

COMPOSICIÓN INHIBIDORA DE LA CORROSIÓN DEL ACERO EN MEDIO ÁCIDO

Bibiana L. Sandianes Vega, **Jorge Uruchurtu Chavarín, *Marina Ronda Marrero*

Centro de Investigación y Desarrollo de Comercio Interior (CID-CI)**Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Cuernavaca, Morelos, MéxicoCentro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET), La Habana**

Las soluciones ácidas, mundialmente usadas en procesos de decapado, limpiezas químicas y estimulaciones a pozos de petróleo, por citar los más comunes, poseen alta corrosividad, siendo práctica general adicionarles inhibidores de corrosión para proteger los materiales metálicos. En el presente trabajo se obtuvo una composición inhibidora de la corrosión de acero al carbono en ácido clorhídrico, combinando dos de las vías usuales de obtención de inhibidores de corrosión, lo cual resulta novedoso.

La formulación está basada mayoritariamente en un subproducto, fracción aceite de cera de caña, y un desecho, el mosto alcohólico, los que se mezclan con un aditivo de carácter tensioactivo, logrando un efecto sinérgico entre ellos, determinado comparando los coeficientes de protección de la formulación con los de sus componentes individuales, mediante ensayos gravimétricos.

Se realizaron ensayos electroquímicos con la formulación de mayor coeficiente de protección, así como el estudio metalográfico del acero antes y después de los ensayos gravimétricos sin y con adición del producto.

Se concluye que la composición inhibidora posee alta efectividad inhibidora de la corrosión del acero en soluciones de ácido clorhídrico, se comporta como un inhibidor mixto, típico de inhibidores orgánicos de adsorción en medio ácido y no provoca corrosión localizada al material metálico. El producto fue registrado en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial.

Parte de la investigación fue realizada en el Instituto de Investigaciones Eléctricas de México, auspiciada por una beca, otorgada por la Secretaría de Relaciones Exteriores de ese país.

Palabras clave: *corrosión, inhibidor de corrosión, composición inhibidora.*

The worldwide used of the acid solutions in pickling processes, chemical cleanings, and oil well stimulations, just to mention the most common ones, have a high corrosivity, and it is well accepted to add corrosion inhibitors to protect the metallic materials.

In this paper it is shown the obtained inhibiting composition of the steel corrosion in hydrochloric acid, combining two of the common ways of obtaining corrosion inhibitors, and this is new.

The formulation is mainly based on a by-product and a waste, which are mixing with an tensioactive additive getting a synergetic effect between them. This was determined comparing the protection coefficients of the formulation with the individual components and through gravimetric tests.

Electrochemical tests with the formulation a higher protection coefficient was carried out, an also a steel metallographic study was done before and after the gravimetric tests with and without adding the product.

Finally it was determined that the inhibiting composition has a high corrosion inhibiting effectiveness of the steel in hydrochloric acid solutions, and it works like an mixed inhibitor, typical of the organic inhibitors of adsorption in an acid environment, and it does not corrode the metallic materials. This product was registered in the Cuban Organization of Industrial Property.

This research was done partially in the Electrical Research Institute of Mexico due to a scholarship of Department of Foreign Affairs of Mexico.

Key words: *corrosion, corrosion inhibitor, inhibiting composition.*

Introducción

Las soluciones de ácido clorhídrico (HCl) son mundialmente usadas en diferentes industrias, pudiéndose citar entre sus campos de aplicación más importantes y comunes, los procesos de decapado ácido, las limpiezas químicas y las estimulaciones a los pozos de petróleo. Las soluciones mencionadas constituyen un medio muy agresivo debido a su alta corrosividad, por lo que es imprescindible el empleo de métodos de protección contra la corrosión para reducir el ataque que las mismas provocan sobre los materiales metálicos en contacto con ellas, siendo la adición de inhibidores de corrosión al fluido ácido el método más adecuado y difundido en la práctica mundial. Los inhibidores de corrosión son sustancias químicas que, adicionadas en pequeñas concentraciones al medio corrosivo, actúan en la interfase metal-solución, logrando disminuir sensiblemente la velocidad de corrosión del material metálico expuesto a dicho medio /1/. Los inhibidores deben ser desarrollados o seleccionados según el sistema donde serán empleados, teniendo en cuenta la interrelación metal - medio corrosivo - parámetros tecnológicos, pues no existen inhibidores de aplicación universal. Un aspecto muy importante a tener en cuenta en la aplicación de inhibidores de corrosión es que en ocasiones un producto puede poseer una alta efectividad para reducir la corrosión generalizada en toda la superficie metálica, pero, sin embargo, puede provocar otros daños, como propiciar algún tipo de corrosión localizada, en cuyo caso no puede ser empleado en el proceso.

En Cuba se han realizado numerosos trabajos encaminados a la obtención de inhibidores de corrosión nacionales, con especial énfasis en los que puedan ser utilizados en medio ácido, como /2-9/ por sólo citar algunos, de manera que posean eficiencia y costo similares a los de importación, en cuyo caso podrían sustituirlos. Se han estudiado productos, subproductos y desechos de diferentes procesos industriales, a los que se atribuyen propiedades inhibidoras, como fuentes

asequibles de materias primas para la obtención de inhibidores de corrosión de mejor calidad que los compuestos de partida, mediante las vías fundamentales, cuyas particularidades se exponen más adelante.

El presente trabajo tuvo como objetivo primordial obtener una formulación inhibidora de la corrosión del acero en soluciones de ácido clorhídrico a partir de un sub-producto, fracción aceite de cera de caña, y un desecho, mosto alcohólico, con la adición de un tensioactivo, utilizando la combinación de dos de las vías usuales de obtención de inhibidores de corrosión, tratando de lograr un efecto sinérgico entre los componentes, que le proporcionara una elevada efectividad al producto final, empleando un procedimiento fácil y sencillo.

Fundamentación teórica

Las vías esenciales para obtener inhibidores de corrosión, según /10/, son a partir de:

1. **la síntesis orgánica** dirigida a la obtención de sustancias individuales comunes
2. **productos, subproductos y desechos** de la industria, sin tratamiento adicional o con algunas modificaciones
3. **productos combinados**, mezclando sustancias especialmente seleccionadas para que se manifieste sinergismo entre ellas

Los inhibidores que se obtienen por la primera variante son generalmente muy efectivos, pero de elevado costo, lo que constituye su esencial inconveniente, por lo que se utilizan básicamente para combatir casos especiales de corrosión.

La obtención de inhibidores utilizando la segunda variante tiene dos ventajas básicas: económica, por su bajo costo y asequibilidad de la materia prima y ecológica, porque usa desechos que de otra forma pueden contaminar el medio ambiente. Usualmente son menos efectivos que los obtenidos por síntesis y pueden presentar dificultades en su aplicación, entre otras causas,

porque su composición no es constante, no son productos individualizados, casi siempre son mezclas de sustancias con composición química y estructura aproximadas, que pueden sufrir transformaciones indeseables, por ejemplo por la reducción de la concentración de ácido o por altas temperaturas, pudiendo disminuir la eficiencia inhibidora o provocar un efecto tecnológico indeseado. Se pueden realizar tratamientos adicionales para mejorar la composición y estabilidad de estas sustancias, pero suelen ser complicados y requerir gastos considerables.

Antagonismo: el coeficiente de protección de la mezcla es menor que la suma de los coeficien-

$$\gamma_{mezcla}(x + y + \dots + n) = \gamma_{(x)} + \gamma_{(y)} + \dots + \gamma_{(n)} \quad (1)$$

Sinergismo: el coeficiente de protección de la mezcla es mayor que la suma de los coeficientes de protección de los constituyentes por separado.

$$\gamma_{mezcla}(x + y + \dots + n) < \gamma_{(x)} + \gamma_{(y)} + \dots + \gamma_{(n)} \quad (2)$$

$$\gamma_{mezcla}(x + y + \dots + n) > \gamma_{(x)} + \gamma_{(y)} + \dots + \gamma_{(n)} \quad (3)$$

También se considera sinergismo si se logra igual efecto protector, empleando una concentración de la mezcla menor que la suma de las concentraciones de los constituyentes por separado, lo que redundaría en menor costo.

Ha comenzado a experimentarse otra vía para obtener inhibidores de corrosión a partir de microorganismos o con la participación directa de los mismos en el medio corrosivo /13/. Sin embargo, aún no es práctica general y son escasos los reportes en la literatura.

Las formulaciones inhibidoras generalmente están constituidas por:

1. uno o más compuestos inhibidores (principio activo)
2. mejoradores de las propiedades protectoras

Los inhibidores producidos por la tercera variante son los de mayor perspectiva, si se logra sinergismo entre los componentes de la mezcla, lo que no siempre ocurre, pues al mezclar productos puede resultar cualquiera de los efectos siguientes /11, 12/.

Aditividad: el coeficiente de protección de la mezcla (γ_{mezcla}) es igual a la suma de los coeficientes de protección de los constituyentes por separado (γ_i). Efecto no perjudicial, tampoco proporciona ventajas, ocurre normalmente al mezclar productos similares, su mayor utilidad es combinar sustancias sin peligro de que su acción conjunta sea dañina.

tes de protección de los constituyentes por separado. Efecto siempre indeseado.

Efecto deseado al mezclar diferentes productos inhibidores, y su aplicación proporciona ventajas económicas.

3. solventes
4. mejoradores de la solubilidad o dispersabilidad
5. tensioactivos con diferentes objetivos específicos
6. sustancias inactivas de relleno
7. decolorantes y/o desodorizantes
8. otros aditivos en dependencia de la aplicación

En medio ácido el principio activo está formado generalmente por compuestos orgánicos, donde la estructura química de la molécula juega un importante papel en su efectividad inhibidora, que es el parámetro fundamental que los caracteriza, aunque no sólo este parámetro es definitorio para su empleo. En efectivo inhibidor debe ser suficientemente soluble en el medio dado. Los inhibidores orgánicos que cumplen este requisito, pueden ser

muy efectivos a concentraciones muy bajas con un mínimo de saturación de la superficie metálica /14/.

Se reportan como efectivos en HCl, compuestos con grupos funcionales que contienen al menos un heteroátomo de nitrógeno, azufre, oxígeno, fósforo, y que posean en la molécula enlaces múltiples, preferentemente triples /1, 12, 14/.

Como fuente potencial para la obtención de inhibidores se ha dedicado especial interés en nuestro país a subproductos, residuos y desechos relacionados con la industria azucarera por poseer ciertas características inhibitoras en su composición y estructura.

En específico, la fracción aceite de la cera de caña, que contiene ácidos grasos con varios doble enlaces, y el mosto alcohólico, desecho en el que permanecen polímeros coloreados, han sido objeto de numerosos estudios, debido a las propiedades inhibitoras que se les atribuyen.

Todo lo anteriormente expuesto constituye la fundamentación teórica y práctica en que se basa la selección de los componentes y la vía utilizada para la obtención de la composición inhibitora de la corrosión del acero en medio ácido que se presenta en el desarrollo de este trabajo.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Material metálico y medio corrosivo

Se emplearon probetas de acero de medio carbono bajo aleado al manganeso, desengrasadas, pulidas con esmeril hasta No. 600, enjuagadas, secadas y depositadas en una desecadora durante 24 horas antes del ensayo.

Se empleó HCl 15 % en peso como solución virgen. Se utilizaron cuatro productos: fracción aceite (FA), mosto (M) y dos tensioactivos (TA-1 y TA-2), de forma individual y en formulaciones, las que se obtuvieron por simple mezclado de sus componentes con agitación a

temperatura ambiente. La temperatura para los ensayos gravimétricos fue 50°C y para los electroquímicos fue de 30°C y 50°C.

Método gravimétrico

Se empleó para determinar los coeficientes de protección de la mezcla y de sus constituyentes individuales, según:

$$\gamma = V_{co} / V_{ci} \quad (4)$$

Donde: γ -coeficiente de protección

V_{co} velocidad de corrosión del acero en solución sin inhibidor

V_{ci} velocidad de corrosión del acero en solución con adición de los productos en estudio, individuales o en mezcla

Las velocidades de corrosión del acero en la solución sin inhibidor, y con la adición de los productos individuales y en mezcla, se calculan por la expresión siguiente:

$$V_c = (P_i - P_f) / A \cdot t \quad (5)$$

Donde: V_c - velocidad de corrosión

A - área de la probeta

P_i - peso inicial de la probeta

P_f - peso final de la probeta

A-área de la probeta

t- tiempo de ensayo

Métodos electroquímicos

Se trazaron las curvas de polarización potenciodinámicas, y de ruido electroquímico en un equipo multipropósito Modelo Gill 8AC de la ACM Instruments, utilizando la solución no inhibida y en presencia de la composición inhibitora, que mostró mayor coeficiente de protección. Como electrodo de referencia se empleó el de calomel saturado y platino como electrodo auxiliar, según el requerimiento de cada técnica.

Estudio metalográfico

Se realizó a probetas no expuestas a la solución de ensayo, así como a probetas después de

ensayos gravimétricos en solución sin inhibir y en solución con la composición inhibidora seleccionada, utilizando un microscopio óptico Neophot-21, de la Carl Zeis.

Resultados y discusión

Como resultado de la selección realizada entre diferentes subproductos y desechos que se originan en el país, se escogieron la fracción aceite (FA) de cera de caña y el mosto alcohólico (M), para desarrollar una formulación inhibidora de la corrosión, debido a características en la composición y estructura de cada uno. La primera es una

de las fracciones que se obtiene a partir de la cera de caña, mediante un proceso de extracción con solventes, mientras el segundo es un desecho residual del proceso de destilación de las mieles finales azucareras.

Ensayos gravimétricos

En la tabla 1 se presentan los coeficientes de protección obtenidos con los productos mencionados y con los tensioactivos, TA-1 y TA-2. Se emplean concentraciones de FA y M elevadas, precisamente por ser productos no terminados.

Tabla 1. Coeficientes de protección de productos individuales en HCl 15 % a 50 °C

No.	Producto	concentración, % vol	η	Observaciones
1	FA	0,25	1,3	baja solubilidad de FA en la solución
2		0,50	1,7	
3		1,0	1,8	
4	M	5,0	1,1	
5		10,0	1,4	
6	TA-1	0,10	-	no se obtuvo un valor apreciable de η
7		0,30	-	
8	TA-2	0,10	-	
9		0,30	-	

Como se aprecia de la tabla 1 los valores de los coeficientes de protección de los productos FA y M, añadidos a la solución de HCl son muy pequeños, considerándose que logran disminuir muy poco la velocidad de corrosión del acero en estas condiciones.

La fracción aceite está compuesta principalmente por ácidos grasos de largas cadenas carbonadas y varios enlaces doble, reportándose en /15/ que estos posibilitan que las moléculas se orienten paralelas a la superficie metálica, por la interacción de los enlaces insaturados con el metal, aumentando sus propiedades inhibidoras. Sin embargo, la FA en medio acuoso posee muy baja solubilidad, lo cual es determinante para que un inhibidor posea alta efectividad, lo que explica los valores de coeficientes de protección obtenidos con este producto, como se muestra en la tabla 1, 2 y 3.

El mosto incluye polímeros coloreados, que poseen propiedades inhibidoras /16/, y es soluble en medio acuoso, pero al ser un desecho, no elaborado, ni purificado, incluye en su composición elementos colaterales, como agua y otras impurezas, que deben ser los responsables de los pequeños valores de coeficiente de protección obtenidos a pesar de las altas concentraciones empleadas, como se observa en las tablas 1, 4 y 5.

Con los tensioactivos TA-1 y TA-2, no se pudieron determinar valores apreciables de coeficiente de protección, pues no mostraron ninguna influencia, favorable ni perjudicial, sobre la velocidad de corrosión del acero. Estos productos, si bien son capaces de adsorberse sobre la superficie metálica, en mayor o menor grado, pueden no tener propiedades inhibidoras de la corrosión, no obstante, si no son aceleradores de la misma,

pueden emplearse con otros fines, como aumentar la humectabilidad del metal, y dispersar o mejorar la solubilidad de otros productos en el medio acuoso.

Es evidente que los productos estudiados no pueden ser empleados por sí solos como inhibidores de corrosión en las condiciones ensayadas. Es posible tratar de lograr un aumento de las propiedades protectoras, mejorando la solubilidad del producto FA, sin encarecerlo grandemente, ni complicar el proceso de obtención o producción del producto resultante, ni su modo de empleo, por lo que se desarrollaron, diferentes formulaciones de tres componentes, FA, M y TA-1 o TA-2,

buscando un efecto sinérgico entre ellos. Se obtuvo una familia de productos, donde varía la relación entre sus componentes, cuya característica general es que es un líquido viscoso, de consistencia aceitosa, de color carmelita-verdoso, con olor característico, que se dispersa excelentemente en medio acuoso, lo que se logró gracias a la presencia del tensioactivo, cuya función primordial es actuar como agente dispersante.

En la tabla 2 se muestran algunos de los resultados más significativos, señalando que los valores obtenidos con los dos tensioactivos fueron similares, por lo que sólo se presentan las formulaciones con uno de ellos.

Tabla 2 Coeficientes de protección de las formulaciones en HCl 15 % a 50 °C

No.	Formulación	concentración, %vol	γ_{mezcla}
1	FA/M/TA-1	0,25	39,1
2		0,50	60,0
3	FA/M/TA-2	0,50	50,0
4	FA/M/TA-3	0,50	54,5
5	FA/M/TA-4	0,50	53,0
6	FA/M/TA-5	0,25	94,0
7		0,50	154,0
8	FA/M/TA-6	0,25	42,5
9		0,50	66,6

Comparando los valores de los coeficientes de protección de las formulaciones de FA/M/TA (γ_{mezcla}), mostrados en la tabla 2 con los coeficientes de protección obtenidos con los productos individuales (γ_i), que aparecen en la tabla 1, es cierto que los correspondientes a las mezclas superan grandemente a los obtenidos por separado, lo que no sólo quiere decir, que se produce el efecto sinérgico deseado, si no que la protección que brindan las formulaciones es elevada.

Ensayos electroquímicos

Es importante realizar el estudio del producto triangulando varias técnicas, para obtener una valoración más completa de su comportamiento inhibitor. En trabajos anteriores se ha obtenido

una buena correlación entre los ensayos gravimétricos y los electroquímicos empleados en este artículo, incluyendo además el de impedancia electroquímica /17/. En los ensayos electroquímicos se empleó como inhibidor la formulación FA/M/TA-5, que fue la composición que mostró los mayores valores de coeficiente de protección.

Curvas de polarización

La corrosión electroquímica, es el resultado de un flujo de corriente entre las áreas anódicas y catódicas en la superficie metálica a través del medio. El inhibidor de corrosión que se añada a la solución debe ser capaz de reducir dichas corrientes, lo cual puede detectarse mediante el empleo de las curvas de polarización anódica y catódica.

En la figura 1, que presenta las curvas de polarización del acero en HCl 15 % sin inhibidor y con la adición de éste a dos concentraciones a 30 °C, puede observarse que las pendientes anódica y catódica de las curvas en presencia del

inhibidor, disminuyen en relación a las de la curva en ausencia del mismo, en la cual se presentan los mayores valores de corriente, que disminuyen a medida que aumenta la concentración del inhibidor en la solución.

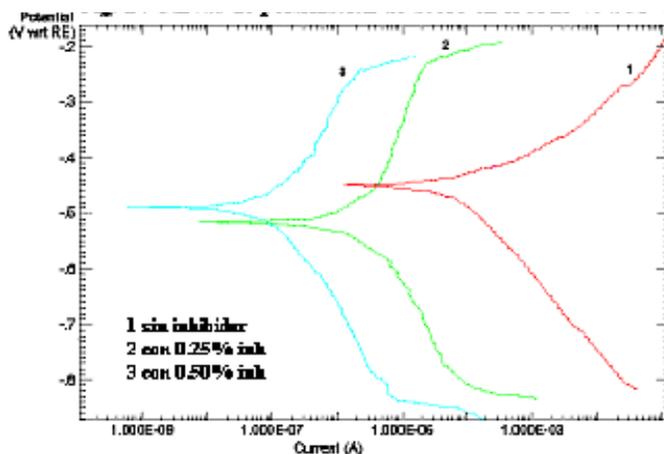


Fig. 1 Curvas de polarización de acero en HCl 15 % a 30 °C.

La figura 2 presenta las curvas de polarización del acero en HCl 15 % sin y con inhibidor a 50 °C. Igual que a 30 °C, las mayores corrientes las presenta la curva sin inhibidor, y la acción de éste también es similar, aunque los valores de corrientes

son superiores, comparándolas con las de la figura 1 a iguales concentraciones, en lo que, evidentemente, incide el aumento de temperatura del medio.

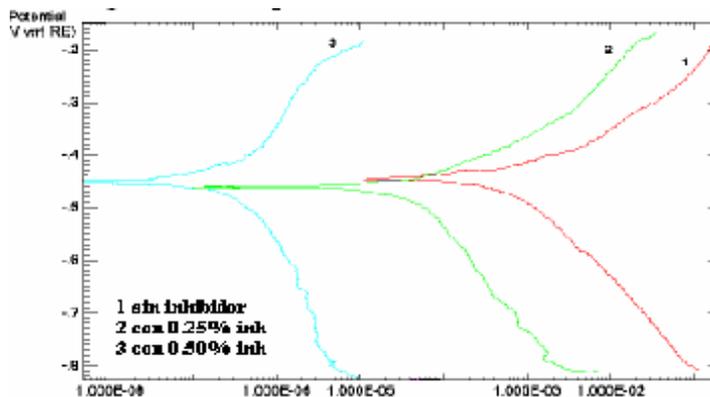


Fig. 2 Curvas de polarización de acero en HCl 15 % a 50 °C.

Los inhibidores orgánicos de adsorción, que son los más usados en medio ácido, pueden tener cierta tendencia a ser catódicos o anódicos, pero generalmente son mixtos, capaces de modificar ambas ramas de las curvas de polarización. Este comportamiento coincide con el mostrado por la composición inhibitoria en estudio, como se puede

observar en las figuras 1 y 2, por lo que puede clasificarse precisamente como un inhibidor mixto en estas condiciones.

Curvas de ruido electroquímico

La técnica de ruido electroquímico permite tener referencia acerca del tipo de corrosión,

generalizada o localizada, que ocurre en la superficie metálica, los datos se obtienen a partir de la simple escucha de señales recogidas del medio, que no son más que fluctuaciones espontáneas de potencial y/o corriente en un sistema electroquímico dado, por lo que tiene la ventaja de no perturbar dicho sistema.

La información obtenida es útil para complementar la lograda por otros métodos, por ejemplo, mediante ensayos gravimétricos, se puede obtener un elevado coeficiente de protección del inhibidor y, sin embargo, estar ocurriendo corrosión localizada, en cuyo caso los datos no serían representativos de la realidad, lo cual puede ser detectado mediante las curvas de ruido electroquímico.

En la figura 3 se presentan las gráficas de las señales de ruido en potencial de acero en HCl 15 % sin inhibidor y con la adición de éste, a dos concentraciones, a 30 °C.

Cuando no hay inhibidor en la solución se presenta una señal con pocas oscilaciones durante todo el tiempo de ensayo, próximas a los -460 mV.

En el ensayo con 0,25 % de inhibidor se emplearon electrodos seleccionados con superficies que presentaban hendiduras. La señal obtenida con estas condiciones presenta oscilaciones casi periódicas, con amplitudes que alcanzan los 15 mV aproximadamente, con potenciales que fluctúan entre -520 mV y -500 mV. Este comportamiento es típico de corrosión localizada en resquicios, debido a que se empleó un electrodo con tales características, como se explicó anteriormente.

Para la concentración de 0,5 % de inhibidor, la señal presenta oscilaciones aleatorias de bajísima, casi imperceptible, amplitud, en potenciales entre -485 mV y -490 mV. En este caso, que se emplearon electrodos normales (sin hendiduras), no se observaron indicios de que la presencia del inhibidor provocara corrosión localizada.

También se registraron las señales de ruido en corriente, verificándose que su comportamiento refleja lo observado en el ruido en potencial, en las condiciones dadas. Sin inhibidor, la señal en corriente es aleatoria, con alta frecuencia y baja

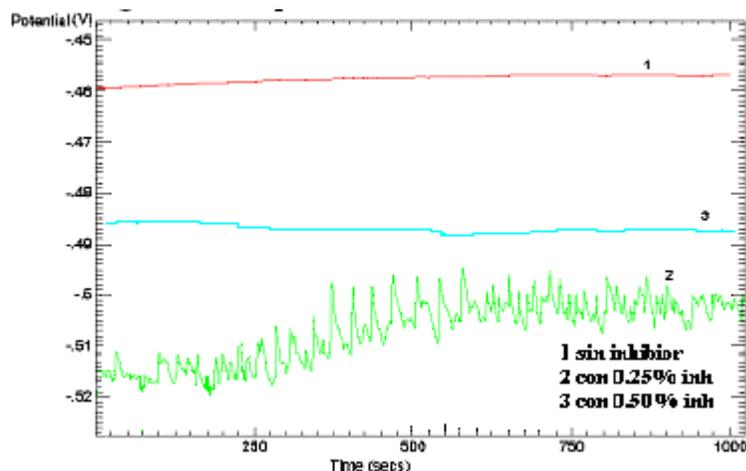


Fig. 3 Ruido en potencial de acero en HCl 15 % a 30 %.

amplitud, en 0,15 mA. Para la concentración de 0,25 % de inhibidor, donde se utilizó un electrodo que presentaba hendiduras, la señal se encontraba alrededor de 0,1 mA, con amplitudes mayores, disminuyendo ésta con el tiempo, lo que manifiesta

una cierta influencia de la presencia del inhibidor. Con 0,5 % de inhibidor, la señal que se obtuvo, con valor cercano a cero, es casi plana, las oscilaciones son aleatorias de muy baja amplitud, lo que evidencia una buena acción inhibitoria.

En la figura 4 se presentan las gráficas de las señales de ruido en potencial de acero en HCl 15 % sin inhibidor y con la adición de éste, a dos concentraciones, a 50 °C.

La señal de potencial para la solución sin inhibidor, se presenta casi sin oscilaciones, igual que para esta misma condición a 30 °C, como se muestra en la Figura anterior, en este caso con valores se encuentran alrededor de -480 mV.

En la solución con 0,25 % de inhibidor, la señal presenta oscilaciones aleatorias de muy baja amplitud en potenciales entre -480 mV y -490 mV.

Cuando se emplearon electrodos con hendiduras, en este caso añadiendo una concentración de inhibidor de 1,0 %, superior a las empleadas antes, las oscilaciones fueron cuasi periódicas, con amplitudes de hasta 60 mV, a potenciales entre -510 mV y -450 mV. Este comportamiento es típico de

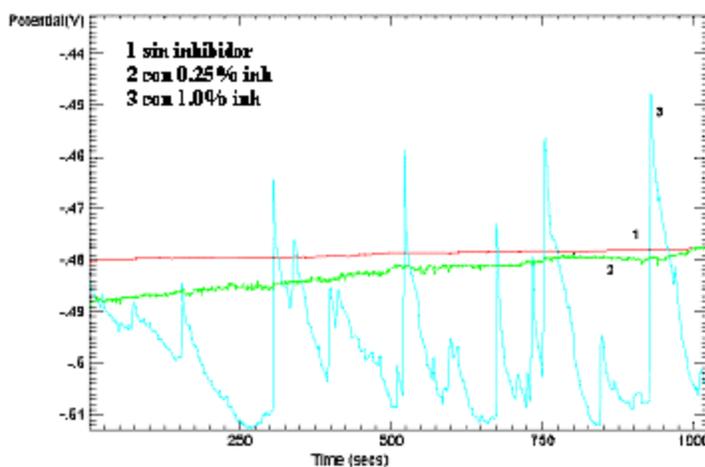


Fig. 4 Ruido en potencial de acero en HCl 15 % a 50 %.

corrosión localizada en resquicios, debido a las mismas razones explicadas anteriormente.

Las señales de ruido en corriente, que también fueron registradas para iguales condiciones de ensayo, demostraron un comportamiento que concuerda con lo observado en el ruido en potencial. En la solución sin inhibidor, la señal en corriente resultó ser aleatoria, con baja amplitud y alta frecuencia, en valores que oscilaban entre 0,88 mA y 1,0 mA. Estos valores son muy superiores a los obtenidos a 30 °C, que fueron de sólo 0,15 mA, poniendo de manifiesto la influencia del aumento de temperatura como factor acelerador de la corrosión.

Para la concentración de 0,25 % de inhibidor, la señal fue de muy poca amplitud, en valores alrededor de cero mA, reflejando la presencia del inhibidor y una buena acción protectora del mismo.

Para la concentración de 1,0 % de inhibidor, que se utilizó el electrodo con hendiduras, la señal estuvo cercana a 0,01 mA, pero con oscilaciones cuasi periódicas del orden de hasta 0,1 mA de amplitud.

Analizando los resultados obtenidos mediante la técnica de ruido electroquímico, se puede decir, que la adición de la composición inhibidora no provoca corrosión localizada al material metálico, pero si éste ya posee grietas o hendiduras, se desfavorece su acción inhibidora.

Ensayos metalográficos

Se muestran micrografías tomadas a probetas de acero, tanto nuevas como después de ensayos gravimétricos en HCl 15 % sin inhibidor y con la adición de la composición inhibidora FA/M/TA-5.

Probetas de acero antes de los ensayos

En la micrografía de la figura 5 pueden observarse numerosas inclusiones no metálicas de

sulfuros en la probeta de acero, características precisamente de sulfuros de manganeso. Estas inclusiones se presentan en forma alargada, coincidiendo con la dirección del laminado.

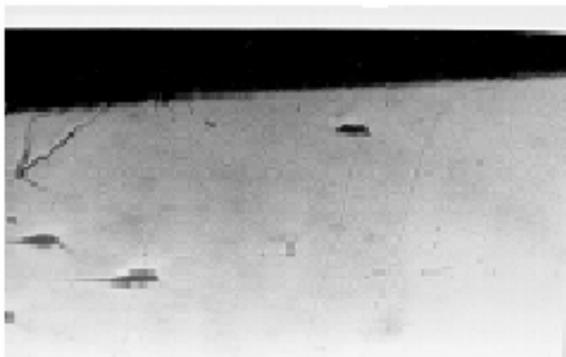


Fig. 5 Micrografía de probeta de acero sin revelar la estructura 100 X.

Probetas de acero después de ensayo gravimétrico en HCl 15 % sin inhibidor

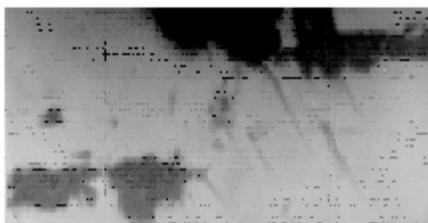


Fig. 6 Micrografía de probeta de acero después de ensayo en HCl 15 % Sin revelar la estructura 100 X.



Fig. 7 Micrografía de probeta de acero después de ensayo en HCl 15 % Estructura revelada 100 X.

En las micrografías de las figuras 6 y 7, se observa fuerte ataque corrosivo generalizado sobre el acero, con cierta incidencia en zonas, donde existían inclusiones no metálicas. Estas inclusiones actúan como centros catódicos que

favorecen la descarga de iones hidrógeno, acelerando la corrosión del acero en medio ácido. Se observan grietas o rajaduras que siguen, con preferencia, la dirección del laminado.

Probeta de acero después de ensayo gravimétrico en HCl 15% con inhibidor

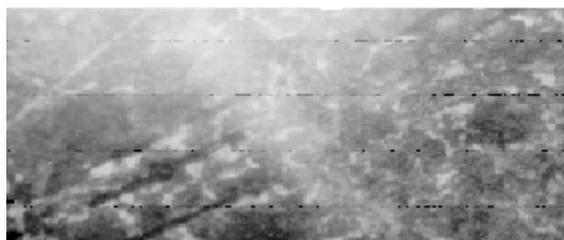


Fig. 8 Micrografía de probeta de acero después de ensayo en HCl 15 % con inhibidor Estructura revelada 200 X.

De la micrografía de la figura 8, obtenida de una probeta sometida a ensayo en solución con inhibidor, se puede observar que el deterioro que sufre el material es significativamente menor que el que se obtiene sin inhibidor, mostrado en la micrografía de la figura 7. El ligero ataque que se produce, continúa ocurriendo preferencialmente sobre las inclusiones no metálicas, sin llegar a ser mayoritariamente localizado, lo cual concuerda con los resultados de los ensayos de ruido electroquímico.

Conclusiones

1. Se obtuvo una familia de formulaciones con tres componentes, entre los que se manifiesta un efecto sinérgico inhibidor de la corrosión del acero en ácido clorhídrico.
2. La composición inhibidora desarrollada mostró un comportamiento típico de los inhibidores de corrosión en medio ácido.
3. El empleo de la composición inhibidora en estudio, no sólo disminuye la corrosión localizada del material metálico, si no que, por sí sola, en superficies sin hendiduras, no provoca ataque localizado significativo sobre el acero en ácido clorhídrico.
4. Los resultados obtenidos mediante diferentes métodos de ensayo se complementan unos a otros, lo que permite obtener una valoración más amplia sobre el comportamiento de la formulación inhibidora.

Lista de símbolos y letras griegas

Mayor que: >

Menor que: <

Igual: =

%: por ciento

A: Ampere

mA: mili ampere

V: Volt

mV: mili volt

°C: grado Celsius

γ : Ganma - coeficiente de protección.

Bibliografía

1. Domínguez, J. A. y otros.: *Introducción a la corrosión y protección de metales*. La Habana, Edit. Ministerio de Educación Superior, Cuba, 1987.
2. Ledovsky, V. M.; Domínguez, J. A.; Monduí, R. *Obtención y estudio de derivados nitrogenados del furfural para la inhibición del acero en medio ácido*. Revista Tecnología Química. Vol. 3. No. 4. Cuba. 1982. págs. 34-41.
3. Bartoli, R. y otros. *Utilización de alquil ceten mercaptales furánicos como inhibidores de la corrosión ácida*. Patente No. 35 847. C 23 F 11/00. 1985.
4. Sandianes, B. y otros. *Evaluación de productos nacionales como posibles inhibidores en medio ácido*. QUIMINDUSTRIA'88. Jornada Internacional de Corrosión – Protección, Cuba, 1988. págs. 146-149.
5. Cortijo, O.; Cabrera, X. *Acción inhibidora de un derivado furánico en HCl a diferentes concentraciones y temperatura de ebullición*. 3er Congreso Iberoamericano de Corrosión y Protección. Vol. II. Brasil. 1989. págs. 1103-1111.
6. Monduí, R.; Villarreal, Z. y Morales, M. *El efecto inhibidor de algunos aldehídos sobre la corrosión del acero en HCl*. QUIMINDUSTRIA'90. 1er Simposio Internacional de Corrosión - Protección y Tropicalización, Cuba, 1990. págs. 333-336.
7. Sandianes, B. y otros. *Inhibidores de corrosión del acero para la estimulación ácida a pozos de petróleo*. MINEMETAL'91. II Simposio Internacional de Minería y Metalurgia, Cuba, 1991. Publicación sin paginar.
8. Sandianes Vega, B. y col. *Composición inhibidora de la corrosión*. Certificado No. 22294. ONIITEM, República de Cuba, 1994.
9. Sandianes, B. y Uruchurtu, J. *Estudio electroquímico de inhibidores de la corrosión ácida en condiciones de estimulación*. Memorias del XVIII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica. ISBN 968-5742-01-4, México, 2003.
10. Antropov, L. I.; Makuchin, E. M.; Panacenko, B. F.: *Inguibitory korrozii metallov*. Edit. Kiev Tejnica. Kiev, 1981.

-
11. Hunt, L. R. and Drucker, R. *Aspects of the Use of Acid Inhibitors in Acid Cleaning and Pickling*. Corrosion week. 41st Manifestation. Eur. Fed. Corros. 1968. págs 190-207.
 12. Juzniewick, R.: *Texnika borby s korroziei*. Izd. Jimia, Leningrad, 1980.
 13. McCafferty, E.; McArdle, J. V. *Corrosion Inhibition of Iron in Acid Solutions by Biological Siderophores*. J. Electroch. Soc. Vol. 142. No. 5. 1995. págs 1447- 1453.
 14. Nathan, C. C. *Corrosion Inhibitors*. NACE. 1973.
 15. Reshetnikov, S. M.: *Inguibitory kislotnoi korrozii metallov*. Izd. Jimia. Leningrad. 1986.
 16. Montejo, R. *Estudio de las propiedades inhibidoras de los mostos alcohólicos en limpiezas ácidas de superficies metálicas*. Revista Cuba Azúcar. Jul.-Sept. 1977, págs. 8-14.
 17. B. Sandianes. *Inhibidor para tecnologías de protección contra el impacto ambiental sobre materiales metálicos*. Informe de Proyecto de Investigación, auspiciado por la Secretaría de Relaciones Exteriores de México. Cuernavaca, Morelos, México, 2002.