

В безразмерном виде:

$$\omega(t) = \frac{U(t)}{U_0} = \bar{\omega}^\sigma t = \bar{\omega}^\varepsilon t \leq 1. \quad (11)$$

Очевидно, что при построении оптического критерия практически использовать наиболее простое последнее из соотношений (8), связывающее оптическую разность хода $\delta(t)$ с деформацией $\varepsilon(t)$, и выражение для $\bar{U}^\varepsilon t$ из (10), тогда

$$U(t) = \bar{U}^\delta t = \frac{1}{C_\varepsilon^2 h^2} \int_0^t \bar{R} \delta \frac{d\delta(\rho)}{d(\rho)} d\rho \leq U_0. \quad (12)$$

По идеологии повреждаемости, (12) может быть представлено в форме:

$$\omega(t) = \bar{\omega}^\delta t = \frac{1}{C_\varepsilon^2 h^2 U_0} \int_0^t \bar{R} \delta \frac{d\delta(\rho)}{d(\rho)} d\rho \leq 1. \quad (13)$$

Энергия разрушения U_0 материала может быть определена как площадь диаграммы $\sigma - \varepsilon$ при различных видах деформирования. В случае простых видов нагружения или деформирования (например, а) $\sigma(t) = H(t)\sigma^0$, $\sigma^0 = \text{const}$, $H(t)$ – единичная функция Хевисайда; б) $\dot{\varepsilon}(t) = \text{const}$) критерии принимают вырожденный, простой вид.

Из сравнения (5) и (10) видно, что динамический структурно-временной критерий является частным случаем энергетического, который будет совпадать со структурно-временным, если использовать в нем вырожденное ядро оператора \bar{P} и наложить ограничение на U_0 .

Проведенное сравнение применения предлагаемых критериев с данными статических и динамических опытов по растяжению и отколу стержней из полиметилметакрилата при режимах а), а также по растяжению в статическом диапазоне поликапроамидных нитей при режимах б) показало удовлетворительное согласие. Расхождение между ними не превысило 15 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Партои В.З., Черепанов Г.П.* Механика разрушения // Механика в СССР за 50 лет. Т. 3. Механика деформируемого твердого тела. М., 1972. С. 365-467.
2. *Качанов Л.М.* Основы механики разрушения. М., 1974. 312 с.
3. Разрушение твердых полимеров / Под. ред. Б. Роузена. Пер. с англ. М., 1971. 528 с.
4. *Морозов Н.Ф., Петров Ю.В.* Проблемы динамики разрушения твердых тел. С.-Пб., 1997. 132 с.
5. *Лихачев В.А., Малинин В.Г.* Структурно-аналитическая теория прочности. С.-Пб., 1993. 471 с.
6. *Уржумцев Ю.С., Максимов Р.Д.* Прогностика деформативности полимерных материалов. Рига, 1975. 416 с.
7. *Федоровский Г.Д.* Определяющие уравнения реологически сложных полимерных сред // Вестн. Ленинград. ун-та. 1990. Сер. 1. Вып. 3. № 15. С. 87-91.
8. *Федоровский Г.Д.* Деформирование реологически сложных полимерных сред: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / СПбГУ. С.-Пб., 1998. 15 с.
9. *Александров А.Я., Ахметзянов М.Х.* Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М., 1973. 576 с.

УДК 541.183+ 539.4+669.788+669.38

НАВОДОРОЖИВАНИЕ СТАЛИ КАК СЛЕДСТВИЕ ЕЕ РАЗРУШЕНИЯ

© Ю.А. Хрусталева

Россия, Москва, Институт физической химии РАН

Khrustaleva Y.A. Hydrogen increase in steels as a result of its destroying. The increase of hydrogen concentration in steels is discussed from the point of view of physical and chemical processes accompanying the appearance of fresh surfaces after mechanical decomposition.

К проблеме наводороживания конструкционных материалов и их водородной хрупкости привлечено внимание исследователей вследствие все более широкого использования водорода в технике (удобный энергоноситель космических кораблей, атомная энергетика, высококалорийное топливо и т. п.), что важно и с точки зрения улучшения экологии (в частности, радиационная очистка сточных вод).

Известно, что проникновение водорода в металл часто приводит к ухудшению эксплуатационных свойств. Особенно сильно уменьшается сопротивление механическим напряжениям из-за снижения пластич-

ности. Водород способен образовывать с металлом новую фазу – гидриды. В двух- и трехмерных дефектах он молизуется, повышая внутреннее давление газа в деталях машин. При взаимодействии с углеродом возникает метан, что ведет к обезуглероживанию сталей и дополнительно повышению внутренних напряжений. Конечным результатом накопления водорода в металле является резкое снижение прочности и долговечности деталей и хрупкое катастрофическое их разрушение (водородная хрупкость).

Автор проблему наводороживания конструкционных материалов на примере сталей рассматривает с

позиций их разрушения. Разрушение твердого тела (металла) имеет следствием разрыв составляющих кристаллическую решетку химических связей. В работе [1] приводится обобщенная схема физических явлений и химических процессов, наблюдающихся при механическом воздействии на твердые тела вплоть до их разрушения. И хотя в этой работе обсуждаются диэлектрические твердые тела, многие физико-химические проявления характерны и для проводящих материалов – металлов. Свежие поверхности разрушения материала следует рассматривать как возбужденные (имеющие свободные нескомпенсированные химические связи), излучающие (электроны, ионы, электромагнитные волны), а отсюда – как неравновесные системы. Поэтому их физические и химические свойства, особенно в первоначальный момент жизни после возникновения, в значительной степени отличаются от свойств обычной поверхности, находящейся в статическом неизменном состоянии в данных условиях.

Равновесные поверхности металла в обычных комнатных или природных условиях содержат адсорбированные влагу и газы атмосферы и практически не проявляют интереса к химическим реакциям даже, к примеру, к кислотным дождям (наличие во влажном воздухе и дождевой воде растворимых газов – CO_2 , NO_2 , SO_3 и т. п.). Но даже единственная царапина (песком, камнем) стали, обнажая металл, при контакте с кислотой может спровоцировать, например, реакцию $\text{Fe} + \text{H}_2\text{SO}_4 \Rightarrow \text{FeSO}_4 + \text{H}_2$, т. е. приводит к появлению водорода. Данный химический путь – есть первый источник возникновения водорода.

Другой механизм образования водорода – диссоциативная ионизация молекул водорода под воздействием электронов, эмитируемых из зоны развивающейся микротрещины при механических напряжениях различного происхождения. Нами было установлено [2], что электроны, эмитируемые со свежей поверхности скола кристаллов, способны разрушать молекулы воды, адсорбированные на их поверхности до раскола или даже находящиеся вблизи кристалла, по механизму диссоциативной ионизации. Аналогичные результаты были получены и при сухом трении и износе ряда железосодержащих сплавов [3]. Методом масс-спектрометрии была убедительно доказана связь между ионным током водорода при царапании пластин различных металлов и взаимодействием воды с поверхностями исследованных образцов. Так, в случае нержавеющей стали адсорбированные молекулы воды испытывают весьма слабые связи со сталью, когда они частично диссоциированы с образованием гидроксильных групп. По этой причине количество водорода при царапании образца нержавеющей стали в сравнении со сталью Ст3 выше в аналогичных условиях эксперимента. Поскольку титан способен легко поглощать водород, при возникновении трещины водород вовсе не наблюдался [3]. Работы [2, 3] подтвердили возможность диссоциации молекул воды под влиянием потока электронов с возбужденных, неравновесных и излучающих поверхностей разрушения сталей.

При фрикционном взаимодействии конструкционных сталей с биомассой количественные данные о поглощенном ими водороде сравнивались с помощью оригинальной высокочувствительной установки (ИФХ АН СССР) с точностью до 10^{-4} мм рт. ст. методом вакуумной термодесорбции [4] диффузионно-подвижного водорода. Результаты исследования однозначно

подтвердили, что в процессе трения стали с биомассой происходит наводороживание металла. А источником водорода служит содержащаяся в биомассе вода: чем ее выше (влажнее зерно), тем больше в одинаковых условиях эксперимента в металле накапливается водород (содержание водорода увеличивается для разных случаев в 2 – 10 раз). В указанных опытах, однако, механизм распада молекул воды отличается от приведенного в [2, 3]: проявляется третий путь образования водорода из воды – каталитический. Содержащиеся в стали металлы переходных групп таблицы элементов Менделеева способны катализировать процессы диссоциации молекул воды. Трение и вибрация облегчают каталитические процессы разложения молекул воды на поверхности металла. Свежие поверхности разрушения (например, царапины от песка или камня) режущих кромок сельскохозяйственных уборочных машин способны наводороживаться по механизму каталитического разложения молекул воды в значительной степени и потому требуют частого ремонта или замены. Некоторые другие каталитические реакции образования водорода из молекул воды и полимерных материалов описаны в работе [5].

Рассмотрим еще один путь – электрохимический. В случае металлов электродами могут служить мозаично заряженные участки из-за наличия примесей или дефектов структуры свежих поверхностей разрушения. При этом разность потенциалов может достигать значений, достаточных для протекания электролиза (в электролите кислотного дождя) воды. Процессы электрохимической атмосферной коррозии металлов, приводящие к появлению ионов водорода, подробно рассмотрены во многих монографиях, например, в [6]. Электрохимическая обработка металлов также приводит к наводороживанию стали [7].

Физико-химические процессы получения водорода из воды обобщены в монографии [8].

Разложение воды может быть осуществлено и при воздействии ионизационного излучения [9], когда промежуточные возбужденные молекулы воды диссоциируют по различным механизмам с возникновением свободно-радикальных продуктов и гидратированного электрона.

В принципе источниками водорода служат все содержащие этот элемент органические и неорганические вещества [5].

Итак, автор предлагает следующую схему наводороживания стали:

- нарушение сплошности металла (трещины, микроразрушение);
- образование свежих, неравновесных, возбужденных и излучающих поверхностей;
- диссоциация молекул воды при химическом взаимодействии, электронном излучении, каталитических и электрохимических процессах на поверхности разрушения металла с образованием атомарного водорода или протонов;
- адсорбция атомов и ионов водорода свежей поверхностью;
- диффузия их вглубь металла;
- создание в кристаллической решетке новых фаз с участием водорода;
- достижение критических концентраций водорода в металле;
- водородное охрупчивание металла – его хрупкое разрушение.

Таким образом, разрушение металла может вызвать его наводороживание и в конце концов новое водородное охрупчивание. Естественно, что происходят и обратные процессы разводороживания металла, которые могут быть прерваны на любой стадии наводороживания.

В наших работах [10, 11] на примере системы колесо – рельсы железнодорожного транспорта исследовались процессы наводороживания поверхности катания колеса, распределение диффузионно-подвижного водорода по глубине и возможности предотвращения неизбежного, но более отдаленного по времени эксплуатации, наводороживания колесной стали. Предлагаемые в этих работах технологические приемы позволили увеличить пробег колеса в 3 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варенцов Е.А., Хрусталев Ю.А. Механозмиссия и механохимия молекулярных кристаллов органических веществ // Успехи химии. 1995. Т. 64. № 8. С. 834-849.
2. Гай А.П., Глазунов М.П., Журавлев Л.Т., Хрусталев Ю.А., Шенгелия К.Я. О причине газовой выделении в процессе механического раз-

рушения твердых тел // Доклады АН СССР. 1984. Т. 277. № 2. С. 388-390.

3. Хрусталев Ю.А., Симаков Ю.С., Глазунов М.П., Губин В.В. Образование водорода при сухом трении металлов // Журнал физической химии. 1989. Т. 63. № 5. С. 1355-1357.
4. Симаков Ю.С., Коган Б.М., Ляхов Б.Ф., Тененбаум М.М., Хрусталев Ю.А., Кауфман С.М. Наводороживание металла при фрикционном взаимодействии с биологической массой // Трение и износ. 1989. Т. 10. № 4. С. 749-750.
5. Хрусталев Ю.А. Физико-химическая концепция наводороживания металлов. Роль эмиссии электронов с поверхности разрушения конструкционных материалов в процессе образования водорода // Эффект безызносности и триботехнологии. 1997. №2. С. 19-35.
6. Розенфельд И.Л., Персианцева В.П. Ингибиторы атмосферной коррозии. М.: Наука, 1985. 278 с.
7. Белоглазов С.М. Наводороживание стали при электрохимических процессах. Л.: ЛГУ, 1973. 411 с.
8. Лебедев В.В. Физико-химические основы процессов получения водорода из воды. М.: Наука, 1969. 134 с.
9. Пикаев А.К. Сольватированный электрон в радиационной химии. М.: Наука, 1969. 457 с.; его же. Современная радиационная химия. Радиолит газы и жидкостей. М.: Наука, 1986. 440 с.
10. Хрусталев Ю.А., Ляхов Б.Ф., Балабанов В.И., Мамыкин С.М. Наводороживание поверхности качения колесной пары // Вестн. машиностроения. 1997. № 11. С. 23-26.
11. Хрусталев Ю.А., Ляхов Б.Ф., Гребенюк М.Н., Терезгеря В.В. Влияние металлоорганической присадки Гретири-3 на наводороживание стали при трении // Вестн. машиностроения. 2000. № 5. (В печати.)

УДК 539.4:537.5

МИГРАЦИЯ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

© Д.Н. Карпинский, С.В. Санников

Россия, Ростов-на-Дону, НИИ Механики и прикладной математики при Ростовском Государственном Университете

Karpinsky D.N., Sannikov S.V. The electrical current influence on the point defects migration at the crack tip. The estimation is realised of the constant electrical current influence on the point defect migration at the crack tip in an alpha-Fe crystal. The computation takes into account the plastic deformation at the crack tip in the loaded sample, Joule heat and the gas-exchange in crack banks. The plastic deformation is caused by dislocation motion in the active sliding crystal planes. Stress relaxation and asymmetry are revealed in point defect distribution induced by an electrical current at the crack tip.

1. В последние годы достоверно установлено наличие резкого снижения сопротивления металла деформированию и повышение его пластичности под влиянием электрического тока большой плотности [1]. В связи с этим представляет значительный интерес исследование эволюции точечных дефектов у вершины трещины при совместном действии сил механического и электрического происхождения. Временная зависимость распределения точечных дефектов в отсутствие электрического тока оценена в [2]. Однако для разработки методов электрохимического наводороживания [3] и других задач важно понимать закономерность влияния электрического тока на прочность образцов, которая существенно зависит от миграции точечных дефектов в них. В этом направлении исследований авторам известна только работа [4], в которой выполнен расчет эволюции распределения атомов водорода, растворенных вблизи надреза в токонесящем стержне, но в этом расчете предполагалось, что внешняя нагрузка не вызывает пластической деформации, и отсутствует накопление газообразной примеси в полости надреза.

Цель настоящей работы заключается в расчете эволюции распределения атомов водорода у вершины тре-

щины в кристалле при решеточной диффузии под действием постоянного электрического тока и механической нагрузки с учетом газообмена на берегах трещины.

2. Исследование эволюции концентрации $c(r, t)$ межузельных атомов примеси и соотношения вкладов дислокационных механизмов в процесс переноса примесных межузельных атомов выполнено в [2]. В этой работе рассмотрена трещина длиной l , расположенная в плоскости скола (010) бесконечного кристалла с объемно-центрированной кубической (ОЦК) решеткой. К плоскостям кристалла $y \rightarrow +\infty$ приложено однородное напряжение растяжения $\sigma_x(t)$ (мода I), монотонно возрастающее до некоторого значения σ_{\max} пластического деформирования кристалла, но недостаточного для роста трещины. Дополним [2] предположением о протекании через кристалл перпендикулярно плоскости трещины постоянного электрического тока плотностью $j(r)$ в удаленной от трещины части кристалла ($j_x(r) = 0, j_y(r) = j_0$ при $r \rightarrow \infty$). Расчет эволюции пластической деформации у вершины трещины аналогичен [2] за исключением вычисления тепловыделения в пластической зоне у вершины трещины. Будем предполагать, что трещина расположена вдоль оси абсцисс, а ее