

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИХ РЕСУРСА

Л. Б. Зуев, О. В. Соснин, Д. З. Чиракадзе,
В. Е. Громов, В. В. Муравьев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021 Томск

Рассмотрены возможности контроля накопления повреждений при усталостном нагружении с помощью измерения скорости распространения ультразвука. Показано, что зависимость скорости ультразвука от числа циклов нагружения является трехстадийной кривой, на каждой стадии которой скорость ультразвука снижается. Наиболее быстрый спад наблюдается на последней стадии испытания непосредственно перед разрушением. Показано, что переход в критическое состояние может быть обнаружен при измерениях скорости ультразвука. Предложен способ повышения ресурса работы образца, приблизившегося к критическому состоянию, за счет обработки серией мощных импульсов электрического тока, при этом ресурс работы повышается на 30...40% по сравнению с исходным.

1. Постановка задачи. Предсказание остаточного ресурса деталей в случае усталостного нагружения является сложной проблемой. Например, данные о пределе усталости, получаемые при построении так называемой кривой Велера [1], дают возможность оценить лишь усредненные характеристики материала, ничего не сообщая о таком важном показателе надежности индивидуального изделия, как срок службы (ресурс) [2]. Разрушение при усталости обычно носит внезапный характер, и его приближение не сопровождается какими-либо заметными внешними признаками. Микроскопические исследования [1, 3] показывают, что при усталости происходит постепенное накопление микроповреждений, затем медленное латентное подрастание усталостной трещины, завершающееся катастрофическим ростом магистральной разрушающей макротрещины. Наличие длительной подготовительной стадии процесса наводит на мысль о том, что подходящим воздействием можно попытаться задержать переход к его финальному этапу. Для этого необходимо решить две проблемы:

- выбор и обоснование достоверного и достаточно информативного признака перехода к опасной стадии структурных изменений на индивидуальном изделии;
- разработка (пригодных для применения непосредственно на деталях машин или изделиях) методов задержки развития опасных дефектов, рост которых за короткое время может привести к разрушению.

2. Об информативном признаке усталостного разрушения. Удобной величиной, несущей достоверную информацию о структуре материала и ее изменениях, является скорость распространения ультразвука (СУЗ) в металлах и сплавах [4]. Справедливое представление о том, что эта величина определяется модулем упругости G (для поперечных волн) и плотностью материала ρ , т. е. $V_R = (G/\rho)^{1/2}$, не вполне отражает глубину проблемы [5]. Выяснилось [4], что практически все структурные изменения, вызванные термической обработкой, легированием или деформацией, приводят к малым, но измеримым изменениям СУЗ. Перспективным оказалось применение методики измерения СУЗ для диагностики материала при усталостном нагружении. Измерения, проведенные мето-

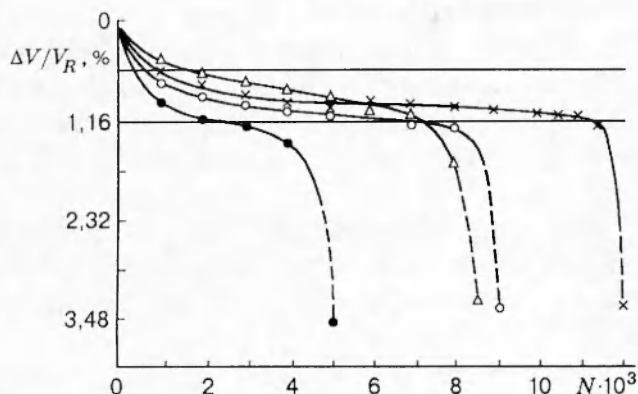


Рис. 1

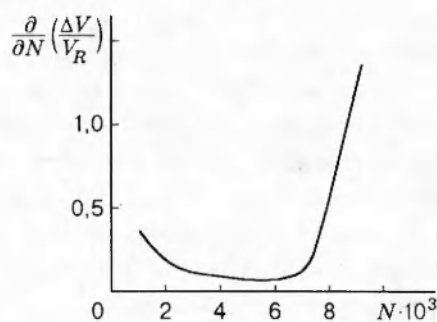


Рис. 2

дом автоциркуляции импульсов ультразвуковых поверхностных волн на несущей частоте 2,5 МГц с помощью прибора ИСП-11 [4], указывают на качественно одинаковую для всех испытанных образцов зависимость скорости ультразвуковых волн от числа циклов нагружения N . Данные усталостного испытания образцов из стали 45 по схеме изгибных колебаний при отнулевом цикле приведены на рис. 1. Аналогичные зависимости были получены и для образцов из рельсовой стали М76. Во всех случаях кривая $\Delta V/V_R(N)$ (ΔV — снижение СУЗ по сравнению с первоначальным значением этой величины — V_R) содержит три последовательные стадии, но уровень и темп количественных изменений для каждого образца индивидуален. Характерно, что трехстадийная кинетика изменения некоторых свойств металлов при усталостных испытаниях отмечалась ранее при измерениях модуля Юнга стали [6], фрактальной размерности очагов усталостной коррозии [7], электрического сопротивления [8] и амплитуды прогиба образцов при изгибных колебаниях [9, 10]. Исследования металла, подвергнутого усталостным испытаниям [4], показали, что на стадиях 1 и 2 в микроструктуре еще практически не заметны какие-либо изменения, но по мере приближения стадии 3 появляются следы пластической деформации, а сразу после начала крутого спада зависимости $\Delta V/V_R(N)$ отмечены признаки разрушения в виде микротрещин размером $\geq 0,01$ мм.

Таким образом, есть надежные основания считать, что переход к стадии 3 является признаком приближения катастрофической стадии усталости и исчерпания ресурса изделия. Поскольку измерения СУЗ с помощью прибора ИСП-11 или подобного ему [4] достаточно просты, они могут быть проведены практически без ограничений на работающих в условиях знакопеременного нагружения конструкциях и машинах. Это дает возможность заблаговременно улавливать признаки наступления критического состояния материала изделий непосредственно в условиях эксплуатации.

Характер кривых на рис. 1 согласуется с известной в теории надежности [11] зависимостью интенсивности отказов (число отказов в единицу времени), описываемой U-образной функцией, от времени эксплуатации t . Действительно, на рис. 2 кривая, иллюстрирующая зависимость производной $\partial/\partial N(\Delta V/V_R)$ от числа циклов N (очевидно $N \sim t$), построенная по данным рис. 1, имеет U-образную форму: в терминах теории надежности [2, 11] ее начальный этап соответствует приработочным отказам, стадия медленного спада СУЗ — периоду внезапных отказов (нормальная эксплуатация), а быстрый спад СУЗ сигнализирует о наступлении наиболее опасного периода износных отказов, когда, как показывают микроскопические исследования, уже появляются усталостные трещины критического размера.

3. Восстановление ресурса деталей после усталостных испытаний. Своевременное обнаружение начала критической стадии усталости наводит на мысль о возможности восстановления ресурса деталей путем своевременного залечивания микротрещин под влиянием специфических внешних факторов [12]. Перспективным в этом отношении представляется действие мощных импульсов электрического тока. Так, например, в [13–15] высказана мысль о том, что пластификация сплавов в условиях электропластического эффекта связана с залечиванием микротрещин при пропускании пуга импульсов электрического тока с плотностью $j \geq 1 \text{ ГА/м}^2$. В рамках настоящей работы сделана попытка применить этот способ к стальным образцам, состояние которых после усталостных испытаний соответствовало началу стадии 3.

Эксперимент проводился по следующей схеме. Образцы из стали 45 и рельсовой стали М76 подвергались усталостным испытаниям при отнулевом цикле нагружения с амплитудой 1,6 МПа. Одновременно измерялась СУЗ с помощью прибора ИСП-11. В исходном состоянии СУЗ составляла 2910 м/с. Образцы в таких условиях разрушались после $\sim 3\ 150$ циклов нагружения (средние данные по 8 образцам), а начало существенного падения СУЗ (до величины 2 890 м/с) отмечалось уже после 3000 циклов нагружения. Достигшие такого состояния образцы были подвергнуты обработке токовыми импульсами с частотой 20 Гц и амплитудой $\sim 20 \text{ кА}$ в течение 30 мин. Продолжение усталостных испытаний показало, что такая обработка не только практически восстанавливала первоначальное значение СУЗ, но и позволяет образцам выдержать до разрушения дополнительно 1 000–1 500 циклов нагружения, т. е. эффект был достаточно заметным.

Таким образом, электрическая обработка материалов после наступления критической стадии накопления усталостных повреждений может ощутимо повысить ресурс работы образцов, а в случае использования реальных изделий продлить срок их эксплуатации. Наиболее вероятной причиной такого возрастания ресурса можно считать залечивание зародышевых микротрещин за счет локальных разогревов материала в области концентрации линий тока у их концов, затупления последних вследствие релаксации напряжений и соответствующего снижения уровня концентрации напряжений в этих зонах. Подобные эффекты широко обсуждались в литературе безотносительно к проблеме усталости [12–14].

Большую роль играет в этом случае режим электрической обработки. Так, в работе [16] сделана аналогичная попытка повысить усталостную прочность за счет предварительной обработки стали электрическими импульсами. Однако это не привело к повышению работоспособности образцов, содержащих заранее выращенные трещины разной длины (1,5–2,0 мм), а уменьшило только разброс данных от одного образца к другому. Возможно, это связано с формой использованных электрических импульсов, которые представляли собой быстро затухающую синусоиду, характерную для разряда конденсатора на малоиндуктивный контур, в то время как известно [15, 17], что максимальный электропластический эффект наблюдается при использовании униполярных импульсов специального генератора.

Таким образом, сочетание методики непосредственного слежения за состоянием металла при усталостных испытаниях с помощью измерения СУЗ и обработки электрическими импульсами создает принципиальную возможность увеличения срока службы изделий, работающих в условиях усталостного нагружения, и повышения надежности машин и механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. М.: Оборонгиз, 1952.

2. Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В. З. Надежность машин. М.: Высш. шк., 1988.
3. Кеннеди А. Дж. Ползучесть и усталость в металлах. М.: Metallurgia, 1965.
4. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996.
5. Tokuoka T., Iwashimizu Yu. Acoustical birefringence of ultrasonic waves in deformed isotropic elastic materials // Intern. J. Solids Structures. 1968. V. 4. P. 383-389.
6. Иванова В. С. Усталость металлов. М.: Metallurgia, 1963.
7. Zhou X. G., Chen D. L., Ke W. Fractal characteristics of pitting under cyclic loading // Mat. Lett. 1987. V. 7, N 12. P. 473-476.
8. Баш В. Я. Исследование напряжений и деформаций термоэлектрическим методом. Киев: Наук. думка, 1984.
9. Зуев Л. Б., Коротких Н. К., Муратов В. М. Рост трещин при циклическом нагружении термически обработанной рельсовой стали // Изв. вузов. Черная металлургия. 1980. № 10. С. 81-86.
10. Зуев Л. Б., Коротких Н. К. Определение вязкости разрушения по кинетике роста усталостных трещин // Изв. вузов. Черная металлургия. 1984. № 10. С. 80-83.
11. Дилон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. М.: Мир, 1984.
12. Финкель В. М. Физические основы торможения разрушения. М.: Metallurgia, 1977.
13. Финкель В. М., Головин Ю. И., Слетков А. А. Разрушение вершины трещины сильным электромагнитным полем // Докл. АН СССР. 1976. Т. 227, № 4. С. 848-851.
14. Новиков И. И., Климов К. М., Бурханов Ю. С. Расчет пространственного распределения плотности электрического тока в неоднородных проводниках // Докл. АН СССР. 1981. Т. 260, № 6. С. 1360-1362.
15. Sprecher A. F., Mannan S. L., Conrad H. On the mechanism for the electroplastic effect in metals // Acta Metallurg. 1986. V. 34, N 7. P. 1145-1162.
16. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И. Влияние импульсного тока высокой плотности на усталостную долговечность стального образца с концентратором // Проблемы прочности. 1995. № 5-6. С. 74-78.
17. Громов В. Е., Зуев Л. Б., Козлов Э. В., Целлермаер В. Я. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов. М.: Недра, 1996.

Поступила в редакцию 16/XII 1996 г.
