

Fragilización por hidrógeno y Brush Plating

Hydrogen embrittlement and Brush Plating

O. Sepúlveda y Alberto Monsalve

Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile.

alberto.monsalve@usach.cl

Resumen

Se hace una revisión de los mecanismos de daño por hidrógeno, incluyendo el ampollado por hidrógeno, la precipitación interna de hidruros, el agrietamiento por precipitación de hidruros, el ataque por hidrógeno y la fragilización por hidrógeno. Se analizan los tipos de fractura en función de los puntos de residencia del hidrógeno y la interacción del hidrógeno con los aceros, estudiándose las etapas de disolución, difusión y transporte de hidrógeno. Se describe el proceso de "Brush Plating" que se aplica a una superficie con el fin de reparar los daños en los recubrimientos anticorrosivos. Finalmente, se describe el procedimiento para evaluar el daño por hidrógeno en aceros, a través del método de la carga incremental detallado en la norma ASTM F1624-12, analizándose el caso de un acero SAE 4340 sometido a brush-plating en comparación con el mismo acero sometido a carga de hidrógeno. El resultado muestra la validez de la norma aludida en la determinación del daño por hidrógeno en aceros.

Palabras Clave: Daño por hidrógeno; Brush-plating; Método de carga incremental.

Abstract

A review is made of the mechanisms of hydrogen damage, including hydrogen blistering, internal hydride precipitation, hydride precipitation cracking, hydrogen attack, and hydrogen embrittlement. The types of fracture are analyzed as a function of the hydrogen residence points and the interaction of hydrogen with steels, studying the stages of hydrogen dissolution, diffusion and transport. "Brush Plating" process that is applied to a surface in order to repair damage to anticorrosive coatings, is described. Finally, the procedure for evaluating hydrogen damage in steels is analyzed, through the incremental loading method detailed in the ASTM F1624-12 standard, studying the case of a SAE 4340 steel subjected to brush-plating in comparison with the steel subjected to hydrogen loading. The result shows the validity of the referenced standard in the determination of hydrogen damage in steels.

Keywords: Hydrogen damage; Brush-plating; Incremental step loading.

Introducción

Uno de las causas de falla en aceros y otras aleaciones lo constituye el daño por hidrógeno. Consiste en la introducción de hidrógeno en un metal o aleación que se produce cuando se dan ciertas condiciones de presencia de hidrógeno, tensiones tractivas y de un material susceptible a absorber hidrógeno. Ejemplos de esto es la entrada de hidrógeno en aceros usados como envases que contienen este gas comprimido, las tuberías que transportan agua o hidrocarburos, las industrias que manejan ácidos, como las empresas que se dedican a los recubrimientos. En todos estos casos, el daño por hidrógeno está siempre acechando a los metales y aleaciones, produciendo una pérdida en la ductilidad de la aleación y un deterioro de las propiedades mecánicas, especialmente en la respuesta a fractura, conocida como fragilización por hidrógeno.

Siguiendo la clasificación propuesta en los ASM Handbook (ASM Handbook Vol. 11, 2002), se distinguen cinco tipos de daño que serán introducidos brevemente a continuación:

Ampollado por hidrógeno o (blistering) que se produce por la recombinación del hidrógeno atómico disuelto en el metal para formar H₂ molecular. En puntos cercanos a la superficie, la presión del gas provoca el inflado de la piel del material.

Precipitación interna de hidruros. Cuando las condiciones no permiten que el material se ampolle, el hidrógeno provoca el desarrollo de zonas frágiles en el entorno de los puntos en los que se concentra. Las zonas fragilizadas presentan una forma circular, conocida como "copo de hidrógeno", con el punto de concentración de gas en su centro.

Agrietamiento por precipitación de hidruros. En este caso, el hidrógeno facilita la aparición de fases

frágiles en una matriz dúctil, lo que da lugar a pequeños crecimientos de grieta para cargas mucho menores a las de diseño. Se debe tener presente que un hidruro, la combinación química de un metal con el hidrógeno, es un material muy frágil con un muy bajo valor de tenacidad a la fractura (KIC).

Ataque por hidrógeno. En este caso el hidrógeno reacciona con algunos de los componentes de las aleaciones y los productos de esta reacción. Un ejemplo de esto es la reacción entre hidrógeno y carburo de hierro. $Fe_3C + 4H \rightarrow 3Fe + CH_4$. En este caso se produce metano, el cual a su vez puede producir ampollamiento (Schweitzer, 2007).

Fragilización por hidrógeno. Se trata de un proceso en el que los átomos de hidrógeno disueltos en el metal interaccionan con su microestructura reduciendo su tenacidad. Aunque se trate de un proceso fenomenológicamente sencillo, la correcta descripción de los mecanismos metalúrgicos que dan lugar a la pérdida de tenacidad genera controversia (aún no del todo resuelta) en la comunidad científica (Pressourye, 1980).

Esto se debe en parte a que la tipología de fractura puede variar en función del elemento microestructural con el que interaccione el hidrógeno. Por ejemplo, cuando el hidrógeno se concentra en bordes de grano, se considera que reduce la energía de los enlaces atómicos y facilita la aparición de fracturas intergranulares. La segregación del hidrógeno a precipitados incoherentes con la matriz, sin embargo, puede dar lugar a los tres tipos de rotura: dúctil, intergranular o de tipo clivaje.

Dado que el hidrógeno puede interactuar con una variedad de componentes y características microestructurales, se genera cierta confusión a la hora de identificar cada interacción. En la Tabla N° 1 se resumen las diversas tipologías microestructurales y su interacción con el hidrógeno (Álvarez Laso, 1998).

Localización del Hidrógeno	Clivaje	Intergranular	Dúctil
Intersticial			
Bordes de grano			
Precipitados incoherentes			
Dislocaciones			
Poros y Rechupes			
Precipitados coherentes			

Tabla N° 1. Tipologías de rotura mediando la fragilización por hidrógeno, en función de los puntos de residencia del hidrógeno adaptado de (Álvarez Laso, 1998).

Como ya se mencionó, es necesario que se den tres condiciones para que exista fragilización por hidrógeno: tensiones tractivas, un material susceptible y presencia de hidrógeno.

Tensiones tractivas: Se debe tener en cuenta que la FPH se puede producir tanto en presencia de tensiones externas como de tensiones internas, residuales, los efectos de entalla y las deformaciones plásticas locales, que juegan un rol fundamental en el proceso de fisuración (Figueroa Gordon, 2005).

Materiales susceptibles: El fenómeno de fragilización por hidrógeno aparece en materiales metálicos de alta resistencia como aceros, aleaciones de aluminio y de titanio. La susceptibilidad de los aceros a este fenómeno normalmente aumenta al hacerlo la resistencia mecánica del material (Otero-Huerta, 2001). La fragilización por hidrógeno ocurre en aceros al carbono, en aleaciones Fe-Cr martensíticas y ferríticas y también en otros metales como vanadio, molibdeno y tantalio (Uribe *et al.*, 2011). La composición química, la microestructura y la presencia de inclusiones son elementos clave en la resistencia a la fisuración inducida por el hidrógeno. La microestructura, por ejemplo, interviene tanto en los procesos de transporte de hidrógeno desde el ambiente a la zona de fisuración: adsorción, absorción, transporte (difusión) y acumulación, como en los propios mecanismos de fragilización (Figueroa Gordon, 2005).

Las microestructuras más duras y con formas aciculares son las más susceptibles a sufrir daño por hidrógeno. De un modo general se acepta la siguiente relación con respecto a su susceptibilidad al daño por hidrógeno. De mayor a menor se tienen las siguientes microestructuras: Martensita > Bainita > Perlita laminar > Martensita revenida a alta temperatura > Ferrita+perlita laminar > Ferrita+cementita globular (Uribe *et al.*, 2011).

La martensita sin revenir es muy sensible a la acción del H, las estructuras de templado y revenido son menos sensibles (nula para altas temperaturas de revenido) y las estructuras laminares son más sensibles que las globulares. También, las estructuras consistentes en perlita globular o bainita superior son menos afectadas a la acción del H que las estructuras martensíticas o bainita inferior (Ovejero-García, 2016).

Medio agresivo: Como ya se ha mencionado, el hidrógeno puede ser aportado por varios tipos de

medios, desde una atmósfera rica en H₂, hasta un ambiente industrial en que se manipulen ácidos y algunos procesos electrolíticos pasando por los ambientes altos en humedad (ASM Handbook Vol. 13 A, 2003).

Efectos sobre las propiedades del material

La fragilización por hidrógeno produce una disminución de la ductilidad y de la resistencia tensil máxima del material (Fontana, 1987; Robergé, 2000). También disminuye la tenacidad a la fractura del material y aumenta considerablemente la velocidad de crecimiento de grietas por fatiga (Zafra, 2016). La fisuración propia de FPH tiene generalmente un aspecto frágil a escala macroscópica, cuando sin embargo a escala microscópica puede estar asociada a diferentes mecanismos de rotura, tanto frágiles, intergranulares o transgranulares por cuasi-clivaje, como dúctiles, coalescencia de microhuecos o desgarramiento plástico (Oriani, 1978).

Interacción del hidrógeno con el acero

Los principales factores que contribuyen a elevar o disminuir la solubilidad y/o difusividad de hidrógeno en los aceros son la temperatura, la composición química, la estructura cristalina y subestructura, el tiempo, el estado de tensión, la presencia de gases y líquidos, el medio ambiente, la concentración del hidrógeno en el acero, la presión, las condiciones superficiales, las propiedades físicas y mecánicas del material, entre otras (Interrante & Raymond, 1995).

Ahora bien, ¿cómo es que se produce la entrada de hidrógeno en el acero? En general se está de acuerdo en que se produce un mecanismo de disolución del hidrógeno en el metal y de su difusión dentro de éste. A continuación, se analizarán ambas etapas.

Disolución: La Figura N° 1 ilustra el mecanismo de entrada de hidrógeno cuando se produce el proceso de electrólisis en el acero que se da a través de las siguientes etapas:

- El hidrógeno protónico (H⁺) migra hacia la superficie del acero debido a la polaridad del cátodo.
- Es absorbido en la superficie del metal donde

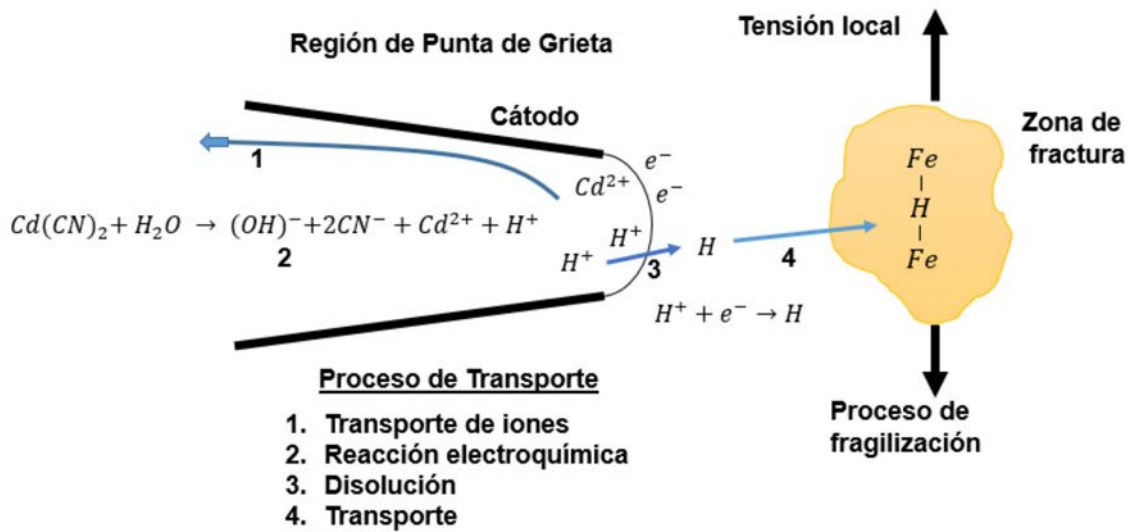


Figura N° 1. Entrada de hidrógeno en acero (Sepúlveda, 2019).

una elevada diferencia de concentración entre esta superficie libre y el interior del material, garantiza las condiciones para que ocurra la difusión en estado sólido.

- Finalmente es absorbido por el acero.

Difusión: La fuerza motriz que permite el movimiento del hidrógeno es proporcionada por gradientes térmicos y por gradientes de potencial químico del hidrógeno en el interior del acero, causando la movilidad del hidrógeno de la siguiente manera:

- Difusión intersticial que es la difusión del hidrógeno a través de los intersticios de la red cristalina; en general sigue las leyes de Arrhenius y de Fick.
- Transporte de hidrógeno por las dislocaciones en atmósferas de Cottrell, cuando ocurre deformación plástica. En este caso, el hidrógeno es arrastrado por la línea de la dislocación en su movimiento.
- Cortocircuito de difusión, que ocurre en la red donde la difusión es más rápida. Es el caso de los límites de grano y a lo largo de los núcleos de dislocaciones.

Es importante tener presente que el tamaño del átomo de hidrógeno es de sólo 0,092 nm, el más pequeño de los átomos. Esta es la razón por la cual su difusividad es tan grande. Para justificar esta aseveración, es útil analizar la tabla 2, donde se muestra el tamaño de los intersticios octaédricos y tetraédricos en las celdas BCC y FCC del hierro. Dado que el tamaño del átomo de hidrógeno es comparable con el tamaño de los intersticios, se concluye que el hidrógeno efectivamente puede difundir en la red de hierro. Además, la solubilidad es mayor en hierro FCC debido al mayor tamaño de los intersticios octaédricos.

Por otro lado, el menor factor de empaquetamiento atómico de la estructura BCC en relación a la FCC justifica los mayores valores del coeficiente de difusión del hidrógeno en aquella estructura cristalina.

Transporte de Hidrógeno: El movimiento del hidrógeno en el acero se produce debido a dos mecanismos que compiten entre sí: difusión intersticial y movimiento de dislocaciones.

	Diámetro atómico (nm)	FEA	Diámetro intersticios octaédricos (nm)	Diámetro intersticios tetraédricos (nm)
Fe α (BCC)	0,248	0,68	0,038 (6/celda unidad)	0,072 (12/celda unidad)
Fe γ (FCC)	0,252	0,74	0,104 (4/celda unidad)	0,057 (8/celda unidad)

Tabla N° 2. Diámetro atómico y de los intersticios en el hierro BCC y FCC (FEA: factor de empaquetamiento atómico) (Askeland *et al.*, 2010; Smith y Hashemi, 2006; Callister y Rethwisch, 2018).

En la difusión intersticial, la fuerza impulsora para la difusión del hidrógeno es un gradiente en el potencial químico generado por una diferencia en la concentración de hidrógeno en la red o por un gradiente en la componente hidrostática del campo elástico de tensiones.

En cuanto al movimiento de dislocaciones, cuando hay deformación plástica, los átomos de hidrógeno pueden ser arrastrados por las dislocaciones en su movimiento. Una vez absorbidos, los átomos de hidrógeno se unen a las dislocaciones formando las denominadas atmósferas de Cottrell y se mueven con ellas. De este modo son arrastrados por las dislocaciones hacia lugares potenciales de inicio de grieta, como las inclusiones o los bordes de grano (Sepúlveda, 2019).

Atrapamiento de hidrógeno: Los átomos de hidrógeno también pueden difundir y encontrarse apisonados en trampas de la microestructura lo cual disminuye su tasa de transporte. Las trampas son zonas que tienen mayor afinidad con el hidrógeno que los sitios intersticiales, es decir, lugares de la red en los que la probabilidad de escape del hidrógeno es menor que para un sitio normal, tales como las interfases entre matriz, las inclusiones, los límites de granos y los defectos cristalinos, entre otros sitios donde la energía de interacción con el hidrógeno es mayor que la encontrada entre el hidrógeno y los espacios cristalinos de la red. La presencia de trampas en el acero aumenta la solubilidad del hidrógeno ya que se generan sitios adicionales donde éste puede alojarse. En el caso de los aceros, prácticamente cualquier defecto o imperfección en la microestructura puede considerarse una posible trampa (Fontana, 1987).

Recubrimiento selectivo (Brush Plating)

Es una técnica de electrodeposición en donde se envuelve una almohadilla (usualmente de algodón) absorbente alrededor de un ánodo, para luego ser empapado con un electrolito rico en iones metálicos de interés y se frota sobre la superficie que se desea recubrir, la cual actúa como cátodo en el proceso (Schweitzer, 2007).

Es un proceso de alta velocidad que requiere de una fuente de poder, con la cual se puede controlar el proceso mediante la variación de la corriente y voltaje generado.

La herramienta usada es un electrodo inerte cubierto con un material absorbente adecuado a la solución con la que se desee trabajar. El electrodo puede ser el ánodo o el cátodo dependiendo del tratamiento, ya que se usa una polaridad catódica en la limpieza de la pieza y anódica en la deposición (Pressourye, 1980).

El tiempo requerido depende del grosor deseado, superficie y la eficiencia de la solución, además la rectificación necesaria posterior es mucho menor en comparación con el depósito convencional. Además, para llevar a cabo el tratamiento se requiere de:

- **Electrolitos especiales:** contienen un mayor contenido de metal que los usados convencionalmente con el fin de lograr altas tasas de deposición. Además, al frotar la almohadilla sobre la superficie de contacto, se agita y genera la reposición de la solución en la interfaz metal-líquido.
- **Ánodos y almohadilla:** Los ánodos deben ser insolubles, para ello se utiliza grafito que resulta fácil de mecanizar, así como metales como titanio platinado, tántalo y aleaciones de platino. Por otro lado, el acero inoxidable es insatisfactorio ya que es propenso a ataques en ciertos ambientes (Ej. Cloruro).
- **Fuente de poder:** se requiere un equipo que suministre un mínimo de 30 V que es necesario para el proceso, además, debe tener corriente inversa ya que se invierte la polaridad del electrodo dependiendo de la etapa. En cuanto a precauciones de seguridad es necesario un seguro en caso de algún corto circuito.

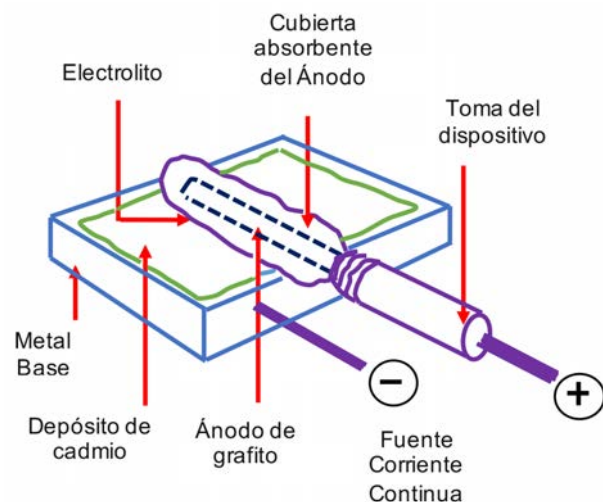


Figura N° 2. Esquema de un recubrimiento a un área selectiva (Pressourye, 1980).

El proceso de Brush Plating posee una serie de factores que lo hacen atractivo, como que se puede realizar in situ, no está limitado por el tamaño de la pieza y puede ser aplicado sobre áreas selectivas trayendo consigo un ahorro a considerar.

Además, permite depositar variados elementos, como Cd, Cr, Cu, Cu-Ni, Ni, Ni-Co, o combinaciones más complejas Ni-Fe-W-P-S, dependiendo de los requerimientos. Por ejemplo, este último caso se usa con el fin de obtener una alta dureza, alcanzando 910 Vickers (Álvarez Laso, 1998).

Este procedimiento requiere de una buena preparación y limpieza adecuada pudiendo generar una adhesión tanto o mejor que una electrodeposición convencional, además, como el electrolito es desechado tras su uso, evita que se acumulen contaminantes, que perjudiquen el proceso. Todos estos factores permiten que el Brush Plating tenga buenos resultados a la hora de reparar partes dañadas y corregir componentes electrodepositados defectuosos.

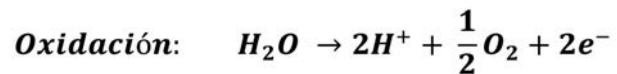
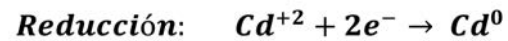
Por otro lado, cuenta con aspectos negativos, como la necesidad de una preparación exhaustiva, un operador con mucha experiencia para obtener buenos resultados y soluciones electrolíticas costosas, ya que se van desechando constantemente.

Cadmium Plating

Dentro de los metales a depositar, se encuentra el cadmio. Es un metal que se caracteriza por ser altamente tóxico para los seres humanos, tanto como el mercurio. Se usa para la fabricación de pilas y baterías, algunas soldaduras, fotografía, fuegos artificiales, en algunas plantas nucleares como estabilizante y como recubrimiento.

En aeronaves se usa ampliamente contra la corrosión de los componentes del fuselaje y sujetadores fabricados con acero. Se corroe a una baja tasa en ambientes clorurados generando protección a largo plazo, además, actúa como revestimiento de sacrificio ya que tiene un potencial más negativo que el acero.

El proceso de Cadmium Plating se lleva a cabo en un ambiente básico, mediante la adición de cianuro, y otros agentes acomplejantes, y se generan principalmente las siguientes reacciones:



Este tratamiento puede generar altas concentraciones de hidrógeno disuelto, que en contacto con el acero puede difundir hacia el interior, acumulándose en sitios de alta tensión, pudiendo causar fragilización por hidrógeno (Figuroa Gordon, 2005).

Como ya se ha expuesto, uno de los problemas a resolver cuando se aplica Brush Plating es el de la fragilización por hidrógeno. La pregunta a hacer. ¿produce el proceso de Brush Plating fragilización por la introducción de hidrógeno al acero que se recubre mediante este procedimiento?

La respuesta a esta pregunta se lleva a cabo a través de pruebas mecánicas. Estas pruebas mecánicas están descritas en la norma ASTM F1624-12 (ASTM F1624-12, 2012). En esta norma se describen los denominados ensayos de carga incremental (ISL: Incremental Step Loading).

El procedimiento de ensayo consiste en aplicar a las probetas un programa de carga incremental (ISL), registrando en todo momento la carga y el desplazamiento. La secuencia de carga viene determinada por la terna (#, %P, h), donde “#” identifica el número total de incrementos de carga de la secuencia, “%P” es el incremento de carga aplicado y “h” el tiempo de espera entre cada incremento. El programa responde a la siguiente secuencia:

- En primer lugar, se debe obtener el valor de carga máximo inicial del programa de ensayos empleando una probeta libre de fragilización. Este valor de carga se denomina Pmax.
- A continuación, se comienza ensayando la primera probeta afectada por hidrógeno.
- Se aplica un incremento de carga a la probeta de valor, “%P”, donde

$$\%P = \frac{P_{\max}}{\#}$$

- Se mantiene el desplazamiento fijo durante un tiempo “h”.
- Si se detecta crecimiento subcrítico de grieta (Figura N° 3, Type A), es decir, si la fuerza medida

por la celda de carga cae mientras se mantiene la probeta con una consigna de desplazamiento constante durante un tiempo h , el ensayo se da por terminado. Existen dos posibles escenarios:

- * Si la carga de fin de ensayo difiere menos de un 5% de la carga máxima de la probeta anterior, se utiliza el valor obtenido para calcular el factor de intensidad de tensiones umbral de fragilización.
- * Si la carga de fin de ensayo difiere más de un 5% de la carga máxima de la probeta anterior, se toma una nueva probeta y se repite el programa de ensayo, utilizando esta vez como carga máxima del programa el valor correspondiente a 1.1 veces la carga máxima de la probeta inmediatamente anterior (Figura N° 4).

- Si no se detecta crecimiento subcrítico de grieta, se aplica un nuevo incremento de carga.

Es evidente que el resultado de los ensayos depende del programa de carga, de modo que la norma F1624-12 establece tres patrones diferentes ($\#$, $\%P$, h) para distintos rangos de dureza de material base:

- Dureza en HRC: [33,45] - Programa = (10/5/2,4): 10 escalones de carga de 2 horas de duración seguidos de 10 escalones de carga de 4 horas de duración, todos ellos de amplitud igual al 5% de la carga máxima objetivo. Tiempo máximo de ensayo: 60 horas.
- Dureza en HRC: [46,54] - Programa = (10/5/1,2): 10 escalones de carga de 1 hora de duración seguidos de 10 escalones de carga de 2 horas de

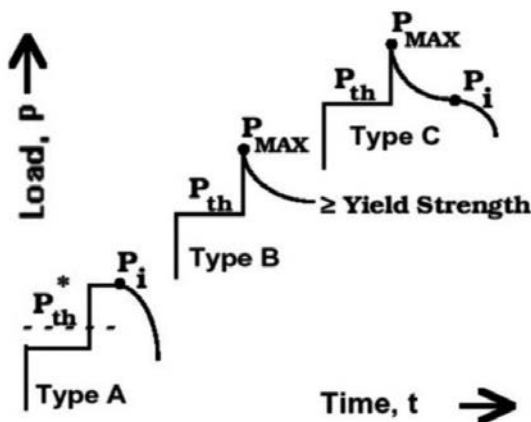


Figura N° 3. Identificación del crecimiento subcrítico de grieta (Type A) (ASTM F1624-12, 2012).

duración, todos ellos de amplitud igual al 5% de la carga máxima objetivo. Tiempo máximo de ensayo: 30 horas.

- Dureza en HRC: ≥ 54 - Programa = (20/5/1): 20 escalones de amplitud igual al 5% de la carga máxima objetivo, todos ellos de una hora de duración. Tiempo máximo de ensayo: 20 horas.

Preparación de las probetas

Con el fin de evaluar el efecto de aplicar Brush Plating sobre muestras de acero de alta resistencia, se utiliza el ya mencionado método ISL (Incremental Step Loading) el cual requiere al menos de 9 probetas; 3 para obtener la carga máxima, 3 para ISL y 3 para cadmiar y posterior ISL. Las probetas que se usaron están basadas en la norma ASTM F519 (Figura N° 5), la cual se complementa con la norma ASTM F1624-12.

Algunos resultados

El tratamiento térmico aplicado sobre el acero SAE 4340 es el siguiente:

- ✓ Las probetas se llevaron al horno, a una temperatura de 840°C por un tiempo de 60 minutos para lograr la austenización completa.
- ✓ Luego se realizó el temple en sales fundidas en el horno a una temperatura homogénea de 300°C, durante 30 segundos, suficiente para homogenizar la temperatura.
- ✓ Consecutivamente las muestras se templaron

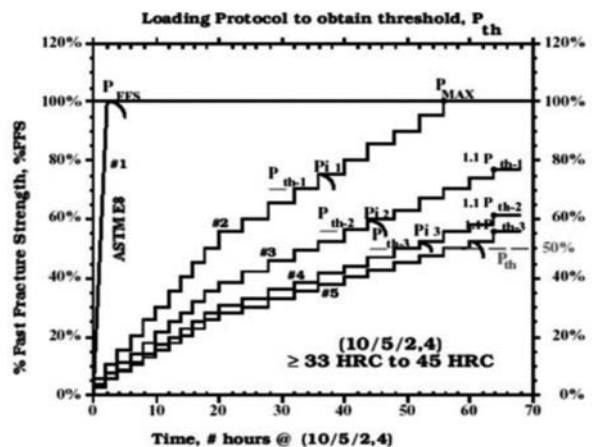


Figura N° 4. Ejemplo de programa de carga incremental para un acero de dureza menor que 45 HRC (ASTM F1624-12, 2012).

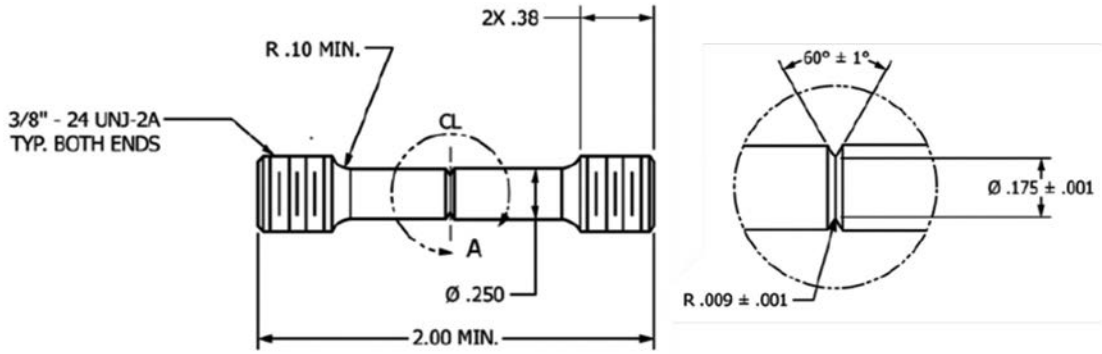


Figura N° 5. Diseño base de las probetas para método ISL (ASTM F519-17, 2017).

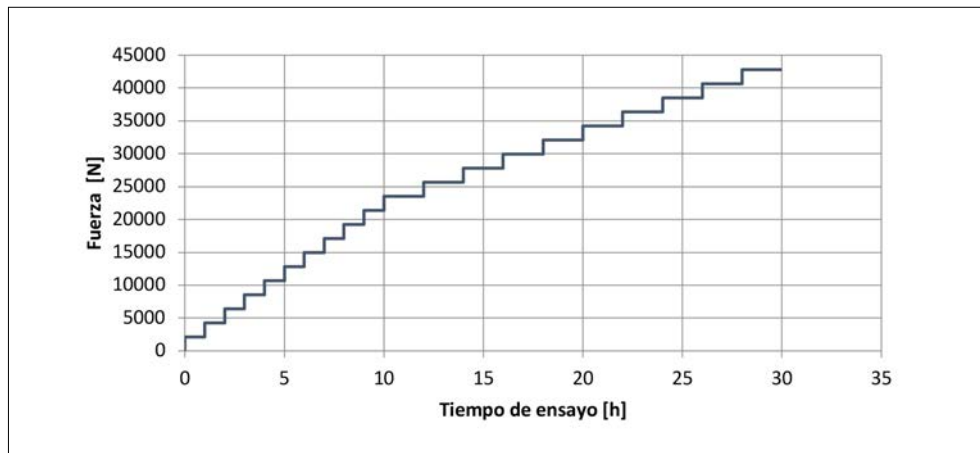


Figura N° 6. Gráfico ISL para probeta acero SAE 4340 tratado térmicamente (temple y revenido) sin cadmiar, con carga máxima de 42.800 N y con un incremento de 2.140 N por etapa.

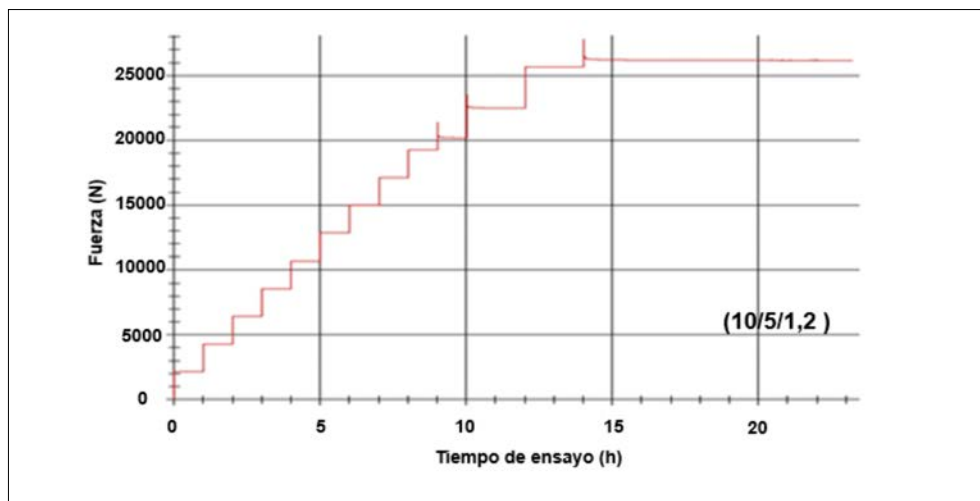


Figura N° 7. Gráfico carga incremental de probeta acero SAE 4340 tratado térmicamente cargado con hidrógeno 8 horas, con carga máxima de 42.800 N y con un incremento de 2.140 N por etapa.

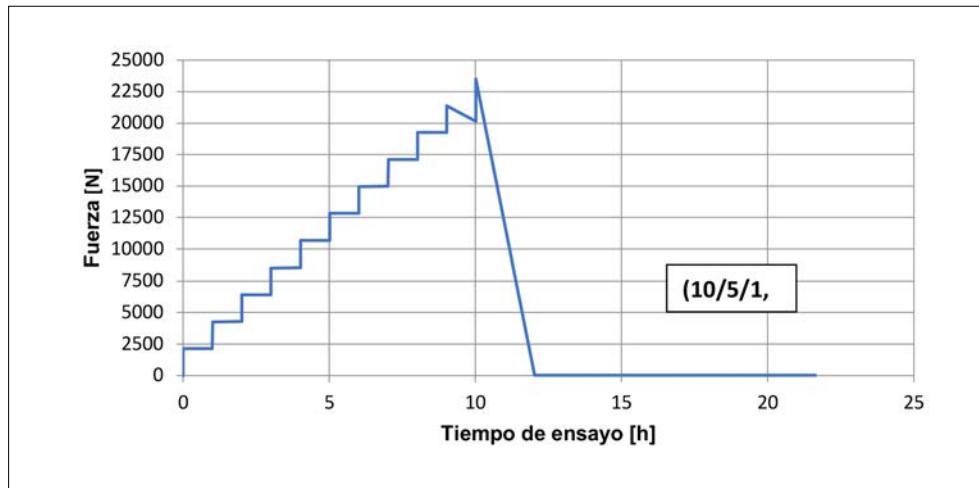


Figura N° 8. Gráfico ISL para probeta acero SAE 4340 tratado térmicamente cargado con hidrógeno 16 horas, con carga máxima de 42.800 N y con un incremento de 2.140 N por etapa.

en aceite a temperatura ambiente por 30 segundos y se dejaron enfriar al aire todas las probetas juntas para promover el auto revenido. Esto hasta alcanzar la temperatura ambiente.

✓ Finalmente se revinieron las probetas en un horno mufla eléctrica, a una temperatura de 125° C durante 30 minutos, y se retiraron del horno y dejaron enfriar al aire. Se midió dureza en escala HRC y se aseguró que el tratamiento térmico fue exitoso.

Las probetas de acero 4340 en estado de temple y revenido fueron ensayadas según la norma ASTM F1624. El acero fue sometido a una carga de hidrógeno de 8 y 16 horas comparándose con el mismo acero sin ser sometido a dicha carga de hidrógeno. En la Figura N° 6 se muestra el resultado de aplicar el procedimiento de carga incremental al acero 4340 templado y revenido sin haber sido sometido a carga de hidrógeno. En la Figura N° 7 y la Figura N° 8 se muestran los resultados de someter a este acero al procedimiento descrito en la norma F1624-12, después de haber sido sometido a una carga de hidrógeno de 8 y 16 horas.

En la Figura N° 6 no se produce ninguna caída en la carga, como debería esperarse, dado que este material no fue sometido a carga de hidrógeno. En la Figura N° 7 se produce una caída en la carga a un tiempo de 9, 10 y 14 horas. Sin embargo, la

forma de la caída muestra ser cóncava, lo cual se asocia a fluencia del material y no a propagación subcrítica de grieta. Finalmente, en el caso de la Figura N° 8, se aprecia una caída de la carga a un tiempo de 10 horas, disminuyendo ésta a cero. De esto se deduce que, al realizar una carga de hidrógeno por 16 horas, el material queda fragilizado por hidrógeno.

Conclusiones

- Se describió el fenómeno de fragilización por hidrógeno y el procedimiento de Brush Plating.
- Se describió en detalle el procedimiento experimental descrito en la norma ASTM F1624-12 para evaluar fragilización por hidrógeno en aceros.
- Se analizaron algunos datos experimentales obtenidos en probetas de acero SAE 4340 en estado de temple y revenido, concluyendo que una carga de hidrógeno de 16 hr produce fragilización por hidrógeno.
- El proceso Cadmium Plating puede significar un alza importante en la utilidad de ENAER, debido al ahorro que puede generar, sin embargo, existe la necesidad de evaluar en distintos materiales y situaciones.

Referencias

- Álvarez Laso JA. 1998. Fisuración inducida por hidrógeno de aceros soldables microaleados: caracterización y modelo de comportamiento. Tesis, Universidad de Cantabria, España.
- Askeland D, Fulay P, Wright W. 2010. The science and engineering of materials. Cengage Learning Customer & Sales Support, Stamford, USA.
- Becker WT, Shipley RJ. 2002. ASM Handbook Vol. 11. Failure analysis and prevention. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v11.9781627081801>
- ASM Handbook Vol. 13 A. 2003. Metals Handbook. A Corrosion: fundamentals, testing and prevention. (First Ed.). American Society for Metals. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.cpi2.t55030062>
- ASTM F1624-12. 2012. ASTM F1624-12 Standard test method for measurement of hydrogen embrittlement threshold in steel by the incremental step loading technique.
- ASTM F519-17. 2017. ASTM F519-12 Standard test method for mechanical hydrogen embrittlement evaluation of plating/coating processes and service environments.
- Callister W, Rethwisch D. 2018. Material science and engineering, Wiley Ed.
- Figueroa Gordon D. 2005. Hydrogen re-embrittlement susceptibility of ultra high-strength steels. Cranfield University School of Industrial and Manufacturing Science. Bedfordshire, UK.
- Fontana MG. 1987. Corrosion engineering. Mac Graw-Hill, México DF, México.
- Interrante C, Raymond L. 1995. Hydrogen damage, corrosion tests and standards ASM Handbook.
- Oriani RA. 1978. Hydrogen embrittlement of steels. *Ann Rev Mater Sci* 8: 327-357.
- Otero-Huerta E. 2001. Corrosión y degradación de metales. Editorial Sintesis, Madrid, España.
- Ovejero-García J. 2016. Degradación de los aceros por efecto del hidrógeno. Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina.
- Pressourye GM. 1980. Trap theory of hydrogen embrittlement. *Acta Metallurgica* 28: 895-911.
- Robergé P. 2000. Handbook of corrosion engineering. Mac Graw-Hill, México DF, México.
- Schweitzer P. 2007. Corrosion engineering handbook. Fundamentals of metallic corrosion. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Sepúlveda O. 2019. Efecto de la electrodeposición de cadmio sobre la fragilización por hidrógeno en acero SAE 4340. Tesis, Universidad de Santiago de Chile.
- Smith W, Hashemi J. 2006. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, Mc Graw-Hill, México DF, México.
- Uribe I, Velosa A, Zabala L. 2011. Fundamentos de daño por hidrógeno en aceros. *El Hombre y La Máquina* 36: 123-142.
- Zafra GA. 2016. Estudio de la difusividad y del agrietamiento por hidrógeno en aceros estructurales. Tesis, Universidad de Oviedo, España.