

05;12

Залечивание усталостных повреждений сталей импульсами электрического тока

© Л.Б. Зуев, О.В. Соснин, С.Ф. Подборонников, В.Е. Громов, С.Н. Горлова

Сибирский государственный индустриальный университет,
654007 Новокузнецк, Кемеровская область, Россия

(Поступило в Редакцию 16 ноября 1998 г.)

Увеличение на 15–30% ресурса при малоцикловых усталостных испытаниях достигается обработкой деталей мощными импульсами электрического тока в момент резкого снижения скорости ультразвука. Обсуждены возможные механизмы эффекта.

Наиболее часто встречающимся видом нагружения при эксплуатации конструкций, механизмов и машин является циклическое (знакопеременное или более сложное) нагружение, при котором развиваются усталостные явления. Оно характерно для авиационной и ракетной техники, двигателестроения различного типа, транспорта и других отраслей техники. Неожиданное в большинстве случаев наступление заключительной стадии усталостного разрушения может привести к катастрофическим последствиям с трудно прогнозируемыми тяжелыми последствиями.

Проблема усталостного разрушения металлов и сплавов, несмотря на многолетнюю историю исследований, остается актуальной до настоящего времени. Значительный экспериментальный материал, накопленный к настоящему времени, в большей степени подчеркивает ее сложность, чем указывает пути ее решения. Существует достаточно много неясностей как в объяснении природы повреждаемости при усталостном нагружении, так и при диагностировании усталости. Работы последних лет указывают на сложную природу явления усталости, связанную с самоорганизацией, накоплением и взаимодействием решеточных дефектов в процессе усталостного нагружения [1,2].

В данной работе поставлены следующие задачи: используя способ простого и надежного определения стадии развития малоциклового усталостного разрушения, применимый для индивидуальных изделий [3,4], предложить методику восстановления ресурса деталей с помощью специального вида обработки и применить ее для широкого класса практически важных конструкционных материалов; для повышения глубины понимания получаемых результатов провести металловедческую проработку проблемы усталостного нагружения и природы восстановления ресурса деталей при такой обработке.

Малоцикловые усталостные испытания были проведены по схеме отнулевого изгиба на образцах, изготовленных из конструкционных сталей 40 и 40Х, рельсовой стали М76(70ХГСА), нержавеющей стали Х18Н10Т и композиции "быстрорежущая сталь Р6М5 — сталь 40Х", изготовленной методом сварки. Параллельно с усталостными испытаниями проводилось измерение скорости распространения ультразвуковых волн (СУЗ) с помощью

измерителя структурных превращений ИСП-12 с точностью до 10^{-4} . Прибор работает на несущей частоте 2.5 МГц и генерирует поверхностные (релеевские) упругие волны, распространяющиеся со скоростью V_R .

Проведенные эксперименты позволили установить, что во время усталостных испытаний СУЗ непрерывно падает и зависимость СУЗ от числа циклов нагружения имеет вид трехстадийной кривой.

Металлографические исследования структуры материала на разных стадиях кривой $\Delta V/V_R(N)$ позволили установить следующее: 1) на первой и второй стадиях спада СУЗ при усталостных испытаниях в структуре материала практически не возникает заметных изменений, которые были бы разрешимы при использовании металлографического микроскопа; 2) к началу заключительной стадии формируются усталостные микротрещины длиной до 0.015 мм, служащие в дальнейшем очагами разрушения; 3) между моментом появления микротрещин и началом резкого спада СУЗ существует однозначная связь.

Таким образом, можно полагать установленным, что резкий спад СУЗ при усталостных испытаниях связан с появлением усталостных трещин и сигнализирует о приближении заключительного этапа процесса — перехода к хрупкому долому и разрушению образца или изделия. Такой признак является информативным для конкретного образца и с достаточной степенью точности предупреждает о начале разрушения. Полученные результаты можно рассматривать как предложение и обоснование нового информативного признака усталостного разрушения сталей [5,6].

Поскольку измерения СУЗ позволяют с достаточной точностью предсказать приближение критической стадии разрушения, то возникает возможность предотвращения разрушения за счет своевременного использования воздействия на нагружаемый материал. В качестве такого воздействия предложено использовать обработку импульсами электрического тока одной полярности с амплитудой до 250 MA/m^2 и длительностью 100 ms. Из многочисленных исследований, выполненных ранее, известно, что такая обработка приводит к заметной пластификации сталей и сплавов [7].

Схема эксперимента была следующей. Образцы после перехода к заключительной стадии усталостного испытания обрабатывались серией электрических импульсов,

Таблица 1. Увеличение ресурса образцов электростимулированием

| Марка стали | Увеличение ресурса, % |
|-----------------------------|-----------------------|
| 40 | 35.7 |
| 40X(термообработанная) | 20.1–20.9 |
| M76(70XГСА) | 26.3–29.3 |
| X18H10T | 22.9–24.3 |
| Сварное соединение 40X+P6M5 | 13.4–15.2 |

после чего усталостное испытание и измерение СУЗ продолжалось. Результат обработки состоял в возрастании СУЗ до первоначального состояния и увеличении числа циклов, выдерживаемых образцом при продолжении испытаний.

Если необработанные образцы после достижения критического состояния, как правило, выдерживали не более 1000 циклов нагружения, после чего следовало разрушение, то после обработки они были способны выдержать 2500 . . . 3000 циклов приложения нагрузки. Таким образом, было отмечено существенное возрастание ресурса образца (табл. 1).

Микроскопические исследования позволили установить, что после обработки токовыми импульсами в структуре металла происходят кардинальные изменения. Наиболее существенным образом меняется состояние усталостных микротрещин, возникших к началу третьей стадии процесса. В трещинах такого сорта появляется новая структурная составляющая, микроструктура которой не разрешается на уровне оптического и электронного растрового микроскопа. В трещине она, как правило, располагается на той стороне, которая при обработке была направлена к "плюсу" генератора импульсов. Однако были отмечены случаи сплошного заполнения объема трещины такой структурной составляющей. Она представляет собой "белый слой", возникновение которого неоднократно отмечалось ранее в случаях концентрированного и локализованного подвода внешней энергии, например, при трении, обработке лучами лазера, плазмой. Удалось проследить за процессом возникновения "белого слоя" в таких условиях на специально маркированных отпечатках микроиндентора усталостных трещинах. Кроме того, была проведена серия модельных экспериментов с поверхностными закалочными микротрещинами, возникающими при закалке образцов из рельсовой стали М76 в воду. В этом случае возникающие микротрещины длиной до 0.15 мм после обработки импульсами электрического тока тоже заполнялись "белым слоем" [5]. Данные по микротвердости (3000 МПа для сталей 40, 10 000 МПа для стали М76) позволяют думать, что такой слой состоит из мелкодисперсных продуктов распада мартенсита. Микрорентгеноспектральный анализ в стали 40, выполненный на растровом электронном микроскопе с микроанализатором JSM-T200 фирмы

"Jeol", указывает на некоторое повышение содержания легирующих элементов (Mn, Si) в "белом слое" по сравнению с матрицей. Процесс возникновения "белого слоя" представляется следующим. Известно, что вблизи концов трещин возникает концентрация линий электрического тока и соответственно растет выделение тепла, приводящее к появлению локального очага плавления в течение одного импульса. После прерывания тока происходит охлаждение за счет быстрого теплообмена с окружающим расплавленную зону твердым металлом. Движущийся в сторону микротрещины фронт кристаллизации оттесняет к последней примеси, понижающие температуру плавления железа, так что последние кристаллизующиеся объемы, из которых формируется "белый слой", оказываются обогащенными этими элементами. При дальнейшем охлаждении появляются дисперсные продукты превращения аустенита с указанной выше твердостью. Этот эффект приводит к снижению уровня концентрации напряжений вблизи концов микротрещин и, таким образом, тормозит развитие разрушения. В общем в структуре усталостно-деформированной стали происходит снижение уровня внутренних напряжений 1-го и 2-го родов и размеров области когерентного рассеяния рентгеновских лучей, о чем свидетельствуют данные табл. 2.

Обращает на себя внимание очень существенное снижение уровня внутренних напряжений 2-го рода и размера области когерентного рассеяния. Обе эти величины связаны с характеристиками дислокационной структуры и их поведение после обработки свидетельствует о выравнивании плотности дислокаций по объему металла, что, естественно, приводит к уменьшению вероятности зарождения трещин. Все эти данные указывают на облегчение хода релаксационных процессов при обработке электрическими импульсами [5–7].

Установленные закономерности позволили предложить способ восстановления усталостного ресурса, пригодный для ответственных стальных деталей машин и механизмов. Подобная обработка может проводиться, например, при техническом обслуживании или ремонте оборудования. Для этого данные о первоначальной СУЗ могут быть заранее внесены в паспорт изделия.

Таблица 2. Изменение характеристик структурного состояния стали 40 после электрической обработки

| | Состояние до обработки | Состояние после обработки |
|--------------------------------|------------------------|---------------------------|
| Число циклов до разрушения N | 2800 (2000 + 800) | 3800 (2000 + 1800) |
| σ_1 , МПа (1-й род) | 296 | 235 |
| σ_{11} , МПа (1-й род) | 506 | 253 |
| D , nm | 333 | 196 |

Примечание. D — размер области когерентного рассеяния.

Нами прослежена связь между трехстадийной кривой зависимости СУЗ от числа циклов нагружения и U-образной кривой интенсивности отказов, хорошо известной в теории надежности [8]. Показано, что 3 стадии спада СУЗ отвечают реализации 3 видов отказов: приработочных (первая стадия), случайных (вторая) и износовых (третья). Такой анализ объясняет принципиальное различие между традиционными способами определения ресурса, основанными на статистическом анализе данных испытаний по многим образцам, и предложенным способом, позволяющим определять приближение критической стадии на индивидуальном образце или изделии. Это представляется важным в случае дорогих деталей ответственного оборудования, для которых набор большой статистики при испытаниях затруднителен. Переход к измерению и анализу усталостных характеристик отдельных деталей или изделий может привести к существенному удешевлению контрольных мероприятий и повышению надежности техники [8].

Список литературы

- [1] *Иванова В.С., Терентьев В.Ф.* Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1995. 455 с.
- [2] *Иванова В.С.* Синергетика, прочность и разрушение металлических материалов. М.: Наука, 1992. 158 с.
- [3] *Зуев Л.Б., Целлермаер В.Я., Громов В.Е.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 9. С. 123–125.
- [4] *Финкель В.М., Головин Ю.И.* // ДАН СССР. 1997. Т. 237. Вып. 2. С. 325–327.
- [5] *Зуев Л.Б., Чиракадзе Д.З., Соснин О.В.* // Металлофизика и новейшие технологии. 1997. Т. 19. № 8. С. 80–82.
- [6] *Зуев Л.Б., Соснин О.В., Чиракадзе Д.З.* // ЖПМиТФ. 1998. № 4. С. 32–34.
- [7] *Громов В.Е., Зуев Л.Б., Козлов Э.В.* Электростимулированная пластичность металлов и сплавов. М.: Недра, 1997. 280 с.
- [8] *Громов В.Е., Чиракадзе Д.З., Семакин Е.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 1997. № 5. С. 1019–1023.