

Прогнозирование прочности стальных труб, поврежденных водной коррозией

М. М. Алексюк

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Показана возможность прогноза долговечности поврежденных стальных труб. Вследствие электрохимического взаимодействия металла и воды образуются щелеобразные коррозионные дефекты, которые являются концентраторами напряжений и приводят к локальному перенапряжению материала и разрушению труб. Долговечность труб рассчитывается по скорости роста коррозионных дефектов и степени концентрации напряжений. С повышением температуры скорость электрохимической коррозии увеличивается, что приводит к снижению долговечности труб.

Ключевые слова: прочность, труба, водная коррозия, концентрация напряжений, температура, долговечность.

В настоящей работе описан метод прогнозирования прочности конструкций типа емкостей, трубопроводов, работающих в контакте с технической чистой водой.

Суть метода заключается в учете действия коррозионных дефектов как концентраторов напряжений. Обычно в практике прочностных расчетов рассматриваются результаты равномерного коррозионного разъедания всей контактной поверхности материала. Рост напряжений при этом определяется как результат уменьшения толщины стенки сосуда [1].

Автором рассматривается более опасный вид коррозии – межкристаллитный, происходящий вследствие электрохимического растворения границ зерен с образованием щелеобразных дефектов с высоким коэффициентом концентрации напряжений. В результате коррозии внешние формы конструкций не изменяются, но происходит существенная потеря прочности и пластичности материала [1]. Такому разрушению подвергаются конструкции из сталей с четко выраженной кристаллической структурой, например хромоникелевые, а также сварные швы.

Образование щелеобразных коррозионных дефектов происходит при растворении в воде ионов металлов, содержащихся в границах зерен – аноде, и осаждении их после восстановления на поверхности зерен – катоде.

Указанный процесс возможен при электрическом контакте между границей и зерном, что обеспечивает свободный переток электронов [1] от анода к катоду.

Схема образования коррозионных дефектов приведена на рис. 1.

Ниже исследуется влияние формы и размеров коррозионных дефектов на прочность труб.

Появление эффекта концентрации напряжений в пустотелых дефектах происходит вследствие преобразования волновых процессов передачи напряжений в металлах [2]. Волна растягивающих напряжений, выходя на поверхность полого дефекта, отражается от нее с потерей полуволны (в

противофазе). Происходит преобразование волн растяжения в волны сжатия, которые должны увлечь эту поверхность вслед за волной напряжения. Однако такому перемещению противодействует силовое сопротивление материала на боковых, по отношению к фронту волны, поверхностях, где появляются напряжения сопротивления, дополнительные к номинальным, которые учитываются как концентрация напряжений. Их величина пропорциональна площади поверхности дефекта, отражающей волну, и обратно пропорциональна площади боковых поверхностей дефекта. Они распространяются в глубь материала на расстояние r , которое зависит от размеров боковых поверхностей и жесткости материала. В теории разрушения размер r называют длиной пластической зоны [2]. Однако такой размер существует и у хрупких материалов, где пластическая деформация физически невозможна. Мы назовем r длиной зоны концентрации напряжений в материале. Ее численное значение определяется по формуле Холла [2], которая после необходимых преобразований принимает вид

$$r = \rho(1 + \varepsilon_c) \exp\left(\frac{\sigma_B}{\sigma_T} - 1\right), \quad (1)$$

где ρ – радиус закругления боковых поверхностей; ε_c – предельная деформация материала; σ_B и σ_T – пределы прочности и текучести.

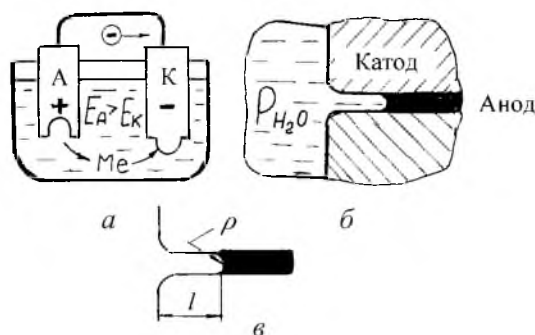


Рис. 1. Схема образования коррозионных дефектов в структуре стали: *а* – электрохимическая коррозия металлов; *б* – межкристаллитный коррозионный дефект; *в* – геометрическая форма и размеры дефекта.

Коэффициент концентрации напряжений для щелеобразного дефекта глубиной L равен [3]

$$K_L = 1 + \left(\frac{L}{2r}\right)^{1/2}.$$

При хрупком разрушении $\sigma_B = \sigma_T$, $r \approx \rho$, и коэффициент K_L рассчитывается по формуле

$$K_L = 1 + \left(\frac{L}{2\rho}\right)^{1/2}. \quad (2)$$

В предложенной модели расчет предельного давления P_c в поврежденной трубе проводится по доработанной известной формуле прочности труб [3]:

$$P_c = \frac{\sigma_b h}{R_T K_L}, \quad (3)$$

где h – толщина стенки трубы; R_T – внутренний радиус трубы; K_L – коэффициент концентрации напряжений в коррозионном дефекте.

Для работающих трубопроводов важным параметром является время безопасной эксплуатации при стабильном рабочем давлении P_H и температуре T . Оно существенно зависит от скорости роста размеров коррозионного дефекта, главным из которых есть глубина L .

Подставив в (3) значение K_L из (2) и решив его относительно L , получим предельное значение L_c :

$$L_c = 2\rho \left(\frac{\sigma_b h}{R_T P_H} - 1 \right)^2. \quad (4)$$

Таким образом, разрушение трубы при рабочем давлении произойдет по достижении дефектом глубины L_c . Необходимое для этого время t_c зависит от скорости коррозионных процессов на границах зерен, которая определяется плотностью электрического тока I_A на поверхности анода S_A [1, 3]:

$$I_A = \frac{I_0}{S_A}, \quad (5)$$

где I_0 – общая плотность тока обмена, определяемая экспериментально при условии химического равновесия процесса коррозии.

Если же напряжение в электрической цепи превысит равновесное состояние за счет дополнительных источников тока на величину ΔU , то плотность тока I_A увеличится согласно уравнению [4]:

$$I_A = \frac{I_0}{S_A} \exp\left(\frac{\Delta U}{B}\right), \quad (6)$$

где B – постоянная Тафеля, при нормальной температуре равная 0,02...0,08 В.

По плотности анодного тока определяется прошедшее за время t количество электричества Q [3, 4]:

$$Q = I_A t. \quad (7)$$

Зная заряд электрона e , можно установить число электронов N_e , принимавших участие в переносе этого электричества, по формуле

$$N_e = \frac{I_A t}{e}. \quad (8)$$

С учетом валентности N_B образующихся ионов определяется число атомов металла N_A на границе зерна, перешедших в ионы с 1 м^2 площади анода в течение времени t секунд:

$$N_A = \frac{I_A t}{e N_B}. \quad (9)$$

Это число атомов занимало объем границ зерна V_A :

$$V_A = \frac{N_A M}{A p}, \quad (10)$$

где M – молекулярная масса металла; A – число Авогадро; p – плотность стали.

Зная объем растворенного материала границ зерен и их площадь, можно определить глубину полых коррозионных дефектов L :

$$L = \frac{V_A}{S_A}. \quad (11)$$

После подстановки значения V_A в формулу (11) последняя преобразуется следующим образом:

$$L = \frac{N_A M}{A p S_A}. \quad (12)$$

Площадь границ зерен зависит от формы, размеров и их количества, а также от степени чистоты материала. Обычно для пароводных трубопроводов используют материалы с небольшим количеством примесей, которые в основном концентрируются в межзеренных границах, имеющих сложную кристаллическую структуру и обладающих более высокой жесткостью [5]. Площадь границ зерен S_A определяется исходя из всего объема материала по стандартной методике [4]. Суть ее заключается в том, что, задавшись формой зерен и определив их количество, можно найти S_A из соотношения

$$N_V = \left(\frac{S_A}{\alpha_\Phi} \right)^3, \quad (13)$$

где N_V – число зерен в единице объема; α_Φ – коэффициент формы зерна.

Из уравнения (13) находим

$$S_A = \alpha_\Phi N_V^{1/3}. \quad (14)$$

Коэффициент α_ϕ определяется следующим образом. Если предположить, что металл состоит из зерен кубической формы, то поверхности границ зерен, соприкасающиеся с химической средой, состоят из четырех участков сечения общей границы между смежными кубическими зёрнами. Поскольку каждая граница образована поверхностями двух зерен, суммарная площадь границ зерен уменьшается наполовину, и коэффициент $\alpha_\phi = 0,5 \cdot 4 = 2$.

Число зерен определяется по стандартной методике. Это понятие известно как зернистость, которая выражается в баллах по стандартной шкале.

Размер зерна в баллах N_d связан с числом зерен N_V соотношением [3]

$$N_V = 2^{(N_d - 1)}. \quad (15)$$

Таким образом, глубина коррозионных дефектов зависит от структуры материала, характера коррозионных процессов, времени их действия и определяется по формуле

$$L = \frac{I_A t M}{e N_V A p \alpha_\phi 2^{(N_d - 1)/3}}. \quad (16)$$

Однако по мере растворения металла и углубления коррозионных дефектов в границах зерен происходит процесс пассивации поверхности границы зерна-анода.

Пассивация – это образование на поверхности анода пленок из окислов металла или адсорбированных атомов кислорода, которые своим экранирующим действием снижают скорость коррозии. Наряду с пассивацией на поверхности анода происходит процесс поляризации, который может оказывать влияние на ионизацию металлов.

Плотность анодного тока в этом случае уменьшается в соответствии с зависимостью [3]

$$I_A = \frac{D_a N_V F C_a}{h_g} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta E_a F N_e}{RT}\right) \right], \quad (17)$$

где D_a – коэффициент диффузии материала анода; N_e – количество электронов, выделяющихся при переходе ионов в раствор; F – число Фарадея; h_g – толщина диффузионного слоя; C_a – концентрация ионов металла анода в растворе; ΔE_a – сдвиг потенциала; R – газовая постоянная.

Таким образом, формула для определения глубины коррозионных дефектов по границам зерен с учетом пассивации и уменьшения анодного тока принимает вид

$$L = \frac{D_a F C_a \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta E_a F N_e}{RT}\right) \right] t M}{h_g e A p \alpha_\phi 2^{(N_d - 1)/3}}. \quad (18)$$

Важной характеристикой пароводопроводов является предельное время безопасной эксплуатации t_c . Эта величина рассчитывается путем подстановки предельного значения L_c из (4) в выражение (18), которое в этом случае принимает значение t_c . Расчетная формула приобретает вид

$$t_c = \frac{2\rho \left(\frac{\sigma_b h}{R_T P_H} - 1 \right)^2 h_g e A p \alpha_\phi 2^{(N_d - 1)/3}}{M D_a F C_a \left[1 - \exp \left(- \frac{\Delta E_a F N_e}{RT} \right) \right]}. \quad (19)$$

Многочисленность параметров этого уравнения отображает сложность процесса межкристаллитной электрохимической коррозии. В качестве примера рассмотрим поведение труб пароводопроводов из хромоникелевой стали марки X18H9, работающих при разных рабочих давлениях P_H и температурах T . Входящие в формулу (19) постоянные показатели имеют следующие значения: $\sigma_b = 550$ МПа, $h = 8 \cdot 10^{-3}$ м, $R_T = 0,162$ м, $h_g = 5 \cdot 10^{-4}$ м, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж, $A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$, $p = 8000$ кг/м 3 , $\alpha_\phi = 2$, $N_d = 7$, $M = 56 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $F = 9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль, $C_a = 4 \cdot 10^{-5}$ моль/м 3 , $\Delta E_a = 9,45$ Дж/моль, $N_b = 2$, $R = 8320$ Дж/моль \cdot К, $N_e = 2$.

Значения переменных показателей приведены в таблице. Если предположить, что вода не содержит существенных примесей и непрерывно течет по трубам, то можно считать, что коррозионный процесс происходит равномерно, и прочность снижается пропорционально времени эксплуатации труб.

Влияние температуры учитывается перерасчетом зависимых от нее параметров, определяемых формулами (1) и (17).

В одном случае оно учитывается зависимостью σ_b и σ_T от температуры в соответствии с уравнением [6]

$$\sigma_{i_T} = \sigma_{i_{293}} \exp \left[\beta_T \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right) \right], \quad (20)$$

(σ_{i_T} – пределы прочности и текучести при T ; $\sigma_{i_{293}}$ – пределы прочности и текучести при комнатной температуре; β_T – характеристика температурной зависимости; T – рабочая температура, К), в другом – путем изменения показателя степени при определении анодного тока (17).

Результаты расчетов долговечности поврежденных коррозией пароводопроводных труб из стали X18H9 при разных давлениях среды и температурах приведены в таблице. По результатам расчетов построены графики зависимости долговечности труб от нагрузки и температуры. Видно, что с повышением давления и температуры долговечность снижается, особенно при воздействии температуры (рис. 2).

Долговечность труб, поврежденных водной коррозией

P_H , МПа	T , К	σ_T/σ_B , МПа	$r \cdot 10^{-5}$, м	$D_a \cdot 10^{-5}$, м ² /с	$L_c \cdot 10^{-3}$, м	t_c , год	Погрешность, %
0	300	274/550	4,3	1	8,00	$\frac{17,7}{\sim 20,0}$	11
2,5	300	274/550	4,3	1	4,13	$\frac{9,2}{\sim 10,0}$	8
5,0	300	274/550	4,3	1	0,84	$\frac{1,9}{\sim 2,0}$	5
7,5	300	274/550	4,3	1	0,29	$\frac{0,64}{\sim 0,80}$	20
0	600	246/530	5,4	10	8,00	$\frac{3,3}{\sim 4,0}$	17
2,5	600	246/530	5,4	10	5,80	$\frac{2,4}{\sim 3,0}$	20
5,0	600	246/530	5,4	10	1,05	$\frac{0,44}{\sim 0,50}$	12
7,5	600	246/530	5,4	10	0,36	$\frac{0,16}{\sim 0,20}$	20

Примечание. Над чертой приведены расчетные значения t_c , под чертой – действительные.

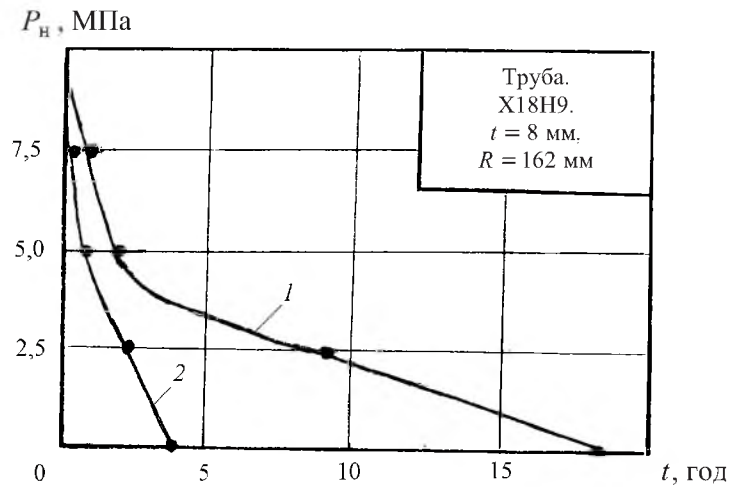


Рис. 2. Долговечность труб из стали X18H9 при действии водной коррозии: 1 – $T = 300$ К; 2 – $T = 600$ К.

В реальных условиях процесс коррозионного разрушения труб происходит быстрее за счет действия химических примесей в воде.

Таким образом, метод оценки долговечности пароводопроводов с учетом действия коррозионных процессов и температур позволяет прогнозировать их работоспособность с достаточной точностью, а главное раскрывает механизм влияния химически активных сред на прочностную надежность контактирующих с ними стальных конструкций.

Описанный метод может быть использован для решения задач прочности конструкций, поверхность которых подвержена локальным коррозионным разрушениям, происходящим под воздействием различных химически активных сред.

Резюме

Показана можливість прогнозування довговічності пошкоджених сталевих водопровідних труб. Внаслідок електрохімічної взаємодії металу і води виникають щілиноподібні корозійні дефекти, що є концентраторами напружень і зумовлюють локальну перенапругу матеріалу та руйнування труб. Довговічність труб розраховується по швидкості росту корозійних дефектів і ефективності концентрації напружень. Із підвищенням температури швидкість електрохімічної корозії збільшується, що призводить до зниження довговічності труб.

1. *Жук Н. П.* Курс коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия, 1968. – 408 с.
2. *Алексюк М. М.* Метод прогнозирования прочности конструкций // Надежность и долговечность машин и сооружений. – Киев: Наук. думка, 1990. – Вып. 18. – С. 64 – 70.
3. *Герасимов В. В.* Коррозия сталей в нейтральных водных средах. – М.: Металлургия, 1981. – 192 с.
4. *Van-Vlack L. H.* Materials Science for Engineers. – Massachusetts: Addison-Wesley publishing company, 1974. – 472 p.
5. *Трефилов В. И., Мильман Ю. В., Фирстов С. А.* Физические основы прочности тугоплавких металлов. – Киев: Наук. думка, 1975. – 316 с.
6. *Махутов Н. А.* Соппротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. – М.: Машиностроение, 1973. – 200 с.

Поступила 01. 10. 2000