

MATERIALES

ACEROS INOXIDABLES

- **¿Cuál es el fundamento de la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable?**

Se denominan aceros inoxidable a aquellas aleaciones que contienen un mínimo de 10.5 – 11% de cromo.

Los aceros inoxidable o resistentes a la corrosión, adquieren esta propiedad a través de la formación de una capa superficial invisible y muy adherente de un óxido muy rico en cromo, llamada película de pasivación, que se forma y recompone espontáneamente en la presencia de oxígeno.

Esta capa es continua, adherente, no porosa, insoluble, y autorreconstituible en la presencia de oxígeno cuando es deteriorada.

La pasividad se forma bajo un rango de condiciones dependiendo de las características del ambiente circundante, pero la presencia de oxígeno es fundamental en todos los casos.

En general, la resistencia a la corrosión de un acero inoxidable es máxima cuando la superficie del acero está lo suficientemente aireada o expuesta y libre de cualquier tipo de depósitos.

Cuando el contenido de cromo se eleva a 17 – 20%, típico de los aceros inoxidable austeníticos; o entre 26–29% de cromo, típico de los más recientes desarrollados superferríticos, la estabilidad de la capa de pasivación aumenta notoriamente. No obstante, el mayor contenido de cromo en el acero puede afectar adversamente las propiedades mecánicas, la fabricabilidad, la soldabilidad, etc. Por lo tanto, es más eficiente mejorar la resistencia a la corrosión agregando o incrementando el contenido de otros aleantes en el acero con o sin ningún incremento de cromo.

- **¿Cuáles son las formas más comunes de corrosión localizada que pueden sufrir algunos aceros inoxidable?**

Las formas más comunes de corrosión localizada que pueden sufrir los aceros inoxidable son:

- **Corrosión por picado:** es una forma de ataque corrosivo que produce hoyos o pequeños agujeros en un metal. Esta forma de corrosión es muy destructiva para las estructuras de ingeniería si causa la perforación del metal. La picadura es a menudo difícil de detectar porque los pequeños agujeros causados por la picadura pueden cubrirse con los productos de la corrosión. Asimismo, el número y profundidad de los agujeros puede variar enormemente y por eso el daño producido por picadura puede ser difícil de evaluar. En consecuencia, la picadura, dada su naturaleza localizada, puede a menudo localizar fallos repentinos e inesperados, razón por la cual se considera a este tipo de corrosión como el más peligroso.

La picadura generalmente requiere de un período de iniciación, pero una vez que comienza, los agujeros crecen a gran velocidad. La mayoría de los agujeros crecen en la dirección de la gravedad y en las superficies más bajas de los equipos de ingeniería.

Lugares comunes en que se inicia el agujero son: inclusiones, heterogeneidades estructurales y heterogeneidades de composición sobre una superficie metálica.

- **Corrosión por rendijas:** es una forma de corrosión localizada asociada con espacios confinados o

rendijas formadas por ciertas configuraciones geométricas. Es también llamada corrosión por aireación diferencial. Las regiones con diferentes concentraciones de oxígeno se comportan como una cupla de corrosión. Las zonas de baja concentración se dan dentro de la rendija y actúan como ánodos donde el metal se oxida. Dentro de la rendija aumenta la concentración de iones positivos y si hay presencia de halógenos en el medio (Cl, por ejemplo) estos migran hacia la rendija formándose FeCl dentro de la misma. Luego por hidrólisis se genera un exceso de iones hidrógeno acelerándose notablemente la velocidad de corrosión.

- **Corrosión intergranular (SENSITIZACIÓN):** la corrosión intergranular es un ataque de corrosión localizada y/o adyacente a los límites de grano de una aleación. En condiciones ordinarias si un metal se corroe uniformemente, los límites de grano serán sólo ligeramente más reactivos que la matriz. Pero bajo otras condiciones las regiones de límites de grano pueden ser muy reactivas, dando lugar a una corrosión intergranular que cause pérdidas de resistencia en la aleación e incluso una disgregación en los límites de grano. Este es el caso de la pérdida de cromo alrededor de los límites de grano en los aceros inoxidable debido a la precipitación de carburos de cromo en temperaturas entre 400 y 800 °C. en esas zonas el material pierde resistencia a la corrosión. Ocurre como resultado de tratamientos térmicos (recocido o relevado de tensiones) incorrectos, exposición térmica en ese rango de temperaturas y por realización de soldaduras. Los carburos precipitados son del tipo M₂₃C₆ y el tiempo para el inicio de la precipitación varía con el contenido de carbono del acero.
- **Corrosión bajo tensión:** este tipo de corrosión es muy perjudicial, ya que en un lapso extremadamente corto se puede producir la falla de una pieza. La rotura por corrosión por esfuerzo (stress – corrosion cracking SCC) de metales se refiere a la rotura causada por el efecto combinado de esfuerzos de tensión y un entorno corrosivo específico actuando sobre el metal. Durante la SCC el ataque que recibe la superficie del metal es generalmente muy pequeño mientras que las grietas aparecen perfectamente localizadas y se propagan a lo largo de la superficie del metal. Los esfuerzos que causan la SCC pueden ser residuales o aplicados. Las altas tensiones residuales capaces de provocar SCC pueden ser en consecuencia, por ejemplo, de tensiones térmicas introducidas por velocidades desiguales de enfriamiento, de un diseño mecánico defectuoso para esfuerzos, de transformaciones de fase durante el tratamiento térmico, el trabajo en frío o la soldadura.

Sólo ciertas combinaciones de aleaciones y ambientes son susceptibles de SCC. Por ejemplo, los aceros inoxidable sufren deterioro en medios como cloruro de etilo con agua (a temperaturas superiores a la ambiente), en agua de mar y otros medios que no contienen cantidades apreciables de cloruros, como soluciones de soda cáustica, agua que contiene ácido sulfhídrico, productos formados en las refinerías a partir de H₂S, agua a temperaturas elevadas, como así también en vapor de agua.

- **Corrosión galvánica:** la corrosión galvánica ejerce una acción localizada que ocurre cuando dos metales diferentes están en contacto bajo una solución que puede obrar de electrolítico. Así, los dos metales diferentes forman un par de electrodos cortocircuitados que constituyen una celda electroquímica. De ello resulta la disolución del material que se comporta como electrodo anódico (donde ocurre la oxidación), mientras que el material que se comporta como cátodo (donde ocurre la reducción) permanece inalterable. El potencial electroquímico de esa celda de corrosión variará según sea la posición ocupada por los metales y aleaciones en la serie de potenciales galvánicos. Ha de tenerse cuidado, entonces, al unir dos metales distintos, puesto que la diferencia de sus potenciales electroquímicos puede conducir a corrosión.

Otra consideración importante en la corrosión galvánica de dos metales es la relación de las áreas anódica y catódica. Esta relación se denomina efecto de área. Una relación de área desfavorable es la correspondiente a un área catódica grande y un área anódica pequeña. Cuando se aplica una cierta cantidad de corriente a un par de metales, la densidad de corriente es mucho más grande para el electrodo pequeño que para el electrodo grande. Por ello el electrodo anódico pequeño se corroerá mucho más rápido.

- **Corrosión por contacto:** una diminuta partícula de acero al carbono o hierro, una escama de óxido, cobre u otra sustancia extraña cualquiera incrustada en el acero inoxidable puede ser suficiente para destruir la pasividad en el punto de contacto. El ataque empieza al formarse una celda galvánica con la partícula de material extraño como ánodo. Mientras dura la acción electroquímica que disuelve lo contaminado, iones de hidrógeno se liberan haciendo que el acero inoxidable se vuelva activo en el punto de contacto. La acción de picado puede proseguir después de haber sido eliminada la partícula extraña por haberse constituido una celda activa – pasiva entre la diminuta superficie anódica atacada y la extensa área catódica circundante.

- **¿Con cuáles grados de acero inoxidable se puede mitigar la corrosión intergranular?**

La corrosión intergranular se puede evitar mediante el empleo de aceros de grado L ($C < 0.03\%$), o mediante el empleo de aceros inoxidables estabilizados, como el AISI 321 con Ti ó AISI 347 con Nb. El Ti y el Nb se combinan con el carbono a temperaturas más altas respecto de aquellas en las que el carbono se podría combinar con el cromo.

- **¿Qué aceros inoxidables resisten la corrosión por picado? ¿Cuáles elementos químicos presentes en el material son importantes para ello?**

Los aceros inoxidables austeníticos tienen especial resistencia a la corrosión por picado, esta característica se la confieren elementos como Mo, Nb, Ti, Cu y N.

- **¿Qué característica tienen cada una de las familias de aceros inoxidables?**

- **Martensíticos:**

- Son endurecibles por temple + revenido, para conseguir alta resistencia mecánica y buena ductilidad y tenacidad. Tensiones de rotura hasta 1900 MPa.
 - Tienen una aceptable resistencia a la corrosión. Es indicado para aplicaciones que requieren no solo resistencia a la corrosión sino resistencia mecánica, dureza y resistencia al desgaste.
 - Debido a los aleantes, el acero es templable desde fase austenítica (forma martensita en el enfriamiento) en aire o aceite.
 - Con tratamientos de recocido se obtienen estructuras de ferrita y carburos esferoizados.
 - Su temperatura límite de trabajo es de 475 °C puesto que se produce un fenómeno de fragilización por precipitación de fase alfa prima.
 - La baja conductividad térmica de estos aceros requiere precalentar lo suficiente previo a la austenización para evitar distorsiones y fisuras de temple
 - Son magnéticos.

- **Ferríticos:**

- Son magnéticos y no endurecibles por tratamiento térmico. Su microestructura es siempre ferrítica.
 - Son de relativamente baja resistencia mecánica ($YS=240 - 380$ MPa, $UTS=415 - 585$ MPa) y tienen baja tenacidad y soldabilidad.
 - Bajo costo, buena resistencia a la corrosión bajo tensión y aceptable resistencia a la corrosión general.
 - Se los utiliza en aplicaciones arquitectónicas, automotrices, utensilios de cocina, etc.

- **Austeníticos:**

- Contienen elementos como Mo, Ti, Nb, Cu, que le confieren resistencia a formas particulares de corrosión. No son magnéticos y tienen coeficiente de expansión térmica 50% mayor que el de los martensíticos y ferríticos.

- Su estructura es austenítica a temperatura ambiente. No son endurecibles por tratamiento térmico (formación de martensita) pero endurecen por deformación. Su soldabilidad es excelente.
- Son los más resistentes a la corrosión en virtud de su más alto contenido de cromo y níquel. Son resistentes a altas temperaturas (resistencia a la corrosión y resistencia al creep). Tienen una excelente ductilidad y tenacidad que los hace especialmente aptos para aplicaciones en temperaturas subcero. Tienen aproximadamente 200MPa de YS y 500MPa de UTS.
- En servicios a temperaturas mayores a 600 °C durante tiempos prolongados, pueden precipitar fases fragilizantes (sigma, chi). La sensibilización por encima de 400 °C genera corrosión intergranular.

• **Dúplex austenítico – ferrítico:**

- Presentan una microestructura de granos de ferrita y de austenita.
- Tienen buena resistencia mecánica, hasta 700 MPa, (mayor que la de los ferríticos o austeníticos), excelente resistencia a la corrosión bajo tensión y muy buena ductilidad y tenacidad.
- Muy buena resistencia a la corrosión generalizada y localizada. Presentan un límite de temperaturas de trabajo de 380 °C.

• **Endurecibles por precipitación de matriz martensítica, semiaustenítica o austenítica:**

- Fueron desarrollados para proveer alta resistencia a la corrosión con alta resistencia mecánica y tenacidad. Son muy utilizados en la industria aeroespacial. Se obtienen UTS superiores a 2000 MPa.
- Los precipitados endurecedores son diferentes según sea el tipo de acero: pueden ser carburos, intermetálicos (Ni–Al o Ni–Ti), o Cu metálico.

• **¿Por qué los aceros inoxidables austeníticos son los más ampliamente utilizados en el mercado?**

Los aceros inoxidables austeníticos son los más ampliamente utilizados porque son los más resistentes a la corrosión. Resisten a la mayoría de los ácidos oxidantes, muchas soluciones de esterilización para uso hospitalario y un amplio rango de productos orgánicos e inorgánicos. Tienen excelente ductilidad y tenacidad, que los hace aptos para aplicaciones subcero. Tienen una relativamente buena resistencia mecánica.

Son además aptos para aplicaciones en un amplio rango de temperaturas y tienen una muy buena apariencia.

Otra característica importante de estos aceros es su elevada conformabilidad.

• **¿Qué tratamientos térmicos se aplican o pueden aplicarse (y con qué objetivos) a cada una de las familias de aceros inoxidables?**

Los martensíticos son endurecibles por temple y posterior revenido para conseguir alta resistencia mecánica (temple) y buena ductilidad y tenacidad (revenido). El temple es un enfriamiento brusco (en agua o aceite) que se realiza con el objeto de endurecer el acero por precipitación de martensita; el templado ofrece una muy buena resistencia mecánica pero muy poca tenacidad, por lo cual se hace necesario realizar, luego del templado, otro tratamiento térmico, denominado revenido, que nos permite obtener martensita revenida que tiene algo menos de resistencia mecánica que la martensita propiamente dicha pero es mucho menos frágil que ésta, confiriéndole al material una interesante combinación de resistencia mecánica, ductilidad y tenacidad.

Los aceros inoxidables austeníticos, los ferríticos y los dúplex no son endurecibles por tratamiento térmico, pero se los puede endurecer por deformación plástica en frío. Al hacer esto aumenta la resistencia mecánica del material pero disminuye su tenacidad y ductilidad, problema que se resuelve mediante un recocido parcial.

Otros tratamientos aplicables son el martempering, el austempering, normalizado, homogeneizado, alivio de tensiones, recocido de esferoidización y otros.

Una alternativa adicional la constituyen los aceros inoxidable endurecidos por precipitación. Estos aceros logran sus propiedades por un tratamiento de envejecido a temperaturas más bajas. Permiten mecanizar una pieza en su condición recocida y obtener la dureza por el posterior tratamiento térmico a temperaturas entre 400 y 500 °C, evitándose distorsiones y oxidación.

- **¿Qué ventajas tienen los aceros inoxidable dúplex respecto de las otras familias de inoxidable?**
¿Cuál es su limitación de uso más importante?. Justifique.

La principal ventaja de los aceros inoxidable dúplex sobre las otras familias de aceros inoxidable es que tienen una mayor resistencia mecánica (hasta 700MPa). Además poseen excelente resistencia a la corrosión bajo tensión y muy buena ductilidad y tenacidad, junto con una buena soldabilidad.

Poseen también muy buena resistencia a la corrosión generalizada y localizada, y medios que contengan CO₂.

Estos aceros presentan un límite de temperaturas de trabajo entre 280 – 380 °C, puesto que por encima de este rango de temperaturas pueden precipitar fases fragilizantes (fases chi, alfa prima, sigma).

- **Mencione al menos 5 razones por las cuales a largo plazo puede ser beneficioso el uso de los aceros inoxidable.**

El uso de los aceros inoxidable puede ser beneficioso a largo plazo por varias razones, entre ellas podemos mencionar:

- Resistencia a la corrosión en gran variedad de condiciones adversas.
- Fácil mantenimiento, lo que conlleva a un ahorro de dinero a largo plazo.
- Apariencia muy agradable.
- Aptos para servicio en un amplio rango de temperaturas de servicio, lo que los hace aptos para una gran variedad de aplicaciones, desde criogénicas hasta requerimientos a temperaturas relativamente altas.
- También ofrecen una amplia variedad de resistencia mecánica según el grado.
- Algunos grados de aceros inoxidable (sobre todo de los superausteníticos) compiten con las superaleaciones, pero con la ventaja de un costo mucho más accesible.

- **¿Qué factores intervienen en la selección de un acero inoxidable para una dada aplicación?**

Para seleccionar el grado de acero inoxidable para una dada aplicación hay que tener en cuenta los siguientes criterios:

- *requerimientos del servicio*
- *requerimientos de fabricación*
- *requerimientos de seguridad, códigos y reglamentos*
- *costo total*
- *disponibilidad*

- **¿Qué factores tendría en cuenta para determinar el nivel de resistencia a la corrosión que se requiere en una dada aplicación?**

El nivel de resistencia a la corrosión depende de los siguientes factores:

- Naturaleza del agente corrosivo al que el acero inoxidable estará expuesto durante la aplicación.Cuál es el PH?.Cuál es la composición global de la solución?.
- Concentración del agente corrosivo. 10%?. 15%?.

- Presencia de impurezas o contaminantes en el medio corrosivo que puedan generar corrosión general o localizada (S, P, Cl, etc.).
- Temperatura del agente corrosivo. Usualmente cuando la temperatura incrementa también lo hace la velocidad de ataque.
- Presencia de depósitos adherentes sobre superficies (sólidos en solución) que puedan promover corrosión por aireación diferencial.
- Grado de aireación del ambiente.
- Velocidad del agente corrosivo (puede afectar la severidad del ataque).
- La aceptable velocidad de corrosión en el ambiente específico. Cuánto tiempo debe funcionar el componente en ese ambiente?.

• **¿Qué parámetro se utiliza para determinar los requerimientos de propiedades mecánicas?**

Típicamente, es la resistencia mecánica la propiedad mecánica relevante que dicta este requerimiento. Aunque para requerimientos a altas temperaturas (mayores que los 500 °C), la resistencia al *creep* (termofluencia) es el factor más importante a considerar.

Por último, para servicios criogénicos inferiores a los -100 °C, la tenacidad es un importante factor que hay que tener en cuenta.

• **Para servicios a temperaturas mayores a 500 °C ¿Qué requerimientos se plantean para el material y cuáles aceros inoxidables son los más aptos?. Justifique.**

Para requerimientos a temperaturas mayores a los 500 °C, la resistencia al creep constituye el factor importante a considerar. En estos casos los AISI 321 (con Ti) y los AISI 347 (con Nb) son recomendables y pueden utilizarse hasta los 800 °C. Para más altas temperaturas de servicio (hasta 1100 °C) se utilizan los aceros inoxidables austeníticos resistentes a la oxidación y al creep del tipo AISI 309 y 310. Cabe destacar que existen numerosas variantes de grados no standards o de grados propietarios para todas estas aplicaciones.

• **¿Qué simbolizan los grados L, N y S en los aceros inoxidables?. Justifique.**

- Grado L: significa que es un acero inoxidable con un nivel de carbono inferior al 0.03%. Estos grados se utilizan, por ejemplo, cuando en un austenítico se requiere soldadura para fabricar el componente que debe resistir a la corrosión, puesto que un porcentaje mayor de carbono podría traer inconvenientes de precipitación de carburos de cromo a las altas temperaturas de soldadura, lo cual favorece la corrosión intergranular.
- Grado N: significa que es un acero inoxidable al cual se le ha incrementado su resistencia mecánica y su resistencia a la corrosión por picado por adición de nitrógeno, que endurece por solución sólida en los grados austeníticos. El nitrógeno, además, retarda las fases fragilizantes como la fase sigma. En los grados ferríticos es tan perjudicial como el carbono.

Estos grados se utilizan, por ejemplo cuando se requiere una resistencia mecánica considerable pero no se puede endurecer por adición de carbono por el peligro de la precipitación de carburos de cromo a altas temperaturas.

- Grado S:

• **¿Qué requerimientos de servicio satisfacen en mayor o menor medida los aceros y superaleaciones termorresistentes?.**

Mencione el listado de estas familias de materiales y el límite de temperaturas que soportan en cada caso.

Se denominan aceros y aleaciones termorresistentes a aquellos materiales aptos para solicitaciones mecánicas en servicios a temperaturas mayores a los 500 °C y que además poseen resistencia a la formación de cascarilla. Estas aleaciones se emplean, al igual que los aceros inoxidables endurecibles por precipitación, cuando los requerimientos de resistencia al creep y a la oxidación/corrosión son los más exigentes: industria aeroespacial, turbinas de gas, reactores nucleares, etc.

La mayoría de estos aceros se ubican dentro de las siguientes categorías:

- Aceros al Carbono (hasta 370 °C bajo carga continua, y algunos soportan hasta 540 °C)
 - Aceros al Carbono – Molibdeno (C – Mo) (entre 440 y 540 °C)
 - Aceros al Carbono – Cromo – Molibdeno (C – Cr – Mo) (entre 540 y 650 °C)
 - Aceros inoxidables ferríticos (hasta 700 °C)
 - Aceros inoxidables martensíticos (hasta aprox. 500 °C)
 - Aceros inoxidables austeníticos (hasta 1200 °C según el tipo de acero)
 - Superalaciones base Fe – Ni, base Ni y base Co (hasta aprox. 590 °C).
- **¿Cuáles son los aleantes principales, y qué función cumplen, en los aceros termorresistentes por debajo de los 700 °C?**

Los aleantes principales, sus efectos y sus rangos de composición son:

- Cr: (5 a 25%) previene la oxidación y corrosión a elevada temperatura, forma carburos y endurece por solución sólida.
- Mo, W: (0 a 12%) brinda resistencia a la oxidación y endurece por precipitación.
- Ti: (0 a 6%) forma carburos y endurece por precipitación.
- Nb: (0 a 5%) forma carburos y endurece por solución y precipitación.
- Mn: (0 a 1.6%) estabiliza la austenita y endurece por solución sólida y por carburos.
- Si: (0 a 2.5%) previene la oxidación y corrosión por sulfuros y endurece por solución.

- **¿Cuáles son las ventajas de los aceros para herramientas al carbono (sin aleantes)?**

Las ventajas de los aceros al carbono son su bajo precio y excelente trabajado por deformación y mecanizado en estado de recocido (dureza máxima 200 – 250 HB). Los inconvenientes son: estrecho intervalo de temperaturas de temple que conduce a peligrosos sobrecalentamientos, el hecho de enfriar en agua o en salmuera que intensifica las distorsiones o torceduras pudiendo provocar fisuras, y por último que su máxima temperatura de trabajo son los 200 °C.

- **¿Qué tratamiento térmico final llevan invariablemente los aceros para herramientas?. Justifique.**

El procesado final de los aceros para herramientas consiste de un tratamiento térmico para producir la dureza requerida y otras propiedades para una dada aplicación, como ser resistencia mecánica y al desgaste, etc.. El endurecimiento final consiste de un número de pasos que incluyen precalentamiento, austenización, enfriamiento o temple y revenido.

El objetivo de esta secuencia es obtener martensita revenida.

El revenido es el tratamiento final aplicado a los aceros para herramientas. El revenido se realiza para mejorar la tenacidad de un acero después de del temple.

- **¿Cuáles son los aleantes fundamentales de los aceros aleados para herramientas? ¿Y qué función cumplen?**

Los aleantes fundamentales de los aceros para herramientas son:

- *Cromo*: es el elemento de aleación de relativamente más bajo costo. Incrementa la templabilidad y en suficiente exceso forma el carburo Cr_23C_6 que brinda resistencia al desgaste. Cuando el cromo está en solución forma un óxido muy estable, pasivante, que mantiene el filo de las herramientas de corte.
- *Molibdeno y tungsteno*: tienen efectos similares en cuanto a templabilidad y otras características. Cuando el contenido de ellos supera el 5% forman con el carbono el carburo M_6C que precipita luego del revenido resistiendo el ablandamiento y promoviendo el endurecimiento secundario típico de los aceros rápidos. Este endurecimiento que ocurre en dichos aceros es también llamado endurecimiento al rojo, puesto que la herramienta puede tomar esa coloración por calentamiento sin ablandarse y perder su filo. El Mo es de menor costo que el W.
- *Vanadio*: forma carburos del tipo V_4C_3 que son los más duros en un acero para herramientas. Este elemento otorga gran resistencia al desgaste y dureza. El V es un elemento costoso.

• **¿Cuál es el objeto de realizar un doble revenido en muchos aceros para herramientas?. Justifique.**

En aceros para herramientas es muy importante la posible ocurrencia de endurecimiento secundario por precipitación de carburos aleados, durante altas temperaturas de revenido. También ocurre que en el enfriamiento del revenido, la austenita retenida que no descompuso a bainita durante el revenido, transforma a martensita. Normalmente, es aplicado un doble o triple revenido para asegurar que la tenacidad sea mejorada después de los cambios microestructurales inducidos por el primer revenido. Esto es, mediante el segundo y tercer revenido la martensita producto de la transformación de la austenita retenida, puede revenirse. Asimismo, cualquier gruesa bainita producto de la descomposición de la austenita retenida, puede revenirse de modo de mejorar la tenacidad del material.