

УДК 539.375

Р. В. ГОЛЬДШТЕЙН, Т. М. МОРОЗОВА, Б. Р. ПАВЛОВСКИЙ

МОДЕЛЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СТРУКТУР РАЗРУШЕНИЯ В СТАЛЯХ ПРИ НАВОДОРОЖИВАНИИ¹

Предлагается модель формирования систем трещин, возникающих при эксплуатации трубопроводов из низколегированных сталей низкой и средней прочности в присутствии сероводородосодержащей среды с учетом прочностной анизотропии металла. Модель опирается на анализ полей напряжений в плоской задаче теории упругости о прямолинейном разрезе, расположенном вблизи границы полуплоскости, на берега которого действует нормальное давление.

1. Введение. Разрушение структурированных материалов не всегда происходит путем образования и развития одиночной макротрещины. В ряде случаев особенности структуры и напряженного состояния приводят к формированию систем микро — или макротрещин — структур разрушения. Структуры разрушения наблюдаются в слоистых, пористых, волокнистых материалах. Некоторые закономерности их образования рассмотрены [1—3]. Образование систем трещин может оказывать двойное влияние на развитие процесса разрушения. С одной стороны, системы микротрещин, которые образуются в концевой зоне макротрещины приводят к эффективному повышению трещиностойкости материала [4]. С другой стороны, процесс разрушения может представлять собой развитие упорядоченной системы микротрещин без образования единой макротрещины вплоть до финальной стадии разрушения. При этом размеры участков, где имеются системы дискретных трещин и произошло их слияние могут быть сравнимы по масштабу. Такой вид разрушения реализуется в конструкциях из низколегированных сталей низкой и средней прочности, содержащих исходные расслоения или зоны с пониженными прочностными свойствами, в которых они легко образуются в процессе наводороживания металла. Указанные материалы имеют анизотропию параметров микропрочности, причем водород может изменять их значения, усугубляя анизотропию. Конструкции, о которых в первую очередь идет речь (трубопроводы и сосуды давления), работают в условиях совместного действия механической нагрузки (внутреннее давление) и водородной нагрузки, которая проявляется в виде давления водорода, скапливающегося в полостях, дефектах, порах [5—7]. Геометрия образующихся при этом систем микротрещин определяется особенностями поля напряжений, которое возникает в элементе конструкции под действием обоих видов нагрузки, распределением и прочностью связи с матрицей микроструктурных элементов, имеющихся в металле. Опыт показывает, что в этих условиях образуются две характерные структуры разрушения (фиг. 1).

Для количественного описания условий формирования той или иной системы трещин в данной работе анализируются поля напряжений, создаваемые отдельной макротрещиной (расслоением) в элементе конструкции на расстояниях характерных для распределения микроструктурных составляющих металла.

¹ Работа является изложением доклада на II Всесоюзном симпозиуме по механике разрушения. Житомир, 1985 г.



Фиг. 1

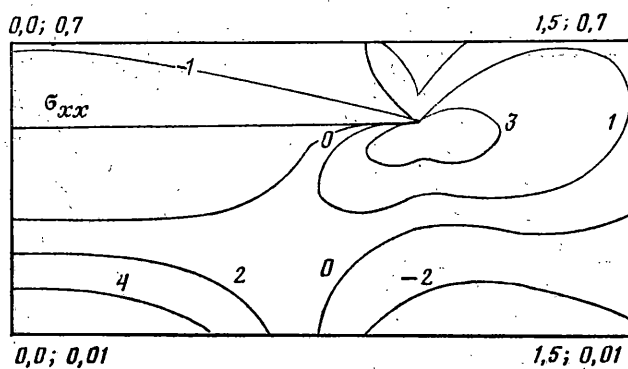
Из анализа напряженного состояния следует, что переход от одной структуры разрушения к другой происходит при определенных размерах зоны расслоения, глубины ее залегания, когда наряду с областью концентрации напряжений в концевой зоне расслоения, возникает область повышенных растягивающих напряжений в районе средней части расслоения у ближайшей к нему поверхности элемента конструкции.

В пункте 2 приведено описание экспериментальных данных, формулируется постановка задачи теории упругости и приводятся формулы для напряжений, обусловленных наличием криволинейного разреза вблизи поверхности. Затем (пункт 3) проведен численный анализ полей напряжений и получены оценки параметров структур разрушения. Отметим, что ступенчатые системы трещин, образующиеся при наводороживании малоуглеродистых низколегированных сталей, описаны в [7], где высказано предположение о том, что возникновение системы трещин связано с действием сдвиговых напряжений, количественная модель в [7] отсутствует.

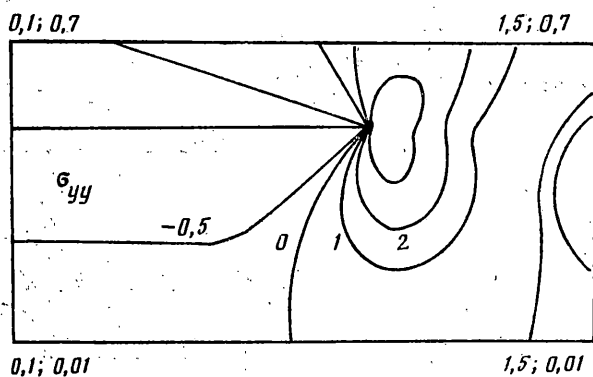
2. Постановка модельной задачи. На фиг. 1 показаны две реально наблюдаемые структуры разрушения. Процесс разрушения происходит, как показывает анализ поведения конструкций в реальных условиях, а также в лабораторных и стендовых экспериментах, в несколько стадий. На начальной стадии формируется макротрещина, развитие которой идет по зоне с пониженной трещиностойкостью, обычно в средней трети по толщине листа, приуроченной к его ликвидационной зоне. Затем по мере достижения этой трещиной определенного характерного размера относительно глубины ее залегания, начинают формироваться структуры разрушения либо в виде прорыва (трещины) со стороны поверхностей листа, который направлен перпендикулярно первоначальной трещине и находится под ее средней частью, либо в виде выходящего на поверхность эшелона микротрещин, ось которого образует острый угол с плоскостью прокатки. Анализ шлифов и рельефа реальных поверхностей разрушения показывают, что поверхность разрушения имеет вид террасок с высотой ступенек от десятых и сотых долей мм до 1–2 мм и длиной до нескольких мм (в отдельных случаях до 10 мм). При построении модели формирования этих структур рассмотрим случай несимметричного расположения исходной трещины в листе, когда влияние ближайшей границы является определяющим. При этом вместо разреза в полосе можно рассматривать трещину в полуплоскости [8, 9]. Для анализа напряженного состояния в полуплоскости с модельной прямолинейной трещиной, расположенной под ее границей, воспользуемся результатами решения задачи теории упругости о криволинейном разрезе L , расположенном вблизи границы полуплоскости, берега которого находятся под действием самоуравновешенных нагрузок [9]. Пользуясь выражениями для комплексных потенциалов Колосова — Мусхелишвили для этой задачи, получим следующие формулы, связывающие напряжения σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{yy} с производными от скачков смещений $[du_i/d\tau] = b_i(\tau)(1-\tau^2)^{-1/2}$ ($i=x, y$), которые имеют корневую особенность на концах трещины

$$\sigma_{xx}(z) = 2 \operatorname{Re} \Phi(z) - \operatorname{Re} [\bar{z} \Phi'(z) + \Psi(z)] \quad (1.1)$$

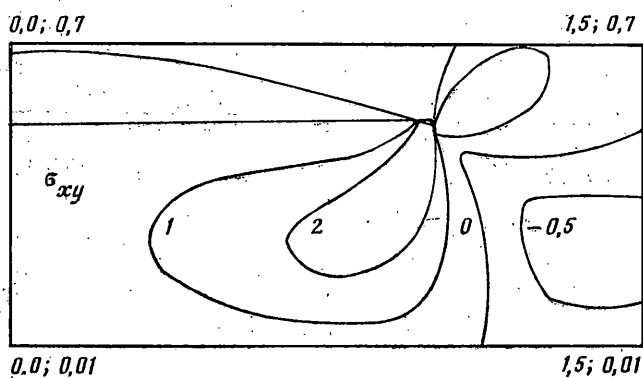
$$\sigma_{yy}(z) = 2 \operatorname{Re} \Phi(z) + \operatorname{Re} [\bar{z} \Phi'(z) + \Psi(z)], \quad \sigma_{xy}(z) = -\operatorname{Im} [\bar{z} \Phi'(z) + \Psi(z)]$$



Фиг. 2

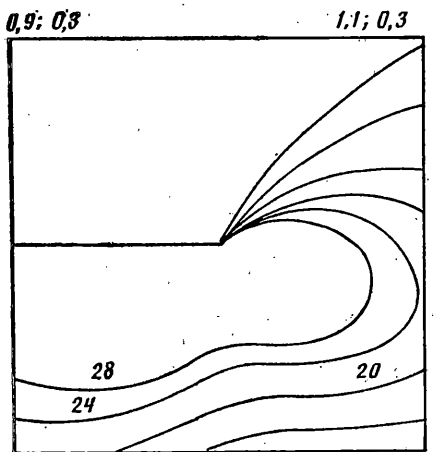


Фиг. 3

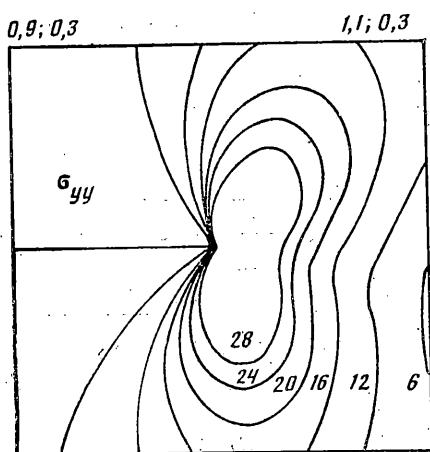


Фиг. 4

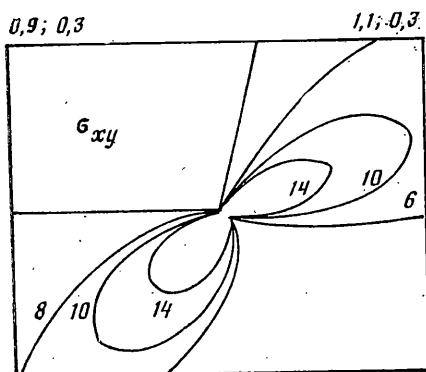
$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx}(z) = & \frac{\mu}{\pi(\kappa+1)} \int_{-1}^1 \{ b_x(\tau) (1-\tau^2)^{-1/2} [-2wu^{-1} - 4f^2wu^{-2} - \\
 & - va^{-1} - 2(f^2v + y(\tau)(f^2 - v^2))a^{-2} + 4y(\tau)y(3f^2v - v^3)a^{-3}] + \\
 & + b_y(\tau) (1-\tau^2)^{-1/2} [2fu^{-1} - 4fw^2u^{-2} - fa^{-1} - 2(wf + 4y(\tau)fv)a^{-2} - \\
 & - 4y(\tau)y(f^3 - 3fv^2)a^{-3}] \} d\tau \\
 \sigma_{xy}(z) = & \frac{\mu}{\pi(\kappa+1)} \int_{-1}^1 \{ b_x(\tau) (1-\tau^2)^{-1/2} [-fu^{-1} + 2fwu^{-2} - 0.5fa^{-1} +
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$



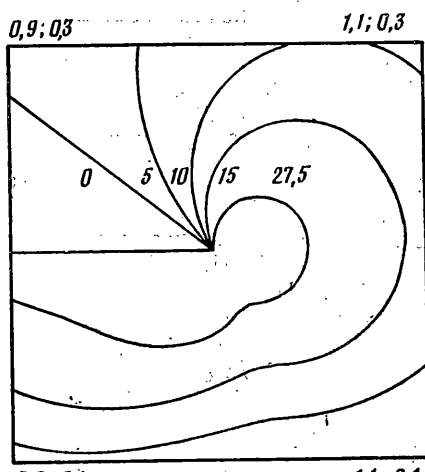
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7



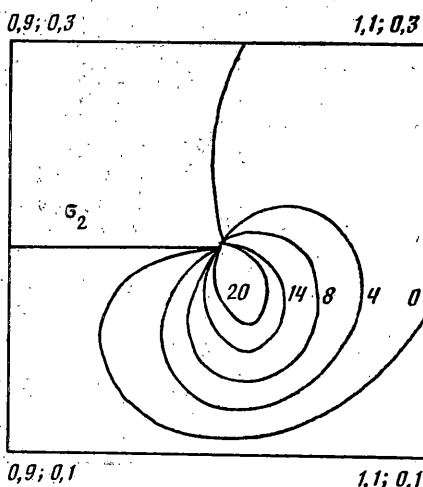
Фиг. 8

$$+0,5(f^3-3fv^2)a^{-2}+4y(\tau)y(f^3-3fv^2)a^{-3}] \\ +b_y(\tau)(1-\tau^2)^{-1/2}[-wu^{-1}+2w^3u^{-2}+0,5va^{-1}+0,5(2f^2w-f^2v-v^5-2v^2w)a^{-2}+ \\ +4y(\tau)y(v^3-3f^2v)a^{-3}]\}d\tau \quad (1.3)$$

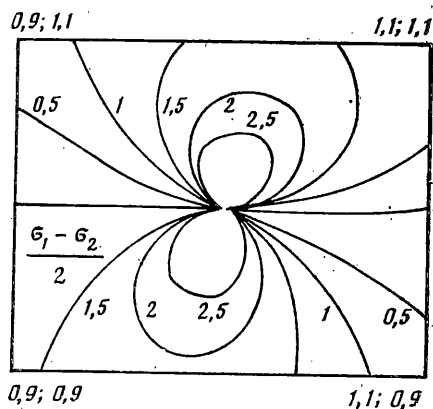
$$\sigma_{vv}(z) = \frac{\mu}{\pi(\kappa+1)} \int_{-1}^1 \{b_x(\tau)(1-\tau^2)^{-1/2}[-wu^{-1}+2f^2w+0,5va^{-1}+ \\ +0,5(v^3-f^2v-2f^2+2v^2w)a^{-2}-4y(\tau)y(3f^2v-v^3)a^{-3}]+ \\ +b_y(\tau)(1-\tau^2)^{-1/2}[fu^{-1}+2w^2fu^{-2}-2,5fa^{-1}+0,5(3f^3-v^2f)a^{-2}+ \\ +4y(\tau)y(f^3-3v^2f)a^{-3}]\}d\tau \quad (1.4)$$

$$f=x(\tau)-x, \quad w=y(\tau)-y, \quad v=y(\tau)+y \\ a=f^2+v^2, \quad u=f^2+w^2, \quad z=x+iy$$

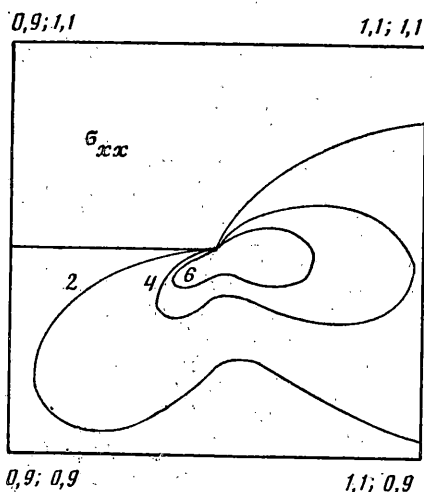
Определив значения производных от скачков смещений из численного решения системы сингулярных интегральных уравнений [9], можно найти поля напряжений для рассматриваемой задачи в результате численного интегрирования формул (1.2)–(1.4). Интегрирование проводилось по квадратурным формулам Гаусса–Чебышева. Проводился численный анализ модельной задачи о прямой трещине, удаленной на расстоянии H



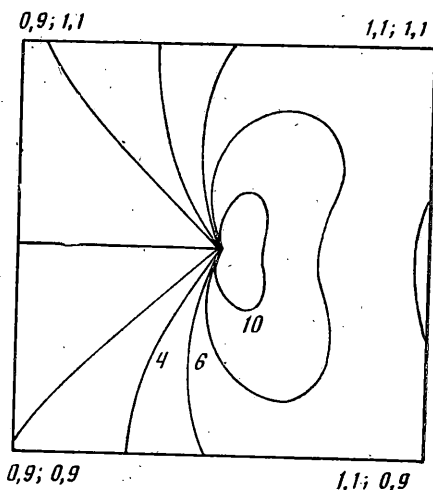
Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11

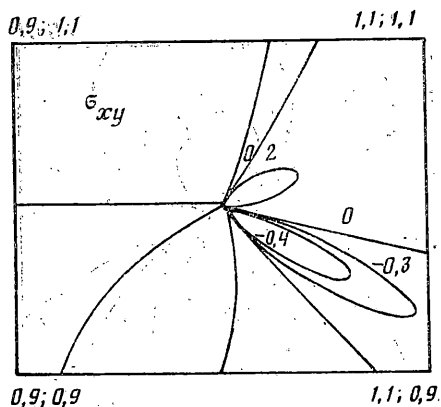


Фиг. 12

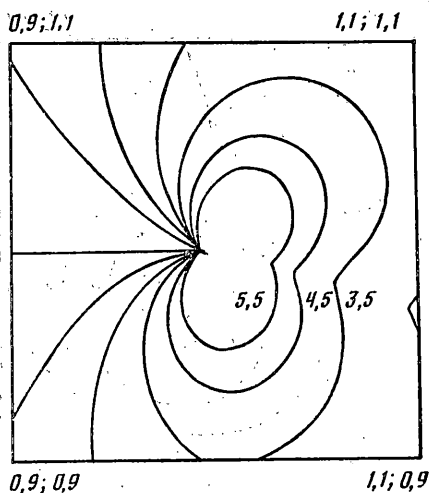
от границы, когда на ее берега действует нормальное давление. Оценка точности численного счета проводилась для задачи о плоскости, содержащей прямолинейный разрез и находящейся в условиях однородного растяжения на бесконечности. Сравнение с аналитическим вычислением напряжений на продолжении прямолинейного разреза показало, что на расстояниях $r/l \geq 0,01$ от вершины отличие не превышало 1%. Эпюры изолиний главных напряжений для этой задачи полностью совпали с полученными в [10].

3. Результаты расчетов. Приведем результаты счета для следующих соотношений параметров: а) $H/l=1$; б) $H/l=0,5$; в) $H/l=0,2$, моделирующих процесс разрушения, когда трещина расположена далеко от границы (а), с учетом влияния границы (в) и промежуточный случай (б). Эпюры напряжений представлены на фиг. 2—16. Анализ эпюр позволяет выделить следующие важные для объяснения закономерностей формирования структур разрушения особенности полей напряжений.

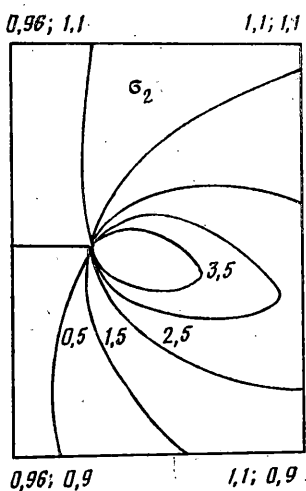
1. Кроме зоны концентрации напряжений σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} у вершины трещины, для случая $H/l=\infty$, при приближении к границе $H/l=0,5$ появляется зона концентрации растягивающих напряжений σ_{xx} (фиг. 2) у границы полуплоскости под серединой трещины, а также зоны концентрации сжимающих напряжений у границы тела на участке, отвечающем концевой зоне трещины.



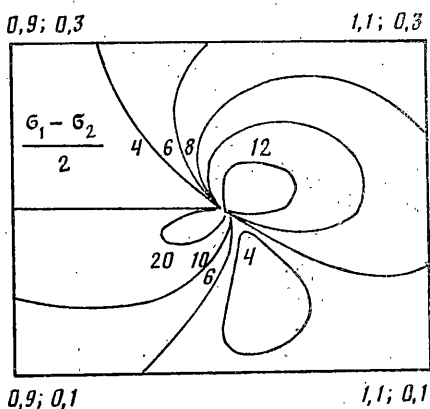
Фиг. 13



Фиг. 14



Фиг. 15



Фиг. 16

2. Сравнивая поведение напряжений σ_{xx} , σ_{yy} вблизи конца трещины для случаев (а) и (в) и главные напряжения σ_1 и σ_2 при этих же значениях параметров, можно заметить, что в общих чертах изолинии напряжений σ_1 (фиг. 12) вдали от границы повторяют напряжения σ_{yy} (фиг. 14), в то время как при приближении к границе (случай (в)) они σ_1 (фиг. 5) повторяют характер поведения σ_{xx} (фиг. 8).

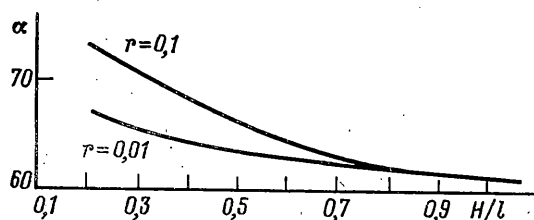
3. Для удаленной от границы трещины (а) область равновесных состояний имеет место при малых углах относительно плоскости трещины, а σ_1 , σ_2 максимально отличаются при углах порядка $\sim 60-90^\circ$. При приближении к границе (в) картина становится обратной, т. е. равновесное состояние достигается при углах $60-90^\circ$, а максимальная разность главных напряжений при углах $\sim 0^\circ$.

4. С увеличением l/H угол α_m , отвечающий $\max \sigma_{yy} = \sigma_{yy}^m$, а также острота максимума функции $\sigma_{yy}(\alpha)$ возрастает и при $H/l=0,2$ α_m достигает $80-90^\circ$. При этом, чем меньше r/l , тем ниже значение α_m (фиг. 17).

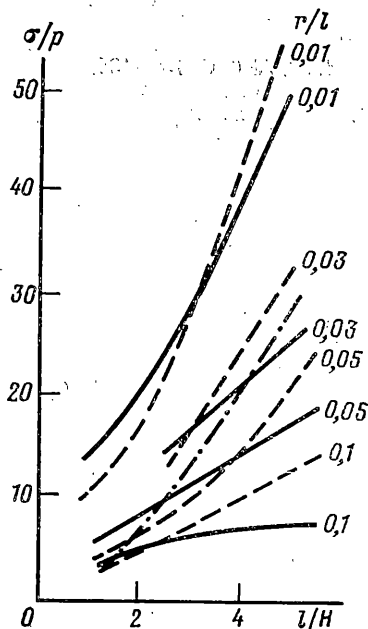
5. Максимумы сдвиговых напряжений при увеличении l/H смещаются от $\pm 90^\circ$ ($l/H=1$) (фиг. 10) в сторону тупых углов и при $l/H=5$ они располагаются в области углов $\sim 130^\circ$ (фиг. 16) и 5° ; в секторе углов $|\alpha| < 90^\circ$ абсолютные значения касательных напряжений в 2,5-3 раза меньше значений главных нормальных напряжений.

Из анализа эпюр напряжений следует, что максимальные значения растягивающих напряжений в образующихся зонах их концентрации,

а именно значения σ_{xx} , σ_{yy} и σ_m могут по разному соотноситься друг с другом, что обуславливает возможность перехода от одного механизма разрушения к другому. Например, на фиг. 18 показаны зависимости σ_{xx} (штриховая линия), σ_{yy} (сплошная линия) в концевой области трещины и σ_m (штрихпунктирная линия) напряжение на границе в середине под трещиной, от l/H при $r=0,05l$ ($r=1$ мм, $l=10$ мм), из которого видно, что при $l \leq 2,5H$ доминирует σ_{yy} , а при $l > 2,5H$ доминирует σ_m . В случае, когда акты микро-разрушения происходят в концевой зоне макротрещины по площадкам, перпендикулярным направлению действия σ_{yy} , радиус-вектор, соединяющий эти площадки с вершиной базовой трещины, составляет с осью x острый угол, который по мере увеличения l или уменьшения H приближается к 90° в соответствии с тем, как это имеет место в действительности. При достаточно больших отношениях l/H на-



Фиг. 17



Фиг. 18

ряду с процессом в концевой зоне начинает развиваться растрескивание у поверхности тела. При этом процесс растрескивания как в концевой зоне, так и у поверхности тела происходит по механизму отрыва, но в направлении перпендикулярном действию напряжений σ_{xx} .

При количественном анализе возможности реализации указанных механизмов необходимо учитывать анизотропию критических значений — напряжений отрыва, обусловленных анизотропией структурных элементов, по границам которых соответствующий отрыв происходит. Например [11], в низколегированной стали со структурным элементом (включение MnS) в виде эллипсоида $17 \times 10 \times 3$ мкм и макроскопическим пределом текучести 420–460 МПа, экспериментально установленные значения критических напряжений отрыва по границе матрица-включение по площадкам вдоль оси x составляет 750–850 МПа, а вдоль оси y 1100–1200 МПа, т. е. коэффициент анизотропии достигает 30–40%. На эти значения может влиять водород, проникающий в металл при его наводороживании. Так, по данным [6], это влияние может достигать 50%, причем указанное влияние зависит от тонкой структуры границы матрица-включение. Оно проявляется в полной мере при наличии на границе сегрегаций примесей. Таким образом, критические значения могут находиться в достаточно широком диапазоне от 400–500 МПа до 1000–1200 МПа. Как видно из проведенных выше расчетов эти значения в практически важной области параметров $l/H=1 \div 10$, $r/l=0,01 \div 0,1$ могут достигаться при давлениях водорода в исходной трещине $P \approx 100 \div 1000$ атм, которые имеют место в действительности, например, в результате наводороживания стального оборудования при его эксплуатации в сероводородсодержащих нефтегазовых средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Думанский А. В., Ишлинский А. Ю. О закономерностях растрескивания коры деревьев // Докл. АН СССР. 1952. Т. 84. № 1. С. 161–164.
2. Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Разрушение и формирование структуры // Докл. АН СССР. 1978. Т. 240. № 4. С. 829–832.
3. Гольдштейн Р. В., Капцов А. В. Формирование структур разрушения слабо взаимодействующих трещин // Изв. АН СССР. МТТ. 1982. № 4. С. 173–182.
4. Разрушение. М.: Мир, 1976. Т. 7. Ч. I. 634 с.
5. Гольдштейн Р. В., Зазовский А. Ф., Павловский Б. Р. Развитие дискообразного расслоения в стальном листе под действием растяжения и наводороживания // Физ.-хим. механика материалов. 1985. Т. 21. № 5. С. 100–105.

6. Beremin F. M. Cavity formation from inclusions in ductile fracture of A508 steel // Met. trans. Ser. A 1981, V. 12, № 5, P. 723-731.
7. Pöpperling R., Schwenk W., Venkateswarlu J. Wasserstoffinduzierte Spannungsriss Korrosion von Stählen durch dynamisch-plastische Beanspruchung in Promotorfreien Elektrolyt lösungen // Werkstoffe und korrosion. 1985, V. 36, N 9, S. 389-400.
8. Cinar A., Erdogan F. The crack and wedging problem for an orthotropic strip // Intern. J. Fract. 1983, V. 23, N 2, P. 83-102.
9. Морозова Т. М. Коэффициенты интенсивности напряжений для криволинейной трещины, расположенной вблизи границы полуплоскости // Изв. АН СССР. МТТ. 1986, № 6, С. 130-134.
10. Wnuk M. P. Podstawy mechaniki. Krakov: PEKANIA, 1977. 356 s.
11. Cialone H., Asaro R. J. Hydrogen assisted fracture of spheroidized plain carbon steels // Met. tran. Ser. A. 1981, V. 12, N 8, P. 1373-1387.

Москва

Поступила в редакцию
10.V.1988