

КИНЕТИКА РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВОДОРОДА

В.П. Петров, И.В. Петров, А.А. Шипилов (*г. Барнаул, Россия*)

Отрицательное влияние водорода на трещиностойкость сварных соединений общепризнано. Закономерности диффузии водорода в твердых металлах, в том числе и в сталях, изучены достаточно подробно. Предполагают, что развитие водородных трещин однозначно связано с диффузией водорода. Если это действительно так, то рост водородных трещин должен сравнительно просто описываться известными для водорода кинетическими зависимостями.

Водородные трещины, как это отмечается в большинстве посвященных этому вопросу работ, имеют хрупкий характер и к ним можно применить соотношение Гриффитса, которое связывает критическое напряжение $\sigma_{кр}$, необходимое для раскрытия трещины полудлины "с" в материале с поверхностной энергией γ :

$$\sigma_{кр}^2 = \frac{2E\gamma}{\pi c},$$

где E – модуль упругости материала.

Раскрытие трещин осуществляется за счет создания им в полости трещины критического давления $P_{кр}$. Таким образом, кинетика развития трещины под влиянием водорода определяется кинетикой натекания его в трещину для создания в ней давления больше или равного $P_{кр}$.

В этом случае предполагается, что в металле уже есть субмикродфект, в котором возможно скопление водорода. Такими субмикродфектами могут быть зародыши хрупких трещин, дислокационные модели возникновения которых проанализированы в работах многих ученых: Зинера, Коттрелла, Петча и др.

При кинетических расчетах развития водородных трещин может быть допущено предположение, справедливость которого определяется степенью соответствия расчетных данных результатам экспериментов. В данном случае это относится к механизму роста трещин. Исходя из того, что водородные трещины развиваются дискретно, можно полагать, что рост трещины происходит по следующей схеме: насыщение водородом зародыша трещины до давления $P_{кр}$ → скачок в росте трещины → резкое снижение давления водорода в трещине → остановка для

нового насыщения водородом → новый скачок трещины и т.д. вплоть до момента нестабильного развития трещины, сопровождающегося в отдельных случаях разрушением конструкции. Как следует из этой схемы, основным лимитирующим звеном процесса роста трещины является диффузия в нее водорода.

Рассмотрим наиболее наглядный и вероятный путь попадания водорода в трещины – за счет градиента давления его в окружающем металле и в полости. Связь давления водорода в металле (P) с его содержанием в нем ($[H]$) можно учесть соотношением, приведенным Прагменом в его статье.

$$[H] = 6,35 \cdot 10^{-2} \cdot P^{1/2} \frac{(3453 + 7,3 \cdot 10^{-8} P)}{T}. \quad (1)$$

Кинетика натекания водорода может быть определена по формулам, предложенным К.К. Шкодиным для случая перераспределения газов через проницаемую мембрану, из которых можно получить связь между давлением с двух сторон мембраны и временем перетекания газа

$$P_2 = \frac{P_1 \cdot F D t}{V + F D t}, \quad (2)$$

где P_2 – давление в объеме, куда идет натекание;

P_1 – давление в объеме, из которого идет натекание;

D – коэффициент диффузии газа через мембрану;

V – объем полости, в которую идет натекание;

F, l – площадь и толщина мембраны соответственно.

Исследования образования подваликовых трещин показали, что они обычно располагаются на расстоянии примерно 0,5 мм от линии сплавления. а так как водород попадает в околосшовную зону из металла шва, то можно принять толщину мембраны $l = 0,05$ см. Коэффициент диффузии водорода в металле при 20 °С приняли $D = 6 \cdot 10^{-6}$ см²/с.

Величину скачка трещины под влиянием водорода изучали Заккет В.Ф. и др., которые установили зависимость ее от начальной полудлины трещины (c), действующего напряжения (σ) и предела текучести металла (σ_T).

$$2\Delta_c = \frac{\pi c \sigma^2}{E \sigma_T} \quad (3)$$

Как видно из схемы роста водородных трещин, использование зависимостей (1)–(3) достаточно для расчета кинетики их развития.

Для упрощения расчетов нами было принято, то субмикротрещина представляет собой сумму двух конусов. Принимая половину раскрытия трещины "b" равной 0,01 полу-длины трещины "с" и преобразуя выражение (2), получили зависимость времени натекания водорода до очередного скачка трещины от давления водорода и размера трещины, где натекание водорода учтено через половину поверхности трещины:

$$\tau = \frac{(P_{кр} - P_{тр})}{(P_{ст} - P_{тр}) \cdot 150 \cdot D} \quad (4)$$

где τ – время натекания, с;

$P_{кр}$ – критическое давление, необходимое для очередного скачка, Па;

$P_{тр}$ – давление в трещине после скачка, Па;

$P_{ст}$ – давление водорода в металле, Па;

l – расстояние от источника водорода до трещины, см.

Результаты расчета субмикротрещин при насыщении их водородом, попадающим из металла шва в околошовную зону, для разного содержания водорода в металле представлены на рисунке 1 в виде зависимости длины трещин от времени изотермической выдержки.

Согласно расчетам по этой схеме трещины растут с очень высокой скоростью ($1-1,5 \cdot 10^{-3}$ см/с), гораздо более высокой, чем реально наблюдавшаяся скорость роста под-валиковых трещин (в среднем $2 \cdot 10^{-8}$ см/с).

Другим возможным путем расчета кинетики роста водородных трещин является использование зависимостей (5) и (6), приведенных в работе Заккея В.Ф., Герберича У.У., Паркера Р.Р.

$$\tau = \frac{K_c^4}{2\sigma_0 \pi D \sigma_T E} \quad (5)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\sigma_T \cdot E \cdot D}{K_c^2} \quad (6)$$

где τ – время до разрушения;

K_c – коэффициент интенсивности напряжений;

σ_0 – действующее напряжение;

σ_T – предел текучести;

E – модуль упругости.

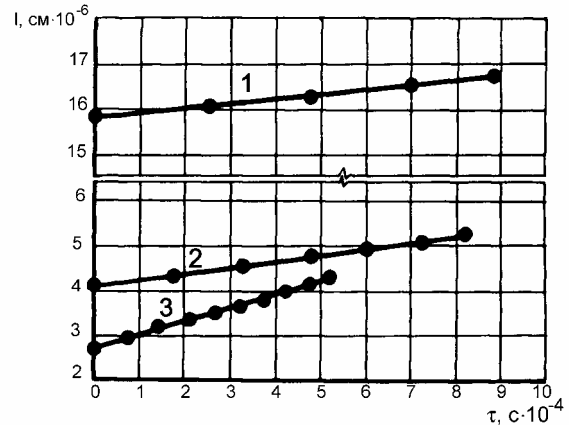


Рисунок 1 – Развитие трещин под влиянием водорода, поступающего в полость трещины по обычному механизму диффузии (расчетные данные): 1 – $[H] = 40 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; 2 – $[H] = 7 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; 3 – $[H] = 1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$

Авторы этой работы полагают, что время между скачками трещины связано с диффузией водорода из одного участка трещины в другой. Выражение (6) дает скорость роста трещины в стали Ст3 при напряжениях $0,7 \sigma_T$ около $1,3 \text{ см/с}$, что также значительно превышает реально наблюдаемые скорости роста трещин.

Таким образом, приведенные расчетные схемы не позволяют даже в первом приближении получить представление о кинетических закономерностях развития трещин под влиянием водорода. Столь существенное различие между расчетными значениями и экспериментально установленными скоростями роста трещин может быть связано лишь с тем обстоятельством, что только часть водорода поступает в трещины обычным диффузионным путем и участвует в процессе развития трещин. Простые диффузионные модели проникновения водорода в трещины не дают возможности провести даже весьма приближенный расчет кинетики роста трещин. Вероятно, насыщение трещины водородом реализуется и по другому механизму, отличному от диффузии под влиянием градиента давления. Таким механизмом предположительно может быть дислокационный механизм.