

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ И ВЫЗВАННОГО ВОДОРОДОМ РАСТРЕСКИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ ПЛАСТИЧНОСТИ

Астафьев В.И.

Самарский государственный аэрокосмический университет

### MODELING OF HYDROGEN EMBRITTLEMENT AND HYDROGEN INDUCED CRACKING OF METALS IN PLASTICITY CONDITIONS

*Astafiev V.I. The paper deals with a phenomenological model of hydrogen embrittlement of metals, based on the use of damage parameter. The basic governing equations of the model is proposed, and the behavior of materials in this model is analyzed, for the case of uniaxial tension, as well for the case of a complex stress state. It is noted that the proposed model describes many features of hydrogen embrittlement - the loss of plasticity, the influence of the form of stress state on the fracture behavior and the conditions of crack development.*

Воздействие водорода на металл проявляется, как правило, в снижении его прочностных и пластических свойств (водородное охрупчивание - ВО). Под действием водорода значительно увеличивается чувствительность металла к наличию в нем трещин. Эксперименты показывают, что

- ВО связано с зарождением, развитием и накоплением различного рода повреждений, которые вносятся действующими напряжениями и внешней средой, при этом отмечается повышенная чувствительность металла к ВО при низких скоростях деформации;

- задержанный характер разрушения наводороженного металла;

- частичное восстановление механических характеристик наводороженного металла в процессе отдыха после снятия напряжений;

- зависимость ВО от вида напряженного состояния и т.д.

Для моделирования процесса накопления повреждений в металлах при ВО был применен подход Качанова-Работнова с привлечением скалярного параметра поврежденности  $w$ , широко распространенный в случае высокотемпературной ползучести металлов. Кинетическое уравнение для параметра поврежденности имеет вид

$$dw/dt = A \operatorname{sign}(w_* - w) |w_* - w|^m \quad (1)$$

где  $A, m$  - параметры материала,  $w_*(s_{ij})$  - предельное значение накопленной поврежденности, зависящее от уровня и вида напряжений, внешней среды, температуры.

Для зависимости  $w_*(s_{ij})$  предложена следующая аппроксимация [1,2]:

$$w_* = \begin{cases} as_0 + b, s_0 > 0 \\ b, s_0 \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

отражающая тот факт, что всестороннее растяжение  $s_0 \geq 0$  является сопутствующим, а всестороннее сжатие  $s_0 \leq 0$  тормозящим факторами при накоплении поврежденности и водородном охрупчивании материала.

Условие пластичности и критерий локального разрушения в случае идеальной пластичности и критерия текучести Мизеса записываются как

$$s_e = s_*(w), \quad e_{\max}^p = e_*(w) \quad (3)$$

где  $s_e$  - интенсивность напряжений,  $e_{\max}^p$  - максимальная пластическая деформация,  $s_*(w) = s_*^0(1 - k_1 w)$  - предел текучести и  $e_*(w) = e_*^0(1 - k_2 w)$  - предельно допустимая пластическая деформация. Поскольку эти

величины подвержены воздействию водорода, то зависят от величины накопленной поврежденности  $w$ . Учитывая, что  $w$  является безразмерным внутренним параметром, одну из констант можно выбрать равным 1, т.е. положить  $k_2 = 1$  и  $k_1 = k$ .

В результате, в данной модели удалось описать весь диапазон поведения материалов при их охрупчивании под действием внешней среды и нагрузки - от полностью охрупчивающихся, до материалов, не подверженных охрупчивающему воздействию внешней среды и нагрузки. В этом случае величина накопленной поврежденности  $w$  соответствует величине потери пластичности материала, испытанного в водородсодержащей среде.

В случае сложного напряженного состояния введено понятие пороговой поверхности в пространстве напряжений, т.е. такой области, напряженное состояние внутри которой не приводит к разрушению (аналог цилиндра Мизеса для случая пластического течения). Вид такой поверхности в пространстве главных напряжений изображен на рис.1. Для плоского напряженного состояния линии предельного уровня для различных значений параметров охрупчивания  $kas_*^0$  изображены на рис.2.

Показано, что изменение формы пороговой поверхности может быть связано с изменением характера разрушения от вязкого внутризеренного разрушения сдвигом до хрупкого межзеренного разрушения отрывом.

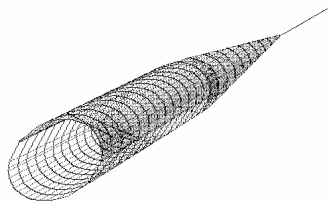


Рис. 1. Вид предельной поверхности в пространстве главных напряжений

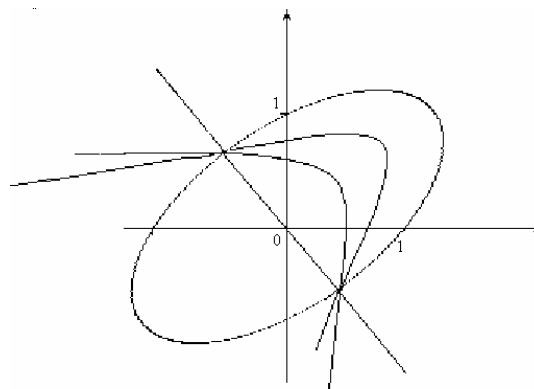


Рис. 2. Линии предельного уровня в случае плоского напряженного состояния

В работе предложена также математическая модель распространения трещин в упруго-пластической охрупчивающейся среде. Моделирование роста трещины также проводилось с привлечением параметра поврежденности. В качестве критерия локального разрушения использовался модифицированный критерий Леонова-Панасюка. Предложенная модель была применена к решению задачи о росте полубесконечной и конечной трещины в материале, охрупчивающемся под воздействием водородсодержащей среды. Определены условия существования стационарного состояния (неподвижная трещина), найдены значения порогового коэффициента интенсивности напряжений  $K_{I SCC}$ , при превышении которого трещина начинает развиваться с контролируемой скоростью (докритическое развитие трещины), а также величина предельной трещиностойкости  $K_{I C}$  определяющая условия перехода к неконтролируемому динамическому росту трещины.

### Библиографический список

1. Астафьев, В.И. Накопление поврежденности и рост трещин в металлах при водородном охрупчивании / В.И. Астафьев // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. Нижний Новгород, 2006. Т. III. С. 22.
2. Astafiev, V.I. Modeling of Hydrogen Embrittlement and Fracture of Metals in Wet H<sub>2</sub>S Containing Environment / V.I. Astafiev // XXII International Congress on Theoretical and Applied Mechanics. Abstract Books. Adelaide, Australia. 2008. P. 221.