

05;08;12

Ультразвуковой контроль накопления усталостных повреждений и восстановление ресурса деталей

© Л.Б. Зуев, В.Я. Целлермаер, В.Е. Громов, В.В. Муравьев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 8 июля 1996 г.)

Описана методика контроля изменения прочностных свойств сталей в процессе усталостных испытаний с помощью измерения скорости распространения ультразвука. Установлена возможность обнаружения опасной стадии развития усталостных повреждений на отдельных деталях. Предложен способ восстановления работоспособности изделий с помощью обработки мощными импульсами электрического тока. Показано, что подобная обработка существенно повышает ресурс работы и может предотвратить усталостное разрушение.

Введение

Хорошо известно, какой сложной проблемой является предсказание остаточного ресурса деталей в случае усталостного нагружения. Данные о пределе усталости, получаемые при построении так называемой кривой Велера [1], дают возможность оценить только усредненные характеристики материала, ничего не сообщая о таком важном, надежном показателе индивидуального изделия, как срок службы (ресурс) [2]. Подобное положение существенно ограничивает прогресс в повышении надежности машин и механизмов. К тому же разрушение при усталости обычно носит внезапный характер, его приближение не сопровождается какими-либо заметными внешними признаками. Микроскопические исследования [1,3] показывают, что при усталости происходит постепенное накопление микрповреждений, затем медленное скрытное подрастание усталостной трещины, переходящее в катастрофический рост магистральной разрушающей макротрещины. Существование такой длительной подготовительной стадии наводит на мысль о том, что подходящим воздействием можно попытаться задержать переход к финальному этапу процесса.

Таким образом, в прикладных исследованиях процесса усталости металлов и сплавов видятся две проблемы: выбор и обоснование достоверного и достаточно информативного признака наступления опасной стадии структурных изменений, ведущих к разрушению; разработка пригодных для применения непосредственно на деталях машин или изделиях методов задержки развития дефектов, рост которых за короткое время может привести к разрушению. Некоторые подходы к этим вопросам рассмотрены в настоящей работе.

О возможности диагностики усталостного разрушения

Очень 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. $V_t = (G/\rho)^{1/2}$, не вполне отражает глубину проблемы [5]. Выяснилось [4], что практически все структурные изменения, вызванные термической обработкой или деформацией, приводят к малым, но измеримым изменениям СУЗ. Перспективным оказалось применение методики измерения СУЗ для диагностики материала при усталостном нагружении. На рис. 1 представлены данные о изменении СУЗ в ходе усталостного испытания образцов из стали 45 по схеме изгибных колебаний. Аналогичные зависимости были получены и для образцов из рельсовой стали М76. Измерения, проведенные методом автоциркуляции звуковых импульсов на несущей частоте 2.5 МГц с помощью прибора ИСП-12 [4], указывают на качественно одинаковый для всех испытанных образцов вид зависимости скорости поперечных ультразвуковых волн от числа циклов нагружения n . Во всех случаях $V_t(n)$ состоит из трех последовательных стадий снижения СУЗ, но уровень и темп количественных изменений для каждого конкретного образца индивидуален (рис. 1). Характерно, что трехстадийная кинетика изменения некоторых свойств металлов при усталостных испытаниях

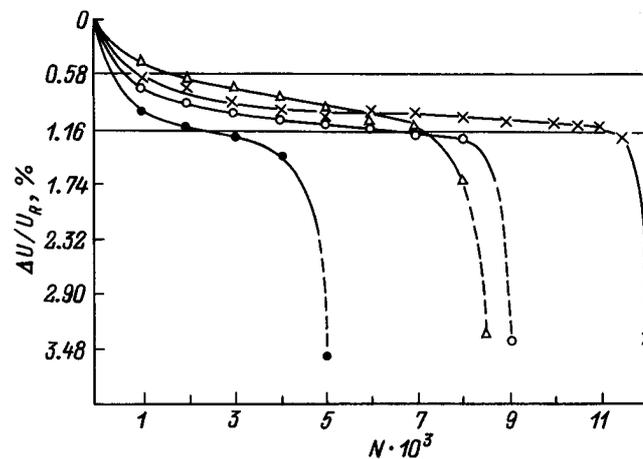


Рис. 1. Относительное изменение СУЗ в ходе усталостных испытаний образцов из стали 45.

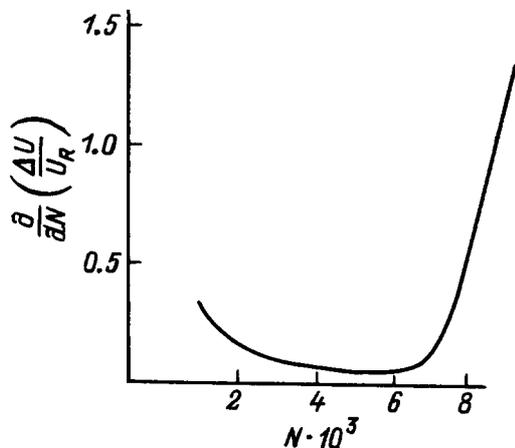


Рис. 2. Зависимость изменения СУЗ на 1 цикл испытания от числа циклов.

отмечалась и при использовании других методик. Так, в [6] было показано, что аналогично меняется модуль Юнга стали (см. также [7]), в [8] обнаружен подобный ход электросопротивления, а в [9,10] отмечены близкие закономерности в изменениях амплитуды прогиба образцов при изгибных колебаниях. Понимание существа процессов, ответственных за подобную стадийность кривых, достигается при микроструктурном анализе металла, подвергнутого усталостным испытаниям. Оказывается, на стадиях 1 и 2 в микроструктуре еще практически незаметны какие-либо изменения, но по мере приближения стадии 3 появляются следы пластической деформации, а сразу после начала крутого спада зависимости $V_i(n)$ отмечены признаки разрушения в виде микротрещин размером ≥ 0.01 мм.

Таким образом, есть надежные основания считать, что переход к стадии 3 зависимости СУЗ от числа циклов нагружения сигнализирует о приближении катастрофической стадии усталости и исчерпанию ресурса изделия. Поскольку измерения СУЗ с помощью прибора ИСП-12 или другого, подобного ему [4], достаточно просты, то 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.

Представляется, что подобный вид зависимости $V_i(n)$ может быть полезен для объяснения известного в теории надежности [11] U -образного характера зависимости интенсивности отказов (их числа в единицу времени) от времени эксплуатации t . Действительно, U -образной является показанная на рис. 2 зависимость dV_i/dn от n (очевидно, $n \sim t$), построенная по данным рис. 1: в терминах теории надежности [2,11] ее начальный этап соответствует приработочным отказам, стадия медленно спада СУЗ — периоды внезапных отказов (нормальная эксплуатация), а быстрый спад СУЗ сигнализирует о переходе к наиболее опасному периоду износовых отказов,

когда в структуре материала уже произошли серьезные изменения, в частности, как показывают микроскопические исследования, появились трещины опасного размера.

Восстановление ресурса деталей после усталостных испытаний

Методика своевременного обнаружения начала критической стадии усталости наводит на мысль о возможности восстановления ресурса деталей за счет залечивания микротрещин под влиянием каких-либо специфических внешних факторов [12], поскольку оставляет время для их применения. Наиболее перспективным в этом отношении представляется действие мощных импульсов электрического тока. Так, авторы [13–15] высказали мысль о том, что пластификация сплавов в условиях электропластического эффекта связана с залечиванием микротрещин при пропускании цуга импульсов электрического тока с плотностью $j \geq 10^3$ МА/м². В рамках настоящей работы сделана попытка применить этот эффект к стальным образцам, состояние которых после усталостных испытаний соответствовало началу стадии 3 зависимости $V_i(n)$, зафиксированному по данным об изменении СУЗ.

Схема эксперимента была следующей. Образцы из рельсовой стали М76 подвергались усталостным испытаниям по схеме от нулевого цикла нагружения с амплитудой 1.6 МПа с одновременным измерением СУЗ с помощью прибора ИСП-12. В исходном состоянии величина СУЗ составляла 2910 м/с. Образцы в таких условиях разрушались после ~ 3150 циклов нагружения (среднее по 8 образцам), а начало существенного падения СУЗ (до величины 2890 м/с) отмечалось уже после 300 циклов нагружения. Достижение такого состояния образцы были подвергнуты обработке токовыми импульсами с частотой 20 Гц и амплитудой ~ 20 кА в течение 30 мин. Продолжение усталостных испытаний показало, что такая обработка не только практически восстанавливала первоначальное значение СУЗ, что указывает на возвращение к первоначальной структуре материала, но и позволяла образцам выдержать до разрушения дополнительно 1000 . . . 1500 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, формирующихся в процессе усталостного нагружения, 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. Эффекты такого сорта широко обсуждались в литературе [12–14] безотносительно проблемы усталости.

Заметим, что большую роль играет в этом случае режим электрической обработки. Так, авторы [16] сделали аналогичную попытку повысить усталостную прочность за счет предварительной обработки стали электрическими импульсами. Это, однако, не привело к повышению работоспособности усталостных образцов, содержащих заранее выращенные трещины разной длины (1.5...2.0 мм), уменьшив только разброс данных от одного образца к другому. Возможно, это связано с формой использованных электрических импульсов, которые представляли собой быстрозатухающую 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 восстановления срока службы (ресурса) изделий, работающих в условиях усталостного нагружения, и может дать вклад в повышение надежности машин и механизмов.

Список литературы

- [1] *Кеннеди А.Дж.* Ползучесть и усталость в металлах. М.: Металлургия, 1965.
- [2] *Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З.* Надежность машин. М.: Высшая школа, 1988.
- [3] *Горицкий В.М., Терентьев В.Ф.* Структура и усталостное разрушение металлов. М.: Металлургия, 1980.
- [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.* // Int. J. Solids Structures. 1968. Vol. 4. P. 383–389.
- [6] *Karius A., Gerold E., Shulz E.H.* // Archiv f. Eisenhuettenwesen. 1944. N. 5/6. S. 113–120.
- [7] *Иванов В.С.* Усталость металлов. М.: Металлургия, 1963.
- [8] *Баш В.Я.* Исследование напряжений и деформаций термоэлектрическим методом. Киев: Наукова думка, 1984.
- [9] *Зуев Л.Б., Коротких Н.К., Муратов В.М.* // Изв. вузов. Черная металлургия. 1980. № 10. С. 81–86.
- [10] *Зуев Л.Б., Коротких Н.К.* // 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.: Металлургия, 1977.
- [13] *Финкель В.М., Головин Ю.И., Слетков А.А.* // ДАН СССР. 1976. Т. 227. № 4. С. 848–851.
- [14] *Климов К.М., Новиков И.И.* // ДАН СССР. 1981. Т. 260. № 6. С. 1360–1362.
- [15] *Sprecher A.F., Mannan S.L., Conrad H.* // Acta Metall. 1986. Vol. 34. N 7. P. 1145–1162.
- [16] *Степанов Г.В., Бабуцкий А.И.* // Проблемы прочности. 1995. № 5–6. С. 74–78.
- [17] *Громов В.Е., Сташенко В.И., Троицкий О.А.* // Изв. АН СССР. Металлы. 1991. № 2. С. 154–158.