

УДК 531.8

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ МАТЕРИАЛОВ,
НАКАПЛИВАЮЩИХ ВОДОРОД, ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ
МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

© 2011 г.

Ю.А. Яковлев

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

yura.yakovlev@gmail.com

Поступила в редакцию 15.06.2011

Описывается влияние водорода на конструкционные материалы и приведена качественная модель разрушения материалов содержащих водород при циклическом одноосном нагружении.

Ключевые слова: разрушение материалов, концентрация водорода, циклическое нагружение.

Водород – один из самых распространенных элементов на планете. В металлах и других твердых материалах водород находится в ловушках различной природы. В зависимости от характера распределения водорода по ловушкам и его концентрации материал приобретает определенные свойства. В конструкционных материалах, таких как сталь и алюминий, наличие водорода негативно сказывается на механических свойствах. Если водород способен образовывать с материалом соединения с большой энергией связи, например гидриды, то охрупчивание материала происходит при значительно больших концентрациях, чем в случае отсутствия таких ловушек, когда водород образует соединения с низкой энергией связи или находится в диффузно-подвижном состоянии. Большое влияние на распределение водорода в материале оказывает не только насыщение из внешней среды, но и распределение механических напряжений по материалу.

В процессе механического нагружения материала водород диффундирует в область растягивающих напряжений, в этом заключается эффект Горского. При снятии нагрузки водород может перераспределяться обратно в течение некоторого времени релаксации. Если процесс нагружения материала происходит циклично, то наблюдается накопление водорода в зонах максимальных напряжений. Этот эффект связан с тем, что в процессе нагружения происходит перераспределение водорода по энергиям связи [1]. Если рассмотреть эффект Горского с учетом этого факта, то получится что перераспределение водорода влияет на сам эффект. Может наступить такой момент, когда в зоне растяжения накопится критическая концентрация водорода и при очередном воздействии на изделие произойдет его раз-

рушение.

Двухконтинуальная модель сплошной среды [2] применена к задаче о циклическом одноосном нагружении материала, содержащего водород с различными энергиями связи. В рамках этой модели рассмотрен одномерный случай. Описан эффект перераспределения водорода по энергиям связи при таких нагрузках.

Рассмотрим уравнение баланса частиц связанного и несвязанного водорода в рамках двухконтинуальной модели:

$$\frac{\partial^2 n_H^+}{\partial t^2} + (\alpha + \beta) \frac{\partial n_H^+}{\partial t} - \frac{C_H^2}{k} D(\epsilon_{st}) \left[\beta \frac{\partial^2 n_H^+}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n_H^+}{\partial t \partial x^2} \right] = 0. \quad (1)$$

В уравнении (1) α, β – некоторые константы, $D(\epsilon_{st})$ – коэффициент диффузии, который зависит от деформации ϵ_{st} .

Это уравнение гиперболического типа с движущимся фронтом концентрации связанного водорода. Воспользуемся методом Фурье, тогда переменные можно разделить и получить определяющее уравнение для функции времени $T_{n_H^+}(t)$:

$$\ddot{T}_{n_H^+}(t) + \left(\alpha + \beta + \gamma_x^2 \frac{C_H^2}{k} D(\epsilon_{st}) \right) \dot{T}_{n_H^+}(t) + \gamma_x^2 \frac{C_H^2}{k} D(\epsilon_{st}) \beta T_{n_H^+}(t) = 0. \quad (2)$$

Примем $G(\epsilon_{st}) = C_H^2 / k D(\epsilon_{st}) \gamma_x^2$ и деформацию представим в виде: $\epsilon = \epsilon_1 \sin(\omega t)$. В качестве первого приближения возьмем $D(\epsilon) = D_0 + D_1 \epsilon$ и получим уравнение:

$$\ddot{T}_{n_H^+}(t) + [\alpha + \beta + (G_0 + G_1 \cos(\omega t))] \dot{T}_{n_H^+}(t) +$$

$$+(G_0 + G_1 \cos(\omega t))\beta T_{n^+}(t) = 0. \quad (3)$$

Решение такого уравнения является отдельной задачей и требует применения специальных методов. Однако можно проанализировать его не решая. Величина

$$\omega_0 = \sqrt{G_0\beta} = C_H \gamma_x \sqrt{D_0\beta/k}$$

– собственная частота колебаний величины концентрации водорода с различными энергиями связи внутри материала. Собственная частота зависит от полной локальной концентрации водорода, параметра объемного распределения γ_x и коэффициента β . Со временем концентрация водорода растет, что приводит к увеличению собственной частоты. Следовательно, во время усталостной нагрузки можно достичь состояния, когда собственная частота $\omega_0 = 2\omega$ или

$$C_H = \frac{2\omega}{\gamma_x} \sqrt{\frac{k}{D_0\beta}}. \quad (4)$$

Такая концентрация приводит к неустойчивости (параметрическому резонансу) в решениях уравнения (3), то есть она является критической, при этом получается параметрическая неустойчивость, которую можно рассматривать как динамическую водородную хрупкость при циклической нагрузке.

Список литературы

1. Полянский А.М, Полянский В.А., Яковлев Ю.А. Методы определения энергий связи водорода в твердом теле, реализованные на базе анализатора водорода АВ-1 // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами: Труды Третьей междунар. конф. и Третьей междунар. школы молодых специалистов, С.-Петербург, 02–07 июля 2007г. Саров, 2007. С. 342–244.
2. Indeitsev D.A., Semenov B.N. About a model of structural-phase transformations under hydrogen influence. // Acta Mechanica. 2008. Vol. 195. P. 295–304.

PARAMETRIC INSTABILITY OF MATERIALS ACCUMULATING HYDROGEN UNDER CYCLIC MECHANICAL LOADING

Yu.A. Yakovlev

The influence of hydrogen on structural materials is described. The quality model of fracture of materials containing hydrogen under cyclic uniaxial mechanical loading is presented.

Ключевые слова: fracture of materials, hydrogen concentration, cyclic mechanical loading.