

TITULO: Efecto de las Cargas en el Agrietamiento por Corrosión Bajo Tensión.

TITLE: Effect of the Loads in Cracking for Corrosion Under Tension

AUTORES:

Ing. Veronica Avila Ayón

Ing. Francisco Raúl Casanella Leyva

Dr. Ing. Ana Luisa Rodríguez Quesada

PAÍS: Cuba

RESUMEN:

Aborda los aspectos relacionados con la definición de la corrosión bajo tensión como la aceleración del ataque de la corrosión debido a una sollicitación mecánica, tratándose de la sustitución de una agresividad aparente soportante por una agresividad específica pequeña o media. Cuando actúa una sollicitación mecánica sobre un metal que se halle en un medio corrosivo, puede originarse agrietamiento con posterior rotura. La sollicitación mecánica puede ser debida a tensiones externas o bien tratarse de esfuerzos alternados, dándose entonces en fenómeno de fatiga por corrosión. Tanto en el agrietamiento por tensocorrosión como en la fatiga, la corrosión, expresada en material disuelto es muy escasa, mientras que los efectos son espectaculares.

PALABRAS CLAVES:

CORROSION, TENSOCORROSION, FATIGA, ESTRUCTURAS METALICAS.

ABSTRACT:

It approaches the essential elements related with the definition of the corrosion under strength like the acceleration of the attack of the corrosion due to a mechanical action, it is the substitution of an apparent aggressiveness for a small or half specific aggressiveness. When a mechanical sollicitation acts on a metal which is in a corrosive environment, it can originate cracking with ultimate collapse. The mechanical sollicitation can be due to external tensions or to be alternate efforts, being given then in phenomenon of fatigue by corrosion. Both, in cracking for corrosion under strength and in fatigue, the corrosion are very scarce, expressed in dissolved material, while the collapses are fragile.

KEY WORDS:

CORROSION, METAL STRUCTURES, FATIGUE, STRUCTURES

INTRODUCCIÓN:

Las pérdidas ocasionadas por la corrosión se han estimado entre el 3 y 4% del PNB de cada país. Para los países industrializados este porcentaje representa varios cientos de millones de dólares al año. Esta cifra, tan enorme, expresa

solamente las pérdidas anuales directas originadas por la corrosión y no incluye por lo tanto las pérdidas indirectas, como las que ocasionan las interrupciones en la producción, la disminución de la productividad, las pérdidas de materias primas por paralización de la producción, los gastos adicionales por sobre dimensionamiento o sobre diseño, los gastos de mantenimiento, etc. Pero mucho más importante que todas las mencionadas son las invalorable pérdidas de vidas humanas que tienen lugar por roturas o fallas provocadas por la corrosión.

Cuando los fenómenos corrosivos en los elementos estructurales se combinan con las sollicitaciones mecánicas que intervienen en el proceso industrial se puede producir un fallo prematuro en el elemento. Este defecto caracterizado fundamentalmente por la fisuración local de la superficie metálica. El tamaño de la fisura, su velocidad de propagación a partir de las condiciones ambientales y el comprometimiento de la vida útil de la edificación son los aspectos más importantes que debe considerar el especialista para determinar el peligro de fallo inminente.

El objetivo de esta investigación radica en la determinación de los valores críticos de carga para los cuales se produce el agrietamiento por corrosión en los aceros de estructuras metálicas partiendo de los métodos de la mecánica de la fractura para estos casos. El análisis a realizar debe partir de las causas que dieron origen a la fisura, el estado actual y el desenvolvimiento futuro de la misma teniendo en cuenta que la misma se ha producido por la simultaneidad de las acciones mecánicas y el medio corrosivo. Este último aspecto es quizás el más difícil de determinar y de controlar. Se debe tener un conocimiento exhaustivo del fenómeno de corrosión y los factores medioambientales que intervienen en él en el lugar exacto donde aparece la fisura, tanto los atmosféricos como los que se derivan de los procesos industriales: humos, materias primas, combustibles, lubricantes, etc.

Además realizar el rediseño del sistema de protección inicial y replantearlo para las condiciones actuales. Así mismo realizar el análisis estructural de elemento figurado a partir de las recomendaciones que se dan más adelante. El factor de seguridad real empleado en los pasados años en el diseño de Estructuras de Ingeniería Civil sostiene una promesa de una vida considerable, mas allá de aquella para la cual fue proyectada la obra (cuando todos los factores son favorables) o la amenaza de causas prematuras o imprevistas que provoquen el colapso (cuando todos los factores son desfavorables). Esto se debe revisar periódicamente; la estructura debe volver a calcularse para que se ajuste no a las especificaciones de su diseño original, sino a las que reflejan las mayores cargas presentes en la actualidad que puedan actuar de una forma u otra sobre la estructura analizada.

MATERIALES Y METODOS:

Existen varias hipótesis que puntualizan como podría ocurrir el agrietamiento por corrosión:

1. La corrosión bajo tensión tiene lugar escalonadamente. Hay un periodo de inducción, donde las tensiones no tienen una gran participación, seguido de la iniciación de grietas en puntos de la superficie desnuda del metal y su rápida propagación en una dirección perpendicular a la tensión de tracción.
2. El periodo de inducción incluye una etapa de reparación de la película de óxido y puede incluir otra de rotura de la película y corrosión por picadura.
3. Las grietas no se inician en picaduras de corrosión, sino que más bien comienzan en puntos de la superficie desnuda del metal que son especialmente activos anódicamente.
4. Las grietas se propagan a una velocidad de 1.5-3 mm/h. Esta velocidad aumenta algo con la temperatura, pero es casi independiente de la tensión aplicada dentro de un amplio margen.

Los principales métodos de investigación científica que se utilizaran son los siguientes:

- Método de análisis y síntesis: para determinar los factores claves que influyen en el fenómeno, interrelacionar los efectos presentados que constituyen explicaciones al problema.
- Método estadístico: en el muestreo de objetos para determinar las potencialidades perspectivas en el establecimiento de los métodos de análisis y su aplicación según el resultado al problema planteado.

La metodología que se aplica en el mundo y que necesita de las técnicas mas avanzadas de ensayo se denomina Mecánica de la Fractura que presupone la existencia de grietas, superficiales o internas, enfatizando en que condiciones se torna inestable, provocando la rotura frágil. La deformación plástica macroscópica del material es casi nula. El crecimiento de la grieta necesita energía proveniente de la fuerza externa y de las condiciones de fragilidad del material.

Supongamos que contamos con una plancha perfectamente elástica y con un determinado espesor (t), sometido a una fuerza axial que genera tensiones normales

y que en la misma se ha producido una grieta fina continua, con longitud $2l$. La forma de la zona adyacente a la grieta se considera como una elipse convencional con semiejes l y $2l$ y área

$A = 2\pi l^2$ liberándose una determinada cantidad de energía igual a:

$$W = \frac{\sigma^2}{2E} 2\pi l^2 t = \frac{\sigma^2}{E} \pi l^2$$

donde la relación

$$\frac{\sigma^2}{2E} = \frac{\sigma^2 \xi}{2}$$

representa la energía potencial por unidad de volumen en un caso de tracción axial.

En la formación de las zonas elípticas adyacentes a la grieta se ha tenido que invertir una cantidad de trabajo igual a

$$A = 2 * 2l * t * \gamma$$

donde el parámetro μ es la densidad de la energía superficial que depende de la resistencia que posea el material al agrietamiento.

El criterio energético para el crecimiento de la grieta aumentando su longitud en (+dl) se expresa a través de las diferencias entre los diferenciales de trabajo (dA) y energía (dW). Cuando $dW > dA$ la grieta crece, el caso contrario es estable y cuando la diferencia de los diferenciales es cero, la grieta está en un estado crítico de equilibrio inestable.

Para este último caso se puede determinar:

$$\frac{\sigma^2}{E} 2\pi l^2 t dl - 4\gamma t dl = 0 \quad \text{o} \quad \frac{\sigma^2 \pi l^2}{E} - 2\gamma = 0$$

Si tenemos los valores críticos de la tensión para determinado material podemos calcular las longitudes críticas a partir de la cual la grieta se torna inestable, simplificando la expresión y sustituyendo valores conocidos tenemos:

$$l_c = \frac{2\gamma E}{\pi \sigma^2} = \frac{K_{Ic}^2}{\pi \sigma^2} \quad \text{considerando que} \quad K_{Ic} = \sqrt{2\gamma E}$$

Si por el contrario se conoce la longitud de la grieta se podría determinar la tensión crítica como:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l}}$$

de donde se puede concluir que el valor de tensión crítica es inverso a la longitud de la grieta. Cuanto menor es la longitud de las grietas originales, mayores tensiones puede soportar el material sin crecer la grieta.

RESULTADOS DEL TRABAJO:

La definición habitual de la corrosión bajo tensión es la aceleración del ataque de la corrosión debido a una sollicitación mecánica, se trata pues de la sustitución de una agresividad aparente soportante por una agresividad

específica pequeña o media. Se produce cuando actúa una sollicitación mecánica sobre un metal o aleación que se halle en un medio corrosivo, originándose agrietamiento con posterior rotura. En el caso de fatiga por corrosión, los ciclos de fatiga que resiste el material en un medio corrosivo es mucho menor que el material en un medio inocuo.

En los fenómenos de tensocorrosión, la velocidad del fallo está determinado por la simultaneidad de un medio corrosivo típico y las acciones mecánicas llegando a producir fallos prematuros y espectaculares. De estar estos fenómenos independientes, el proceso de corrosión expresado en cantidad de metal disuelto es muy escaso.

Es importante distinguir la rotura sencilla por sollicitación excesiva y la rotura de una pieza por corrosión bajo tensión; este hecho constituye el caso de la simple aceleración de fallo bajo un esfuerzo inherente al propio metal. La verdadera corrosión bajo tensión se debe a las tensiones internas del metal, inherentes a la cristalización defectuosa del mismo, tal metal no ha recibido el tratamiento térmico de relajación. Este caso particular caracteriza, por ejemplo, ciertas aleaciones de Aluminio o de acero inoxidable "sensibilizadas". El esfuerzo mecánico facilita la penetración de la corrosión.

Las tensiones residuales son un factor importante en el desarrollo de las roturas catastróficas, rotura frágil y corrosión bajo tensión. Lógicamente, el mecanismo específico que hace que las especies químicas provoquen la rotura del metal tensionado varía en cada caso, pero siempre en presencia de tensiones de tracción. Esto permite obtener conclusiones generales sobre el fenómeno de la corrosión bajo tensión y sobre las tensiones residuales que se puedan concentrar.

Las edificaciones industriales, presentan generalmente como sistema constructivo típico el de las Naves Industriales, construidas principalmente con elementos de acero estructural. En estas instalaciones se conjugan altos valores de sollicitaciones mecánicas producidas por equipos y tecnologías utilizadas en los procesos de producción industrial y un medio altamente corrosivo debido a la presencia de vapores, humos y gases contaminantes, residuos de los mismos procesos industriales. Estas condiciones tan desfavorables se agravan por la aplicación de estrategias de conservación y mantenimiento que dan prioridad a las maquinarias y obvian la edificación civil.

En los estudios realizados se ha encontrado desde la ausencia de métodos y materiales de conservación hasta la sustitución de parte de la estructura para colocar maquinarias, transportadores, puntos de almacenamiento, etc., con la consecuente sobrecarga de la parte restante de los elementos estructurales. Pero veamos como ocurre este fenómeno en el interior de los metales para poder comprender como se manifiesta el fallo.

La corrosión bajo tensión puede presentarse de manera intergranular (la propagación de la grieta sigue los bordes del grano) o transgranular (la propagación de la grieta ocurre a través del grano). Para conocer los mecanismos de propagación de la grieta se debe partir del estudio de la

orientación de los cristales metálicos que da lugar a las figuras de corrosión. Este principio es válido para los metales que tienen una sola fase de cristalización, pero en ocasiones pueden coexistir dos o más fases. Además, también depende de la configuración de los cristales metálicos, del sistema cristalino obtenido del proceso de fabricación, de la pureza química de los metales o aleaciones que provoquen la heterogeneidad de la fase metálica, de los contenidos de carbono que determinan la flexibilidad de la capa pasiva que surge en la superficie del metal y que debe absorber la deformación que se produce. Esta deformación puede romper la película pasiva, que aunque sea muy delgada e invisible, siempre se encuentra en la superficie del metal.

Cuando se rompe esta película, la zona expuesta se comporta anódica frente al resto del metal produciendo una corrosión electroquímica por contacto. La capa pasiva se forma de la oxidación inicial del metal base al entrar en contacto con el medio, y por ser una capa de óxido, las propiedades mecánicas y físicas de ella se aproximan a las del metal en su estado inicial diferenciándose en el potencial electroquímico del metal base. Es esta la causa de que en la zona expuesta una se comporte como ánodo y la otra como cátodo aumentando la velocidad de la corrosión. Si sumamos a esto que la presencia de otras heterogeneidades en la fase metálica, en el medio y en las condiciones físicas, que pueden ser en este caso:

- Tensiones o deformaciones producto a esfuerzos exteriores
- Regiones del metal conformado en frío
- Uniones bimetálicas
- Partículas contaminantes en la superficie incluyendo cristales metálicos de distintas orientaciones.
- Anisotropía de los granos cristalinos o bordes del grano.
- Discontinuidad en la capa que recubre el metal y que impiden el efecto barrera de las protecciones.
- Diferencia de temperatura, concentración de oxígeno, sales, composición y PH del medio.
- Los metales y aleaciones no son químicamente puros.

Cuando un metal o aleación se halla sometido a una sollicitación mecánica en un medio agresivo determinado, la respuesta corrosiva puede ser muy diferente que en el caso de no existir tensiones mecánicas. Los metales y aleaciones en los que se da el agrietamiento por corrosión bajo una tensión se muestran pasivos en ausencia de estas en cualquier medio químico. Al aplicar un esfuerzo ocurre una deformación que puede ser de un modo uniforme o siguiendo zonas singulares produciéndose un deslizamiento.

Cuando el potencial aumenta por encima del potencial de corrosión la diferencia entre velocidad de disolución del metal desnudo y la del metal con película pasiva se reduce; como resultado de ello, la corrosión a lo largo de las líneas de deslizamiento no se diferencia del ataque generalizado del metal no tensionado y no se da la corrosión bajo tensión. Disminuyendo el potencial por debajo del potencial de corrosión la diferencia entre la velocidad de disolución

del metal desnudo y el pasivado aumenta, pero la velocidad de propagación de la grieta disminuye.

En el proceso de corrosión bajo tensión se pueden distinguir dos etapas: **Nucleación y Propagación**

Para que ocurra la corrosión bajo tensión ha de existir en el material metálico una susceptibilidad a la corrosión selectiva a lo largo de caminos más o menos continuos, como por ejemplo, en los bordes del grano. Esta susceptibilidad está presente cuando la estructura microscópica es heterogénea y la fase que forma los caminos es anódica en el medio corrosivo. Debe existir una tensión suficiente y que esta actúe en una dirección tendente a separar el metal. Esto producirá una concentración de tensión en el fondo de la muesca así formada. Si la tensión aumenta se desarrollarán las grietas, destruyendo cualquier película protectora y exponiendo nuevo material anódico al medio corrosivo.

La corrosión intergranular de los aceros de bajo carbono es debida a la presencia de partículas de carbura al borde del grano, deformaciones plásticas o a la aplicación de tensiones en el metal durante la concentración de estas tensiones.

Los parámetros que intervienen en el proceso de crecimiento de la grieta son: el factor intensidad de tensión (K) y las dimensiones iniciales de la grieta.

$$K = \sigma \sqrt{\alpha \pi \cdot l}$$

donde el factor intensidad se obtiene del producto de la tensión y

$$\sqrt{\alpha \pi \cdot l}$$

que se considera como el tamaño de la grieta.

La rotura se produce cuando el factor intensidad alcanza un valor K_{ic} que se determina experimentalmente y es típico para cada material en determinado medio ensayado tomándose como **Resistencia a la Rotura**. Como se puede apreciar debe tenerse en cuenta que la solución de la elasticidad lineal, en el caso de grietas muy grandes, da un valor infinito. Esto presenta una solución en zonas donde ocurra una deformación plástica pequeña en comparación con la concentración de tensiones en la grieta.

Este coeficiente de intensidad crítico K_{ic} se obtiene de la expresión

$$K_{ic} = \sqrt{2 \gamma E}$$

Partiendo de la Mecánica de la Fractura existen 2 formas para realizar el análisis de una estructura:

1. Determinar el tiempo de incubación de la grieta y, por integración, la velocidad de propagación y el tiempo que dura esta.
2. Determinar experimentalmente K_{iscc}

Como se puede apreciar en el gráfico este fenómeno presenta tres etapas bien definidas. Una primera de incubación de la grieta. Posteriormente esta se propaga aumentando su profundidad. Luego se produce la rotura cuando ($K=K_{Ic}$). De ahí que podamos graficar la velocidad de ocurrencia de este fenómeno:



Figura1: Comportamiento de la velocidad de propagación de las grietas.

Existe un valor inicial K_{ISCC} para el cual la velocidad de propagación de la grieta es nula. Cuando los aceros son de alta resistencia este valor es bastante exacto no así en aceros efervescentes o con defectos de fabricación.

CONCLUSIONES:

En resumen, es muy importante analizar con sumo cuidado la aparición de cualquier grieta que aparezca en un elemento estructural sometido a tensiones mecánicas en un medio corrosivo agresivo, como es el que existe generalmente en las instalaciones industriales donde existen solicitaciones mecánicas producto del proceso industrial como por ejemplo, esteras, transportadores, motores, centrifugas, grúas, etc. Así como la presencia de humos y gases tóxicos y contaminantes, materias primas, conservantes, lubricantes, combustibles, etc que contiene entre otras, soluciones alcalinas, nitratos, amoniaco anhídrido, soluciones de cloruro férrico, mezclas de cloruro de magnesio, fluoruro sódico, ácido sulfhídrico, vapor de agua con cloruros, cloruros orgánicos húmedos, etc.

Los fenómenos de la corrosión bajo tensión se aceleran mucho debido a la concentración de las tensiones en cada uno de estos medios siendo un factor de suma importancia los defectos de fabricación que puedan existir en las piezas metálicas. El análisis estructural de cada elemento que presente grietas debe concretarse a las condiciones reales de utilización, con el análisis

exhaustivo de las cargas, las solicitaciones y las pérdidas de área útil por efecto de la corrosión superficial.

Cuando el tamaño de las grietas sea considerable, las soluciones deben dirigirse a eliminar o atenuar las tensiones pues el fallo puede producirse bruscamente. Otra solución debe analizarse con cuidado, pues es muy difícil recuperar la resistencia del elemento estructural cuando el factor de intensidad de la tensión (K) ha aumentado, por efecto de la tensión, hasta un punto cercano al límite de rotura. Pero lo más importante es realizar el análisis específico de cada elemento estructural en su situación propia, utilizando la mayor información que exista sobre el tema.

BIBLIOGRAFÍA:

1. La Corrosión en la Industria azucarera. La Habana: Editorial GEPLACEA, 1985. 302p. [Serie mantenimiento industrial].
2. La Corrosión y los procedimientos anticorrosivos. Madrid, España: Ediciones Interciencias Castanilla de los Angeles, 1889. 245p.
3. Maurin J, A. Manual de anticorrosión. España: Editorial Urmo, 1966. 646 p.
4. McCormac, J. Diseño de estructuras de acero, método LRFD. España: Alfaomega, 1999. 557p.
5. Mujhanov, K. K. Desing of metal structures. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1983. 463p.
6. Oller, S. Fractura mecánica, un enfoque global. Barcelona, España: Ediciones UPC, 2000. 307p.
7. Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión. [José A. González y et al.] Madrid: España. 1984. 684p.
8. Uhlig, H. H. Corrosion and corrosion control. La Habana: Edición Revolucionaria, 1962. 367p.

DATOS DE LOS AUTORES:

Nombre:

Ing. Veronica Avila Ayón
Ing. Francisco Raúl Casanella Leyva
Dr. Ing. Ana Luisa Rodríguez Quesada

Correo: veronica@facing.uho.edu.cu.

Centro de trabajo:

Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya”.
Gaveta Postal 57 CP 80100, Ave. XX Aniversario, Piedra Blanca, Holguín
Telef. 481302-481324