

ВОДОРОДНАЯ ДЕГРАДАЦИЯ И ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

© 2012 А. Н. Чуканов, А. А. Яковенко

Тульский государственный университет, пр-т. Ленина 92, 300600 Тула, Россия

Поступила в редакцию: 20.09.2010 г.

Аннотация. На основе комплексного анализа неупругих эффектов внутреннего трения (Снука, водородного максимума Снука-Кестера, деструкционного эффекта) оценили влияние водородсодержащих сред и роль водорода в развитии деградации и накоплении поврежденности малоуглеродистых сталей. Изучение диффузионной подвижности водорода методом внутреннего трения позволило фиксировать процессы диффузии и молекуляции водорода, ведущие к зарождению и росту микротрещин.

Ключевые слова: углеродистые стали, электролитическое насыщение водородом, деградация, коррозионная повреждаемость, внутреннее трение, температурные зависимости.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленные изделия, узлы и агрегаты, элементы конструкций, как правило, работают в агрессивных водородсодержащих средах (коррозионных, эрозионных). Водород, проникая в металл изделия и абсорбируясь в нем, изменяет химический состав, структуру, а также перераспределяет поля внутренних напряжений. Эти процессы, обобщенные термином «деградация», подготавливают и стимулируют развитие микронесплошностей различного масштабного уровня [1—5].

Перспективным методом, измерения диффузионных характеристик водорода, а также параметров суб- и микроструктуры в ходе развития деградации и деструкции является метод *внутреннего трения* (ВТ).

На температурных зависимостях ВТ (ТЗВТ) фиксируют комплекс неупругих эффектов (НЭ), максимумов, отражающих изменение фазового состава, морфологии фаз, процессы перераспределения растворенных и собственных атомов, формирование суб- и микронесплошностей. Принципиальное преимущество ВТ в фиксации перечисленных процессов на самых ранних этапах деградации [6, 7].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В ходе развития деградации и деструкции сталей, подвергнутых наводороживанию, на ТЗВТ в диапазоне $-100 \dots 200$ °С фиксируют следующие неупругие эффекты: водородный максимум Сну-

ка — Кестера (СК(Н)), максимум Снука, а также специфический деструкционный максимум (Д), имеющий место в поврежденных образцах. Наблюдаемый водородный максимум Снука-Кестера обусловлен диффузией под напряжением атомов водорода вблизи неподвижных атомов кислорода или азота в сталях с ОЦК решеткой. Эффект Снука — следствие упорядочения под напряжением примесей внедрения (атомов азота и углерода) в α -Fe [1]. Появление деструкционного максимума на ТЗВТ связано с изменением дислокационной динамики у структурных дефектов и дефектов поврежденности (микротрещин) [5].

Цель исследования: изучение влияния коррозионного воздействия (насыщения водородом) на развитие деградации и повреждаемости с помощью метода внутреннего трения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Объекты исследования: образцы углеродистой стали 20 и стали марки Ст 3 ($l=200$ мм, $d=8$ мм). Коррозионное воздействие имитировали электролитическим насыщением водородом (катодная поляризация в растворе H_2SO_4 [4]). Интенсивность воздействия варьировали длительностью насыщения ($1 \dots 30$ часов) при плотности тока $j=150$ А/м². Стимуляторы — тиомочевина и роданистый аммоний [4].

Анализировали комплекс параметров НЭ ВТ, полученных в диапазоне от -100 до 200 °С при

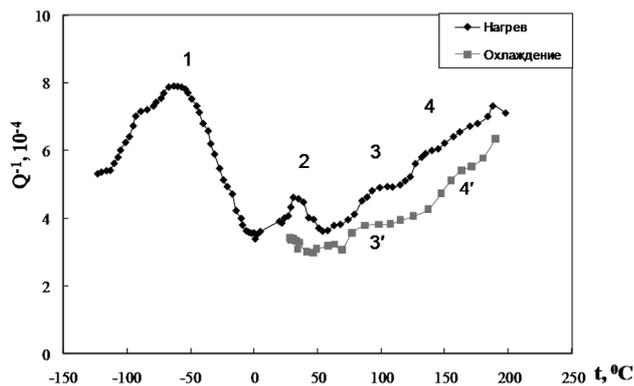


Рис. 1. ТЗВТ наводороженной стали Ст 3 ($j = 150 \text{ А/м}^2$, $\tau = 25 \text{ ч}$)

среднечастотных (резонансные изгибные колебания $f \sim 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) измерениях амплитудных и температурных зависимостей ВТ (АЗВТ и ТЗВТ) (ГОСТ 25156-82). Скорость нагрева 2 град./мин.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На ТЗВТ фиксировали ряд максимумов ВТ (рис. 1): 1 — водородный максимум Снука — Кестера (С-К), 2, 3 — деструкционные максимумы (Д), 4 — максимум Снука (Сн).

Компьютерный анализ максимума 1 позволил выявить два образующих его пика 1А ($T_m = -89,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q_m^{-1} = 1,38 \cdot 10^{-4}$, $H = 11,4 \text{ кДж/моль}$) и 1В ($T_m = -54,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q_m^{-1} = 3,58 \cdot 10^{-4}$, $H = 23,4 \text{ кДж/моль}$). Сложный характер максимума 1 объясняется взаимодействием одиночных атомов водорода (максимум СК_н(а)) и их парных комплексов (СК_н(м)) с геометрическими перегибами на невинтовых дислокациях. Деструкционные максимумы 2 и 3 отражают образование перегибов с винтовой ориентацией (s-типа) (максимум 2) и перегибов с винто-

вой и краевой ориентацией (e-типа) (максимум 3) на дислокациях, расположенных в локальных зонах концентраций напряжений вблизи вершин микротрещин. Анализировали зависимости параметров перечисленных максимумов от длительности электролитического наводороживания (рис. 2, 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Развитие деградации и накопление поврежденности оценивали комплексно по параметрам НЭ ВТ. Вместе с процессами накопления поврежденности в материале происходят деградиционные процессы: перераспределение углерода, взаимодействие атомов внедрения с дислокациями; о которых судим по изменению параметров максимумов Снука, водородного максимума Снука-Кестера, а также по изменению фона ВТ и АЗВТ.

При увеличении длительности наводороживания растет высота максимума СК(Н), что объясняли диффузией атомов водорода в область максимальных трехосных напряжений как следствие градиента химического потенциала. Процесс диффузии атомов водорода протекает до выравнивания химического потенциала во всех областях системы, о чем свидетельствует стабилизация процесса при длительности наводороживания более 15 часов (рис. 2).

Рост величины деструкционного максимума ВТ (рис. 3) объясняется как повышением плотности дислокаций, так и повышением количества дефектов поврежденности в процессе увеличения длительности наводороживания. Уменьшение высоты деструкционного максимума обусловлено формированием перегибов s-типа после 15 часов наводороживания можно связать с тем, что

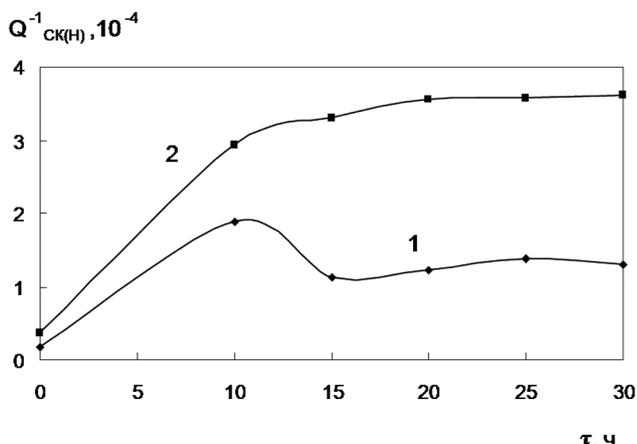


Рис. 2. Зависимость высоты водородного (1 — СК_н(а), 2 — СК_н(м)) максимума Снука-Кестера от времени наводороживания для стали Ст 3 ($j = 150 \text{ А/м}^2$)

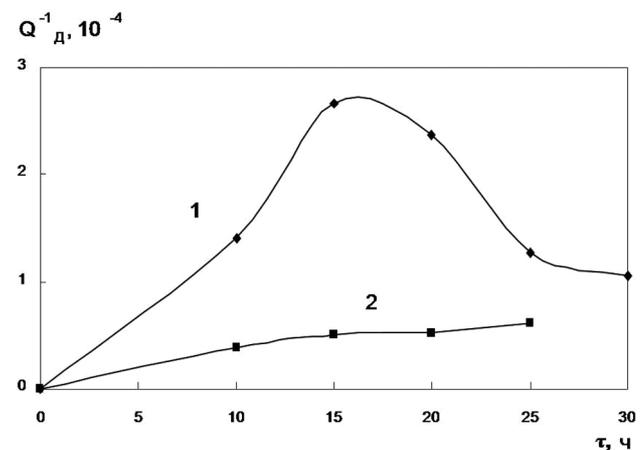


Рис. 3. Зависимость высот деструкционных максимумов (1 — Д(s), 2 — Д(e)) от времени наводороживания для стали Ст 3 ($j = 150 \text{ А/м}^2$)

при насыщении металла водородом возникающие локальные микронапряжения по достижению критического состояния быстро релаксируют за счет образования большого количества субмикротрещин. Максимум $D(s)$ характеризуется более низкой энергией активации и, соответственно, является более вероятным процессом, чем максимум $D(e)$.

Зависимость изменения высоты максимума Снука (рис. 4) подтверждает предположение об образовании углеводородов в результате электролитического наводороживания.

ВЫВОДЫ

Анализ полученных результатов показал, что длительность электролитического наводороживания образцов стали Ст 3 до 15 часов ($j=150 \text{ A/m}^2$) характеризуется интенсивным проникновением водорода в металл (рис. 2), повышением как плотности дислокаций, так и повышением количества дефектов поврежденности, интенсивным ростом плотности микротрещин (рис. 3, 6, 7).

Увеличение фона ВТ (рис. 5) связано с эффектом развития микродеформации при наводороживании, вызванного высоким давлением молекулярного водорода в трещинах.

Микроскопический анализ, выполненный в работе [3] на наводороженных образцах стали Ст 3 (рис. 8), подтверждает последовательность развития процесса накопления поврежденности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтвердили предположение о наличии диффузии атомов водорода к постоянно присутствующим технологическим трещинам и последующую молезазию в них. Контроль за параметрами дислокационно-примесного взаимодействия и изменением дислокационной динамики в окрестностях эволюционирующих микротрещин позволил фиксировать диффузию и молезазию водорода, а также структурные последствия этих процессов. Таким образом, анализ спектра ВТ позволяет эффективно изучать развитие деградации и деструкции в сталях, содержащих водород.

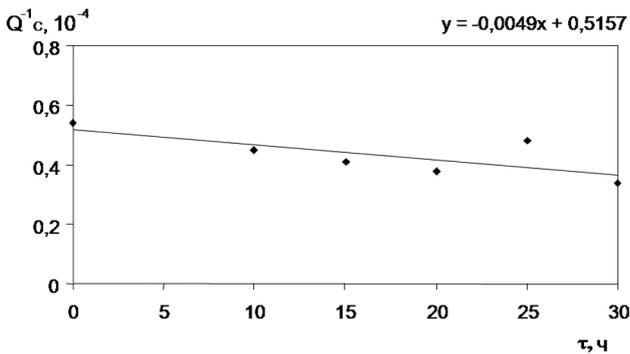


Рис. 4. Зависимость высоты максимума Снука от времени наводороживания для стали Ст 3 ($j=150 \text{ A/m}^2$)

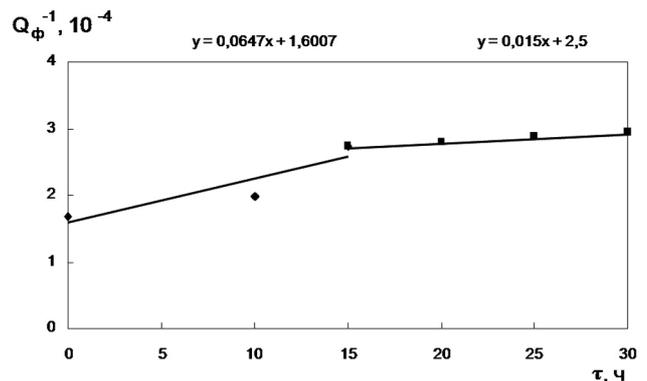


Рис. 5. Зависимость изменения фона внутреннего трения от времени наводороживания для стали Ст3 ($j=150 \text{ A/m}^2$)

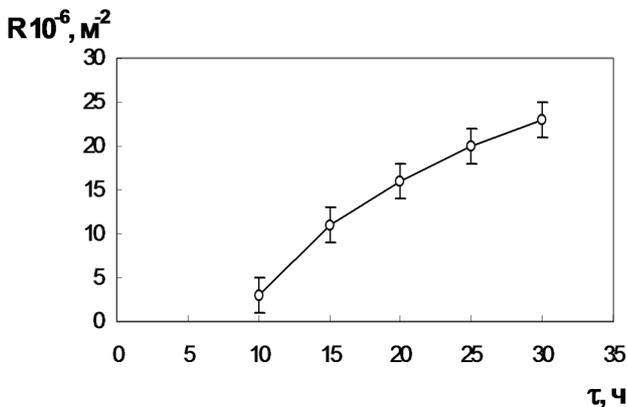


Рис. 6. Зависимость плотности микротрещин от длительности наводороживания для образцов стали марки Ст3 [3]

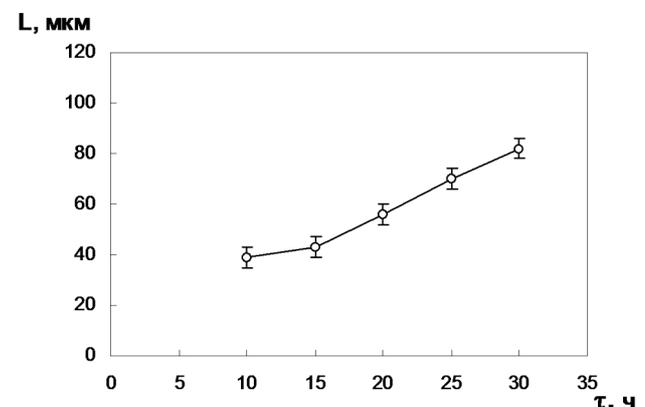


Рис. 7. Зависимость средних длин микротрещин от длительности наводороживания для образцов стали марки Ст3 [3]

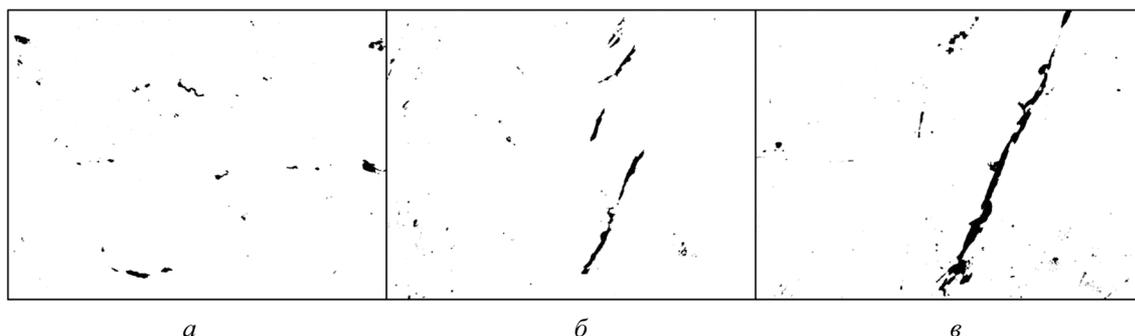


Рис. 8. Развитие дефектов поврежденности в стали Ст 3 при электролитическом наводороживании, $\times 500$ [3]: *a* — $\tau = 10$ час, *б* — $\tau = 20$ ч, *с* — $\tau = 30$ час

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блантер М. С., Головин И. С., Головин С.А. и др. Механическая спектроскопия металлических материалов. М.: МИА, 1994. 256 с.
2. Левин Д. М., Чуканов А. Н., Муравлева Л. В. // Вестник Тамбовского университета. Тамбов. 1998. Т. 3. Вып. 3. С. 315—318.
3. Муравлева Л. В. Диссертация... канд. тех. наук. Тула: ТПИ.
4. Извольский В. В., Сергеев Н. Н. Коррозионное растрескивание и водородное охрупчивание арматурных

сталей железобетона повышенной и высокой прочности. Тула: Изд-во Тул. гос. пед. ун-та, 2001. 163 с.

5. Чуканов А. Н. Физико-механические закономерности формирования предельного состояния и развития локального разрушения в металлических материалах // Автореферат диссертации... докт. техн. наук. Тула: ТулГУ, 2001. 39 с.

6. Чуканов А. Н., Яковенко А. А., Пуханова И. В. // DFM2006/Book of articles. Moscow: Interkontakt Nauka, 2006. P. 82—84.

7. Чуканов А. Н., Яковенко А. А. // Известия ТулГУ. Серия: Естественные науки. 2010. № 1. С. 13—20.

Чуканов Александр Николаевич — д.т.н., профессор, кафедра физики, Тульский государственный университет; тел.: (4782) 332442, e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Chukanov Alexander N. — grand PhD (technical science), professor, department of physics, Tula State University; tel.: (4782) 332442, e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Яковенко Александра Александровна — аспирант, кафедра физики, Тульский государственный университет; тел.: (4782) 332442, e-mail: AlexYakovenk@gmail.com

Yakovenko Alexandra A. — post-graduate, department of physics, Tula State University; tel.: (4782) 332442, e-mail: AlexYakovenk@gmail.com