

05.1

## **О деформационном электрическом шуме при знакопеременном упругопластическом деформировании стали**

© В.М. Баранов, Е.Ю. Капралов, Ю.А. Капралов

Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет)  
E-mail: e\_kapr@kpi.mephi.ru

Поступило в Редакцию 27 июня 2003 г.

Исследована взаимосвязь характеристики механических напряжений при циклическом упругопластическом деформировании образцов стали при заданной величине деформации и параметров шумовой компоненты электрического тока, протекающего через образец при наложении на него переменного электрического напряжения. Обнаружено различие шумовых характеристик, регистрируемых в процессе деформирования, при испытаниях образцов с необработанной поверхностью, а также с поверхностью, подвергшейся предварительной механической обработке. Показана возможность установления стадии накопления материалом структурных изменений, приводящих к усталостному разрушению, на основе оценки параметров электрического шума.

Актуальность разработки методов диагностики и прогнозирования остаточного ресурса материалов и конструкций, подвергающихся усталостному деформированию, остается высокой. В работах [1–3] показаны возможности использования для диагностических целей шумовых методов, основанных на регистрации и анализе случайных компонент электрического тока, пропускаемого через образцы конструкционных материалов, в частности стали.

Продолжением проводимых исследований стала попытка выявить закономерности изменения спектральной плотности электрического шума в области низких и инфранизких частот при различной предварительной механической обработке испытуемых образцов.

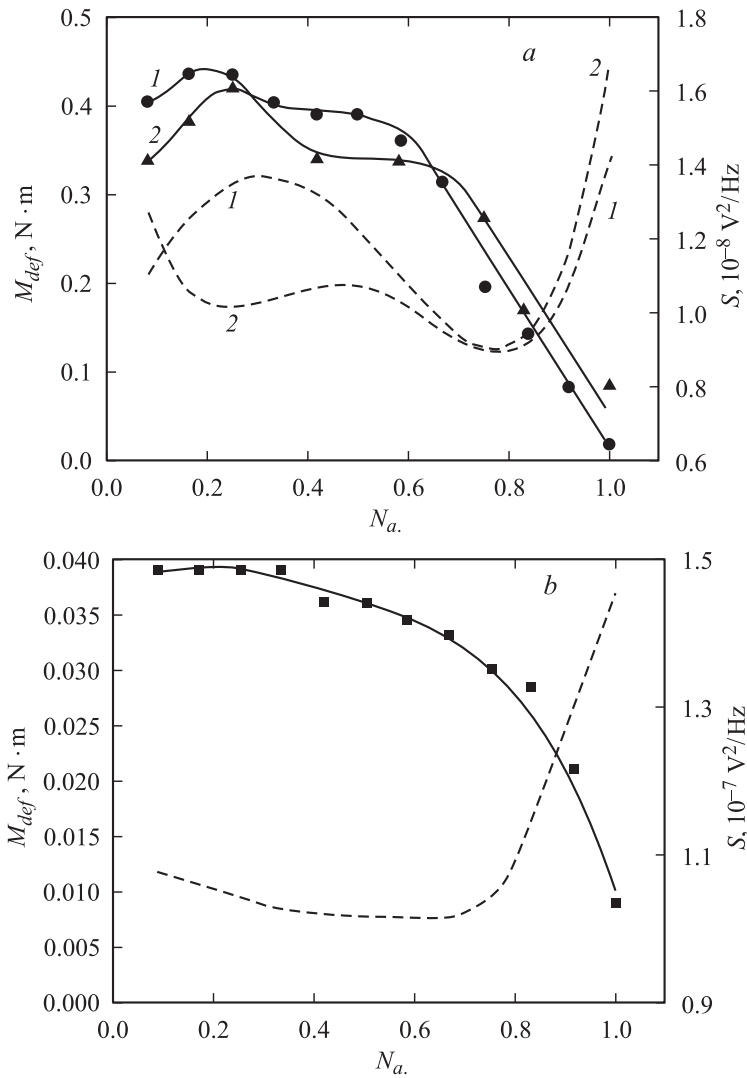
Методика проводившихся усталостных испытаний в целом аналогична методике, изложенной в [3]. Образцы из стали 20 были выполнены

в виде пластин толщиной около 0.5 mm. Консольно закрепленные на оправке из неэлектропроводного материала диаметром  $d = 2$  mm образцы деформировали изгибом на заданный угол  $\varphi = \pm 45^\circ$  относительно исходного положения. Через образцы, включенные в последовательную цепь с генератором, пропускали переменный электрический ток. Регистрировали и анализировали постоянную составляющую и флуктуации тока в указанной электрической цепи, а также характеристику нагружения образца — максимальную нагрузку, которую требовалось приложить к образцу для его изгиба на заданный угол в течение каждого полуцикла деформирования.

В серии усталостных испытаний использовали три образца, отобранных из партии случайным образом. Образцы 1 и 2 механически не обрабатывались, а поверхность образца 3 в зоне, где в процессе эксперимента образовывалась область пластической деформации, подвергли плоскому шлифованию и чистовому полированию до значения параметра  $R_z = 0.8 - 0.4 \mu\text{m}$ . Тем самым проводилось предварительное упрочнение образца [4].

На рисунке, а представлены результаты испытаний образцов 1 и 2. Сплошными линиями отображены зависимости максимального деформирующего момента  $M_{def.}$ , рассчитанного как произведение максимальной нагрузки на длину части образца, к которой указанную нагрузку прилагали, от относительного числа циклов до разрушения  $N_a$ . ( $N_a = N/N_p$ ), где  $N_p$  — номер цикла деформирования, на котором наступало разрушение образца. Из рисунка видно, что образцы 1 и 2, не подвергавшиеся механической обработке, претерпевают сначала упрочнение при  $(0.1-0.3) N_a$ , затем максимальная нагрузка, уменьшаясь до первоначального уровня, остается постоянной в интервале  $(0.4-0.6) N_a$ , далее нагрузка монотонно уменьшается вплоть до момента разрушения образца.

Пунктиром показана зависимость спектральной плотности электрического шума в измерительной цепи  $S$ , усредненной по интервалу 0.001–0.05 Hz от относительного числа циклов до разрушения  $N_a$ . (сглаженные кривые спектральной плотности получены по экспериментальным данным полиномиальной аппроксимацией методом наименьших квадратов) для первого и второго образца. В диапазоне  $(0.1-0.8) N_a$  для первого образца и  $(0.1-0.65) N_a$  соответственно для второго указанная характеристика имеет локальные минимум и максимум, перепад между которыми достигает значения  $0.5 \cdot 10^{-7} \text{V}^2/\text{Hz}$ .



Максимальный деформирующий момент  $M_{def}$  (сплошная линия) и спектральная плотность электрического шума в диапазоне 0.001–0.05 Hz  $S$  (пунктирная линия) при усталостных испытаниях стальных образцов:  $a$  — с необработанной поверхностью;  $b$  — с поверхностью, обработанной чистовым полированием.

Отличие хода кривой  $S$  для образца  $1$  от соответствующей кривой для образца  $2$  в начале эксперимента обусловлено разницей в исходном состоянии образцов, в силу условий эксперимента не подвергавшихся предварительной механической обработке, что косвенно подтверждается смещением кривой  $M_{def.}$  для образца  $2$  относительно кривой  $M_{def.}$  для образца  $1$  на  $0.1 N_a.$  Далее в диапазоне  $(0.8-1.0) N_a.$  спектральная плотность в диапазоне инфранизких частот монотонно возрастает. Можно заметить, что минимум шумовой характеристики —  $S$  сопровождается переходом материала в стадию уменьшения сопротивления деформирующей нагрузки, связанную с образованием в образцах макроскопических трещин, что было установлено при наблюдении зоны пластической деформации образцов под микроскопом МБС-2.

В процессе усталостного деформирования образцов  $1$  и  $2$  выделяются три стадии. Стадия начального упрочнения, которая характеризуется локальным максимумом шумовой характеристики, соответствует, по-видимому, увеличению плотности дислокаций в зоне пластической деформации. Таким образом, возрастает сопротивление рабочей части образца, и, исходя из теоремы Найквиста [5], возрастает шумовая компонента процесса.

В дальнейшем при образовании максимально достижимой плотности дислокаций в зоне деформации наступает стадия насыщения, когда дальнейший рост пластической деформации происходит при неизменном уровне деформирующей нагрузки. При этом также происходит кластеризация имеющихся в зоне пластической деформации точечных дефектов [6], что, вероятно, и приводит к уменьшению спектральной плотности электрического шума.

Минимум спектральной плотности шума достигается непосредственно перед образованием магистральной трещины, дальнейший рост шумовой характеристики может объясняться образованием новых поверхностей, приводящим к увеличению электрического сопротивления рабочей части образца.

Образец  $3$  не имеет стадии упрочнения (см. рисунок,  $b$ ). Деформирующий момент (сплошная линия) остается постоянным в диапазоне  $(0.1-0.35) N_a.$ , далее он монотонно убывает до момента разрушения образца. Отметим, что убывание деформирующего момента носит существенно разный характер до и после образования макроскопической трещины, которая возникает в образце в интервале  $(0.7-0.8) N_a.$  В отсутствие упрочнения материала образца  $3$  спектральная плотность

шумового процесса, как и в предыдущем случае, уменьшается при практически постоянном значении деформирующей нагрузки, что, по-видимому, свидетельствует о неизменной конфигурации дефектов. При последующем уменьшении деформирующего момента уровень шума остается постоянным в докритической и возрастает в закритической фазе роста трещины.

Таким образом, использование спектральной плотности электрического шума позволяет оценить состояние материала с точки зрения накопления усталостных явлений в процессе его упругопластического деформирования, обнаружить образование макроскопической трещины. Кроме того, можно выявить различие между материалами, подвергавшимися и не подвергавшимися механической обработке.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования РФ № 01.200304409.

## Список литературы

- [1] Баранов В.М., Губина Т.В., Капралов Е.Ю. // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Мат-лы 14-й научно-техн. конф. М.: МГИЭМ, 2002. С. 205–206.
- [2] Баранов В.М., Капралов Е.Ю. // Научная сессия МИФИ-2003. Сб. науч. трудов. Т. 9. М.: МИФИ, 2003. С. 165–166.
- [3] Баранов В.М., Капралов Е.Ю., Капралов Ю.А. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. Т. 69. № 3. С. 36–39.
- [4] Панин В.Е., Плешанов В.С., Буркова С.А. и др. // Материаловедение. 1997. № 8–9. С. 22–27.
- [5] Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов / Пер. с англ. Под ред. Г.Я. Мирского. М.: Мир, 1974. 464 с.
- [6] Берзин А.А., Морозов А.И., Сигов А.С. // Письма в ПЖТФ. 2000. Т. 42. В. 10. С. 1757–1761.