

UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CENTRO DE INVESTIGACIONES DE SOLDADURA



Título: Obtención y evaluación de mezclas pirometalúrgicas destinadas al relleno superficial de piezas mediante procedimiento aluminotérmico.

Autor: Luis Angel Torna Borcela

Tutor: Dr. Lorenzo Perdomo González

Dr. Manuel Rodríguez Pérez

2010 - 2011

Resumen

En el trabajo se evalúa la posibilidad de utilizar la técnica aluminotérmica para realizar el relleno superficial de piezas industriales, por lo que se presentan los experimentos desarrollados con tres cargas diferentes. Cada una de las materias prima fue procesada de acuerdo a los requerimientos del proceso, determinándose las condiciones requeridas para su desarrollo. Se realizaron diez ensayos con los diferentes tipos de termita. La primera contiene cascarilla, pirolusita, cromita, aluminio y grafito, la segunda formada por los mismos componentes de la inicial pero sin cromita y la tercera es similar a la segunda pero se le incorporó fluorita. Las termitas fueron procesadas en un molde construido por barras de grafito y depositadas en planchas de acero, utilizando una fuente de corriente directa para el encendido. A los depósitos obtenidos se le realizó caracterización química y metalográfica, obteniéndose con la mezcla III un depósito de buena adherencia, con 11% de Mn y 0.21% C, una dureza de 448 Hv y una estructura con alto contenido de martensita.

Abstract

The paper assesses the possibility of using the technique for filling aluminothermic surface of industrial parts, so are the experiments performed with three different loads. Each raw material was processed according to process requirements, determining the conditions for its development. Ten trials were conducted with different types of termites. The first contains quinine, pyrolusite, chromite, aluminum and graphite, the second consisting of the same components as the original but not chromite and the third is similar to the second but was incorporated fluorite. Termites were processed in a mold built by graphite rods and deposited on steel plates using a direct current source for ignition. For the deposits obtained underwent chemical and metallographic characterization, obtained with the mixture III a good bond deposit, with 11% Mn and 0.21% C, a hardness of 448 Hv and a structure with high content of martensite.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1: Revisión bibliográfica	4
1.1: Generalidades de las termitas	4
1.2: Concepto de termita	6
1.3: Tipos de termitas	7
1.3.1: Termita simple.....	7
1.3.2: Termita de acero suave.....	7
1.3.3: Termita para hierro fundido	8
1.3.4: Termita para molinos de balancín de aceros	8
1.3.5: Termita para soldar raíles	8
1.4: Utilidad en las vías férreas	8
1.5: Ventajas y desventajas del proceso aluminotérmico	9
1.6: Propiedades del aluminio	10
1.7: Características de la cascarilla de laminación	10
1.8: Principales componentes de las ferroaleaciones.....	11
1.9: Manganeso.....	12
1.9.1: Minerales de manganeso	13
1.9.2: El manganeso como desulfurante	15
1.9.3: El manganeso como desoxidante	15
1.9.4: El ferromanganeso como elemento de aleación	16
1.9.5: Aceros al alto manganeso.....	16
Conclusiones parciales del Capítulo 1	18
Capítulo 2: Parte experimental.....	19
2.1: Materias primas.....	19

Índice

2.2: Preparación de las materias primas	19
2.3: Secuencia de trabajo. Equipamiento	21
2.4: Ensayos realizados.....	22
2.5: Caracterización de los productos	23
2.6: Caracterización de los depósitos.....	24
2.6.1: Caracterización química del depósito.....	24
2.6.2: Caracterización metalográfica.....	24
2.6.3: Determinación de la dureza de los depósitos.....	25
2.7: Procedimiento general de trabajo.....	25
Conclusiones parciales del Capítulo 2.	27
Capítulo 3: Análisis de los Resultados	28
3.1: Potencialidades de las materia prima.	28
3.2: Formulación de las cargas.....	30
3.3: Resultados de los ensayos realizados.....	31
3.4: Caracterización de los depósitos.....	35
3.4.1: Caracterización química de los depósitos	36
3.4.2: Caracterización metalográfica de los depósitos	37
Conclusiones parciales del Capítulo 3	41
Conclusiones Generales	42
Recomendaciones.....	43
Citas y Referencias	44
Bibliografía	46

Introducción

Los progresos industriales, que se iniciaron en Inglaterra en el siglo el siglo XVIII y después se propagaron por todo el mundo, han continuado sin interrupción hasta nuestros días [1].

Los métodos para fabricar acero se conocen desde hace siglos, pero las técnicas eran muy lentas y llenas de dificultades, por lo que el resultado era muy caro.

En los procesos productivos, los materiales son insumos que ocupan una posición intermedia entre las materias primas y los productos finales. La historia les ha conferido gran importancia al punto de clasificar las civilizaciones según los materiales más utilizados: la piedra, la cerámica, el bronce, el hierro, etc.

En la industria moderna cada estrategia productiva requiere una estrategia de materiales que de respuesta a preguntas tales como: ¿Qué materiales se van a utilizar en la producción? ¿Quién los suministrará con la calidad y la rapidez necesarias y a precios que permitan la competitividad? ¿Cómo se controlará su calidad? ¿Qué cambios se avizoran en los materiales utilizados que influirán en la calidad y los costos del producto final? ¿Cómo integrar a la cadena productiva materias primas locales que agreguen valor y busquen ventajas competitivas? Poseer un mínimo de competencia y autonomía en la ciencia, tecnología, medición, y ensayos de materiales se ha convertido en un elemento indispensable para el desarrollo de cualquier sector industrial [1].

Nuestro país tiene como premisa priorizar la reactivación del mantenimiento industrial, incluyendo la producción y recuperación de partes y piezas de repuesto y herramientas [2].

La producción de materias primas a partir del uso de minerales cubanos y el reciclaje de desechos industriales pueden contribuir a la sustitución de importaciones, objetivo priorizado por el gobierno cubano en estos momentos

La soberanía tecnológica propicia desarrollar procesos metalúrgicos como la aluminotermia, en este proceso, las materias primas permiten la obtención de

aleaciones metálicas, las cuales poseen características especiales, siendo factible su utilización como relleno de piezas industriales [2].

En el proceso aluminotérmico, ocurren reacciones químicas, las cuales desprenden calor (reacciones exotérmicas), estas son capaces de suministrar la energía calorífica necesaria para su mantenimiento, reduciéndose de esta manera los costos de producción de estos materiales. Siendo factible, en este proceso, la utilización de compuestos minerales y de residuales industriales.

Estas mezclas aluminotérmicas se utilizan generalmente para la obtención de metales y para la realización de soldaduras como es el caso de la soldadura aluminotérmica de carriles, aunque también puede ser factible su empleo en la recuperación de piezas mediante relleno superficial, si se logra establecer una metodología para la conformación de las cargas y el proceso de relleno con termita.

Problema práctico

La necesidad de rellenar piezas industriales que estén sometidas al desgaste superficial utilizando el método aluminotérmico.

Hipótesis

Mediante una adecuada selección de los componentes de la mezcla pirometalúrgica y un correcto procedimiento tecnológico es posible utilizar el procedimiento aluminotérmico en el relleno superficial de piezas sometidas al desgaste.

Objetivo General:

Evaluar las potencialidades del proceso aluminotérmico para su empleo en el relleno superficial de piezas.

Objetivos específicos:

1. Realizar los cálculos para la formulación de las mezclas pirometalúrgicas.
2. Establecer un procedimiento para la realización de los depósitos aluminotérmicos.
3. Caracterizar los depósitos obtenidos.

Tareas:

1. Realizar una revisión bibliográfica del tema.
2. Realizar los cálculos estequiométricos de las mezclas pirometalúrgicas con vista a su uso en la formulación de la termita.
3. Preparación de materias primas y de un molde.
4. Preparación y evaluación de las mezclas aluminotérmicas.
5. Realizar la caracterización de los depósitos obtenidos

Capítulo 1: Revisión bibliográfica

1.1: Generalidades de las termitas

Los principios de la aplicación de la reacción de la termita en soldadura se presentaron en 1898 por el Dr. Hans Goldschmidt en la convención de la Sociedad Alemana de Electroquímica. El desarrollo del proceso tuvo lugar, de forma inmediata, pasando de un procedimiento inicial de forja a otro de aporte de material fundido entre la superficie de unión de las piezas de trabajo. El propio Goldschmidt había estudiado las reacciones de obtención aluminotérmica del cromo y el manganeso, ya que los óxidos de estos metales no se reducen tan fácilmente con carbono [3].

Esta reacción fue descubierta por el alemán Hans Goldschmidt en el año 1894, y hasta la fecha la reacción de la termita (también así conocida técnicamente) es empleada en la práctica por su importancia en la obtención de metales puros y aleaciones metálicas, en la fabricación de corindón artificial y como fuente de calor en soldadura e incendiarios.

Básicamente, termita es el nombre genérico dado a las reacciones entre los óxidos metálicos y los agentes reductores. Los óxidos usuales son aquellos que tienen bajo calor de formación y los agentes reductores son los que cuando se oxidan tienen alto calor de formación. Los excesivos calores de formación de los productos, comparados con los materiales iniciales de la reacción representan el calor producido por la reacción, de aquí el nombre de exotérmico [4 y 5].

La variación de energía libre de Gibbs (ΔG^0) para un proceso a presión constante puede representarse por la ecuación siguiente:

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$$

Donde:

ΔH^0 : variación de entalpía del proceso

ΔS^0 : entropía del sistema

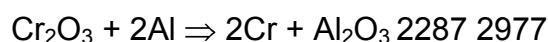
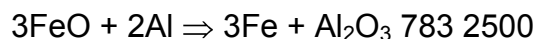
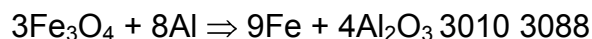
T: temperatura

Y la misma representa la ecuación de una línea recta de la forma $y = n + mx$ cuyos coeficientes n y m se encuentran reportados en la literatura.

Según el diagrama de Ellingham correspondiente a la formación de óxidos las rectas tienen una ordenada en el origen que corresponde a ΔH^0 y una pendiente de valor $-\Delta S^0$. Este tipo de diagrama nos permite predecir la espontaneidad de una reacción de desplazamiento a una temperatura determinada. Al utilizar este diagrama o las tablas para el análisis de los valores de la energía libre de formación para los diversos óxidos se revela por qué se utiliza el aluminio en estas reacciones. El valor grande y negativo de la energía libre de formación del óxido de aluminio hace que salvo raras excepciones no comunes en metalurgia, cualquier combinación con la energía libre de formación de otro óxido resulte en un ΔG^0 negativo, es decir, el proceso es espontáneo. Los metales que pueden ser desplazados de sus óxidos por el aluminio (ΔG^0) se dice que son menos activos que éste.

Las reacciones típicas de algunos procesos de termita se muestran a continuación:

Reacciones Qp (kJ/mol) Temp. Alcanzada ($^{\circ}\text{C}$)



En todas las reacciones anteriores el aluminio ha sido usado como agente reductor, pero también el magnesio y el calcio son capaces de reducir gran número de óxidos metálicos, concretamente los de hierro y cobre, que son los más usados en soldadura aluminotérmica. Se elige el aluminio porque el magnesio tiene un bajo punto de

ebullición y el calcio tiene carácter higroscópico. También se han utilizado mezclas de silicio y aluminio como elementos reductores, aunque la utilización exclusiva de silicio precisa el aporte externo de energía calorífica ya que por sí mismo es difícil que la reacción progrese [5].

La bibliografía consultada reporta diferentes formas o métodos utilizados como sistemas de iniciación de la reacción aluminotérmica. Puede utilizarse una mezcla de polvo de aluminio con un oxidante fuerte (peróxido de bario, clorato, permanganato y nitrato de potasio, etc.) llamada cebo, esta mezcla se inflama con una cinta de magnesio o una barra de acero o hierro al rojo. La carga puede colocarse totalmente en el crisol o ir añadiéndose paulatinamente a medida que transcurre la reacción. También puede hacerse en un horno eléctrico revestido de magnesita, caliente entre 1500 y 1600°C, añadiendo primeramente el aluminio y cuando esté fundido (quitando la corriente del horno) añadir la carga, también puede calentarse previamente alrededor de 400 ó 500 °C y puede hacerse la carga completa y colocar la de encendido encima.

El desempeño del recipiente de reacción es fundamental en el desarrollo de la reacción aluminotérmica y especialmente sobre su posible aplicación práctica, por lo que requiere una atención particular. Los crisoles comunes de metal o porcelana no resisten la elevada temperatura o el brusco salto de ésta que tiene lugar durante la combustión de una termita.

Todo material obtenido por aluminotermia presenta alguna cantidad de aluminio como impureza o residuo de la reacción, lo cual no supone ningún problema hasta un contenido de un 0.7%, ya que actúa como desoxidante que asegura la solidez del metal de la soldadura [3].

1.2: Concepto de termita

Termita es un tipo de composición pirotécnica de aluminio y un óxido metálico, el cual produce una reacción aluminio-térmica conocida como reacción termita. El aluminio es oxidado por el óxido de otro metal, comúnmente por óxido de hierro (herrumbre). Los productos de la reacción química son: óxido de aluminio + hierro elemental libre y una

gran cantidad de calor. Los reactivos normalmente se pulverizan y mezclan con un aglomerante para mantener el material sólido y prevenir su separación [6].

La reacción es usada para la soldadura aluminotérmica frecuentemente utilizada para unir rieles ferroviarios. Se pueden usar algunos otros óxidos metálicos, tales como óxido de cromo, para generar metal elemental. La termita cúprica se produce usando óxido de cobre y es usada para crear uniones eléctricas en un proceso llamado "cadwelding". Algunas mezclas parecidas a la termita son usadas como iniciadores pirotécnicos como en los fuegos artificiales [6].



Figura 1.1: Mezcla de termita usando óxido de hierro (III)

1.3: Tipos de termitas

Las mezclas más comúnmente usadas para la soldadura por fusión de metales ferrosos son: termita simple, termita de acero suave, termita para acero fundido, termita para molinos de balancín de acero y termita para soldar raíles [7].

1.3.1: Termita simple

Es una mezcla de óxido de hierro y aluminio finamente dividido, siendo la base de la mayoría de las mezclas de termita, ésta es la que rinde la máxima temperatura.

1.3.2: Termita de acero suave

Esta consiste en una termita simple con la adición de acero suave para aumentar el metal producido y además se adiciona carbón y manganeso para ajustarlas químicamente.

1.3.3: Termita para hierro fundido

Esta termita es usada sólo cuando es necesario tener un metal de soldar maquinable, además puede usarse una termita simple con adición de acero suave y ferrosilicio.

1.3.4: Termita para molinos de balancín de aceros

Esta consiste en una termita simple con adiciones sustanciales de manganeso y carbón, para suministrar una dureza resistente al desgaste, acero maquinable especialmente adaptado para la fabricación de los terminales gastados del balancín de los rodillos de los molinos de acero y para la fabricación de los grandes piñones.

1.3.5: Termita para soldar raíles

Estas mezclas usualmente consisten en termita simple con adiciones de carbón y manganeso para ajustar la dureza del metal depositado a la dureza del metal que va a ser soldado. Las aleaciones también son añadidas para controlar la resistencia a la abrasión y para actuar como refinadores de grano [7].

1.4: Utilidad en las vías férreas

Desde la aparición de los ferrocarriles, se han realizado muchos esfuerzos para incrementar la longitud de los tramos continuos de vías y reducir los problemas asociados a la discontinuidad entre los tramos. En la década de los 50 comenzó el empleo de carriles continuos soldados, cuyos carriles tenían una longitud alrededor de 18 a 36 metros, dando a lugar carriles de 144 a 288 metros de longitud, las cuales soldadas aluminotérmicamente daban lugar a las vías continuas [8]. En la figura 1.2 se puede observar la reacción de la termita durante el proceso de soldadura de carriles.



Figura 1.2: Termita reaccionando para soldar un riel ferroviario. Después de esto el hierro líquido fluye dentro del molde alrededor del perfil de la vía.

1.5: Ventajas y desventajas del proceso aluminotérmico

Este proceso presenta una serie de ventajas y también algunas deficiencias:

Aspectos positivos.

1. Adecuada para usarla en lugares alejados y poco accesibles.
2. Tiempo de ejecución pequeño.
3. No se necesita el uso de la energía eléctrica.
4. No conlleva el uso de aparatos sofisticados ni de una tecnología de avanzada.
5. Permite unir piezas de diferentes perfiles dimensiones y composición química.

Aspectos negativos.

1. Se requiere de protección al técnico que ejecute el proceso.
2. Se requiere de moldes específicos para cada aplicación.
3. Se necesita de un precalentamiento en las partes a unir para elevar la efectividad de dicho proceso.

Tales aspectos hacen de este proceso el más adecuado en los trabajos de mantenimiento [9].

1.6: Propiedades del aluminio

El aluminio es un metal ligero, de color blanco plateado y relativamente blando. Se caracteriza por su buena resistencia a la oxidación frente al aire, agua, aceites, alimentos y muchos agentes químicos, esto se debe a la existencia de una capa de óxido de aluminio; esta capa denominada alúmina es muy refractaria, es decir que la T_f es muy elevada, la cual debe ser retirada antes o durante el soldeo para permitir una buena fusión del metal base.

Es un metal muy dúctil (incluso a bajas temperaturas), tiene baja resistencia mecánica, sus aleaciones tienen mayor resistencia mecánica lo que hacen que mejoren las características mecánicas del aluminio. El aluminio puro se utiliza principalmente en la electricidad [10].

1.7: Características de la cascarilla de laminación

La cascarilla de laminación es un subproducto procedente del proceso de laminación en caliente del acero que está constituido, fundamentalmente, por hierro, óxidos de hierro y contenidos de grasas y aceites. La cascarilla está formada por partículas de naturaleza escamosa con un tamaño de partícula generalmente menor de 5,0 mm. La distribución de tamaño depende del punto del proceso en el que se genere.

La cascarilla gruesa se recicla prácticamente al 100%, vía planta sinterización y la cascarilla, que esta más contaminada de aceites, acaba en el vertedero.

Se considera reutilizable al sinter sin pretratamiento la cascarilla con tamaño de partícula entre 0,5 y 5,0 mm y un contenido de aceites mayor del 3% debe ser tratada previamente, ya que este contenido puede producir incrementos de emisiones de compuestos orgánicos volátiles, dioxinas y problemas en los sistemas de purificación de gases residuales.

El lodo de cascarilla no puede ser reutilizado vía sinter ya que las partículas finas contienen aceites en alto grado (5-20%) y normalmente, es tratado como residuo siendo depositado en el vertedero.

Si se recicla este lodo, el coste del tratamiento sería elevado y podría superar el valor de los materiales convencionales a los que reemplazaría, haciendo inviable desde el punto de vista económico dicho tratamiento [11].

1.8: Principales componentes de las ferroaleaciones

Las ferroaleaciones son aleaciones de hierro con algunos otros elementos además del carbón. A la ferroaleación se la ha definido por la Sociedad Americana de Metales y el Departamento de Minería como “una aleación de hierro que contiene una cantidad suficiente de uno o más elementos químicos que son útiles como un agente para introducir esos elementos en el metal fundido, principalmente el acero”.

En la práctica, el término ferroaleación se usa para incluir cualquier aleación que introduzca elementos reactivos en sistemas de aleaciones, como el níquel y el cobalto en sistemas de aluminio, calcio silicio, etc.

Las ferroaleaciones confieren cualidades distintivas al acero y al hierro fundido, y proveen de importantes funciones durante los ciclos de producción.

Las principales ferroaleaciones son las de cromo, manganeso y silicio:

- El cromo da resistencia a la corrosión.
- El manganeso es esencial para contrarrestar los efectos dañinos del azufre en la producción de todos los aceros.
- El silicio se usa para la desoxidación en aceros y como agente aleante.
- También se utilizan para ferroaleaciones el boro, cobalto, columbio, molibdeno, níquel, fósforo, titanio, tungsteno, vanadio y zirconio.

El número de ferroaleaciones posibles es muy elevado, aunque pueden distinguirse entre las que tienen como objeto principal la desoxidación del hierro, como ocurre con la mayoría de los ferromanganesos y ferro silicios, y las que buscan una aportación de otros metales para obtener aceros especiales con características definidas, como ocurre con los ferro tungstenos, ferro vanadios, etc.

Existen múltiples tipos de ferroaleaciones en el mercado, pero hay un grupo de ellas que se comercializan en mayor cantidad, siendo estas las ferroaleaciones de manganeso y silicio, siendo muy frecuente también encontrar en el mercado aleaciones de manganeso y silicio denominadas sílico - manganeo. Entre los principales productos de manganeso que se producen están:

- Ferromanganeso Alto Carbón 72/74:

Este producto es una de las ferroaleaciones más versátiles y más usadas en la fabricación de acero.

- Ferromanganeso Medio Carbón:

Producto utilizado en aceros finos en donde el contenido de carbón es crítico

- Ferromanganeso Bajo Carbón:

Es También una ferroaleación refinada para aceros de bajo contenido de carbón.

- Ferromanganeso Medio Carbón Nitrogenado:

Muy sofisticada, Se utiliza para aceros de la industria de partes automotrices

- Silicomanganeso 62/65:

Es generalmente utilizado en obtención de aceros de grado fino, de alto grado de limpieza [12].

1.9: Manganeso

El manganeso es un metal de color blanco argénteo muy duro y frágil, su densidad es de 7.27 g/cm^3 y su temperatura de fusión es $1\ 244 \text{ }^\circ\text{C}$. Es bastante abundante en la naturaleza siendo el elemento que ocupa el decimoquinto lugar [13].

El manganeso se combina con otros elementos químicos siendo los sistemas más importantes: [13]

Mn – Fe: al estado fundido el hierro y el manganeso son solubles en cualquier proporción y no forman combinaciones químicas.

Mn – C: el manganeso forma con el carbono combinaciones químicas muy estables, entre las que se han estudiado las formas α y β del Mn_3C y el Mn_3C_4 .

Mn – Si: con el silicio forma compuestos como $MnSi$, Mn_2Si y Mn_2Si_3 , siendo el $MnSi$ el más estable. También existen eutécticos a 1 084 °C con 12 % de Si, a 1 230 °C con 30 % y 1 144 °C con 50 % de Si.

Mn – Al: existen dos combinaciones Al_5Mn y Al_3Mn y un eutéctico que funde a 650 °C, con poco contenido de manganeso.

Mn – O: el manganeso forma con el oxígeno cuatro combinaciones, MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4 y MnO . Los más estables de los óxidos son el MnO y el Mn_3O_4 , los restantes son menos estables y se descomponen a altas temperaturas con formación de los óxidos más estables. Así, el MnO_2 calentado a 300 °C desprende oxígeno y por tostación a temperaturas de 800 – 900 °C se transforma en Mn_3O_4 . A muy altas temperaturas solo es estable el MnO .

1.9.1: Minerales de manganeso

Los diferentes minerales de este elemento se clasifican atendiendo a su aplicación en: minerales para la industria química (80 % en masa de MnO_2) y minerales para la industria siderúrgica, los que a su vez se clasifican según la relación en que se encuentran el Mn y el Fe, pero fundamentalmente por su contenido de dióxido de silicio el cual debe ser menor o igual que el 11 % [14].

Entre los principales minerales de manganeso se destacan los oxidados y los carbonatos. A los primeros pertenece la pirolusita (MnO_2 con 63,2 % de Mn), que es el más frecuente y entre los carbonatos se destaca la rodocrosita ($MnCO_3$ con 47.8% de Mn). Existe además un tercer grupo, que son los silicatos de calcio y manganeso - Rodanita (Mn, Ca) (Si_3O_9) y bustamita (Ca, Mn) (Si_3O_9).

En los minerales de manganeso el contenido de fósforo, el cual se encuentra formando parte de especies minerales acompañantes, se considera un parámetro de calidad

importante, que llega incluso a definir los esquemas y posibilidades de procesamiento [14].

Como se expone anteriormente, solo algunos pueden considerarse como materias primas con manganeso aprovechable. La mayor parte de estos son minerales oxidados y es el dióxido de manganeso (MnO_2) el único estable a temperatura y presión atmosférica, ya que los demás óxidos con menos contenido de oxígeno se oxidan fácilmente. Los minerales más importantes son los óxidos tipo pirolusita, a los cuales acompañan con mucha menor importancia otras especies mineralógicas [14].

Para la fabricación de ferromanganeso del 70 % de manganeso basta con que la relación de manganeso a hierro sea solo 6. El límite de fósforo en el mineral no debe pasar de 0.0035 % por cada 1 % de manganeso que contenga el mineral [13].

El fósforo, al igual que el azufre, constituye un elemento perjudicial ya que empeora las propiedades mecánicas del acero y provoca su agrietamiento en frío. La presencia de carbono baja aún más la resistencia del metal, debido a que se forman eutécticos triples de fácil fusión del tipo Fe – C – P.

Para la producción de manganeso por aluminotermia se deben emplear minerales muy altos en manganeso y con una pequeña proporción de impurezas, y no debe pasar del 0.09 % de Fe por cada 1 % de Mn y del 0.002 % de P [13].

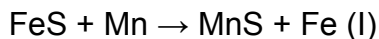
En Cuba se encuentra la pirolusita en varias zonas de las provincias Pinar del Río, Camagüey, Granma y Santiago de Cuba.

El mineral de manganeso es de tipo oxidado con una alta ley (76.86 % de MnO_2). Los otros óxidos más significativos en su composición lo constituyen el SiO_2 en primer orden (8.6 %) y en menores proporciones el CaO y el Al_2O_3 (2.0 y 2.06 % respectivamente). El hierro y fósforo aparecen en valores 1.17 % Fe_2O_3 y 0.11 % P [14].

1.9.2: El manganeso como desulfurante

La presencia de azufre en el acero hace que este se agriete en caliente o al rojo y provoque la formación de grietas de cristalización, por lo que se hace necesaria su eliminación [15].

En la práctica el sulfuro de manganeso se separa mediante dos procesos: con ayuda de Mn y MnO y también con CaO. El proceso de desulfuración cuando se emplea manganeso como desulfurante se verifica mediante la siguiente reacción química:



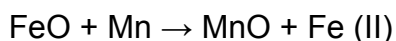
El sulfuro de manganeso es poco soluble en el metal y pasa parcialmente a la escoria, quedando el resto en el metal en forma de inclusiones de sulfuro u óxidosulfuros [15].

Se ha establecido que la presencia de aluminio y silicio en el metal acelera significativamente el proceso de desulfuración, ya que el azufre se desprende al mismo tiempo que el oxígeno. Lo anterior es una consecuencia de la evaporación del azufre en forma de Al_2S_3 (temperatura de sublimación 1 550 °C) y de SiS (temperatura de sublimación 940 °C).

1.9.3: El manganeso como desoxidante

La presencia del oxígeno en los aceros, en forma de solución sólida o inclusiones de óxidos, es muy perjudicial. Este problema se puede eliminar a través de la expulsión de este elemento con la ayuda de sustancias químicas que posean mayor afinidad con el oxígeno que el hierro y formen óxidos de una menor solubilidad en el metal líquido que el FeO. Entre estos elementos encontramos el aluminio, vanadio, silicio, carbono, manganeso y cromo, por lo cual se utilizan con este fin ferroaleaciones de los mismos [15].

Reacción típica de desoxidación:



1.9.4: El ferromanganeso como elemento de aleación

El manganeso se emplea para la fabricación de muchos aceros. Cuando el contenido de manganeso en el acero es elevado este adquiere una alta resistencia al desgaste, a la abrasión y al impacto, utilizándose para la fabricación de piezas para maquinarias de perforación, dragas, equipos de trituración y molienda y para la fabricación de cambios de vía. Además el Mn afina, en general, la estructura del acero y aumenta la resistencia a las altas temperaturas, la resistividad eléctrica y baja fuertemente la conductividad calorífica [14].

Debe señalarse que el acero para este tipo de piezas especiales tiene un contenido de Mn superior al 13 % y de C alrededor del 1.2 %. Este es el llamado acero Hadfield el cual posee alta tenacidad y plasticidad, típica de los aceros austeníticos {solución sólida de carbono en hierro γ , [Fe γ (C)]}, además de una resistencia relativamente alta [16].

1.9.5: Aceros al alto manganeso

Cuando en el mundo se comenzaron a desarrollar los aceros aleados debido al creciente desarrollo de la industria de la construcción de maquinarias, un pionero en este campo lo fue Sir Robert Hadfield [17 y 18] que en 1882 desarrolló un acero que contenía 0,95- 1,40% de carbono, 0,3- 1,40% de Si y un contenido de manganeso entre 12 - 14%. Este acero esencialmente austenítico tenía la capacidad de endurecerse hasta una dureza de 40 a 52 HRC cuando era sometido a trabajo de golpeo continuo combinado con fricción.

Debido a esta propiedad este acero encontró amplia aplicación en la industria destinándose fundamentalmente a la obtención de elementos que trabajaran en condiciones similares a las descritas anteriormente; es decir, se comenzaron a fabricar con el mismo cruces de rieles para las vías ferroviarias, cangilones de excavadoras, muelas o mandíbulas de trituradoras de piedra, cuchillas de bulldozer, etc.

Este acero, al que algunos autores denominan acero al alto manganeso (high manganese steel), otros aceros al manganeso, pero que en el mundo entero se le

conoce por el nombre de su creador, acero Hadfield (Hadfield Steel), presenta como desventaja fundamental que no resulta fácil su maquinado por métodos convencionales.

El acero típico de este grupo, el ASM 128-33 [19] presenta las siguientes propiedades físicas:

Resistencia Específica ($\mu\Omega\text{-cm}$): 69 (100 °C) - 115 (650 °C)

Densidad: 7,75 g/cm³

Coefficiente de expansión térmica (cm e-6/cm K): 16,92 (100 °C) – 19,62 (850 °C)

Conductividad Térmica. (W/m K): 16,26 (100 °C) – 21,45 (500 °C)

Calor Específico (J/g K): 0,502 (100 °C) – 0,61 (600 °C)

Temperatura de fusión: 1350-1420 °C

De acuerdo a estos datos si se compara con el acero al carbono, el acero austenítico al manganeso se expande durante el calentamiento un 50% más que el material de referencia. Sin embargo su conductividad térmica es la séptima parte de la del acero al carbono.

Estos tipos de acero tienen múltiples aplicaciones en la industria, en Cuba es amplio su uso en los equipos de trituración de minerales.

Conclusiones parciales del Capítulo 1

1. La aluminotermia se ha empleado desde 1894 como técnica para la obtención de metales de alta pureza y como técnica para la soldadura de carriles de vías férreas.
2. La formulación de termitas para soldar carriles se realiza a partir de mezclas de óxidos de hierro y aluminio metálico a las cuales se le pueden agregar otros elementos de aleación en función de las propiedades que se deseen obtener en los depósitos.
3. Las aleaciones de manganeso pueden ser obtenidas a partir de sus minerales mediante procesamiento aluminotérmico, siendo este un elemento de gran importancia en la elaboración de aceros ya que actúa, como desoxidante, desulfurante y como elemento de aleación.

Capítulo 2: Parte experimental

2.1: Materias primas.

La selección de las materias primas se realizó sobre la base de utilizar, en la medida de lo posible, componentes de procedencia nacional y/o residuales industriales. Como reductor se utilizaron virutas de aluminio procedentes del proceso de maquinado de las cafeteras de la EIMPUD “1^o de Mayo “de Santa Clara y como portador de hierro se utilizaron cascarillas de laminación procedentes de la Empresa Antillana de Acero. Como minerales se usó la pirolusita, procedente del Yacimiento Margarita de Cambute en Santiago de Cuba, cromita refractaria del Yacimiento Cayo Guam en Holguín y fluorita de importación. Como portador de carbono se empleó grafito, el cual se obtuvo de los electrodos partidos en la Empresa Planta Mecánica de Santa Clara. La composición química de las diferentes materias primas se muestra en la tabla 2.1.

2.2: Preparación de las materias primas

Las virutas de aluminio, procedente del maquinado de cafeteras, fueron sometidas a un proceso de tamizado, utilizándose las fracciones por debajo 1mm y la pirolusita es adquirida con una granulometría de hasta 12 mm, por lo que fue triturada, a mano, a un tamaño de grano < 1 mm.

La cromita fue triturada en un molino de bolas y tamizada a un tamaño de grano inferior a 1 mm y el grafito fue triturado en un mortero a mano y tamizado hasta una granulometría menor a 1 mm y la fluorita fue utilizada con la misma granulometría con que se obtuvo (menor a 0.25 mm).

Tabla 2.1: Composición química del aluminio, la pirolusita, la cromita, la cascarilla de la laminación, la fluorita y el grafito.

Pirolusita		Viruta de aluminio		Cromita	
Componente	Contenido	Componente	Contenido	Componente	Contenido
SiO ₂	5.60	Si	3.5-4.0	Cr ₂ O ₃	32.87
MnO ₂	76.14	Fe	0.5-0.6	SiO ₂	5.79
MnO	0.14	Mn	0.3-0.35	Al ₂ O ₃	26.06
Fe ₂ O ₃	1.51	Cu	2.5-3.5	FeO	14.54
Al ₂ O ₃	1.54	Mg	0.3-0.5	CaO	0.42
CaO	1.35	Zn	0.5-0.6	MgO	16.00
MgO	0.30	Al	Balance	Cascarilla de laminación	
Na ₂ O	0.47	Fluorita		Componente	Contenido
Ka ₂ O	0.24	Componente	Contenido	Fe ₂ O ₃	20 – 30
P ₂ O ₅	0.02	SiO ₂	3.24	Fe ₃ O ₄	40 – 60
S	0.01	Al ₂ O ₃	0.43	FeO	15 – 20
Grafito		CaO	0.22	Fe	2 – 5
Componente	Contenido	MgO	0.10	Fe (Prom.)	70.82
C	100	CaF ₂	96.1	O ₂ (Prom.)	24.18
-	-	-	-	Impurezas	5.00

Para la preparación de la cascarilla de laminación se siguió la secuencia de trabajo que se muestra en la figura 2.1.

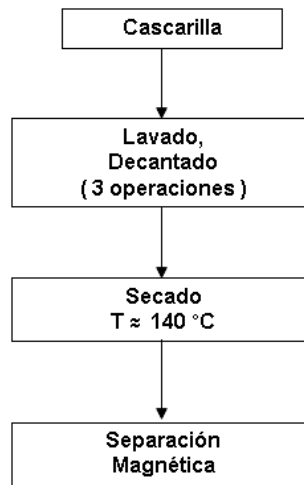


Figura 2.1: Preparación de la cascarilla de laminación

La fracción magnética fue sometida a un proceso de tamizado.

Tabla 2.2: Resultados del proceso de tamizado de la cascarilla de laminación.

Clase granulométrica (mm)	Masa retenida (g)	Masa retenida (%)
5.0/2.5	57	3,00
2.5/2.0	14	0,74
2.0/1.0	395	20,81
1.0/0.7	392	20,65
0.7/0.5	240	12,65
0.5/0.25	750	39,52
0.25/0.16	36	1,90
0.16/0.1	5	0,26
0.1/0.0	9	0,47
Total	1898	100

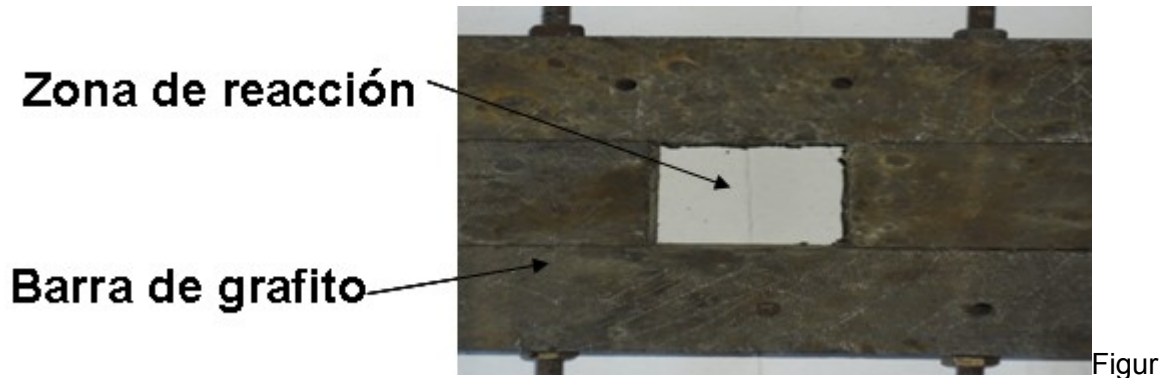
2.3: Secuencia de trabajo. Equipamiento

Pesaje: El pesaje de los diferentes componentes se realizó con una balanza técnica.

Mezclado: Esta operación se llevó a cabo en un mezclador rotatorio que cuenta con un recipiente de porcelana, realizándose la alimentación de los productos en orden ascendente de densidades, el mezclado se realiza durante 30 minutos, colocándose el equipo con una inclinación de 30° respecto a la horizontal.

Secado: Una vez mezclados los diferentes componentes, la mezcla es calentada, al igual que las planchas a soldar, en una estufa, a una temperatura de 300 °C durante 2 horas.

Reactor: La reacción y soldadura de relleno se realizaron en un molde cuadrado, construido a partir de barras de grafito, donde sus caras están ajustadas por espárragos. En la figura 2.2 se muestra una foto del reactor.



a 2.2 Foto del reactor

Encendido: La termita caliente es adicionada en el interior del reactor para su posterior encendido mediante un arco eléctrico que se establece entre el molde de grafito y un alambre de acero al carbono, los cuales están conectados a los polos de una fuente de corriente que suministra entre 90 – 110 A y de 20 – 25 V.

Probetas de acero: Como probeta para realizar la soldadura se utilizaron chapas de acero al carbono del tipo ASTM A36, las cuales tienen que estar libres de óxido, para cumplir dicho requisito se utilizó un cepillo de alambre y lijas de agua.

2.4: Ensayos realizados

Se prepararon tres cargas iniciales, donde la conformación de cada una de ellas se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Conformación de las cargas metalúrgicas (% masa).

Materias prima	I	II	III
	Contenido (%)	Contenido (%)	Contenido (%)
Cascarilla	40.7	46.6	44.4
Aluminio	26.2	27.5	26.2
Pirolusita	22.1	25.3	24.1
Cromita	10.5	-	-
Grafito	0.5	0.6	0.5
Fluorita	-	-	4.8
	100	100	100

2.5: Caracterización de los productos

Para todas las cargas se pesaron 200g de mezcla. Se realizaron tres ensayos con la carga I de la tabla 2.3, en todos los casos estos la reacción se tornó lenta, no se logró que el metal soldara a la chapa.

Tabla 2.4: Se muestran los resultados cualitativos de los ensayos realizados.

Ensayos	Caracterización
II.1	La mezcla quemó de manera homogénea, en la parte inferior del metal base, se registran marcas producidas por la temperatura que generó la mezcla cuando se fusionó con la chapa.
II.2	La mezcla quemó con dificultades, solamente quedó soldada una pequeña porción del metal aportado, de todo el metal depositado.
II.3	La mezcla quemó de manera homogénea, el metal depositado queda apartado del lugar donde se realizó la soldadura, esto ocurrió después de golpear el metal para valorar su adherencia a la chapa
II.4	La mezcla no quemó de manera homogénea, quedo una capa fina de escoria entre el metal de aporte y el metal base. El metal de aporte queda desprendido, debido a la capa de escoria que quedó entre ellos. Esto ocurre cuando la mezcla enciende con dificultades y la escoria no tiene por donde escapar.
III.1	La mezcla quemó de manera homogénea, en este ensayo se le agregó un 5% de fluorita a la mezcla buscando una mayor fluidez, con el objetivo que el metal fundido abarcara más área y a su vez llegara más rápido a la chapa. El metal base fue perforado, esto ocurrió debido a que la chapa tomó una posición incorrecta, quedando un vacío entre la mesa de ensayo.
III.2	La mezcla quemó de manera homogénea, el metal de deposito quedó soldado a la chapa, esto se logró cuando se disminuyó el tamaño de la chapa, quedando espacios libres en el molde, el metal fundido rodeó toda el metal base, también se notó una buena separación de la escoria. La chapa es perforada por el metal de aporte.
III.3	La mezcla quemó de manera homogénea, el metal queda fusionado con la chapa, en la superficie quedó una marca, esta representa el punto de entrada del metal fundido. La superficie de la chapa quedó rellena debido a la fusión del metal.

2.6: Caracterización de los depósitos

2.6.1: Caracterización química del depósito

El análisis químico fue realizado mediante espectrometría de emisión atómica (Spectrolab) en el laboratorio químico de la Empresa E. Villegas de Santa Clara. La muestra para el análisis fue rectificada manualmente.

2.6.2: Caracterización metalográfica

El ensayo metalográfico, se realizó en Laboratorio de Metalografía del Centro de Investigaciones de Soldadura de la UCLV. Para obtener las probetas antes mencionadas se le realizó un corte a la muestra, utilizando un disco, se secciona la muestra con el objetivo de analizar la estructura del metal de aporte, el metal base y la zona de fusión de los dos metales. La sección de la probeta fue sometida a un proceso de preparación en el propio laboratorio.

Ya preparada la muestra se atacó con un compuesto químico llamado Nital al 2%, el cual revela la estructura del metal.

Las observaciones metalográficas se realizaron en un microscopio metalográfico marca NOVEL de modelo NJF- 120A (figura 2.3). Estas imágenes fueron registradas por medio de una cámara digital marca Canon, modelo A630, resolución 8 MPixel.



Figura 2.3 Foto de microscopio utilizado durante el ensayo metalográfico.

Se tomaron varias fotos al material en distintas zonas, en la frontera, en la lámina y en el material de aporte. Dichas imágenes fueron tomadas con diferentes aumentos.

2.6.3: Determinación de la dureza de los depósitos

El ensayo de dureza se hizo colocando una carga sobre la superficie tratada, esta deja una huella, este proceso se realizó seis veces en la zona del metal base y otras seis en la zona del metal depositado.

El ensayo de dureza se realizó con un durómetro Vickert marca Hecke (figura 2.4). La carga aplicada sobre la superficie sobre la probeta fue de 100gf, dicha fuerza deja una huella, estas mediciones se realizaron doce veces, cuyos resultados fueron promediados.



Figura 2.4 Durómetro Vickert marca Hecke

2.7: Procedimiento general de trabajo

El procedimiento de trabajo utilizado para la realización de los depósitos es el siguiente:

- 1- Conformación de la mezcla: triturar, tamizar y pesar a las dimensiones requeridas.
- 2- Mezclado: Se realiza por un tiempo aproximado de 30 minutos.
- 3- Preparación de la probeta: La probeta debe ser de aproximadamente 5mm menor que el área del molde, la cual debe estar correctamente limpia, libre de óxidos.

4- Pre calentamiento: Precalear la mezcla y la probeta a una temperatura entre 280 – 320 °C durante 1 hora.

5- Colocación de la probeta en el molde: La posición de la probeta tiene que ser horizontal y en el centro del molde.

6- Adición de la termita en el molde: Esta operación tiene que ser de manera rápida, tratando de compactar lo más posible la mezcla en el reactor.

7- Encendido: Encender la termita en más de un punto de forma tal que sea lo más homogénea posible.

Conclusiones parciales del Capítulo 2.

1. Una eficiente preparación de las materias primas garantiza un desempeño favorable del proceso aluminotérmico de relleno superficial.
2. La incorporación de un 5% de fluorita a las mezclas combinado con un precalentamiento entre 280 - 320 °C permiten el adecuado procesamiento aluminotérmico de la mezcla y la unión del metal generado (soldadura) al metal base.
3. La caracterización químico estructural de los depósitos permite realizar una adecuada evaluación de los resultados del proceso de relleno aluminotérmico.

Capítulo 3: Análisis de los Resultados

3.1: Potencialidades de las materia prima.

En la (Tabla 2.1 del Capítulo 2), se puede apreciar que las virutas empleadas como agente reductor, contienen en su composición más de un 90 % de aluminio, lo que garantiza el correcto desarrollo del proceso aluminotérmico. En cuanto al resto de los elementos presentes en las virutas de aluminio, el mayor por ciento está representado por el silicio (3.5 - 4.0 %) del cual parte debe pasar a la escoria debido a la alta afinidad que tiene este elemento por el oxígeno y parte quedará en el metal, el magnesio debe pasar también a la escoria, aunque él está presente en muy bajo contenido (0.3 – 0.5 %). El otro elemento predominante en las virutas es el cobre (2.5 – 3.0 %) quien debe pasar al metal, pero quedará en contenidos muy bajos. El resto de los elementos presentes (Fe, Mn y Zn) están en cantidades inferiores al 0.6%.

La pirolusita presenta en su composición un 76.14 en % masa de MnO_2 (ver Tabla 2.1 del Capítulo 2). Este mineral, fue empleado como la fuente aportadora de manganeso y fuente de oxígeno para la generación de energía a partir del proceso de reducción aluminotérmico, otro componente que forma parte de la pirolusita es la sílice quien representa el 5.6%, de la cual una parte puede reducirse durante el procesamiento metalúrgico y otra parte quedará en las escorias. Del resto de los componentes que integran la pirolusita sólo los óxidos de hierro, aluminio y calcio están entre 1.35 – 1.54 %, los demás constituyentes están en contenidos inferiores al 1%. Esta valoración permite apreciar que el concentrado mineral debe permitir la obtención de aleaciones de elevados contenidos de manganeso.

Los datos de composición química de la cromita utilizada permiten afirmar el carácter refractario del mineral, obteniéndose una relación Cr_2O_3/FeO de 2.26, la cual está por debajo de la relación reportada por la literatura para ser empleada como materia prima para la obtención de ferrocromo metalúrgico (2.5).

Además, están formadas por aproximadamente un 50% de los óxidos Al_2O_3 , MgO y SiO_2 en relaciones porcentuales ($Al_2O_3: MgO: SiO_2 = 1: 0.6: 0.2$), donde los óxidos de

aluminio y magnesio no se reducen durante el procesamiento aluminotérmico. No obstante a esto con este mineral combinado con pirolusita se han obtenido aleaciones de manganeso cromo que contienen hasta un 16% de cromo [20 y 21]

Como material para aportar carbono se utilizó grafito de alta pureza, el cual debe permitir obtener determinados niveles de carbono en el metal depositado y como fundente se utilizó fluorita la cual contiene un 96% de CaF_2 , éstos son los componentes de importación utilizados en el trabajo, aunque en el caso del grafito puede sustituirse por electrodos partido.

La cascarilla de laminación es un residual que se produce en los laminadores de acero, del cual se producen apreciables cantidades, entre 35 – 40 kg por toneladas de acero producido. Se conoce que éste no es un residual altamente contaminante propiamente dicho, aunque las cascarillas de laminación generalmente se encuentran muy contaminadas con aceites y grasas lo cual tiende a aumentar su nivel de agresividad [11 y 22]. Las cascarillas son productos de relativa alta pureza ya que ellas están formadas en su inmensa mayoría por los diferentes óxidos de hierro y el hierro metálico, en la realización de los cálculos de carga se asumió que todo el hierro presente se encontraba en forma de óxido de hierro (III).

Las cascarillas, para su empleo, fueron sometidas a un proceso de beneficio de lavado y separación magnética, lo cual permitió trabajar con un producto de alta calidad, ya que mediante el lavado se eliminó una gran cantidad de impureza, donde la combinación del lavado con el proceso de secado favorece la oxidación del hierro metálico y del hierro II, incrementando los contenidos de Fe_2O_3 en el residual y en la separación magnética se eliminan todos los componentes no magnéticos presentes, estas operaciones combinadas garantizan un material de alta pureza. En la figura 3.1 se muestra el resultado de la clasificación granulométrica realizada a la cascarilla.

Análisis granulométrico

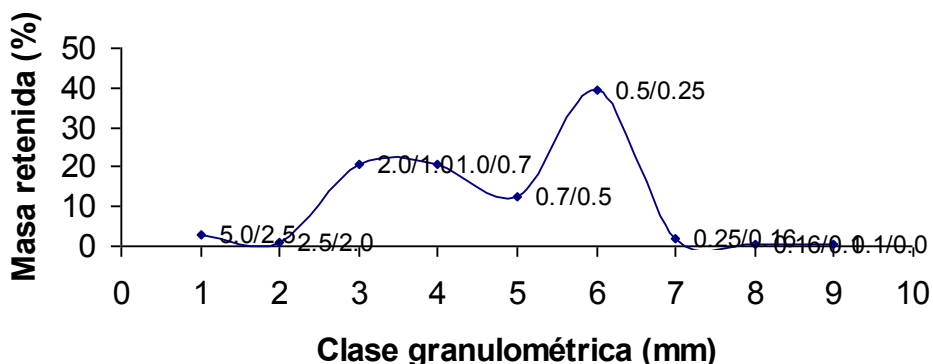


Figura 3.1: Resultados de la separación granulométrica de la cascarilla.

En la figura 3.1 se puede observar que los mayores contenidos de cascarilla se encuentran en las fracciones 2.0/1.0, 1.0/0.7 y 0.5/0.25 en las cuales se concentra alrededor del 80% de toda la cascarilla, observándose que en la fracción 0.5/0.25 se encuentra casi el 40% de todo el producto.

3.2: Formulación de las cargas

El objetivo central de la formulación de las mezclas pirometalúrgicas es lograr conformar una mezcla que sea capaz de garantizar el proceso de reducción aluminotérmico y que los productos metálicos obtenidos se depositen sobre la plancha de acero, ya que de lograrse esto se podrá entonces utilizar éste método para la recuperación de piezas desgastadas.

De aquí que inicialmente se formuló una mezcla integrada por cascarilla, pirolusita, cromita, aluminio y grafito, cuya composición se muestra en la tabla 2.3, cuya mezcla debe dar teóricamente un depósito de alrededor a 20 % de Mn, 5% de Cr y 0,6% de C, el cual debe tener alta resistencia al desgaste.

De igual manera en la tabla 2.3 aparecen otras dos formulaciones donde se eliminó la cromita, la mezcla II debe dar una aleación con alrededor de 20% de Mn y 0,6% de C.

En la mezcla III se incorporó fluorita para disminuir la viscosidad de la escoria, aumentando así su fluidez, pero la composición química del depósito debe ser similar a la mezcla II.

3.3: Resultados de los ensayos realizados

Los ensayos fueron realizados en un reactor (molde) construido de barras cuadradas de grafito el cual soporta las reacciones que se producen, no absorbe humedad a diferencia de los moldes cerámicos, y no contamina de manera apreciable con carbono los depósitos obtenidos.

En los ensayos realizados con la formulación I de la tabla 2.3, se pudo observar, en todos los casos, que la reacción fue lenta, lo que motivó que el metal soldara a la chapa. Esto pudo estar motivado por la presencia de la cromita en la mezcla, la cual es de carácter refractario, disminuyendo la cantidad de calor generado por unidad de masa.

En el caso de los ensayos realizados con la formulación II de la tabla 2.3, la reacción se comportó de manera más favorable en todos los casos, aunque se pudo comprobar que en las mezclas donde no se logró un precalentamiento entre 280 – 320 °C, la reacción fue más lenta y no quemaron de manera homogénea, según se muestra en la tabla 2.4. Por otra parte, en las mezclas donde la reacción fue efectiva quedó una capa de escoria atrapada debajo del metal, aunque se pudo observar que la cantidad de calor generada fue muy alta.

En el transcurso de los ensayos con la mezcla II, se hace notar la presencia de la escoria entre el metal base y el metal de aporte, dicho fenómeno dificulta la adherencia del metal utilizado como relleno hacia la chapa, esto puede estar motivado por la alta viscosidad de la escoria. En el ensayo II.1, como muestra en la figura 3.2, la escoria se encuentra incrustada entre el relleno y la plancha, evitando la unión de ambos metales.



Figura 3.2. Metal depositado en el ensayo II.1

En el ensayo II.4, como muestra la figura 3.3 la separación de la chapa a soldar y el metal de aporte es más significativa ya que quedó totalmente dividida por una fina capa de escoria.



Figura 3.3. Metal depositado en el ensayo II.4

A partir de estos resultados se decidió incorporar un 5% de fluorita a la mezcla con el objetivo de aumentar la fluidez de la escoria, para evitar que ella quedara atrapada entre el metal obtenido y la chapa.

En el ensayo III.1 de la tabla 2.4 ya se adiciona un 5% de fluorita a la muestra, lográndose un apreciable aumento de la fluidez, lo que llevó a que la plancha de acero fuera perforada por el metal aportado, según se muestra en la figura 3.4.



Figura 3.4. Metal depositado en el ensayo III.1

En todos los casos anteriores la chapa utilizada tenía dimensiones superiores a la cámara de reacción del molde, comprobándose que esto afecta también la separación de la escoria del metal, por lo que se decidió trabajar con probeta de tamaño inferior al molde, de forma tal que los productos de la reacción cubrieran toda el área de la pieza a soldar.

En el ensayo III.2 se modifican las dimensiones de la chapa, quedando un espacio de aproximadamente de 5 mm entre la chapa y las paredes del molde, esto permitió que el metal fundido interactuara en toda el área de la chapa, en la figura 3.5 se muestra como el metal de aporte rellenó casi toda el área de la chapa y se observa una muy buena separación de la escoria.



Figura 3.5. Metal depositado en el ensayo III.2

A demás en la figura 3.6, se muestra la cara inferior de la chapa soldada, en la cual se observa que una parte del metal queda por debajo de la chapa, lo cual pudo ocurrir por perforación de la chapa o porque el metal corrió por el borde de ella.



Figura 3.6. Metal fundido en la parte inferior de la chapa.

El ensayo III.3, se realizó de la misma forma que el ensayo III.2, confirmándose los resultados del ensayo anterior, observándose en la figura 3.7 el depósito obtenido, donde se logró también la unión de ambos metales y la buena separación de la escoria. En esta figura se observa una marca que evidencia que el metal fundido perforó la

plancha de acero, con lo cual se confirma que esta mezcla es capaz de unir el metal de la termita con el metal base.



Figura 3.7. Metal depositado en el ensayo III.3

3.4: Caracterización de los depósitos

Como paso inicial para valorar los resultados del proceso, con la mezcla III se realizó un balance de masa, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.1.

Las reacciones fundamentales que toman lugar son las siguientes:

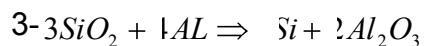
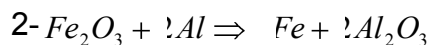
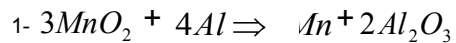


Tabla 3.1: Balance de masa para los componentes de la mezcla III.

Componentes	Entrada	Generación	Consumo	Salida
SiO ₂	1.58	-	1.26	0.32
MnO ₂	21.58	-	15.11	6.47
MnO	0.04	-	-	0.04
Al ₂ O ₃	0.44	41.72	-	42.16
CaO	0.38	-	-	0.38
MgO	0.08	-	-	0.08
Na ₂ O	0.13	-	-	0.13

Ka₂O₃	0.06	-	-	0.06
P₂O₅	0.01	-	-	0.01
PPI	2.08	-	-	2.08
Si	1.12	0.59	-	1.71
Zn	0.14	-	-	0.14
Mn	0.08	9.55	-	9.63
Fe	0.14	31.27	-	31.41
Al	25.64	-	22.09	3.55
Cr	0.38	-	-	0.38
Fe₂O₃	47.02	-	44.67	2.35
C	0.6	-	0.3	0.3
CaF₂	5	-	-	5
CO	-	0.7	-	0.7
O₂	0.4	-	0.4	-
TOTAL	106.9	83.83	83.83	106.9

3.4.1: Caracterización química de los depósitos

La muestra procedente del depósito III.1 fue analizada químicamente, mediante espectrometría de emisión atómica, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.2

Tabla 3.2: Composición química del depósito del ensayo III.1 y composición determinada a partir del balance de masa.

Componentes	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al
Depósito	0.21	2.35	11.44	0.11	0.038	0.77	0.50	>2.40
Balance de masa	0.64	3.63	20.44	-	-	0.81	-	7.53

En la tabla 3.2 se observa que se obtiene un metal depositado con 11.44% de Mn, 0,21% de C y 2.35% de Si, además se observa que el contenido de Al es relativamente alto, lo cual evidencia que se adicionó un exceso de Al a la mezcla.

Si se comparan estos datos de composición con los obtenidos del balance de masa se puede apreciar que el contenido de Mn disminuyó con relación al teórico lo cual evidencia que la reducción de los óxidos de Mn fue menor a la prevista, aunque esto permite incrementar el contenido de pirolusita en la mezcla, lo cual generaría una cantidad de calor superior a la obtenida con esta mezcla facilitando el proceso de

soldadura o permitiría incorporar otros elementos de aleación a la mezcla para lograr depósitos aleados con otros componentes.

El contenido de carbono en depósito también resultó inferior al determinado en el balance de masa, lo que evidencia que la transferencia del carbono al depósito fue muy baja.

La composición química de los depósitos obtenidos permite afirmar que mediante el relleno con termita se pueden obtener depósitos con contenidos apreciables de elementos de aleación, siendo factible su empleo en la recuperación de piezas.

3.4.2: Caracterización metalográfica de los depósitos

Una muestra tomada del depósito III.2 fue sometida a un estudio metalográfico, en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del CIS. Las fotos tomadas se muestran en las figuras 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11.

En la figura 3.8 se aprecia que el depósito obtenido mediante el proceso de aluminotermia con el procedimiento seguido, ha logrado una adecuada adherencia con el metal base.

La afirmación anterior se fundamenta por la dilución entre el metal base y el aportado, la cual se puede identificar en la figura 3.8 como una zona bien definida a lo largo de la probeta con un ancho de aproximadamente 100 micras. Esta zona se caracteriza por una micrografía diferente tanto al metal base como al aportado, donde no se aprecian inclusiones de escorias, poros u otros defectos que puedan afectar la adherencia y como resultado el desprendimiento del metal aportado.

En cuanto a la estructura en la zona de la dilución, puede señalarse que no es típica de los cordones de soldadura por fusión, donde el ancho del cordón es mucho menor y la altura de penetración es mayor.

En caso de la zona de dilución se aprecian granos alargados, los cuales pueden tener naturaleza ferrítica, aunque es necesario verificar mediante un análisis más completo desde el punto de vista metalográfico.

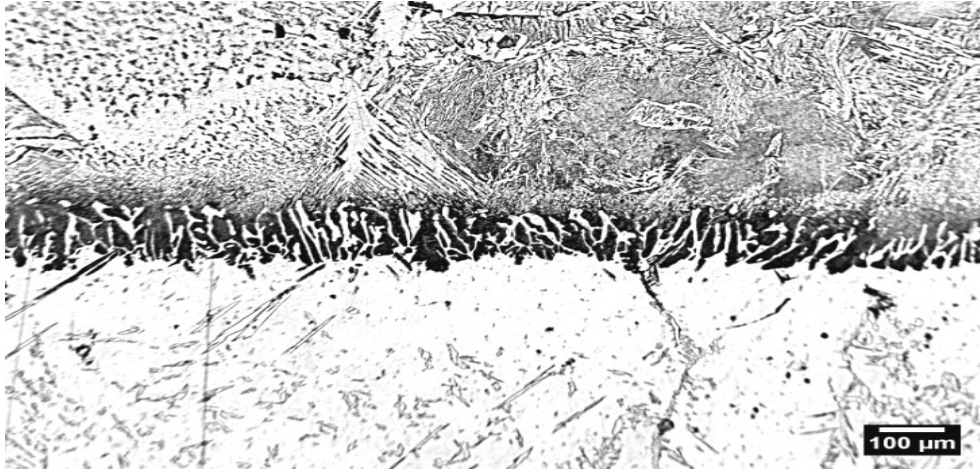


Figura 3.8. Microestructura de la zona de dilución.

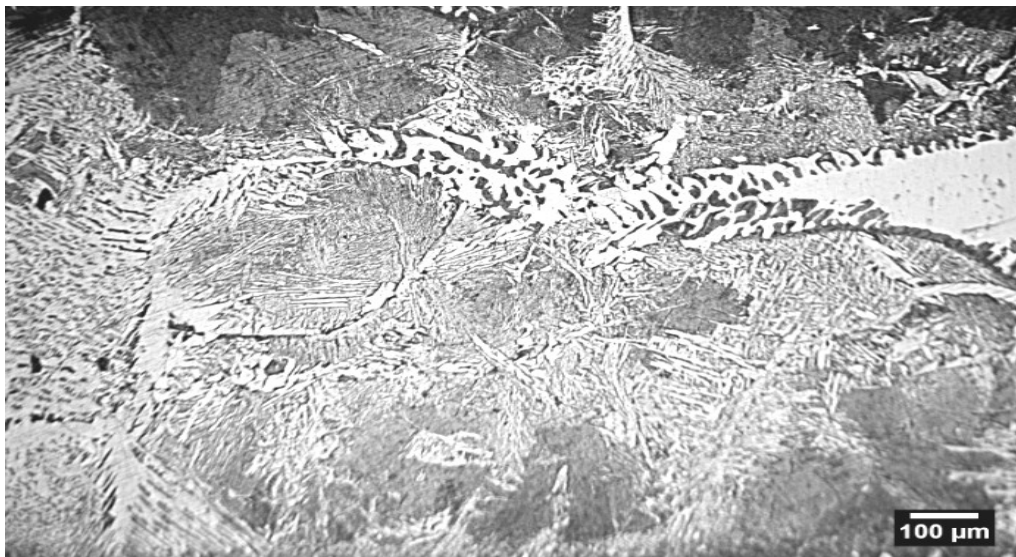


Figura 3.9. Microestructura del metal base.

En la zona del metal base donde no existe dilución (figura 3.9), se puede observar una estructura ferrita del tipo Widmanstatten y poligonal de contorno de grano lo que indica que esta zona alcanzó una elevada temperatura, cercana a los 1000 °C. La afirmación de la presencia de estas estructuras se confirma por la dureza que se obtiene (314 Hv) la cual se puede observar en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Dureza de la zona del metal base y el metal depositado (en Hv)

Número de pruebas	Metal base	Metal depositado
1	377	464
2	306	430
3	309	455
4	304	464
5	287	437
6	299	441
Promedio	314	448

Por otro lado el metal aportado se caracteriza por una dureza elevada (448 Hv), y por su morfología se puede señalar que estamos en presencia de una estructura con alto contenido de martensita como se aprecia en la figuras 3.10 y 3.11. Este razonamiento en cuanto a la estructura se confirma si se valora la composición química la cual se indica en la tabla 3.2, donde se da un contenido de carbono de 0,21% y de manganeso de 11.44%.

Según la composición química obtenida, el metal aportado alcanza un contenido de manganeso cercana a las aleaciones Hadfield, (C: 1.2% y Mn: 13%) la cual se caracteriza por su estructura austenítica [16].

Sin embargo en este caso, al lograrse un contenido de carbono por debajo, no es posible que se establezca la austenita y se produzca una transformación martensítica.

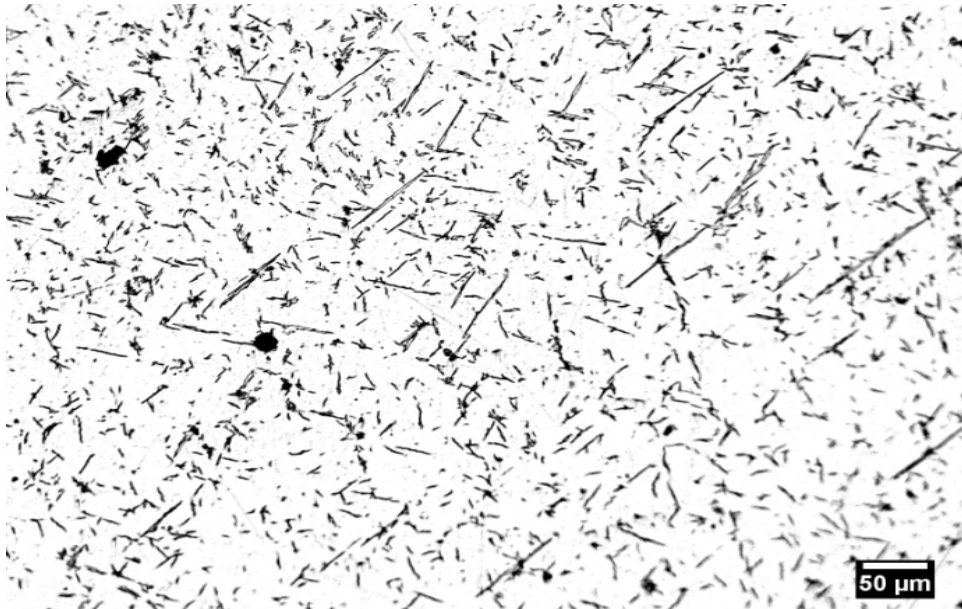


Figura 3.10. Microestructura del metal de aporte.

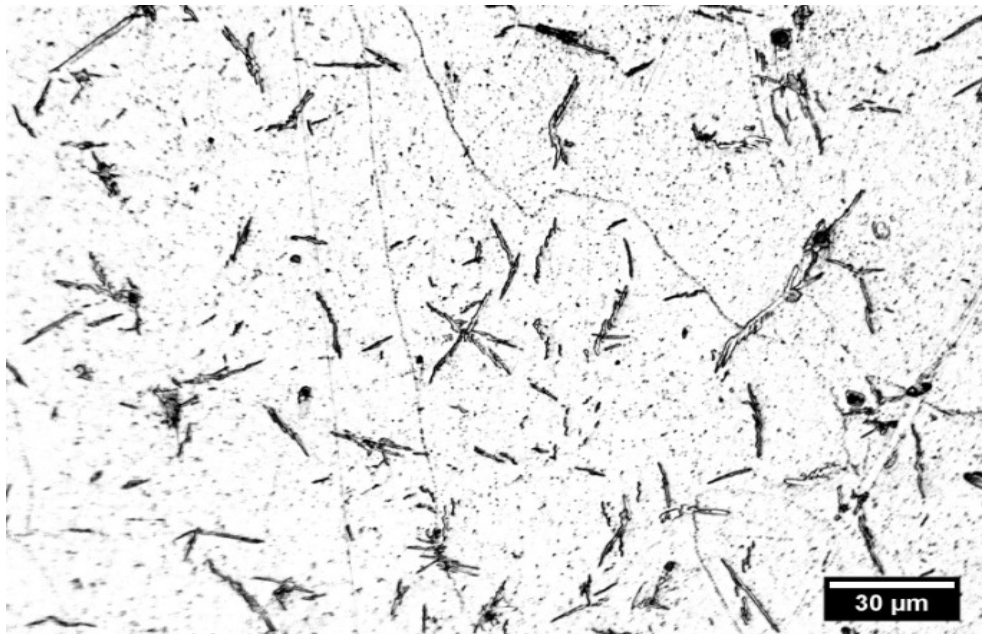


Figura 3.11. Microestructura del metal de aporte.

Conclusiones parciales del Capítulo 3

1. La composición química de la cascarilla de laminación, la pirolusita del yacimiento Margarita de Cambute y el aluminio procedente del proceso de maquinado de cafeteras, mezclados con grafito y fluorita permiten conformar mezclas pirometalúrgicas factibles de ser empleadas para el relleno superficial de piezas mediante aluminotermia.
2. La adecuada conformación de las mezclas, el precalentamiento de la mezcla y la probeta garantizan la obtención de depósitos mediante aluminotermia con un contenido de Mn de 11.44% y 0.25 % de C con buena adherencia al metal base.

Conclusiones Generales

1. La formulación de una mezcla integrada por: cascarilla de laminación (44.4%), aluminio (26.2%), pirolusita (24.1%), grafito (0.5%) y fluorita (4.8%), mezclada durante 30 minutos y precalentada a una temperatura entre 280 – 300 °C, permiten el adecuado procesamiento aluminotérmico de la mezcla y la obtención de depósitos, sobre chapas de acero al carbono, con adecuada adherencia.
2. El procesamiento aluminotérmico de la mezcla III permitió la obtención de depósitos con 11.44% Mn, 0.21% C y 2.35% de Si, una dureza de 448 Hv y una estructura con alto contenido de martensita.
3. La composición química de los depósitos, la estructura metalográfica y la observación de una zona de dilución, entre el metal base y el aportado, bien definida a lo largo de la probeta con un ancho de aproximadamente 100 micras, permite afirmar que el procedimiento aluminotérmico puede ser empleado para el relleno superficial de piezas.

Recomendaciones

1. Realizar un estudio metalográfico detallado de la zona de dilución entre el metal base y el aportado por el procedimiento aluminotérmico.
2. Ensayar el procedimiento estudiado en una pieza de dimensiones superiores a la ensayada en el presente trabajo.

Citas y Referencias

- 1- Cuba. Ministerio de Educación. Curso Universidad para todos. "Nuevas tecnologías". Grupo de Edición Editorial Academia. 2005.
- 2- Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución. VI Congreso del Partido Comunista de Cuba. 2011. (Folleto)
- 3- Nihon Denkou K; Kozuzou T. Production of Metallic Alloy by Thermit Method. Patente 60-50129, 14/3/1985. Int. Cl. C22B5/04, C22B34/22, C22B34/34/30.
- 4- Perfect F.H.; Wyomissing, Pa. Process for Aluminothermic Production of Chromium and Chromium Alloys Low in Nitrogen. Patente 6/331/475, 28/7/1980. Int. Cl. C21B15/02.
- 5- Finster T.; et al. Aluminothermic Reaction Mixture Based on Copper Oxide and Iron Oxide. Patente 3/902/891, 20/5/1974, Int. Cl. C21 B15/02, C22B9/10.
- 6- Soldadura aluminotérmica. Wikipedia. La enciclopedia libre. http://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura_aluminot%C3%A9rmica. 22 junio. 2011.
- 7- García, Y. Obtención de una termita para soldar carriles a partir de componentes nacionales. Trabajo de Diploma. UCLV. 2003-2004
- 8- Duart, J.M. et al.: Aceros aluminotérmicos. Nota técnica. Revista de Metalurgia. Madrid 40 (2004) 56-64.
- 9- Bracarense, A., et al.: Aluminotermia. UFMG. Brasil, 37 pp. 2007
- 10- Hernández, G. Manual del Soldador, 18 va Edición, Octubre 2007
- 11- Martín, M., et al.: Posibilidades sobre el uso de residuos de la industria del acero en la eliminación de metales de efluentes líquidos. Rev. Metal. Madrid 40 (2004) 324-328
- 12- Riss, A. Production of ferroalloys. Ed. Foreign languages publishing house. Moscow 1975, 278pp.
- 13- Aranguren, F., Mallol, A., "Siderurgia", Editorial Dossat, Madrid, España, 1963, pp. 7, 8, 13, 14, 197 – 203, 206, 449 – 454, 479 – 591, 500 – 502.

Citas y Referencias

- 14- Cruz Crespo, A. Obtención, mediante fusión, de un fundente fundido del sistema MnO-SiO_2 para la soldadura por arco sumergido. Tesis en opción al grado de doctor en ciencias técnicas. UCLV, Santa Clara, 2001. Cuba
- 15- Sol Riera, Y., "Obtención de Fe – Cr – Mn para el desarrollo de materiales para soldar", Trabajo de diploma, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2002, pp. 4 – 8.
- 16- Guliaev, A. P, "Metalografía", Editorial MIR, Moscú, 1978, tomos I y II, pp. 101 – 110, 183 – 186, 85 – 86 y 164.
- 17- Fucheng, Z; Tingquan, L. "A Study of Friction- Induced Martensitic Transformation for Austenitic Manganese Steel Wear". Vol. 212, Issue2. P195-198. December 10, 1997. Science server Logo Web Site. Enero del 2000. Disponible en: <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>
- 18- Caraballo, M. Endurecimiento mediante explosivos del acero hadfield. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM., 2004.
http://www.ismm.edu.cu/sites/edum/doctorados/d_t_2004_a.pdf
- 19- ASM, ASM Handbook. Volume 18. "Friction, Lubrication and Wear Technology". The Materials Information Society. ASM International. United States of America. 1992.
- 20- Rodríguez, C. Obtención de ferroaleaciones al cromo manganeso, mediante aluminotermia, para la fabricación de consumibles de soldadura. UCLV. Curso 2004-2005
- 21- Bravo, Y. Desarrollo de materiales abrasivos para la industria cubana. UCLV. Curso 2009-2010
- 22- Impactos de las Industrias del Hierro y el Acero - Cascarillas
<http://www.estrucplan.com.ar/producciones/entrega.asp?identrega=150>

Bibliografía

1. Aranguren, F., Mallol, A., "Siderurgia", Editorial Dossat, Madrid, España, 1 963, pp. 7, 8, 13, 14, 197 – 203, 206, 449 – 454, 479 – 591, 500 – 502.
2. ASM, ASM Handbook. Volume 18. "Friction, Lubrication and Wear Technology". The Materials Information Society. ASM International. United States of America. 1992.
3. Bracarense, A., et al.: Aluminotermia. UFMG. Brasil, 37 pp. 2007.
4. Bravo, Y. Desarrollo de materiales abrasivos para la industria cubana. UCLV. Curso 2009-2010
5. Caraballo, M. Endurecimiento mediante explosivos del acero hadfield. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM., 2004.
6. Cruz Crespo, A. Obtención, mediante fusión, de un fundente fundido del sistema Mn-SiO₂ para la soldadura por arco sumergido. Tesis en opción al grado de doctor en ciencias técnicas. UCLV, Santa Clara, 2001. Cuba
7. Cuba. Ministerio de Educación. Curso Universidad para todos. "Nuevas tecnologías". Grupo de Edición Editorial Academia. 2005.
8. Duart, J.M. et al.: Aceros aluminotérmicos. Nota técnica. Revista de Metalurgia. Madrid 40 (2004) 56-64.
9. Finster T.; et al. Aluminothermic Reaction Mixture Based on Copper Oxide and Iron Oxide. Patente 3/902/891, 20/5/1974, Int. Cl. C21 B15/02, C22B9/10.
10. Fucheng, Z; Tingquan, L. "A Study of Friction- Induced Martensitic Transformation for Austenitic Manganese Steel Wear". Vol. 212, Issue 2. P195-198. December 10, 1997. Science server Logo Web Site. Enero del 2000.
Disponible en: <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>
11. García, Y. Obtención de una termita para soldar carriles a partir de componentes nacionales. Trabajo de Diploma. UCLV. 2003-2004

Bibliografía

12. Guliaev, A. P, "Metalografía", Editorial MIR, Moscú, 1978, tomos I y II, pp. 101 – 110, 183 – 186, 85 – 86 y 164.
13. Hernández, G. Manual del Soldador, 18 va Edición, Octubre 2007
14. Impactos de las Industrias del Hierro y el Acero - Cascarillas
<http://www.estrucplan.com.ar/producciones/entrega.asp?identrega=150>
15. Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución. VI Congreso del Partido Comunista de Cuba. 2011. (Folleto).
16. Martín, M., et al.: Posibilidades sobre el uso de residuos de la industria del acero en la eliminación de metales de efluentes líquidos. Rev. Metal. Madrid 40 (2004) 324-328.
17. Nihon Denkou K; Kozuzou T. Production of Metallic Alloy by Thermit Method. Patente 60-50129, 14/3/1985. Int. Cl. C22B5/04, C22B34/22, C22B34/34/30.
18. Perfect F.H.; Wyomissing, Pa. Process for Aluminothermic Production of Chromium and Chromium Alloys Low in Nitrogen. Patente 6/331/475, 28/7/1980. Int. Cl. C21B15/02.
19. Riss, A. Production of ferroalloys. Ed. Foreign languages publishing house. Moscow 1975, 278pp.
20. Rodríguez, C. Obtención de ferroaleaciones al cromo manganeso, mediante aluminotermia, para la fabricación de consumibles de soldadura. UCLV. Curso 2004-2005.
21. Sol Riera, Y., "Obtención de Fe – Cr – Mn para el desarrollo de materiales para soldar", Trabajo de diploma, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2002, pp. 4 – 8.
http://www.ismm.edu.cu/sites/edum/doctorados/d_t_2004_a.pdf
22. Soldadura aluminotérmica. Wikipedia. La enciclopedia libre.
http://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura_aluminot%C3%A9rmica. 22 junio. 2011.