

УДК 539.3:534.2

ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ МЕТАЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПО ПАРАМЕТРАМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2011 О.Е. Сысоев

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

Поступила в редакцию 25.02.2011

Предлагается метод определения предельных состояний конструкционных материалов по минимальной скорости накопления дефектов структурой материала, рассчитанной по параметрам акустической эмиссии.

Ключевые слова: *малоцикловые нагрузки, акустическая эмиссия, минимальная скорость накопления дефектов*

Проблема внезапного разрушения деталей машин и конструкций от воздействия циклических нагрузок остро встала перед инженерами в середине XIX века в связи с бурным развитием железнодорожного транспорта. В это время с непонятной регулярностью происходят документально зафиксированные массовые разрушения сходных деталей после воздействия миллионов циклов нагружений при напряжении значительно ниже предела текучести. Часто в зданиях и сооружениях применяется металлический каркас, который работает в условиях циклического изменения интенсивности напряжений. Для правильного прогнозирования длительной прочности этих конструкций необходимо учитывать накопления повреждений и дефектов в конструкционном материале. Это представляется возможным реализовать путем установки датчиков регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) на ответственные узлы и детали. Особенно такой контроль актуален для конструкций труднодоступных для визуального осмотра.

При нагружении металлического каркаса здания в конструкционном материале, находящимся под механическим напряжением, возникает АЭ от освобождения энергии в результате микро-и макроскопических явлений, вызванных локальной динамической перестройкой внутренней структуры материала [1-3]. Процессы пластического течения материала, процессы упрочнения и образования микронесплошностей успешно описываются с позиции

теории дислокаций [4]. Наиболее распространенным, не вызывающим сомнений источником АЭ в металлах является быстрое движение групп дислокаций. Известны следующие источники АЭ, связанные с упругой и пластической деформацией: движение одиночной дислокации, парная аннигиляция, аннигиляция дислокаций на свободной поверхности, разрушение дислокационной петли, равномерное движение группы дислокаций, работа источника Франка-Рида, работа границ зерен в качестве источника дислокаций, распад-захват краевых диполей, образование линий скольжения, проскальзывание границ зерен, раскрепление или отрыв дислокаций. В соответствии с этим наибольшее признание среди исследователей получил дислокационный механизм акустической эмиссии материала на всех стадиях деформирования и разрушения материала. Можно выделить три дислокационных механизма АЭ [1].

Первый механизм АЭ – перемещение дислокаций по линии скольжения. В этом случае дислокации движутся под действием увеличивающейся силы с возможностью выхода их на поверхность материала или границу зерна, вероятностью торможения на препятствиях или аннигиляции. Эти процессы характерны для стадии пластического течения материала в понятиях макромеханики. Второй механизм АЭ – процессы прорыва движущейся дислокацией препятствий в виде дислокационных скоплений, неоднородностей различного типа, границ зерен. В этом случае формирование сигнала АЭ также имеет две составляющие. Передний фронт сигнала формируется за счет

Сысоев Олег Евгеньевич, кандидат технических наук, профессор кафедры строительства и архитектуры. E-mail: fks@knastu.ru

внезапного разрыва связей и быстрой разгрузки материала в окрестности неоднородности. Задний фронт сигнала формируется за счет релаксации напряжений сразу же после разрыва связей [5]. Третий механизм АЭ – процесс излучения АЭ при развитии хрупкого разрушения. В работе [6] рассмотрена модель формирования излучения АЭ на основе представления о разрыве атомных связей. В рассмотренной модели каждый элементарный импульс АЭ обусловлен релаксацией в результате разрыва единичной атомной связи, а полный сигнал излучения формируется из потока элементарных акустических импульсов.

Таким образом, любое изменение структуры материала, появление и залечивание дефектов сопровождается излучением АЭ. То есть по количеству и энергии сигналов АЭ можно определить дефектность структуры материала большинства зданий и сооружений с металлическим каркасом. Количество дефектов в структуре материала, и, особенно, скорость их накопления от воздействия циклических нагружений определяет скорость деградации структуры конструкционного материала.

Для определения дефектности структуры конструкционных материалов от воздействия циклических нагрузок по параметрам АЭ на базе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета были проведены испытания трубчатых образцов с рабочей частью образца $l = 10$ мм, $D = 10$ мм и толщиной стенки $h = 0,5$ мм из стального сплава 40X. Испытания проводились на испытательной машине МИ-40КУ с использованием оригинального программного обеспечения [7]. Это позволило задавать программу малоцикловых испытаний по пилообразному циклу с асимметрией $R=0,5$. Для использования максимальных прочностных возможностей материала нагружение было принято мягким с интенсивностью напряжения $\sigma_i \approx 0,95\sigma_{вр}$, $\sigma_i = 800$ МПа. Одновременно с непрерывной записью накопления величины циклической деформации производилась запись сигналов акустической эмиссии с применением оригинального программного обеспечения [8].

Разработанная комплексная программа исследований долговечности материалов (рис. 1) предусматривала проведение экспериментов при программном нагружении по различным траекториям механического малоциклового нагружения в условиях плоского напряженного состояния с одновременной регистрацией параметров акустической эмиссии. Процесс нагружения в точке упругопластически деформируемого тела происходил в плоскости

двумерного вектора напряжений (рис. 1). Уравнение такой траектории нагружения имеет вид:

$$\vec{S} = S_1 \cdot \vec{i}_1 + S_3 \cdot \vec{i}_3 = S(t), \quad (1)$$

где S_1, S_3 – компоненты вектора напряжений.

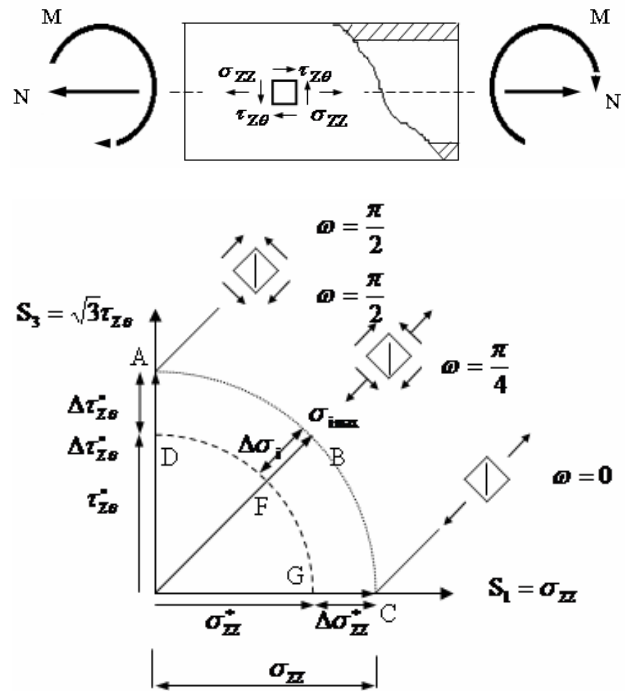


Рис. 1. Траектории циклического нагружения

Такое напряженное состояние, характеризующееся компонентами тензора напряжений $\sigma_{zz}(t) \neq 0$ и $\tau_{z\theta}(t) \neq 0$ создавалось в тонкостенном цилиндрическом образце, который подвергался растяжению и кручению ($N=N(t)$; $M_{кр}=M_{кр}(t)$).

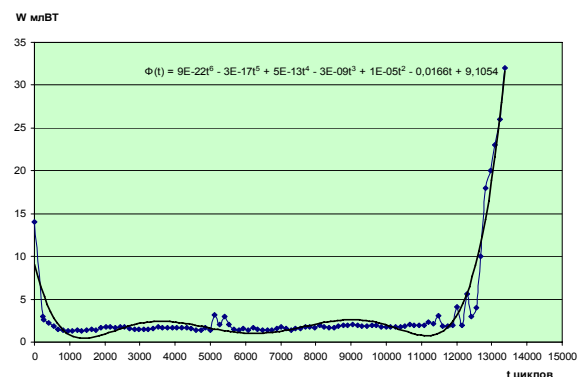


Рис. 2. —♦— диаграмма энергии АЭ по каждому циклу нагружения при $\omega=0$ для стали 40X, — линия тренда $\Phi(t)$

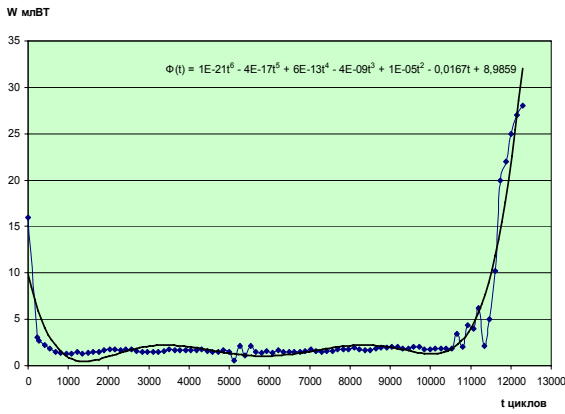


Рис. 3. —◆— диаграмма энергии АЭ по каждому циклу нагружения при $\omega=\pi/4$ для стали 40Х, — линия тренда $\Phi(t)$

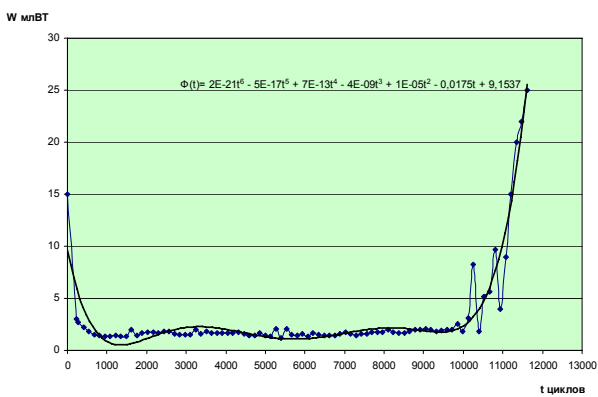


Рис. 4. —◆— диаграмма энергии АЭ по каждому циклу нагружения при $\omega=\pi/2$ для стали 40Х, — линия тренда $\Phi(t)$

Данная программа исследования позволяла создавать в материале плосконапряженное состояние при пропорциональном циклическом нагружении ($\Delta\sigma_i = \sigma_i \min \leftrightarrow \sigma_i \max$). При этом вектор напряжений $S(t)$ в каждую единицу времени совпадает с вектором $\vec{\sigma}_i(t)$ конец которого описывает соответствующую траекторию нагружения в пространстве напряжений.

$$\vec{\sigma}_i(t) = \sqrt{3}\tau_{z\theta}(t) \cdot \vec{i}_3 + \sigma_{zz}(t) \cdot \vec{i}_1 = S(t), \quad (2)$$

Для изучения механизма разрушения материалов была разработана методика, позволяющая использовать метод АЭ при исследовании кинетики накопления повреждений образцов, подвергаемых циклическому нагружению. По результатам проведенных экспериментов были получены диаграммы энергии акустических сигналов по циклам нагружения (рис. 2-4) и накопление интенсивности деформаций (рис. 5) при соответствующих видах пропорционального нагружения ($\omega=0$, $\omega=\pi/4$, $\omega=\pi/2$). На рис. 2-4 по оси ординат отложена энергия сигнала АЭ за цикл нагружения, а затем

эти значения аппроксимированы полиномиальной линией тренда шестой степени, и получено уравнение этой линии $\Phi(t)$ при соответствующем виде пропорционального нагружения при $\omega=0$, $\omega=\pi/4$, $\omega=\pi/2$.

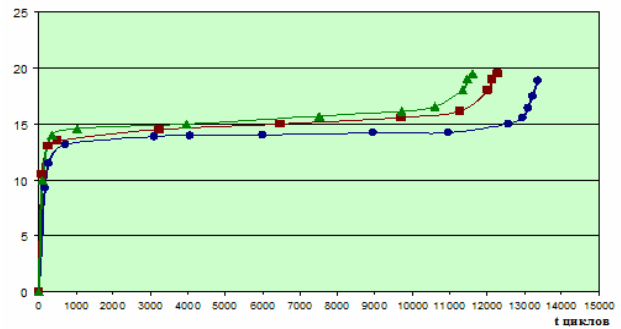


Рис. 5. Диаграмма циклической ползучести: —●— сталь 40Х при $\omega=0$; —■— сталь 40Х при $\omega=\pi/4$; —▲— сталь 40Х при $\omega=\pi/2$. $\sigma_i=800$ МПа

Регистрируемые сигналы АЭ соответствуют проявлению дефектов структуры материала, поэтому функция $\Phi(t)$ является показателем дефектности структуры материала конструкции во времени. При этом можно увидеть разную скорость накопления дефектов структурой материалов во времени (рис. 6). Сначала в первом полуцикле происходит резкий выброс АЭ (эффект Кайзера) – под воздействием внешней нагрузки происходит перестроение структуры материала и структура приспосабливается воспринимать внешние циклические воздействия (1-10 цикл нагружения). Затем скорость накопления дефектов $\Phi(t)$ стабилизируется, становится минимальной, и можно заметить, что минимальная скорость накопления дефектов структурой материала – признак стабильности структуры конструкционных материалов. При увеличении скорости накопления дефектов структурой материала резко увеличивается количество сигналов АЭ (на рис. 6 примерно с 11900 цикла) и материал конструкции приближается к разрушению. Определить этот момент можно, если построить касательную $y=at+c$ к линии тренда $\Phi(t)$ в точке увеличения количества и энергии акустических сигналов за цикл нагружения.

Современная вычислительная техника позволяет выполнять эту операцию в режиме реального времени. На рис. 6 касательная $y=at+c$ в точке увеличения АЭ построена, при этом значение $a=0,49$ (скорость накопления дефектов) значительно выше чем на предыдущем участке. То есть определен момент, когда структура материала больше не может стабильно работать и начинает разрушаться.

$$\Phi(t) \leq a = 0,5$$

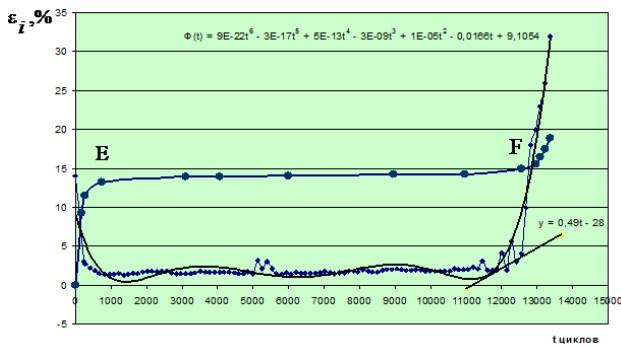


Рис. 6. Совмещенная диаграмма циклической ползучести образца из стали 40X при $\omega=0$, $\sigma_i=800$ МПа и энергии АЭ за цикл нагружения и аппроксимирующей линии тренда $\Phi(t)$

За критерий предельных состояний [9] материала принималась минимальная скорость ползучести участок E-F диаграммы $\varepsilon \square t$ (рис. 5): при превышении минимальной скорости ползучести наступало предельное состояние и деталь или конструкция разрушались. Разница между критерием минимальной скорости ползучести и критерием минимальной скорости накопления дефектов структурой материала заключается в том, что возрастание скорости накопления дефектности структуры материала при малоцикловых нагружениях материала начинается значительно раньше, чем нарастание минимальной скорости ползучести (рис. 6). То есть критерий минимальной скорости накопления дефектов структурой материала является более чувствительным и будет более точным при определении предельных состояний конструкционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Семашко, Н.А. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Н.А. Семашко, В.И. Шпорт, Б.Н. Марьин и др. Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Н.А. Семашко. – М.: Машиностроение, 2002. 240 с.
2. Сысов, О.Е. Мониторинг изменения структуры материалов при циклических нагружениях по сигналам акустической эмиссии / Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. № 1(74)/2009 Механика, материаловедение // СПбГПУ. 2009. С. 83-89.
3. Иванов, В.И. Классификация источников акустической эмиссии / В.И. Иванов, С.П. Быков // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. 1985. № 1. С. 67-74.
4. Хирт, Д. Теория дислокаций / Д. Хирт, И. Лоте. – М.: Атомиздат, 1972. 600 с.
5. Иванов, В.И. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений / В.И. Иванов, В.М. Белов. – М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
6. Иванов, В.И. Акустическая эмиссия в процессе когерентного разрушения // Доклады АН СССР. 1986. 287. №2. С. 302-306.
7. Сысов, О.Е. Программное обеспечение для управления испытательной машиной МИ-40КУ 2009 (ПО «ТМ-40 Manager 2009») / О.Е. Сысов, С.А. Жбанов, Е.А. Кузнецов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2010613498, 2010.
8. Сысов, О.Е. Программное обеспечение для регистрации сигналов акустической эмиссии «AERecoder 2009» (ПО «AERecoder 2009») / О.Е. Сысов, С.А. Жбанов, Е.А. Кузнецов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2010613499. 2010.
9. Можаровский, Н.С. Ползучесть и долговечность материалов при программном нагружении / Н.С. Можаровский, Е.А. Антипов, Н.И. Бобырь. – К.: Вища школа. Изд-во при Киев. ун-те, 1982. 130 с.

POSSIBILITIES OF LIMITING CONDITIONS MONITORING OF METAL PRODUCTS IN MACHINE INDUSTRY AND BUILDING ON PARAMETERS OF ACOUSTIC EMISSION

© 2011 O.E. Sysoev

Komsomolsk-on-Amur State Technical University

The method of definition the limiting conditions of constructional materials on the minimum speed of defects accumulation by material structure, calculated on parameters of acoustic emission is offered.

Key words: low-cycles loading, acoustic emission, minimum speed of defects accumulation