

Н. М. В л а с о в, И. И. Ф е д и к (Подольск, РОНЦ МГОУ). **Водородное охрупчивание материала перед вершиной трещины.**

При длительной эксплуатации изделий в химически активных средах происходит изменение прочностных характеристик материала. Так, например, при взаимодействии водорода с металлами наблюдается водородное охрупчивание. Последнее обусловлено формированием водородных сегрегаций перед вершиной трещины с последующим образованием гидридных фаз в некоторых металлах (например, в цирконии). Водород обладает высокой диффузионной подвижностью по сравнению с примесями замещения и другими примесями внедрения. Поэтому уже при комнатной температуре перед вершиной трещины возникает повышенная концентрация атомов водорода. Они изменяют поверхностную энергию материала вблизи вершины трещины. Если концентрация атомов водорода превышает предел растворимости при данной температуре, то образуются гидридные фазы. В поле внешних нагрузок происходит хрупкое разрушение гидрида и продвижение трещины. После незначительного продвижения трещина останавливается и продолжается сегрегация атомов водорода уже у новой вершины. Таким образом, атомы водорода «выстилают» дорожку перед вершиной трещины, и вдоль этой дорожки осуществляется рост трещины до критического размера. Целью данного сообщения является анализ кинетики образования водородных сегрегаций и гидридных фаз перед вершиной трещины на примере циркония.

Диффузионная подвижность атомов водорода существенно возрастает в поле напряжений вершины трещины. Потенциал взаимодействия (энергия связи) V определяется известным соотношением [1], [2]: $V = -\sigma_{II}\delta v/3$, где σ_{II} — первый инвариант тензора напряжений у вершины трещины, δv — изменение объема материала при размещении атома водорода. Значение σ_{II} находится из решения задачи теории упругости. Окончательное выражение для потенциала V принимает вид

$$V = -A \frac{\cos(\theta/2)}{\sqrt{r}} \delta v, \quad A = \frac{\sqrt{2a}\sigma(1+\nu)}{3} \delta v,$$

где r и θ — полярные координаты, ν — коэффициент Пуассона, $2a$ — длина трещины (линейный разрез в сплошной среде), σ — внешнее напряжение. Решение уравнения диффузии для атомов водорода в окрестности вершины трещины с учетом потенциала V представляет значительные математические трудности. Поэтому используют различные приближенные методы. Один из них заключается в том, что в уравнении для диффузионного потока учитывается только потенциал взаимодействия V . Это вполне приемлемо при описании процесса диффузии непосредственно около вершины трещины, где определяющая роль принадлежит полю напряжений. В этом приближении кинетика водородной сегрегации описывается соотношением [3]:

$$N(\tau) = B\tau^{4/5}, \quad \tau = \frac{Dt}{r_0^2}, \quad B = 2,5c_0 \left(\frac{3}{4}\pi\right)^{1/5} \left(\frac{A}{2kT}\right)^{4/5} r_0^{8/5},$$

где D — коэффициент диффузии атомов водорода, c_0 — начальная концентрация атомов водорода, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, r_0 — внутренний радиус окружения вершины трещины. Величина $N(t)$ определяет число атомов водорода, поглощенного вершиной трещины, в зависимости от безразмерного времени. Соответствующая область занимает площадь внутри характеристики (решение дифференциального уравнения первого порядка). Концентрация атомов водорода внутри перемещающейся области подчиняется экспоненциальной зависимости в соответствии с потенциалом V . Максимальное значение достигается при $\theta = 0$, т. е. на линии распространения вершины трещины. Вдоль этой линии происходит и образование гидридных фаз с последующим их разрушением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. М.: Мир, 1972.
2. Теодосиу К. Упругие модели дефектов в кристаллах. М.: Мир, 1985.
3. Любов Б. Я., Власов Н. М. Некоторые эффекты взаимодействия точечных и протяженных структурных дефектов. — ФММ, 1979, т. 47, № 1, с. 140–157.