

УДК 674.023

С.Е. Бельский, доц., канд. техн. наук;
Ф.Ф. Царук, доц., канд. техн. наук;
А.В. Блохин, доц., канд. техн. наук;
М.Н. Пищов, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)
Adel Abdel Basset Rashid
(Beirut Arab University, Lebanon, Tyre)

ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ С НАПРЯЖЕНИЯМИ РАСТЯЖЕНИЯ

Экспериментальные результаты в сочетании с рассмотренными литературными источниками [1, 2] по влиянию частоты механических колебаний на усталостную долговечность и кинетику структурно-чувствительных характеристик металлов и сплавов позволяют констатировать, что основные признаки усталостного накопления повреждаемости независимо от рассмотренной вариации частоты и дополнительного статического нагружения сохраняются, так остается неизменной форма усталостной кривой; сопоставимы для разных частот и давлений значения ограниченных пределов выносливости; ориентация зарождающихся и распространяющихся усталостных трещин по отношению и направлению нормальных и касательных напряжений не изменяется [3]; остается практически одинаковым влияние средних напряжений при асимметричных циклах нагружения; частота оказывает качественно одинаковое влияние на микротвердость, кинетику дислокационной структуры, электросопротивление, микродеформацию, амплитудно-временные зависимости рассеяния энергии [4].

На основании этого можно сделать заключение о единой физической природе усталостной повреждаемости на качественном уровне, однако выявление причин количественного различия этого процесса на разных частотах требует проведения теоретических и экспериментальных исследований.

Для этого предпринята попытка теоретического анализа частотной зависимости эволюции элементов дислокационной структуры на первом этапе развития процесса усталостной повреждаемости. Рассмотрена динамика развития дефектов структуры дислокационным источником Франка-Рида в условиях циклического нагружения и дополнительной статической нагрузки, вызывающей напряжения растяжения. Выбор данного источника дислокаций обусловлен не только

изученностью этой модели [5], но и его вкладом в механизм размножения дислокаций.

При оценке движения источника Франка-Рида необходимо: проанализировать влияние частоты и асимметрии цикла знакопеременного циклического напряжения на движение дислокационного сегмента, особенно в процессе «срабатывания» источника при достижении критической дислокации от амплитудного значения знакопеременного напряжения в широком спектре частот.

Движение закрепленной дислокационной петли рассматривается нами в виде модифицированной модели Келера. Характер движения дислокации определяется как функция времени.

$$\xi = (y, t), \quad (1)$$

При дополнительном асимметричном нагружении возмущающая сила по модели Келера дополняется статическим напряжением. Для упрощения исходной схемы нагружения принято, что плоскость статического нагружения совпадает с плоскостью знакопеременного циклического напряжения.

Уравнение, моделирующее анализируемый процесс, представим в форме (2).

$$A \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + B \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + C \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = b\sigma \sin \omega t + b\sigma_1 \quad (2)$$

где A – эффективная масса на единицу длины, $A = \rho b^2 / \pi$; ω – частота нагружения, Гц; ρ – плотность материалов, г/см³; b – вектор Бюргера, см; B – коэффициент, определяющий силу динамического вязкого трения (г/см); C – коэффициент, определяющий величину силы на единицу длины, обусловленную натяжением изогнутой дислокации; $b\sigma$ – знакопеременная сила (ее амплитуда), действующая на единицу длины за счет внешнего сдвигового напряжения; σ – амплитуда внешнего напряжения, дин/см²; G – упругий модуль сдвига среды, дин/см²; μ – коэффициент Пуассона; $b\sigma_1$ – статическая сила на единицу длины, обусловленная дополнительной статической нагрузкой, дин/см²; σ_1 – величина статического сдвигового напряжения, дин/см².

$$C = \frac{2Gb^2}{\pi(1-\mu)} \quad (3)$$

Цель теоретического анализа заключается в нахождении решения в виде $\xi = f(\rho, G, b, \sigma_1, \sigma, \omega, B)$, а затем при фиксированном ξ в определении σ как функции всех остальных параметров (σ_1, ω, G и

т.д.). Это позволит определить пороговое напряжение срабатывания источника Франка-Рида в присутствии знакопеременного нагружения образца и статической нагрузки, вызывающей напряжения растяжения.

Выполнив преобразования в соответствии с [6] получаем величину порогового напряжения начала развития усталостного разрушения, связанного с размножением дислокаций.

Учитывая найденное значение σ , а также выражение для T_0 , получаем выражение для порогового значения напряжения:

$$\sigma = \left[\langle \xi \rangle - \frac{\pi \sigma_1 l^2}{2Gb^3} (1 - \mu l^2) \right] \left[\frac{1 + \frac{\omega^2 B^2 l^4}{4G^2 b^4}}{\pi(1 - \mu) l^2} Gb \right] \left[1 + \frac{2\pi B l^2}{Gb^2} \right] \quad (4)$$

То есть для одинакового дислокационного среднего смещения на высоких частотах при равном статическом усилии необходимы значительно большие циклические напряжения, чем на низких частотах. В данном случае расчет имеет качественный характер без учета влияния типа кристаллической решетки и примесей.

Однако параболический характер зависимости распределения регистрируемых критических напряжений от частоты нагружения предопределяет и разные стартовые условия развития повреждаемости, а также энергетику развития и накопления иерархических дефектов структуры. Через механизм зарождения, развития, консолидации дислокаций происходит энергетическая подпитка развития микротрещин.

В этом процессе гидростатического давления на каждом уровне нагружения «определяет» свое семейство пороговых напряжений. Напряжение, превышающее «пороговое» сопряжено с образованием характерной ячеистой структуры, уменьшением размеров блоков и ростом микротвердости отожженных материалов уже на ранних стадиях нагружения.

В большей степени частотная зависимость выражена у сталей (например, таких как 10 и 40Х), то есть у материалов с решеткой ОЦК. При значительно меньших по модулю напряжениях накопление повреждаемости наблюдается у меди М1 и сплава Д16, обладающих графичесентрированной решеткой. Характерно, что формирование частотно-независимых уровней пороговых напряжений, а также и структурно

чувствительных свойств материала существенно завершается, приблизительно на уровне $0,4\sigma_T = 0,6\sigma_T$ с последующим значительным рассеянием (и поглощением) энергии именно на уже сформированных дефектах структуры. Это явление регламентирует слабую частотнозависимую специфику дальнейших преобразований структуры материала до момента разрушения. Таким образом, формируется эквидистантность пределов выносливости уровням пороговых напряжений. Слабое отношение от эквидистантности частотных зависимостей пределов ограниченной выносливости и пороговых напряжений может позволить физически обоснованно сопоставить усталостные характеристики, отмечаемые на высоких и низких частотах, а, следовательно, открывает возможности для прогнозирования низкочастотной усталости по результатам высокочастотных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матохнюк Л.Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. Киев.: Наукова думка. – 1988. – 199 с.
2. Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости машин. Мн.: 1983. – 165 с.
3. Писаренко Г.С., Степаненко В.А., Маковецкая И.А. Разрушение сплавов ВТ 4-1 и Д16Т при циклическом нагружении в широком диапазоне частот. // Проблемы прочности. – 1976. – № 3. – С. 813.
4. Смирнов Б.И. Дислокационная структура и упрочнение металлов. – Л.: Наука. – 1981. – 236 с.
5. Чишко К.А., Нацик В.Д. // ФТТ. – 1975. – Т.17. – С. 34–38.
6. Соболев В.Р., Мазуренко А.В., Логвинович П.И., Бельский С.Е., Блохин А.В. О влиянии сил вязкости на движение дислокационного сегмента и распространение упругих колебаний в металлах. /Доклады национальной академии наук Беларуси. – 2007. – Т.51, № 3. – С. 121–124.