

La fragilidad por hidrógeno

White Paper

La fragilidad por hidrógeno

Por Peter Witzke

Jefe del Equipo de Expertos de Bossard

www.bossard.com

Todos los derechos reservados © 2020 Bossard

Las recomendaciones y consejos mencionados deben ser adecuadamente comprobados por el lector en el uso práctico y ser aprobados como adecuados para su aplicación.
Cambios Reservados.



ASSEMBLY
TECHNOLOGY
EXPERT

LA FRAGILIDAD POR HIDRÓGENO

Introducción

La fragilización por hidrógeno es un asunto grave que degrada mecánicamente una serie de materiales estructurales diferentes. A pesar de que se informó por primera vez hace más de cien años (1875) y de que el fenómeno ha sido objeto de intensos estudios durante decenios, todavía existen muchas incertidumbres.

La fragilización por hidrógeno puede dividirse en dos tipos. Uno es el tipo ambiental en el que el fallo de la fragilización por hidrógeno se debe al suministro de hidrógeno del medio ambiente, normalmente a través de la corrosión. El segundo, y el más común, es el fallo de la fragilización por hidrógeno debido al suministro de hidrógeno de los procesos durante la fabricación. Este tipo se denomina fragilización interna por hidrógeno

La complejidad de las fracturas por fragilización por hidrógeno va más allá de los procesos de fractura normales y no todos los metales y aleaciones se ven afectados. Los materiales más vulnerables son los aceros de alta resistencia, el titanio y las aleaciones de aluminio. La entrada de hidrógeno en los metales y aleaciones es, por supuesto, un elemento importante de la fragilización por hidrógeno. Este proceso por sí solo es bastante complicado y la tasa de entrada de hidrógeno depende de muchas variables. Además de la corrosión, las fuentes de hidrógeno pueden incluir, por ejemplo, el proceso de fabricación de acero, la descomposición de lubricantes inadecuados, las atmósferas de tratamiento térmico, la soldadura por arco y también el mecanizado en ambientes húmedos. Sin embargo, la gran mayoría de los riesgos de fragilización del proceso parecen ser tratamientos electroquímicos de la superficie, como la limpieza con ácido y los procesos electrolíticos.

LA FRAGILIDAD POR HIDRÓGENO

Fundamentos de la fragilización por hidrógeno

La fragilización por hidrógeno de la tornillería se asocia típicamente a los aceros al carbono y a las aleaciones, pero como se mencionó anteriormente también pueden verse afectados otros metales y aleaciones. La dureza del elemento de fijación es un parámetro esencial. La mayoría de las normas que tratan del fenómeno de la fragilización por hidrógeno establecen que el riesgo comienza con una dureza superior a 320HV. Algunos expertos sostienen que la dureza superior a HV 360 es el umbral más allá del cual se requieren medidas adicionales para gestionar el riesgo de fragilización por hidrógeno, y las investigaciones recientes y diversos exámenes prácticos lo respaldan.

El fallo de una fijación causada por la fragilidad por hidrógeno es un fallo retardado y frágil. La fractura sólo se produce después de la instalación y sólo en el caso de los tornillos expuestos a tensiones de tracción (una rara excepción a esto son ciertas piezas de resortes que contienen tensiones de tracción residuales de la estampación en frío que podrían romperse sin la instalación). El nivel de tensión de tracción en el tornillo es un parámetro decisivo, ya que el tornillo será más propenso al fallo por fragilización por hidrógeno con cargas más altas. Sin embargo, la fractura puede producirse incluso en los tornillos expuestos a cargas de tracción muy inferiores a la resistencia a la tracción. El fallo se produce en algún momento después de que el tornillo se haya ensamblado. Normalmente, un tornillo se instala durante el ensamblaje y se encuentra roto horas más tarde o en el siguiente par de días.

Rara vez ocurre segundos después del ensamblaje y normalmente no más tarde de unos meses, pero cuando ocurre, es repentino, sin aviso previo ni señales visibles. Las fallas que ocurren en el servicio son a menudo costosas y a veces incluso catastróficas.

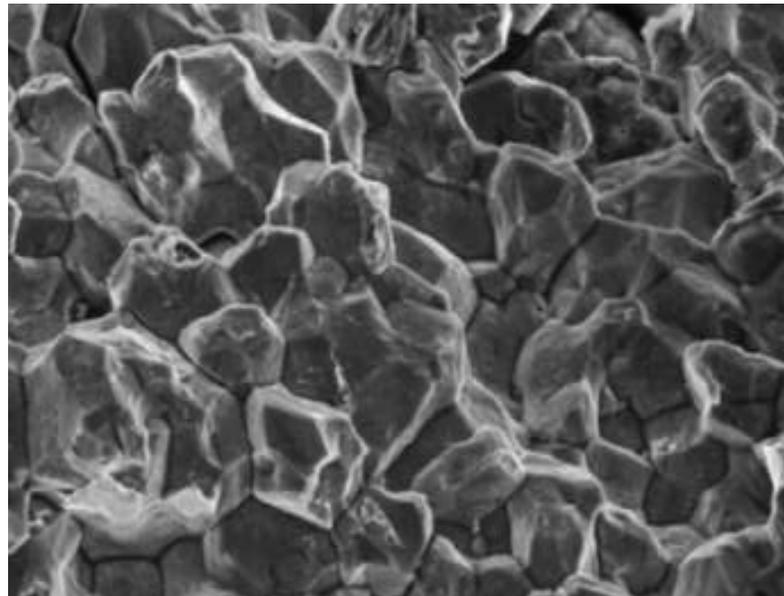


Fig 1: Fractura intergranular causada por la fragilidad por hidrógeno en el tornillo

La inspección visual de la fractura muestra un área sin ductilidad; sin embargo, otra parte podría mostrar una fractura dúctil originada por la rotura final del tornillo donde el mantenimiento del área de la sección transversal no pudo resistir más la carga. La fractura frágil revela un aspecto muy similar a las fracturas intergranulares que resultan de otras causas. Los exámenes por parte de experimentados ingenieros de materiales utilizando el microscopio electrónico son críticos para la identificación de la fragilidad del hidrógeno en el análisis del fallo.

En caso de fragilización por hidrógeno, se llevarán a cabo los siguientes procesos:

1. La entrada de hidrógeno en el elemento de fijación
2. Difusión de hidrógeno a las regiones de alta tensión en el elemento de fijación
3. La segregación de hidrógeno a las fronteras de los granos, inclusiones, dislocaciones y otras trampas
4. Alcance del valor crítico de la concentración de hidrógeno
5. Desarrollo de la grieta

Los puntos 2 a 5 continuarán hasta que el elemento de fijación no pueda resistir la carga y finalmente se rompa.

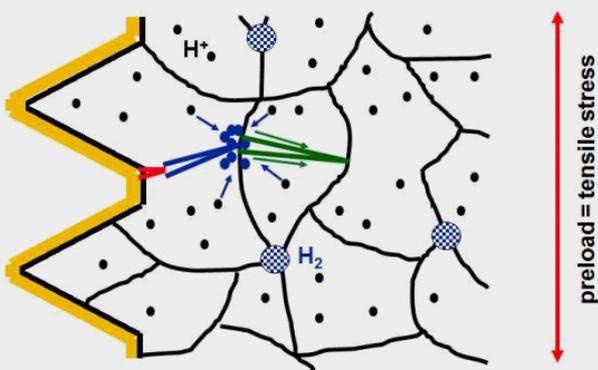


Fig 2: desarrollo de grietas en un tornillo

LA FRAGILIDAD POR HIDRÓGENO

La entrada de hidrógeno en el elemento

Como ya se ha mencionado, el hidrógeno puede originarse de varias fuentes. En la mayoría de los casos en que se descubre el fallo de fragilización por hidrógeno en los tornillos, los mayores contribuyentes se encuentran en el proceso de fabricación relacionado con la limpieza con ácido y los posteriores procesos electrolíticos. Los electrolitos utilizados para el recubrimiento se han optimizado para una mayor eficiencia en los últimos años, lo que ha reducido la generación de hidrógeno. Sin embargo, no hay garantía de que la alta eficiencia no conduzca a la dicha fragilidad.

Antes de que se pueda llevar a cabo el recubrimiento por electrólisis, los tornillos necesitan una superficie activa y tienen que estar químicamente limpios. Normalmente el proceso de limpieza es un desengrase alcalino seguido de una limpieza ácida para eliminar las escamas del tratamiento térmico, el óxido y otras películas de óxido. La limpieza alcalina y mecánica debe utilizarse para piezas de muy alta resistencia, pero son procesos lentos y costosos.

La limpieza ácida genera una cantidad considerable de átomos de hidrógeno (H) nacientes que se forman en la superficie del tornillo. El tiempo de inmersión depende de la condición de la superficie recibida y debe ser de una duración mínima y siempre con el uso de inhibidores. Algunos de los átomos de hidrógeno se unirán y formarán una molécula de H_2 que puede verse como burbujas en el ácido. Parte del hidrógeno naciente será absorbido por el acero. La cantidad total de hidrógeno absorbido por el tornillo está influenciada por el tiempo en la limpieza del ácido y la química del ácido.

El siguiente paso es el proceso electrolítico, en el que el material protector (por ejemplo, Zn, Ni o Cr) en forma de iones se deposita en el tornillo mediante una reacción catódica en un electrolito. También este proceso genera hidrógeno que puede ser absorbido por el tornillo. La norma de referencia es la ISO 4042 "Elementos de fijación. Recubrimientos electrolíticos", que proporciona orientación para evitar la fragilización por hidrógeno.

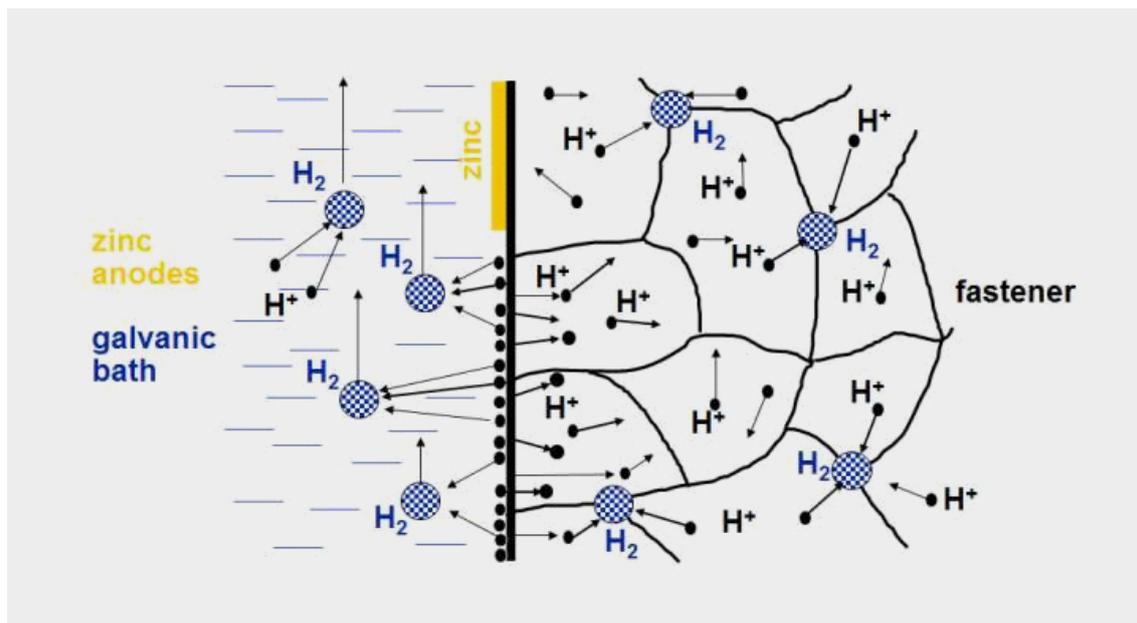


Fig 3: proceso de electrólisis

LA FRAGILIDAD POR HIDRÓGENO

Difusión de hidrógeno a las regiones de alta tensión en el tornillo

El hidrógeno se disuelve en el tornillo de acero como átomos de hidrógeno (H). Los átomos de hidrógeno absorbidos son muy móviles y pueden difundirse dentro del material de fijación a distancias considerables. Dentro del tornillo, el átomo de hidrógeno tenderá a segregarse en regiones de alta tensión y, con el tiempo, la concentración

de hidrógeno aumentará en esas regiones. Si dos átomos adyacentes se recombinan para formar hidrógeno molecular (H₂) en una trampa, la tensión aplicada necesaria para provocar el movimiento se hace mucho mayor y la molécula quedará inmobilizada en ese punto.

LA FRAGILIDAD POR HIDRÓGENO

La segregación de hidrógeno a las fronteras de los granos, inclusiones, dislocaciones y otras trampas

Como ya se ha mencionado, las fracturas causadas por la fragilidad por hidrógeno son intergranulares. Dentro del tornillo, el hidrógeno tiene una tendencia a segregarse en las fronteras de los granos,

inclusiones, dislocaciones y otras trampas. Con el tiempo, a medida que el hidrógeno se difunde a través del tornillo, la segregación en estas trampas aumenta.

LA FRAGILIDAD POR HIDRÓGENO

Alcance del valor crítico de la concentración de hidrógeno

Una mayor concentración de hidrógeno da lugar a un menor estrés crítico en el que puede producirse un fallo y una menor concentración de hidrógeno da lugar a un mayor estrés crítico en el que puede producirse un fallo. Los átomos de hidrógeno móviles se segregarán en defectos de la superficie, inclusiones, dislocaciones y otros defectos en los que las tensiones de tracción son elevadas y la consecuencia es que estas regiones se debilitarán. Cuando la combinación de la concentración de

hidrógeno y la cantidad de tensión alcance el punto crítico, se producirá la fractura y este proceso puede continuar hasta que finalmente se rompa el elemento de fijación.

La grieta inicial aparecerá típicamente en el interior de un grano y se desarrollará hasta que llegue al límite del grano. A partir de este punto se desarrollará a lo largo de los límites del grano hasta la rotura final del elemento.

LA FRAGILIDAD POR HIDRÓGENO

Prevención y alivio del hidrógeno

La fragilización por hidrógeno es en gran medida impredecible y todos los esfuerzos para evitarla deben hacerse durante la fase de diseño en la que se deciden las características de las piezas y durante la siguiente producción.

Si se evitan los procesos de producción que permiten la generación de hidrógeno y la absorción de hidrógeno en las fijaciones, se eliminará el riesgo de que se produzcan fallos en la fragilización por hidrógeno originados por la producción. El tipo de ambiente causado por la corrosión puede evitarse seleccionando un tratamiento superficial adecuado que no genere hidrógeno durante el proceso de recubrimiento.

Entre una gama de posibles soluciones están:

- El cincado mecánico.
- Dacromet
- Geomet
- Delta Protekt
- Xylan 1014/1400/1424
- Magni 565

La fragilización por hidrógeno sólo ocurre en el caso de los elementos de fijación de alta resistencia. Si las aplicaciones lo permiten, deben seleccionarse fijaciones con una dureza inferior a 320 HV cuando el método de fabricación no pueda excluir el hidrógeno.

La eliminación de la limpieza ácida cuando sea posible, cuando no sea posible el tiempo de inmersión durante el decapado ácido debe mantenerse al mínimo. El ácido siempre debe contener

inhibidores. Cuando se necesiten elementos de fijación de alta resistencia y el proceso de producción no permita la eliminación total de la generación y absorción de hidrógeno en la fijación, por ejemplo, mediante la limpieza con ácido y el proceso de electrólisis, es fundamental reducir al mínimo el riesgo mediante un proceso de recocido posterior denominado alivio del hidrógeno.

El recocido está especificado por la ISO 4042 a una temperatura de 200°C a 230°C de 2 a 24 horas. Las piezas deben pasar esta fase de recocido dentro de las cuatro horas siguientes al recubrimiento, preferible una hora, ya que la concentración de hidrógeno inmediatamente después de la limpieza con ácido y la aplicación del recubrimiento es muy alta justo por debajo de la superficie del acero. Es importante señalar que el tiempo a las temperaturas dadas debe basarse en la temperatura del núcleo de la fijación.

Especialmente para los elementos de fijación con tensiones residuales, el tiempo de recocido es crítico porque las tensiones residuales en los tornillos harán que el hidrógeno cerca de la superficie se segregue a estas regiones estresadas asociadas con defectos de la superficie, inclusiones, dislocaciones y potencialmente causen fragilidad.

La intención del recocido es expulsar tanto hidrógeno como sea posible y redistribuir el resto a través del tornillo. Esto reducirá la cantidad de hidrógeno móvil que causa la fragilidad. Los estudios han demostrado que el tiempo de este proceso es crucial, cuanto más cerca de las 24 horas, mejor. La duración del recocido por debajo de 5-6 horas ha demostrado tener un efecto muy limitado.

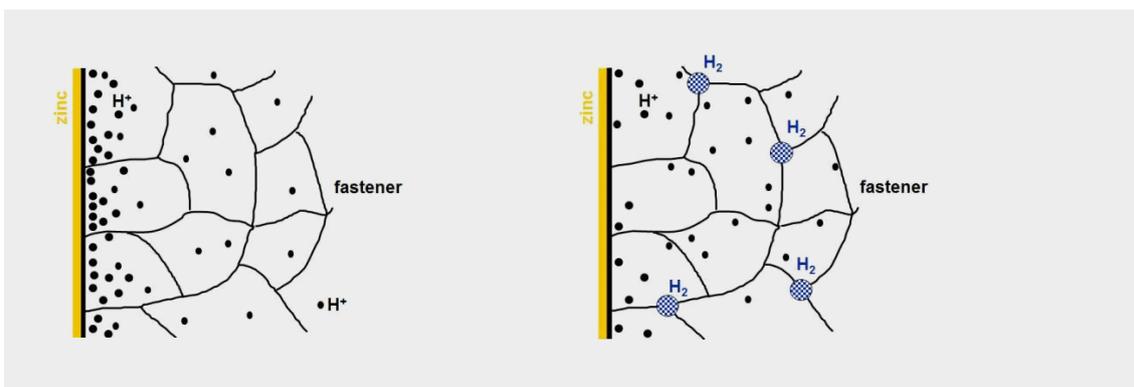


Fig 4: distribución del hidrógeno antes (izquierda) y después del proceso de recocido (derecha)

LA FRAGILIDAD POR HIDRÓGENO

Procedimiento para inspeccionar los elementos de fijación en busca de fragilidad por hidrógeno

Cuando se producen fallos por fragilidad, todos los elementos de fijación de un lote rara vez se ven afectados. De hecho, normalmente sólo un pequeño porcentaje o menos de las fijaciones mostrarán fragilidad cuando se expongan a cargas de tracción. Se puede hacer una inspección, pero incluso un alto número de pruebas podría no detectar las partes afectadas, a pesar de la alta eficiencia del propio método de prueba.

La inspección de los elementos de fijación se define en la norma ISO 15330, "Elementos de fijación. Ensayo de precarga para la detección de la fragilización por absorción de hidrógeno. Método de las placas paralelas". Durante el ensayo, los elementos de fijación se someten a un esfuerzo de tracción en el rango del límite elástico o del par de rotura. La tensión o el par se mantienen al menos durante 48 horas. Es crucial para el ensayo que las fijaciones estén constantemente expuestas a tensiones de tracción y que el asentamiento (incrustación) se limite al mínimo. Después de cada 24 horas las fijaciones se vuelven a apretar al par de apriete inicial y al mismo tiempo se comprueba si se ha producido un fallo debido a la fragilidad por hidrógeno.

Si todas las muestras de las fijaciones de un lote han pasado la prueba sin roturas o grietas visibles, el lote puede ser dado por bueno. Sin embargo, es importante saber que esos ensayos tienen por objeto el control del proceso en la producción, donde pueden iniciarse en las horas siguientes a las etapas del proceso de generación del hidrógeno. Como se ha descrito anteriormente, el tiempo que transcurre desde la entrada del hidrógeno hasta los procesos de mitigación es fundamental para la eficiencia. Lo mismo se aplica a la eficiencia de las pruebas de fragilización por hidrógeno. Para la aprobación final de elementos de fijación, el método de ensayo descrito en la norma ISO 15330 sigue siendo la mejor opción disponible, pero cabe señalar que se reducirán las posibilidades de revelar un posible fallo.



Para más información:

spain@bossard.com
www.bossard.es

SC Trade Center
Av. de les Corts Catalanes, 8
08173 Sant Cugat del Vallés
Barcelona