

## ИНЖЕНЕРНАЯ ОЦЕНКА РОСТА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СЛОИСТЫХ ВОДОРОДНЫХ РАССЛОЕНИЙ В СЛУЧАЕ ИХ КАНАЛЬНОГО СЛИЯНИЯ

В. П. ДЯДИН, Е. А. ДАВЫДОВ

*На основе силового критерия механики разрушения получены упрощенные инженерные зависимости для оценки величины возможного роста низкотемпературных слоистых водородных несплошностей в случае их «канального» слияния. Несплошности, нагруженные различным внутренним давлением, моделируются как дискообразные трещины, расположенные в средней части условных сечений параллельно поверхности проката. Рассмотрен пример расчета роста дефекта для случая изотропии свойств в направлении толщины. Представлен типичный пример канального слияния низкотемпературных слоистых водородных расслоений по результатам ультразвукового компьютеризованного контроля системой P-Scan обечайки теплообменника толщиной 16 мм.*

*Simplified engineering dependencies were derived on the basis of the force criterion of fracture mechanics for evaluation of the extent of possible growth of low-temperature lamellar hydrogen discontinuities in the case of their «tunnel» coalescence. Discontinuities loaded by different inner pressures, are modeled as disk-shaped cracks located in the middle part of conditional sections in parallel to the rolling surface. An example of calculation of defect growth is considered for the case of isotropy of properties in the direction of the thickness. A typical example of «tunnel» coalescence of low-temperature lamellar hydrogen delaminations is given, based on the results of ultrasonic computerized control by P-Scan system of a heat exchanger shell of 16 mm thickness.*

Низкотемпературное водородное растрескивание нефтехимического оборудования (и не только) является довольно частым явлением. В ранее опубликованных работах [1, 2] отмечалось, что при оценке дальнейшей работоспособности аппаратов, подвергнутых слоистому водородному растрескиванию, принято вычитать весь поврежденный слой металла или, в случае локального повреждения стенки, рассматривать как ослабление выемкой поврежденного металла. Такой подход не учитывает местного внутреннего давления в растрескавшихся коррозионных полостях, которое в зависимости от глубины залегания дефекта, его размера и толщины стенки может играть в ряде случаев существенное значение.

Определение фактического давления и скорости притока молекулярного водорода при постоянном росте несплошности в общей постановке является довольно сложной задачей [3, 4]. В первую очередь, это связано с определением скорости развития слоистого растрескивания и наводороживания металла как в плоскости проката, так и в направлении его толщины. Необходимо также учитывать, что данный процесс растрескивания зависит от взаимного влияния несплошностей, глубины их залегания и вязкости разрушения металла  $K_{1c}^z$ . Кроме того, он может развиваться неравномерно как с пластическим деформированием наиболее тонкого слоя, так и без него.

Сбалансированный рост слоистого низкотемпературного расслоения с постоянной скоростью [4]

на практике встречается довольно редко. Многочисленные исследования подобных повреждений, которые проводили авторы, при диагностировании нефтехимического оборудования показывают, что увеличение дефектов происходит неравномерно и, в основном, связано с их взаимным слиянием.

На рис. 1 представлен результат ультразвукового (УЗ) сканирования типичного низкотемпературного водородного растрескивания обечайки теплообменника. Как видно из данного рисунка, в металле находится множество дефектов, взаимодействующих друг с другом. В силу разницы своих размеров они имеют различные внутренние давления в полостях  $p_i$ .

В данной статье рассмотрен вариант слоистого растрескивания без пластического деформирования слоя. В этом случае несущую способность можно оценить, исходя из силовых критериев механики разрушения и результатов испытаний на ударную вязкость [5, 6].

Для упрощения будем интерпретировать дефект как круговую трещину с радиусом  $a$ . Коэффициент интенсивности напряжений  $K_{1c}^z$  при наличии внутреннего давления  $p$  в дефекте, расположенном в срединной плоскости бесконечного слоя (рис. 2), можно записать в виде [6]:

при  $\lambda \leq 2$

$$K_{1c}^z = p(12h)^{0,5}F(\lambda), \quad (1)$$

где  $F(\lambda) = (0,1267 + 0,6733\lambda^{-1} + 0,5\lambda^{-2} + C)$ ;  $C = (0,0104 - 0,1267\lambda^{-1} - 0,3367\lambda^{-2} - 0,1667\lambda^{-3})(0,6733 +$

Шкала соответствия  
"цвет-глубина залегания"

- 9.0 nm
- 10.9 nm
- 12.8 nm
- 14.7 nm

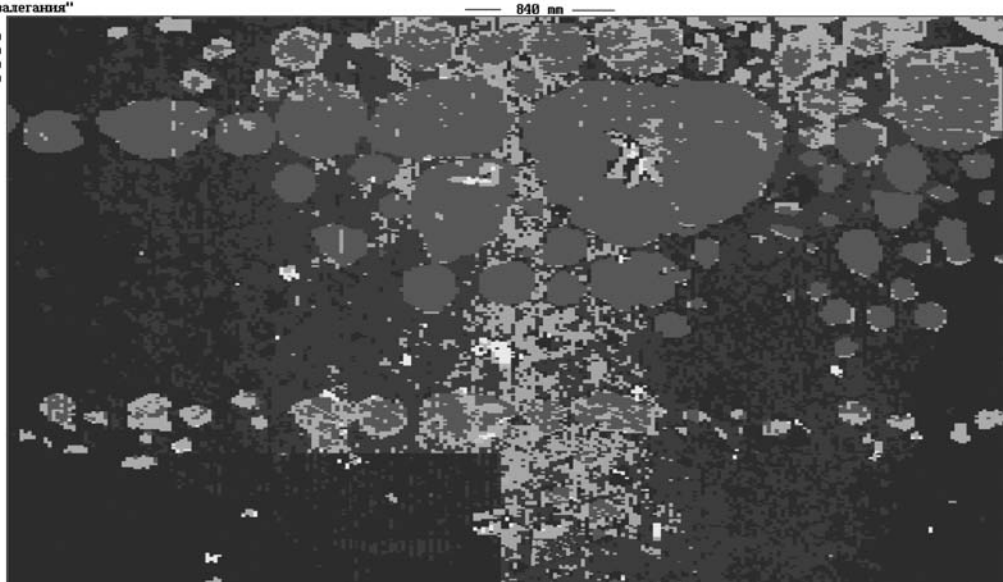


Рис. 1. Пример слоистого низкотемпературного водородного растрескивания при температуре 45 °С обечайки теплообменника, изготовленной из стали 16ГС толщиной 16 мм

+  $\lambda^{-1}$ )<sup>-1</sup>;  $\lambda$  — относительная толщина слоя, равная  $h/a$  (относительная погрешность формулы (1) при  $\lambda \leq 2$  не превышает 1 %);  
при  $2 \leq \lambda < \infty$

$$K_{1c}^z = 2p(a/\pi)^{0.5} G(\lambda), \quad (2)$$

где  $G(\lambda) = (1 + C_0\lambda^{-3} + 9,6C_1\lambda^{-5} + (C_0)^2\lambda^{-6})$ ,  $C_0 = 0,906$ ;  $C_1 = -0,179$  (относительная погрешность формулы (2) при  $2 \leq \lambda < \infty$  также не превышает 1 %).

Пусть возник переток газа между двумя несплошностями, нагруженными внутренними давлениями  $p_1, p_2$  и имеющими круглую плоскую форму радиусов  $a_1$  и  $a_2$  в изотропном материале (рис. 3). В соответствии с подходами механики разрушения при образовании канала между двумя такими несплошностями должен произойти рост того дефекта, в котором до слияния давление было меньше.

Если не учитывать влияние возможных температурных изменений, то в первом приближении внутреннее давление  $p_3$  в слившихся круглых заземленных полостях, залегающих на разных глубинах, после увеличения размера несплошности размера  $a_3$  должно составлять [7]:

$$\frac{p_1^2 a_1^3 \lambda_1^{-3} + p_2^2 a_2^3 \lambda_2^{-3}}{a_3^3 \lambda_3^{-3} + a_2^3 \lambda_2^{-3}} = p_3^2, \quad (3)$$

где

при  $p_2 > p_1$

$$\lambda_1 = h_1/a_1; \lambda_2 = h_2/a_2; \lambda_3 = h_1/a_3; \quad (3a)$$

при  $p_2 < p_1$

$$\lambda_1 = h_1/a_1; \lambda_2 = h_2/a_2; \lambda_3 = h_2/a_3. \quad (36)$$

Выражение (3) можно переписать в более удобном виде:

$$\frac{1 + \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2 \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^3 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{-3}}{\left(\frac{a_3}{a_1}\right)^3 \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_1}\right)^{-3} + \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^3 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{-3}} = \left(\frac{p_3}{p_1}\right)^2, \quad (4)$$

где относительная толщина слоя  $\lambda$  определяется из условий (3a) или (36).

Формула (4) содержит восемь неизвестных, из которых только четыре  $a_2, a_1, h_1, h_2$  могут быть непосредственно измерены при диагностическом обследовании оборудования без привлечения более сложных методов контроля. В то же время используя уравнения (1) или (2) можно существенно упростить выражение (4).

Для простоты дальнейших выводов рассмотрим наиболее распространенный случай подобных повреждений, когда относительные размеры несплошностей достаточно хорошо выявляемы обычными неразрушающими методами контроля, но и не столь велики, чтобы трактовать их как недопустимые по критериям [1, 2] (в данном случае это выражение (1)).

В случае постоянства характеристики вязкости  $K_{1c}$  в направлении толщины металла из асимпто-

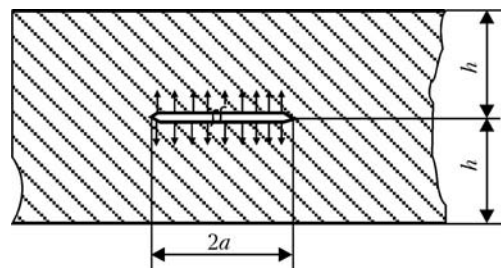


Рис. 2. Дiskoобразная трещина радиуса  $a$ , расположенная в срединной плоскости слоя и нагруженная внутренним давлением  $p$

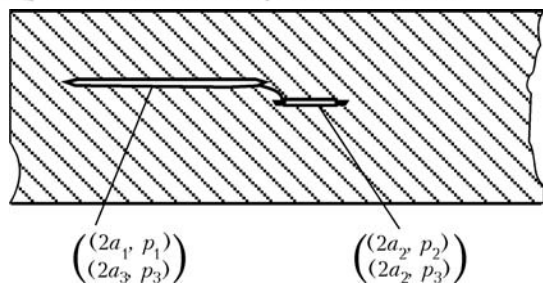


Рис. 3. Пример канального слияния двух несплошностей

тической зависимости (1) и при выполнении условия (3а) следует:

$$1 + \frac{\left(\frac{F(\lambda_1)}{F(\lambda_2)}\right)^2 \frac{h_1}{h_2} \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^3 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{-3}}{\left(\frac{a_3}{a_1}\right)^6 + \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^3 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{-3}} = \left(\frac{F(\lambda_1)}{F(\lambda_2)}\right)^2 \quad (5)$$

Полученное выражение (5) интересно тем, что при различной глубине залегания взаимодействующих между собой дефектов ожидаемый рост несплошности до значения  $a_3$  зависит только от начальных размеров  $a_1, a_2, h_1, h_2$ .

Характеристики  $a_1, a_2$  и  $h_1, h_2$  легко определяются методами НК, что позволяет использовать данное равенство для упрощенной инженерной оценки увеличения размера несплошности («скачка»), при условии отсутствия пластического деформирования прослойки.

В случае, когда происходит слияние более чем двух дефектов, предлагаемый подход к решению данной задачи практически не меняется. Кроме того, можно использовать принцип последовательного решения, когда на каждом последующем этапе происходит слияние с новым дефектом (если дефект не попадает в область распространения предыдущего). Поэтому данный подход может быть применен при анализе работоспособности реального оборудования и выработке прогностического решения (назначенный ресурс).

В предложенной постановке может быть получено общее решение данной задачи. Перед рассмотрением конкретного примера решения упро-

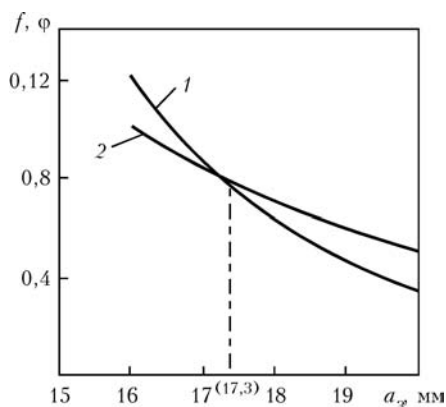


Рис. 4. Графическое решение уравнения (6): 1 –  $f(a_3)$ ; 2 –  $\phi(a_3)$

щенной задачи следует еще раз отметить, что кажущаяся простота определения возможного скачка дефекта связана с рядом принятых здесь ограничений, значимость которых в каждом конкретном случае следует оценивать или, по крайней мере, качественно понимать:

- несплошность (дефект) рассматривается как круговая, залегающая в срединной плоскости и расположенная к ней параллельно; высота до срединной плоскости принимается равной минимальной толщине слоя в зоне несплошности;
- несплошность (образующие ее поверхности) рассматривается в упругой постановке для защемленной пластины, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой;
- характеристика вязкости разрушения в направлении толщины  $K_{1c}$  принимается постоянной;
- затраты энергии на страгивание трещины не учитываются;
- взаимное влияние дефектов перед их фронтами не учитывается.

Как пример, рассмотрим случай, когда основная глубина залегания дефектов к более близкой поверхности составляет 8...9 мм. При «туннельном» слиянии двух дефектов с радиусами 16 и 12 мм и залегающими на глубинах 8 и 9 мм соответственно уравнение (5) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} & (1 + (2,3797/1,3391)^2(8/9)(12/16)^3(0,75/0,5)^{(-3)}) / \\ & / ((a_3/16)^6 + (12/16)^3(0,75/0,5)^{(-3)}) = \\ & = (2,3797)^2 / ((0,1267 + 0,6733(a_3/8) + 0,5(a_3/8)^2 + \\ & + (0,0104 - 0,1267(a_3/8) - 0,3367(a_3/8)^2 - \\ & - 0,1667(a_3/8)^3)(0,6733 + a_3/8)^{-1})^2. \quad (6) \end{aligned}$$

Условие (3а) при этом выполняется.

Для наглядности решим уравнение (6) в графическом виде.

Пусть

$$f(a_3) = (1 + (2,3797/1,3391)^2(8/9)(12/16)^3 \times (0,75/0,5)^{(-3)}) / ((a_3/16)^6 + (12/16)^3(0,75/0,5)^{(-3)}); \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \phi(a_3) = & (2,3797)^2 / ((0,1267 + 0,6733(a_3/8) + \\ & + 0,5(a_3/8)^2 + (0,0104 - 0,1267(a_3/8) - \\ & - 0,3367(a_3/8)^2 - 0,1667(a_3/8)^3)(0,6733 + a_3/8)^{-1})^2. \quad (8) \end{aligned}$$

На рис. 4 представлены графики зависимостей (7) и (8).

Как следует из рис. 4, точка пересечения кривых  $f(a_3)$  и  $\phi(a_3)$  дает искомое значение  $a_3$ , которое в данном случае составляет 17,3 мм. Таким образом, средний радиус несплошности  $a_1$  после слияния стал больше на 1,3 мм, что соответствует увеличению площади дефекта на 17 %.

Следует отметить, что на практике листовой прокат в направлении толщины может характеризоваться как значительной неоднородностью механических свойств, так и различной вязкостью разрушения  $K_{1c,i}^z$ , что необходимо учитывать при анализе возможного слияния подобных дефектов, залегающих на различных глубинах.



За время диагностического обследования оборудования неоднократно наблюдались случаи, когда меньшая несплошность, залегающая на большей глубине, при туннельном соединении с большей несплошностью, залегающей на меньшей глубине, провоцировала ее рост за счет более высокого давления. В каком-то смысле бóльшая несплошность становилась коллектором.

В этом случае зависимость (3) является более общей, позволяющей учитывать подобные отличия свойств в направлении толщины с учетом уравнений (1) и (2). В общем виде выражение (3) сводится к следующему:

$$1 + \frac{\left(\frac{K_{1c,2}^z}{K_{1c,1}^z}\right)^2 \left(\frac{F(\lambda_1)}{F(\lambda_2)}\right)^2 \frac{h_1}{h_2} \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^3 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{-3}}{\left(\frac{a_3}{a_1}\right)^3 \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_1}\right)^{-3} + \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^3 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{-3}} = \left(\frac{K_{1c,3}^z}{K_{1c,1}^z}\right)^2 \left(\frac{F(\lambda_1)}{F(\lambda_3)}\right)^2 \frac{h_1}{h_3} \quad (9)$$

где при  $p_2 > p_1$ :

$$\lambda_1 = h_1/a_1; \lambda_2 = h_2/a_2; \lambda_3 = h_1/a_3; h_3 = h_1; K_{1c,3}^z = K_{1c,1}^z;$$

при  $p_2 < p_1$ :

$$\lambda_1 = h_1/a_1; \lambda_2 = h_2/a_2; \lambda_3 = h_2/a_3; h_3 = h_2; K_{1c,3}^z = K_{1c,2}^z.$$

Условие  $p_2 > p_1$  равносильно выражению

$$\left(K_{1c,2}^z/K_{1c,1}^z\right)^2 \left(F(\lambda_1)/F(\lambda_2)\right)^2 (h_1/h_2) > 1,$$

условие  $p_2 < p_1$  — выражению

$$\left(K_{1c,2}^z/K_{1c,1}^z\right)^2 \left(F(\lambda_1)/F(\lambda_2)\right)^2 (h_1/h_2) < 1.$$

Как видно, для решения уравнения (9), в отличие от (5), необходимо еще дополнительно знать

значения характеристик трещиностойкости  $K_{1c,1}^z$  и  $K_{1c,2}^z$  на соответствующих глубинах залегания дефектов, что является довольно трудоемкой задачей. Разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины подходы к оценке характеристик вязкости разрушения  $K_{1c}$ ,  $\delta_{1c}$  по результатам стандартных механических испытаний [5, 7] позволяют несколько упростить данную задачу, но и в этом случае необходимо провести испытание методом разрушающего контроля.

**Выводы**

Отмечена неравномерность развития низкотемпературного слоистого водородного растрескивания нефтехимического оборудования на стадии «туннельного» слияния несплошностей.

Получены упрощенные инженерные зависимости по оценке роста низкотемпературного слоистого водородного растрескивания при выравнивании внутренних давлений между двумя отдельными дефектами для изотропного и анизотропного состояний свойств материала в направлении толщины проката.

1. *Некоторые* результаты технической диагностики сосудов и трубопроводов в нефтехимической промышленности // В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина, В. П. Дядин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 3. — С. 17–24.
2. *Гиренко В. С., Мутас В. В., Гиренко С. В.* Прочность трубопроводов и сосудов с коррозионными выемками // Там же. — 2001. — № 4. — С. 21–23.
3. *Балуева А. В., Дашевский И. Н.* Рост водородных отслоений в металле // Изв. РАН. МТТ. — 1999. — № 1. — С. 119–123.
4. *Балуева А. В., Дашевский И. Н.* Модель внутренней газонаполненной трещины в материале // Механика твердого тела. — 1994. — № 6. — С. 113–118.
5. *Гиренко В. С., Дядин В. П.* Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных материалов и их сварных соединений // Автомат. сварка. — 1986. — № 10. — С. 61–62.
6. *Механика* разрушения и прочность материалов / Справ. пособие. — Т. 2. — Киев: Наук. думка, 1968. — С. 616.
7. *Дядин В. П.* Сопоставление значений ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже при вязком разрушении // Автомат. сварка. — 2004. — № 4. — С. 24–29.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила в редакцию 10.10.2008