

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
ЗАЩИТЫ МАТЕРИАЛОВ

УДК 620.197.3:630*866

ЗАЩИТА ОТ КИСЛОТНОЙ КОРРОЗИИ
СТАЛЕЙ Ст3 И 10X18H10T ИНГИБИТОРАМИ
НА ОСНОВЕ ЭКСТРАКТОВ ДРЕВЕСНОЙ КОРЫ¹

© 2024 г. Е. В. Школьников*

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова
(ФГБОУ ВО СПбГЛТУ),
Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург, 194021 Россия
*E-mail: eshkolnikov@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.05.2024 г.

После доработки 09.06.2024 г.

Принята к публикации 25.08.2024 г.

Гравиметрическим и электрохимическим методами впервые исследовано влияние температуры и состава ингибирующих композиций на основе водных экстрактов коры осины (ЭКО), ели (ЭКЕ) и сосны (ЭКС) на коррозию углеродистой стали Ст3 в 2М серной кислоте, используемой для травления стальных изделий, и аустенитной стали 10X18H10T в 1.4 М соляной кислоте, применяемой с добавкой ингибитора для промывки и химической очистки варочного и теплообменного оборудования. Получены и проанализированы новые данные по кинетике и механизму кислотной коррозии исследованных сталей. Показано, что при одинаковом содержании 1 г·л⁻¹ ингибирующее действие Z водоэкстрактивных веществ (ВЭВ) древесной коры на кислотную коррозию сталей увеличивается в ряду ЭКС < ЭКЕ < ЭКО, а также при повышении концентрации ВЭВ до 4.0 г·л⁻¹ и температуры от 20° до 60°С, при смешении экстрактов коры разных видов и еще значительно (Z = 90–97%) при введении в водные экстракты синергистов гексаметилентетрамина или йодида калия.

Ключевые слова: ингибиторная защита от кислотной коррозии; добавка синергиста, углеродистая и аустенитная стали; водные экстракты древесной коры

DOI: 10.31857/S0044185624030116, EDN: MCVCZJ

ВВЕДЕНИЕ

Суммарные расходы на коррозию в настоящее время составляют в ряде развитых стран от 3 до 6% валового внутреннего продукта [1]. Для снижения ущерба от коррозии технологического оборудования для химической переработки древесины рекомендованы различные методы [2], включая мониторинг содержания активаторов коррозии [3] и ингибирование кислотных сред недорогими, взрыво- и экологически

безопасными композициями на основе водных экстрактов коры осины [4]. Использование ингибиторов совместно с пенообразователями позволяет уменьшить расход кислоты и потери металла при травлении, предохранить металл от водородной хрупкости и улучшить условия труда. При повышении температуры защитное действие большинства ингибиторов падает [5]. В работе [6] показана эффективность экстрактов еловой и сосновой коры как ингибиторов коррозии нефтепромышленного оборудования из стали Ст20 в пластовых водах. Нефтегазодобывающая промышленность предъявляет к ингибиторам коррозии дополнительное требование устойчивости защитного

¹ Работа выполнена в соответствии с заданием финансируемой НИР 03.003.10 ФЦНТП РФ «Комплексное использование древесного сырья».

действия в присутствии сероводорода и диоксида углерода [7].

В последнее десятилетие проводятся интенсивные поисковые исследования эффективных биоразлагаемых ингибиторов на основе экстрактов коры деревьев различных пород, листьев зеленых растений и другого возобновляемого растительного сырья [8, 9]. Обнаружена корреляция между степенью ингибирования кислотной коррозии малоуглеродистых сталей и содержанием танинов в экстрактах коры ели и сосны [6]. Противокоррозионное действие ингибиторных композиций на растительной основе может быть усилено (синергизм) введением в экстракт других фитохимических веществ или специально подобранными химическими добавками.

Природные экстрактивные вещества применяются для снижения коррозии металлов и сплавов в разбавленных растворах сильных кислот. Изопропанольные экстракты еловой и сосновой коры или хвои оказывают высокое защитное действие на низкоуглеродистую сталь Ст3 в 1М растворе H_2SO_4 при температуре 20°C, однако при нагревании наблюдается снижение ингибирующей способности экстрактов [10]. В концентрированных растворах минеральных кислот преимущественно используются синтетические органические ингибиторы, содержащие линейные и циклические полярные функциональные группы с гетероатомами O, S или N, ароматическими кольцами, π -электронами в тройных и сопряженных двойных связях или неподеленными электронами как центрами физической или химической адсорбции на металле и сплаве. Согласно данным [11], в 1М растворе HCl эффективность ингибирования коррозии углеродистой стали функциональными группами уменьшается в ряду $-NH_2 > -OH > -CHO > -COOH$.

Систематические исследования на кафедре химии Санкт-Петербургского лесотехнического университета показали перспективность комплексной химической переработки древесной коры с получением ингибиторов коррозии, а также дубителей, поверхностно-активных веществ, удобрений (компостов) или топливных брикетов [4, 7, 12]. Согласно работе [13], водно-экстрактивные вещества еловой коры ($1.5 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$) в 7–8 раз замедляют коррозию стали 10X17H-13M2T в 10% растворах муравьиной и уксусной кислот соответственно при 50° и 90°C.

Для настоящего исследования выбраны широко используемые углеродистая сталь марки Ст3 и аустенитная нержавеющая сталь 10X18H10T. Сталь Ст3 – универсальный конструкционный

материал с хорошей прочностью, пластичностью и свариваемостью. Сталь 10X18H10T применяется для плакирования биметаллических котлов целлюлозного производства, при изготовлении химических реакторов и сварных конструкций в агрессивных средах [14]. Возможность увеличения ингибиторного эффекта изменением породного состава древесной коры, минеральными и органическими добавками, а также кинетика и механизм ингибирования коррозии сталей в сильных кислотах изучены недостаточно.

Цель работы – гравиметрическое и электрохимическое исследование влияния температуры и состава ингибирующих композиций на основе водных экстрактов коры осины (ЭКО), ели (ЭКЕ) и сосны (ЭКС) на скорость и механизм коррозии углеродистой стали Ст3 в 2М серной кислоте (17.4 мас. %), используемой для травления стальных изделий, и аустенитной стали 10X18H10T в 1.4 М соляной кислоте (5.0 мас. %), применяемой с добавкой ингибитора для промывки и химической очистки варочных котлов целлюлозного производства, гидролизных и теплообменных аппаратов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Использовали листовую сталь Ст3, или Ст3Гсп (состав в %: Fe от 97.75, C 0.14–0.22, Si 0.15–0.3, Mn 0.4–0.65, Ni до 0.3, S до 0.05, P до 0.04, Cr до 0.3, N до 0.008, Cu до 0.3, As до 0.08, ГОСТ 380–2005) и сталь 10X18H10T (состав в %: Fe от 67, C до 0.10, Cr 17–19, Ni 10–11, Mn 1–2, Ti до 0.8, Si до 0.8, P до 0.035, S до 0.02, ГОСТ 11068). Коррозионные испытания¹ сталей проводили на шлифованных прямоугольных пластинах размером соответственно $2 \times 20 \times 30$ и $2 \times 15 \times 30$ мм, нарезанных из холоднокатаного листового проката (ПАО “Северсталь”), с отверстием диаметром 2.5 мм для подвешивания. Растворы 2М H_2SO_4 и 1.4М HCl готовили из концентрированных кислот “чда” (АО “Крезол”) и дистиллированной воды с контролем концентрации титрованием стандартным 1М раствором NaOH квалификации “хч” (АО “Ленреактив”). Среднюю скорость равномерной сплошной коррозии K_3-5 шлифованных и обезжиренных ректифицированным этанолом стальных пластин, подвешенных на стеклянных крючках в кислоте в закрытых химических стаканах (в соотношении 5мл кислоты на 1 см^2 поверхности образцов),

¹ С участием Г.Ф. Ананьевой и А.Д. Тимошина в проведении лабораторных испытаний.

определяли гравиметрическим способом с использованием электронных микровесов ВСЛ–60/0.1А(ГК “Невские весы”) по стандартной методике. Продукты коррозии с поверхности сталей снимали мягким или жестким ластиком.

Для приготовления ингибирующих композиций использовали в основном свежие водные экстракты образцов коры, полученных сухой осенней окоркой спелых деревьев (80–100 лет) осины обыкновенной *Populus tremula L.* (ЭКО), ели *Picea excelsa* (ЭКЕ), сосны обыкновенной *Pinus sylvestris L.* (ЭКС) Лисинского лесхоза Ленинградской области.

Измельченную на молотковой мельнице, фракционированную на ситах и высушенную на воздухе древесную кору (луб и корка, $l = 3–5$ мм) обрабатывали в стеклянных колбах с обратным холодильником или в стальных автоклавах дистиллированной водой при гидромодуле 5 и температуре 100°C в течение 8 ч. В этих условиях из древесной коры извлекаются такие водоэкстрактивные вещества (ВЭВ) как танины, англ. tannin (гидролизуемые галлотанины и эллаготанины, конденсированные танины), моно- и дисахариды, гликозиды, крахмал, арабиногалактан, камеди и пектины [13,15]. Кроме чистой воды, в качестве экстрагента испытывали кислый раствор $0.1\% \text{H}_2\text{SO}_4$ ($\text{pH}_{\text{исх}} = 2$), свежие слабощелочные водные растворы $0,01\text{M Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ($\text{pH}_{\text{исх}} = 9.2$), $0.033\text{M Na}_2\text{SO}_3$ ($\text{pH}_{\text{исх}} = 9.3$) или $0.1\text{M Na}_2\text{HPO}_4$ ($\text{pH}_{\text{исх}} = 9.9$).

Плотность фильтрованных экстрактов определяли с помощью ареометра, водородный показатель pH с использованием лабораторного pH-метра-милливольтметра pH-673 (НПО “Аналитприбор”), сухой остаток гравиметрическим методом и органические кислоты потенциометрическим титрованием до pH 8.5. При кипячении в воде коры сосны, ели и осины в течение 8 ч при гидромодуле 5 выход ВЭВ составлял ~12, 20 и 30% массы абсолютно сухой коры (а.с.к.) соответственно. Согласно данным [15–16], из исследованных видов древесной коры именно осиновая кора содержит наибольшее количество экстрактивных веществ. Упаренные до 25 – 50% сухих веществ однородные коричневые экстракты плотностью $1.15–1.30\text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ и pH 3.5–4.0 содержали с учетом данных [15–17] танины (до 6%), D-ксилозу, D-глюкозу, галактозу, L-арабинозу и другие моносахариды (в сумме до 7%), органические кислоты (до 2% массы а.с.к.). Одинаковую общую концентрацию сухих ВЭВ коры 0.5 и $1.0\text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ обеспечивали введением соответственно 2.0 и $4.0\text{ г}\cdot 25\%$

экстракта в 1 л кислоты. Общая концентрация ВЭВ *езде в настоящей работе* указана в пересчете на сухие вещества экстрактов. Для повышения антикоррозионной эффективности экстрактов коры исследовали влияние добавки к экстрактам хлористого натрия “чда”, йодистого калия “чда” (Челекенский химзавод) или уротропина технического $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ (“АО РЕА-ХИМ”), часто используемого в патентах [18, 19] в качестве синергиста комбинированных ингибиторов кислотной коррозии.

Электрохимическое исследование ингибирования коррозии стальных пластин, подготовленных в соответствии с ГОСТ 9.514–99, проводили на потенциостатах П-5848 и П5827М (производство России) методом построения поляризационных кривых в динамическом режиме со скоростью $24\text{ мВ}\cdot\text{мин}^{-1}$ и в статическом режиме с выдержкой 5 мин при заданном потенциале в области малых (до $\pm 10\text{ мВ}$) и больших поляризаций (до $\pm 1200\text{ мВ}$). Использовали стандартную электрохимическую ячейку ЯЭС-1 с разделенными катодным и анодным электролитами, исследуемый стальной электрод, насыщенный хлоридсеребряный электрод сравнения и платиновый электрод для измерения и регулирования электрического тока. Стальные электроды перед каждым опытом зачищали тонкозернистой наждачной шкуркой 00, обезжировали ректифицированным этанолом, промывали дистиллированной водой и подвергали катодной обработке при потенциале -1.0 В (н.в.э.) в течение 3–5 мин. Нерабочую поверхность стальных электродов покрывали изолирующим лаком. Заданную температуру поддерживали с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$ циркуляцией воды через “рубашку” электрохимической ячейки с использованием ультратермостата Zeamil-Horizont UTU-2/77.

Стационарный потенциал коррозии $E_{\text{кор}}$ стальных определяли по стандартной методике при равенстве катодной и анодной плотности тока без внешней поляризации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определение средней скорости коррозии K ($\text{г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$) проводили по формуле

$$K = \frac{\Delta m}{S\tau}, \quad (1)$$

где Δm – потеря массы(г) образца за время τ (ч), S – площадь поверхности ($6–12\cdot 10^{-4}\text{ м}^2$). Из экспериментальных данных гравиметрического определения средней скорости коррозии стальных

по формуле(1) без ингибитора (K_0) и с ингибитором (K_i) рассчитали защитное действие Z (%)

$$Z = 100(K_0 - K_i)/K_0 \quad (2)$$

и ингибиторный эффект $\gamma = K_0/K_i$.

Гравиметрическое исследование травления углеродистой стали Ст3 в 2М растворе H_2SO_4 (80°C, 1ч) показало, что взятые в отдельности добавки (3 г·л⁻¹) чистых реактивов танина, арабиногалактана, галактозы, маннита, пирокатехина, ксилозы, глюкозы и мальтозы(АО “Ленреактив”) обладают существенным антикоррозионным действием Z , равным соответственно 44, 44, 45, 56, 60, 62, 73 и 74% ($K_0 = 800 \pm 12$ г·м⁻²·ч⁻¹).

Из предварительно испытанных нами для стали 10X18H10T в 5%-й соляной кислоте (60°C, 1ч) отдельных добавок (1 г·л⁻¹) $AlCl_3$, $NiSO_4$, KBr , KI , лигносульфоната натрия, танина, карбамида и уротропина с ингибиторным эффектом γ соответственно 1.1, 1.3, 2.2, 3.4, 1.5, 2.0, 2.1 и 2.2 к экстракту коры осины (ЭКО, 2 г·л⁻¹) как ингибитору коррозии стали ($\gamma = 1.7$) наибольший синергизм показали добавки уротропина или йодида калия с ингибиторным эффектом композиции соответственно 6 или 23.

Согласно кинетическому исследованию [17], при обработке коры кипящей водой на первой стадии преобладает диффузионно контролируемый физический процесс экстрагирования танинов, свободных сахаров и других ВЭВ. При увеличении времени водной обработки или при повышении температуры возрастает вклад второй стадии с энергоемкими химическими превращениями преимущественно гидролиза танинов и углеводов с накоплением редуцирующих веществ и органических кислот, однако без существенного увеличения антикоррозионного действия Z . Величина Z не изменялась заметно также при хранении экстрактов в закрытых колбах из темного стекла в течение 30 суток при 20 – 25°C. С добавкой $NaCl$ 1 г·л⁻¹ 50% водный экстракт коры осины сохранял в этих условиях защитное действие ~85% на сталь Ст3 в растворах 2М H_2SO_4 и 4М HCl в течение года.

Влияние ингибиторов и температуры на коррозию стали Ст3 в 2М растворе H_2SO_4

Из данных табл.1 следует, что при одинаковой концентрации (1 г·л⁻¹) ВЭВ древесной коры оказывают по гравиметрическим данным на сталь Ст3 защитное действие Z , равное 52–60% при 20°C. Отдельно взятые добавки экстрактов коры

Таблица 1. Влияние ингибирующих добавок на потенциал коррозии $E_{кор}$ и параметры защиты углеродистой стали Ст3 в 2М H_2SO_4 при 20°C

Ингибирующие добавки (в пересчете на сухие вещества)	$-E_{кор.} \pm 2$ мВ (н.в.э.)	$K \pm 0.3$, г·м ⁻² ·ч ⁻¹	Z , %	γ
—	205	10.9	—	—
1 г·л ⁻¹ ЭКС	205	4.2	61	2.6
1 г·л ⁻¹ ЭКЕ	204	5.2	52	2.1
1 г·л ⁻¹ ЭКО	203	4.7	56	2.3
0.5 г·л ⁻¹ ЭКС + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКЕ	205	3.8	65	2.9
0.5 г·л ⁻¹ ЭКС + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКО	204	2.9	74	3.8
0.5 г·л ⁻¹ ЭКЕ + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКО	203	1.9	82	5.6
1 г·л ⁻¹ NaCl	250	5.7	47	1.9
1 г·л ⁻¹ ЭКС + 1 г·л ⁻¹ NaCl	230	2.4	78	4.5
0.5 г·л ⁻¹ ЭКС + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКЕ + 1 г·л ⁻¹ NaCl	210	2.2	80	5.0
0.5 г·л ⁻¹ ЭКС + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКО + 1 г·л ⁻¹ NaCl	205	1.7	84	6.4
0.5 г·л ⁻¹ ЭКЕ + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКО + 1 г·л ⁻¹ NaCl	200	2.4	79	4.6
1 г·л ⁻¹ (CH_2) ₆ N ₄	190	2.6	76	4.2
0.5 г·л ⁻¹ ЭКЕ + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКО + 1 г·л ⁻¹ (CH_2) ₆ N ₄	185	0.31	97	35

ЭКЕ или ЭКО практически не влияют на потенциал электрохимической коррозии $E_{\text{кор}}$ при 20 и 80°C (табл. 1–2), но уменьшают в 2–3 раза скорость анодного процесса (i_a) растворения стали и катодного процесса (i_k) выделения водорода из серной кислоты, поддерживая сталь Ст3 при анодной поляризации в состоянии частичной пассивации в области потенциалов (+350–500 мВ, н.в.э.) при 20°C (рис.1, кривые 1 и 3). Ингибирующее действие ЭКС проявляется в катодном процессе водородной депольаризации и в снижении гравиметрически определенной средней скорости коррозии K в 2.6 раза при 20°C (табл. 1) и в 2 раза при 80°C (табл. 2).

Антикоррозионное действие Z и соответственно ингибиторный эффект γ экстрактов древесной коры заметно зависят от породного состава дерева и увеличиваются при введении смешанных экстрактов коры с одинаковой общей концентрацией ВЭВ (табл. 1).

Следует отметить, что на ряде предприятий России по химической переработке древесины нередко накапливаются отходы древесной коры смешанных пород [12].

Еще значительнее синергизм защитного действия при сернокислотной коррозии стали Ст3 с увеличением Z до 97 (табл. 1) или 94% (табл. 2) проявляется при модифицировании экстрактов

коры добавками соответственно уротропина $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ или йодида калия KI.

При нагреве серной кислоты от 20° до 80°C сильно возрастают катодный и анодный токи поляризации (рис. 1–2) и примерно в 50 раз увеличивается по гравиметрическим данным средняя скорость коррозии K углеродистой стали Ст3 со смещением на 40–50 мВ в отрицательную область потенциала электрохимической коррозии $E_{\text{кор}}$ в 2М H_2SO_4 (табл. 1–2). При этом уменьшается способность стали к пассивации и при потенциалах выше +700мВ возрастает склонность к питтинговой коррозии в серной кислоте без добавок (рис. 2, кривая 1). Следует отметить, что водные экстракты еловой и осиновой коры благодаря наличию сапонина образуют пену на поверхности травильного раствора и в отличие от изопропанольных экстрактов коры [10], промышленных ингибиторов ЧМ, ПБ-5, КФ-03 и ряда других ингибиторов кислотного травления [5] сохраняют защитное действие на сталь Ст3 в 2М H_2SO_4 при 80°C. Отдельные и совместные добавки катодно-анодных ингибиторов ЭКЕ и ЭКО при общей концентрации ВЭВ 1 г·л⁻¹ примерно в 3 раза уменьшают катодный и анодный токи поляризации (рис.2, кривая 3) и скорость коррозии стали Ст3 в 2М растворе H_2SO_4 при 80°C (табл. 2). Ингибиторный

Таблица 2. Влияние ингибирующих добавок на потенциал коррозии $E_{\text{кор}}$ и параметры защиты углеродистой стали Ст3 в 2М H_2SO_4 при 80°C

Ингибирующие добавки (в пересчете на сухие вещества)	$-E_{\text{кор}}, \pm 3 \text{ мВ (н.в.э.)}$	$K \pm 0.3 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$	$Z, \%$	γ
–	250	600	–	–
1 г·л ⁻¹ ЭКС	247	300	50	2.0
1 г·л ⁻¹ ЭКЕ	245	230	62	2.6
1.5 г·л ⁻¹ ЭКЕ	244	207	65	2.9
1 г·л ⁻¹ ЭКО	245	180	70	3.3
1 г·л ⁻¹ танина $\text{C}_{76}\text{H}_{52}\text{O}_{46}$	244	333	44	1.8
1 г·л ⁻¹ NaCl	260	360	41	1.7
1 г·л ⁻¹ ЭКС + 1 г·л ⁻¹ NaCl	250	100	84	6.0
1 г·л ⁻¹ ЭКЕ + 1 г·л ⁻¹ NaCl	248	60	90	10
1 г·л ⁻¹ ЭКО + 1 г·л ⁻¹ NaCl	247	50	92	12
0.5 г·л ⁻¹ ЭКС + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКЕ + 1 г·л ⁻¹ NaCl	240	75	88	8.0
0.5 г·л ⁻¹ ЭКЕ + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКО + 1 г·л ⁻¹ KI	230	38	94	16

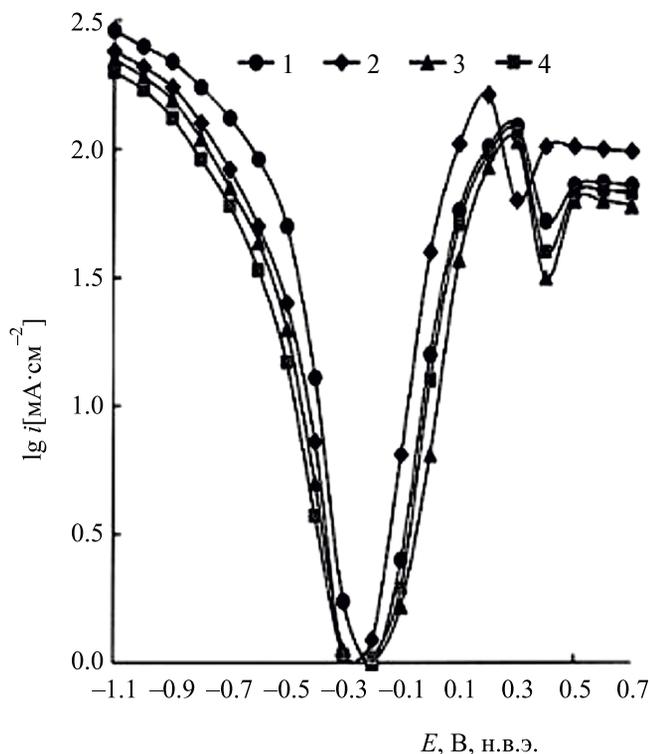


Рис. 1. Потенциостатические кривые поляризации стали Ст3 при 20°C в 2М H₂SO₄ (*E*, В, н.в.э., *lg i* [mA·cm⁻²]) без ингибитора (1) и с ингибитором: 2 – 1 г·л⁻¹ NaCl; 3 – 1 г·л⁻¹ экстракта коры ели; 4 – 1 г·л⁻¹ экстракта коры ели и 1 г·л⁻¹ NaCl.

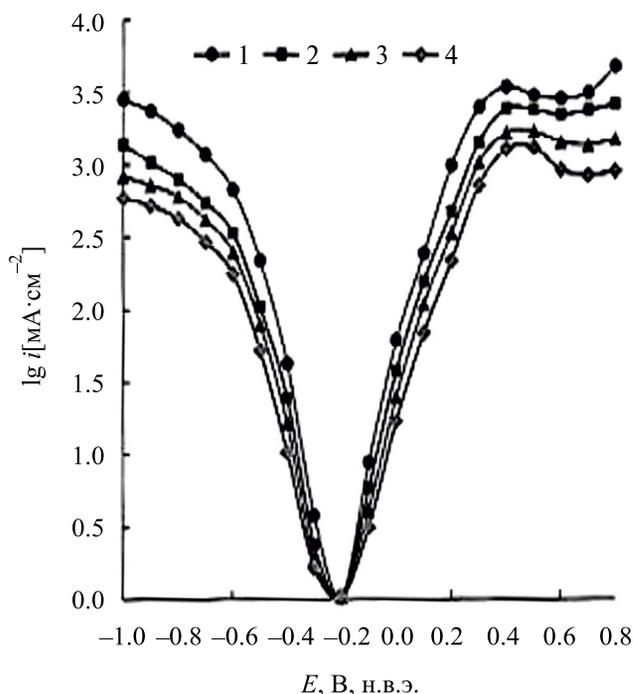


Рис. 2. Потенциостатические кривые поляризации стали Ст3 при 80°C в 2М H₂SO₄ (*E*, В, н.в.э., *lg i* [mA·cm⁻²]) без ингибитора (1) и с ингибитором: 2 – 0,5 г·л⁻¹ экстракта коры осины, 0,5 г·л⁻¹ экстракта коры ели и 1 г·л⁻¹ NaCl; 3 – 0,5 г·л⁻¹ экстракта коры осины и 0,5 г·л⁻¹ экстракта коры ели; 4 – 0,5 г·л⁻¹ экстракта коры осины, 0,5 г·л⁻¹ экстракта коры ели и 1 г·л⁻¹ KI.

эффект добавки 1 г·л⁻¹ менее доступного чистого танина C₇₆H₅₂O₄₆ как основного действующего компонента ЭКО и ЭКЕ существенно ниже ($\gamma = 1.8$, табл. 2).

Замена чистой воды в качестве экстрагента на 0.1% H₂SO₄, а также слабощелочные сульфитный, боратный и гидрофосфатный растворы не приводила к устойчивому увеличению противокоррозионного действия на сталь Ст3 полученных экстрактов-гидролизатов коры с повышенным содержанием танинов (до 8 % массы а.с.к.).

Из данных табл. 2 следует, что защитное действие экстрактов древесной коры на сталь Ст3 в условиях сернокислотного травления значительно возрастает при введении анионо-активных добавок (1 г·л⁻¹) синергистов 0.017 М NaCl ($Z = 90-92\%$, $\gamma = 10-12$) или 0.006М KI ($Z = 94\%$, $\gamma = 16$). Добавка NaCl снижает пассивируемость стали и смещает потенциал коррозии $E_{кор}$ в отрицательную область (табл. 1–2).

При комнатной температуре эта добавка тормозит катодный процесс и заметно ускоряет анодный процесс, смещая узкую область пассивации в сторону отрицательных потенциалов (рис. 1, кривые 1 и 2).

В отличие от NaCl добавка KI смещает потенциал коррозии к менее отрицательным значениям (табл. 1–2) и повышает пассивируемость стали при потенциалах +500–800 мВ (рис. 2, кривые 1 и 4). С учетом значительной энергии активации процесса коррозии (50–60 кДж/моль) в интервале температур 20°–80°C и результатов работ [20,21], синергизм защитного действия ВЭВ древесной коры и добавок галогенид-ионов на скорость коррозии стали Ст3 в 2М H₂SO₄ (табл. 1–2) можно объяснить адсорбционно-химическим взаимодействием компонентов сильнокислой среды (pH < 0) с поверхностными атомами железа и конкурирующей адсорбцией гидросульфат- и галогенид-анионов, а также катионов водорода и молекул воды.

Влияние ингибиторов и температуры на коррозию стали 10X18H10T в 1.4M HCl

Из данных табл. 3 следует, что при одинаковой концентрации (1 г·л⁻¹) ВЭВ коры оказывают антикоррозионное действие ($Z = 44-55\%$ при 20°C), увеличивающееся в ряду ЭКС < ЭКЕ < ЭКО. Добавки водных экстрактов коры смешают потенциал электрохимической коррозии $E_{кор}$ в положительном направлении при 20° и 40°C (табл. 3), уменьшают скорость анодного (i_a) и катодного (i_k) процессов (см. типичные кривые на рис. 3–4) и поддерживают сталь 10X18H10T при анодной поляризации в состоянии частичной или полной пассивации. Потенциал начала пассивации $E_{н.п}$ стали 10X18H10T в чистой соляной кислоте, а также с добавками ЭКО, уротропина или их смеси равен +70 мВ, а потенциал резкого увеличения плотности анодного тока (потенциал образования питтингов или локальной депассивации)

вследствие активации хлорид-анионами [22] равен +220 мВ (н.в.э.) при 20°C (рис. 3, кривые 1–5).

Пассивация исследуемых сталей сильнее выражена при 20°C и при содержании сухих ВЭВ коры 3.75–4.25 г·л⁻¹. С ингибитором ЭКО анодный ток растворения при пассивации стали 10X18H10T уменьшается в ~5 раз при потенциале +250 мВ (рис.3, кривая 2), с добавкой 0.75 г·л⁻¹ уротропина в 2 раза (кривая 3), а с добавкой комбинированного ингибитора (3.75 г·л⁻¹ ЭКО + +0.75 г·л⁻¹ (CH₂)₆N₄) в 3 раза (кривая 5).

В нагретой до 40°C соляной кислоте композиции ЭКС (ЭКЕ или ЭКО) с уротропином (йодидом калия) уменьшают скорость катодного и анодного процессов и поддерживают сталь 10X18H10T в пассивном состоянии при потенциалах +600–900 мВ (рис. 4, кривые 2–4).

Защитное действие ингибитора ЭКО на аустенитную сталь 10X18H10T при 40°C возрастает

Таблица 3. Влияние температуры и ингибирующих добавок на потенциал коррозии $E_{кор}$ и параметры защиты аустенитной стали 10X18H10T в 1.4M HCl

Ингибирующие добавки (в пересчете на сухие вещества)	$-E_{кор.} \pm 3$ мВ (н.в.э.) при $t \pm 1$ °C		$K \pm 0.2$ г·м ⁻² ·ч ⁻¹	Z, %	γ
	20	40	при 20°C		
–	135	180	1.64	–	–
1 г·л ⁻¹ ЭКС	107	174	0.89	44	1.8
1 г·л ⁻¹ ЭКЕ	103	168	0.80	50	2.0
1 г·л ⁻¹ ЭКО	100	164	0.73	55	2.2
3.75 г·л ⁻¹ ЭКО	75	–	0.32	80	5.0
0.5 г·л ⁻¹ ЭКС + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКЕ	105	170	0.52	68	3.1
0.5 г·л ⁻¹ ЭКС + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКО	103	168	0.40	75	4.0
1 г·л ⁻¹ танина C ₇₆ H ₅₂ O ₄₆	120	170	0.96	41	1.7
1 г·л ⁻¹ (CH ₂) ₆ N ₄	125	172	0.76	52	2.1
1 г·л ⁻¹ танина C ₇₆ H ₅₂ O ₄₆ + 1 г·л ⁻¹ (CH ₂) ₆ N ₄	110	165	0.68	58	2.4
1 г·л ⁻¹ ЭКС + 1 г·л ⁻¹ (CH ₂) ₆ N ₄	105	160	0.70	56	2.3
3.75 г·л ⁻¹ ЭКО + 0.75 г·л ⁻¹ (CH ₂) ₆ N ₄	50	–	0.25	84	6.4
1 г·л ⁻¹ ЭКЕ + 1 г·л ⁻¹ (CH ₂) ₆ N ₄	95	158	0.10	70	3.3
0.5 г·л ⁻¹ ЭКС + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКЕ + 1 г·л ⁻¹ (CH ₂) ₆ N ₄	100	155	0.53	67	3.0
1 г·л ⁻¹ KI	115	173	0.53	67	3.0
0.5 г·л ⁻¹ ЭКЕ + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКО + 1 г·л ⁻¹ KI	85	125	0.16	90	10
0.5 г·л ⁻¹ ЭКС + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКЕ + 1 г·л ⁻¹ KI	90	145	0.30	81	5.3
0.5 г·л ⁻¹ ЭКС + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКО + 1 г·л ⁻¹ KI	87	140	0.24	85	6.7

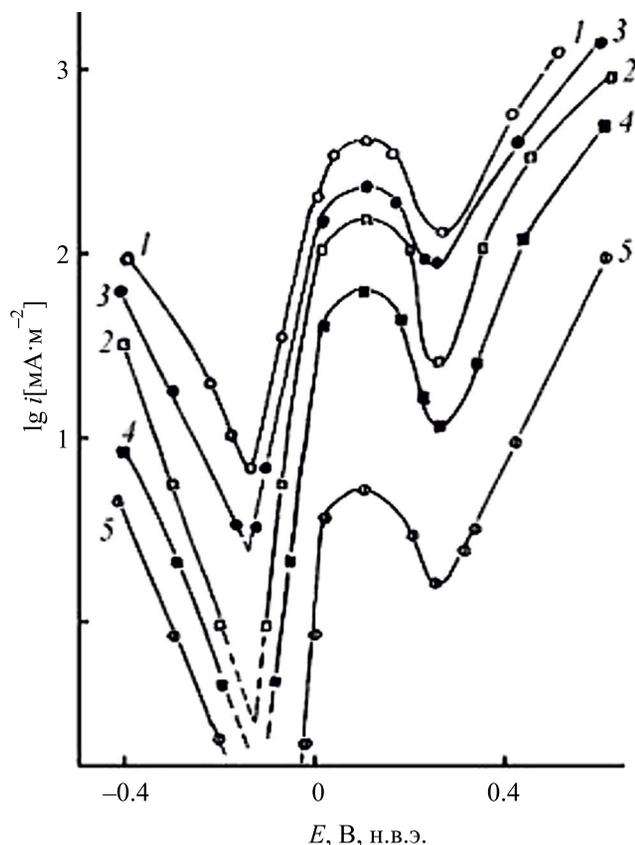


Рис. 3. Потенциодинамические кривые поляризации ($24 \text{ мВ} \cdot \text{мин}^{-1}$) стали 10X18H10T в 1.4M растворе HCl при 20°C (E , В, н.в.э.; $\lg i$ [$\text{А} \cdot \text{м}^{-2}$]) без ингибитора (1) и с ингибитором:

2 – $3.75 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ экстракта коры осины,

3 – $0.75 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ гексамина (CH_2N_4),

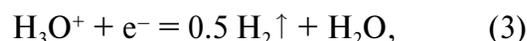
4 – $4.25 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ экстракта коры ели,

5 – $3.75 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ экстракта коры осины + $0.75 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ гексамина (CH_2N_4).

с разбавлением соляной кислоты ($7 \rightarrow 3 \text{ мас}\%$). Наиболее эффективным по гравиметрическим данным (табл. 3) является комбинированный ингибитор ($0.5 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ ЭКО + $0.5 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ ЭКЕ + $1 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ KI), защитное действие 90%, ингибиторный эффект 10 при 20°C . Эта добавка к кислоте смещает потенциал коррозии $E_{\text{кор}}$ стали 10X18H10T в положительном направлении примерно на 40–50 мВ при 20° и 40°C (табл. 3) и расширяет область пассивации при 40°C (рис. 4, кривая 4).

Антикоррозионная эффективность добавки $1 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ более дорогого чистого танина $\text{C}_{76}\text{H}_{52}\text{O}_{46}$ и композиции ($1 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ танина $\text{C}_{76}\text{H}_{52}\text{O}_{46}$ + $1 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ гексамина $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$) заметно ниже эффективности ингибиторов на основе водных экстрактов древесной коры (табл.3).

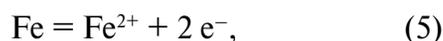
При нагревании от 20° до 40°C коррозионная активность соляной кислоты возрастает, скорость коррозии стали 10X18H10T увеличивается примерно в 2 раза, перенапряжение катодного выделения водорода



уменьшается, а потенциал $E_{\text{кор}}$ смещается в отрицательную сторону (табл.3). В стационарном состоянии, когда $E = E_{\text{кор}}$, выполняется приближенное равенство

$$i_M^- = i_H^+ = i_{\text{кор}}, \quad (4)$$

где i_M^- – плотность тока анодного окисления стали (железа)



i_H^+ – плотность катодного тока водородной деполаризации, $i_{\text{кор}}$ – плотность коррозионного тока, или скорость электрохимической коррозии, зависящая от разности начальных потенциалов анодного и катодного процессов, анодной ($\Delta E_a/i$) и катодной ($\Delta E_k/i$) поляризуемостей и омического сопротивления коррозионной среды, незначительного для 1.4M раствора HCl.

Из анализа поляризационных кривых исследуемых сталей (рис.3) следует, что добавка ЭКО (кривая 2) или ЭКЕ (кривая 4) к соляной кислоте тормозит катодный и особенно анодный процесс, понижая плотность тока при одинаковой абсолютной величине электродного потенциала и увеличивая наклон поляризационных кривых. При совместном присутствии катодного ингибитора ЭКС и преимущественно анодного ингибитора ЭКЕ или ЭКО усиливается торможение катодного и анодного процессов электрохимической коррозии стали 10X18H10T в 1.4M HCl при 20° и 40°C с частичной пассивацией в области потенциалов +500 –700 мВ (рис. 4, кривая 3). При этом водозэкстрактивные вещества ЭКС и ЭКЕ (ЭКО) взаимно усиливают ингибирующее действие на кислотную коррозию стали. Ингибиторный эффект по электрохимическим данным

$$\gamma_{\text{эк}} = i_{\text{кор}} / i_{\text{кор}}^{\text{инг}}, \quad (6)$$

возрастает при добавлении уротропина ($\gamma_{\text{эк}} = 1.8$) или йодида калия ($\gamma_{\text{эк}} = 2.2$) к ЭКС, ЭКЕ и к их смеси (рис. 4, табл. 4)

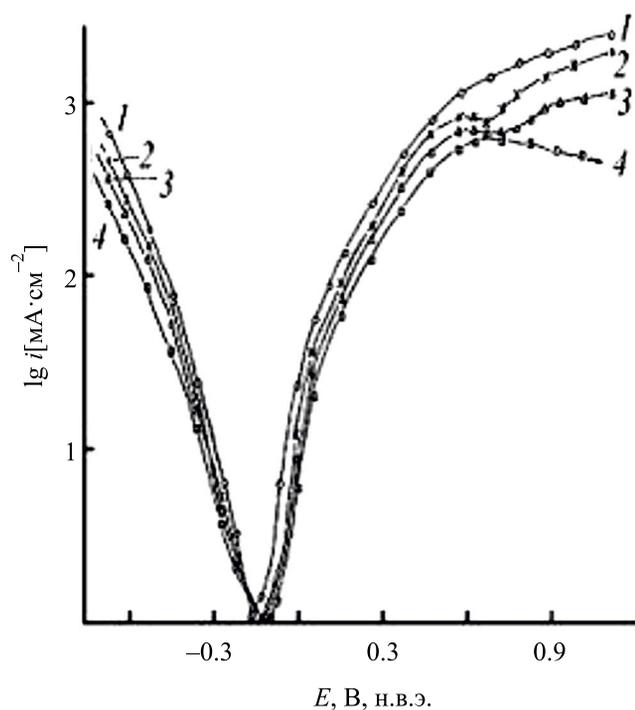


Рис. 4. Потенциостатические кривые поляризации стали 10X18H10T при 40 °С в 1.4M HCl (E , В, н.в.э., $\lg i$ [$\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$]) без ингибитора (1) и с ингибитором: 2 – 1 г·л⁻¹ экстракта коры сосны + 1 г·л⁻¹ $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ (2), 3 – 0.5 г·л⁻¹ экстракта коры сосны + 0.5 г·л⁻¹ экстракта коры ели + 1 г·л⁻¹ $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$, 4 – 0.5 г·л⁻¹ экстракта коры ели + 0.5 г·л⁻¹ экстракта коры осины + 1 г·л⁻¹ KI.

и удовлетворительно согласуется с результатами гравиметрического определения ингибиторного эффекта (табл. 3).

Скорость электрохимической коррозии $i_{\text{кор}}$ сталей определяли по известному уравнению Стерна–Гири (Stern–Geary)

$$i_{\text{кор}} = i |b_k \cdot b_a / [2.3 \Delta E (|b_k| + b_a)]|, \quad (7)$$

где i – плотность возникающего тока ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$) при изменении потенциала на малую величину ΔE (≤ 10 мВ) катодной или анодной поляризации вблизи стационарного потенциала коррозии $E_{\text{кор}}$; b_k и b_a – наклоны катодной и анодной поляризационных кривых на прямолинейных участках, соответствующих уравнению Тафеля.

Теоретическое уравнение (7), используемое при условии отсутствия концентрационной поляризации и незначительности омического сопротивления коррозионной среды, применимо

для исследуемых нами коррозионных процессов с водородной деполаризацией. Найденные из зависимостей $\lg i(E)$ вблизи стационарного потенциала коррозии $E_{\text{кор}}$ при 40 °С для катодных кривых 1–4 (рис. 4, левые ветви) значения $|b_k|$ равны соответственно 11.3, 13.4, 13.6 и 13.1 мВ, а для анодных кривых 1–4 (рис. 4, правые ветви) значения b_a равны 9.4, 9.8, 9.8 и 9.6 мВ соответственно в 1.4M HCl без ингибитора и в присутствии ингибиторов (2–4), согласно табл. 4.

С учетом анализа в работе [23] в первом приближении можно принять, что в общем торможение коррозии стали 10X18H10T в ингибированной кислоте, найденное по формуле (6) и данным табл. 4, наибольший вклад вносят блокировочный – эффект и адсорбционный ψ_1 –эффект в соответствии с уравнением

$$\lg \gamma = \lg [1/(1 - \theta)] + K_I \Delta \psi_1, \quad (8)$$

где θ – степень заполнения поверхности стали адсорбированными частицами, $\Delta \psi_1$ – изменение величины ψ_1 – потенциала при адсорбции поверхностно-активных веществ, K_I – постоянная.

Оценим теперь смещение адсорбционного потенциала $\Delta \psi_1$ по экспериментальным данным табл. 4 и уравнению [21,23]

$$E'_{\text{кор}} - E_{\text{кор}} = \Delta E_{\text{кор}} = \frac{E'_{\text{кор}} - E_{\text{кор}}}{1 - b_a b_k / b_o (b_a + b_k)} \Delta \psi_1, \quad (9)$$

где $E'_{\text{кор}}$ – потенциал коррозии стали в ингибированной соляной кислоте, $b_o = 2.3RT/F$, R – газовая константа, T – абсолютная температура, F – константа Фарадея. Тогда для ингибиторов (2), (3) и (4) в табл. 4 получим значения $\Delta \psi_1$ соответственно 22, 28 и 39 мВ.

Для исследования механизма адсорбции на стали 10X18H10T в ингибированной экстрактами коры соляной кислоте был выбран водный экстракт коры осины ЭКО как более эффективный ингибитор по сравнению с ЭКС и ЭКЕ (табл. 3 и рис. 3). Проводили запись и кинетический анализ кривых уменьшения плотности тока i в зависимости от времени t в цепи потенциостатируемого электрода из исследуемой стали при введении ингибитора в коррозионную среду. Из семи проверенных нами уравнений адсорбции по различным механизмам [21, с. 60–61] ожидаемые прямолинейные зависимости получены для двух вариантов (рис. 5). Линия 1 на рис. 5 соответствует

Таблица 4. Параметры катодной и анодной поляризации стали 10X18H10T вблизи $E_{кор}$ и плотность тока коррозии $i_{кор}$ в чистой 1.4М HCl и в ингибированной 1.4М HCl при 40°C

$-E$ (н.в.э.), мВ	ΔE , мВ	$ \Delta E /i$, мВ·м ² /А	$i_{кор}$, А/м ²	$-E$ (н.в.э.), мВ	ΔE , мВ	$ \Delta E /i$, мВ·м ² /А	$i_{кор}$, А/м ²
1.4М HCl (1)				1.4М HCl + 1 г·л ⁻¹ ЭКС + 1 г·л ⁻¹ (CH ₂) ₆ N ₄ (2)			
188	-8	7.1	0.31	168	-8	13.6	0.18
187	-7	7.7	0.29	167	-7	14.6	0.17
186	-6	7.6	0.29	166	-6	14.0	0.18
185	-5	8.5	0.26	165	-5	14.3	0.17
184	-4	8.0	0.28	164	-4	13.6	0.18
183	-3	7.9	0.28	163	-3	11.5	0.21
180	0	—	0.22*	160	0	—	0.14*
177	3	6.8	0.33	157	3	10.3	0.24
176	4	6.7	0.33	156	4	11.8	0.21
175	5	7.0	0.32	155	5	10.6	0.23
174	6	6.5	0.35	154	6	10.7	0.23
173	7	5.6	0.40	153	7	9.5	0.26
172	8	4.8	0.46	152	8	9.0	0.27
171	9	4.5	0.49	151	9	7.5	0.33
1.4М HCl + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКЕ + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКС + +1 г·л ⁻¹ (CH ₂) ₆ N ₄ (3)				1.4М HCl + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКЕ + 0.5 г·л ⁻¹ ЭКС + +1 г·л ⁻¹ KI (4)			
163	-8	16.0	0.16	153	-8	19.6	0.14
162	-7	16.3	0.15	152	-7	19.7	0.12
161	-6	17.6	0.14	151	-6	19.4	0.12
160	-5	15.6	0.16	150	-5	19.2	0.12
159	-4	16.0	0.16	149	-4	18.2	0.13
158	-3	12.5	0.20	148	-3	15.4	0.16
155	0	—	0.12*	145	0	—	0.10*
152	3	12.5	0.20	142	3	15.0	0.16
151	4	12.9	0.19	141	4	16.7	0.14
150	5	13.2	0.19	140	5	15.2	0.16
149	6	12.0	0.21	139	6	14.3	0.17
148	7	11.7	0.21	138	7	13.7	0.17
147	8	9.6	0.26	137	8	12.3	0.19

* Эти значения $i_{кор}$ найдены экстраполяцией тафелевых участков поляризационных кривых до стационарного потенциала.

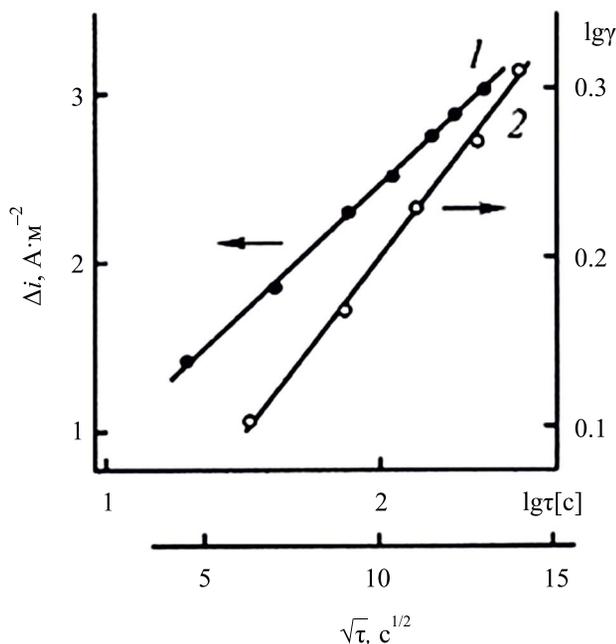


Рис. 5. Кинетические зависимости адсорбции водоэкстрактивных веществ коры осины (1.5 г·л^{-1}) на стали 10X18H10T в 1.4M соляной кислоте при 20°C (Δi , A·м^{-2} ; τ , с) по экспериментальным данным ингибиторного эффекта γ и уменьшения плотности катодного тока $\Delta i(\tau)$ при введении экстракта коры осины в электрохимическую ячейку.

равномерно-неоднородной поверхности с преобладанием блокировочного механизма действия ингибитора ЭКО согласно уравнению

$$\Delta i = a i_0 + 2.3 b i_0 \lg \tau, \quad (10)$$

где i_0 – плотность тока до введения ингибитора, $\Delta i = i_0 - i$, a и b – константы. Линия 2 (рис. 5) соответствует энергетической неоднородности поверхности стали согласно уравнению:

$$\ln \gamma = K_i (\tau/\tau_\infty)^{0.5}, \quad (11)$$

по электрохимическим данным, K_i – константа, τ_∞ – время достижения адсорбционного равновесия, приравненное времени установления постоянной плотности тока. Найденное время τ_∞ (~ 250 с) для адсорбции ингибитора ЭКО на стали 10X18H10T в 1.4M HCl при 20°C на порядок превышает время τ_∞ , наблюдаемое при физической обратимой адсорбции [21], и свидетельствует о химической адсорбции с участием электронов π -связей ароматических колец полифенольных соединений и неподеленных

электронов на гетероатомах кислорода и азота функциональных групп $-\text{NH}_2$, $-\text{OH}$, $-\text{CHO}$ и $-\text{COOH}$ водоэкстрактивных веществ коры.

Согласно полученным гравиметрическим данным, на химическую адсорбцию ЭКО на стали 10X18H10T указывают рост ингибирующего действия от 78–80% до 86% при нагревании 1.4M HCl от 20° до 50°C и увеличение энергии активации коррозии от 17 до 23 ± 2 кДж·моль $^{-1}$ соответственно в 1.4M HCl без ингибитора и с добавкой 3.75 г·л^{-1} ЭКО. Сделанный вывод о хемосорбции ЭКО на стали согласуется с установленным в работе [6] образованием слоя химических соединений хвойных танинов и железа на поверхности стали. С учетом данных табл. 2 и 3, а также работ [6,10] основным антикоррозионно действующим компонентом ЭКО и ЭКЕ может быть таниновая кислота $\text{C}_{76}\text{H}_{52}\text{O}_{46}$ (код CAS 1401–55–4), образующая с железом на поверхности стали блокирующие молекулярные соединения.

Химическое модифицирование водных экстрактов коры минеральными и органическими добавками показало, что лучшими синергистами являются йодид калия и уротропин. По данным работы [24], эффективность ингибирования кислотной коррозии углеродистой стали уротропином увеличивалась при нагревании от 20° до 50°C . По нашим гравиметрическим данным, при коррозионном испытании стали 10X18H10T в 1.4M HCl при 60°C отдельные добавки $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ и KI (1 г·л^{-1}) к экстракту ЭКО с 2 г сухих ВЭВ в 1 литре повышали ингибиторный эффект от 1.6–3.2 до 6 и 23 соответственно. В практическом отношении предпочтительнее в качестве синергиста широко применяемый уротропин (гексаметилентетрамин, гексамин), хорошо растворимый в воде и частично гидролизующийся сильными кислотами. Согласно работе [25], в 1M растворе HCl третичные атомы азота гексамина протонируются и полученный продукт медленно разлагается при 25°C в основном на обладающие антикоррозионным действием формальдегид CH_2O и аммиак NH_3 по механизму мономолекулярного затухания с константой скорости $1.3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. При введении гексамина в экстракты древесной коры формальдегид, образующийся при гидролизе гексамина, реагирует с учетом данных [15] с полифенольными танинами экстрактов с образованием метиленовых мостиковых и эфирных связей, а также воды и химически модифицирует ингибитор.

В кислотной среде передача неподеленных и π -электронов от ароматических колец и функциональных групп галловой и эллаговой кислот,

моносахаридов и других ВЭВ из древесной коры, а также от добавленных молекул гексамина или йодид-ионов на незанятые 3d-орбитали Fe(Cr,Ni) стали 10X18H10T приводит к хемосорбции в результате образования координационных и обычных ковалентных связей. В отличие от возможной одновременно физической (электростатической) адсорбции процесс хемосорбции усиливается при нагревании, повышая эффективность ингибирования кислотной коррозии.

Для сравнения эффективности ингибиторов на основе экстрактов древесной коры и известных промышленных ингибиторов провели гравиметрическое исследование коррозии аустенитной котельной стали 10X17H13M2T в лабораторных условиях, моделирующих химическую очистку 5% соляной кислотой (3ч при 50 °С) варочного и теплообменного оборудования, добавляя органично-минеральный осадок (20 г·л⁻¹), снятый с верхней полусферы варочного аппарата “Камюр” Котласского ЦБК. Растворение осадка происходило с образованием сероводорода и диоксида углерода, скорость коррозии стали 9.6 ± 0.5 г·м⁻²·ч⁻¹. В этих условиях ингибитор ЭКО (3 г·л⁻¹) и композиция (3.75 г·л⁻¹ ЭКО + 1.25 г·л⁻¹ С₆Н₁₂Н₄) имели защитное действие 85 и 94%, а промышленные ингибиторы (3 г·л⁻¹) ПБ-5, уротропин, ПКУ-3 и ХОСП-10 соответственно 10, 60, 89 и 93% (данные Г.Ф. Ананьевой и автора).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Защитное действие Z (50–70%) водных экстрактов древесной коры при коррозии углеродистой стали Ст3 в 2М растворе серной кислоты сохраняется при нагревании от 20° до 80°С, зависит от породного состава дерева и увеличивается при совместном введении катодного ингибитора ЭКС и катодно-анодных ингибиторов ЭКЕ или ЭКО с одинаковой общей концентрацией 1 г·л⁻¹ водоэкстрактивных веществ (ВЭВ).

Еще значительно сильнее синергизм защитного действия при сернокислотной коррозии стали Ст3 с увеличением Z до 97 или 94% проявляется при модифицировании экстрактов еловой и осинной коры добавками 1 г·л⁻¹ катодно-анодных ингибиторов уротропина (СН₂)₆ N₄ или йодида калия KI. Ингибиторный эффект добавки 1 г·л⁻¹ менее доступного чистого танина С₇₆Н₅₂О₄₆ как основного действующего компонента водных экстрактов древесной коры существенно ниже ($\gamma = 1,8$, $Z = 44\%$).

При одинаковом 1 г·л⁻¹ содержании ВЭВ древесной коры сосны, ели и осины ингибирующее действие Z на коррозию аустенитной стали 10X18H10T в 1.4М водном растворе HCl увеличивается в ряду: экстракт коры сосны < экстракт коры ели < экстракт коры осины, при повышении концентрации ВЭВ до 3.8 г·л⁻¹ (для ЭКО при 20°С $Z = 80\%$) и сохраняется при нагревании от 20° до 60°С.

По данным потенциостатического исследования в 1.4 М растворе HCl при 20°С водоэкстрактивные вещества коры осины химически адсорбируются на отрицательно заряженной энергетически неоднородной поверхности стали 10X18H10T с преобладанием блокировочного эффекта.

Лучшими из испытанных нами синергистов к ингибитору ЭКО являются йодид калия и уротропин в массовом соотношении сухих веществ 2 ÷ 3 ЭКО: 1KI или 2 ÷ 3ЭКО: 1(СН₂)₆ N₄. По гравиметрическим данным отдельные добавки (СН₂)₆ N₄ или KI (1 г·л⁻¹) к экстракту ЭКО (2г ВЭВ·л⁻¹) уменьшают скорость коррозии стали 10X18H10T в 1.4М HCl при 60°С соответственно в 6 и 23 раза.

Наиболее эффективным по гравиметрическим и электрохимическим данным является комбинированный ингибитор (0.5 г·л⁻¹ ЭКЕ + 0.5 г·л⁻¹ ЭКО + 1 г·л⁻¹ KI). Эта добавка к раствору 5% HCl значительно смещает стационарный потенциал коррозии стали 10X18H10T при 20° и 40°С в положительном направлении.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрунин М.А., Гладких Н.А., Малеева М., Рыбкина А. А., Терехова Е. В., Юрасов Т. А., Игнатенко В. Э., Максаева, Л. Б., Котенев В.А., Цивадзе А. Ю. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2021. Т. 57, № 2. С.198–214. <https://doi.org/10.31857/S004418562102008X>
2. Олиференко Г.Л., Иванкин А.Н., Устюгов А.В., Зарубина А.Н. //Лесной вестник/ Forestry Bulletin. 2021. Т. 25. № 3. С. 142–151. <https://www.elibrary.ru/sqncwz>
3. Школьников Е.В., Ананьева Г.Ф., Смирнов В.Д. // Бумажная промышленность. 1988. № 12. С. 32–34. https://www.elibrary.ru/author_items.asp?authorid=495764

4. Школьников Е.В., Ананьева Г.Ф. // Целлюлоза. Бумага. Картон, 1999. № 7–8. С. 38–40.
5. Иванов Е.С., Гузенкова А.С., Иванов С.С. Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. № 5. С. 18–25.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=21497002>
6. Фазуллин Д.Д., Маврин Г.В., Фазуллина Л.И., Шайхиев И.Г., Лядов Н.М // Черные металлы. 2022. №5 (электронный журнал). (дата обращения 06.01.2024)
<https://doi.org/10.17580/chm.2022.05.10>
7. Школьников Е.В., Смирнов В.Д., Ананьева Г.Ф. // Мониторинг нефтегазовых сооружений в условиях коррозии. Материалы Междунар. совещ. Суздаль. 29–30 сентября 1993 г. М., 1993. С. 32–34.
8. Zakeri A., Bahmani E., Aghdam A.S.R. // Corrosion Communications. 2022. V. 5. P. 25–38.
<https://doi.org/10.1016/j.corcom.2022.03.002>
9. Danda K.T, Owoye T.F, Akande I.G. a. Fayomi O.S.I.// Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2023.V.59. №.6. P. 1290–1297.
<https://doi.org/10.1134/S2070205123701137>
10. Мишуров В.И., Кулакова А.С. // Молодой исследователь Дона. 2022.№2(35).С. 24–27(электронный журнал, дата обращения 08.01.2024).
<https://elibrary.ru/obrnxa>
11. Abdallah M., Asghar B.H., Zaaferanym I. and Fouda A.S. // Int. J. Electrochem. Sci. 2012. V. 7. P. 282–304.
[https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)13338-4](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)13338-4)
12. Shkol'nikov E.V.//Abstract book Intern. confer. “Renewable Wood and Plant Resources: Chemistry, Technology, Medicine” September 18–22, 2017. Saint Petersburg, Russia: VVM Publishing Ltd, 2017. P. 152–153. <https://elibrary.ru/zghcbx>
13. Школьников Е.В., Ананьева Г.Ф. // Известия Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии. 1997. № 163. С. 81–87.
https://www.elibrary.ru/author_items.asp?author-id=495764
14. Singhal T.S., Jain J.K. //Materials Today.2020. V. 26. № 2. P. 2432–2441.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.518>
15. Feng S., Cheng S., Yuan Z., Leitch M., Xu C. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. V. 26. P. 560–578. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.024>
16. Соболева С.В., Воронин В.М., Есякова О.А. //Химия растительного сырья. 2020. №1. С. 373–380.
<https://doi.org/10.14258/jcprpm.2020014442>
17. Школьников Е.В., Ананьева Г.Ф. // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2001. № 2. С. 95–100.
18. Шипигузов И.А., Колесова О.В., Вахрушев В.В. и др. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2016. № 1. С. 114–119. <https://elibrary.ru/vraqar>
19. Patent CN 1754987A (publ.05.04.2006). Acid corrosion inhibitor for boiler.
20. Колотыркин Я.М. // Защита металлов. 1967. Т. 3. № 2. С.131–144.
21. Решетников С.М. Ингибиторы кислотной коррозии металлов. Ленинград: Химия, 1986. 144 с.
22. Школьников Е.В., Ананьева Г.Ф. // Ж. прикл. хим. 1998. Т. 71. № 7. С. 1134–1137. [Shkol'nikov E.V., Anan'eva G.F. // Russ. J. Appl. Chem. 1998. V. 7 № 7. P. 1185–1188]. <https://www.elibrary.ru/LEOOIN>
23. Антропов Л.И. // Защита металлов. 1977. Т. 13. № 4. С. 387–399.
24. Bayol E., Kayakirilmaz K., Erbil M. // Materials Chemistry and Physics. 2007. V. 104. P. 74–82.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.02.073>
25. Cooney P.A., Crampton M.R.; a. Golding P. //J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1986. V. 2. № 6. P. 835–839
<https://doi.org/10.1039/p29860000835>