

SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES

INTRODUCCION

Los aceros inoxidables que contienen níquel son indispensables en la construcción de equipos para la industria de procesos. Estos aceros se usan en lugar de los aceros convencionales por sus excelentes propiedades tales como: resistencia a la corrosión, dureza a baja temperatura y buenas propiedades a alta temperatura.

Los aceros inoxidables son una excelente elección para la construcción de equipos para la industria química, láctea, alimenticia, biotecnológica y para usos arquitectónicos y relacionados.

Tabla I

Influencia de las propiedades físicas en la soldadura de aceros inoxidables austeníticos, comparados con el acero al carbono

	Aceros inoxidables austeníticos	Aceros al carbono	Observaciones
Punto de fusión (Tipo 304)	1400 - 1450 °C	1540 °C	El Tipo 304 requiere menos calor para producir la fusión, lo cual significa una soldadura más rápida para el mismo calor, o menos calor para la misma velocidad
Respuesta magnética	No magnético a todas las temperaturas ⁽¹⁾	Magnético hasta más de 705 °C	Los aceros inoxidables al níquel no están sujetos a la soldadura de arco
Velocidad de conductividad térmica A 100 °C A 650 °C	28% 66%	100 % 100%	El Tipo 304 conduce el calor mucho más lentamente que los aceros al carbono, lo cual produce gradientes de temperatura más pronunciados. Esto acelera la deformación. Una difusión más lenta del calor a través del metal de base significa que la zona soldada permanece caliente por más tiempo, resultado de lo cual puede ser una mayor precipitación de carburos, a menos que se usen medios artificiales para extraer el calor, tales como barras enfriadoras, etc
Resistencia Eléctrica (aleado) (microhm.cm, aprox.) a 20 °C a 885 °C	72.0 126.0	12.5 125	Esto es importante en los métodos de fusión eléctrica. La resistencia eléctrica más grande del tipo 304 resulta en la generación de más calor para la misma corriente, o la misma cantidad de calor con menos corriente, comparado con los aceros al carbono. Esta propiedad, junto con una menor velocidad de conductividad térmica, resulta en la efectividad de los métodos para soldadura por resistencia del Tipo 304
Expansión térmica en el rango indicado pulg./pulg./°C x 10 ⁻⁶	17.6 (20 - 500 °C)	11.7 (20 - 628 °C)	El tipo 304 se expande y contrae a una velocidad más alta que el acero al carbono, lo cual significa que se debe permitir expansión y contracción a fin de controlar la deformación y el desarrollo de tensiones térmicas después del enfriamiento. Por ejemplo, para el acero inoxidable deben usarse más puntos de soldadura que para el acero al carbono

(1) Los aceros inoxidables dúplex son magnéticos.

Propiedades físicas de los aceros inoxidables austeníticos

Las propiedades físicas de los aceros al carbono y los inoxidables austeníticos son bastante diferentes, y esto requiere una revisión de los procesos de soldadura. En la Tabla I de Propiedades Físicas, se incluyen algunos ítems como el punto de fusión, expansión térmica, conductividad térmica, y otros que no cambian significativamente con el tratamiento térmico o mecánico. Como se ilustra en esta Tabla, el punto de fusión de los grados austeníticos es menor, así que se requiere menos

calor para lograr la fusión. Su resistencia eléctrica es mayor que la de los aceros comunes, así que se requiere menos corriente eléctrica para la soldadura. Estos aceros inoxidables tienen un coeficiente de conductividad térmica menor, lo cual causa que el calor se concentre en una zona pequeña adyacente a la soldadura. Los aceros inoxidables austeníticos también tienen coeficientes de expansión térmica aproximadamente 50% más grandes que los aceros al carbono, lo cual requiere más atención en el control de la distorsión y deformación.

Factores que afectan la resistencia a la corrosión de las soldaduras en acero inoxidable

Antes de discutir las pautas para la soldadura, es útil describir los tipos de soldaduras y las superficies de acero inoxidable que darán el mejor resultado en ambientes corrosivos. Estos son factores que pueden controlar los soldadores, y no la elección del material, la cual se hace generalmente por el usuario final o por el Ingeniero en Materiales. La fabricación de equipos resistentes a la corrosión debiera ser un esfuerzo conjunto de la selección de la aleación correcta y entonces emplear las prácticas correctas de fabricación y soldadura. Ambos elementos son esenciales.

Penetración completa de las soldaduras

Es bien sabido que para lograr una óptima resistencia, las soldaduras a tope deben penetrar completamente. En servicio corrosivo, cualquier rendija resultante de la falta de penetración es un sitio potencial para el desarrollo de la corrosión por rendijas. Un ejemplo típico de una rendija indeseable es una fusión incompleta en la pasada de raíz en la soldadura en un caño, tal como se muestra en la figura 14-31

En algunos ambientes, la corrosión tiene lugar en la rendija, la cual, a su vez, puede dar lugar a una falla en la junta soldada.

Sellar las rendijas en las soldaduras

Las rendijas entre dos superficies de acero inoxidable tales como en los soportes para bandejas en un tanque, tal como se muestra en la figura 14-16, también favorece la corrosión por rendijas. Evitar tales rendijas es una responsabilidad del Ingeniero de Diseño. Sin embargo, es útil que aquellos que están haciendo el equipo lo ayuden a eliminar las rendijas siempre que sea posible.

Contaminación por hierro

Cuando un equipo nuevo de acero inoxidable desarrolla puntos de herrumbre, casi siempre es el resultado de la contaminación por partículas de hierro. En algunos ambientes, si el hierro no se elimina, puede tener lugar un severo ataque en forma de corrosión por picado. En atmósferas no tan exigentes, las partículas de hierro pueden actuar como un contaminante, afectando la pureza del producto, o presentar una apariencia superficial desagradable a la vista.

El hierro libre resulta a menudo incluido en la superficie del acero inoxidable durante las operaciones de formado o soldado. Algunas reglas a seguir para evitar la inclusión de partículas de hierro son:

No permitir el contacto de las superficies de acero inoxidable con elementos de hierro o acero. El contacto podría provenir de herramientas de izado, mesas de acero o rack de almacenamiento, por citar algunas.

No usar herramientas, tales como discos abrasivos que hayan sido previamente usados con hierro o acero ordinarios, ya que podrían tener hierro incrustado.

Usar sólo cepillos de acero inoxidable que nunca hayan sido usado con hierro o acero al carbono. Nunca usar cepillos de alambre de acero al carbono.

No dejar las planchas u hojas de acero inoxidable en el piso, expuestas al tráfico. Se deben guardar en posición vertical.

Si es posible, realizar las operaciones de fabricación de los equipos de acero inoxidable en un lugar alejado de donde se realicen operaciones con hierro o acero al carbono, para evitar contaminaciones con partículas de hierro provenientes de amoladoras, herramientas de corte o arenadoras.

La detección del hierro libre se discute más adelante.

Evitar óxidos superficiales de la soldadura

Para una mejor resistencia a la corrosión, las superficies de acero inoxidable deben estar libres de óxidos superficiales. Los óxidos pueden estar en la forma de tinte de calor, en el otro lado de la chapa, como resultante de la soldadura, o tinte de calor en la soldadura, o en la zona afectada por el calor (ZAC). Los óxidos también se pueden desarrollar en el lado interno de las cañerías soldadas con una purga inadecuada del gas inerte.

Los óxidos pueden variar desde un color pajizo, pasando por el púrpura, hasta negro. Cuanto más coloreado es el óxido, más grueso es, y más fácilmente desarrollará la corrosión por picado, causando un serio ataque al metal subyacente. Se debe entender que los óxidos son peligrosos en ambientes corrosivos.

Normalmente, los óxidos no necesitan ser eliminados cuando el acero inoxidable operará a alta temperatura, donde los óxidos se formarían nuevamente. El tinte de calor a menudo conduce a la corrosión, una vez expuesto el acero inoxidable a la atmósfera u otro ambiente levemente corrosivo.

Cuando después de haber tomado todas las precauciones normales, todavía hay óxidos superficiales, deben ser eliminados mediante decapado ácido, blastinado o algunos de los otros métodos que se discuten en la Limpieza de Posfabricación.

Otros defectos relacionados con la soldadura

Se listan tres defectos relacionados con la soldadura, y el procedimiento para su eliminación:

Las marcas de encendido del arco dañan la capa protectora del acero inoxidable y crean imperfecciones similares a rendijas. Los puntos de parada de la soldadura pueden crear defectos similares a pinchazos de alfiler en el metal soldado. Ambas imperfecciones se deben eliminar mediante un ligero pulido con abrasivos de grano fino.

Las salpicaduras de soldadura crean pequeñas marcas donde el metal fundido toca la superficie y se adhiere. La capa protectora de óxido del acero inoxidable es penetrada y se crean pequeñas rendijas donde esta capa es más débil. Las salpicaduras de soldadura se pueden eliminar fácilmente aplicando una pasta a ambos lados de

la soldadura, que previene la salpicadura. Esta pasta, junto con las salpicaduras, se lavan en el proceso posterior de limpieza.

La escoria de algunas soldaduras practicadas con electrodos revestidos es difícil de eliminar completamente. Pequeñas partículas de escoria resisten la limpieza y permanecen particularmente donde hay pequeñas hendiduras u otras irregularidades.

Estas partículas crean rendijas, y deben ser eliminadas mediante cepillado, un ligero pulido o blastinado con materiales libres de hierro.

Calificación para soldadura

Es una práctica normal para los fabricantes de equipos de proceso desarrollar o mantener especificaciones para procedimientos de soldadura, para los distintos tipos. Los operarios soldadores se prueban y certifican mediante la realización de soldaduras de calidad aceptable. Hay un número de códigos de Sociedades Industriales que gobiernan las calificaciones para la soldadura. Los dos más usados en Estados Unidos para equipos resistentes a la corrosión son:

- American Society of Mechanical Engineers, ASME, Boiler and Pressure Vessel Code - Sección IX, Welding and Brazing Qualifications;
- American Welding Society, AWS, Standard for Welding Procedure and Performance Qualification - AWS B2.1

Internacionalmente, cada país tiene sus propias normas o códigos individuales. Afortunadamente, hay una tendencia hacia la aceptación o intercambio de especificaciones, en el interés de eliminar recalificaciones no deseadas.

Común a estos códigos es la identificación de variables esenciales que establecen cuándo se requiere un nuevo proceso de calificación. Las variables esenciales difieren para cada procedimiento de soldadura, pero algunos ejemplos comunes pueden ser:

- cambio en el metal de base a ser soldado (número P)
- cambio en el metal de relleno (número F)
- cambio significativo en el espesor a ser soldado
- cambio en el gas inerte utilizado
- cambio en el proceso de soldadura utilizado

La Sección IX de la Norma ASME de clasificación de números P, a menudo determina si se necesita una nueva Especificación de Proceso de Soldadura. Un cambio de número P a otro en el mismo metal de base requiere una recalificación. También las juntas entre dos metales distintos de diferentes números P requieren una Especificación de Proceso de Soldadura separada, aún cuando las pruebas de calificación hayan sido hechas para cada uno de los metales base soldados entre sí. Los números P son:

Número P	Metal de Base
8	Aceros inoxidables austeníticos en la Tabla VI, desde el tipo 304 hasta el 347 y la aleación 254 SMO, más las fundiciones similares a la CF de la Tabla VII
10H	Aceros inoxidables dúplex, incluidas las aleaciones 255 y 2205, y las fundiciones CD 4Mcu
45	Aleaciones 904L y 20Cb-3 y aleaciones de molibdeno al 6% de la Tabla VI, excepto la aleación 254 SMO

No se ha asignado a todas las aleaciones un número P. Las aleaciones que no tengan un número requieren una calificación individual, aún cuando se haya calificado para aleaciones similares en composición. Si una aleación no está listada en la Tabla de Números P, se deberá contactar al fabricante para determinar si a esa aleación se le ha asignado recientemente un número P.

Entrenamiento del Soldador

Para cumplir con las especificaciones para calificación en soldadura, tales como la ASME y ASTM, los soldadores deben pasar por una prueba de calificación. Un programa de entrenamiento previo no sólo es esencial antes de tomar las pruebas de calificación, sino que también aseguran la calidad en la ejecución de la soldadura. Los aceros inoxidables son tan diferentes de los aceros ordinarios en sus características, que se debe dar tiempo a los operarios para entrenamiento y práctica. Una vez que están familiarizados con los aceros inoxidables, muchos de ellos los prefieren. Los entrenamientos deben cubrir no sólo los diferentes metales de base y procesos de soldadura, sino también las formas a ser soldadas, tales como tubos o chapas finas, o soldaduras en posiciones poco usuales.

Preparación para la soldadura

Los aceros inoxidables deben ser manejados con un poco más de cuidado que los aceros ordinarios, en el corte y montaje. El cuidado que se tome en la preparación para la soldadura será tiempo bien usado, lo que incrementará la calidad de la soldadura y la terminación del producto, lo cual dará un óptimo rendimiento en servicio.

Corte y preparación de las juntas

Con excepción del corte oxiacetilénico, el acero inoxidable puede ser cortado con los mismos métodos utilizados para el acero al carbono. El corte oxiacetilénico resulta en la formación de óxidos de cromo refractarios, que impiden un corte preciso y parejo. El espesor y la forma de las partes a ser cortadas o preparadas para la soldadura, son los que dictan cuáles de los métodos que se muestran en la Tabla II serán los más apropiados.

Diseño de las juntas

El diseño de juntas utilizadas para acero inoxidable, es similar a las de los aceros ordinarios. El diseño de junta

seleccionada debe producir una soldadura de resistencia apropiada y desempeño en servicio, manteniendo bajos los costos. Las soldaduras a tope deberán ser con penetración completa, para servicio en atmósferas corrosivas. Los filetes de soldadura no necesitan tener penetración completa, siempre que se suelden ambos lados y las puntas para evitar espacios vacíos que puedan juntar líquido y permitir la corrosión por rendijas.

La conexión de secciones de tubería mediante filetes de soldadura deja una rendija grande en el interior del diámetro, lo cual favorece una corrosión por rendijas y

microbiológica, y debe ser prohibida en toda construcción de cañerías de acero inoxidable, para todo servicio.

El acero inoxidable fundido de la soldadura es bastante menos fluido que el acero al carbono, y la profundidad de la penetración de la soldadura no es tan grande. Para compensar, las juntas de soldadura en acero inoxidable deberán tener un chaflán y un espacio para la pasada de raíz más anchos. El proceso de soldadura también influencia el diseño de junta óptimo. Por ejemplo, la soldadura MAG por spray de arco, da una penetración mucho más profunda que la MAG por cortocircuito.

Tabla II

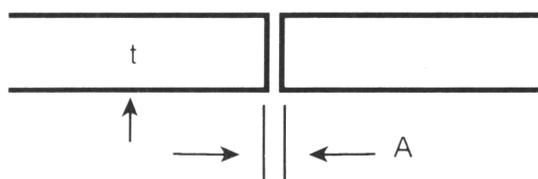
Métodos de corte de Acero Inoxidable

Método	Espesor	Comentario
Guillotina	Láminas, cintas, placas finas	Preparar el borde expuesto al ambiente para eliminar rendijas
Corte por sierra y abrasivo	Amplio rango de espesores	Eliminar lubricantes o líquidos de corte antes la soldadura o tratamiento térmico
Maquinado	Amplio rango de formas	Eliminar lubricantes o líquidos de corte antes de la soldadura o tratamiento térmico
Corte con arco de plasma	Amplio rango de espesores	Amolar las superficies cortadas para limpiar el metal
Corte con polvo metálico	Amplio rango de espesores	Corte menos preciso que con plasma, se deben eliminar todas las escorias
Corte por arco de grafito	Usado para acanalar la parte de atrás de soldaduras y cortar formas irregulares	Amolar las superficies cortadas para limpiar el metal

El diseño de juntas típico para la soldadura de chapas y planchas se muestra en la Figura 1-1 a 1-5. El diseño típico para juntas de tubos con soldadura MIG, ya sea con o sin insertos consumibles, se muestran en las figuras 1-6

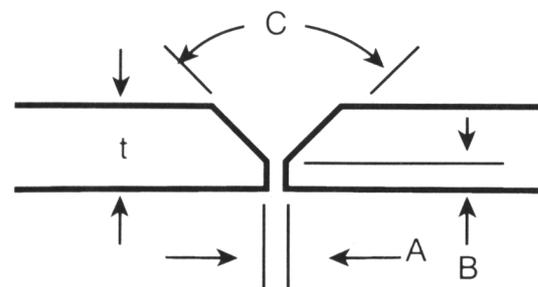
y 1-7. Los insertos de anillos consumibles se usan ampliamente, y se recomiendan para una penetración adecuada.

Figura 1-1: Junta para soldadura a tope de chapas



t máximo = 3.2 mm A = 0.8 - 2.3 mm

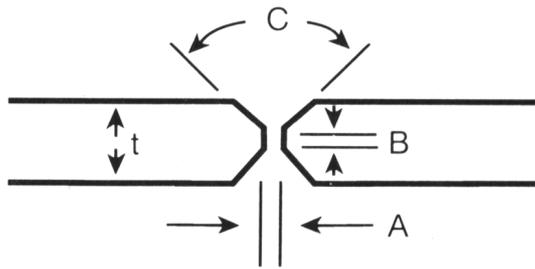
Figura 1-2: Junta en "V" para chapas y placas



t máximo = 12.7 mm A = 0.8 - 2.4 mm

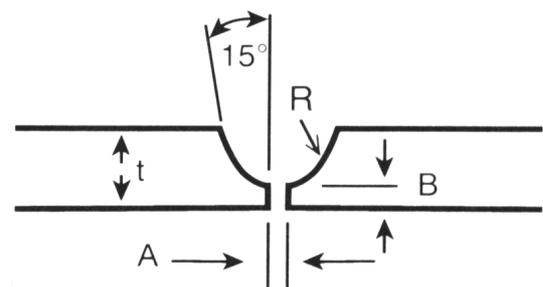
B = 1.6 - 2.4 mm C = 60 a 80°

Figura 1-3: Junta doble "V" para placas



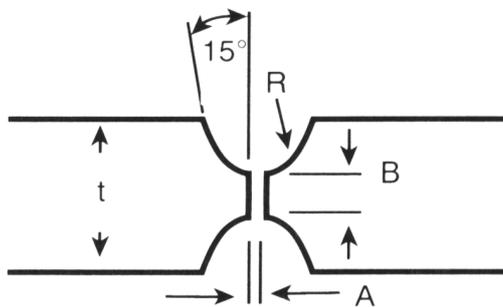
$t = 12.7 \text{ mm}$ o mayor $A = 0.8 - 2.4 \text{ mm}$
 $B = 1.6 - 2.4 \text{ mm}$ $C = 60 \text{ a } 80^\circ$

Figura 1-4: Junta "U" para placas



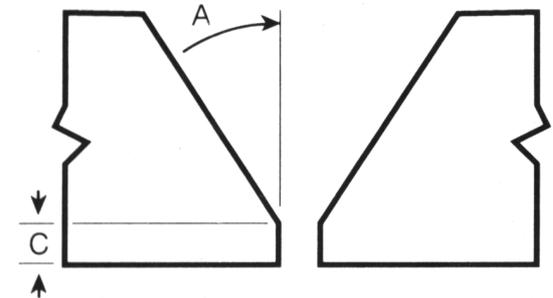
$t = 19 \text{ mm}$ y más $A = 1.6 \text{ mín.} - 3.2 \text{ máx. (mm)}$
 $B = 1.6 - 2.4 \text{ mm}$ $R = 6.4 \text{ mm mín.}$

Figura 1-5: Junta doble "U" para placas



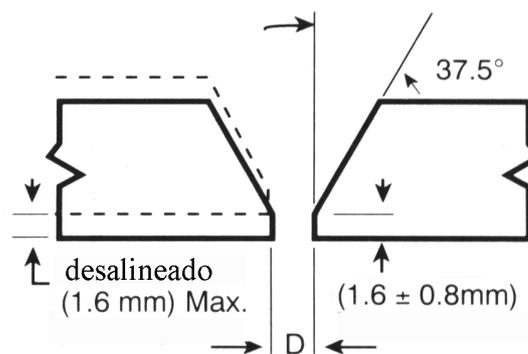
$t = 19 \text{ mm}$ y más $A = 1.6 \text{ mm mín.} - 3.2 \text{ mm}$
 $B = 1.6 \text{ a } 2.4 \text{ mm}$ $R = 6.4 \text{ mm mín.}$

Figura 1-6: Junta para caños con inserto consumible



$A = 37.5 \pm 2.5^\circ$ $C = 1.8 \pm 0.9 \text{ mm}$

Figura 1-7: Junta para caño sin inserto consumible



$D <$ diámetro del metal de aporte

$D >$ diámetro del metal de aporte para el método de alimentación continua

Limpieza en la preparación de la soldadura

El área a soldar que debe ser limpiada incluye los bordes de la junta y 50 a 75 mm de la superficie adyacente. Una limpieza inapropiada puede causar defectos en la soldadura tales como fisuras, porosidad o falta de fusión. La resistencia a la corrosión de la

soldadura y de la zona afectada por el calentamiento se puede reducir sustancialmente si se deja material extraño en la superficie antes de la soldadura o una operación de calentamiento. Después de limpiadas, las juntas deben ser cubiertas, a menos que se realice inmediatamente la soldadura.

Oxido y otras capas superficiales

Las juntas a ser soldadas deberán estar libres de los óxidos superficiales que quedan frecuentemente después del corte por métodos térmicos. Estos óxidos están compuestos preferentemente por compuestos de cromo y níquel, los cuales se funden a una temperatura mucho mayor que el metal de base, y por lo tanto no se funden durante la soldadura. A menudo una capa de óxido queda atrapada en la soldadura, resultando en un defecto que es difícil detectar por radiografía. Esto es una diferencia básica con la soldadura del acero ordinario. Con el acero, los óxidos de hierro funden a casi la misma temperatura que el metal de base. Si bien se considera mala práctica soldar sobre una capa de óxido en acero, esto no presenta el problema causado por los óxidos en el acero inoxidable. Las diferencias entre las temperaturas de fusión del metal y sus óxidos se presentan en la Tabla III

Tabla III

Temperatura de fusión de metales y óxidos metálicos

Metal	Temperatura de fusión (°C)	Oxido metálico	Temperatura de fusión (°C)
hierro	1537	Fe ₂ O ₃	1565
Níquel	1454	NiO	1982
AISI 304	1400 - 1454	Cr ₂ O ₃	2266

Los productos de acero inoxidable forjados despachados por las usinas, normalmente están libres de óxidos y no necesitan tratamiento especial antes de ser soldados. Cualquier capa de óxido será fina y no causará inconvenientes en la soldadura. Con metales muy finos, tales como cinta por debajo de 0.25 mm, puede ser necesaria una limpieza especial con vapor, dado que capas finas de óxido superficial pueden quedar atrapadas en la soldadura que se solidifica muy rápido.

Los aceros inoxidables que han estado en servicio, a menudo requieren una limpieza especial. Si la aleación ha estado expuesta a altas temperaturas, la superficie estará fuertemente oxidada, carburizada o sulfurizada. Estas capas deben ser eliminadas mediante esmerilado o maquinado. La limpieza con cepillos de alambre pule y no remueve los óxidos firmemente adheridos. El equipamiento de acero inoxidable que ha estado en servicio químico, puede estar contaminado por el producto. Un buen ejemplo es un medio cáustico, que si se deja en la superficie durante la soldadura, la misma y la zona calentada desarrollarán fisuras. Es una práctica recomendable neutralizar los residuos alcalinos con una solución medianamente ácida y los ácidos con una solución medianamente alcalina, antes de proceder a la reparación de equipos que hayan estado en contacto con elementos químicos. Al tratamiento neutralizador debe seguir siempre un lavado con agua caliente para eliminar los residuos.

Elementos contaminantes

Hay un número de elementos y compuestos que deben ser eliminados de la superficie antes de la soldadura. Si no

se sacan, el calor de la soldadura puede causar fisuras, defectos de soldadura o disminución en la resistencia a la corrosión en la soldadura y en la zona afectada por el calor. Los elementos a ser evitados y su fuente común son:

Azufre, carbono	Hidrocarburos tales como fluidos de corte, grasa, aceite, ceras e imprimantes
Azufre, fósforo, carbono	Crayones para marcar y pinturas
Plomo, zinc, cobre	Herramientas tales como martillos, barras de respaldo de cobre, pinturas ricas en zinc.
Suciedad del taller	Cualquiera o todos de los ya citados

La presencia de azufre, fósforo y metales de bajo punto de fusión pueden causar fisuras en la soldadura o en la zona afectada por el calor. El carbono o materiales carbonosos dejados en la superficie antes de la soldadura, pueden ser incluidos en la misma, resultando en una capa superficial con alto carbono, que puede reducir la resistencia a la corrosión en determinados ambientes.

La limpieza para eliminar estos contaminantes se puede realizar siguiendo unas pocas recomendaciones, junto con el sentido común. Los contaminantes metálicos y materiales que no tengan una capa de grasa, se pueden eliminar mediante un pulido o blatinado. Es esencial que los elementos que se usen para este tratamiento no estén contaminados con hierro de operaciones anteriores. Un tratamiento con ácido nítrico, seguido de una neutralización, puede también eliminar metales de bajo punto de fusión, sin afectar al acero inoxidable.

Los contaminantes a base de aceite o grasa (hidrocarburos) deben ser eliminados mediante limpieza con solventes, debido a que no son eliminados mediante tratamiento ácido o con agua. Los trabajos grandes se limpian normalmente mediante paños saturados con solvente. Otros métodos aceptables incluyen inmersión, trapeado o pulverizado con soluciones alcalinas, emulsiones, solventes, detergentes o una combinación de éstos; por limpieza con vapor, con o sin un limpiador, o por agua a alta presión. La norma ASTM A380, que refiere a los procedimientos para limpieza y decapado de equipos de acero inoxidable, es una guía excelente para fabricantes y usuarios.

Un procedimiento típico para eliminar aceites o grasas incluye:

- Eliminar el exceso de contaminante por limpieza con un trapo limpio
- Limpiar el área a soldar (por lo menos 50 mm a cada lado de la soldadura) con un solvente orgánico, tales como solventes alifáticos, clorados (ver precauciones más abajo) o mezclas de los dos. Usar únicamente solvente limpio y trapos sin uso previo.

- Eliminar los solventes secándolos con trapo limpio
- Asegúrese de la completa limpieza. Un residuo en el trapo de secado puede indicar limpieza incompleta. Donde el tamaño lo permita, utilizar el test del rompimiento de la película de agua.

La selección de los solventes para limpieza involucra algunas consideraciones, aparte de su habilidad para eliminar grasas o aceites. Dos precauciones son las que siguen:

- Solventes clorados: Muchos solventes comerciales contienen clorados y son efectivos en la limpieza de partes maquinadas y componentes libres de fisuras. El problema potencial con solventes clorados es que pueden permanecer y concentrarse en fisuras, y más tarde iniciar procesos de corrosión por rendijas o por stress. Ha habido innecesarias y costosas fallas en el acero inoxidable de intercambiadores de calor después de limpiarlos con solventes clorados. La limpieza de áreas abiertas con solventes clorados no presenta problema, pero antes de arriesgar una mala aplicación, algunas organizaciones prohíben el uso de cualquier solvente clorado para cualquier tarea. Los solventes no clorados se prefieren para la limpieza del acero inoxidable, y se debe usar siempre en la limpieza de equipos y piezas con ranuras.
- Riesgos para la salud: Están incluidos carcinógenos, agentes tóxicos, irritantes, corrosivos, sensibilizantes y cualquier agente que dañe los pulmones, piel, ojos o la mucosa de las membranas. Cada Organización debe asegurar que los solventes que utiliza no son peligrosos para el personal o equipo. Además del efecto tóxico, se debe prever el venteo de vapores explosivos, y la evacuación segura de las soluciones usadas. Obviamente estos procedimientos deberán estar de acuerdo con las disposiciones de los Organismos Estatales. Los solventes utilizados en la limpieza previa de las soldaduras incluyen, pero no están limitados a:
 - no clorados: tolueno, metil etil cetona, y acetona
 - solventes clorados: 1.1.1 tricloroetano

Todos deben ser utilizados de acuerdo con los requisitos de las normas regulatorias y las instrucciones del fabricante.

Instalación y Montaje

Una buena alineación de las juntas puede reducir el tiempo de la soldadura. Es esencial que las piezas a ser soldadas estén cuidadosamente alineadas para lograr un buen resultado. Cuando una de ellas es considerablemente más gruesa que la otra, p. Ej. la cubierta de un tanque más gruesa que la pared, el lado de la cubierta debe ser maquinado para rebajarlo, para reducir la concentración de tensiones. Las juntas con distancias variables requieren ajustes especiales por parte del soldador, y pueden dar lugar a quemaduras o falta de penetración. Cuando el volumen de las partes iguales es grande, el uso de sostenes a menudo se justifica económicamente.

Sostenes y posicionadores

Los sostenes se diseñan habitualmente para cada montaje particular, y mantienen a las partes juntas durante la operación de soldadura. Cuando los sostenes están ligados a posicionadores, existe la ventaja adicional de que la soldadura se puede realizar en la posición más conveniente. Algunas ventajas de usar sostenes son:

- mejor ajuste de las juntas
- menos tiempo de punteado y soldadura
- se minimiza la distorsión
- la terminación del montaje se hace con tolerancias menores

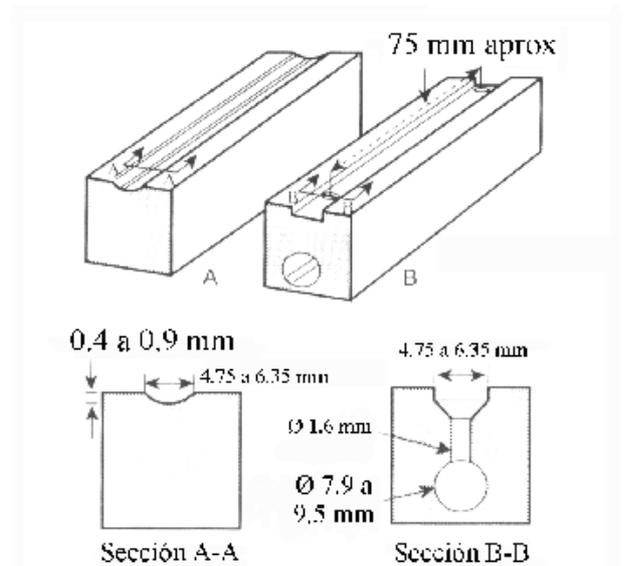
Es importante que la superficie de los sostenes que sostienen las partes de acero inoxidable no introduzcan contaminación por hierro. Esto se puede evitar haciendo que las superficies en contacto con las piezas de acero inoxidable, también sean del mismo material. Estos sostenes deberán usarse sólo para montaje de piezas de acero inoxidable.

Materiales de respaldo

Se pueden utilizar materiales de respaldo en la soldadura de chapas o planchas, a menos que se puedan soldar ambos lados. Sin un respaldo, la parte de abajo puede tener una penetración errática, con fisuras, huecos y oxidación excesiva. Tales defectos reducen la resistencia de la soldadura y pueden iniciar una corrosión acelerada. El cobre, con su alta conductividad térmica, es el material más usado para barras de respaldo.

Los diseños típicos de barras de respaldo para usar con o sin gas de respaldo, se muestran en la *Figura 2*.

Figura 2
Diseño de ranuras en barras de respaldo
 (A) ranura estándar para uso sin gas de respaldo
 (B) ranura cuadrada empleada con gas de respaldo



En una operación normal de soldadura, la barra de cobre enfría el metal que se suelda. El arco no debe ser

mal direccionado al punto tal que el cobre se funde y se incorpore dentro de la soldadura de acero inoxidable, o resultará una rajadura en la soldadura. Es una buena práctica decapar después de soldar para eliminar trazas de cobre de la superficie e imprescindible si a la soldadura sigue un tratamiento de temple.

El respaldo con argón provee una excelente protección al lado interno de la soldaduras con TIG. Ayuda a controlar la penetración y mantiene una superficie brillante y limpia. El nitrógeno también se usa como gas de respaldo, y tiene un precio ventajoso comparado con el argón. Sin embargo, el nitrógeno no debiera introducirse dentro de la atmósfera del arco, porque podría alterar la composición de la soldadura.

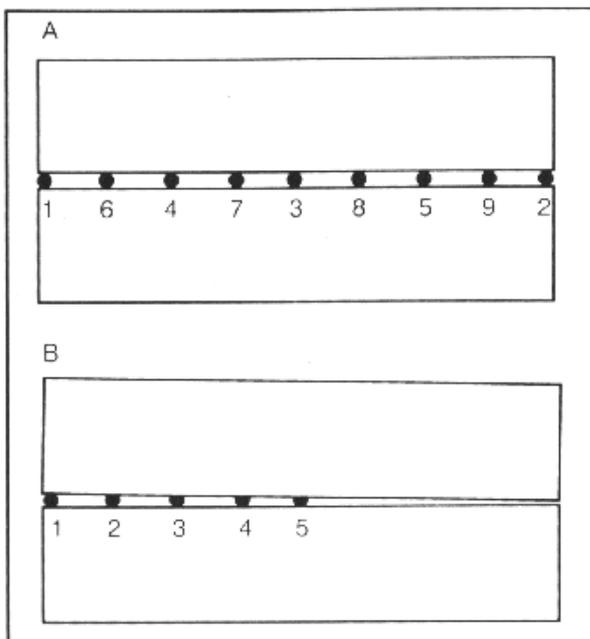
Cuando una barra de cobre de respaldo o una purga con gas inerte no sea práctico, hay productos cerámicos, cintas y pastas disponibles comercialmente. Estos ofrecen alguna protección contra el quemado, pero dan poca protección contra la oxidación, así que será necesaria una limpieza final por medios abrasivos o decapado con ácidos.

Punteado de la soldadura

Las juntas no soportadas con sostenes, se deberán puntear para mantener una alineación y espaciado uniforme. Las puntadas se deberán hacer en secuencia para minimizar el efecto de contracción. Para realizar el montaje de dos chapas, se deberán hacer dos puntadas en cada punta de la chapa, y luego una en el medio, tal como se muestra en la Figura 3 (A). La Figura 3 (B) muestra cómo se acercan las chapas cuando las puntadas se realizan desde un extremo hacia el otro.

Figura 3

La secuencia correcta de puntadas se muestra en A. Cuando las puntadas se realizan sólo desde un lado, los bordes se juntan, como se muestra en B.



Los puntos de soldadura en el acero inoxidable deberán estar considerablemente más juntos que lo que sería necesario para el acero al carbono, dado que una expansión térmica más grande del acero inoxidable causa mayor distorsión. Una guía aproximada es usar la mitad de la distancia que se usa en el acero al carbono, cuando la distorsión sea un factor importante.

La longitud de las puntadas de soldadura deberán ser tan cortas como 3 mm, o un pequeño punto de soldadura para materiales finos, y hasta 25 mm de longitud para placas gruesas. Lo que es más importante, es que las puntadas no causen defectos en la soldadura final. Las puntadas gruesas o muy altas deberán ser esmeriladas. El tamaño de las puntadas se controla más fácil con el proceso TIG, siendo una buena elección para realizar puntadas de soldadura. Aquellas que se incorporen a la soldadura final deberán ser limpiadas con cepillo o esmeriladas. Se deberán inspeccionar para comprobar que no tengan rajaduras, o eliminarlas por esmerilado.

Montaje de juntas de tuberías para soldadura TIG

Los puntos de soldadura son importantes porque normalmente quedan incluidos en la soldadura final. La purga con gas inerte antes de este proceso es necesaria como protección contra la oxidación. En las juntas por puntos con insertos consumibles, o soldaduras de raíz abiertas, como se las suele llamar, hay una fuerte tendencia de las fuerzas de deformación a cerrar la junta. Para mantener la separación deseada, puede ser necesario utilizar espaciadores e incrementar el tamaño y la cantidad de puntos de soldadura. Los espaciadores normalmente son pequeños pedazos de alambre limpio de acero inoxidable de diámetro adecuado. Cualquier punto de soldadura defectuoso o fisurado debe ser eliminado mediante esmerilado. Ambos extremos de los puntos de soldadura en raíz abierta deberán ser biselados para ayudar a que se fundan dentro de la soldadura de raíz.

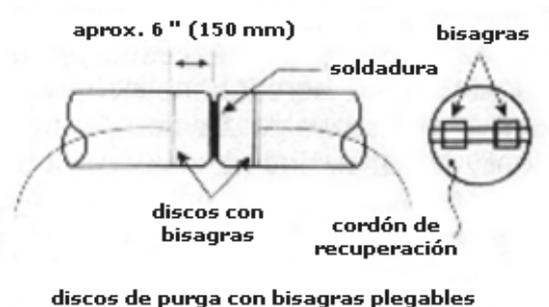
La necesidad de mantener una separación adecuada durante la pasada de soldadura de raíz se debe a dos razones. La primera es que un espaciado uniforme ayuda al soldador a producir un contorno óptimo en el diámetro interno del tubo. Cuando la junta es muy cerrada, hay una tendencia a raíces cóncavas en lugar de la deseable, que es levemente convexa. La segunda es que se necesita mantener una composición química uniforme en la pasada de raíz. Para muchas aplicaciones en corrosión, la adición de metal de aporte es esencial para que la soldadura tenga una resistencia a la corrosión similar a la del metal de base. Si la junta es muy chica, será imposible fundir una cantidad adecuada de metal de aporte dentro de la soldadura de raíz. Por ejemplo, los aceros inoxidables con el 6% de molibdeno requieren una adecuada separación de la raíz y el agregado de un metal de aporte adecuado.

La purga durante la soldadura de raíz en cañerías

El interior del caño debe ser purgado con un gas inerte adecuado antes de la pasada de raíz con TIG. La falta de purga puede resultar en una superficie muy oxidada en la parte interior del caño, con una resistencia a la corrosión menor. La purga se realiza normalmente con argón puro,

pero también se suele utilizar el nitrógeno, debido a su bajo costo. Con los aceros inoxidables dúplex, el respaldo gaseoso con nitrógeno compensa la pérdida del mismo en el metal soldado, y devuelve a la soldadura su resistencia a la corrosión por picado. En Europa se utiliza ampliamente una mezcla de nitrógeno con 10% de hidrógeno para purgar los caños de aceros austeníticos, lo cual no se recomienda para aceros dúplex.

La purga es una operación en dos pasos. La primera se realiza antes de la soldadura para desplazar el aire que contiene el caño. Para ahorrar tiempo y gas, se usan baffles a ambos lados de la junta, con el fin de reducir el área de purga.



discos de purga con bisagras plegables

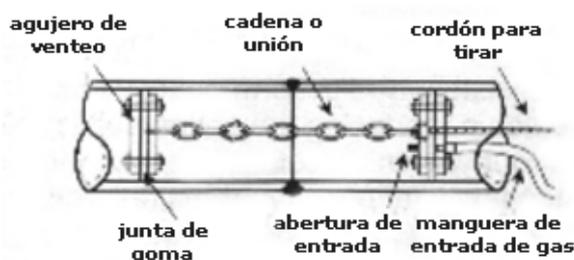


Figura 4 Instalación típica para purga de caños

Las juntas de la soldadura de raíz abierta deberán ser encintadas y los espacios muertos venteados antes de la purga. El contenido interno de oxígeno deberá bajarse a menos del 1% antes de la soldadura. Una instalación típica de purga se muestra en la Figura 4.

Antes de comenzar la soldadura, el flujo de la purga deberá reducirse hasta un punto donde sólo haya una ligera presión positiva. La cinta que cubre la junta deberá ser quitada sólo momentos antes de realizar la soldadura. Después de la primera pasada, la purga deberá mantenerse durante las próximas dos pasadas con metal de aporte, con el fin de minimizar el desarrollo de color en la zona afectada por el calor (oxidación) en el interior de la cañería. Esto es especialmente importante cuando no sea práctico el decapado después de la soldadura.

Procesos de soldadura

Soldadura por arco de metal protegido

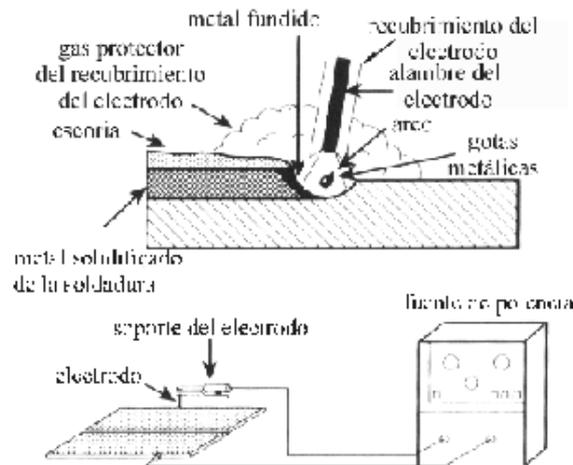
Es un proceso versátil, ampliamente utilizado para la soldadura del acero inoxidable, cuando los tamaños o cantidades no justifican la soldadura automática. El electrodo es un alambre sólido recubierto con una capa de decapante extruido, aunque algunos fabricantes utilizan

un alambre hueco. La zona del arco en este proceso se muestra en la Figura 5.

La soldadura se lleva a cabo manualmente con el soldador manteniendo control sobre la longitud del arco y dirigiéndolo hacia la junta a soldar. El recubrimiento del electrodo tiene estas funciones:

- la cubierta exterior de decapante no se quema tan rápido como el alambre del electrodo, lo cual ayuda a controlar la acción del arco y permite soldar en varias posiciones.
- El decapante se utiliza para aportar aleación al metal de soldadura. El alambre del electrodo no siempre es de la misma composición que el metal que se deposita en la soldadura, y por lo tanto es una mala práctica sacar el recubrimiento del electrodo y utilizar el alambre como metal de aporte en otro proceso como la soldadura TIG.
- El recubrimiento gaseoso de la descomposición del decapante excluye al oxígeno y nitrógeno del metal fundido.
- La escoria fundida que se forma sobre la soldadura protege al metal de la contaminación atmosférica y ayuda a dar forma al cordón de soldadura.

Figura 5 Soldadura por arco de metal protegido



Tipos de electrodo - Los electrodos se seleccionan primero en base al metal a soldar y luego de acuerdo con el tipo de recubrimiento. Normalmente son de una aleación de la misma composición que el metal de base, o más alta. En algunos casos, por razones de diseño, se utilizan electrodos de aleaciones especiales. El tipo de recubrimiento del electrodo generalmente se deja a criterio del fabricante. Los electrodos para aceros inoxidables se muestran en la Tabla IV.

La fórmula del recubrimiento del electrodo es una información celosamente guardada por el fabricante de éstos. El recubrimiento influencia cómo el electrodo opera en distintas posiciones, formas y uniformidad del cordón de soldadura. Hay dos clasificaciones básicas: 15 (óxido de calcio) y 16 (óxido de titanio). Por ejemplo, un

electrodo puede ser 308-15 o 308-16. Los fabricantes a menudo establecen sus propios sufijos para la designación de electrodos especiales, pero la Norma AWS A 5.4 - 81 reconoce sólo el -15 y -16.

Los electrodos tipo -15 son también conocidos como calcio - feldespatos o tipo básico. Se usan con corriente continua, electrodo positivo; pero algunas marcas operan con corriente alterna. Estos recubrimientos dan las soldaduras más limpias, con bajo contenido de nitrógeno, oxígeno e inclusiones. Las soldaduras tienden a ser más duras, dúctiles, más resistentes a la rotura y tienen la mejor resistencia a la corrosión. Los electrodos tienen buena penetración y se pueden usar en todas las posiciones, lo cual es deseable en un trabajo de montaje.

El recubrimiento de los electrodos tipo -16 generalmente tiene una mezcla de óxidos de calcio y titanio y se usan a menudo con corriente alterna. Son más populares que los del tipo -15 debido a sus mejores características de operación. El arco es estable y uniforme, con una buena transferencia de metal. El cordón de soldadura es uniforme, con un contorno entre plano y ligeramente cóncavo. La escoria se elimina fácilmente sin que quede un film secundario en el cordón de soldadura.

Otras guías en el empleo de soldadura por arco metálico protegido

Los factores que contribuyen a una alta calidad de las soldaduras en acero inoxidable incluyen el manejo y almacenamiento apropiado de los electrodos, una intensidad de corriente adecuada, junto con buenas técnicas para el encendido y apagado del arco.

Manejo y almacenamiento de los electrodos - Los electrodos de acero inoxidable se suministran normalmente en paquetes adecuados para un largo almacenamiento. Después que el paquete se abre, los electrodos se deben guardar en gabinetes calefaccionados a una temperatura recomendada por el fabricante. Si los electrodos han sido sobreexposados a la humedad, deben ser reacondicionados a una temperatura y tiempo indicados por el fabricante. Es preferible obtener las indicaciones precisas del fabricante, dado que la temperatura varía con el tipo de recubrimiento, pero a falta de esta información, las temperaturas más comunes que se usan son:

- almacenamiento de electrodos de cajas abiertas: 110 °C
- tratamiento de reacondicionamiento: 260 °C

La humedad en los recubrimientos es un inconveniente porque el hidrógeno generado puede causar porosidad en la soldadura. Los poros pueden estar en el interior de la soldadura o pueden alcanzar la superficie justo cuando el metal se solidifica, formando poros visibles. La porosidad puede ocurrir en soldaduras a tope cuando el contenido de humedad del recubrimiento es alto, pero ocurre más a menudo en los filetes de soldadura. La humedad excesiva en el recubrimiento de electrodos de aceros inoxidables dúplex tiene el riesgo añadido de causar fragilidad por hidrógeno en la fase

ferrítica, lo cual no es un inconveniente en los aceros inoxidables austeníticos de la serie 300. Los electrodos mojados no deben ser reacondicionados sino descartados.

La humedad en el recubrimiento no es la única causa de porosidad en la soldadura. Soldar sobre superficies pintadas o engrasadas puede dar lugar a poros del tipo de agujeros de gusano.

Intensidad de corriente - Los fabricantes de electrodos normalmente indican en cada paquete los rangos recomendados de intensidad de corriente para cada diámetro. Dado que los aceros inoxidables tienen una resistencia eléctrica más grande que los aceros comunes, los rangos de intensidad de corriente pueden estar entre un 25 y 50% de los utilizados para electrodos de acero común. Una intensidad de corriente excesiva sobrecalienta el recubrimiento del electrodo, lo cual a su vez causa una pérdida en la fuerza del arco y dificultad en dirigir el arco cerca de la punta del electrodo.

Encendido y apagado del arco - Las mismas técnicas que se utilizan para el encendido y apagado del arco en los electrodos de acero al carbono con bajo hidrógeno, tal como el E7018, son de aplicación en la soldadura de los aceros inoxidables.

Algunas guías son:

- encender el arco en algún punto de la junta de tal manera que el metal se vuelva a fundir. Un encendido del arco lejos de la soldadura puede generar grietas, y a menos que sean eliminadas, darán lugar a un área con resistencia a la corrosión disminuida.
- No extinguir abruptamente el arco dejando un cráter en la soldadura. Cuando el metal se solidifique, se formará una depresión, a menudo rellena con escoria. Una técnica aceptable es mantener el arco por unos momentos sobre la soldadura, y luego moverlo rápidamente hacia atrás, alzando el arco del cordón de soldadura. Otra técnica es apagar el arco contra una de las paredes de la junta después de llenar el cráter.
- Evitar un movimiento excesivo del electrodo. Los límites de una ondulación aceptable varían de acuerdo con el tipo de electrodo, y con los electrodos con recubrimiento de tipo básico (-15) a menudo se necesita una pequeña oscilación para lograr un buen cordón de soldadura. Sin embargo, una oscilación excesiva a menudo resulta en un mayor aporte de calor, que puede causar fisuras o deformaciones en la soldadura. La oscilación normalmente se limita a 2 - 2.5 veces el diámetro del alambre del electrodo.

Soldadura TIG

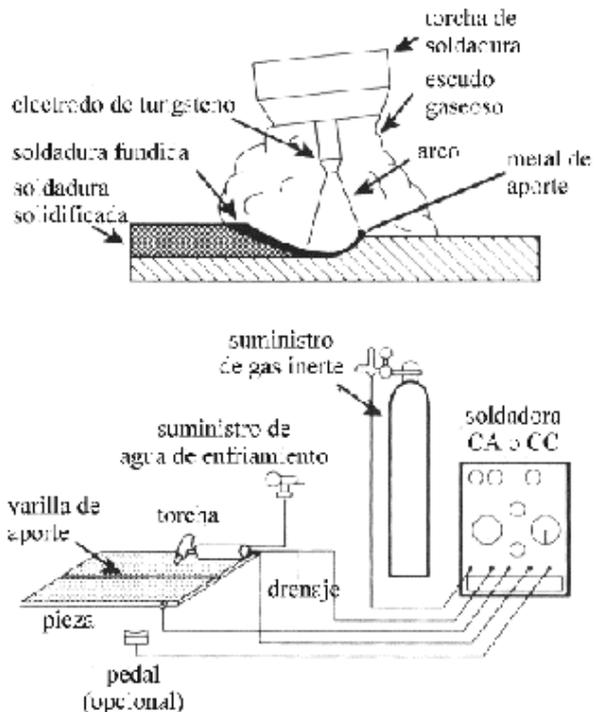
El proceso TIG (Tungsten Inert Gas) se usa ampliamente y es muy adecuado para soldar acero inoxidable. Un gas inerte (normalmente argón) se usa para proteger del aire al metal fundido de la soldadura. Si se necesita, se agrega metal de aporte en forma de alambre dentro del arco, bien manual o automáticamente. El proceso se ilustra en la Figura 6. Mediante el proceso TIG se puede soldar materiales tan finos como algunas

Tabla IV
Materiales de aporte sugeridos para la soldadura del acero inoxidable

Metal de base	Electrodo recubierto AWS o nombre común	Electrodo desnudo y varilla - AWS o nombre común	Metal de base	Electrodo recubierto AWS o nombre común	Electrodo desnudo y varilla - AWS o nombre común
AISI (UNS)	AWS A5.4 (UNS)	AWS A 5.9 (UNS)	AISI (UNS)	AWS A5.4 (UNS)	AWS A 5.9 (UNS)
304 (S30400)	E 308 ⁽¹⁾ (W30810)	ER 308 ⁽¹⁾ (S30880)	20 MO-6 ⁽²⁾ (N08026)	(3)	(3)
304L (S30403)	E 308L (W30813)	ER 308L (S30883)	20Cb-3 ⁽²⁾ (N08020)	E 320LR (W88022)	ER 320LR (N08022)
309 (S30900)	E 309 ⁽¹⁾ (W30910)	ER 309 ⁽¹⁾ (S30980)	FUNDICIONES		
310 (S31000)	E 310 (W31010)	ER 310 (S31080)	TIPO ACI (UNS)	AWS A 5.4 (UNS)	AWS A5.9 (UNS)
316 (S31600)	E 316 ⁽¹⁾ (W31610)	ER 316 ⁽¹⁾ (S31680)	CF-8 (J92600)	E 308 ⁽¹⁾ (W30810)	ER 308 ⁽¹⁾ (S30880)
316L (S31603)	E 316L (W31613)	ER 316L (S31683)	CF-3 (J92500)	E 308L (W30813)	ER 308L (S30883)
317 (S31700)	E 317 ⁽¹⁾ (S31780)	ER 317 ⁽¹⁾ (31780)	CF-8M (J92900)	E 316 ⁽¹⁾ (W31610)	ER 316 ⁽¹⁾ (S31680)
317L (31703)	E 317L (W31713)	ER 317L (S31783)	CF-3M (J92800)	E 316L (W31613)	ER 316L (S31683)
317 LM (S31725)	(3)	(3)	CN-7M (J95150)	E 320 LR (W88022)	ER 320 LR (N08022)
321 (S32100)	E 347 (W34710)	ER 321 (S52180)	CK-3Mcu (S32154)	(3)	(3)
347 (S34700)	E 347 (W34710)	ER 347 (S34780)	CA-6NM (J91540)	E 410 NiMo (W41016)	ER 410 NiMo (S41086)
Aleación 904L (N08904)	(3)	(3)	Notas:		
Aleación 254 SMO ⁽²⁾ (S31754)	(3)	(3)	(1) La "L" o grado bajo en carbono o un grado estabilizado se usa siempre para una construcción soldada, excepto en algunas pocas instancias donde es más importante una dureza un poco mayor que una mejor resistencia a la corrosión.		
AL-6XN ⁽²⁾ (N08367)	(3)	(3)	(2) Nombre comercial		
1925 hMo ⁽²⁾ (N08926)	(3)	(3)	(3) Para soldar estos aceros inoxidables se usa normalmente un metal de aporte con 9% o más de molibdeno, tales como los dos listados abajo		
25-6 Mo ⁽²⁾ (N08926)	(3)	(3)	Electrodo recubierto AWS A5.11 (UNS)	Electrodo desnudo y varilla AWS 5.14 (UNS)	

centésimas hasta espesores grandes, pero normalmente se usa hasta 1/4" (6.4 mm)

Figura 6 - Soldadura TIG



Algunas ventajas de este proceso de soldadura incluyen:

- no hay escoria que eliminar, lo cual minimiza las tareas de limpieza posterior.
- es un proceso de soldadura que se puede utilizar en todas posiciones, lo cual lo hace especialmente apto para la soldadura de cañerías.
- no hay salpicaduras de soldadura que limpiar.
- prácticamente no hay una variación en la composición química de la aleación del metal de base durante la soldadura.

Equipamiento para soldadura TIG

Lo estándar es utilizar corriente continua, con electrodo negativo. Una opción es utilizar corriente pulsante, que es adecuada para soldar materiales finos y para juntas que no están bien alineadas. La corriente pulsante es también útil para realizar la pasada de raíz en soldadura de cañerías. Las fuentes de potencia normalmente cuentan con un dispositivo de encendido de alta frecuencia. Esto permite que el arco se encienda sin tener que tocar la superficie, lo cual puede resultar en una contaminación del electrodo de tungsteno. Algunas fuentes tienen un dispositivo que permite que el electrodo sea posicionado sobre el trabajo, pero el arco no se enciende hasta que la tobera sea levantada. Una ventaja sobre el encendido por alta frecuencia es que elimina la posible interferencia sobre componentes cercanos, tales como computadoras y componentes electrónicos.

Además de los controles para la intensidad de corriente en el tablero de la fuente, a menudo es útil tener un dispositivo de control de intensidad por medio de un pedal. Este dispositivo permite al operario aumentar o disminuir la corriente durante el transcurso de la soldadura, para ajustarse a las condiciones, como puede ser una junta desalineada. Una ventaja adicional es que permite el apagado del arco reduciendo la intensidad de corriente.

Las toberas son enfriadas por aire o por agua. Las enfriadas por aire están limitadas a un rango de corrientes más bajo que las enfriadas por agua. Los electrodos más comunes son los de tungsteno con un 2% de torio, debido a sus excelentes propiedades de emisividad, aunque se utilizan electrodos de tungsteno con otros agregados. Las opiniones difieren en cuanto al tamaño de los electrodos para diferentes amperajes. Algunos están a favor de utilizar diferentes diámetros para rangos de corriente diferentes, mientras otros usan un diámetro de 2.4 mm para un rango de corriente mucho más amplio. También varían las preferencias en cuanto a la terminación de la punta del electrodo, pero una de las usadas más comúnmente es un afilado entre 20 y 25° con el extremo despuntado a 0.25 mm de diámetro.

Las toberas o copas gaseosas vienen en una amplia variedad de tamaños y formas, y es mejor adaptar la tobera a la aplicación. Los diámetros de copa más grandes proveen mejor protección gaseosa, mientras las más pequeñas ayudan a mantener un arco más estable y permiten una mejor visibilidad. Una alternativa es el lente gaseoso, el cual crea un flujo laminar mediante pantallas especiales dentro de la tobera. El flujo de gas inerte se proyecta a una distancia considerable de la punta de la tobera, dando una mejor protección gaseosa y buena visibilidad.

Con cualquier proceso de soldadura que utilice gas inerte, es importante revisar todas las conexiones para asegurar que no existan pérdidas en el sistema. Si existiera una pérdida, por ejemplo en la línea de gas, el aire será aspirado dentro de ésta, a pesar que se crea lo contrario.

Consumibles

Para soldar aceros inoxidables, en el escudo gaseoso se utiliza argón puro, helio o mezclas de los dos. Las mezclas de argón con oxígeno que se utilizan en la soldadura MIG no deben ser usados en la TIG, debido al rápido deterioro de los electrodos de tungsteno. La adiciones de nitrógeno no se recomiendan por la misma razón. En la soldadura manual y realización de juntas por debajo de un espesor de 1.6 mm se prefiere al argón como escudo gaseoso. Da una buena penetración con una velocidad de flujo menor que la del helio, y hay menos oportunidad de fundir la soldadura. El helio produce un mayor flujo calorífico y una penetración más profunda, lo cual puede ser una ventaja en algunas operaciones de soldadura automática. Las mezclas de argón-helio pueden mejorar el contorno de la soldadura y la mojabilidad.

Los metales de aporte adecuados para la soldadura TIG de aceros inoxidables se muestran en la *Tabla IV*. Los trozos rectos se utilizan normalmente en la soldadura manual, mientras que los alambres en rollos o bobinas se usan en la soldadura automática. Son esenciales prácticas convencionales de control de calidad para asegurar la limpieza de los alambres y evitar la mezcla de las distintas calidades. El alambre desnudo debe ser limpiado antes de ser usado y almacenado en un lugar cubierto.

Guías técnicas para el operador

La iniciación del arco se hace más fácil mediante dispositivos tales como un arranque por alta frecuencia o un arco piloto. En ausencia de estos dispositivos, se inicia el arco frotando la superficie con el electrodo, con lo cual se corre el riesgo de contaminar al electrodo y al metal a ser soldado. Cuando sea práctico, es útil utilizar pequeños trozos de planchuela de acero inoxidable adyacentes a la soldadura, para eliminar el posible daño en el metal de base.

El soldador también debe ser cuidadoso cuando apaga el arco. El tamaño de la parte fundida de la soldadura debe ser disminuido, de otra manera, cuando la soldadura solidifique quedará un cráter y se producirá una grieta. En ausencia de un pedal de control de corriente, se debe aumentar la velocidad de soldadura antes de levantar el electrodo. Una buena práctica de apagado del arco es particularmente importante en la pasada de raíz de soldaduras que se realizan sólo desde un lado, de otra manera las grietas serán difíciles de reparar. Después de que se rompa el arco, el soldador deberá mantener la torcha sobre el cráter por varios segundos para permitir que la soldadura se enfríe bajo la protección de la atmósfera de argón.

Los aceros inoxidables son fáciles de soldar con el proceso TIG. Las aleaciones son relativamente insensibles a una pobre protección gaseosa, comparadas con metales reactivos, tales como titanio o zirconio. Sin embargo, es una buena práctica proveer de una buena protección gaseosa, tanto a la soldadura como al respaldo, lo mismo que mantener al metal de aporte dentro del escudo gaseoso durante la soldadura.

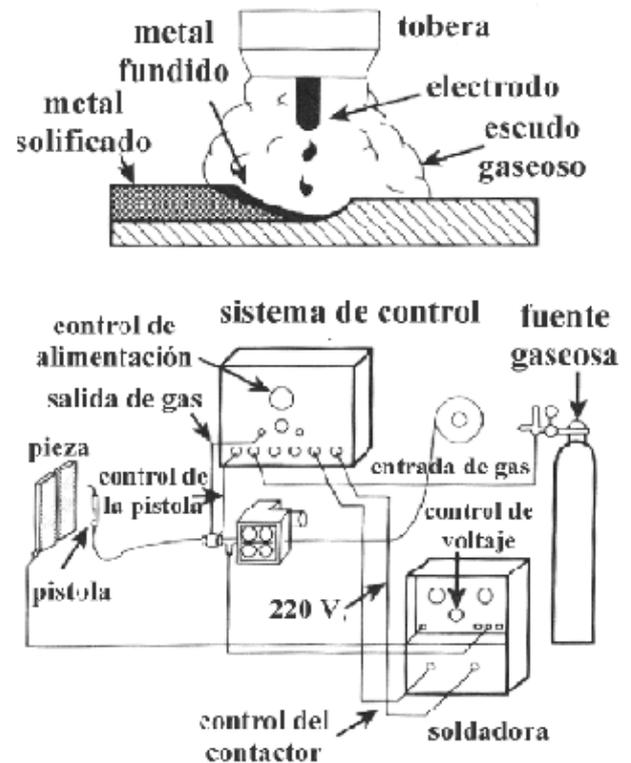
Si el proceso tiene una potencial limitación, es que la soldadura pueda parecer buena, pero tener un metal de aporte inadecuado. En algunas soldaduras, esta práctica puede resultar en una forma cóncava, que tiene una tendencia a rajarse en el centro. La utilización de un metal de aporte adecuado, produce una soldadura ligeramente convexa y en algunas aleaciones mejora el nivel de ferrita, lo cual aumenta la resistencia al agrietamiento.

En las soldaduras sujetas a ambientes corrosivos severos, a menudo es necesario que la aleación de las soldaduras sea de un grado más alto que la del material de base a ser unido, para dar una resistencia a la corrosión similar. Las soldaduras de aleación enriquecida son sólo posibles con una generosa adición de metal de aporte. Es difícil definir qué cantidad de metal de aporte se debe utilizar, pero se estima que al menos de un 50% del metal de la soldadura debiera provenir del metal de aporte. Sin embargo, es importante que la mezcla con el metal de

aporte adecuado se produzca antes de que la soldadura se solidifique, de otra manera existirían zonas segregadas de alta y baja aleación. Una causa de este tipo de segregación se debe a una desigual fusión del metal de aporte, junto con una alta velocidad de solidificación. Un ejemplo de dónde este tipo de segregación en la soldadura puede afectar en forma adversa el comportamiento en servicio, es en la soldadura de raíz de los caños utilizados en ambientes corrosivos.

Soldadura MIG

Figura 7 -Soldadura MIG



En el proceso MIG (metal inert gas, cuando se utiliza un escudo gaseoso de gas inerte) o MAG (metal active gas, cuando se utiliza un gas activo), se establece un arco entre el electrodo consumible, un alambre desnudo y la pieza. El arco y la soldadura se protegen de la atmósfera mediante un escudo gaseoso, compuesto principalmente por gases inertes, argón y/o helio. Con el objeto de obtener una mejor acción del arco y una mejor mojabilidad en la soldadura, se utilizan opcionalmente pequeñas cantidades de gases activos, tales como dióxido de carbono, oxígeno e hidrógeno. Algunas ventajas del proceso MIG sobre los otros procesos de soldadura incluyen:

- mayores velocidades de soldadura
- no hay escoria que eliminar, lo cual facilita el proceso de limpieza posterior
- facilidad de automatización
- buena transferencia de elementos a través del arco

Los componentes básicos del proceso MIG se muestran en la Figura 7.

Modos de transferencia del arco

Los tipos de transferencia metálica en la soldadura MIG tienen una profunda influencia en las características del proceso, a un grado tal que a menudo es engañoso dar

información general sobre el proceso MIG sin indicar el modo de transferencia del arco. Los tres modos más utilizados en la soldadura de aceros inoxidables son: spray, corto circuito y arco pulsado. La *Tabla V* compara algunos parámetros y diferencias de uso entre los tres.

Tabla V**Comparación de modos de transferencia de arco en la soldadura MIG de aceros inoxidables**

	Spray	Corto Circuito	Arco Pulsado
Espesores	3 mm mínimo 6 mm y más	1.6 mm y más	1.6 mm y más
Posiciones	Plana y horizontal	Todas	Todas
Velocidad relativa de deposición	La más alta	La más baja	Intermedia
Diámetro típico del alambre	1.16 mm	0.8 ó 0.9 mm	0.9 ó 1.2 mm
Corriente típica de soldadura	250 - 300 amperios	50 - 225 amperios	Arriba de picos de 250 amperios
Escudo gaseoso (1)	Argón - 1% oxígeno Argón - 2% oxígeno	90% helio 7.5% argón 2.5% CO ₂ o 90% argón 7.5% helio 2.5% CO ₂	90% helio 7.5% argón 2.5% CO ₂ o argón - 1% oxígeno

(1) Se usan otras mezclas de gases, sin embargo, el escudo gaseoso debe contener al menos 97.5% de gas inerte, por ej. argón, helio o una mezcla de los dos.

Equipamiento para soldadura MIG

Las mismas fuentes de potencia, mecanismos de alimentación de alambre y torchas que se usan para la soldadura de aceros ordinarios, se usan en aceros inoxidables. Los recubrimientos plásticos en los conductos de alimentación de alambre han demostrado ser útiles para reducir el arrastre con alambres de acero inoxidable. El proceso MIG tiene más parámetros que controlar que el TIG y la soldadura con electrodos recubiertos, tales como amperaje, voltaje, pendiente de corriente, alimentación de alambre, velocidad de pulsos y modo de transferencia del arco. Consecuentemente, las fuentes de potencia para la soldadura MIG son más complejas y costosas. Algunas de las fuentes más nuevas, tales como la de arco pulsado sinérgico, han hecho la operación más simple, ya que provee sólo un dial de control para el operador, y los otros parámetros se ajustan automáticamente. La corriente de soldadura utilizada más del 95% del tiempo es de polaridad inversa. Esta corriente da una penetración más profunda que la corriente de polaridad directa, y un arco más estable. La corriente de polaridad directa se limita a aplicaciones que requieren una penetración superficial, tales como la soldadura en solapa.

Consumibles

Algunos de los gases más comúnmente usados para escudos gaseosos en soldadura MIG se muestran en la *Tabla V*. El gas que se usa como protección para el arco spray normalmente es argón con 1 o 2% de oxígeno. Las soldaduras por arco en cortocircuito y pulsado usan una gran variedad de escudos gaseosos. Una mezcla popular en Norteamérica es 90% helio, 7.5% argón y 2.5% CO₂;

pero en Europa, el helio es bastante caro y se usa ampliamente una mezcla de 90% argón, 7.5% helio y 2.5% CO₂. Cualquiera sea la combinación, el gas de protección debe contener al menos un 97.5% de gases inertes (argón, helio o mezcla de los dos). El dióxido de carbono no debe exceder el 2.5%, o la calidad de la soldadura y la resistencia a la corrosión podrán verse reducidas.

Los metales de aporte a ser usados en la soldadura MIG se muestran en la *Tabla IV*. Los diámetros más comunes son 0.9 mm, 1.2 mm y 1.6 mm, pero hay otros disponibles.

Otros procesos de soldadura

Los aceros inoxidables se pueden soldar por la mayoría de los procesos comerciales de soldadura. Estos procesos pueden ofrecer ventajas no obtenibles en los procesos de soldadura con electrodos, MIG y TIG, y deberían ser tenidos en cuenta para altas producciones o fabricaciones especiales. Como ejemplo, han habido recientes avances en la producción de alambres con alma rellena de decapante, que producen soldaduras de alta calidad, con una mayor eficiencia que la soldadura con electrodos recubiertos. Estos alambres huecos a menudo son más fáciles de producir con composiciones especiales o rangos de ferrita, que el alambre sólido.

La soldadura por arco sumergido, se ha usado extensamente para soldar espesores de unos 6.4 mm y más, y para soldadura en solapa. Hay decapantes comerciales disponibles para usar con metales de aporte usados para soldadura MIG. Los procesos por arco de plasma, electroescoria, haz de electrones, láser y fricción se están usando más y más; y los procesos de soldadura

por resistencia, por punto, costura, proyección y flash se pueden adaptar fácilmente a la soldadura de los aceros inoxidables.

Los aceros inoxidables se pueden soldar entre sí o a un número de otros metales por bronceado. No se usa normalmente cuando la unión estará expuesta a ambientes corrosivos severos, pero hay procesos industriales y alimenticios donde el bronceado provee propiedades adecuadas.

La soldadura oxiacetilénica no se recomienda para aceros inoxidables. Los óxidos de cromo que se forman en la superficie hacen que este tipo de soldadura sea dificultosa. Sin embargo, más importante es el cuidado extremo que se necesita en la soldadura para evitar reducir la resistencia a la corrosión de la soldadura y el área adyacente.

Procedimientos de limpieza de post-fabricación

Muy a menudo se supone que el producto, ya sea un tanque, un recipiente a presión, la junta de un caño, etc., está listo para el servicio después de que se haya realizado la última soldadura. La limpieza después de la fabricación debe ser tan importante como cualquiera de los pasos discutidos anteriormente. La condición superficial de los aceros inoxidables es crítica, bien cuando el producto no debe ser contaminado (plantas farmacéuticas, alimenticias o nucleares), o cuando el acero debe resistir ambientes agresivos, tales como en plantas de procesos químicos. Las condiciones superficiales que pueden reducir la resistencia a la corrosión se pueden agrupar en cuatro categorías: contaminación superficial, incrustaciones de hierro, daño mecánico, o defectos relacionados con la soldadura. La *Figura 8* ilustra algunas de las condiciones más comunes.

Figura 8 - Defectos típicos de fabricación

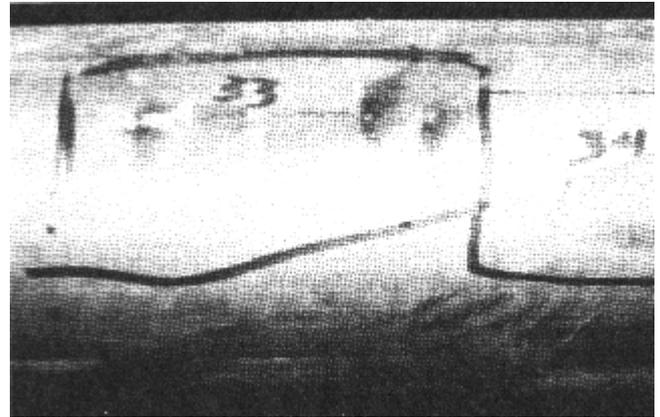


Contaminantes superficiales

En ambientes agresivos, los contaminantes orgánicos sobre las superficies de acero inoxidable pueden favorecer la corrosión por rendijas. Tales contaminantes incluyen grasas, aceites, marcas de crayones, pinturas, cintas adhesivas, y otros depósitos pegajosos. La *Figura 9* muestra marcas de corrosión por rendijas (en el área marcada 33) en un tanque de acero inoxidable. Las marcas se formaron donde no se limpiaron las marcas de crayón antes de que el tanque fuera puesto en servicio. Las superficies a ser decapadas o tratadas con ácido deben

estar libres de contaminantes orgánicos para que el ácido sea efectivo en remover la contaminación por hierro, óxidos superficiales o condiciones similares. Debido a que poco se puede hacer durante la fabricación para reducir la contaminación orgánica, el fabricante lo debe hacer durante la limpieza final.

Figura 9 - Corrosión en rendija que ocurrió cuando las marcas de crayón no fueron limpiadas, en un recipiente de acero inoxidable



Detección

La inspección visual se utiliza normalmente para detectar la contaminación orgánica, mientras que se puede usar un trapo o papel para la detección de aceite o grasa.

Remoción

El desengrasado, utilizando un solvente no clorado, es efectivo. La prueba de rotura de la película de agua es una manera simple de juzgar la efectividad del desengrasado. Una fina cortina de agua, aplicada con una manguera sobre la pared del recipiente, se romperá alrededor de las superficies contaminadas con grasa o aceite. El desengrasado se deberá repetir hasta que la película de agua deje de romperse.

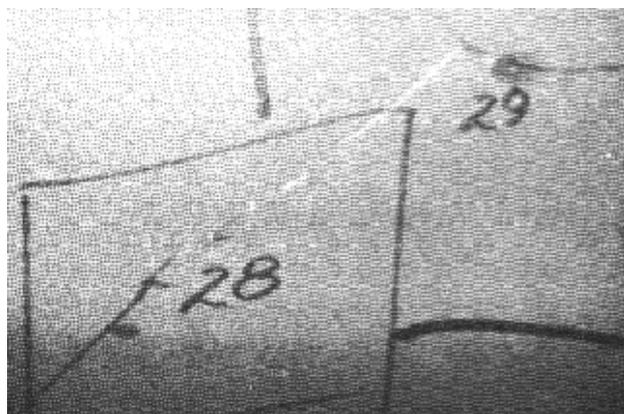
Los solventes clorados no se recomiendan debido a los restos de cloruros que pueden permanecer y causar procesos de corrosión cuando la unidad sea puesta en servicio.

Hierro embebido

Algunas veces, los tanques o recipientes se oxidan poco tiempo después que son despachados. Esto se puede deber a partículas de hierro embebidas en la superficie durante el proceso de fabricación. Las partículas de hierro se corroen en el aire húmedo o cuando son mojadas, dejando marcas de óxido. Además de ser desagradables a la vista, las partículas más grandes de hierro embebido pueden iniciar procesos de corrosión por rendijas en el acero inoxidable subyacente. La *Figura 10* muestra corrosión en varios puntos a lo largo de un rayón, donde se han incrustado partículas de hierro. En servicio corrosivo, la corrosión por rendijas iniciada por grandes partículas de hierro embebido, pueden llevar a fallas por corrosión, que de otra manera no hubieran sucedido. En las industrias farmacéuticas, alimenticias y de otros procesos en los cuales el acero inoxidable se usa

principalmente para prevenir la contaminación del producto, el hierro embebido no puede ser tolerado.

Figura 10 - Una raya profunda hecha durante la fabricación, sirvió como iniciadora de la corrosión en este recipiente.



Detección del hierro embebido

La prueba más simple para la detección del hierro embebido es mojar la superficie con agua limpia y dejar que se escurra el exceso. Después de 24 horas, se inspecciona la superficie para detectar manchas de óxido. Esta es una prueba muy simple, que cualquier taller puede realizar. Para asegurar la ausencia de hierro embebido, esta prueba debe ser especificada en los documentos de fabricación.

Una prueba más sensible se obtiene mediante el uso de la prueba del ferroxilo. La solución se prepara mezclando los siguientes ingredientes:

Ingrediente	%	Cantidad (volumen o peso)
Agua destilada	94	1.000 cm ³
Acido nítrico, 60-67%	3	30 cm ³
Ferrocianuro de potasio	3	30 g

La solución se aplica mejor mediante un rociador. La contaminación con hierro se indica por la aparición de un color azul después de pocos minutos. La profundidad del color es un indicador del grado de contaminación. La solución debe ser limpiada después de algunos minutos mediante agua o un paño húmedo.

La prueba del ferroxilo es muy sensible y se puede aplicar tanto en el taller como durante el montaje. Se puede entrenar al personal para realizarla en unas pocas horas. Esta prueba generalmente se requiere para equipos de acero inoxidable utilizados en plantas farmacéuticas, alimenticias, nucleares, al igual que para equipos de proceso en industrias químicas. Una excelente guía básica para estas pruebas es la norma ASTM A380, "Standard Recommended Practice for Cleaning and Descaling Stainless Steel Parts".

Remoción del hierro embebido

El *decapado*, que a menudo se realiza después del desengrase, es el método más efectivo para eliminar al hierro embebido. En el decapado, una capa superficial menor que 0.025 mm se elimina por corrosión, normalmente con un baño ácido de nítrico / fluorhídrico a 50 °C. El decapado no sólo elimina la contaminación por hierro y otros metales, sino que deja la superficie brillante y limpia, y en su condición más resistente. Dado que el decapado es una corrosión controlada y generalizada, se prefieren los aceros inoxidables de bajo carbono o estabilizados. El proceso puede iniciar corrosión intergranular en la zona afectada por el calor, en los grados no estabilizados. Debido a que el decapado es agresivo, destruirá las superficies pulidas o brillantes.

Usando ácido nítrico solo, se eliminará la contaminación de hierro superficial, pero no las partículas que estuvieran más profundas. Al tratamiento con ácido nítrico solo se lo llama también *pasivado*. Esto puede dar lugar a malas interpretaciones, dado que la superficie decapada también se pasiva cuando entra en contacto con el aire.

Los objetos pequeños se decapan mejor por inmersión. Las cañerías, tanques y recipientes demasiado grandes para ser sumergidos, se pueden tratar haciendo circular la solución dentro de ellos. Normalmente se contrata a empresas especializadas para realizarla.

Cuando la prueba del ferroxilo muestra pequeñas zonas con hierro embebido, se pueden eliminar mediante aplicación local de pasta de nítrico / fluorhídrico. Para tanques grandes, llenarlos hasta una altura de 150 mm para decapar el fondo, y eliminar localmente el hierro embebido en las paredes, es también una alternativa práctica a circular la solución decapante a través de ellos.

Cuando el decapado no es práctico, se puede usar el blastinado, pero no todos los abrasivos dan buenos resultados. El blastinado con esferas de vidrio produce buenos resultados, pero antes de hacerlo se debe realizar una prueba para determinar si eliminará la contaminación superficial. También se deberán realizar pruebas periódicas para ver qué cantidad de esferas se pueden volver a utilizar antes de que comiencen a recontaminar la superficie. Las cáscaras de nuez también resultan buenas como abrasivo.

El blastinado abrasivo con trozos de acero o arenisca, generalmente no dan resultados satisfactorios, debido al riesgo que se corre de contaminación con hierro. Además, el blastinado con arenisca deja una superficie muy rugosa, que hace al acero inoxidable susceptible de corrosión por rendijas, ya sea que la superficie esté o no libre de hierro. El arenado también debe ser evitado cuando sea posible, aún cuando se utilice arena nueva libre de hierro.

Daño mecánico

Cuando una superficie ha sido dañada y se requiere su reacondicionamiento, la reparación se realiza normalmente mediante amolado, o soldadura y amolado. Los defectos superficiales se eliminan primero por amolado, preferiblemente con un disco abrasivo limpio de

grano fino. La máxima profundidad de amolado para eliminar defectos a menudo se especifica en las normas de fabricación, y pueden variar entre el 10 y 25% del espesor total.

Cuando se necesita una reparación por soldadura, se puede hacer mediante cualquiera de los procesos ya mencionados, pero se prefiere la TIG debido a la facilidad en la realización de pequeñas soldaduras. Siempre se debe agregar metal de aporte, y nunca se deberán permitir soldaduras "cosméticas" debido al riesgo que se corre de grietas en las soldaduras y resistencia a la corrosión disminuida.

Seguridad y humos de soldadura

Las normas de seguridad para soldadura de aceros inoxidables son esencialmente las mismas que para todos los metales, y se refieren a áreas tales como equipamiento eléctrico, de gases, protección de ojos y cara, protección contra incendios, etiquetado de materiales peligrosos, etc. Una buena guía de referencia sobre seguridad en soldadura es la norma ANSI/ASC, Z49.1-88, "Safety in Welding and Cutting", publicada por la American Welding Society.

La adecuada ventilación es importante para minimizar la exposición de los soldadores a los humos, en la soldadura y corte de todos los metales, incluyendo al acero inoxidable. Además de una buena ventilación, los soldadores deben evitar aspirar los humos que se desprenden del trabajo, posicionándolo de tal manera que su cabeza se encuentre fuera de la columna de humo. La composición de los humos de soldadura varía con el metal de aporte y el proceso. Las soldaduras por arco también producen gases como ozono y óxidos de nitrógeno. Se ha manifestado preocupación en la soldadura con consumibles de acero inoxidable y aceros de alta aleación debido al cromo, y en menor grado al níquel, presentes en los humos de soldadura. Una buena ventilación minimizará estos riesgos a la salud. El Instituto Internacional de Soldadura desarrolló una serie de hojas informativas para soldadores, que ofrecen sugerencias internacionalmente aceptadas para el control del humo.