

УДК 539.375

© 1996 г. Ю.В. ЖИТНИКОВ, Б.Р. ПАВЛОВСКИЙ

**ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ
ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН
ПРИ НАВОДОРОЖИВАНИИ**

Настоящая работа является продолжением цикла исследований закономерностей развития систем трещин в сталях невысокой прочности при наводороживании в процессе эксплуатации [1–5]. Дополнительной особенностью текущего этапа является учет данных инспекции аппаратов и трубопроводов, давших экспериментальные примеры чувствительных зон и возникающих систем трещин в количестве нескольких тысяч [6].

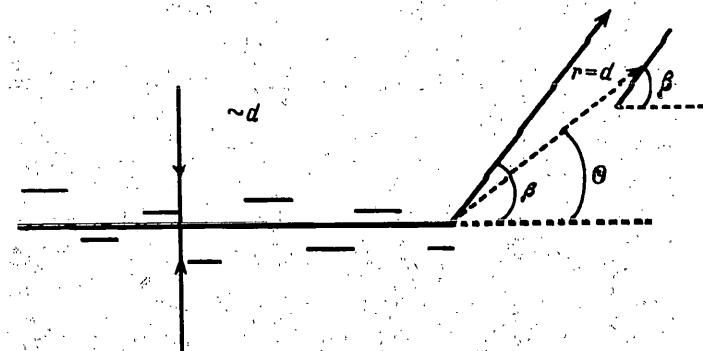
Известно [1–5], что трещины в пластичных низколегированных сталях при наводороживании представляют собой дискретную систему микродефектов. Развитие такой трещины (зоны поражения) определяется возникновением нового микродефекта [1–5]. В данной работе формулируется численный критерий определяющий предельные нагрузки и направление дальнейшего развития трещины, с учетом ее дискретного характера. Анализируются условия, определяющие развитие трещины при наводороживании как локализованной зоны поражения.

В данной работе рассматривается случай, когда система трещин развивается по плоскостям, параллельным поверхности и масштаб трещин, входящих в систему, сравним с глубиной ее залегания относительно поверхности. Трещины в системе могут располагаться в одной плоскости на одной глубине или разных, но достаточно близких. Интерес к такой постановке связан с тем, что имеет место одновременное и конкурентное взаимодействие трещин друг с другом и с поверхностью. В результате, в системах подповерхностных трещин реализуются различные зоны концентрации напряжений, связанные с концевой областью трещин, парным взаимодействием трещин между собой и отдельных трещин с поверхностью и тройных взаимодействий двух соседних трещин и поверхности. В отличие от случая одиночной трещины [4,5], возникают эффекты ускоренного развития вдоль внешнего контура системы и, что еще более интересно, возникновение лидирующей траектории разрушения в зоне между элементами системы, но не навстречу друг к другу, а в направлении поверхности. Доминирование конкретных механизмов траекторий зависит от соотношения параметров и выделение соответствующих областей является основным предметом статьи.

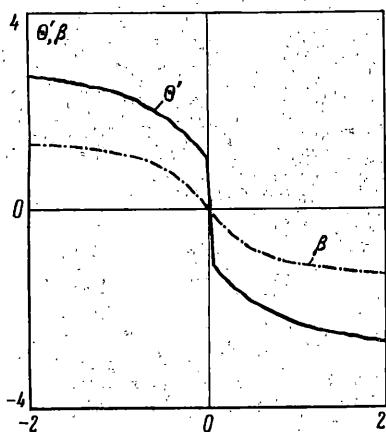
1. Развитие процесса разрушения при наводороживании. Результаты исследования зон поражений в пластичных низколегированных сталях при наводороживании показывают [1–5], что они имеют вид дискретной системы микродефектов (хотя центральный участок такой зоны может представлять трещину с раскрытием). Механизм прорастания такой трещины в этом случае обусловлен возникновением нового микродефекта на расстоянии d от его вершины (d – структурный параметр) и за тем присоединением его к множеству дефектов, образующих магистральную трещину. При этом толщина зоны поражения много меньше ее длины, что позволяет моделировать зону поражения магистральной трещиной находящейся под действием водородного давления. В этом случае предполагаем, что структурный параметр $d \ll l$ (где l – длина трещины).

Сформулируем критерий определяющий предельные нагрузки и направление дальнейшего роста магистральной трещины.

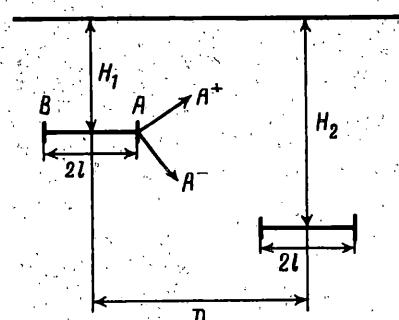
1. Возникновение нового микродефекта, обусловленный достижением главным напряжением σ_1 критического значения на расстоянии d от вершины трещины.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

2. Направление дальнейшего роста трещины совпадает с направлением площадки, на которой главное напряжение достигает критического значения (фиг. 1). В этом случае микродефекты, образующие магистральную трещину, ориентированы параллельно ей, толщина которой порядка d .

В соответствии с этим критерием разрушения и условием $d \ll l$ возникновение нового микродефекта определяется полями напряжений вблизи вершины магистральной трещины.

Известные асимптотические представления распределения напряжений около вершины трещины через коэффициенты интенсивности напряжений K_1, K_2 [7]:

$$\sigma_{yy} = \left(K_1^{\pm} \left(5 \cos \frac{\Theta}{2} - \cos \frac{5\Theta}{2} \right) + K_2^{\pm} \left(\sin \frac{5\Theta}{2} - \sin \frac{\Theta}{2} \right) \right) f(r) \quad (1.1)$$

$$\sigma_{xx} = \left(K_1^{\pm} \left(3 \cos \frac{\Theta}{2} - \cos \frac{5\Theta}{2} \right) + K_2^{\pm} \left(-7 \sin \frac{\Theta}{2} - \sin \frac{5\Theta}{2} \right) \right) f(r)$$

$$\sigma_{xy} = \left(K_1^{\pm} \left(-\sin \frac{\Theta}{2} + \sin \frac{5\Theta}{2} \right) + K_2^{\pm} \left(3 \cos \frac{\Theta}{2} + \cos \frac{5\Theta}{2} \right) \right) f(r)$$

$$1/f(r) = 4\sqrt{2r}$$

где (r, Θ) – полярная система координат с основанием в вершине трещины; знаки +

или – соответствуют различным вершинам трещины; σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} – компоненты тензора напряжений в заданной системе координат OXY .

По этим формулам определяем направление Θ' , где главное напряжение σ_1 максимально:

$$\sigma_1(\Theta', r) = \max_{\Theta \in [-\pi, \pi]} \sigma_1(\Theta, r), \quad r = d \quad (1.2)$$

Затем вычисляем направление площадки β , действие главного напряжения

$$\operatorname{tg} 2\beta = 2\sigma_{xy}/(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \quad (1.3)$$

В качестве направление дальнейшего развития трещины, примем направление β , параллельное площадки главных напряжений, а предельные нагрузки определяем из условия $\sigma_1 = \sigma_c$ (σ_c – критическое напряжение).

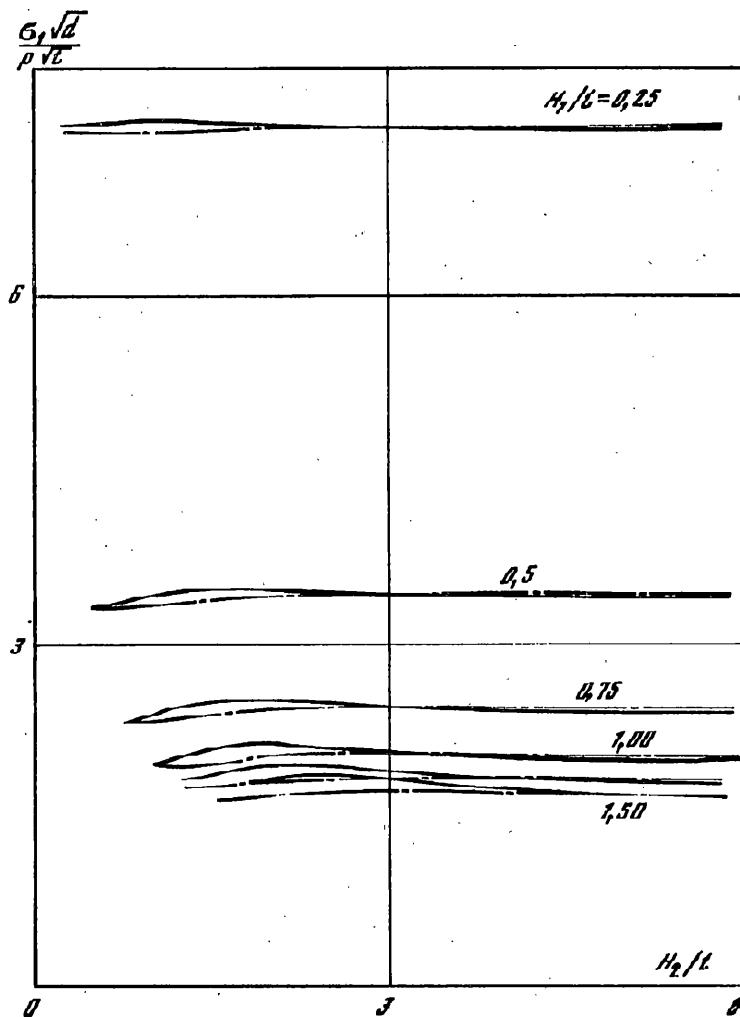
Таким образом, соотношения (1.1–1.3) определят предельные нагрузки и направление дальнейшего роста трещины.

Заметим, что сформулированный выше критерий дальнейшего роста трещины отличается от обычно используемых критериев [7,8], в которых разрушение происходит от вершины трещины. Сформулированный критерий роста трещины при наводороживании (1.2), (1.3) описывает дискретный характер трещины, т.е. как множество микротрещин, которые образуют магистральную трещину. Механизм прорастания трещины в этом случае обусловлен возникновением нового микродефекта на расстоянии d от вершины трещины, и затем присоединением его к множеству дефектов, образующих магистральную трещину. В частности, при развитии трещины в плоскости, под давлением P , новый дефект образуется под углом $\Theta = \pm\pi/3$ и ориентацией $\beta = 0$, а трещина представляет собой линию толщиной порядка структурного размера d , состоящую из множества микродефектов.

Проанализируем зависимость угла дальнейшего роста трещины β и направления Θ' на площадку главного напряжения от K_1, K_2 . Поскольку рассматриваем случай нагружения водородным давлением P , то предполагаем, что $K_1 \neq 0$. На фиг. 2 представлены зависимости β, Θ' от K_2/K_1 . Из этой зависимости видно, что с ростом K_2 (то есть сдвиговой нагрузки) угол Θ' увеличивается. При изменении знака K_2 (направления сдвиговой нагрузки) изменяется направление дальнейшего роста трещины. Из этой зависимости видно, что с ростом K_2 угол β стремится к $\pi/2$, а Θ' к π , т.е. трещина растет под прямым углом к своему направлению. При $|\Theta'| > \pi/2$ микродефект образуется над магистральной трещиной, что означает увеличение ее ширины и возможное нарушение условия локализации зоны поражения ($d/l \ll 1$). В этом случае, дальнейшее развитие зоны поражения как локализованного процесса (трещины) может не происходить. При таких нагрузках дальнейшее развитие зоны повреждаемости связано либо с развитием объемной области повреждаемости, либо с формированием геометрически более сложных структур разрушений.

Используя развитые выше представления о процессе разрушения при наводороживании проанализируем развитие двух прямолинейных трещин в полу平面ости под действием водородного давления P .

2. Постановка задачи и анализ результатов вычисления. Для анализа и моделирования процесса развития системы трещин в плоскостях параллельных поверхности материала при наводороживании, рассмотрим в системе координат OXY (ось OY направлена от материала по нормали к поверхности) равновесие линейноупругой изотропной полуплоскости, ослабленной двумя трещинами длиной $2l$ на глубинах H_1, H_2 и расстоянием между центрами трещин D , под действием водородного давления P (фиг. 3). Система сингулярных интегральных уравнений, описывающая скачки смещений на трещине известна [7] и решалась численно методом механических квадратур [7]. В результате решения этой системы по полученным скачкам смещений

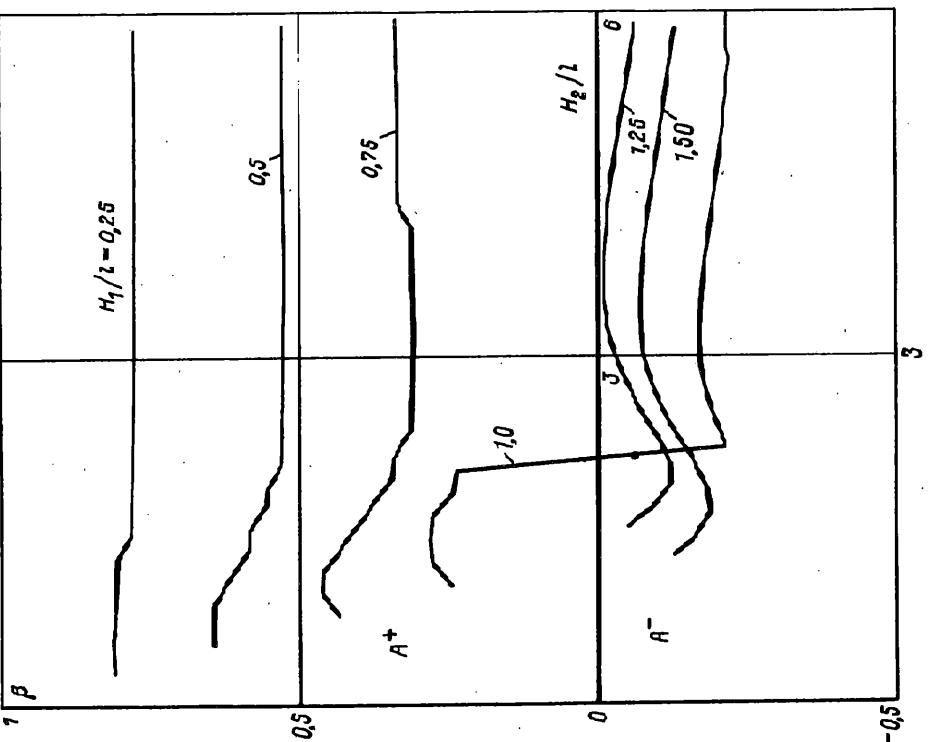


Фиг. 4

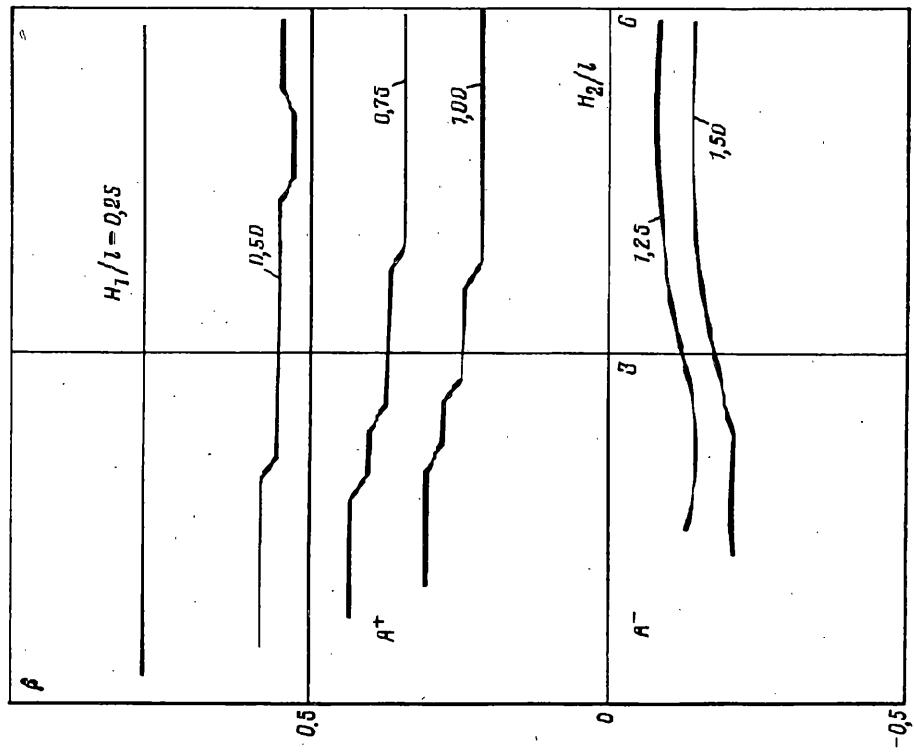
на трещине вычислялись коэффициенты интенсивности напряжений, а по (1.1–1.3) определялись напряжение и направление дальнейшего роста трещины β .

Максимальная концентрация напряжений возникает у трещины ближайшей к поверхности, причем либо у вершины A , либо у вершины B (A – внутренняя вершина трещины, B – внешняя, фиг. 1). Область углов роста трещины от вершины A обозначим A^+ и A^- (A^+ – к границе полуплоскости, A^- – к другой вершине трещины), то есть $A^+ : \Theta' \in [0, \Pi]$; $A^- : \Theta' \in [-\Pi, 0]$ (фиг. 1).

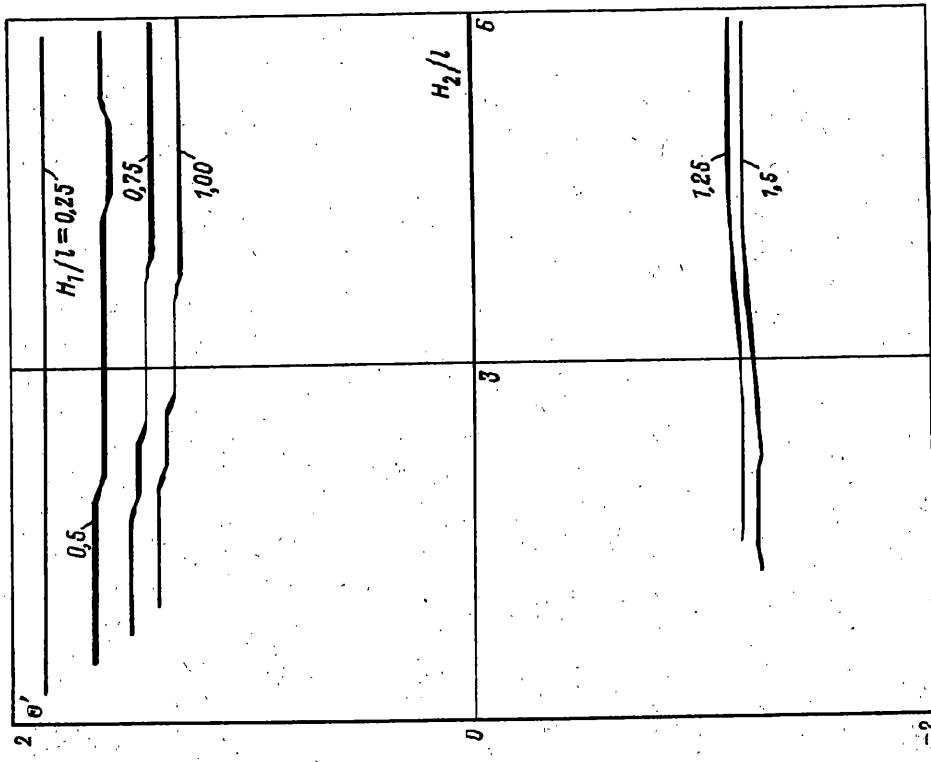
На фиг. 4 представлена зависимость напряжения $\sigma_1 \sqrt{d} (p \sqrt{l}^{-1})$ у вершин трещины A, B (фиг. 3) в зависимости от параметров $H_1/l, H_2/l, D/l$ (сплошная кривая соответствует вершине A , пунктирная – вершине B , $D/l = 3,0$). Из этой зависимости видно, что наибольшая концентрация достигается у вершины A , а затем с увеличением расстояния между трещинами убывает. Начиная с некоторого расстояния концентрация напряжений у вершины B незначительно превосходит концентрацию у вершины A . При этом направление роста трещины от вершины B всегда направлено к границе полуплоскости. Характер изменения концентрации напряжений у вершин A, B



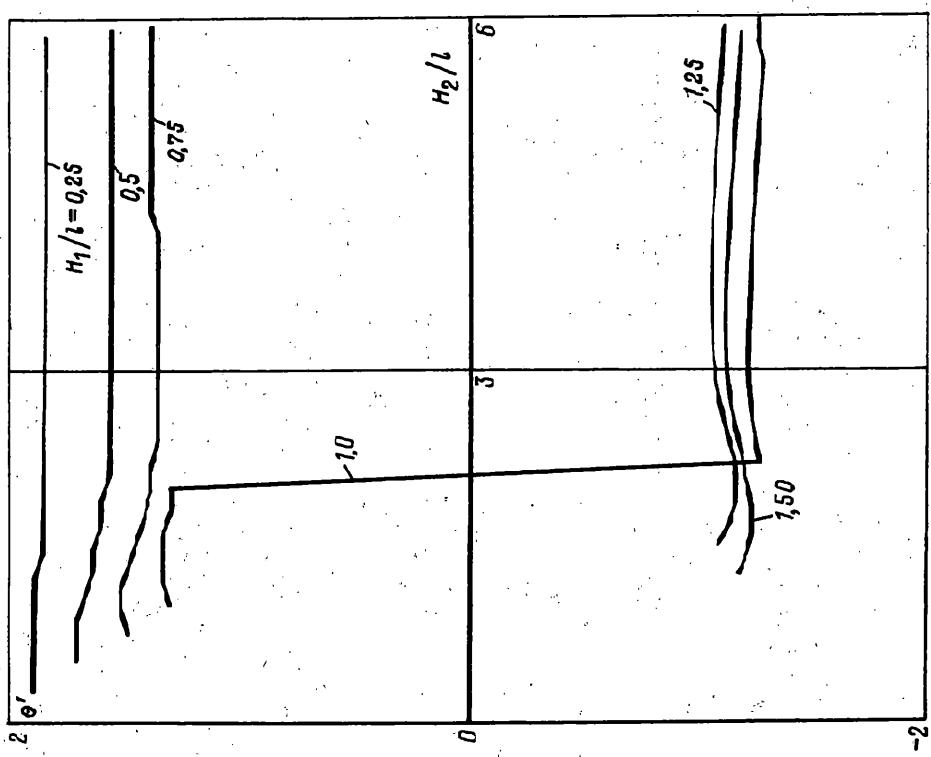
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 8



Фиг. 7

(фиг. 4) характерен и для других значений параметра D/l . Из этих зависимостей следует, что определяющий дальнейший рост трещины является концентрация напряжений у вершины A .

На фиг. 5 ($D/l = 3,0$), 6 ($D/l = 4,0$) представлена зависимость направлений дальнейшего роста трещины β от вершины A в полуплоскости под действием водородного давления в зависимости от H_1/l , H_2/l и D/l . В отличие от случая одной трещины [3–5] возникает область изменения параметров H_1/l , H_2/l , в которой трещины стремятся объединиться (область A^- на фиг. 5, 6). Заметим, что в процессе расчета направлений дальнейшего роста трещин необходимо учитывать условие локализации зоны поражения ($|\Theta'| < \pi/2$). На фиг. 7 ($D/l = 3,0$), 8 ($D/l = 4,0$) показана зависимость угла Θ' , расположения площадки главного напряжения от параметров H_1/l , H_2/l , D/l . При $H_1/l \leq 0,5$ возникает область значений углов Θ' , для которой $|\Theta'| > \pi/2$. Это связано с влиянием границы полуплоскости, приводящим к значительному увеличению коэффициента интенсивности напряжений K_2 . Для этих параметров новый микродефект образуется в области над трещиной, что приводит к формированию более сложной структуры разрушения (например, T – структуры, описанной в [5]), требующей дополнительного моделирования и анализа ее развития.

Таким образом, результаты вычислений показывают, что в зависимости от параметров H_1 , H_2 , D , l возникают следующие особенности дальнейшего развития зон поражения (двух трещин в полуплоскости):

1. Возникновение траектории разрушения от элементов системы в направлении к поверхности и к их объединению;
2. Возможное нарушение условия локализации зоны поражения – трещины, приводящее к увеличению ее ширины.

В первом случае, возможен либо выход трещины на поверхность, либо формирование трещины большего масштаба. Во втором случае, дальнейшее развитие трещины может происходить, как объемной зоны поражения, что требует дальнейшего развития модели разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдштейн Р.В., Исхаков А.Р., Климов Д.М., Павловский Б.Р., Холзаков Н.В., Щугорев В.В. Некоторые проблемы прогнозирования и обеспечивания ресурса оборудования для нефтяной и газовой промышленности // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1990. № 6. С. 3–11.
2. Павловский Б.Р., Мирочник В.Л., Холзаков Н.В. Влияние эксплуатационного наводороживания на механические свойства и конструкционную прочность сталей ферритно-перлитного класса // Хим. и неф. машиностроение. 1990. № 2. С. 17–20.
3. Гольдштейн Р.В., Ентов В.М., Павловский Б.Р. Модель развития водородных трещин в металле // Докл. АН СССР. 1977. Т. 237. № 4. С. 828–831.
4. Гольдштейн Р.В., Морозова Т.М., Павловский Б.Р. Модель возникновения структур разрушения в сталях при наводороживании // Изв. АН СССР. МТГ. 1989. № 4. С. 131–138.
5. Гольдштейн Р.В., Морозова Т.М., Павловский Б.Р. Некоторые закономерности формирования структур разрушения в сталях невысокой прочности // Физ.-хим. механика материалов. 1991. Т. 27. № 1. С. 13–17.
6. Павловский Б.Р., Гедике Х., Кизингер Р., Холзаков Н.В. Инспекция трубопроводов с помощью интеллектуальных дефектоскопов-снарядов // Безопасность труда в машиностроении. 1992. № 3. С. 15–18.
7. Панасюк В.В., Саерук М.П., Дацьшин А.П. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках. Киев: Наук. думка, 1976. 443 с.
8. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.

Москва

Поступила в редакцию
16.V.1995