 232 с.