

УДК 620.193-001.18

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДВИЖЕНИЯ СРЕДЫ НА ПАССИВАЦИЮ ПИТТИНГОВ И ИХ ПРЕДЕЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ

© 2002 г. К. Р. Таранцева*, В. С. Пахомов**

* Пензенский технологический институт

** Московский государственный университет инженерной экологии

Поступила в редакцию 12.04.2000 г.

Предложена модель для определения условий пассивации питтингов и их предельных размеров в движущихся средах исходя из условий образования и существования солевой пленки на их поверхности. Проверка модели в хлоридных растворах на полностью активированных и локально активированных электродах из стали 12Х18Н10Т (на последних – в гидродинамической системе двух дисков), а также в реальной коррозионной системе подтвердила возможность ее использования для прогнозирования питтинговой коррозии нержавеющих сталей в движущихся средах.

Влияние движения среды на питтингообразование – признанный факт [1–13]. Несмотря на различные подходы к оценке влияния движения среды на рост питтинга и его пассивацию в потоке среды, большинство авторов сходятся в том, что эффект движения определяется массопереносом через солевую пленку или (при ее отсутствии) разбавлением внутривиттингового электролита. При определенных скоростях движения жидкости ($Re_{кр}$) на поверхности металла концентрация насыщения $C_{нас}$ не достигается, и сохраняется возможность самопроизвольной пассивации обнажившихся участков.

$Re_{кр}$ определяют решением уравнения Тафеля (1) и конвективного массопереноса (2) для реакций, идущих с кинетическим контролем:

$$\eta_s(x) = \frac{RT}{anF} \ln \frac{i(x)}{i_0}, \quad (1)$$

$$U \nabla C = \frac{1}{Pe} \nabla^2 C, \quad (2)$$

и уравнениями Лапласа (3) и конвективного массопереноса (2) – для реакций, идущих с омическим контролем:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} = 0. \quad (3)$$

Граничные и начальные условия зависят от свойств конкретных систем. Решение уравнений (1) и (2) или (2) и (3) представляют в виде критических значений числа Рейнольдса.

На практике чаще $Re < Re_{кр}$, и у растворяющейся поверхности существуют условия достижения и сохранения $C_{нас}$, т.е. зарождения и роста питтингов. В этом случае возможность пассивации действующих питтингов определяется достаточностью

локального движения в них для выноса продуктов растворения из питтинга и растворения имеющейся в нем солевой пленки. В данном случае условия пассивации питтинга можно определить, решая уравнения Навье-Стокса и конвективного массопереноса,

$$\nabla^2 U = Re \nabla P, \quad (4)$$

$$U \nabla C = \frac{1}{Pe} \nabla^2 C \quad (5)$$

с двумя видами граничных условий: 1) поверхность каверны растворяется с определенной скоростью, т.е.

$$\frac{\partial C}{\partial n} = -Sh, \quad C < C_{нас};$$

2) поверхность каверны покрыта металлической солью:

$$C > C_{кр}.$$

Решение системы (4) и (5) представляется в виде критических значений Re , Pe , Sh :

$$Re > A Sc^b Sh^c, \quad (6)$$

где $Re = \frac{UL}{2\nu}$ – число Рейнольдса; $Sc = \frac{\nu}{D}$ – число

Шмидта; $Sh = \frac{iL}{nFC_{sat}D}$ – число Шервуда, характе-

ризующее локальную скорость растворения вдоль стенок каверны; A – коэффициент массопереноса; b и c – коэффициенты, зависящие от свойств конкретной системы; L – размер каверны; U – скорость течения жидкости в центре каверны; ν – кинематическая вязкость раствора; D – коэффициент диффузии; F – число Фарадея; C_{sat} – концентрация насыщения; i – плотность тока на поверхности каверны;

n – число электронов, принимающих участие в реакции.

В [11] на основе расчета градиентов концентрации, возникающих у растворяющейся поверхности каверн различной конфигурации, определены критические условия пассивации питтингов благодаря движению в их полости и показано, что питтинг пассивируется, если:

$$1 < Pe < 200, \quad (7)$$

$$0.1 < Sh < 10, \quad (8)$$

где $Pe = ReSc$ – число Пекле, характеризующее долю конвективного переноса к диффузионному.

Доказано [14], что критическая концентрация катионов металла не достигается при потенциале отрицательнее потенциала образования солевой пленки, поскольку в этой области действуют кинетические ограничения процесса растворения металла в питтинге. В области же положительнее потенциала образования солевой пленки растворение в питтинге происходит с диффузионно-омическим контролем.

В таком случае, условно приняв за потенциал дна питтинга потенциал образования солевой пленки E_{sf} и зная омические характеристики системы можно рассчитать область потенциалов $\Delta E = E_{кор} - E_{sf}$, в которой возможна пассивация питтингов.

Таким образом, определив условия образования и существования солевой пленки в питтинге, можно прогнозировать динамику его роста при различных режимах и скорости течения жидкости.

Ниже рассматривается модель питтинговой коррозии нержавеющей сталей в движущихся нейтральных хлоридсодержащих средах, основанная на потенциале образования солевой пленки [14–16] и известных представлениях [1–13, 17] и вытекающая из нее инженерная методика прогноза питтинговой коррозии нержавеющей сталей в движущихся средах.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Исследования показывают [2, 18], что основными условиями пассивации питтингов в движущихся средах являются разбавление поверхностного раствора соли корродирующего металла ниже критической концентрации и создание его безотрывного невозмущенного течения без зон турбулентности, в которых локально удерживается концентрация выше критической.

В качестве основных характеристик, определяющих скорость растворения питтинга в движущихся средах, приняты распределение потенциала у растворяющейся поверхности металла и скорость конвективной диффузии в условиях ламинарного потока.

При этом исходили из следующих допущений.

1. Разность потенциалов ΔE_a между дном и устьем растущего питтинга складывается из перенапряжения перехода ΔE_s , концентрационного перенапряжения в диффузионном слое ΔE_c и падения потенциала на омическом сопротивлении ΔE_{ohm} :

$$\Delta E_a = \Delta E_s + \Delta E_c + \Delta E_{ohm}, \quad (9)$$

$$\Delta E_{s(x)} = \frac{RT}{anF} \ln \frac{i(x)}{i_0}, \quad (10)$$

$$\Delta E_{c(x)} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_x}{C_0}. \quad (11)$$

Падение потенциала на омическом сопротивлении определяли из уравнения Лапласа (3) с граничными условиями:

$$i = -\chi \frac{dE}{dy} \Big|_{y=0} \quad \text{при } y = 0,$$

$$E = 0 \quad \text{при } y \rightarrow \infty,$$

$\nabla E = 0$ на поверхности изолятора.

В [9] приведено решение уравнения Лапласа (4) и показано, что омическое падение потенциала вблизи поверхности электрода составляет:

$$\Delta E_{ohm} = -\frac{1}{2\pi\chi_0} \int_0^l i(x') \ln(x-x')^2 dx'. \quad (12)$$

На практике [8], разность потенциалов на омическом сопротивлении в большинстве систем удовлетворительно описывается уравнением:

$$\Delta E_{ohm} \approx \frac{\pi di(x)}{k\chi}, \quad (13)$$

где k – коэффициент пропорциональности, колеблющийся соответственно геометрии от 3 до 8 [9]; d – характеристический размер растворяющейся поверхности.

2. Уравнение конвективной диффузии для пограничного диффузионного слоя в условиях ламинарного потока имеет вид

$$U_x \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (14)$$

с граничными условиями

$$C = C_0 \approx 0 \quad \text{при } y \rightarrow \infty,$$

$$C = C_0 \approx 0 \quad \text{при } x = 0,$$

$$\frac{i(x)}{nF} = -D \frac{dC}{dy} \Big|_{y=0} \quad \text{при } y = 0.$$

В этом случае решение системы уравнений (3), (9)–(14) для области значений Рейнольдса, в которой возможна пассивация питтинга движущимся потоком в параметрической форме имеет вид (6).

Справедливость теоретической модели была проверена на физической модели питтинга.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Физической моделью питтинга служили цилиндрические каверны с инертными стенками и полностью активированным дном.

Единственной изменяющейся характеристикой каверн являлась их глубина. Диаметр каверн d составлял от 0.5 до 2 мм; глубину h изменяли от 0 до $0.5 h/d$. Это соотношение было выбрано исходя из наблюдаемых для питтингов в движущихся средах величин $h/d = 0.15 \dots 0.85$ [19].

Для изучения движения среды на кинетику развития питтингов необходим электрод с равнодоступной в диффузионном отношении изотермической и эквипотенциальной поверхностью, причем система должна иметь известные решения гидродинамической и диффузионной задачи для реальных условий обтекания рабочей поверхности потоком жидкости.

Поэтому влияние движения среды на кинетику развития модельного питтинга исследовали в гидродинамической системе двух соосных горизонтальных дисков [20, 21], верхний из которых вращается, а нижний, с электродом, вмонтированным рабочей поверхностью вверх, неподвижен.

Для этой системы ранее экспериментально были определены: массоперенос на поверхности неподвижного диска (уравнения (15), (16)) и в модельном питтинге на глубине h (уравнения (17), (18)), коэффициент пропорциональности k для определения разности потенциалов на омическом сопротивлении в системе (13) и влияние движения среды на повышение потенциала образования солевой пленки ΔE_{sf} (уравнение (19)) [22–24]:

$$i = AnFcD^{2/3} \nu^{-1/6} \omega^{1/2}, \quad (15)$$

или

$$Sh = 0.5 \varepsilon^{-1/3} Re^{1/2} Sc^{1/3}, \quad (16)$$

где $A = 0.5 \varepsilon^{-1/3}$; $\varepsilon = \frac{\sqrt{\pi} r}{R}$ – геометрический параметр, r – радиус микроэлектрода, R – расстояние от края неподвижного диска до центра микроэлектрода, $Re = \frac{\omega H^2}{\nu}$ [20]; H – расстояние между дисками;

$$Sh = \frac{ir}{nFCD},$$

$$i_h = 0.68 \left(\frac{d}{h} \right)^{0.15} i, \quad (17)$$

$$Sh/Sh_h = 0.68 \left(\frac{d}{h} \right)^{0.15}, \quad (18)$$

$$\Delta E = \frac{qRT}{bZ_2F} \ln \left(C_0 + \frac{1.61 i D^{1/3} \nu^{1/6}}{FD_1(Z_1 + Z_2)\omega^{1/2}} \right), \quad (19)$$

где q – число анионов, участвующих в адсорбционном комплексе; R – газовая постоянная; T – температура; F – число Фарадея; C_0 – объемная концентрация активирующих ионов; i – ток, соответствующий начальной стадии питтингообразования; D – эффективный коэффициент диффузии; ν – кинематическая вязкость раствора; D_1 – коэффициент диффузии катионов; Z_1 – заряд катионов; Z_2 – заряд аниона; ω – частота вращения контрдиска.

Из (19) следует, что существуют два предельных случая растворения металла в питтинге, когда скорость растворения:

определяется перенапряжением перехода;

контролируется диффузионно-омическими сопротивлениями.

Для действующих питтингов характерен второй вариант. Пассивация их становится возможной, если падение потенциала на омическом сопротивлении сравнивается с разностью потенциалов металла E_a в устье и на дне питтинга.

Поскольку в области положительнее потенциала образования солевой пленки растворение металла в питтинге происходит с диффузионно-омическим контролем [14], условно приняв за потенциал дна потенциал образования солевой пленки E_{sf} и зная омические характеристики системы, можно найти область потенциалов репассивации питтинга:

$$E_a - E_{sf} > \frac{AnFCD^{2/3} \omega^{1/2} \nu^{-1/6} \pi d}{k\chi} 0.68 \left(\frac{d}{h} \right)^{0.15}. \quad (20)$$

Это условие для пассивации необходимо, но само по себе не достаточно. Достаточность возникает, когда оно комбинируется с такими условиями вторичного движения жидкости в каверне, при которых поверхностная концентрация катионов металла в ней не достигает насыщения, т.е. выполняются условия (7) и (8) [11].

В этом случае, с учетом известной скорости течения жидкости в центре цилиндрической каверны, условие существования безотрывного невозмущенного течения жидкости в модельном питтинге глубиной h в исследуемой системе можно записать следующим образом:

$$1 < 0.68 \left(\frac{d}{h} \right)^{0.15} \frac{K\omega h}{D} < 200, \quad (21)$$

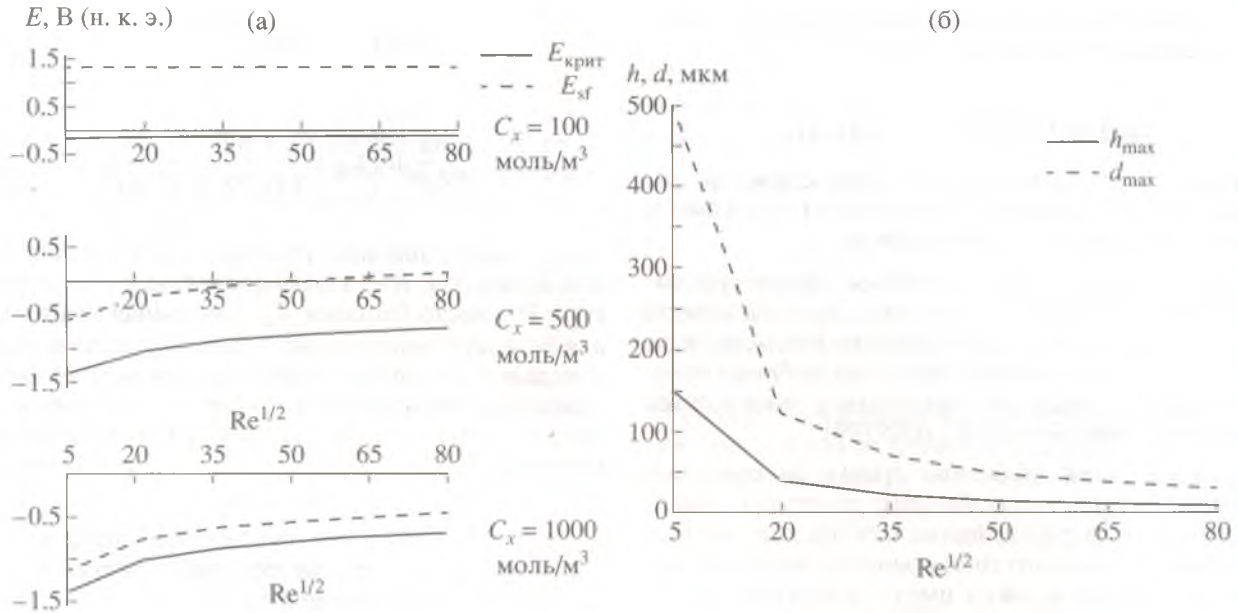


Рис. 1. Результаты расчета критических условий пассивации питтингов (а) и их предельных размеров, мкм (б), на нержавеющей стали в движущихся хлоридсодержащих средах в интегрированном пакете Excel.

где $K = \frac{u}{\omega}$ – коэффициент пропорциональности для пересчета частоты вращения диска ω в линейную скорость u .

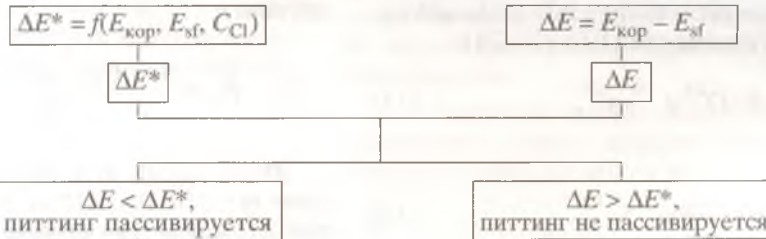
Исследования показывают [25], что на практике движение среды начинает существенно влиять на развитие питтинга лишь при достижении им размера, сопоставимого с толщиной диффузионного слоя. В таком случае, приняв $d_{min} = \delta_{диф}$, мож-

но найти область потенциалов, в которой происходит пассивация питтингов движущимся потоком:

$$\Delta E < \left(\frac{D^{1/3} v^{1/3} \omega^{0.04}}{0.0016A} \right)^{1.18} \frac{1}{\chi} \quad (22)$$

Результаты расчетов, проведенных по (20)–(22), даны на рис. 1а, 1б. Все расчеты проводили с использованием пакета прикладных программ Excel по алгоритму:

1. Критические условия пассивации



2. Предельные размеры питтингов



РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Согласно расчетам по (20)–(22), в растворе 1 N NaCl в питтингах диаметром $700 < d < 1300$ мкм критическая концентрация катионов металла не достигается.

Проверку полученных результатов расчета проводили на модельных питтингах диаметром 500 и 1000 мкм и начальной глубиной равной 0.2. Электроды анодно поляризовали при потенциале 1 В. После выпадения солевой пленки в питтинге

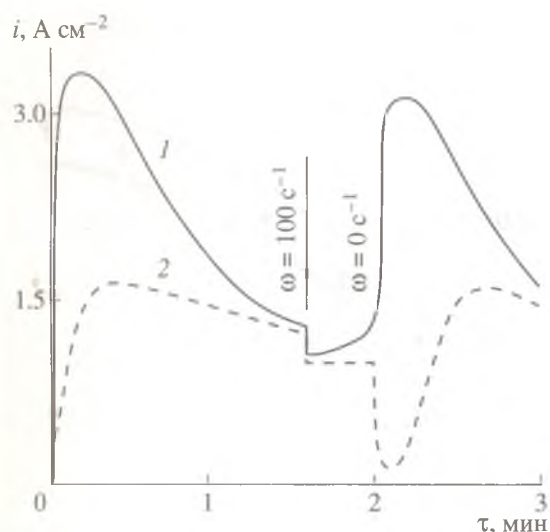


Рис. 2. Влияние движения среды на плотность тока растворения в модельных питтингах диаметром 0.5 мм (1) и 1.0 мм (2) в 1 N NaCl, E = 1 В, T = 298 К.

подавали импульс движения, который приводил к резкому уменьшению тока до некоторой величины, определенной массопереносом.

После прекращения действия импульса движения ток в питтинге диаметром 1000 мкм в первый момент уменьшался практически до нуля, затем начинал расти, достигая своего предельного значения и после выпадения солевой пленки уменьшался соответственно рис. 2. Под микроскопом поверхность модельных питтингов выглядела темной, протравленной, со следами многочисленных мелких питтингов. Это косвенно свидетельствует, что в указанных условиях критическая концентрация катионов металла в модельном питтинге этого размера не достигалась и поверхность металла в нем растворялась в режиме травления [26].

В моделях питтингов диаметром 500 мкм ток после отключения импульса движения не уменьшался, как было в питтингах диаметром 1000 мкм, а сразу возрастал, практически мгновенно достигая своего максимального значения (рис. 2). При ос-

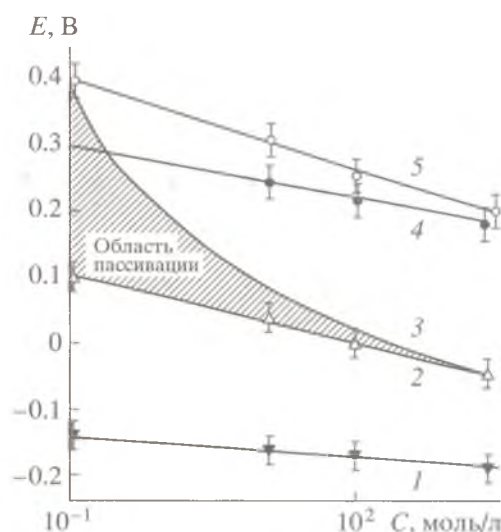


Рис. 3. Критические потенциалы стали 12X18H10T E_{sf} (1, 2), $E_{по}$ (4, 5) и область пассивации питтингов в растворах хлоридов в движущейся (2, 5 при $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$) и неподвижной среде (1, 4), 3 – расчетная зависимость.

мотре поверхность выглядела светлой, полированной, чем подтверждается сохранение высокой поверхностной концентрации катионов металла. По-видимому, в моделях питтингов этого размера не достигаются условия ламинарного течения жидкости, необходимые для достаточно полного выноса продуктов растворения и внешнее движение жидкости не мешает поверхностной концентрации катионов металла на дне питтинга оставаться выше критической.

В конечном итоге, исследования на моделях питтингов подтвердили, что в реализуемых на использованной установке условиях массопереноса в питтингах диаметром $700 < d < 1300$ мкм критическая концентрация катионов металла при внешнем движении среды не достигается. Однако это справедливо лишь при сохранении в питтингах безотрывного невозмущенного течения жидкости.

Согласно расчетам по (22), питтинги на нержавеющей стали 12X18H10T должны пассивироваться в 1 N NaCl при частоте вращения диска $\omega =$

Расчетные и экспериментальные предельные размеры питтингов на исследуемых сталях в аппаратах осаждения ампициллина

Сталь	ΔE	Расчет			Эксперимент		
		h_{max}	d_{max}	Примечание	h_{max}	d_{max}	Примечание
08X18Г8Н2Т	0.35	Не пассивируется			Образцы разрушились		
2X18H10T	0.2	158	40	Пассивируется	80	20	Питтинги
8X22Н6Т	0.15	158	25	Пассивируется	60	20	Питтинги
8X21H6M2T	0	Питтинги не возникают			Пассивная поверхность		

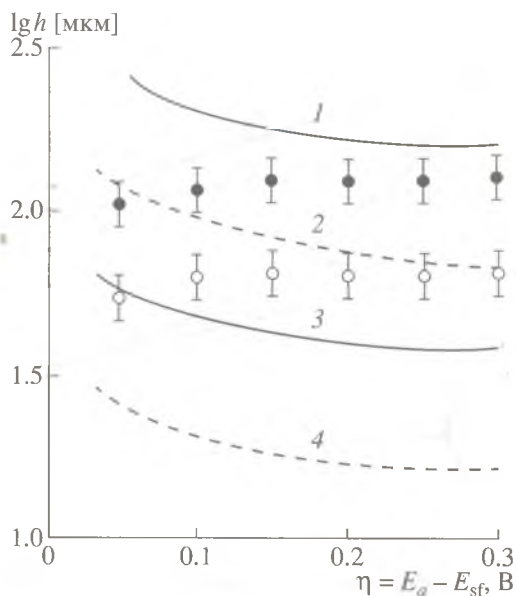


Рис. 4. Максимальная глубина питтингов, запассивированных движущимся потоком, на стали 12Х18Н10Т в 0,1 N NaCl. Расчетные зависимости (1, 3) и (2, 4) для $\omega = 100$ и 200 с^{-1} соответственно. Эксперимент для $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ (темные точки) и $\omega = 200 \text{ с}^{-1}$ (светлые точки).

$= 100 \text{ с}^{-1}$ в области потенциалов $\Delta E_a < 0.325 \text{ В}$, а при $\omega = 200 \text{ с}^{-1}$ уже при $\Delta E_a < 0.350 \text{ В}$. С учетом же влияния движения среды на потенциал образования солевой пленки E_{sf} [23], это область $E_{кор} < 0.425 \dots 0.450 \text{ В}$.

Экспериментально это проверяли на локально активированных электродах в 0,1 N NaCl при $E_{кор} < 0.4 \text{ В}$ (рис. 3). Electrodes анодно поляризовали в движущейся среде в течение 1 ч при $E = 0.2 \dots 0.45 \text{ В}$. Обследование поверхности электрода под микроскопом после опытов показало, что во всех случаях размеры питтингов не превышали расчетных величин (рис. 4, 5).

Таким образом, результаты исследований подтвердили достоверность предлагаемой математической модели и возможность применения ее для оценки предельных размеров питтингов в движущихся средах.

Справедливость модели проверяли в реальной коррозионной системе на четырех марках стали в условиях работы аппаратов на участке осаждения ампициллина. Образцы исследуемых сталей 08Х18Г18Н2Т, 12Х18Н10Т, 08Х22Н6Т и 08Х21Н6М2Т находились в течение 6 мес. в хлоридсодержащей среде, при следующих условиях: $Re = 5000$, $u = 0.2 \text{ м/с}$, $k = 4$, $\chi = 1 \text{ Ом/м}$, $A = 0.3$. Потенциалы коррозии исследуемых сталей находились при этом в области значений 0–250 мВ. Используя ранее найденные потенциалы образования солевой пленки исследуемых сталей по

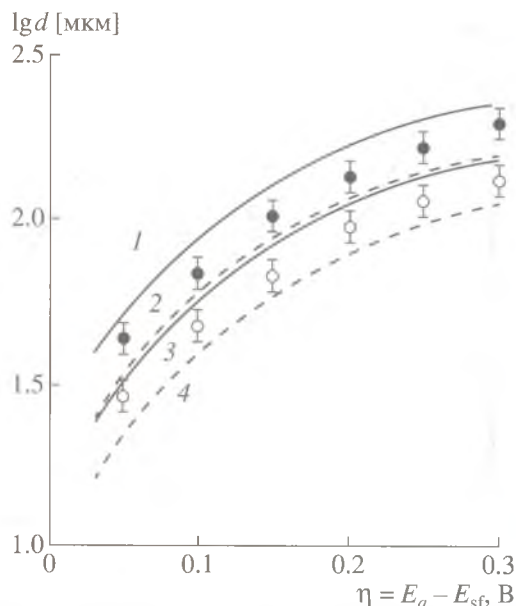


Рис. 5. Максимальные диаметры запассивированных движущимся потоком питтингов на стали 12Х18Н10Т в 0,1 N NaCl: расчетные зависимости (1, 3) и (2, 4) соответственно для $\omega = 100$ и 200 с^{-1} ; эксперимент для $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ (темные точки) и $\omega = 200 \text{ с}^{-1}$ (светлые точки).

(20)–(22), мы определили условия пассивации и величины (h_{max}) и (d_{max}) питтингов (таблица).

Результаты обследования поверхности образцов после эксплуатации показали, что максимальные размеры питтингов были меньше расчетных, а максимальная погрешность расчетов не превы-



Рис. 6. Влияние характеристической величины системы $k\chi$ на область потенциалов, в которой возможна пассивация питтингов в движущихся средах.

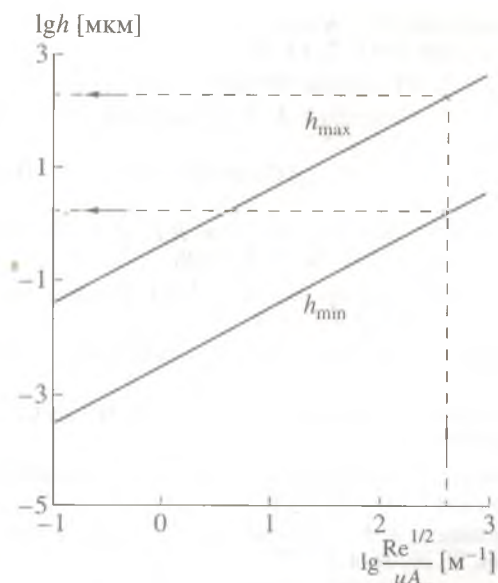


Рис. 7. Влияние характеристической величины системы $\lg \frac{Re^{1/2}}{uA}$ на предельную глубину питтингов $lg h$.

шала 60%, что вполне допустимо, с учетом возможного отклонения технологических параметров в рабочем процессе и ориентировочно принятых значений массопереноса A и коэффициента пропорциональности k в уравнении (20).

Это подтверждает возможность использовать предлагаемую модель питтинговой коррозии нержавеющей стали в движущихся средах как при оценке коррозионных повреждений на действующем оборудовании, так и на стадии разработки конструкторской документации и выбора оптимальных параметров эксплуатации оборудования.

В связи с тем, что в системе не всегда известны коэффициент массопереноса A , коэффициент пропорциональности k и разность потенциалов $\Delta E = E_{кор} - E_{sf}$, можно использовать их усредненные значения.

Обзор литературы показывает, что коэффициент массопереноса в разных гидродинамических системах укладывается в пределы $A = 0.1 \dots 0.7$ [27], а коэффициент пропорциональности $k = 3 \dots 8$ [8, 28]. Разность потенциалов коррозии и образования солевой пленки для нержавеющей стали в нейтральных растворах хлоридов составляет, по нашим оценкам, $\Delta E = 0 \dots 0.5$ В.

Для облегчения инженерных расчетов нами составлены номограммы (рис. 6–8). Расчеты проводили на ПК по приведенному выше алгоритму. Порядок расчетов следующий.

Исходные данные для расчета: u , Re , A , k , χ , η .

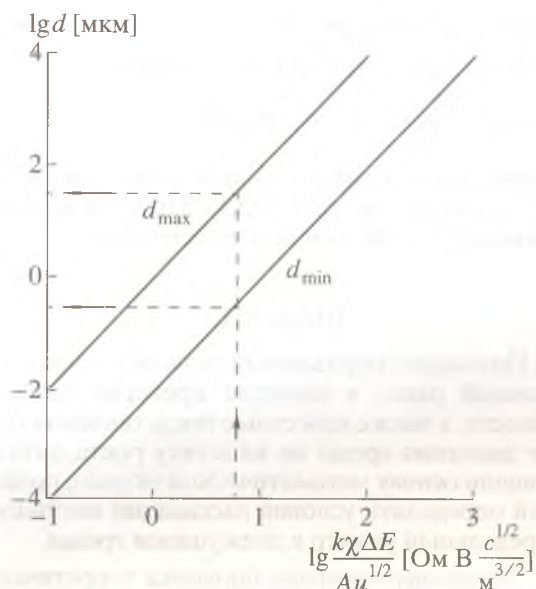


Рис. 8. Влияние характеристической величины системы $\lg \frac{k\chi\Delta E}{Au^{1/2}}$ на предельный диаметр питтингов $lg d$.

1. Определение возможности пассивации питтингов в заданных условиях

Рассчитываем первую характеристическую величину системы $k\chi$ и по номограмме (рис. 6) находим точку, соответствующую координатам $\Delta E - k\chi$. Питтинг пассивируется, если эта точка находится ниже критической линии пассивации в питтинге и, соответственно, не пассивируется, если точка находится на линии или выше нее.

Пример. Для рассмотренных выше условий эксплуатации сталей на стадии осаждения ампициллина, условиям питтингообразования на стали 12X18H10T соответствует точка a , на стали 08X18Г8Н2Т – точка b . Поскольку питтинги будут пассивироваться только на стали 12X18H10T дальнейший расчет продолжаем только для этой стали.

2. Определение предельной глубины питтинга

Рассчитываем вторую характеристическую величину системы $\frac{Re^{1/2}}{u}$, и по номограмме (рис. 7) на-

ходим минимальную и максимальную глубину за пассивировавшихся питтингов. Порядок определения предельных глубин питтингов для стали 12X18H10T в исследуемых условиях показан на номограмме стрелками.

3. *Определение предельного диаметра питтинга*

Рассчитываем третью характеристическую величину $\frac{k\chi\Delta E}{Ai^{1/2}}$, и по номограмме (рис. 8) определяем

максимальный и минимальный диаметры питтингов. Например, для стали 12Х18Н10Т эти диаметры составляют 4 и 40 мкм соответственно.

ВЫВОДЫ

1. Потенциал образования солевой пленки, предложенный ранее в качестве критерия питтингоустойчивости, а также известные представления о влиянии движения среды на кинетику роста питтинга составили основу математической модели, позволяющей определять условия пассивации питтингов и их предельный размер в движущихся средах.

2. Экспериментальная проверка теоретической модели с использованием полностью или локально активированных электродов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т в растворах хлоридов в гидродинамической системе двух дисков и в реальной коррозионной системе подтвердила применимость модели для определения условий пассивации питтингов в движущихся средах и их предельных размеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колотыркин Я.М. // Итоги науки и техники. Сер. Коррозия и защита от коррозии. М.: ВИНТИ, 1982. Т. 9. С. 88.
2. Hakkarainen T. Electrochem. Methods in Corrosion Research: Ed. Dprt. Mater. Sci. Forum. 1986. P. 81.
3. Раскин И.В., Турковская А.В. // Защита металлов. 1969. Т. 5. № 4. С. 443.
4. Раскин И.В., Турковская А.В., Новаковский В.М. // Защита металлов. 1968. Т. 4. № 5. С. 480.
5. Williams D., Westcott C., Fleischmann M. // J. Electroanal. Chem. 1984. P. 549.
6. Фрейман Л.И., Лап Ле Мин, Раскин Г.С. // Защита металлов. 1973. Т. 9. № 6. С. 680.
7. Новицкий В.С., Кузуб В.С., Крикун В.П. // Защита металлов. 1981. Т. 17. № 1. С. 83.
8. Beck T.R. // Corrosion (NACE). 1977. V. 33. N. 1. P. 9.
9. Alkire R., Gangellari A. // J. Electrochem. Soc. 1983. V. 130. N. 6. P. 1252.
10. Beck T.R., Chan S.G. // Corrosion (NACE). 1981. V. 37. № 11. P. 665.
11. Alkire R.C., Reiser D.B., Sani R.L. // J. Electrochem. Soc. 1984. V. 131. № 12. P. 2795.
12. Alkire R., Deligiani H., Beck J. // J. Electrochem. Soc. 1990. V. 137. № 3. P. 818.
13. Harb J.N., Alkire R.C. // Corros. Sci. 1989. V. 29. № 1. P. 31.
14. Hunkeler F., Frankel G.S., Bohni H. // Corrosion (NACE). 1987. V. 43. № 3. P. 189.
15. Bohni H. // 10-th Int. Congr. on Metallic Corrosion. Madras, 1987. V. 4. P. 3139.
16. Таранцева К.Р., Пахомов В.С. // Защита металлов 1994. Т. 30. № 4. С. 377.
17. Wagner C. // J. Electrochem. Soc. 1951. V. 98. P. 115.
18. Hakkarainen T. // 10-th Int. Congr. on Metallic Corrosion. Madras, 1987. V. 4. P. 3087.
19. Фрейман Л.И. // Итоги науки и техники. Сер. Коррозия и защита от коррозии. М.: ВИНТИ, 1985. Т. 11. С. 3.
20. Бувеч Ю.А., Манкевич В.Н., Пахомов В.С. // Докл. АН СССР. 1986. Т. 289. № 6. С. 1404.
21. Макарецов В.В. // Дис. ... канд. техн. наук. М., 1984.
22. Таранцева К.Р., Пахомов В.С. // Хим. и нефтегаз. машиностроение. 1997. № 4. С. 74.
23. Таранцева К.Р., Пахомов В.С. // Защита металлов 1999. Т. 35. № 2. С. 162.
24. Таранцева К.Р. // Дис. ... канд. техн. наук. М., 1994.
25. Williams D., Fleischmann M., Stewart J., Brooks T. Electrochem. Methods in Corrosion Research: Ed. Dprt. Mater. Sci. Forum. 1986. P. 151.
26. Sato N. // Electrochim. Acta. 1971. V.16. P. 1683.
27. Abdulaleem F.A., Habdan F.M., Dahshan M.E. Mass Transfer Aspects of Electrochemical Corrosion. / 10-th Int. Congr. on Metallic Corrosion. Madras, 1987. V. 4. P. 383.
28. Beck T.R. // J. Electrochem. Soc. 1982. V. 129. № 11. P. 2412.