

УДК 620.193–001.18

## ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ СРЕДЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОТЕНЦИАЛ ОБРАЗОВАНИЯ СОЛЕВОЙ ПЛЕНКИ

© 1999 г. К. Р. Таранцева\*, В. С. Пахомов\*\*

\*Пензенский технологический институт

\*\*Московский государственный университет инженерной экологии

Поступила в редакцию 10.12.97 г.

Исследовали влияние движения среды и температуры на потенциал образования солевой пленки, ранее предложенный в качестве критерия питтингостойкости. Исследования проводили на моделях питтингов – полностью активированных электродах, в гидродинамической системе двух дисков. Объектом исследования была сталь 12Х18Н10Т в растворах хлорида натрия при температурах от 298 до 333 К. Принудительное движение среды облагораживает потенциал образования солевой пленки. Эффект движения на растворение металла в питтинге более выражен в разбавленных растворах. С увеличением температуры влияние движения среды на потенциал образования солевой пленки ослабевает.

Найдены выражения качественного и количественного влияния движения среды и температуры на потенциал образования солевой пленки.

В [1–3] была рассмотрена возможность использования потенциала образования солевой пленки в качестве характеристического потенциала питтинговой коррозии и показана необходимость проведения исследований с целью оценки степени влияния внешних и внутренних факторов коррозионной системы на его величину.

Цель данной работы – исследовать влияние движения среды и температуры на потенциал образования солевой пленки.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве объекта исследования использовали микроэлектрод площадью  $3.14 \times 10^{-6} \text{ м}^2$ , запрессованный во фторопластовую оправку, встроенную заподлицо в неподвижный нижний диск системы двух соосных горизонтальных дисков, верхний из которых вращается. Для данной гидродинамической системы решено уравнение конвективной диффузии [4] и определены границы автомодельности, при которых величина диффузионного тока не зависит от расстояния между дисками и может быть рассчитана по уравнению [5, 6]

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

где  $A = 0.72$  – коэффициент пропорциональности для использованной установки;  $n = 2$  – число электронов, участвующих в реакции;  $F$  – число Фарадея;  $C$  – концентрация вещества в объеме раствора;  $D$  – коэффициент диффузии;  $\nu$  – кинематическая вязкость раствора;  $\omega$  – частота вращения диска (об/с).

Предельный диффузионный ток восстановления кислорода определяли по потенциодинамическим (15 мВ/с) катодным кривым. При выбранном темпе повышения катодной поляризации измеряемый предельный диффузионный ток может служить критерием локальной скорости движения жидкости у микроэлектрода, функцию которой этот ток при прочих равных условиях и представляет [7].

Закономерности процессов, идущих в питтинге, исследовали на модели питтинга – полностью активированных микроэлектродах [8, 9]. Полной активации металла достигали его потенциостатической анодной поляризацией в хлоридном растворе, превышающей потенциал питтингообразования.

Потенциалы питтингообразования  $E_{\text{по}}$  и репассивации  $E_{\text{реп}}$  определяли по потенциодинамическим (1.2–1.44 В/ч) кривым повышения и понижения анодной поляризации. Смена знака производной потенциала по времени проводилась при достижении плотности тока  $i = 10 \text{ А/м}^2$ , согласно [10].

Потенциал образования солевой пленки  $E_{\text{сп}}$  измеряли на модели питтинга по методике [11]. После выпадения солевой пленки, когда рост питтинга уже достаточно замедлен, на электрод от базового потенциала подавали секундные положительные и отрицательные импульсы потенциала с амплитудой от 0.1 до 1.0 В и измеряли отклонение плотности тока от соответствующей базовому потенциалу. Между импульсами соблюдали паузу 10 с для возвращения электрода в со-

стояние устойчивого развития. Потенциал  $E_{\text{сн}}$  определяли путем экстраполяции на  $i \rightarrow 0$ .

Исследование проводили на стали 12X18H10T в растворах хлорида натрия концентрацией 0,5, 1 и 3 моль/л при температуре от 298 до 333 К. Растворы готовили на дистиллированной воде из реактивов марки "ч.". Аэрация естественная.

Непосредственно перед опытом поверхность образца вместе с оправкой шлифовали наждачной бумагой, тщательно обезжировали этиловым спиртом и проверяли под микроскопом НЕОРНОТ-30 при увеличении, равном 100, на отсутствие щелей между металлом и оправкой.

Измерения проводили на импульсном потенциостате ПИ-50.1.1 с автоматической записью на самописце "Recorder". Электрод сравнения – каломельный насыщенный, вспомогательный – платиновый. Ячейку с разделенным катодным и анодным пространствами помещали в термостат ТНЖ-1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известна взаимосвязь между критическим потенциалом питтингообразования и транспортными стадиями процесса растворения металла в питтинге. Решающее значение при этом отводят критическому миграционному накоплению у растворяющейся поверхности металла анионов активаторов, адсорбционно вытесняющих пассивирующий кислород и предотвращающих репассивацию [12]. Скорость миграционного подвода  $j$  зависит от напряженности электрического поля, создаваемого электродом и растворяющимися катионами металла, и от концентрации хлорида в объеме раствора. В первом приближении

$$j = CuE, \quad (2)$$

где  $C$  – концентрация хлорид-ионов в объеме раствора;  $u$  – их подвижность;  $E$  – напряженность поля.

Напряженность поля будем считать пропорциональной концентрации катионов металла у активных центров, т.е. определяемой скоростью их образования в анодном процессе и диффузионно-конвективным отводом в глубь раствора. Очевидно, этот отвод будет уменьшать напряженность электрического поля, противодействуя росту поверхностной концентрации хлорид-ионов.

Считая, что потенциал образования солевой пленки – это потенциал равновесной анионной активации металла и что эта активация обусловлена образованием на металле комплексов с частичным переносом заряда  $[\text{MeAn}]^{m-n}$ , т.е. принимая квазиобратимость образования поверхностных комплексов [12, 13], можно записать уравнение

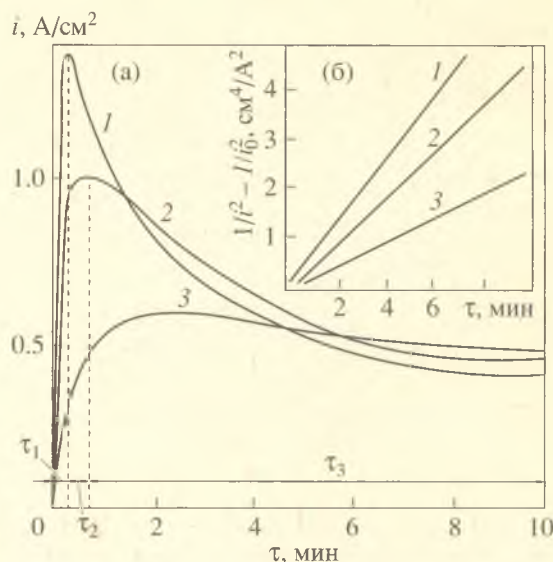


Рис. 1. Хроноамперограммы модельного питтинга стали 12X18H10T (а) и зависимость  $(i^{-2} - i_0^{-2}) - \tau$  (б) при потенциале  $E = 1.2$  В в растворах NaCl концентрацией, моль/л: 1 – 3.0; 2 – 1.0; 3 – 0.5.

потенциала образования солевой пленки следующим образом:

$$E_{\text{сн}} = E_0 - \frac{nRT}{mF} \ln[\text{An}], \quad (3)$$

где  $E_0$  – стандартный равновесный потенциал образования комплекса  $[\text{MeAn}]^{m-n}$ ,  $n$  – число активирующих анионов, приходящихся на ион-атом металла в образующемся комплексе,  $m$  – заряд иона металла,  $[\text{An}]$  – поверхностная активность анионов.

Согласно (3), уменьшение поверхностной концентрации хлорид-ионов должно приводить к облагораживанию потенциала образования солевой пленки в движущейся среде.

Исследования полностью активированных электродов показали, что без движения на дне питтинга за время  $\tau = \tau_{\text{кр}}$  образуется видимый простым глазом черный слой, тормозящий дальнейшее растворение. Судя по кажущейся энергии активации стали 12X18H10T, близкой к характерным для диффузии в растворах электролитов, анодный предельный ток растворения в питтинге определяется массопереносом. На это указывает и

характер зависимости  $\frac{di^{-2}}{d\tau}$  (рис. 1).

Эффективные энергии активации процесса депассивации стали 12X18H10T в растворах хлоридов ( $T = 298 \pm 333$  К) следующие:

Концентрация хлоридов, моль/л	0.1	0.5	1.0	3.0
Энергия активации стали, кДж/моль	24.9	19.0	15.1	13.5

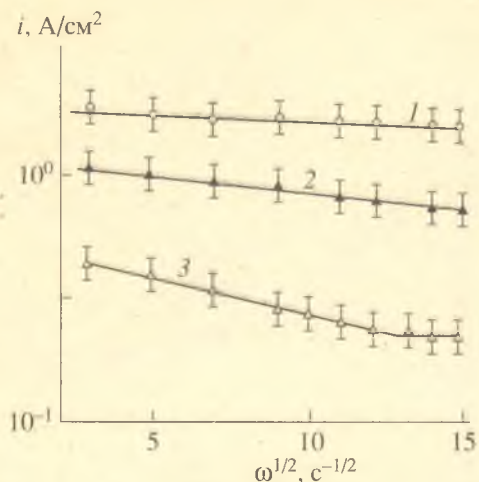


Рис. 2. Влияние частоты вращения диска ( $\omega$ ) на предельный ток модельного питтинга стали 12X18H10T в растворах NaCl концентрации, моль/л: 1 – 3.0; 2 – 1.0; 3 – 0.5.  $T = 298$  К.

Согласно [14], в неподвижную среду катионы металла, накапливающиеся у анодно растворяющейся поверхности, переходят под действием двух градиентов: концентрации и потенциала. Поскольку при растворении железа в области потенциала от 0.1 до 1 В основное омическое падение потенциала локализовано в тонком резистивном слое, прилегающем к поверхности анода [15], на дальнейшем пути переноса градиентом потенциала можно пренебречь, считая

$$\frac{i}{nF} = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4)$$

В этом случае, приняв за граничные условия

$$i = i_0, \quad h = 0 \text{ при } \tau = 0;$$

$$i = i, \quad h = \frac{M}{nF\rho} \int_0^{\tau} i d\tau \text{ при } \tau > 0 \quad (5)$$

и проинтегрировав уравнение (4), можно получить

$$(i)^{-2} = (i_0)^{-2} + \frac{2M\tau}{n^2 F^2 D \rho (C_s - C_0)}, \quad (6)$$

где  $M$  – атомная масса металла,  $\rho$  – плотность металла,  $h$  – глубина питтинга. Из уравнения (6) видно, что плотность тока растворения в питтинге изменяется пропорционально  $\tau^{1/2}$ . При этом зависимость плотности тока от времени должна быть линейна с наклоном:

$$\frac{1}{S} = \frac{di^{-2}}{d\tau} = \frac{2M}{n^2 F^2 \rho D (C_s - C_0)}, \quad (7)$$

это и наблюдали в действительности.

Оценка поверхностной концентрации, проведенная на основании полученных значений  $\frac{di^{-2}}{d\tau}$  (рис. 16) по (7) из расчета  $M = 55.4$  г/моль,  $n = 2.2$ ,  $\rho = 8$  г/см<sup>3</sup>,  $D = 0.75 \times 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с,  $C_0 = 0$  моль/см<sup>3</sup>, показала, что поверхностная концентрация катионов металла составляет в растворах 0.5; 1.0 и 3.0 М NaCl около 8.0; 6.0 и 4.0 моль/л соответственно. Можно предположить, что именно такая концентрация катионов металла поддерживает напряженность поля, необходимую для достижения поверхностной концентрации хлорид-ионов, обеспечивающей стабильный рост питтинга в указанных растворах.

Согласно [16],<sup>1</sup> для нержавеющей стали при достижении поверхностной концентрации катионов металла 1.8 моль/л происходит переход от растворения в режиме травления к растворению в режиме полировки. Осмотр поверхности модельных питтингов после эксперимента при увеличении 100 показал, что поверхность их была светлой, полированной. Этот факт подтверждает высокую концентрацию катионов металла в модели питтинга с неподвижной средой.

Движение среды приводит к торможению процесса растворения в модельном питтинге. С увеличением частоты вращения диска  $\omega$  предельный ток растворения  $i$  в модели питтинга уменьшается, причем зависимость  $i-\omega^{-1/2}$  линейна (рис. 2, 3). При превышении определенной скорости  $\omega$ , зависящей от объемной концентрации хлоридов в растворе, полная активация поверхности модельного питтинга не достигается, и электрод растворяется в режиме локальной анодной активации (рис. 2, кривая 3).

Уменьшение тока растворения стали в модельном питтинге при приведении среды в движение может иметь две причины – усиление подвода ингибитора или пассиватора и усиление отвода активатора.

По-видимому, в условиях эксперимента действовали обе причины. Менее очевидно, через какие именно транспортные процессы и в какой пропорции между ними. Так, движение среды должно интенсифицировать доставку в питтинг растворенного кислорода, который мог бы усиливать пассивационные процессы. А поскольку в ряду растворов 0.5; 1.0 и 3.0 М NaCl влияние движения среды на предельный ток растворения ослабевает, это можно было бы качественно увязать со снижающейся в том же ряду растворимостью кислорода.

С другой стороны, движение усиливает отвод катионов металла и водородных ионов, образующихся при гидролизе. И те, и другие участвуют в создании электрического поля, которое вызывает миграцию активирующих ионов к металлу и

достижение их критической поверхностной концентрации, а вторые к тому же дополнительно активируют поверхность металла, предотвращая образование на ней оксидных слоев, тормозящих растворение.

Известная зависимость флэде-потенциала или потенциала полной пассивации от концентрации водородных ионов означает, что выше критического рН металл пассивируется. Очевидно, именно по этой причине движение разбавленных хлоридных растворов вызывает переход растворения из режима полной анодной активации поверхности в локальный.

Интересно, что потенциал образования солевой пленки, рассчитанный по (3) для поверхностной концентрации хлорид-ионов, соответствующей критической плотности тока  $i(\omega_{кр})$  (принимали, что концентрация активирующих ионов  $C_s$  связана с поверхностной концентрацией катионов металла  $C_x$  соотношением  $C_x = nC_s$ , где  $n = 2.2$  [17]), находится в области потенциала, где образование хлорида железа, по оценке [14], невозможно. Значения рН рассчитывали согласно  $pH = -\lg(C_H)$ , где  $C_H$  – внутривиттинговая концентрация ионов водорода. Концентрацию  $C_H$  оценивали по уравнению  $C_H = kC_x^q$ , где  $0 < k < 1$ ,  $q > 0$  [18]. Принимали  $k = 0.5$ ;  $q = 2$ .

Влияние температуры на характеристики питтинговой коррозии однозначно определяется тем, что энергия активации собственно электродных стадий процесса намного выше, чем транспортных. Так, с повышением температуры раствора от 293 до 353 К коэффициенты диффузии катионов возрастают примерно втрое, а ионов хлора менее чем вдвое [19], тогда как токи обмена электродных реакций (а значит, и константа их скорости) увеличиваются более чем на порядок величины. Поэтому с повышением температуры, несмотря на некоторый рост предельного диффузионного или конвективно-диффузионного тока удаления катионов, ток их анодного образования обгоняет его при все меньших и меньших анодных перенапряжениях и все более круто. В итоге при какой-то критической температуре даже чрезвычайно интенсивное движение становится недостаточным, чтобы вывести процесс из состояния конвективно-диффузионного контроля, порождающего питтинг вследствие достижения критической концентрации хлоридов.

Действительно, при температуре раствора 333 К движение сравнительно слабо влияет на скорость анодного растворения металла в разбавленных растворах хлоридов и практически не изменяет ее в концентрированных растворах (рис. 3). Во всем исследованном диапазоне скоростей вращения диска  $\omega$  режим полностью активированного растворения не нарушался.

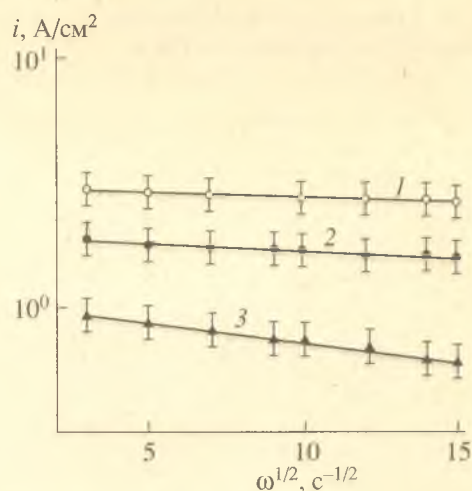


Рис. 3. Влияние частоты вращения диска ( $\omega$ ) на предельный ток модельного питтинга стали 12Х18Н10Т в растворах NaCl концентрацией, моль/л: 1 – 3.0; 2 – 1.0; 3 – 0.5.  $T = 333$  К.

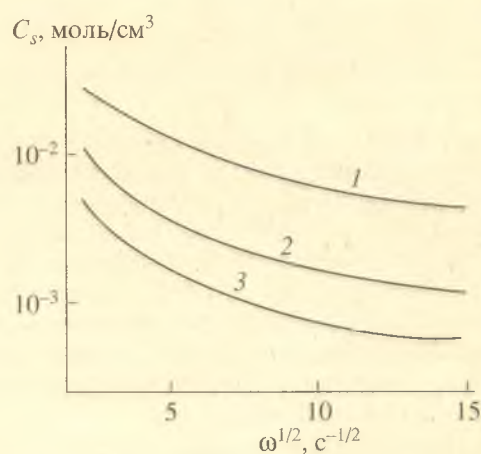


Рис. 4. Влияние частоты вращения диска ( $\omega$ ) на поверхностную концентрацию ( $C_s$ ) катионов стали 12Х18Н10Т в растворах NaCl концентрацией, моль/л: 1 – 3.0; 2 – 1.0; 3 – 0.5.  $T = 333$  К.

Итак, при невысокой температуре в разбавленном растворе хлоридов скорость анодного образования катионов металла сопоставима со скоростью их диффузионного отвода, вследствие чего ускорение отвода катионов металла от поверхности электрода ведет к ослаблению электрического поля в диффузионном слое и к затруднению достижения критической концентрации активирующих ионов. Повышение температуры в значительно большей степени увеличивает скорость образования катионов металла, чем скорость их диффузионного отвода. Это облегчает достижение критической концентрации хлоридов, вызывающей питтинг, и уменьшает влияние движения среды.

**Таблица 1.** Расчетные и экспериментальные изменения потенциала образования солевой пленки  $\Delta E_{\text{сп}}$  в движущихся растворах хлоридов,  $T = 298 \text{ K}$ 

Частота $\omega^{1/2}, \text{c}^{-1/2}$	$\Delta E_{\text{сп}}$ при концентрации, моль/л								
	0.5	1.0	3.0	0.5	1.0	3.0	0.5	1.0	3.0
	расчет (3)			расчет (12)			эксперимент		
3	135	119	107	110	98	70	120	100	90
5	158	140	124	154	105	92	140	130	110
7	173	150	117	181	155	102	165	140	120
10	183	160	142	204	173	111	175	155	130
13	188	165	150	221	184	116	180	160	130
15	188	168	150	230	190	118	180	160	130

**Таблица 2.** Кодирование факторов и их уровни

Уровни	Частота $\omega, \text{c}^{-1} (X_1)$	Концентрация $C_0, \text{моль/л} (X_2)$	Температура $T, \text{K} (X_3)$
Основной уровень	100	-0.26	313
Интервал варьирования $\Delta X_i$	100	0.74	20
Верхний уровень $\Delta X_i = 1$	200	0.48	333
Нижний уровень $\Delta X_i = -1$	0	-1	293

Исследования на модели питтинга показали, что концентрация катионов металла у растворяющейся поверхности с увеличением скорости движения среды уменьшается (рис. 4). Расчет потенциалов образования солевой пленки на основании уравнений (2) и (3) (табл. 1) показывает, что при движении среды эти потенциалы повышаются. Наибольший эффект должен наблюдаться в разбавленных электролитах при комнатной и более низкой температуре.

Экспериментально влияние движения среды на потенциал образования солевой пленки исследовали, применяя метод математического планирования экспериментов. В качестве переменных факторов выбрали частоту вращения верхнего диска ( $\omega$ ), концентрацию хлорид-ионов в объеме раствора ( $C_0$ ) и температуру раствора ( $T$ ), а за выходной параметр ( $Y$ ) приняли потенциал образования солевой пленки. Осуществляли полный факторный эксперимент типа  $2^3$ . Кодирование факторов и их уровни представлены в табл. 2.

Реализация матрицы планирования и статистическая обработка результатов позволили получить уравнение регрессии, адекватно описывающее экспериментальные данные:

$$Y = -0.18 + 0.12X_1 - 0.04X_2 - 0.02X_3 - 0.03X_1X_2 - 0.01X_2X_3 - 0.02X_1X_2X_3. \quad (8)$$

Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения показала, что все они значимы.

Анализ уравнения регрессии (8) позволяет оценить характер и степень влияния изучаемых факторов на потенциал образования солевой пленки. Положительный коэффициент перед членом  $X_1$ , характеризующим влияние частоты вращения диска, отражает повышение потенциала, т.е. затруднение образования солевой пленки с увеличением скорости движения раствора. Отрицательные коэффициенты при членах  $X_2, X_3$  и при  $X_1X_2, X_2X_3, X_1X_2X_3$ , характеризующих соответственно влияние концентрации хлоридов, температуры и коллективные воздействия факторов, характеризуют ослабление влияния движения среды на потенциал образования солевой пленки в концентрированных средах и при повышении температуры.

Достоверность уравнения регрессии (8) подтверждена дополнительными экспериментальными данными о потенциале образования солевой пленки на стали 12X18H10T в растворах 0.1 M NaCl и 1 M NaCl при различной частоте вращения верхнего диска и температурах 298 и 333 K (рис. 5). Как видно, потенциал образования солевой пленки действительно повышается с увеличением частоты вращения диска, и в растворе 0.1 M NaCl этот эффект выражен сильнее. Выше определенной частоты вращения потенциал образования пленки достигает предела, что связано, по-видимому, со сменой контролирующей стадии процесса.

Сравнение по критерию согласия Колмогорова экспериментально полученных значений по-

тенциала образования солевой пленки в движущихся средах с рассчитанными по поверхностной концентрации катионов металлов (табл. 3) показало, что они согласуются с вероятностью согласия  $P = 0.86$ .

Дисперсию ( $D_{\max}$ ) и коэффициент Колмогорова ( $l$ ) вычисляли по формулам:

$$D_{\max} = \frac{(\Delta E_i - \Delta E_i^*)}{\sum \Delta E_i} = \frac{34.0}{585} = 0.058, \quad (9)$$

$$l = D_{\max} \sqrt{\sum \Delta E_i} = 0.058 \sqrt{585} = 1.4. \quad (10)$$

За уровень значимости  $P_0(l)$  принимали [20] значения 0.01. Согласно таблице значений,  $P(l) = 0.0397$ . Поскольку  $P(l) > P_0(l)$ , эмпирическая кривая согласуется с теоретической.

Полученные результаты не противоречат известным данным относительно влияния движения среды на питтинговую коррозию [4, 21, 22].

Согласно [23], поверхностная концентрация анионов-активаторов на поверхности вращающегося диска равна

$$C_s = C_0 + \frac{1.61 i D^{1/3} \nu^{1/6}}{F D_1 (Z_1 + Z_2) \omega^{1/2}}. \quad (11)$$

Соответственно облагораживание критического потенциала питтингообразования в потоке составит:

$$\Delta E = \frac{qRT}{bZ_2F} \ln \left( C_0 + \frac{1.61 i D^{1/3} \nu^{1/6}}{F D_1 (Z_1 + Z_2) \omega^{1/2}} \right), \quad (12)$$

где  $q$  – количество анионов, участвующих в адсорбционном комплексе,  $R$  – газовая постоянная,  $T$  – температура,  $F$  – число Фарадея,  $b$  – число переноса анионов,  $C_0$  – объемная концентрация активирующих ионов,  $i$  – ток, соответствующий начальной стадии питтингообразования,  $D$  – эффективный коэффициент диффузии,  $\nu$  – кинематическая вязкость раствора,  $D_1$  – коэффициент диффузии

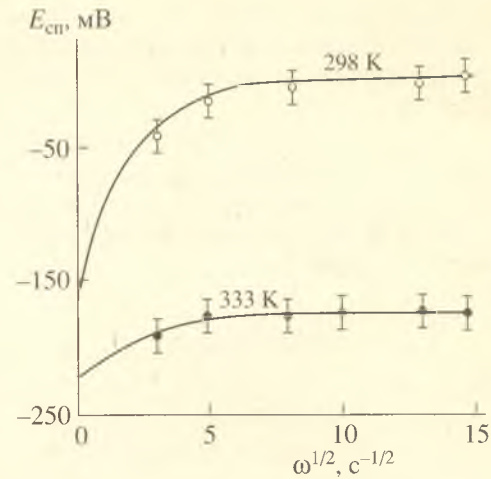


Рис. 5. Влияние частоты вращения диска ( $\omega$ ) на потенциал образования солевой пленки стали 12Х18Н10Т в 1 М NaCl: кривые – расчет по уравнению регрессии; точки – эксперимент.

катионов,  $Z_1$  – заряд катиона,  $Z_2$  – заряд аниона,  $\omega$  – частота вращения электрода.

Как следует из (11), рост потенциала питтингообразования с усилением движения среды вызван уменьшением поверхностной концентрации ионов-активаторов, и в области высоких скоростей влияние движения на  $E_{по}$  должно ослабевать. При этом, согласно (12), роль переменного (зависящего от  $\omega$ ) слагаемого в определении поверхностной концентрации анионов может быть существенной только в разбавленных растворах, когда поверхностная концентрация ионов-активаторов  $C_s$  во много раз превышает объемную  $C_0$ . В концентрированных растворах  $C_s$  мало отличается от объемной, поэтому и влияние движения среды должно быть незначительным. Такие результаты до нас наблюдали в [4 и 21].

Количественная оценка показала, что экспериментально полученная зависимость потенциала образования солевой пленки от движения среды (8) качественно и количественно согласуется с

Таблица 3. Последовательность вычислений критерия Колмогорова

Номер опыта	$\omega$	$\Delta E_i$	$\Delta E_i^*$	$\Delta E_i$ (накопл.)	$\Delta E_i^*$ (накопл.)	$\Delta E_i - \Delta E_i^*$
1	4	65	70	65	70	-5
2	7	106	102	171	172	-1
3	10	124	120	295	292	+3
4	14	139	130	494	422	+14
5	17	151	140	585	562	+23
Сумма		585				34

Примечание.  $\Delta E_i$  и  $\Delta E_i^*$  – соответственно эмпирические и теоретические величины изменения потенциала  $\Delta E$  с частотой вращения верхнего диска  $\omega$  в 1 М NaCl при  $T = 293$  К.

теоретической зависимостью (12) критического потенциала питтингообразования от движения среды в исследуемой системе с вращающимся контрдиском.

Таким образом, результаты исследований показывают, что потенциал образования солевой пленки зависит от движения среды, а уравнения (8) и (12) позволяют качественно и количественно оценить это влияние.

### ВЫВОДЫ

1. Исследования, проведенные на полностью активированных электродах, моделирующих питтинг, показали, что движение среды повышает потенциал образования солевой пленки, затрудняя достижение критической концентрации ионов металла, при которой стабильно развивается питтинг. Влияние движения среды на скорость растворения металла в питтинге более выражено в разбавленных хлоридных растворах.

2. С повышением температуры раствора влияние движения среды на потенциал образования солевой пленки ослабевает, так как при этом скорость анодного образования катионов металла растет в значительно большей степени, чем скорость их диффузионного отвода, а критическая концентрация хлоридов легко достигается даже при движении среды.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hunkeler F., Frankel G.S., Bohni H.* // Corrosion (NACE). 1987. V. 43. № 3. P. 189.
2. *Bohni H.* Stability of localized corrosion processes / 10th Int. Congr. on Metallic Corrosion. Madras, 1987. № 4. P. 3139.
3. *Таранцева К.Р., Пахомов В.С.* // Защита металлов. 1994. Т. 30. № 4. С. 377.
4. *Макарцев В.В.* Дис. ... канд. техн. наук. М., 1984.
5. *Бувевич Ю.А., Манкевич В.Н., Пахомов В.С.* // Докл. АН СССР. 1986. Т. 289. № 6. С. 1404.
6. *Таранцева К.Р.* Дис. ... канд. техн. наук. М., 1994.
7. *Сивер Ю.Г., Кабанов Б.Н.* // Журн. физ. химии. 1948. Т. 22. № 1. С. 53.
8. *Бару Р.Л., Фокин М.Н., Старосветский Д.В.* // Защита металлов. 1978. Т. 14. № 3. С. 266.
9. *Замалетдинов И.И., Фрейман Л.И.* // Защита металлов. 1983. Т. 19. № 4. С. 556.
10. *Фрейман Л.И., Флис Я., Пражак М. и др.* // Защита металлов. 1986. Т. 22. № 2. С. 179.
11. *Новаковский В.М., Сорокина А.Н.* // Защита металлов. 1966. Т. 2. № 4. С. 416.
12. *Колотыркин Я.М.* // Итоги науки и техники. Сер. Коррозия и защита от коррозии. М.: ВИНТИ, 1982. Т. 9. С. 88.
13. *Кузнецов Ю.И.* // Защита металлов. 1987. Т. 23. № 5. С. 739.
14. *Isaaks H.S.* // J. Electrochem. Soc. 1973. V. 120. № 11. P. 1456.
15. *Tester J.W., Isaaks H.S.* // J. Electrochem. Soc. 1975. V. 122. № 11. P. 1438.
16. *Sato N.* // J. Electrochem. Soc. 1982. V. 129. № 2. P. 260.
17. *Bohni H., Stockert L.* // Wekst. und Korros. 1989. Bd. 40. № 2. S. 63.
18. *Фрейман Л.И., Замалетдинов И.И.* // Защита металлов. 1982. Т. 18. № 4. С. 520.
19. *Добош Д.* Электрохимические константы. М.: Мир, 1980. 365 с.
20. Статистические методы обработки эмпирических данных: / Сб. Под ред. Сазонова В.Г. М.: ВНИИНМАШ, 1978. 232 с.
21. *Буриан Е.Я., Чеховский А.В.* // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 1991. Т. 34. № 1. С. 90.
22. *Чеховский А.В., Буриан Е.Я.* // Электрохимия. 1990. Т. 26. № 12. С. 1621.
23. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 699 с.