

REDISEÑO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PIEZAS EN ACERO
INOXIDABLE 304.

HENRY GOMEZ
JAIRO OLIVARES

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
CARTAGENA DE INDIAS

2003

REDISEÑO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PIEZAS EN ACERO
INOXIDABLE 304.

HENRY GOMEZ

JAIRO OLIVARES

Monografía para optar al título de Ingeniería Mecánica

Director
LUIS FABREGAS
Ingeniero Metalúrgico

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLIVAR

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

CARTAGENA DE INDIAS

2003

A mi madre que no desfalleció en su empeño de educarme y mi padre que ya no está presente .

HENRY GOMEZ BILBAO

Especialmente y antes que nada agradezco a Dios que me dio la vida , el cual ha sido mi sustento desde el momento en que vine a este mundo , por la culminación de esta etapa de mi vida fundamental para mi desarrollo como profesional y como hombre de bien con la esperanza de ser una herramienta de muy valiosa utilización para el mundo laboral y espiritual.

JAIRO OLIVARES GUERRA

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la empresa ETEC S.A. por su apoyo a la realización de este trabajo y especialmente a su Gerente General el Ingeniero Eric Thiriez V. quien con gran espíritu científico dió respaldo a su realización.

Por su atenta colaboración queremos agradecer a los Ingenieros:

EMMANUEL THIRIEZ
VICTOR FORBES
HUGO NARVÁEZ
BENJAMÍN ARANGO

TABLA DE CONTENIDO

	Pag
INTRODUCCIÓN	1
1. EL PROBLEMA Y LOS OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.	3
1.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA	3
1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACION	4
1.3. OBJETIVOS	6
1.3.1. Objetivo General	6
1.3.2. Objetivos especificos	6
2. REVISIÓN DEL ESTADO DE CONOCIMIENTO	7
2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES	7

2.2.	PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACERO AISI 304 y 304L	12
2.3	CORROSION INTERGRANULAR EN LOS ACEROS AUSTENITICOS O SENSIBILIZACION.	16
2.4.	PASIVACION.	20
2.5.	HIPÓTESIS	23
2.5.1.	ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MEDICION DE TEMPERATURA.	24
2.5.2.	ENSAYO CON PINTURA HORNEABLE.	26
3.	IMPLEMENTACION DE LAS MEJORAS EN EL PROCESO	27
3.1	RECUBRIMIENTO CON PINTURA HORNEABLE	29
3.1.1	ENSAYO 1	29
3.12	ENSAYO 2	30
3.2	TRATAMIENTO TERMICO	35

3.3	PROCESO DE SOLDADURA MIG	37
3.3.1	Parámetros predeterminados	37
3.3.2	Parámetros dependientes del equipo	37
3.3.3	Parámetros dependientes del operario	38
4.	CONCLUSIONES	40
	BIBLIOGRAFÍA	43

LISTA DE CUADROS

		Pag
Cuadro 1.	Acero AISI 304 Composición Química (%)	12
Cuadro 2.	Propiedades de tracción a Temp. ambiente de diferentes perfiles	13
Cuadro 3.	Acero AISI 304L Composición Química (%)	14
Cuadro 4.	Propiedades de tracción de varios perfiles a Temp. Ambiente	15
Cuadro 5.	Características mecánicas a temperatura ambiente	15
Cuadro 6.	Carta de selección de alambres para soldadura MIG / MAG en acero inoxidable según AWS 5.9	38
Cuadro 7.	Parámetros para soldadura de aceros inoxidables mediante proceso MIG.	39

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. Proceso de producción de piezas de acero inoxidable en ETEC. S.A.	4
Figura 2. Estructura martensítica del acero	8
Figura 3. Estructura ferrítica del acero	9
Figura 4. Estructura austenítica del acero	10
Figura 5. Microfotografía de carburos precipitados entre los bordes de grano.	16
Figura 6. Diagrama TTT para el acero 304	19
Figura 7A. Probetas sin tratar	30
Figura 7B. Probeta brillada	30
Figura 8A. Probeta sin tratar, lado rugoso	30
Figura 8B. Probeta sin tratar, lado brillado	30
Figura 9. Probetas 1 – 6	32
Figura 10. Apariencia probeta 1	33
Figura 11. Aspecto Probeta 3 con soldadura	33
Figura 12. Aspecto Probeta 4	34
Figura 13. Aspecto Probeta 6 con recubrimiento y tratamiento térmico	35

INTRODUCCIÓN

Con la presente investigación se busca alcanzar la optimización del proceso de fabricación de piezas en acero inoxidable en la empresa ETEC. S.A. mediante la implementación de mejoras y nuevas técnicas en el mismo, tratando de minimizar un fenómeno de corrosión que se presenta en algunas piezas de productos terminados

Se busca alcanzar los objetivos trazados con anterioridad y mejorar dicho proceso teniendo en cuenta los factores mas importantes del mismo, los cuales son son: Los procedimientos a seguir, los materiales con los que se ha de efectuar el proceso, las condiciones dentro del mismo que afectan la micro estructura final y su resistencia a la corrosión.

También se documentará de manera especial el proceso de soldadura aplicado en ETEC S.A. para el armado de piezas, (proceso M.I.G.), que es el tipo de soldadura que se utiliza en toda la extensión de la pieza, especialmente en las juntas soldadas.

Debido a su relevancia en el proceso se evaluarán fenómenos tales como Pasivación y Sensibilización y se analizarán sus efectos sobre las piezas fabricadas.

1. EL PROBLEMA Y LOS OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la empresa ETEC SA de la ciudad de Cartagena se realiza un proceso de fabricación de piezas en acero inoxidable mediante soldadura MIG. Dicho proceso no está documentado con memorias de cálculo y se ha detectado corrosión superficial posterior al tratamiento térmico en algunas de las piezas fabricadas.

Por lo anterior desea rediseñar el proceso con la mejor información existente en el ámbito mundial sobre procesos para soldar aceros inoxidables y tratamiento térmico, aplicando para ello criterios de ingeniería.

El proceso de fabricación de las piezas en acero inoxidable 304 consta de : corte con plasma, rolado, armado de la pieza y soldado de la misma con proceso MIG. Seguidamente se realiza un tratamiento térmico de austenizado y luego un pasivado con ácidos débiles. El diagrama de proceso se puede apreciar en la figura 1.

Posterior al T.T. se ha observado la aparición de leve corrosión superficial en las piezas terminadas, y se desea determinar las causas de la misma para corregirlas.

Por otra parte, el proceso de tratamiento térmico no es un proceso controlado en estrictamente en cuanto a la los tiempos de duración del mismo y a las temperaturas alcanzadas, lo cual puede incidir negativamente en las condiciones de los elementos sometidos al proceso

FIGURA 1. PROCESO DE PRODUCCION DE PIEZAS DE ACERO INOXIDABLE EN ETC. S.A.



1.2 JUSTIFICACIÓN

Como se ha podido explicar en el capítulo anterior, el proceso de fabricación de piezas en acero inoxidable en la empresa ETEC. S.A. presenta problemas de corrosión en el producto final. Aunque la magnitud de este fenómeno es pequeña y no comprometería la resistencia estructural de los elementos, afecta valores

estéticos que también son significativos en la aceptación de los productos. Se han identificado inicialmente tres posibles causas : la primera es la implementación de el Tratamiento Térmico aplicado durante el proceso , la segunda es un incorrecto procedimiento de soldeo MIG y particularmente de fallas en la protección con gas de la junta soldada y por último se considerará la revisión del procedimiento de pasivación.

La presencia de focos de corrosión en las piezas expuestas a ambientes agresivos como fluidos, agua salada, con partículas y agentes corrosivos podría dar origen a debilitamiento, destrucción parcial o total de las mismas con los consiguientes perjuicios, tanto para los clientes como para la empresa misma.

Ya que el fenómeno de corrosión se ha detectado posterior al Tratamiento Térmico aplicado a las piezas se hace necesario analizar este proceso y las condiciones adversas que éste pueda generar en las piezas para tratar de neutralizar o disminuir al máximo sus efectos.

Además de esto, el T.T. que se realizado no emplea un control estricto de temperatura final ni de tiempo de aplicación de la misma en cada uno de los rangos que maneja todo el proceso.

Debido a lo ya manifestado es necesario estudiar y analizar los diferentes pasos del procedimiento de fabricación de las piezas, haciendo énfasis en el Tratamiento Térmico, para poder actuar en consecuencia y aplicar los correctivos a las

falencias del proceso y, de ser posible, implementar nuevos procedimientos que ayuden a mejorar las características de las piezas terminadas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general. El objetivo de este estudio es evaluar la validez de los métodos utilizados para la fabricación de piezas en acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso de soldadura MIG y su posterior tratamiento térmico y pasivado . Se revisarán los procedimientos, materiales y condiciones del proceso que afectan la micro estructura final y su resistencia a la corrosión

1.3.2. Objetivos específicos.

- Elaborar un procedimiento general para el proceso estudiado que esté de acuerdo con el estado del arte del conocimiento sobre los temas que comprende este proceso.
- Aplicar un método de fabricación capaz de evitar la corrosión superficial presentada en las piezas producidas.
- Identificar las prácticas de fabricación que no estén de acuerdo el mejor método conocido y recomendar las acciones necesarias para corregirlas.

2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO

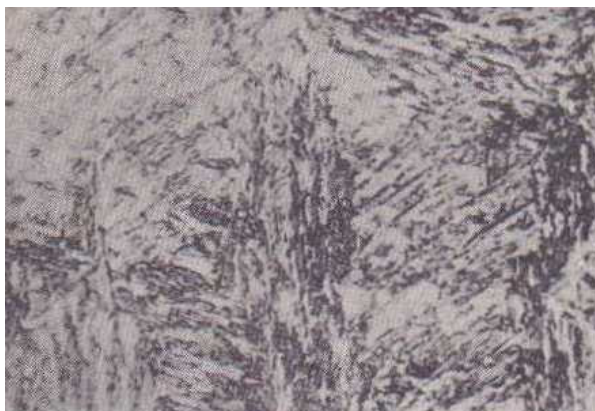
2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Con la denominación de aceros inoxidable agrupamos una serie de aceros que en determinadas condiciones y circunstancias resisten bien la acción de ciertos agentes corrosivos como atmósferas industriales, ambientes húmedos, ácidos de diversas clases y concentraciones y también el efecto de temperaturas elevadas sin sufrir una oxidación o destrucción sensible. Conviene advertir que cada uno, o cada familia de estos aceros, que reciben el nombre de inoxidable, no son completamente inoxidable en el sentido más amplio de la palabra, ya que en realidad sólo resisten bien la acción de ciertos agentes de corrosión y en cambio, en otras determinadas circunstancias, se oxidan y corroen en forma parecida a los aceros ordinarios. Los aceros inoxidable pueden clasificarse en tres grupos a saber:

1.º Aceros martensíticos. Aceros que admiten el temple. Son aceros al cromo que suelen recibir el nombre de aceros martensíticos por quedar con esa estructura

después del temple y aún también después del enfriamiento al aire. Los aceros más clásicos suelen contener de 12 a 14% de cromo. Algunos otros aceros de este grupo que tienen menos importancia que los anteriores y que se emplean sólo para usos especiales, suelen contener de 15 a 17% de cromo y de 1 a 3% de níquel. La figura 2 . muestra una microfotografía de un acero con composición martensítica.

Figura 2. Estructura martensítica de acero



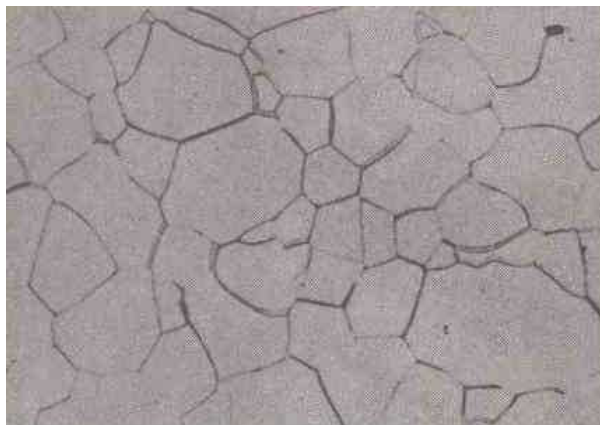
Resisten sin oxidarse temperaturas hasta de 750°. Todos ellos se caracterizan porque pueden ser tratados térmicamente en forma análoga a los aceros ordinarios.

2.º Aceros ferríticos Son aceros al cromo. A veces se denominan también aceros de alto contenido en cromo y el porcentaje que suelen contener de ese elemento varía generalmente de 15 a 30%. Su contenido en carbono suele ser bajo, generalmente inferior a 0,15% y sólo en los de 27% de cromo suele oscilar de 0,15 a 0,30%.

Su resistencia a la corrosión es ligeramente superior a la de los aceros martensíticos del grupo anterior y los que tienen un contenido de cromo de 25 a 30% tienen un excelente comportamiento a la oxidación a elevadas temperaturas.

Los de 17% de cromo resisten sin oxidarse temperaturas hasta de 850° y los de 27% de cromo resisten temperaturas hasta de 1.050°.

Figura 3. Estructura ferrítica del acero



Se caracterizan además por no poder ser tratados térmicamente como los aceros ordinarios, por tener en cualquier estado y a cualquier temperatura una estructura fundamentalmente ferrítica. Son, en general, de resistencia mecánica bastante baja, son bastante blandos y relativamente frágiles.

3.º *Aceros austeníticos.* Son aceros cromo-níqueles más inoxidables y resistentes a la corrosión atmosférica y a ciertos ácidos que los aceros correspondientes a los grupos citados anteriormente. Tampoco estos aceros pueden ser templados y

revenidos ni recocidos en la forma ordinaria, debido a que en cualquier estado y a cualquier temperatura están constituidos fundamentalmente por austenita, que tiene gran estabilidad y no se transforma por el enfriamiento rápido en otros constituyentes y, por lo tanto, en estos aceros el temple no se puede producir. Estos aceros son en general los que tienen a elevadas temperaturas una resistencia mecánica más elevada, de las diferentes clases de aceros inoxidables que estamos estudiando.

El acero más típico de este grupo contiene aproximadamente 18% de cromo y 8% de níquel. A este grupo pertenecen también otros aceros con 12% de cromo y 12% de níquel; otros de 25% de cromo y 20% de níquel, etc. Otros aceros de este grupo contienen además pequeñas cantidades de wolframio, molibdeno, etc. El acero 18-8 resiste sin oxidarse hasta 800° y otros aceros del mismo grupo con 3% de silicio resisten bien temperaturas de 950°. El acero 25-20 resiste sin oxidarse temperaturas hasta de 1.150°.

Figura 4. Estructura Austenitica de acero



Los aceros austeníticos se caracterizan por tener muy buena resistencia a la acción de los agentes atmosféricos, por ser los aceros que tienen mayor resistencia a la acción corrosiva de los ácidos y tener además, en general, a elevadas temperaturas buena resistencia mecánica y muy buena resistencia a la oxidación. Se emplean para elementos decorativos, sanitarios, elementos de hornos y calderas, instalaciones industriales, etc., y también son utilizados para la fabricación de piezas de motores que llegan a calentarse a elevadas temperaturas, como turbinas de gas, motores de reacción, etc. Son los aceros inoxidables de precio más elevado.

Existen diversas composiciones con elementos aleantes que le dan distintas características útiles. Podemos destacar:

El acero 304 clásico y una serie de aceros derivados de él que con pequeñas variantes de composición se emplean para numerosos usos especiales que citaremos más adelante.

Los aceros cromo-níqueles parecidos a los del grupo anterior, pero con porcentajes algo mayores de cromo y de níquel, cuya composición aproximada es 25-20 y 23-13, son muy resistentes a elevadas temperaturas y tienen gran resistencia al creep.

Los aceros cromo-níqueles austeníticos con un porcentaje de níquel muy elevado y superior al de cromo, de composición aproximada 19-22, 8-25, etc., que tienen

muy buen comportamiento a elevadas temperaturas, y finalmente, el acero 12-12 de fácil embutición. Entre los aceros derivados del 304 es interesante señalar el acero 304L de muy bajo contenido de carbono que es utilizado para construcciones soldadas. Además encontramos Acero 304 con columbio y titanio que se usan también para piezas y elementos que deban ser soldados. Acero 304 con molibdeno de gran resistencia a los ácidos y gran resistencia a elevada temperatura y una gran resistencia al creep. Los aceros 304 con silicio de elevada resistencia a la oxidación en caliente, con wolframio de gran resistencia mecánica a elevadas temperaturas, y acero de fácil mecanización con pequeños porcentajes de fósforo, azufre o selenio.

2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACERO AISI 304 y 304L

Debido a que las piezas fabricadas objeto de este estudio se producen con acero inoxidable AISI 304 , a continuación se describen las características y propiedades físicas del acero 304 y 304L.

Cuadro 1. Acero AISI 304 Composición Química (%)

ELEMENTO	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
% MAX.	0,08	1,00	2,00	0,045	0,030	18,00	8,00

Generalidades: Cuando se le mantiene a temperaturas comprendidas entre 450 y 900° C se provoca una precipitación de carburos que lo hacen sensible a la

corrosión intergranular. Estos carburos precipitados podemos disolverlos de nuevo con un temple austenítico (hipertemple).

Este problema aparece en las soldaduras, precipitándose carburos de cromo en las zonas cercanas al cordón donde la temperatura está comprendida entre 450 y 900° C. Por ello, su empleo queda limitado a aquellas piezas que posteriormente pueden recibir un temple austenítico (hipertemple).

La soldadura es posible con todos los procedimientos. Pueden realizarse bajo llama oxiacetilénica y por resistencia. Para espesores pequeños puede emplearse la soldadura al arco sin metal de aportación y bajo atmósfera de argón puro. Para espesores grandes, el mismo procedimiento con hilo de aportación o soldadura con electrodos revestidos. Las soldaduras deberán ser decapadas y pasivadas para evitar focos de corrosión. Mantiene buenas resiliencias a temperaturas bajo cero. Es amagnético (no le atrae el imán).

Cuadro 2. Propiedades de tracción a Temp. ambiente de diferentes perfiles

Perfil	Resistencia a la tracción (Rm) N/mm2 (Kgf/mm2)	Límite elástico del 0.2% (Rp) (N/mm2 (Kgf/mm2)	Alargamiento (L = 50mm)	Estricción %	Dureza %
Chapa y fleje	590 (60)	245 (25)	50	-	80 HRb
Plancha	590 (60)	205 (21)	60	70	150 HB
Barras	590 (60)	205 (21)	60	70	150 HB

Tratamientos Térmicos. Con un temple austenítico (hipertemple) entre 1,030 y 1,100 ° C disolveremos los carburos precipitados. El enfriamiento se realiza en agua. Cuando las piezas a tratar sean de acero moldeado es conveniente aumentar en unos 50° C, la temperatura del temple austenítico. Con este tratamiento la estructura estará formada básicamente por austenita, aunque pueden aparecer pequeñas cantidades de ferrita. Esto dependerá de la composición química, de la temperatura del tratamiento y del enfriamiento.

Cuadro 3. Acero AISI 304L Composición Química (%)

ELEMENTO	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
% MAX.	0,03	1,00	2,00	0,045	0,030	20,00	12,00

Generalidades: Por su bajo contenido en carbono es insensible a la corrosión intergranular. La soldadura es posible con todos los procedimientos. Puede realizarse bajo llama oxiacetilénica y por resistencia. Para espesores pequeños puede emplearse la soldadura al arco sin metal de aportación y bajo atmósfera de argón puro. Para espesores grandes, el mismo procedimiento con hilo de aportación o soldadura con electrodos revestidos. Las soldaduras deben ser decapadas y pasivadas para evitar focos de corrosión. Mantiene buenas resiliencias a temperaturas bajo cero.

La estructura de este acero es austenítica a todas las temperaturas. Es amagnético (no le atrae el imán).

CUADRO 4. Propiedades de tracción de varios perfiles a Temp. ambiente

Perfil	Resistencia a la tracción (Rm) N/mm2 (Kgf/mm2)	Límite elástico del 0.2% (Rp) (N/mm2 (Kgf/mm2)	Alargamiento (L = 50mm)	Estricción %	Dureza %
Chapa y fleje	540 (55)	225 (23)	50	-	75 HRb
Chapa gruesa	520 (53)	195 (20)	55	65	140 HB
	520 (53)	195 (20)	55	65	140

CUADRO 5. Características mecánicas a temperatura ambiente

Tratamiento	Resistencia a la tracción (Rm) N/mm2 (Kgf/mm2)	Límite elástico del 0.2% (Rp) (N/mm2 (Kgf/mm2)	Límite elástico del 0.1% (Rp) (N/mm2 (Kgf/mm2)	A en barras 5≤d≤160	Pla 0,5≤e≤3	Min nos 3≤e≤30	P (KU) Min J (kgfm)	Dureza HB
Hipertemple	440-640 (45-65)	175 -18	205 -21	40	38	40	118 -12	192 máx

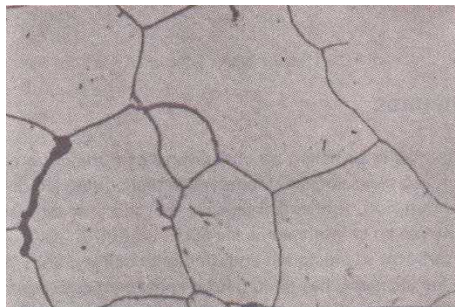
Tratamientos Térmicos. Con un temple austenítico (hipertemple) entre 1,000 y 1,050° C se eliminara la acritud creada durante la transformación en caliente. El enfriamiento puede hacerse en aire o en agua. Se aplicará la misma temperatura a las piezas moldeadas. Con este tratamiento la estructura estará formada básicamente por austenita aunque pueden aparecer pequeñas cantidades de ferrita. Esto dependerá de la composición química, de la temperatura del tratamiento y del enfriamiento.

2.3. CORROSION INTERGRANULAR EN LOS ACEROS AUSTENITICOS O SENSIBILIZACION

Si a un acero inoxidable austenítico se le mantiene durante cierto tiempo a temperaturas comprendidas entre 500 y 850° C se provoca una precipitación de carburos de cromo en los límites de los granos que empobrecen de cromo las zonas contiguas a los mismos.

Si en estas condiciones se le sitúa en medios corrosivos, puede experimentar un ataque intergranular que recibe el nombre de corrosión intergranular o intercrystalina.

Figura 5. Microfotografía de carburos precipitados entre los bordes de grano.



Decimos que un metal está sensibilizado cuando es susceptible a la corrosión intergranular, también llamada intercrystalina.

La sensibilización se debe a la formación de carburos de cromo en los bordes de grano en el rango de temperaturas entre 500 – 850 ° C. Debido a que la difusión

del cromo es lenta éste no puede difundirse desde el interior de los granos para reemplazar el cromo que ha migrado de los bordes para formar carburos. La capa de cromo en los bordes de grano se adelgaza debido a esto, y los bordes de grano quedan con menor resistencia a la corrosión y puede ser afectados por ésta en un ambiente que normalmente podrían resistir si el metal no estuviera sensibilizado.¹

Pueden ser causas de la precipitación de carburos : tratamientos térmicos mal realizados, calentamientos o enfriamientos defectuosos durante la transformación del acero, los calentamientos sufridos en las zonas cercanas al cordón de soldadura, etc.

Es muy peligroso que un acero quede sensibilizado a la corrosión intergranular, ya que en ocasiones, después de dicho ataque parece que está sano, pero un examen detallado pone de manifiesto que posee muy poca resistencia a la corrosión.

La formación de carburos es la explicación clásica para el fenómeno de sensibilización, pero también se forman nitratos y carbonitratos por lo que el contenido de nitrógeno del acero también debe ser tenido en cuenta. La susceptibilidad de un acero está relacionada con su contenido de carbono y nitrógeno.

¹ Austral Wright Metal. Sensitisation of Austenitic Stainless Steel. Australia. www.pfonline.com Doc. PDF

El volumen del metal sensibilizado sufre una corrosión rápida, mientras que las partes no sensibles del metal permanecen intactas.

Efecto del contenido de carbono. Un mayor contenido de carbono ocasiona mayor precipitación, de aquí que los aceros de mayor carbono sean más sensibles. Los aceros inoxidable modernos poseen menor contenido de carbón debido a que la maquinaria y procesos de los fabricantes han mejorado. En equipos modernos el contenido de carbono de los aceros inoxidable está entre 0.03 y 0.06 % mientras que los producidos con equipos antiguos varía entre 0.05 y 0.08%. La sensibilización es actualmente un problema menor a lo que solía ser.

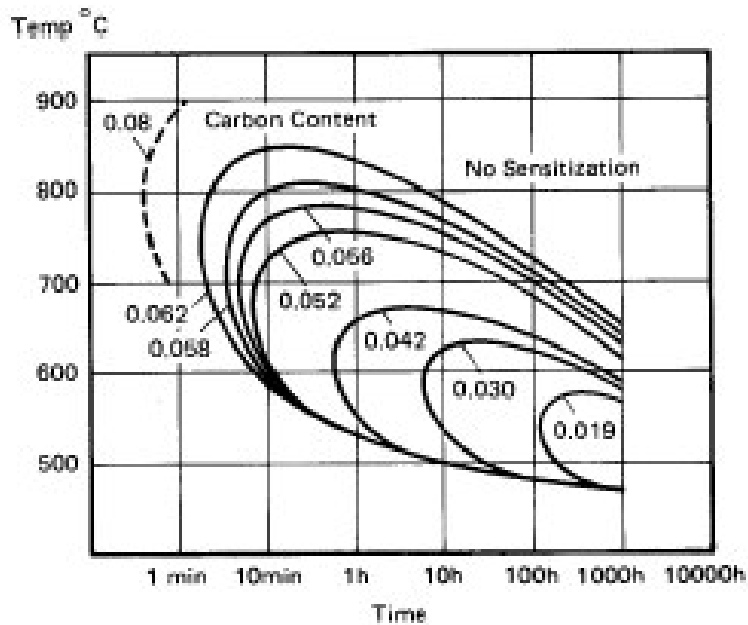
El enfriamiento rápido de las piezas calentadas evita la precipitación de carburos. Las piezas de mucho espesor sometidas a soldadura permanecen más tiempo en la zona de temperatura de sensibilización que las piezas delgadas por lo que son más susceptibles a este efecto.

A pesar de que el proceso de austenizado es más dependiente de la temperatura final que de el tiempo, muchos investigadores coinciden en que se requiere un tiempo de sostenimiento a temperatura de austenizado para lograr la total dilución de carburos y otros compuestos.

El investigador * Asdrúbal Valencia menciona una regla práctica que consiste en sostener la temperatura durante $\frac{1}{2}$ hora por cada pulgada de espesor que tenga la pieza.

A continuación se muestra el diagrama Tiempo – Temperatura – Transformación para el acero inoxidable 304 .

Figura 6. Diagrama TTT para el acero 304



Las curvas separan el área de sensibilización del área no sensible. A la izquierda de las curvas el metal no sufrirá sensibilización, a la derecha de las curvas se sensibilizará. Puede verse la gran diferencia en el tiempo crítico de enfriamiento para distintos contenidos de carbono. Aunque los tiempos sean muy distintos el efecto final será el mismo si se sobrepasa el tiempo crítico.

Pruebas para detectar la sensibilización. Existen varias pruebas para detectarla . una de las mas conocidas es la prueba Strauss modificada, que utiliza un baño en sulfato de cobre acidificado y un posterior doblez mecánico. Esta prueba permite detectar a simple vista los inicios de falla por corrosión.

También se utilizan métodos estandarizados como: AS2038 (1977 – revisado 1986) . ASTM A262. Ambos métodos determinan la sensibilidad de aceros inoxidables austeníticos a la corrosión intergranular.

2.4. PASIVACIÓN.

Aún entre los profesionales de la metalurgia no hay total acuerdo acerca de la teoría detrás del fenómeno de la pasivación. Algunos atribuyen su efectividad al proceso de limpieza que realiza, otros a la fina película de óxido transparente que queda como resultado del proceso, sin embargo lo que realmente está comprobado es que funciona.

Diversos test, entre ellos el de inmersión en sulfato de cobre, test de corrosión acelerada como el de aspersion de sal, test de alta humedad e inmersión en agua confirman la efectividad de este proceso.

El proceso de pasivación ha sido utilizado durante muchos años por la industria aeroespacial, de instrumentación quirúrgica ,electroquímica y de dispositivos de alta tecnología. Estas aplicaciones requieren un máximo desempeño de los componentes de acero inoxidable y la pasivacion es un proceso que da excelentes resultados.

Según la norma ASTM A380 pasivación es la remoción de hierro exógenos en la superficie del acero inoxidable por medio de disolución química. Generalmente se efectúa el tratamiento con una solución ácida que elimina la contaminación superficial sin afectar significativamente el material inoxidable. Además también describe la pasivación como “Tratamiento químico del acero inoxidable con un oxidante suave , tal como solución de ácido nítrico, con el propósito de facilitar la formación espontánea de la capa protectora pasivante”.²

El proceso de pasivación remueve residuos de contaminación de hierro que quedan en la superficie del acero inoxidable luego de los procesos de mecanizado y fabricación. Estos contaminantes son puntos potenciales de ataque corrosivo, que resultan en corrosión prematura y finalmente un deterioro del componente, si no son corregidos a tiempo.

Proceso de pasivación.

- Se inicia con un etapa de limpieza para remover residuos de grasa, lubricantes , aceites solubles (maquinado) , y otras sustancias indeseables que pueden estar presentes en las piezas.
- A continuación se aplica la solución ácida en toda la superficie de la pieza, o se sumerge la misma si se dispone de un baño. Existen varias formulas de ácidos pasivadores , pero las mas usadas son en base de ácido nítrico.
- Deben controlarse tres variables principalmente: Tiempo, temperatura y concentración.

² Austral Wright Metal. Passivation of Stainless Steel. Australia. www.pfonline.com Documento PDF

Estas son función del tipo de aleación procesada, típicamente se usan:

Tiempo : Entre 20 min. – 2 horas

Temperatura : De 25° a 70° C

Concentración : De 20% a 50% en volumen para el ácido nítrico.

Algunas especificaciones incluyen el uso de Dicromato de sodio ya sea en la solución o posteriormente como enjuague. Un cuidado control de la solución, incluyendo la pureza del agua son clave para el éxito del proceso.

Las siguientes normas o especificaciones están vigentes a nivel mundial.

- ASTM – A967
- ASTM – A380
- QQ – P – 35C (U.S. Federal specifications)

Estas describen el proceso completo incluyendo pruebas. Una de las pruebas mas usadas es la de inmersión en sulfato de cobre. Las piezas pasivadas se sumergen durante 6 min. Se enjuagan y examinan visualmente. Cualquier coloración rosada indica la presencia de hierro lo debe causar el rechazo de la pieza.

Pruebas mas usadas:

- Inmersión en sulfato de cobre
- Rocío con sal pulverizada
- Atmósfera de alta humedad
- ASTM B 117

El método apropiado varía según el tipo de aleación y el uso final que tendrá.

2.5. HIPÓTESIS QUE GUIARAN LA INVESTIGACION

Los aceros inoxidable austeníticos sufren un fenómeno llamado “sensibilización”, durante el proceso de soldadura el cual se debe a que durante el soldeo de la pieza base, en la zona afectada por el Calor, se alcanzan temperaturas que comprendidas entre 650° y 800° C.

En este rango de temperaturas la migración del cromo desde el interior de los granos a la zona intergranular forma carburos de cromo ($Cr_{23}C_6$) disminuyendo la concentración de cromo en los bordes de grano . En dichos bordes el acero pierde capacidad inoxidable y se torna susceptible de ser atacado por los agentes externos que estén presentes en el medio.

La sensibilización es entonces uno de los posibles orígenes del fenómeno de corrosión en las piezas.

Otra posible causa de falla en el proceso es un excesivo tiempo de duración del Tratamiento Térmico .

El rango de austenización está comprendido entre 1050 ° C y 1100 ° C. para lograr la austenización completa de la micro estructura. Por lo tanto es necesario estar seguros de que las piezas en el horno alcancen y mantengan esa

temperatura por un periodo de tiempo acorde con las dimensiones físicas de la misma

A causa de que se está empleando un horno con quemador de fuel-oil (ACPM) se debe considerar la posible contaminación de la superficie con sub-productos de la combustión o con oxígeno en exceso de la misma.

2.5.1 Análisis del sistema de medición de temperatura

Para determinar la temperatura a la que debe finalizar el calentamiento de austenizado se está empleando un alambre de cobre para embobinar. Este alambre es cobre comercial de aproximadamente 99.0 % de pureza.

Método utilizado: Se coloca un trozo de alambre dentro del horno y se revisa periódicamente hasta detectar que se ha fundido.

La temperatura de fusión del cobre puro es de 1083^a C. La temperatura de austenización para el acero inoxidable austenítico se estima entre 1050 y 1100 ° C, por lo tanto el método usado es adecuado al objetivo buscado.

A pesar de que la temperatura final del proceso es adecuada, aún debe verificarse que el calentamiento de las piezas no permanezca mucho tiempo en la zona comprendida entre los 650 y 800 ° C , ya que en ella se forman los indeseables

carburos de cromo que causan los efectos negativos en el proceso. También es preciso verificar de manera mas técnica la temperatura final del horno por medio de instrumentos de medición mucho mas precisos que el utilizado en la actualidad, de tal forma que se pueda corroborar que la pieza alcance las temperaturas necesarias para la austenizacion completa.

La forma mas adecuada de medir exactamente la temperatura es utilizando un pirómetro.

Un pirómetro es básicamente un termómetro especial de altas temperaturas

Dependiendo su principio de funcionamiento existen varios tipos de estos, el mas utilizado es el de tipo termocupla, y es muy confiable dentro de su rango de operación que es entre 600° y 1300° C, para temperaturas superiores se requiere un pirómetro de radiación que, como su nombre lo indica, funciona captando la radiación infrarroja producida por la pieza al calentarse y para su uso se debe tener en cuenta las correcciones necesarias debidas a la emisividad de cada material en particular. Otro tipo de pirómetro es el que funciona con base en la comparación de el color de la luz emitida por la pieza incandescente contra unos filtros de colores que se han calibrado a distintos tipos de temperatura. Cada color indica una temperatura diferente.

El principio de funcionamiento de una termocupla es utilizar la diferencia de expansión térmica en una tira bimetálica la cual genera una diferencia de

potencial que al medirse puede asociarse directamente con una temperatura específica

2.5.2. Ensayo con pintura horneable. Como medio para determinar el efecto de la contaminación debida a los gases de la combustión en el horno de T.T., durante el desarrollo de esta investigación la empresa, en cabeza de su Gerente de Ingeniería diseñó un procedimiento consistente en recubrir la superficie del material con pintura horneable. Esta pintura de recubrimiento protege inicialmente por barrera, luego cura a 700°C protegiendo completamente la superficie a partir de esta temperatura en adelante.

De esta forma la película de pintura formada deberá proteger superficialmente la pieza de agentes externos como los producidos por la combustión incompleta del fuel oil empleado para la alimentación del horno y del oxígeno comburente de la mezcla. Protegiendo las piezas en el momento crítico de la aplicación del Tratamiento Térmico

3. IMPLEMENTACION DE MEJORAS EN EL PROCESO

El proceso que se presenta en la empresa ETEC S.A. sigue los procedimientos que se detallan a continuación:

- Corte de piezas mediante arco de plasma
- Ensamble
- Soldadura mediante proceso MIG. Gas Inerte: 98% Argón 2% CO2
Electrodo: 308L
- Maquinado
- Ensamble de aspas.
- Soldado mediante proceso MIG . Gas Inerte : 98% Argón 2% CO2
electrodo: 308L
- Recubrimiento con Hidróxido de calcio. (Cal apagada)
- Tratamiento térmico
 - Calentar para Austenizado : entre 1050° y 1080° C
 - Termómetro: Alambre de cobre para embobinar
 - Enfriamiento en agua a 35° C (temperatura ambiente)
- Sand Blasting .Permite retirar carburos y óxidos superficiales.
- Maquinado final
- Balanceo
- Pulido
- Pasivado con ácidos débiles
- Recubrimiento con aceite siliconado

El material Base es Acero AISI 304 en Láminas de acero austenítico . Como material de aporte se utiliza Electrodo Acero AISI 308 L . Alambre en rollo. Y las piezas son de fundición de acero AISI 304 / ASTM 242 .

Para la mejora del proceso se usará el mismo material pero añadiendo un nuevo ítem de recubrimiento de pintura horneable antes del Tratamiento térmico y efectuando unos cambios en el proceso de calentamiento del Tratamiento por lo cual el procedimiento quedará de la siguiente forma:

- Corte de piezas mediante arco de plasma
- Ensamble
- Soldadura mediante proceso MIG. Gas Inerte: 98% Argón 2% CO2
Electrodo: 308L
- Maquinado
- Ensamble de aspas.
- Soldado mediante proceso MIG . Gas Inerte : 98% Argón 2% CO2
electrodo: 308L
- *Recubrimiento con pintura horneable*
- Tratamiento térmico
 - a. *Calentar para Austenizado (entre 1050° y 1080° C) acelerando el proceso para disminuir el tiempo en el cual la pieza se encuentre en el rango de temperatura comprendido entre los 500° y los 850° C y disminuir de esta forma el sensibilizado de la misma*
 - b. *Termómetro: Termocupla para controlar la temperatura final del proceso y mantener la misma durante un periodo de tiempo que es función del espesor de las piezas tratadas.*
 - c. *Enfriamiento en agua a 35° C (temperatura ambiente)*

- Sand Blasting .Permite retirar carburos y óxidos superficiales.
- Maquinado final
- Balanceo
- Pulido
- Pasivado con ácidos débiles
- Recubrimiento con aceite siliconado

3.1.RECUBRIMIENTO CON PINTURA HORNEABLE .

3.1.1 ENSAYO 1.

Procedimiento: Se prepararon dos probetas de lámina de acero inoxidable AISI 304 .

La probeta N° 1 no se recubrió.

La probeta N° 2 se recubrió con pintura horneable.

Se llevaron ambas probetas al horno de T.T. y se sometieron a calentamiento hasta 1083°C , inmediatamente se sacaron del horno se introdujeron en agua a temperatura ambiente (35°C).

Posteriormente se les realizó limpieza con sand-blasting y se brilló a espejo una de sus caras. En estas condiciones se introdujeron ambas en agua de mar y fueron dejadas a la intemperie durante 5 días. La figura 7A Muestra probetas sin tratar y la Figura 7B muestra una de estas probetas con un lado brillado a espejo.

Figura 7A Probetas sin tratar



Figura 7B. Probeta brillada



En las figuras 8A y 8B se aprecia la misma probeta vista por el lado rugoso y el liso respectivamente.

Figura 8A. Probeta sin tratar, lado rugoso



Figura 8B. Probeta sin tratar, lado brillante



De la observación y comparación del estado de las probetas se observa lo siguiente:

- Las superficies pulidas resistieron notablemente mejor la corrosión que las rugosas.
- El metal recubierto con la pintura en prueba resistió mejor el ataque del medio.
- A pesar del recubrimiento aún pudieron observarse pequeños inicios de corrosión, particularmente en zonas imperfectas de la probeta.

Se diseñó y efectuó un segundo ensayo con el fin de evaluar mas detalladamente el desempeño de la nueva técnica de recubrimiento .

3.1.2 ENSAYO 2

Cuadro 6. Resumen datos ensayo 2

Prob Nº	Proceso	T.T.	Observaciones
1	Ninguno	no	Probeta de referencia, sin procesos aplicados
2	Ninguno	si	Recubrimiento pintura horneable
3	soldadura	no	Probeta de referencia , con soldadura aplicada
4	Ninguno	si	Sin recubrimiento
5	soldadura	si	Sin recubrimiento
6	soldadura	si	Recubrimiento pintura horneable

Las probetas 1 y 3 se conservaron sin tratamiento térmico como elementos de referencia y comparación.. Las probetas 2 y 6 se recubrieron con pintura horneable y las 4 y 5 se dejaron sin recubrimiento. La figura 9 nos muestra todas las probetas utilizadas.

Figura 9. Probetas 1 – 6



Luego las probetas 2, 6 , 4 y 5 se sometieron al tratamiento térmico en las mismas condiciones que se usan para tratar las piezas fabricadas que se analizan en este estudio. Inmediatamente se sacaron del horno se enfriaron bruscamente en agua a temperatura ambiente.

Posterior al tratamiento térmico se efectuó una prueba de corrosión acelerada del tipo inmersión completa en solución salina saturada. La duración de la prueba fue de 96 horas tras las cuales se retiraron las probetas de la solución para su posterior evaluación.

Los resultados de la prueba fueron los siguientes:

- Igual que en el primer ensayo la probeta 1 mostró pocos síntomas de corrosión.

Figura 10. Apariencia probeta 1



La probeta 3, que tenía cordones de soldadura muestra síntomas de corrosión en áreas cercanas al cordón de soldadura como se puede apreciar en la figura 11.

Figura 11. Aspecto Probeta 3 con soldadura



La probeta 4, que fue “pintada” y luego sometida a tratamiento térmico presenta pocos vestigios de corrosión, la figura 12 muestra esta probeta

Figura 12. Aspecto Probeta 4



La probeta 6, que fue cubierta con pintura muestra superficialmente imperfecciones producto de la destrucción del recubrimiento después de haber sido sometida a enfriamiento con agua. Esta se observa en al figura 13.

Figura 13. Aspecto Probeta 6 con pintura horneable y tratamiento térmico



Después de la prueba de corrosión general se pudo observar que:

- La probeta 1 (no afectada) tuvo el mejor desempeño contra la corrosión.
- No pudieron distinguirse diferencias significativas en la resistencia a la corrosión entre las probetas con recubrimiento de pintura horneable (2 y 6) y sin éste (4 y 5).
- Las probetas con recubiertas pintura horneable se pudieron limpiarse mecánicamente con notoria mayor facilidad que las que no tuvieron recubrimiento.

3.2. TRATAMIENTO TERMICO

Descripción del proceso: El tratamiento térmico efectuado es un Austenizado con temple austenítico también llamado *hipertemple* , a pesar del nombre no se produce ningún cambio de fase durante éste, ya que el acero inoxidable

austenítico permanece en dicha fase durante todo el rango de temperatura, hasta llegar a la ambiental.

Temperatura inicial $T_i = 35^{\circ}\text{C}$ (ambiente)

Temperatura final $T_f = 1083^{\circ}\text{C}$

El tiempo requerido para lograr la temperatura final en el horno es de 230 min aproximadamente. Aunque conocemos la temperatura final del proceso, no conocemos la forma de la curva Tiempo – Temperatura que lo describe.

Para llegar a la temperatura de austenización las piezas deben cruzar la zona comprendida entre 550° y 800°C . Lo que desconocemos del actual proceso es cuanto tiempo se requiere para que la masa en el horno cruce la zona mencionada.

Una de las mejoras que se desea implementar en el proceso consiste en reducir el tiempo durante el cual las piezas se encuentren en la zona, que llamaremos “crítica”, durante el proceso, es decir, la zona entre 550° y 800°C tratando de acelerar el proceso de calentamiento del horno.

La solución para este problema consiste en adicionar otro quemador al horno que ayude a calentar al mismo con mayor rapidez. Con lo que se lograría reducir el tiempo de permanencia de la pieza en la zona “crítica”.

La otra mejora consiste en reemplazar el actual sistema de medición de temperatura por medio de la implementación de un pirómetro en el horno.

El pirómetro recomendado en este caso es una termocupla con display digital y relé de control para el dispositivo quemador.

3.3 PROCESO DE SOLDADURA MIG

El proceso de soldadura MIG efectuado sobre las piezas fue revisado en cuanto a procedimiento y parámetros de operación encontrándose acorde con los criterios técnicos que aplican a este proceso. Los parámetros que se controlan en el proceso de soldeo MIG pueden clasificarse en:

3.3.1 Parámetros predeterminados .

Estos se eligen antes de iniciar el proceso de soldeo y se determinan según el material a soldar, el tipo de unión y la posición de soldadura. Son:

- Tipo de electrodo
- Diámetro del electrodo
- Tipo de gas protector
- Flujo de gas protector

3.3.2 Parámetros dependientes del equipo.

Se ajustan en el equipo utilizado. Son :

- Velocidad de alimentación del alambre
- Tensión
- Inductancia

3.3.3 Dependientes de operario

Se refiere a las habilidades del operador para manejar la pistola del equipo de soldeo. Son:

- Velocidad de soldeo
- Distancia de la boquilla de contacto a la pieza
- Inclinación de la pistola.

CUADRO 6. CARTA DE SELECCIÓN DE ALAMBRES PARA SOLDADURA MIG / MAG EN ACERO INOXIDABLE SEGÚN AWS A5.9

Clasificación	Características y aplicaciones
AWS ER 308	Para unir materiales de composición similar , tipos 301 , 302 y 304
AWS ER 308L	Su bajo contenido de carbono impide la precipitación intergranular de carbono. Usado para los tipos 304 y 304 L
AWS ER 309	Para aleaciones termoresistentes de composición similar , juntas de metales disímiles .
AWES ER 310	Para metales base de composición similar , revestimientos de acero al carbono
AWS ER 312	Para aleaciones de composición similar / disímil, acero inoxidable a acero dulce y juntas de alta resistencia
AWS ER 316	Para composiciones similares . El molibdeno extra mejora la resistencia a la deformación y alas picaduras en soluciones de cloruro
AWS ER 316 L	El bajo contenido de carbono impide la precipitación intergranular de carbono. Usado para aceros inoxidable austeníticos con bajo contenido de carbono y aleados con molibdeno

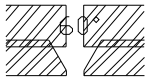
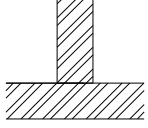
Se verificó el flujo de gas protector requerido para el soldeo . El caudal que se usa en el proceso es de 10 lt/ min , valor que es correcto según las recomendaciones AWS.

Se verificaron los demás parámetros del proceso encontrándose todos acordes con valores recomendados según las tablas AWS A5.9 y el proveedor de gases industriales AGA.

Se pudo observar que las boquillas de las pistolas presentan algunas rebabas e imperfecciones producto de su uso que podrían cambiar la distribución homogénea de la campana de gas protector.

También se verificó que los soldadores cuentan con calificación para soldar bajo el proceso usado en cada pieza en particular .

CUADRO 7. PARÁMETROS PARA SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES MEDIANTE PROCESO MIG.

Tipo de unión	Espesor Material (mm)	Abertura (mm)	Diámetro Alambre (mm)	Material Depositado (Kg /m)	Velocidad Alimentación (m / min)	Corriente (A)	Velocidad Soldeo (cm /min)	Voltaje (V)
	2	0	0.8	0.08	6/8	90/115	80/100	14/18
	3	1.0	1.0	0.05	7/9	100/130	80/100	16/18
	4	1.5	1.2	0.07	6/8	120/150	90/130	20/24
	5	2.0	1.2	0.08	7/9	120/200	90/140	22/24
	5	0	1.2	0.125	6/8	120/190	60/90	20/24
	6	0	1.2	0.160	6/8	120/190	60/80	20/24
	8	1.5	1.2	0.200	7/10	150/230	50/90	20/26
	10	2.0	1.2	1.250	7/10	150/230	60/90	20/26
	2	0	0.8	0.04	8/10	90/120	70/100	16/18
	3	0	1.0	0.06	6/9	100/160	60/90	16/20
	4	0	1.0	0.80	8/10	110/190	50/90	20/26
	5	0	1.2	0.021	6/10	130/240	30/70	20/26
	6	0	1.2	0.026	6/12	130/300	30/70	20/26
	8	0	1.2	0.820	6/12	180/300	30/60	20/26

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo del presente estudio se han identificado procedimientos susceptibles de mejora a través del uso de técnicas de estándar internacional e incluso de una nueva técnica de proceso desarrollada en la empresa por su Gerente de Ingeniería .

A continuación se evaluarán los distintos procedimientos describiendo las mejoras y recomendaciones sugeridas para cada uno.

Materiales. Debe considerarse el uso de lámina inoxidable estabilizada AISI 304 L para las partes fabricadas a partir de lámina.

Maquinas de Soldeo . Recomendamos mantener en óptimo estado las boquillas de las pistolas de las máquinas MIG para garantizar una correcta atmósfera protectora en el proceso de soldeo.

Sistema de medición de temperatura. Debido a la importancia del control de la temperatura se recomienda el uso de un pirómetro con el objetivo de establecer el perfil de la curva Temperatura – Tiempo del proceso. Una vez establecido este

perfil se puede determinar a partir de la observación de la curva si es necesario el uso de un segundo quemador en el horno para reducir el tiempo del proceso y disminuir el efecto de sensibilización.

Proceso de Tratamiento Térmico. Utilizar un segundo quemador para disminuir el tiempo total del proceso, dependiendo de los resultados obtenidos al elaborar la curva Tiempo – Temperatura, una vez se implemente el pirómetro digital en el horno.

Proceso de recubrimiento con pintura horneable. Se comprobó que facilita el proceso posterior de limpieza mecánica previa a la pasivación por lo que se considera muy recomendable para el proceso de fabricación.

Prueba de Sensibilización. Efectuar esta prueba utilizando una de las siguientes normas internacionales: AS2038 (1977 – revisado 1986) ó ASTM A262. Standard Practices for Detecting Susceptibility to intergranular Attack in Austenitic Stainless Steel. La anterior prueba permitirá determinar si una pieza es o no sensible a la corrosión intergranular y en consecuencia se podrá evaluar la conveniencia de procesos o procedimientos de manufactura determinados.

Proceso de pasivación. Efectuar el proceso utilizando una de estas normas internacionales

- ASTM – A967 Standard Specification for Chemical Passivation Treatments for Stainless Steel parts.

- ASTM – A380 Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipments, and Systems.
- QQ – P – 35C (U.S. Federal specifications)

En particular se recomienda la adopción de la norma ASTM 380 que describe los procedimientos de preparación de superficies y de soluciones ácidas para el pasivado.

Prueba de correcta pasivación

- ASTM B 117 Standard Practice for Operating salt spray apparatus.

Con la implementación de las anteriores mejoras y recomendaciones se tendrá mejor control sobre las condiciones en los procesos y se creará la oportunidad de mejorarlos continuamente a través de la evaluación en el tiempo del acabado final y del desempeño mismo de las piezas en su ambiente de trabajo real .

Con la adopción de estándares internacionales para el proceso de fabricación y para la evaluación del estado de las piezas acabadas se aumentará la calidad y confiabilidad del producto final.

BIBLIOGRAFIA

INCHAURZA ZABALA Adrián. Aceros inoxidables y aceros resistentes al calor. Propiedades, transformaciones y normas. Ed. Limusa.

ASM Handbook, Volume 20. Materials Selection and Design.

AGA. Manual de soldadura MIG/MAG y soldado de los aceros inoxidables

AGA. Guía del operario para la soldadura MIG/MAG

APRAIZ BARREIRO José Tratamientos Térmicos de los aceros,. ED. LIMUSA
9na EDICION.

ASKELAND Donald R.. La Ciencia e Ingeniería de los materiales .

APRAIZ BARREIRO José Aceros Especiales y otras aleaciones. ED. DOSSAT 5ta
EDICION.

GROOVER Mike P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Materiales, procesos
y Sistemas.. Ed. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.

VALENCIA Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales,. Editorial
Universidad de Antioquia. 2ª Edición 1992.