

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ПУТЕМ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА НЕУПРУГИХ ЭФФЕКТОВ В СПЕКТРЕ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

© 2005 А. Н. Чуканов, И. В. Пуханова

Тульский государственный университет

Поступила в редакцию 11.10.04

На основе интегрированного описания максимумов внутреннего трения (Снука, Снука-Кэ-Кестера, декструкционного) оценивали степень деградации и декструкции образцов углеродистой стали. Предлагается использовать комплекс характеристик указанных неупругих эффектов для прогнозирования этапов перехода материала в локальное предельное состояние (ЛПС), а также для структурно обоснованного воспроизведения эксплуатационных воздействий при их экспериментальном моделировании.

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей физики прочности является прогнозирование начала разрушения материалов, позволяющее оценить ресурс изделий. Это объясняет растущий интерес металлофизиков к изучению проблемы перехода материала в локальное предельное состояние (ЛПС). Для оценки прочности материала при неоднородном напряженном состоянии в механике разрушения используют градиентный подход (градиентный критерий прочности) и оценку эквивалентных напряжений (удельная рассеянная энергия). Такие методы при всех ограничениях для воспроизводимости полей напряжений с учетом их концентрации и градиента не учитывают массо- и теплообмена в материале, сложность структурных изменений (деградации и декструкции).

Реальный и более близкий к практике путь обоснованного прогноза предельного состояния, локальной поврежденности и разрушения - определение стандартных характеристик механических свойств, используемых в расчетах прочности, на образцах, имеющих уровень деградации и декструкции (поврежденности), соответствующий натурным условиям эксплуатации. Необходима предварительная тарировка контролируемого уровня накопления повреждений (имитация процесса в ходе ускоренных испытаний образцов в лабораторных условиях).

Для этого нужен критерий эквивалентности, позволяющий оценить материалы с разными уровнями поврежденности. Предлагается использовать в качестве меры локальной поврежденности и начала разрушения (критерия эквивалентности поврежденности) комплекс параметров неупругих эффектов, связанных с переходом материала в ЛПС.

Несмотря на различную природу процессов, контролирующих конструктивную прочность при эксплуатационных воздействиях, можно выделить основные последствия их реализации. Это деградация и декструкция структуры (изменение концентрации основного твердого раствора; изменение состава и морфологии включений; образование и развитие микро- и макронесплошностей).

Перспективным направлением контроля за состоянием материала (наблюдением его перехода в ЛПС) и прогнозирования начала локального разрушения является фиксация развития деградационных процессов. Последние непосредственно связаны с диффузией собственных и примесных атомов, а также взаимодействием других дефектов кристаллической структуры. Одним из наиболее эффективных методов наблюдения деградационных процессов является фиксация релаксационных эффектов в ходе дислокационно-примесного взаимодействия по результатам измерения внутреннего трения (ВТ). В ходе развития деградации и декструкции в деформированном

железе и малоуглеродистых сталях в диапазоне 20...400 °С возможна фиксация следующих неупругих эффектов: максимумов Снука, Снука - Кэ - Кестера [1], а также специфического деструкционного максимума, имеющего место в поврежденных образцах [2, 3].

Целью настоящей работы являлась оценка возможности комплексного анализа проявлений и количественных параметров перечисленных неупругих эффектов для контроля за развитием деградации и деструкции в сплавах на базе α -Fe.

Теория. Релаксация Снука. При анализе эффекта Снука учитывали, что он является следствием упорядочением под напряжением диффузии атомов внедрения в кристаллической решетке α -Fe [1]. В итоге формируется состояние с локальным упорядочением атомов азота и углерода (ближний порядок). До нагружения атомы N и C располагаются в междоузлиях ОЦК – решетки, например, на середине ребер элементарной ячейки статистически равномерно. Под действием напряжений происходит постепенное перераспределение указанных атомов. Они стремятся занять междоузлия на ребрах вдоль оси нагружения, чем вызывают снижение искажений решетки.

Изменения характеристик максимума Снука позволяют оценить, интенсивность развития деградации материала образца. Основное влияние на изменение параметров максимума Снука (высоту, температурное положение, интенсивность рассеяния) в углеродистых сталях с ОЦК решеткой оказывают следующие факторы: концентрация атомов внедрения в твердом растворе; размер зерна поликристаллов; ориентация решетки.

Концентрация атомов внедрения в твердом растворе. Линейный характер зависимости высоты максимума Снука от концентрации внедренных элементов проявляется тем сильнее, чем выше искажения, создаваемые атомами внедрения. Отклонения указанной зависимости от линейности при низких концентрациях и более слабый её характер при высоких концентрациях вызвано не только перемещением индивидуальных атомов, но так же образованием комплексов групп внедренных атомов (пар, триплетов) за счет их взаимодействия.

$$Q_m^{-1} = k C_m, \quad (1)$$

где k - коэффициент, C_m - содержание атомов внедрения (% по массе).

Размер зерна. С уменьшением размера зерен феррита высота максимумов Снука падает [4]. Известно, что подобное влияние может быть вызвано: появлением различной текстуры при изготовлении мелко- и крупнозернистых образцов, осаждением атомов внедрения на границах зерен и специфическим характером напряженного состояния в кристалле с межфазными границами.

Ориентационная зависимость. Высота максимума Снука зависит от приложенного напряжения в кристаллической решетке [4]:

$$\Gamma = \cos\alpha_1 * \cos\alpha_2 + \cos\alpha_1 * \cos\alpha_2 * \cos\alpha_3, \quad (2)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - углы, образуемые приложенным напряжением с осями куба [100], [010], [001].

Релаксация Кестера. Помимо точечных дефектов (атомы внедрения C и N) в развитии деградации активно участвуют линейные дефекты кристаллического строения - дислокации. Их вклад в работе изучали путем анализа эффекта Кестера. К появлению релаксации Снука - Кэ - Кестера в районе ~ 200 - 400 °С ($f \sim 1$ Гц) приводит холодная пластическая деформация. Эффект Кестера воспроизводится как при нагреве, так и при охлаждении. В его основе лежит взаимодействие подвижных дислокаций, образованных в ходе предварительного деформирования, с примесными атомами. Интенсивность дислокационно-примесного взаимодействия связана, прежде всего, с концентрацией внедренных атомов в твердом растворе и атмосферах, а также с плотностью подвижных дислокаций [5]. Пластическая деформация приводит к отрыву закрепленных дислокаций от примесных атмосфер и росту их подвижности, что способствует росту затухания. С увеличением концентрации твердого раствора максимум Кестера на ТЗВТ растет и достигает насыщения, причем максимальная высота тем больше, чем выше степень предварительной пластической деформации.

Эксперимент. Для реализации поставленной цели провели измерения ТЗВТ образцов малоуглеродистой стали 20. Исследования проводили по резонансной методике в области температур 20 – 400 °С. Частота изгибных колебаний ~ 1 кГц, скорость изменения температуры ~ 2-3 град/мин. Образцы стали 20 (l = 200 мм, d = 8 мм) были изготовлены из горячекатаных калиброванных прутков (d ~ 14мм).

На ТЗВТ исходных образцов при нагреве со скоростью $v \sim 2,5$ град/мин наблюдали два максимума в диапазонах 50...150 С и 210...360 °С, соответственно максим Р1 и Р2 (рис 1). Максимум Р1 симметричен относительно $T_{mP1} \sim 120$ °С. Высота в точке экстремума $Q^{-1}_m \sim 73 \cdot 10^{-4}$. Анализ формы максимума позволяет разделить его на две составляющие: деструкционный максимум (Р1А) и максимум Снука (Р2А).

Максимум Снука – Кестера (Р2) имеет сложную природу. Графическое разделение Р2 позволило выделить два образующих его максимума Р2А и Р2В (азотный и углеродный соответственно). Параметры Р2А: $T_m \sim 260$ °С, $Q^{-1}_m \sim 120 \cdot 10^{-4}$; Р2В: $T_m \sim 320$ °С, $Q^{-1}_m \sim 90 \cdot 10^{-4}$.

Для оценки влияния степени предварительной деформации образцы стали 20, в состоянии поставки деформировали одноосным статическим растяжением до относительной деформации $\epsilon = 2,7$ и $\epsilon = 5\%$. ТЗВТ деформированных образцов стали 20 представлены на рис. 2 и рис. 3.

Предварительная пластическая деформация изменила вид максимума Р2. В диапазоне температур 200 - 400 °С после дефор-

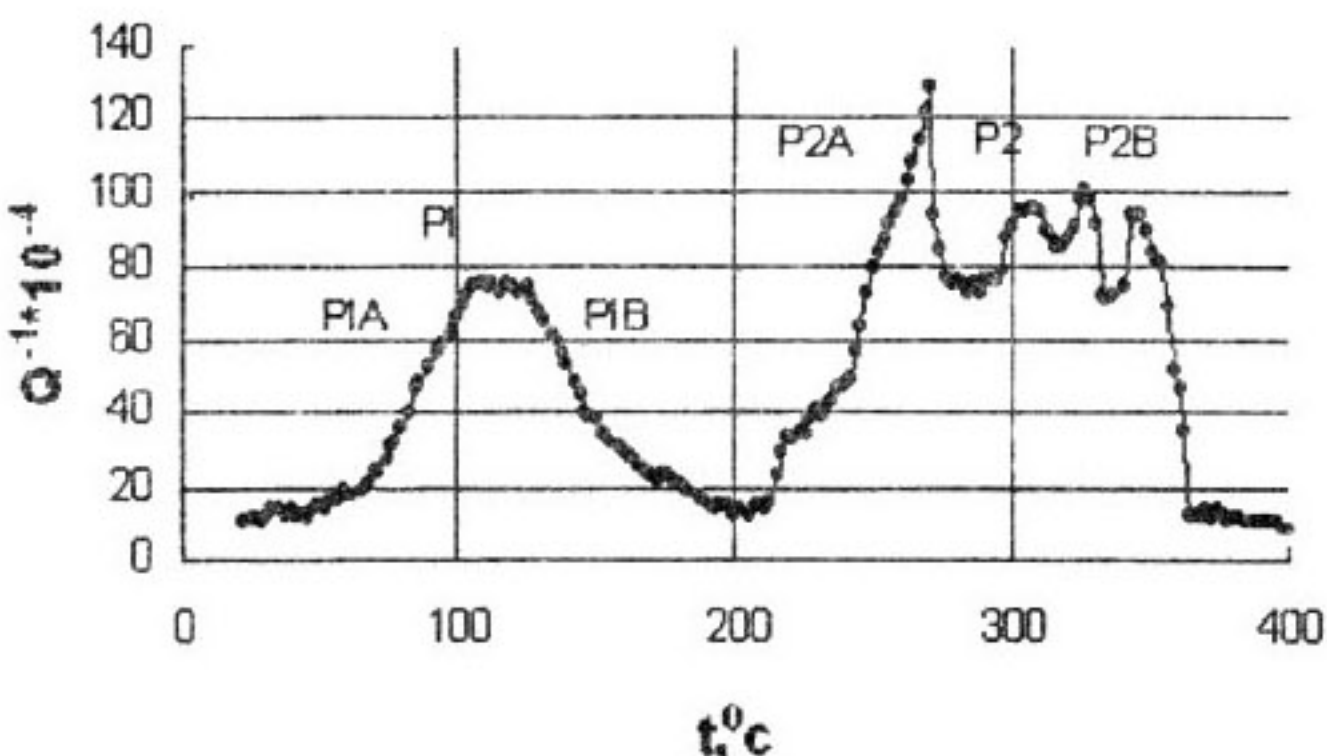


Рис. 1. ТЗВТ стали 20 в исходном состоянии (нагрев).

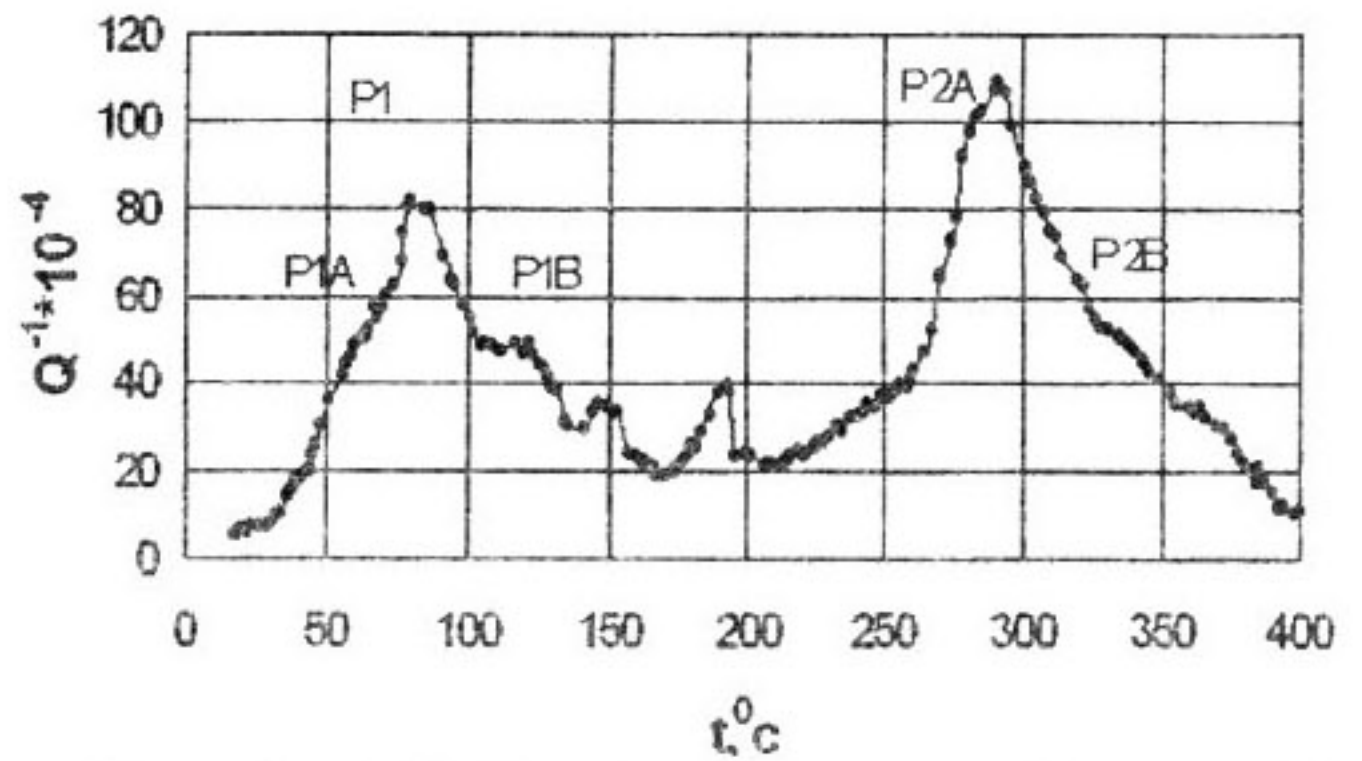


Рис. 2. ТЗВТ деформированной стали 20 ($\epsilon = 2,7\%$, нагрев).

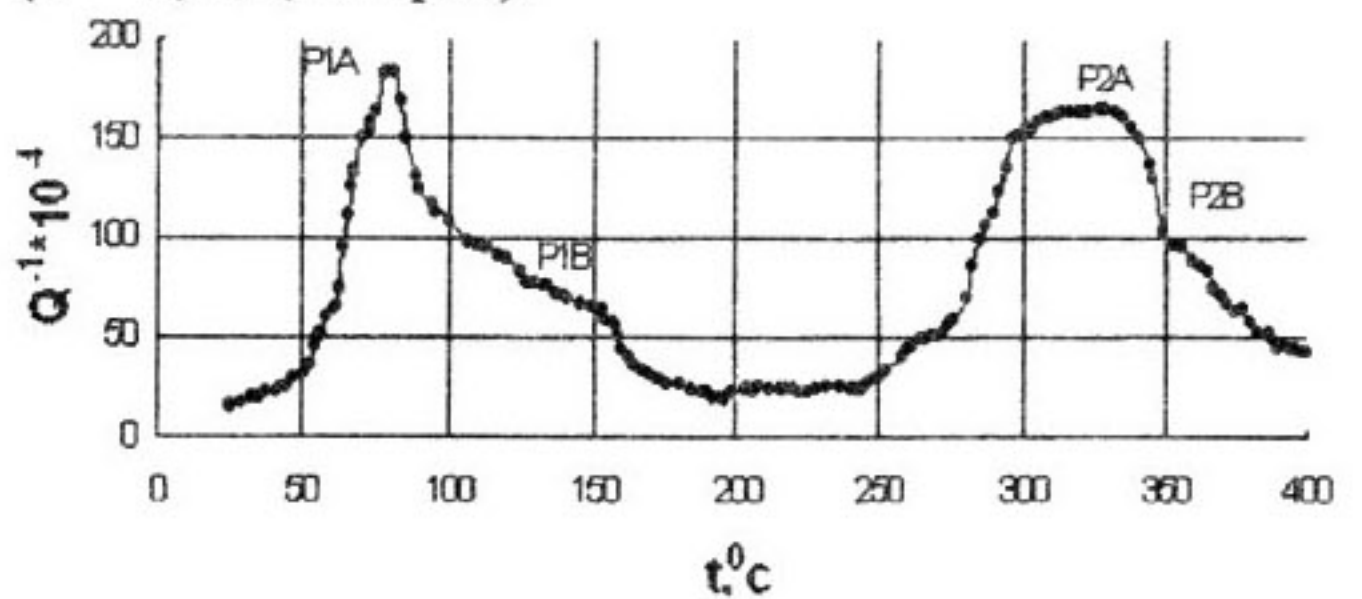


Рис. 3. ТЗВТ деформированной стали 20 ($\epsilon = 5\%$, нагрев).

мации наблюдали одиночный максимум сильно уширенный у основания ($T_m \sim 290$ °С, $Q^{-1}_m \sim 110 \cdot 10^{-4}$). Данный максимум асимметричен. Графический анализ позволяет предположить наличие в высокотемпературной его части ($T \sim 300 - 400$ °С) дополнительной составляющей с параметрами: $T_m \sim 320$ °С, $Q^{-1}_m \sim 45 \cdot 10^{-4}$. Можно допустить, что деформация ведет к усилению роли подвижных дислокаций в деформированной стали 20, которые взаимодействуют с атомами азота. Дополнительный максимум при $T_m \sim 320$ °С, по-видимому, связан с углерод-дислокационным взаимодействием. Возможно, это отражает изменение количества углерода в твердом растворе вследствие растворения частиц второй фазы в процессе измерения.

Рост плотности подвижных дислокаций в процессе предварительной деформации до 2,7 % обеспечивает их более интенсивное взаимодействие с атомами азота (Р2А). Атомы углерода менее активно диффундируют к дислокациям.

Увеличение степени предварительной деформации выше 3% должно усилить жесткость напряженного состояния в вершинах микротрещин и привести к усилению деструк-

ционного максимума P1A. Вместе с тем дальнейшее повышение плотности подвижных дислокаций будет усиливать релаксацию Снука - Кестера. Подобный прогноз полностью оправдывается на образцах, деформированных $\varepsilon = 5\%$ (рис. 3). Графический анализ с большой вероятностью позволяет разделить сложный максимум ВТ P1 на два пика. Температурное положение его низкотемпературной компоненты ($T_m \sim 80^\circ\text{C}$), а также его высота ($Q_m^{-1} \sim 180 \cdot 10^{-4}$) соответствуют активизирующемуся деструкционному максимуму P1A. Его усиление связано с ростом внутренних напряжений в объеме, вследствие повышения степени предварительной деформации.

Высокотемпературная часть максимума P1 предположительно скрывает пик ВТ при $T_m \sim 120^\circ\text{C}$, ($Q_m^{-1} \sim 80 \cdot 10^{-4}$). Температурное положение и характерные особенности позволяют связать его с релаксацией по механизму Снука. Максимум P2 ($T_m \sim 320^\circ\text{C}$, $Q_m^{-1} \sim 160 \cdot 10^{-4}$) по-прежнему остается сложным с параметрами P2A: ($T_m \sim 320^\circ\text{C}$, $Q_m^{-1} \sim 160 \cdot 10^{-4}$) и P2B: ($T_m \sim 340^\circ\text{C}$, $Q_m^{-1} \sim 90 \cdot 10^{-4}$).

Таким образом, увеличение степени предварительной деформации с 2,7% до 5% приводит к росту высоты максимума Снука - Кестера ($T_m \sim 320^\circ\text{C}$). Она составила $Q_m^{-1} \sim 160 \cdot 10^{-4}$. Разница в высотах P2 после деформации до 2,7% и 5% ($\Delta Q_m^{-1} \sim 50 \cdot 10^{-4}$) отражает повышение плотности подвижных дислокаций. Форма максимума P2 после деформации $\varepsilon = 5\%$ аналогична виду ТЗВТ после деформации 2,7%. Графический анализ позволяет предположить наличие пика - спутника при $T \sim 340^\circ\text{C}$. Этот факт делает возможным разделение P2 на P2A ($T_m \sim 320^\circ\text{C}$, $Q_m^{-1} \sim 160 \cdot 10^{-4}$) и P2B ($T_m \sim 340^\circ\text{C}$, $Q_m^{-1} \sim 90 \cdot 10^{-4}$).

ВЫВОДЫ

Вид и параметры ТЗВТ образцов стали 20 в исходном состоянии, а также влияние предварительной пластической деформации свидетельствуют о формировании в диапазоне температур 20 - 400 °С двух максимумов ВТ. Низкотемпературный ($T_{max} \sim 80 - 120^\circ\text{C}$) пик P1 имеет сложную природу, отражающую как изменение дислокационной динамики у вершин микротрещин (P1A - деструкционный максимум, $T_m \sim 85^\circ\text{C}$), так и упорядочение примесных атомов под напряжением по механизму Снука (P1B, $T_m \sim 120^\circ\text{C}$). Высокотемпературный ($T_m \sim 270 \dots 340^\circ\text{C}$) пик P2 отражает релаксацию по механизму Снука - Кестера: взаимодействие подвижных дислокаций с атомами азота и углерода. Проведенные измерения ТЗВТ стали 20 и оценка характеристик эффектов Снука и Снука - Кестера позволяют заключить, что комплексный анализ параметров указанных НЭ позволяет фиксировать развитие дегградации и деструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метод внутреннего трения в металлургических исследованиях/Под ред. М. С. Блантера, Ю. В. Пигузова - М: «Металлургия». 1991. 248с.
2. Левин Д.М., Чуканов А.Н., Муравлева Л.В.//Известия РАН. Серия Физическая. 2000. Т. 64. № 9. С. 1714.
3. Левин Д.М., Чуканов А.Н.//Известия Тульского государственного университета. Серия: Физика. 2003. Вып. 3. С. 17-46.
4. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. М.: Атомиздат. 1975. 472с.