

УДК 669:539.67

ДИССИПАТИВНЫЕ СВОЙСТВА КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕГРАДАЦИИ И ДЕСТРУКЦИИ СТАЛЕЙ

Чуканов А. Н., Левин Д. М.

*Тульский государственный университет, Тула,
chukan@sic.tula.ru*

Описаны возможности метода внутреннего трения (ВТ) для оценки деградации и деструкции углеродистых сталей посредством контроля состояния микрообъемов материала в локальных зонах концентрации напряжений. Дан алгоритм анализа, а также методы моделирования поведения материала (теоретическое, структурное) при наличии распределенных очагов концентрации напряжений, формируемых внешними деструктивными воздействиями.

Введение

Макроскопическое разрушение, как следствие эксплуатационных воздействий, предваряют: деградация материала [1–4] («концептуальная деградация» [5]), переход в предельное состояние (ПС) и локальное разрушение (деструкция или «деструктивная деградация» [5]).

В соответствии с [1–7], под деградацией сплава понимали изменение концентрации основного твердого раствора, состава и морфологии фазовых включений, под деструкцией – образование и развитие субмикро-, микро- и макронесплошностей. Именно эти процессы контролируют создание и перераспределение мощных полей микронапряженй, достаточных для возникновения и развития катастрофического разрушения. Они формируются в ходе диффузионного массопереноса и взаимодействия дефектов кристаллической структуры. Наиболее эффективным и теоретически обоснованным методом исследования перечисленных процессов является оценка характеристик неупругости материала или внутреннего трения (ВТ) [8, 9].

Сложность оценки степени деградации материала на стадии рассеянного (нелокализованного) повреждения состоит в том, что на протяжении всего периода нагружения в материале совместно присутствуют разные типы микроструктуры, а также зоны, которые не подвергались изменениям [10]. Параметры режима нагружения и условия окружающей среды влияют на степень локализации пластической деформации в разных микрообъемах материала, а поэтому перспективными считаются методы исследования рассеянного повреждения, учитывающие статистичность микрохарактеристик материала [11]. Метод ВТ оптимально подходит для исследования повреждаемости материалов как интегральное свойство, отражающее постоянное влияние большого количества структурных дефектов и несплошностей различного масштабного уровня.

В подтверждение этого, из всех методов нелокализованного усталостного повреждения материалов наиболее обоснованным считают метод измерения циклической неупругости, характеризуемый, как и ВТ, неупругой циклической деформацией и энергией неупругого деформирования за цикл [12–15]. Основываясь на литературных данных [16] можно заключить, что неупругая деформация за цикл, при использовании её в качестве критерия числа циклов до разрушения дает возможность построить зависимости более инвариантные к некоторым структурным и технологическим факторам, чем при использовании в качестве такого критерия, напряжения.

Итак, метод ВТ имеет хорошо развитую теоретическую и аппаратурную базы. Он оптимально подходит для анализа развития повреждаемости материалов. Однако до

настоящего времени характеристики собственно ВТ, а также их температурные и амплитудные зависимости как инструменты изучения деградации и деструкции широко не применялись.

Целью данной статьи является представление основных результатов, полученных ранее, а также пропаганда возможностей метода ВТ для наблюдения, количественного описания и прогнозирования в сплавах на базе α -Fe как процессов, деградационных, подготавливающих переход в ПС, так и деструктивных, отражающих зарождение и развитие несплошностей (субмикротрещин) в локальных зонах концентрации напряжений.

Материал и методики эксперимента. Пиковье напряжения у структурных дефектов и дефектов поврежденности являются основным показателем аккомодационных возможностей материала. В ходе измерений ВТ низкоамплитудные (10^{-6} – 10^{-7} отн. ед.) колебания модулируют пайерлсовский рельеф, активизируя релаксационные процессы в зонах концентрации напряжений. Изменяющиеся в этих зонах параметры динамики междислокационного и дислокационно-примесного взаимодействия являются чувствительнейшими релаксационными критериями, деформационно-напряженного состояния материала [17, 18].

Далее приведен анализ результатов, полученных при низко- (обратный крутильный маятник, $f \sim 1 \text{ c}^{-1}$) и среднечастотных (резонансные изгибные колебания, $f \sim 10^3 \text{ c}^{-1}$) измерениях амплитудных и температурных зависимостей ВТ.

Изучение деформационной деградации. Распространенным видом внешнего воздействия, приводящего к разрушению, является силовое воздействие, деформирование. Изучали температурные зависимости ВТ (ТЗВТ) деформированных сплавов системы Fe–C. На ТЗВТ идентифицировали неупругие эффекты (деструкционный, Снука, Снука–Кэ–Кестера, зерногравийный). Оценку их количественных параметров проводили, используя компьютерную обработку. Сложные пики разделяли на унимодальные и определяли их термоактивационные параметры (Q^1_m , T_m , Q^1_f , ΔH). Исследовали динамику изменения этих параметров от степени предварительной деформации [19].

Деградация. Анализ результатов эксперимента. Совместный анализ параметров неупругих эффектов (деструкционного, Снука, Кестера) позволил впервые физически обоснованно описать этапы развития деградации малоуглеродистых сталей в ходе их деформирования в диапазоне 0 до 25 %: 1) деформация со степенями 0–3 % ведет к уменьшению концентрации атомов C и N в твердом растворе в 3 раза (от $9 \cdot 10^{-4}$ до $2,7 \cdot 10^{-4}$ мас. %); 2) деформация со степенями от 3 до 6 ± 8 % ускоряет рост количества подвижных дислокаций и приводит к превалированию этого процесса над процессом блокировки дислокаций примесными атомами; 3) увеличение деформации до степеней 8 ± 10 и далее до 13 % формирует заблокированные дислокационные группы. Растущая в 4 раза энергия связи дислокаций в группах с атомами внедрения ($E_{\text{св.}}$ от $2 \cdot 10^{-19}$ до $8 \cdot 10^{-19}$ Дж) свидетельствует об ужесточающейся блокировке. Дислокационные скопления, в ходе силового воздействия, становятся зонами концентраций внутренних напряжений, стимулирующих развитие микротрещин. Итогом указанной последовательности процессов является переход в ПС, а затем микро- и макроскопическое разрушение образцов [20].

Таким образом, исследования и анализ релаксационного спектра ВТ позволили количественно описать субструктурные изменения в ходе деградации. Это является основой для ускоренных испытаний, имитирующих эксплуатационные воздействия, с четко определенным уровнем развития деградации. Параметры указанных неупругих

эффектов могут служить критериями эквивалентной поврежденности при сравнении материалов с разными уровнями поврежденности.

Деструкция. Следующим этапом применения метода ВТ являлось изучение перехода деградированного материала в предельное состояние (ПС) и начала деструкции. Считали что, переход в ПС и разрушение активизируются в локализованных зонах концентрации внутренних напряжений (ЛЗКН) у структурных дефектов и дефектов поврежденности. Под ПС понимали состояние материала, в котором рост (перераспределение) микронискажений вблизи дефектов поврежденности, обеспечивая изменение их геометрии и количества, ведет к локальному разрушению (ЛР) и необратимому изменению физико-механических свойств материала.

С позиций физики прочности предельность состояния материала при внешнем воздействии отражает способность к релаксации внутренних пиков напряжений посредством микропластической деформации. Наблюдение за параметрами таких релаксационных процессов позволяет контролировать наступление ПС и начало локального разрушения.

Наиболее перспективным методом измерения релаксационных эффектов является метод внутреннего трения (ВТ). Известный своей чувствительностью и избирательностью к конкретным релаксационным процессам, метод ВТ позволяет не только идентифицировать механизм, формирующий релаксационный эффект, но и с высокой точностью оценить его энергетические характеристики [9].

Несмотря на широкое распространение метода ВТ в России и за рубежом, сведения о связи его спектра с наличием структурных дефектов крайне ограничены. Механизмы фиксируемых при локальном разрушении неупругих эффектов не были разработаны и, как правило, идейно не связывались с развитием разрушения.

Деструкция. Теория. Критический анализ литературы позволил предположить существование специфического 'неупругого' эффекта, обусловленного изменением дислокационной динамики в локальных зонах концентрации напряжений (ЛЗКН). За механизм, формирующий подобный эффект в деформированных металлах, приняли термофлуктуационное образование и взаимодействие дислокационных перегибов. На основе представлений П. Бордона, А. Зегера, Г. Донта, Брайлсфорда и др. применительно к модели трещины А.Х. Коттрелла в трактовке В.И. Владимирова и Ш.Х. Ханнанова был теоретически обоснован механизм поведения дислокаций именно в ЛЗКН (индуцированного микронапряжениями изменения их динамики) [21].

Деструкция. Результаты эксперимента. На основе разработанной модели, а также на базе анализа экспериментальных результатов ВТ поврежденных сплавов системы Fe–C были сформулированы представления о релаксационных критериях локального ПС.

Исследования ВТ поврежденных образцов проводились на модельных сплавах, промышленных мало-, средне- и высокоуглеродистых сталях, экономно легированных строительных и трубных сталях, подвергнутых деформационному, коррозионному и коррозионно-силовому воздействиям.

Цикл «деструкционных» исследований включал в себя: а) теоретическое моделирование динамики дислокаций в микрообъемах локальной концентрации напряжений у дефектов поврежденности; б) структурное моделирование в среде с распределенными ЛЗКН у дефектов поврежденности заданной геометрии; в) экспериментальную проверку теоретической модели; г) разработку релаксационных критериев предельного состояния; д) апробацию указанных критериев на образцах, поврежденных различными воздействиями; е) создание прогнозных моделей, связывающих релаксационные кrite-

рии ЛПС и интенсивность внешних воздействий; ж) испытания релаксационных критерев на промышленных объектах; з) разработку вероятностных моделей, связывающих релаксационные критерии ЛПС и интенсивность эксплуатационных воздействий.

В соответствии с модельными представлениями, для ОЦК-решетки рассчитали характеристики ожидаемого неупругого эффекта: величину ВТ и время релаксации субмикротрещины, осциллирующей в поле периодических напряжений в вершине концентратора. Определили энергию активации данного процесса и прогнозируемый температурно-частотный диапазон его развития.

Эксперименты, в инфразвуковом и среднечастотном интервалах подтвердили работоспособность модели.

Для структурного моделирования использовали серые чугуны с различной формой графитных включений, имитирующих дефекты поврежденности. Это гарантировало присутствие структурных дефектов известного типа и геометрии.

Анализ ВТ чугунов полностью подтвердил работоспособность теоретической модели, включая четкую связь параметров деструкционного неупругого эффекта с уровнем микронапряжений и интенсивностью внешнего воздействия [22].

В качестве релаксационных критериев ЛПС использовали количественные характеристики деструкционного эффекта: высоту максимума, его температурное положение, фоновое значение ВТ.

Завершающим этапом разработки была апробация релаксационных критериев на промышленных сталях, подвергнутых силовому, коррозионному и комплексному коррозионно-силовому воздействиям.

Измерения ВТ углеродистых сталей после различных видов деформирования подтвердило действенность релаксационных критериев и однозначно связало их изменение с переходом материала в ПС.

Экспериментально выявили прогнозируемую моделью сложную структуру релаксационного процесса. Фиксация парциальных пиков, формирующих деструкционный максимум, подтвердила заложенную в модели возможность выявления вкладов отдельных механизмов в общий релаксационный процесс. Впервые экспериментально было доказано существование внутренней структуры диссилативного процесса, отражающего переход материала в ПС в ходе деформации. Были выявлены критические уровни действующего фактора (степени предварительной деформации), разделяющие переход в ПС и начало ЛР.

Несмотря на различную природу внешних воздействий, предполагали универсальность разработанного НЭ в отображении развития как деформационной, так и коррозионной поврежденности.

Результаты анализа ВТ наводороженных опытных сплавов и промышленных сталей подтвердили действенность модельных представлений [21]. Релаксационные критерии были четко связаны с длительностью воздействия, количеством и геометрией коррозионных трещин.

Таким образом, был показан универсальный характер механизма рассеяния энергии (ВТ) в сплавах системы Fe—C при их переходе в ПС и развитии локального разрушения вне зависимости от природы внешнего воздействия. Несмотря на специфику протекания деградационных и деструктивных процессов, сопровождающих переход материала в ПС и его развитие, специфику кинетики этих процессов — механизмы диссиляции энергии имеют сходную природу, что проявляется в формировании типичных неупругих эффектов.

Комплексное коррозионно-силовое воздействие привело к аналогичному результату. Диапазон развития деструкционного неупругого эффекта, связь локальных критерев с интенсивностью воздействия (степенью предварительной деформации и дли-

тельностью наводороживания) отражали переход материала в ПС и начало локального разрушения.

Впервые выявили превалирующее влияние одного из совместно действующих факторов (пластическая деформация и длительность наводороживания) на параметры комплексного релаксационного процесса. Это позволяет оценить индивидуальное влияние различных по природе деструктивных процессов на механизм рассеяния.

В тоже время, дефекты поврежденности, вне зависимости от своей природы, являясь результатом локализации и последующей релаксации внутренних напряжений, сохраняют между собой некую общность в качестве элементов единой диссипативной системы. Этот вывод служит фундаментом дальнейшего использования разработанного инструментария и всей методологии для обоснования более сложных синергетических моделей, описывающих сложные системы наноразмерных объектов.

Полученные результаты подтвердили возможность использования параметров деструкционного эффекта ВТ в качестве релаксационных критериев локального ПС и начала микроразрушения. На этой основе были разработаны вероятностные модели, изменения релаксационных критериев ПС от величины внешнего действующего фактора [17].

Для подтверждения работоспособности релаксационных критериев параллельно независимыми методами анализировали изменения дислокационной динамики в ходе активного нагружения. Комплексно оценивали стадийность деформационного упрочнения, деформационную поврежденность, изменения параметров тонкой структуры и релаксационных критериев от внешнего действующего фактора [22–25]. Подтверждением работоспособности релаксационных критериев являлось полное совпадение критических значений деформации для всех перечисленных параметров.

Указанная проверка действенности релаксационных критериев для оценки деформационной поврежденности в ходе нагрузления выявила параллельное развитие двух процессов: деформационного упрочнения и повреждаемости.

Заключительным этапом исследований была промышленная апробация релаксационных критериев. Их использовали для изучения эксплуатационной поврежденности промышленных объектов (труб продуктопроводов, тяжело нагруженных деталей кранового оборудования).

Выявили, что ведущим процессом развития поврежденности продуктопроводов является деформация от силового действия на стенки трубы движущихся масс нефтепродуктов. Дополнительный вклад в деструкцию вносит коррозионное растрескивание при эксплуатационном наводороживании. Таким образом, подтвердили возможность дифференцирования вкладов от внешнего воздействия различной природы. Полученные результаты позволили разработать для изученных трубных сталей вероятностные модели, учитывающие изменение релаксационных критериев, характеристик механических свойств от длительности эксплуатации [26].

Выводы

1. Показана возможность наблюдения, количественного описания и прогнозирования методом ВТ деградации и деструкции поврежденных различными способами сплавов системы железо-углерод.
2. Получены физически обоснованные описания процессов, контролирующих субструктурные изменения в ходе деградации и деструкции.
3. На основе представлений релаксационного ВТ создана модель изменения дислокационной динамики, в локальных зонах концентрации напряжений у дефектов поврежденности.

4. Разработаны, экспериментально и промышленно апробированы релаксационные критерии перехода металла в локальное ПС (ЛПС) в условиях деформационного, коррозионного и комплексного воздействий.

5. Показан универсальный (независимо от природы воздействия) характер процесса рассеяния энергии при переходе изученных сплавов в ЛПС.

6. Выявлена возможность и с помощью ВТ проведена оценка превалирующего влияния одного из совместно действующих деструктивных факторов (определение ведущего процесса).

7. Разработанные вероятностные модели, изменения релаксационных критериев ЛПС от интенсивности внешнего воздействия, служат основой прогнозирования деградации и деструкции промышленных объектов.

8. Предложенный метод может быть использован для экспертизы состояния материала и разработки критериев эквивалентной поврежденности при ускоренных испытаниях.

Список литературы

1. Блантер М.Е. Теория термической обработки. - М.: Металлургия, 1984. -328 с.
2. Куманин В.И., Соколова М.Л., Лунева С.В. Развитие повреждаемости в металлических материалах // МиТОМ. – 1995. – №4. – С. 2-6.
3. Одинг И.А., Либеров Ю.М. Накопление дефектов и образование субмикротрешин при статическом растяжении армко-железа // Изв. АН СССР. Металлургия и горное дело.- 1964.- № 1. - С. 113-116.
4. Одинг И.А., Либеров Ю.М. Появление субмикроскопических трещин в статически деформируемых пластичных материалах // Металлургия и горное дело.- 1964.- № 2.-С. 85-91.
5. Одесский П.Д. О деградации свойств сталей для металлических конструкций/Заводская лаборатория. Диагностика материалов.-2003.-Т.69.-№10.-С. 41-49.
6. Рыбакова Л.М. Деструкция металла при объемном и поверхностном пластическом деформировании // МиТОМ.- 1980.- № 8.- С.17-22.
7. Черемской И.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. – М.: Энергоатомиздат, 1990.-376 с.
8. Криштап М.А., Головин С.А. Внутреннее трение и структура металлов. – М.: Металлургия.- 1976. – 376 с.
9. Метод внутреннего трения в металловедческих исследованиях. // Справ. изд. / Блантер М.С., Пигузов Ю.В., Ашмарин Г.М. и др. - М.: Металлургия, 1991. - 248 с.
10. Яковлева Т.Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов. - Киев: Наук. думка.-2003.-236 с.
11. Горынин И.В., Тимофеев Б.Т., Сорокин А.А. Вероятностный анализ механических свойств материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000// Пробл. прочности.-2006.-№2.-С.15-28.
12. Трощенко В.Т. Нелокализованное усталостное повреждение металлов и сплавов. // Deformation & Fracture of Materials -DFM2006/Book of articles – Moscow: Interkontakt Nauka, 2006, P. 5-13.
13. Klesnil M., Lukas P. Fatigue of metallic materials. Prague: Academia, 1980.-239 p.
14. Трощенко В.Т. Усталость и неупругость металлов. - Киев: Наук. думка, 1971.-267 с.
15. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. - Киев: Наук. думка, 1981.-343 с.
16. Tanaka K., Nishijima S., Matsuoae T., Abe T., Kouzu F., Low- and high-cycle fatigue properties of various steels specified in JS for Machine structural use // Fatigue of Eng. Mat. and Str.- Vol. 4 (1981).-№ 1.-P. 97-108.
17. Чуканов А.Н., Левин Д.М., Муравлева Л.В. Внутреннее трение как мера локальной поврежденности металлических материалов//Известия РАН. Серия Физическая. - 2000.- Т.64 .- № 9.- С. 1714 - 1717.

- 84
18. Чуканов А. Н. Оценка состояния материала путем комплексного анализа неупругих эффектов в спектре внутреннего трения // Конденсированные среды и межфазные границы.- Воронеж, - 2006 - Т. 7 - № 4 . - С. 450-453.
 19. Левин Д.М., Чуканов А.Н. Влияние локализованных напряжений, создаваемых структурными дефектами, на динамику дислокационных скоплений// Известия РАН. Серия физическая.-2005.-Т.69 . № 8 . - С. 1201 – 1205.
 20. Левин Д.М., Чуканов А.Н., Муравлева Л.В. Спектр внутреннего трения чугунов//Изв. Тульского государственного университета. Серия Физика. Вып. 1, - ТулГУ. Туда. - 1998.-С. 72-75.
 21. Левин Д.М., Чуканов А.Н., Муравлева Л.В. Исследование неупругих свойств материалов, содержащих дефекты водородной поврежденности// Известия ТулГУ. Материаловедение. - 2000. -вып. 1. -С. 48 - 51.
 22. Чуканов А.Н., Левин Д.М. Влияние деформационной поврежденности на параметры тонкой структуры и механическое состояние сталей//Конденсированные среды и межфазные границы.-Воронеж, 2003. -Т.5 - Вып. 3. - С. 328 - 332.
 23. Чуканов А.Н., Солдатова Е.И. Аналитическое описание диаграмм деформации и накопление повреждаемости малоуглеродистой стали//Известия ТулГУ. Материаловедение. - 2000. - вып. 1. -С. 151 - 155.
 24. Чуканов А.Н. Деформационная восстановительная обработка сортового проката углеродистых сталей//Известия ТулГУ. Серия: Материаловедение.-2002.-вып. №.2 . - С. 68-71.
 25. Левин Д.М., Чуканов А.Н., Муравлева Л.В. Релаксационные критерии в прогнозировании остаточного ресурса промышленных объектов//Вестник Тамбовского государственного университета. Сер. Естественные и технические науки.-Тамбов, 2003.-Т 8.-Вып. 4.- С. 634 - 637.
 26. Чуканов А.Н., Левин Д.М. Описание локального предельного состояния металлов на основе параметров неупругих эффектов// Deformation & Fracture of Materials -DFM2006/Book of articles – Moscow: Interkontakt Nauka, 2006, Р. 747-750.

УДК 541.34:669.28

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ

Лесюк Е. А.

Московский государственный индустриальный университет
lesyuk@elsite.ru

Ультразвуковая упрочняющая обработка (УЗО) является весьма напряженным в тепловом отношении методом обработки металлов и сплавов. Для предотвращения рекристаллизационных процессов вnano- и микроструктурах предложены высокoeffективные системы охлаждения. Проведено экспериментальное исследование влияния разных видов охлаждения при УЗО на структуру и прочностные характеристики поверхности обработанных деталей.

Для процесса ультразвуковой обработки требуется ультразвуковой генератор, магнитострикционный или пьезострикционный преобразователь, станок и приспособление, фиксирующее преобразователь на суппорте станка. Вид установки для применения данного вида обработки приведен на рис. 1.