

**SOLDABILIDAD DE LOS HIERROS FUNDIDOS.
RECOMENDACIONES PARA SU SOLDADURA.**

Dr. C. Ing. Eduardo Torres Alpízar.

*1. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, Km 3 ½
Carretera a Varadero, Matanzas, Cuba.*

Resumen.

El empleo de los procesos tecnológicos de soldadura al reacondicionamiento de piezas de hierro fundido, constituye un caso sui generis. Debido a ello, se deberán estudiar no solo los problemas que de acuerdo a su soldabilidad metalúrgica presenten las fundiciones en si mismas, sino todas aquellas condiciones relacionadas con el estado de las piezas, después de un largo período de explotación, las cuales entorpecen la aplicación de procesos de soldadura a la recuperación de dichos elementos de máquina. El reacondicionamiento de piezas partidas y desgastadas de hierro fundido gris mediante estos procesos, está ampliamente extendido en el campo de la ingeniería mecánica. La presente monografía constituye un resumen acerca de los problemas de soldabilidad presentes en los Hierros Fundidos Grises, así como las recomendaciones que desde el punto de vista práctico se aplican para llevar a cabo estos procesos.

Palabras claves: Hierro Fundido, Soldabilidad, Ingeniería Mecánica, Tecnología, Soldadura, Tratamiento Térmico.

Bosquejo histórico de la utilización del hierro fundido como material de construcción. Clasificación de los hierros fundidos.

Según (Heyer, 1949) se han encontrado en Japón y en China hierros fundidos pertenecientes a los primeros siglos de la era cristiana. También existen evidencias ciertas de obras escultóricas romanas de la misma época fabricadas de hierro fundido. En 1939 se publicaron datos de composición química y fotografías de la microestructura de una fundición china hecha en el período entre los años 500-1100 de nuestra era. Esta pertenecía a un panel existente en una pagoda próxima a Nanking la cual se piensa fue edificada en el año de 1093. La estructura observada era la típica de un hierro fundido blanco hipoeutectoide. La fotografía de esa estructura se reproduce en la figura 86 del libro antes mencionado.

Esas primeras fundiciones fueron hechas probablemente reduciendo el hierro a través de carbón vegetal en pequeños hornos de crisol o de pozo. Este tipo de horno comenzó a asumir su forma actual en Europa en el siglo XIV. Los cañones y las balas de cañón fueron

los primeros productos elaborados de hierro fundido. Ya en el siglo XVI en Inglaterra se manufacturaron una considerable cantidad de piezas de artillería pesada.

El hierro fundido se volvió provechoso para los propósitos ingenieriles y domésticos después del desarrollo del horno de cubilote entre los siglos XVIII y XIX. Según la referencia (Roshental et al, 1995), el primer horno de cubilote fue patentado en el año 1794. En la misma publicación se plantea que en Estados Unidos de Norteamérica el primer cubilote comenzó a funcionar en el año 1820. En el libro “Welding for engineers” (Udim et al, 1954), se señala al año 1947 como el año de desarrollo del hierro nodular.

Casi todos los autores consultados para la realización del trabajo definen a los hierros fundidos como aleaciones de hierro carbono en los cuales el contenido de carbono varía teóricamente entre (2.1 a 6.7%); aunque en la práctica estos tantos porcientos se limitan en la mayoría de los casos entre 2.7 y 3.7%. Algunos autores difieren de este criterio generalizado como son los casos de Sidney Avner (Avner, 1970), que sitúa el contenido de carbono para los hierros fundidos comerciales entre 2.5 y 4 %. Por otra parte en (Southwell et al, 1990) se establece que los hierros comerciales se encuentran entre un 2 y un 4%.

Los elementos que siempre se encuentran presentes en los hierros fundidos son carbono, manganeso, silicio, fósforo y azufre; aunque en algunos casos podemos encontrarnos: níquel, cobre, cromo.

Los hierros fundidos difieren de los aceros en:

1. Mayor contenido de carbono.
2. En su estructura pueden aparecer ledeburita, grafito, perlita, ferrita.
3. Menor punto de fusión lo que provoca mayor fluidez.
4. Poca capacidad de deformación plástica.
5. Mayor contenido de silicio, manganeso, fósforo, azufre.

Según el método de obtención de los hierros fundidos y atendiendo al estado o forma del grafito se clasifican según (Guliaev, 1978), (Hardbroken, 1966), (Iron Casting Society, 1981) y (Vislavzil, 1967) en:

a) Fundiciones blancas: Se caracterizan porque en ellas todo el carbono se va a encontrar combinado con el hierro. Las estructuras que presentan son de perlita, cementita y ledeburita. En ellas la zona fracturada presenta un color blanquecino caracterizándose

además por:

- Elevada dureza.
- Elevada fragilidad.
- Baja maquinabilidad.
- Elevada resistencia al desgaste.

b) Fundiciones grises: Se caracterizan porque la mayor parte del carbono se encuentra en estado libre de grafito laminar. Presenta las siguientes propiedades:

- Buena maquinabilidad.
- Elevada resistencia al desgaste.
- Buenas propiedades de fundición.

Por su forma son capaces de amortiguar vibraciones. Atendiendo a su estructura las fundiciones grises se dividen en:

- Fundición gris perlítica.
- Fundición gris ferrito-perlítica.
- Fundición gris ferrítica.

c) Fundiciones de alta resistencia (nodulares): Se caracterizan porque todo el carbono se encuentra en forma de grafito nodular. Esta fundición se obtiene añadiendo magnesio o cerio a la carga de metal fundido durante el proceso de fundición. Presenta las siguientes propiedades:

- Mayor ductilidad.
- Mayor resistencia al fuego.
- Mejor resistencia al desgaste.

d) Fundiciones maleables: Se caracterizan por presentar el carbono libre en forma de grafito, el cual se encuentra en forma de roseta y se obtiene a partir de someter a la fundición blanca a un recocido de grafitización (existen otros métodos como la cementación continuada de aceros de alto carbono). Presenta las siguientes características:

Alta resistencia a la tracción.

- Elevada plasticidad.
- Elevada viscosidad al impacto.

e) Fundiciones aleadas: Se caracterizan por presentar elementos maleantes como el cromo, níquel, manganeso, silicio, aluminio, cobre, titanio, molibdeno, vanadio los cuales influyen

en la microestructura y propiedades de las mismas. Sus propiedades fundamentales son:

- Resistencia a la formación de cascarilla.
- Resistencia a la abrasión.
- Resistencia a algunos ácidos.
- Termorresistencia.

Algunos autores como (Avner, 1970) y (Lajtin, 1973) agregan a las fundiciones anteriormente señaladas un nuevo grupo, que el primero llama “fundición en coquilla” y el segundo “fundición templada”, haciendo en ambos casos los dos autores referencia al mismo tipo de fundición. Estas fundiciones se obtienen al verter el metal fundido durante la colada en cosquillas o moldes metálicos. De esta forma al existir mayor velocidad de enfriamiento en la superficie, se origina, al dificultarse el proceso de grafitización una estructura de fundición blanca y en el centro de la pieza, al existir una velocidad que favorece la descomposición de la cementita, se forma una estructura de fundición gris. Entre la superficie y el centro de la pieza existirá una zona de fundición atruchada o intermedia.

Composición química de los hierros fundidos.

La composición química ejerce una influencia determinante sobre la estructura y propiedades de los hierros fundidos, pues la presencia de elementos tales como: carbono, silicio, níquel, etc., favorecen la grafitización mientras que el manganeso y el cromo dan lugar a la formación de cementita. La fundición gris objeto de nuestro estudio presenta las mismas impurezas pero en mayor grado.

La cantidad de carbono en forma de grafito o de cementita depende de la velocidad de enfriamiento, la cual está muy relacionada con el espesor de la pieza, mientras mayor sea el espesor menor será la velocidad de enfriamiento y mayor tendencia a la grafitización.

El contenido de silicio en los hierros fundidos se encuentra entre el 1,4 y el 5 % lo que da la posibilidad al material de obtener las siguientes estructuras:

- Fundición intermedia o atruchada.
- Fundición gris perlítica.

- Fundición gris ferrito-perlítica.
- Fundición gris ferrítica.

El manganeso favorece la formación de cementita (Fe_3C) o el carburo complejo de cementita, el cual es de mayor estabilidad. Este efecto del manganeso se nota para bajos porcentajes del mismo, no sobrepasando por lo general el 1% en los hierros fundidos normales.

El azufre favorece la formación de cementita, pero esta influencia es poco notable cuando existen cantidades apreciables de carbono y silicio. Este elemento disminuye la fluidez del hierro fundido, por lo que su máximo contenido se limita a 0.1%. Empeora el costo del metal y sus propiedades mecánicas.

El fósforo es un elemento que se encuentra en valores entre el 0.1 y el 0.5 %. Este se introduce a los hierros fundidos con el objetivo de aumentar la fluidez de estos materiales. Esto se logra a partir de la formación de la eutéctica fosfórica ($Fe-Fe_3C-Fe_3P$), la cual presenta bajo punto de fusión. La influencia de este elemento en la grafitización es nula.

En la obtención del hierro fundido nodular tienen mucha importancia los elementos nodulizantes, como los encargados de suministrar al grafito la forma que conduce a la obtención de este hierro fundido de alta resistencia. Según (Lajtin, 1973) el contenido de Mg a introducir durante la inoculación del hierro fundido nodular sería entre 0.03-0.07 %. Señala además que el mismo eleva la capacidad del hierro al sobreenfriamiento y por tanto de temple al aire. Para evitar la tendencia de temple al aire se realiza una doble inoculación, agregando magnesio para nodulizar e introduciendo ferrosilicio como grafitizador.

En la referencia bibliográfica (Lakhtin, 1970) se plantea además que la presencia de titanio durante la obtención del hierro fundido nodular, deforma el nódulo de grafito y provoca la aparición de carburos.

En (Smith, 1929) aparecen reflejados los datos de composición química para los hierros fundidos no aleados según la A.I.S.I. en la tabla 9.13. Por su importancia la reproducimos a continuación.

Elemento Químico.	Fundición Blanca. %.	Fundición Gris. %.	Fundición Maleable. %.	Fundición Nodular. %.

Carbono.	1.3-3.6.	2.5-4.0.	2.0-2.6.	3.0-4.0.
Silicio.	0.5-1.9.	1.0-3.0.	1.1-1.6.	1.8-2.8.
Manganeso.	0.2-0.8.	0.2-1.0.	0.2-1.0.	0.1-1.0.
Azufre.	0.06-0.02.	0.02-0.2.	0.04-0.1.	0.03 max.
Fósforo.	0.06-0.1	0.05-1.0.	0.18 max.	0.10 max.

Se pueden adicionar otros elementos tales como el níquel, cromo, molibdeno, cobre para producir hierros fundidos aleados.

Proceso de formación del grafito en los hierros fundidos grises.

Según (Guliaev, 1978) la formación de grafito a partir del líquido o de la austenita se efectúa durante el enfriamiento, en el estrecho intervalo de temperaturas que hay entre las líneas de los diagramas estable y metaestable del sistema hierro carbono (1147-11538 °C), es decir, en las condiciones de pequeños subenfriamientos o por consiguiente a pequeñas velocidades de enfriamiento. De aquí llegamos a la conclusión de que la formación de las estructuras de la fundición gris directamente desde el líquido o de la austenita se produce cuando el enfriamiento es lento, mientras que la formación de las estructuras de la fundición blanca, cuando el enfriamiento es más rápido, lo cual ha sido confirmado multitud de veces por la experiencia.

La formación de grafito a partir del líquido o de la austenita es un proceso que transcurre lentamente, ya que el trabajo de formación del germen de grafito es grande y requiere una considerable difusión de los átomos de carbono para la conformación de los cristales de grafito, y una retirada de los átomos de hierro frente a la cristalización del grafito.

En las aleaciones hierro carbono puras, la formación directa de grafito procedente del líquido sería un fenómeno poco frecuente, a no ser por una circunstancia que favorezca su formación. El caso es que el líquido, en las aleaciones con alto contenido de carbono (fundiciones) no es en la práctica completamente puro. Por lo general la fundición una vez fundida, está “turbia” es decir, contiene en estado de suspensión partículas diminutas de inclusiones e impurezas, entre ellas partículas muy pequeñas de grafito. En estas partículas comienza el proceso de cristalización del grafito, ellas son la pared en la cual precipitan los

átomos de carbono formando el cristal de grafito. En este caso el trabajo de constitución del germen de grafito puede no ser mayor que el de formación del germen de cementita. Por lo regular, incluso a temperatura inferior a la temperatura de equilibrio (1147 °C) resulta ser cinéticamente posible la formación de cristales de grafito.

El recalentamiento de la fundición hasta una temperatura considerablemente mayor que la de fusión, hace que se disuelvan estas partículas en suspensión, aunque no probablemente en su totalidad, lo que dificulta la formación directa del grafito. La introducción de diversos aditivos en la fundición puede ocasionar la aparición de centros adicionales de cristalización del grafito, lo cual favorece en una serie de casos la formación de este último.

En dependencia de las condiciones de cristalización se obtiene grafito de formas distintas. Aparte del proceso de formación del grafito directamente durante la cristalización, es posible otro proceso de formación de grafito. Al ser la cementita un compuesto químico inestable en determinadas condiciones (a una temperatura dada) se descompone formando austenita y grafito o ferrita y grafito. Para que el proceso se realice, es necesaria la difusión del grafito hacia los centros de cristalización del grafito y la autodifusión del hierro de los puntos en los cuales se segregue grafito.

A la temperatura ambiente este proceso no se desarrolla prácticamente, pero con la elevación de la temperatura se acelera bruscamente. Esta característica permitió desarrollar el recocido de grafitización mediante el cual se obtienen las fundiciones maleables a partir de las fundiciones blancas.

El silicio influye especialmente en la estructura de la fundición intensificando la grafitización. Variando el contenido de silicio pueden obtenerse fundiciones completamente distintas por sus propiedades y estructuras desde blanca, pobre en silicio, hasta ferrítica de alto contenido de silicio (gris con grafito laminar o de alta resistencia con grafito esferoidal) para las mismas condiciones de enfriamiento y manteniendo el resto de la composición química.

Propiedades de los hierros fundidos.

Los hierros fundidos grises están compuestos por una base metálica y grafito. Los valores de las propiedades mecánicas están dados fundamentalmente por la base metálica, aunque

la forma tamaño y distribución del grafito tienen influencia en dichas propiedades. Las láminas de grafito tienen una resistencia cohesiva muy pequeña. Su presencia reduce grandemente la sección transversal efectiva del metal de la fundición.

Las bases metálicas de los hierros fundidos pueden ser: ferríticas, ferrito-perlíticas, perlíticas y atruchadas o intermedias. El grafito puede encontrarse en forma de láminas gruesas o de pequeñas escamas, disminuyendo las propiedades mecánicas debido a que disminuye el área de sección transversal de la pieza, pues el mismo se considera como una cavidad dentro de la matriz metálica, por no presentar resistencia. Constituye además un concentrador de tensiones. El grafito ofrece sin embargo algunas propiedades al hierro fundido en comparación con el acero debido a que facilita la mecanización, haciendo que la viruta sea más frágil y se rompa cuando la herramienta llegue a la inclusión de grafito. Gracias a sus cualidades lubricantes el grafito aumenta las propiedades antifricción del hierro fundido.

La existencia de segregaciones de grafito amortigua rápidamente las vibraciones y las oscilaciones de resonancia. La resistencia a la tracción de los hierros fundidos se encuentra entre 210 y 280 MPa. El límite de fluencia no está bien definido como en otras aleaciones ferrosas, pero para la práctica se considera igual a la resistencia máxima del material, es decir en ellos la deformación plástica es nula. La resistencia a la compresión es de 2.5 a 4.5 veces mayor que la resistencia a la tracción y la viscosidad de impacto es muy baja, sobre todo cuando el contenido de fósforo es muy elevado.

Los hierros fundidos de acuerdo con sus propiedades mecánicas, la forma de obtención de los mismos y la forma en que aparece el grafito según (Iron Casting Society, 1981) y (White, 1948) se pueden clasificar en:

- Hierro fundido gris de baja resistencia.
- Hierro fundido gris de mediana resistencia.
- Hierro fundido gris de alta resistencia.

Problemas en la Soldabilidad de los hierros fundidos grises.

Exceptuando los hierros fundidos blancos que no se consideran soldables, en los hierros fundidos grises se presentan problemas fundamentales y secundarios que afectan su soldabilidad. Los problemas principales siempre están presentes, mientras que los

secundarios pudieran aparecer algunas veces. Según (Rodríguez, 1983) y (Seferian, 1979) los hierros fundidos durante la soldadura pueden presentar los siguientes problemas:

Problemas de Soldabilidad principales del hierro fundido.

a) Agrietamiento debido a las características físico químicas del material (plasticidad nula). La presencia de grafito en forma laminar constituye un factor que favorece el agrietamiento.

b) Formación más o menos localizada de cementita (fundición blanca) la cual se puede presentar tanto en la zona fundida como en la zona de influencia térmica. En la práctica se conoce con el término de granos duros, dificultando enormemente la maquinabilidad de los hierros fundidos.

Problemas de Soldabilidad secundarios de los hierros fundidos.

a) Formación de poros en la zona fundida, debido a que por el alto contenido de carbono de los hierros fundidos se forman óxidos de carbono (CO_2 y CO) los cuales no tienen tiempo de escapar del baño fundido por el rápido enfriamiento.

b) Formación de una película refractaria de óxidos de silicio y manganeso durante el proceso de soldadura, los cuales tienen un alto punto de fusión con respecto al metal base.

c) Alta fluidez de los hierros fundidos, ya que provoca la imposibilidad de soldar estos materiales en posiciones inclinadas, verticales y menos aún sobrecabeza.

En algunas ocasiones las condiciones de trabajo de las piezas, previas al proceso de recuperación por soldadura, ocasionan problemas que dificultan la reparación de estas que son:

a) Crecimiento del hierro fundido gris: Este problema se presenta cuando la pieza trabaja largos períodos por encima de los 400°C o sufre calentamiento reiterados por encima de esta temperatura y muy especialmente por encima de los 800°C , lo cual provoca un

aumento del volumen alrededor de un 40% y un gran desarrollo de tensiones internas. Todo lo expuesto anteriormente se debe a la descomposición de la cementita (Fe_3C) en hierro (Fe) y carbono. Este problema provoca el agrietamiento durante el proceso de soldadura.

b) Infundibilidad: Aparece en piezas que han estado en contacto con aceite, grasas y agua de mar durante un período prolongado de tiempo, debido a que estas se embeben o empapan con estas sustancias trayendo consigo que a la hora de soldar la acción de la temperatura provoque que estos líquidos salgan a la superficie llevando a la pieza a un estado de infundibilidad.

Además de los problemas anteriormente citados durante la soldadura del hierro fundido al encontrarse este a temperaturas superiores a la de austenización comienza a ocurrir un desprendimiento de carbono a partir de las inclusiones de grafito. Este será mayor o menor en la medida que la inclusión de grafito esté situada más cerca del baño de soldadura. En la zona de influencia térmica y más específicamente en la zona de sobrecalentamiento el aumento de la temperatura al elevar el coeficiente de difusión favorece la migración de los átomos de carbono de la inclusión de grafito hacia el grano de austenita. Si el enfriamiento de la aleación es lento parte de este carbono regresará a la inclusión de grafito. En caso de enfriamiento rápido este carbono reaccionará con el hierro formando carburos y cementita. Este proceso está descrito en el texto (Udim et al, 1954).

Para explicar la influencia de la temperatura máxima de calentamiento y la velocidad de enfriamiento en la estructura que se origina en (Udim et al, 1954) se efectuó un análisis en este sentido. Para esto se considera una inclusión de grafito nodular en una fundición de matriz ferrítica. Algún tiempo después de que la fuente de calor pase este nódulo y sus alrededores alcanzan un máximo de temperatura determinado por la distancia del nódulo desde la línea de avance de la fuente y por la velocidad e intensidad de la fuente. El grafito entonces enfría con una velocidad comparable pero algo más lenta que la velocidad a la cual aumentó la temperatura. Se selecciona un nódulo que fue calentado a 1300°C . a 738°C una capa delgada de hierro y la interfase ferrita grafito se transforman en austenita. Sin embargo, el grano de ferrita contiene insuficiente carbono y entonces no puede transformarse. En la interface entre la austenita y el grafito el contenido de carbono crece

rápida sobre el nivel de saturación de 0.75 % C, suministrando un gradiente difusivo que fuerza el carbono hacia el resto del hierro.

Como la temperatura continúa aumentando muchas cosas pasan simultáneamente. El contenido de carbono se incrementa a lo largo de la línea Ac_m. El parámetro de la red de austenita aumenta rápidamente, desde el que el grado de difusión del carbono se incrementa exponencialmente con la temperatura a la T₁ del diagrama 1, la austenita de la interfase γ : grafito contiene 0.9 % mientras que la austenita de la interfase γ : α contiene un 0.5 % de carbono. Los gradientes de carbono se muestran sistemáticamente en el diagrama 2, el cual contiene una representación de un nódulo de grafito enfriado rápidamente desde T₁.

Al tiempo que la temperatura alcanza 738°C la matriz entera se transformará en austenita. Los procesos de difusión continúan acelerándose y a la temperatura T₂ ocurrirá una penetración considerable del carbono en la austenita. A 1140°C ocurre una reacción de forma completamente análoga a la primera que comenzó a 738°C. Ahora sin embargo, la nueva fase que se forma es una película interfacial de líquido. El carbono se difunde muy rápidamente en hierro líquido y a la temperatura T₃ la capa de líquido se hace gruesa.

Ahora se analizará la secuencia de sucesos que pueden ocurrir durante el enfriamiento. El análisis se basó en las siguientes consideraciones:

- 1) La velocidad de enfriamiento es más lenta que la velocidad de calentamiento, pero es sin embargo más rápida que la velocidad de enfriamiento típica de la fundición en moldes de arena.
- 2) Las reacciones que ocurren en el calentamiento son termodinámicamente reversibles. Por ejemplo, durante el enfriamiento el carbono disuelto puede, en principio, redepositarse en el nódulo de grafito.
- 3) Cualquier zona puede en principio, padecer las reacciones de pseudoequilibrio indicadas por el diagrama de fase hierro-cementita.
- 4) La velocidad de enfriamiento es lo bastante rápida que la templabilidad en cualquier zona dada puede ser considerada. En otras palabras; una zona puede reaccionar en desacuerdo con los diagramas hierro-cementita y hierro-grafito pero de acuerdo con su propio diagrama de descomposición isotérmica de la austenita (T.T.T.).

Caso 1:

Considerando previamente una zona que alcanzó la temperatura T1. A esa temperatura cada nódulo de grafito está rodeado por granos de austenita; con un contenido de carbono que varía desde 0.5 a 0.9%. Subenfriando, la capa interior de la celdilla se encuentra en equilibrio con el grafito por debajo de A1.

A la temperatura A1 los gradientes de carbono son como se muestran en el diagrama 2a. El promedio de composición química de la austenita alrededor de 0.8 % C y todas las partes contienen mas de 0.5 % C. Por debajo de A1 la zona reacciona de una forma predecible desde el diagrama hierro-grafito. Por debajo de A1 las reacciones no dependen fuertemente de la velocidad de enfriamiento. Si se alcanza A1 sin precalentamiento la celdilla de austenita podrá transformarse en martensita. Con precalentamiento moderado la tendencia será a la formación de perlita. Teóricamente con un precalentamiento alrededor de 1000°C todo el carbono deberá redifundirse de regreso al nódulo de grafito, pero esto no ocurre en la práctica de la soldadura.

Caso 2.

Considerando la zona calentada a la temperatura T2. Otra vez la interfase grafito austenita permanece en equilibrio. Alrededor de 738°C toda la austenita en la cual el carbono no ha penetrado se transforma en ferrita. Con un subenfriamiento adicional hasta A1 el resultado en esta zona será como en la aleación que fue calentada en el caso 1 hasta T1. El **diagrama 2b** muestra la distribución del carbono en A1 para este caso. Con un rápido enfriamiento por debajo de A1 se vuelve a obtener martensita. Si se usa un precalentamiento moderado, se obtiene perlita, pero existirá la posibilidad de que precipiten carburos proeutectoides libres en las regiones hipereutectoides.

Caso 3.

Finalmente se considera un la zona de calentamiento hasta T3 . Aquí las reacciones son más complejas. Subenfriando hasta C, el carbono se depositará en forma de nódulos de grafito de una forma aproximadamente reversible. Mientras tanto, sin embargo, desde el baño

fundido se enfría la matriz de austenita. Esta y la cara fundida de la interfase γ : líquido se enfrían siguiendo la línea de composición G3 E y L3 C respectivamente. La temperatura E C representa la eutéctica austenita - grafito pero la velocidad de enfriamiento es generalmente muy rápida para permitir la precipitación de grafito de la eutéctica y el enfriamiento continuo hasta E C, la cual es la temperatura ledeburítica, forma la eutéctica de austenita cementita.

Cuando el enfriamiento se completa, esta zona consiste en nódulos de grafito rodeados por ledeburita en una matriz de austenita. Un enfriamiento adicional trae como resultado una reacción en la matriz similar a la del caso 2. La austenita con bajo contenido de carbono se transforma en ferrita alrededor de 730°C y los granos de austenita de alto contenido de carbono se transforman en martensita o perlita de acuerdo a su diagrama T.T.T.

Diagrama 1: Esquema de calentamiento de la aleación analizada en el ejemplo anteriorde acuerdo al diagrama de estado Hierro-Carbono.

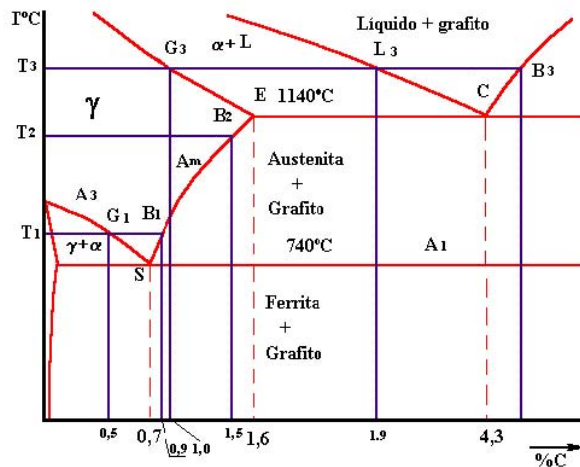
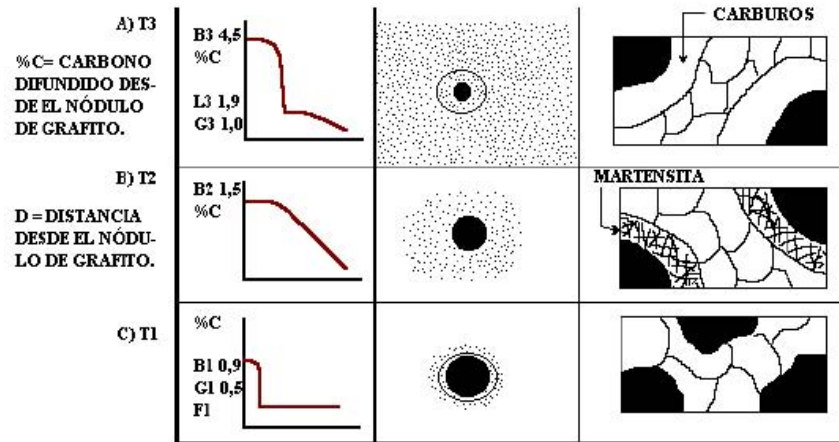


Diagrama 2: Comportamiento de la difusión del carbono y la estructura final en la aleación analizada en el ejemplo anterior de acuerdo a la zona de calentamiento.



Electrodos empleados en la soldadura del hierro fundido.

Los métodos de soldadura manual por arco eléctrico de los hierros fundidos grises pueden ser muy variados, diferenciándose esencialmente en el tipo de electrodo a utilizar y en la aplicación o no de precalentamiento. Estos métodos se clasifican en dos grandes grupos en dependencia o no de la aplicación del precalentamiento: soldadura manual por arco eléctrico con precalentamiento (en caliente) y soldadura manual por arco eléctrico sin precalentamiento (en frío). Los electrodos utilizados para la soldadura del hierro fundido según la American Welding Society (A.W.S.) se dividen de acuerdo a (AWS, 1992) en:

- a) Electrodos base hierro AWS: ECI, ESt.
- b) Electrodos de níquel - hierro AWS: ENiFeCI.
- c) Electrodos de níquel puro AWS: ENiCI.
- d) Electrodos de metal monel AWS: ENiCu-A, ENiCu-B.
- e) Electrodos de bronce AWS: ECuSn-A, ECuSn-C.

En la referencia (Udim et al, 1954) se dan las consideraciones de la utilización de cada uno de estos electrodos en dependencia de la tecnología de soldadura que se desee aplicar en cada caso. Cuando se realiza la soldadura en frío se recomienda la utilización de cualquiera de estos electrodos teniendo en cuenta los siguientes requisitos:

- 1) Cuando no se requiere maquinar el refuerzo del cordón ni cortarlo transversalmente obteniendo una resistencia de la costura similar a la del metal base se recomienda el

electrodo base hierro.

2) Cuando se requiere maquinar el refuerzo del cordón sin cortar transversalmente la costura se recomienda el electrodo de níquel hierro.

3) Cuando se requiere maquinar el refuerzo y la sección transversal de la costura se recomienda el electrodo de níquel puro.

Durante el empleo de estos dos últimos electrodos hay que tener en cuenta durante la reparación el costo elevado de los mismos siendo mas elevado en el caso de los electrodos de níquel que los electrodos de níquel hierro. Estos últimos brindan una mayor resistencia mecánica que los de níquel.

La soldadura en frío se aplicará cuando se suelden piezas con libre dilatación y contracción del metal. Cuando la pieza muestre condiciones de empotramiento o limitaciones en su libre dilatación es que se recomendará la soldadura en caliente. Durante la soldadura en caliente se disminuye la tendencia al agrietamiento del hierro fundido por sus problemas de dilatación y a la formación de cementita. Sin embargo es necesario que el precalentamiento se aplique sólo cuando hace falta debido a que este ocasiona ciertas desventajas tales como:

- a) Manipulación difícil de la pieza a reparar y mayor riesgo de accidente.
- b) Dificultad de operación debido al calor de radiación.
- c) Costos del calentamiento y accesorios para efectuar el mismo.

Si se selecciona la soldadura en caliente los criterios de selección de los electrodos serían:

1) Cuando las piezas estén empotradas, necesiten maquinado, se precise elevada resistencia mecánica de la costura y cuando hay limitación de recursos monetarios se recomienda soldar con electrodos de níquel hierro.

2) El electrodo de níquel puro se recomienda en aquellas costuras donde hay que utilizar gran cantidad de metal de aporte y donde las condiciones de empotramiento de la pieza exige alta plasticidad de la costura; siendo las realizadas con estos electrodos las más caras y donde resistencia mecánica se ve afectada con respecto a los electrodos de níquel hierro.

Con el objetivo de disminuir los costos de las soldaduras se recomienda realizar la soldadura depositando cordones alternos de electrodos de níquel y de níquel hierro. Así se consigue elevar también la resistencia mecánica de la costura. En costuras muy grandes se recomienda asimismo depositar un lecho o base de electrodos de níquel y níquel hierro y los cordones de relleno realizarlos electrodos de acero del tipo E6013 o E7018.

La soldadura con electrodos de metal monel y de bronce tiene el inconveniente que al soldar con los mismos se desprenden vapores de metales no ferrosos perjudiciales a la salud del operario, por lo cual se exige una buena ventilación del local donde se efectúa la soldadura. La resistencia mecánica de los cordones realizados con estos electrodos es muy baja.

Tratamiento térmico de los hierros fundidos.

Según el folleto (UCLV, 1983) a los hierros fundidos se les aplican los tratamientos térmicos siguientes:

1) Recocido para eliminar tensiones: Se da a las siguientes temperaturas en dependencia del tipo de fundición:

- a) . Gris laminar 500-570°C.
- b) Nodular 530-650°C.
- c) . Baja aleación 520-600°C.
- d) Alta aleación 620-650°C. El tiempo de mantenimiento es de una hora por cada 25 mm de espesor. El enfriamiento se realiza en el horno.

2) Recocido ablandador: Mejora el maquinado y eleva la plasticidad se logra con calentamiento prolongado de 680 a 700°C.

3) Recocido grafitizador: Se logra la descomposición de la cementita. Dependiendo del tipo de fundición el rango de temperatura varía entre 850 y 1050°C. El tiempo de tratamiento depende de las condiciones específicas de la fundición. Este tratamiento tiene como objetivo disminuir la dureza y mejorar la maquinabilidad.

4) Recocido esferoidizante: Se usa para mejorar las propiedades mecánicas de las piezas de importancia construidas de fundición maleable o de alta resistencia. Como resultado de este tratamiento se transforma la perlita laminar en globular. El rango de temperatura oscila entre 730 a 750 °C y el tiempo de duración del proceso es de algunas horas con enfriamiento al aire.

5) Normalización: Se realiza en el rango de 850 a 950°C con enfriamiento al aire. Este tratamiento aumenta la dureza , la tenacidad y la resistencia al desgaste. Se logra como resultado de la ferrita o ferrita-perlita en perlita. En el “Niresist” mejora la maquinabilidad.

6) Temple y revenido: Para el temple la fundición se calienta por encima del punto Ac1 con

enfriamiento en aceite a continuación se hace el revenido cuya temperatura puede oscilar entre los 200 y los 600°C. Con este tratamiento aumenta la tenacidad la dureza y la resistencia al desgaste.

7) Tratamiento termoquímico: Tiene como objetivo aumentar la dureza superficial, la resistencia al desgaste y a la corrosión, así como otras propiedades superficiales. Dentro de estos tratamientos se encuentra la nitruración que se realiza entre 550 y 700°C en dependencia del tipo de fundición. En el hierro fundido al magnesio se logran durezas superficiales de hasta 1000 HB.

Se ha comprobado experimentalmente que los elementos de aleación (Mn, Si, Mg, Cr, Ge, Mo, W, Ce, Ni) elevan la dureza de la capa nitrurada y disminuyen su profundidad en comparación con el hierro sin alear. El aluminio tiene la característica que eleva la dureza de la capa nitrurada sin disminuir la profundidad de la misma. La cementación no se utiliza en el caso de los hierros fundidos porque sería incongruente tratar de enriquecer con carbono la superficie de un material demasiado rico en este elemento. La cianuración ni la carbonitruración se emplean por las mismas razones.

Recomendaciones para la soldadura del Hierro Fundido. Principios del precalentamiento.

Según (Rodríguez, 1983) el precalentamiento de los hierros fundidos se define a través de las siguientes interrogantes y condiciones:

- a) ¿Se soldará con o sin precalentamiento?
- b) Si se precalienta ¿De que forma? ¿Local o total?
- c) El precalentamiento se emplea sólo cuando es indispensable y sólo hasta la temperatura que sea necesario.

En la selección del precalentamiento de una forma local o total será necesario analizar si durante el calentamiento existe la libre dilatación es decir la no aparición de tensiones de compresión (σ_c) y de tracción (σ_t). Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas de los hierros fundidos no será necesario el precalentamiento de las piezas cuando existe la libre dilatación, sin embargo para evitar la formación de cementita se le aplica un ligero calentamiento local. En piezas de hierro fundido rígidas, es decir, cuerpos huecos

reforzados, con nervios, etc., el calentamiento local es inútil y entonces es indispensable el calentamiento total el cual debe ser uniforme en todas las dimensiones y secciones.

En la soldadura de piezas grandes se aplica un precalentamiento local, mantenido durante el proceso de soldadura para lograr la libre dilatación de la pieza.

Formas de precalentamiento.

a)- Precalentamiento local.

1. Llama oxiacetilénica.
2. Hornos de llama.
3. Calentamiento por inducción.

b)- Precalentamiento total.

1. Hornos de resistencia eléctrica.
2. Hornos de fragua o forja.
3. Pozos de calentamiento.

Formas de aplicación del precalentamiento.

De acuerdo a (Rodríguez, 1983) la temperatura de precalentamiento se selecciona teniendo en cuenta los siguientes criterios:

a)-Precalentamiento local:

La temperatura de precalentamiento se da en función de la deformación localizada requerida, para una separación tal que libere el empotramiento. Esto puede calcularse en algunos casos por las ecuaciones de dilatación lineal correspondiente; generalmente no sobrepasa los 300°C.

b)-Precalentamiento total:

En piezas de mayor rigidez es, decir, cuando se trata de piezas que no están enteramente cerradas con paredes que no estén reforzadas o donde se admita cierta deformación en flexión, se recomienda una temperatura de precalentamiento entre 300 y 400°C, como por ejemplo en cajas de reductores de velocidad, cárteres de motores, etc. En piezas de mayor rigidez como es en el caso de bloques de cuerpos de bombas, etc., la temperatura de precalentamiento que se recomienda está entre 600 y 800°C.

Los hierros fundidos en dependencia de las temperaturas a la que se sueldan podrán

soldarse en frío o en caliente. En la selección del precalentamiento de una forma total o local será necesario analizar si durante el precalentamiento existe la libre dilatación es decir, la ausencia de aparición de tensiones de compresión (σ_c) y de tracción (σ_t). Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas de los hierros fundidos no será necesario el precalentamiento de las piezas cuando existe la libre dilatación, sin embargo para evitar la formación de cementita se aplica un ligero precalentamiento final.

En piezas, de hierro fundido, rígidas es decir, cuerpos huecos reforzados con nervios, etc., el calentamiento local es inútil y entonces es indispensable el calentamiento total, el cual debe ser uniforme en todas las secciones.

En piezas grandes se aplica un precalentamiento local mantenido durante el proceso para lograr la libre dilatación de la pieza.

➤ **Criterios de temperatura de precalentamiento.**

□ **Precalentamiento local:** Generalmente a 300°C.

□ **Precalentamiento total:**

1. Piezas de menor rigidez como cajas de reductores, cárteres de motores, etc. De 300 a 400°C.
2. Grietas rectas y cortas terminadas en aristas o agujeros. De 350 a 400°C.
3. Grietas ramificadas sin salida al borde de la pieza. 600 – 750°C.

➤ **Soldadura por arco eléctrico de los hierros fundidos.**

❖ **Electrodos para la soldadura del hierro fundido.**

Según la American Welding Society (AWS)*

1. E – St: Electrodo de alambre de acero con revestimiento grafitado.
2. E – CI: Electrodo de alambre de hierro fundido con revestimiento grafitado.
3. E – NiCI: Electrodo de alambre de níquel puro.
4. E – NiFeCI: Electrodo de alambre de níquel hierro.
5. E – NiCuCI: Electrodo de alambre de metal monel (35% de Cu y 65% de Ni).

[*Sociedad Americana de Soldadura].

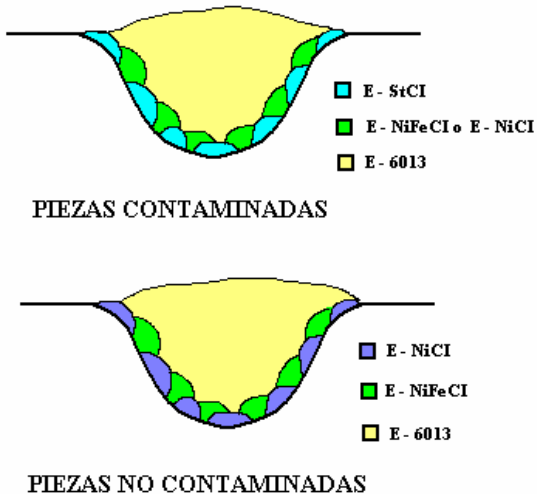
Criterios tecnológicos de soldadura.

1. Para la soldadura en frío.

- Si no es necesario maquinar el refuerzo de las costuras ni cortar transversalmente los cordones de soldadura utilizar E – St y E – CI.
- Si es necesario maquinar el refuerzo de la costura pero no es necesario cortarlos transversalmente utilizar E – NiFeCI.
- Si es necesario maquinar el refuerzo y cortar el cordón por su sección transversal utilizar el E – NiCI.

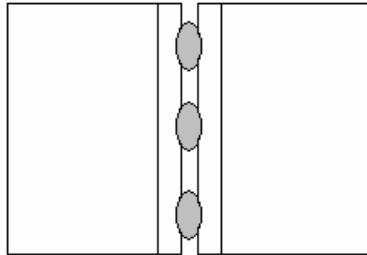
A estos criterios habrá que agregar que:

- Los electrodos E – CI y E – St son los que mayor formación de cementita forman, pero son imprescindibles para soldar piezas de hierro fundido contaminadas.
- Los electrodos E – NiFeCI presentan mayor resistencia mecánica que los E – NiCI. Este último asume mayores condiciones de empotramiento pero son los más caros.
- Estos electrodos deben utilizarse de forma combinada para abaratar el costo de la costura.



- La preparación de borde debe realizarse sin hacer cantos vivos en las mismas.
- Depositar cordones cortos de aproximadamente una longitud de tres veces el diámetro del electrodo.
- Realizar el martillado de la costura hasta la temperatura ambiente.
- Cubrir los cordones de soldadura con material refractario.

- ❑ En los cordones de raíz.
- ❑ Soldar con corriente alterna (CA) o corriente directa con polaridad normal (CDPN).



2. Para la soldadura en caliente.

Se deben aplicar los mismos criterios teniendo en cuenta que se debe utilizar el martillado hasta la temperatura de precalentamiento y que esta debe mantenerse constante durante todo el proceso de soldeo.

➤ Soldadura por oxiacetilénica de los hierros fundidos.

- ❑ Las varillas para la soldadura del hierro fundido según la American Welding Society (AWS) se clasifican en:
 1. RC1: Varillas para la soldadura de los hierros fundidos en uniones soldadas de poca resistencia mecánica.
 2. RC1-B: Varillas para la soldadura de los hierros fundidos en uniones soldadas de resistencia mecánica.
- ❑ Aplicar precalentamiento.
- ❑ Utilizar llama carburante; esta impide la formación por exceso de oxígeno de los óxidos de manganeso y silicio y aporta carbono a la costura para garantizar la grafitización.
- ❑ Soldadura por el método a izquierda.
- ❑ Las composiciones de los fundentes más utilizados son:
 1. Bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) al 100%.
 2. 56% de Bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), 22% de Carbonato de Sodio (CO_3Na) y 22% de Carbonato de Potasio (CO_3K).

3. 50% de Carbonato de Sodio (CO_3Na) y 50% de Bicarbonato de Sodio (CO_3HNa).

❖ **Tratamiento térmico a uniones soldadas de hierro fundido.**

- ❑ Calentamiento entre 590°C y 620°C .
- ❑ Tiempo de Mantenimiento de 25min por centímetro de espesor.
- ❑ Enfriamiento en hornos o cubriendo la pieza con materiales refractarios.

Bibliografía.

1. AVNER, SIDNEY. Introducción a la metalurgia física. Editorial Ciencia y Técnica. Instituto del libro. La Habana. 1970.
2. A.W.S. Specification for welding rods and covered electrodes, for CAST - IRONS. A.W.S. Specification A.5.15.82. New York. 1992.
3. HEYER, ROBERT. Engineering Physical Metallurgy. Van Nostrand Company Inc. New York .1949.
4. GULIÁEV, A P. Metalografía. Editorial MIR. Moscú. 1978.
5. HADBROKEN, L; BROWER, J. The ferric Metallographia. Metallographic Atlas of Iron, Steel and Cast Iron. W.B. Saunders Company. Philadelphia. London. 1966.
6. IRON CASTING SOCIETY, Inc. Iron Casting Handbook. Iron Casting Society, Inc. 1981.
7. LAKHTIN, Y. Engineering Physical Metallurgy. Foreign Languages Publishing House. Moscow. 1970.
8. LAJTIN, Y. Metalografía y tratamiento térmico de los metales. Editorial MIR. Moscú. 1973.
9. RODRÍGUEZ PÉREZ, HECTÓR. Metalurgia de la soldadura de la Soldadura. Pueblo y Educación. La Habana. 1983.
10. ROSHENTAL, HEINE. Principles of metals casting. Mac Graw Hill. New York. 1995.
11. SEFERIAN, DANIEL. Metalurgia de la soldadura. Ediciones Revolucionarias. Editorial Pueblo y Educación. La Habana. 1979.
12. SMITH, WILLIAM. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Mac Graw Hill. Madrid. 1992.

13. SOUTHWELL, G; YOUNG, D. Sulfidation Behavior of a Binary Fe-Mn Alloy. Department of Industrial Chemistry, University of New South Wales. Kensington. Australia. Reprinted from Oxidation of Metals. Vol.34. N° 3 and 4. 1990.
14. UCLV. Laboratorio Científico del departamento de Física. Metalografía y tratamiento térmico de las fundiciones. Universidad Central de Las Villas. Santa Clara. 1983.
15. UDIM, HARRY; FUNK, EDWAR; WULF, JHON. Welding for engineers. N. Jhon Wiley and Sons, Inc. New York. 1954.
16. VISLAVZIL, ZDENEK; FILIP, ANTONIN. Ciencia de los materiales para ramas de metales. Editorial Ciencia y Técnica. La Habana. 1967.
17. WHITE, ALFRED. Engineering Materials. MacGraw Hill Book Company. New York. 1948.