**XI CONFERENCIA CIENTÍFICA INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**COMEC 2023**

**Obtención de aleación MnCrSi, usando minerales cubanos y residuales industriales, para fabricar electrodos tubulares revestidos**

***Obtaining MnCrSi alloy, using Cuban minerals and industrial waste, to manufacture coated tubular electrodes***

**Lorenzo Perdomo González1, Rafael Quintana Puchol2, Mayriel Hernández Hernández3, Manuel Rodríguez Pérez4, Amado Cruz Crespo5, Laura Ailin Perdomo Gómez6**

1- Lorenzo Perdomo González. Facultad Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, E-mail: [lperdomo@uclv.edu.cu](mailto:lperdomo@uclv.edu.cu)

2- Rafael Quintana Puchol. Departamento de Licenciatura en Química, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba E-mail: [rquin@uclv.edu.cu](mailto:rquin@uclv.edu.cu)

3- Mayriel Hernández Hernández. Trabajador por cuenta propia. E-mail: [mayriel2hg@mail.com](mailto:mayriel2hg@mail.com)

4- Manuel Rodríguez Pérez. Facultad Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, E-mail: [manuelr@uclv.edu.cu](mailto:manuelr@uclv.edu.cu)

5- Amado Cruz Crespo. Facultad Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, E-mail: [acruz@uclv.edu.cu](mailto:acruz@uclv.edu.cu)

6- Laura Ailin Perdomo Gómez. Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. E-mail: [laperdomo@uclv.cu](mailto:laperdomo@uclv.cu)

**Resumen:**

* **Problemática:** Las ferroaleaciones utilizadas en Cuba son importadas en su totalidad a pesar de que el país dispone de minerales y residuales industriales capaces de aportar los elementos de aleación de mayor empleo en el desarrollo de consumibles de soldadura destinados al relleno superficial de piezas.
* **Objetivo(s):** Obtener, mediante aluminotermia, una aleación al MnCrSi, usando como materias primas minerales cubanos y residuales industriales, destinada a la fabricación de electrodos tubulares revestidos.
* **Metodología:** A partir de un balance de masa y de la determinación de los calores de reacción se formula una carga para su procesamiento mediante aluminotermia, usando como materias primas: cromita refractaria, pirolusita, cascarilla de laminación, catalizador agotado de la fabricación de ácido sulfúrico y virutas de aluminio. El procesamiento se realiza mediante aluminotermia en reactor de grafito.
* **Resultados y discusión:** Elprocesamiento pirometalúrgico se desarrolló de manera autosostenida y con adecuada separación del metal y la escoria, obteniéndose una aleación con: Mn: 29 %, Cr: 11 %, Si: 19 % y 6 % de Al, adecuada para su uso como carga de aleación de consumibles de soldadura. La escoria va a estar formada fundamentalmente por Al2O3 y elevada dureza lo cual viabiliza su uso como material abrasivo y refractario.
* **Conclusiones:** El procesamiento aluminotérmico de una mezcla compuesta por minerales cubanos y residuales industriales permitió obtener aleaciones al MnCrSi aptas para su uso como carga de aleación de consumibles de soldadura y escorias con los requerimientos necesarios para su uso como materiales abrasivos y refractarios.

**Palabras claves:** Ferroaleaciones; Aluminotermia; Electrodos tubulares revestidos; Abrasivos

***Abstract:***

* ***Problem:*** *The ferroalloys used in Cuba are imported in their entirety despite the fact that the country has minerals and industrial residues capable of providing the alloying elements most used in the development of welding consumables for surface filling of parts.*
* ***Objective(s):*** *Obtain, through aluminothermy, an alloy to MnCrSi, using Cuban minerals and industrial residues as raw materials, intended for the manufacture of coated tubular electrodes.*

***Methodology:*** *Based on a mass balance and the determination of the heats of reaction, a charge is formulated for its processing by means of aluminothermy, using as raw materials: refractory chromite; pyrolusite; mill scale; spent catalyst from the manufacture of sulfuric acid and aluminum chips. The processing is carried out by means of aluminothermy in a graphite reactor.*

* ***Results and discussion:*** *The pyrometallurgical processing was developed in a self-sustaining manner and with adequate separation of the metal and the slag, obtaining an alloy with: Mn: 29 %, Cr: 11 %, Si: 19 % and 6 % of Al; suitable for use as an alloy charge for welding consumables. The slag will be formed fundamentally by Al2O3 and high hardness which makes its use viable as an abrasive and refractory material.*
* ***Conclusions:*** *The aluminothermic processing of a mixture composed of Cuban minerals and industrial residuals allowed obtaining MnCrSi alloys suitable for use as alloy charge for welding consumables and slag with the necessary requirements for their use as abrasive and refractory materials.*

***Keywords*:** *Ferroalloys; Aluminothermy; Coated Tubular Electrodes; Abrasive*

**1. Introducción**

Independientemente del tipo de consumible que se use, de forma general, se puede señalar que la composición química y, por ende, las propiedades mecánicas obtenidas en los depósitos de soldadura dependen fundamentalmente de las características y composición de la carga de aleación del consumible utilizado y su interrelación con la escoria durante la formación de cordón (Amini et al. 2015; Kenchireddy et al. 2014 & Perdomo, et al, 2018).

La naturaleza de los componentes de las cargas de aleación de los consumibles de soldadura puede ser muy disímil, siendo posible usar metales puros, sales y óxidos, ferroaleaciones, etc. Es más frecuente el uso de las ferroaleaciones por ser más económicas en comparación con los metales puros y por otro lado, al tener una temperatura de fusión menor que el metal puro los elementos metálicos aportados son más fácilmente asimilables en el metal fundido (Berciano et al. 2009).

Entre las ferroaleaciones de mayor uso en la formulación de cargas de aleación de consumibles de soldadura se encuentran: ferrocromo, ferromanganeso, ferrosilicio, ferromolibdeno, ferrovanadio, entre otros (Quintana et al. 2003; Kozyrev et al. 2016).

Las ferroaleaciones más frecuentemente adicionadas, como elemento de aleación, son el ferrocromo y el ferromanganeso y como desoxidante el ferrosilicio y el propio ferromanganeso las que son capaces de cumplir ambas funciones (aleante-REDOX), el ferromanganeso también actúa (a través del Mn) como desulfurante efectivo. Es decir, es bastante frecuente encontrar, en diferentes consumibles destinados al relleno superficial, cargas de aleación integradas por estas tres ferroaleaciones, sobre todo para la recuperación de piezas que trabajan en condiciones de desgaste abrasivo e impacto (González-Cabrera et al. 2014 & 2016). La proporción de una ferroaleación o de otra dentro del consumible depende de la magnitud de las propiedades físico-mecánicas y químicas predominantes a obtener en la pieza(dureza, tenacidad, mecanismo de desgaste, etc.).

En el mercado se comercializa una amplia gama de ferroaleaciones de variado contenido de carbono, desde contenidos muy bajos hasta valores relativamente altos de éste elemento, pero no es muy frecuente encontrar ferroaleaciones que contengan más de un elemento metálico de aleación. En el mundo se producen ferroaleaciones al manganeso-silicio (silicomanganeso) y ferroaleaciones al cromo-silicio, éstas últimas muy utilizadas para refinar ferrocromo de alto contenido de carbono (Arangurent & Mallol 1963).

El obtener una ferroaleación multicomponente para la formulación de cargas de aleación de consumibles de soldadura reduce apreciablemente los costos de obtención de la misma ya que en un mismo proceso se obtienen ambos metales (por ejemplo Cr, Mn), lo cual reduce los consumo de tiempo y energía, tanto durante el proceso de obtención como para la preparación de las ferroaleaciones individuales fundamentalmente por las operaciones de pulverización y clasificación hasta granulometrías menores a 0,25 mm. Estas ferroaleaciones, por su restringido uso, pueden ser producidas a solicitud, en instalaciones de pequeña o medianas capacidad y la tecnología de producción puede ser adecuada de forma tal que permita la obtención de ferroaleaciones de alta fragilidad lo que reduciría aún más los costos de preparación de las mismas (Perdomo, et al, 2018).

En Cuba no se produce ninguna de estas ferroaleaciones, aunque existen minerales y residuales industriales que pudieran ser aprovechados para estos fines (Perdomo, et al, 2015, 2018 & 2021).

El procesamiento aluminotérmico, se basa en la reacción de oxidación reducción entre el aluminio y los óxidos metálicos presentes en las mezclas pirometalúrgicas donde la ecuación química general, que representa el proceso es (Gasik, 2013):

**MeXOY + (2y/3)Al → xMe + (y/3)Al2O3**  **(1)**;

donde M: representa el metal del óxido a reducir.

Como premisa, para garantizar el autosostenimiento del proceso sin suministro de energía adicionar, se requiere que el calor específico por unidad de masa de los reactantes esté por encima de 550 cal/g. De manera general las escorias generadas son muy viscosas, por lo que se recomienda incrementar la cantidad de calor de reacción hasta valores entre 620 y 680 cal/g, lo cual garantiza la adecuada separación del metal y la escoria (Riss and Khodorovsky, 1975).

El objetivo del presente trabajo es obtener, mediante aluminotermia, una aleación al MnCrSi, usando como materias primas minerales cubanos y residuales industriales, destinada a la fabricación de electrodos tubulares revestidos.

**2. Metodología**

La selección de las materias primas se realizó sobre la base de utilizar minerales de procedencia nacional y/o residuales sólidos industriales. Se utilizaron catalizadores agotados de la fabricación de ácido sulfúrico, procedentes de la Fabrica Patricio Lumumba (Sulfometales) de Pinar del Río, cascarilla de laminación generada en Acinox Las Tunas y las virutas de aluminio de la Empresa Antenas de Santa Clara. Como fuente de cromo se utilizó cromita refractaria de la Planta Cayo Guam en Moa, provincia de Holguín, y como portador de manganeso, pirolusita del Yacimiento Margarita de Cambute en Santiago de Cuba. La composición química de las materias primas se muestra en la Tabla 1. A partir de los minerales señalados en la Tabla 1 se formuló una carga total de 3374 gramos, con la conformación que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 1: Composición química de las materias primas (en % m)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Viruta de aluminio** | | **Cromita** | | **Residual catalítico** | |
| **Componente** | **Contenido** | **Componente** | **Contenido** | **Componente** | **Contenido** |
| Si | 0,45 | Cr2O3 | 32,87 | SiO2 | 64,35 |
| Fe | 0,2 | SiO2 | 5,79 | Ca3(PO4)2 | 0,405 |
| Mn | 0,1 | Al2O3 | 26,06 | Fe2O3 | 9,071 |
| Cu | 0,1 | FeO | 14,54 | MgO | 1,3 |
| Mg | 0,15 | CaO | 0,42 | CaO | 0,868 |
| Zn | 0,15 | MgO | 16 | Na2O | 1,469 |
| Al | Balance | **Pirolusita** | | SrO | 0,007 |
| **Cascarilla de laminación** | | **Componente** | **Contenido** | Cr2O3 | 0,027 |
| Fe2O3 | 20-30 | SiO2 | 5,6 | S | 7,166 |
| Fe3O4 | 40-60 | MnO2 | 76,14 | V2O5 | 3,433 |
| FeO | 15-20 | MnO | 0,14 | MnO | 0,042 |
| Femetal | 2-5 | FeO | 1,36 | NiO | 0,034 |
| Feprom | 70,3 | Al2O3 | 1,54 | CuO | 0,021 |
| O2,prom | 24,1 | CaO | 1,35 | ZnO | 0,023 |
| Impurezas | 5 | MgO | 0,3 | As2S5 | 0,013 |
|  |  | Na2O | 0,47 | PbO | 0,171 |
|  |  | Ka2O | 0,24 |  |  |
|  |  | P | 0,01 |  |  |
|  | | S | 0,01 |  |  |

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Mezcla para la obtención de la ferroaleación (en %-m)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Pirolusita | Aluminio | Catalizador  de Vanadio | Cromita | Cascarilla |
| 29,64 | 26,14 | 16,66 | 14,23 | 13,34 |

Fuente: elaboración propia

Con los datos de composición química (Tabla 1), de conformación de la carga (Tabla 2) y las reacciones siguientes se realizó un balance de masa, tomando como referencia las reacciones químicas de la 1 a la 12.

|  |  |
| --- | --- |
| 3MnO2 + 4Al = 3Mn + 2Al2O3 | (1) |
| Fe2O3 + 2Al = 2 Fe + Al2O3 | (2) |
| Cr2O3 + 2Al = 2Cr + Al2O3 | (3) |
| 3SiO2 + 4Al = 3Si + 2Al2O3 | (4) |
| 3V2O5 + 10Al = 6V + 5Al2O3 | (5) |
| 3MnO + 2 Al = 3Mn + Al2O3 | (6) |
| MnO2 + 2 Mg = Mn + 2 MgO | (7) |
| 3SrO + 2Al = 3Sr + Al2O3 | (8) |
| 3NiO + 2Al = 3Ni + Al2O3 | (9) |
| 3CuO + 2Al = 3Cu + Al2O3 | (10) |
| Zn + ½O2 = ZnO | (11) |
| S + O2 = SO2 | (12) |

El balance se realiza aplicando el principio de Conservación de la Masa (Castellanos, et al., 2001), según muestra la ecuación general (13):

Acumulación = Entrada – Salida + Generación – Consumo (13)

Los calores de reacción (∆Hreacción) se determinaron para cada una de las doce reacciones químicas tomadas en consideración, utilizando la expresión 14 y los calores de formación de los óxidos a 298 ºC en kcal/mol (Perry, 1999).

ΔHreacción= ΣnΔFprod - ΣnΔFreacc  (14)

La cantidad total de calor generada (Qtotal) por unidad de masa (g) de cada una de las mezclas se determinó de la relación entre la cantidad total de calor generada por las reacciones químicas (*Qi*) que se encuentran involucradas en la mezcla y la masa total de carga a procesar (Mtotal).

La mezcla obtenida es calentada hasta una temperatura de ~250 ºC, durante ~2 h, siendo llevada una porción de ella al reactor aún caliente, para iniciar la reacción, a partir de la energía proveniente del contacto de un electrodo con el cuerpo del reactor (arco eléctrico). La alimentación al horno, del resto de la mezcla preparada, se efectúa de forma continua en la medida en que transcurre la reacción química hasta el procesamiento de toda la carga, dejándose reposar hasta su enfriamiento.

Obtenida la aleación manganeso, cromo, silicio (MnCrSi), se procedió a su extracción del reactor una vez que el producto de la reacción se ha enfriado totalmente. El proceso de extracción se facilita debido a que las escorias (cerámicas) tienen menor densidad que el metal y quedan ubicadas encima del mismo. Una vez separada la cerámica se extrajo el metal, aunque normalmente queda una pequeña capa entre el metal y el crisol. Una vez terminada esta operación, la aleación limpia se trituró y tamizó hasta obtener una granulometría entre 0,1 y 0,2 mm .

**3. Resultados y discusión**

**3.1 Resultados potenciales de la carga**

La realización del balance de masa permite realizar una evaluación preliminar de los resultados del procesamiento, siendo posible estimar la cantidad y composición de los productos a generar. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Balance de masa (en g)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Componente | Entrada | Genera | Consume | salida |
| SiO2 | 445,44 | 0,00 | 445,44 | 0,00 |
| MnO2 | 761,40 | 0,00 | 761,40 | 0,00 |
| MnO | 1,64 | 0,00 | 1,64 | 0,00 |
| Al2O3 | 140,49 | 1581,76 | 0,00 | 1722,25 |
| MgO | 87,11 | 2,21 | 0,00 | 89,31 |
| CaO | 20,39 | 0,00 | 0,00 | 20,39 |
| Na2O | 12,96 | 0,00 | 0,00 | 12,96 |
| K2O | 2,40 | 0,00 | 0,00 | 2,40 |
| P | 0,09 | 0,00 | 0,00 | 0,09 |
| Cr2O3 | 157,93 | 0,00 | 157,93 | 0,00 |
| FeO | 83,39 | 0,00 | 83,39 | 0,00 |
| S | 40,37 | 0,00 | 24,22 | 16,15 |
| Mn | 0,88 | 482,61 | 0,00 | 483,49 |
| Cr | 0,44 | 108,06 | 0,00 | 108,50 |
| Fe | 1,76 | 415,55 | 0,00 | 417,31 |
| Si | 3,97 | 207,87 | 0,00 | 211,84 |
| Cu | 0,88 | 0,09 | 0,00 | 0,98 |
| Mg | 1,32 | 0,00 | 1,32 | 0,00 |
| Zn | 1,32 | 0,00 | 1,32 | 0,00 |
| Al | 871,42 | 0,00 | 837,40 | 34,01 |
| ZnO | 0,13 | 1,65 |  | 1,78 |
| O2 | 24,55 | 0,00 | 24,55 | 0,00 |
| SO2 | 0,00 | 48,45 | 0,00 | 48,45 |
| Fe2O3 | 500,98 | 0,00 | 500,98 | 0,00 |
| Ca3(PO4)2 | 2,28 | 0,00 | 0,00 | 2,28 |
| SrO | 0,04 | 0,00 | 0,04 | 0,00 |
| NiO | 0,19 | 0,00 | 0,19 | 0,00 |
| V2O5 | 19,29 | 0,00 | 19,29 | 0,00 |
| CuO | 0,12 | 0,00 | 0,12 | 0,00 |
| As2S5 | 0,07 | 0,00 | 0,00 | 0,07 |
| PbO | 0,96 | 0,00 | 0,00 | 0,96 |
| V | 0,00 | 10,81 | 0,00 | 10,81 |
| Sr | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,03 |
| Ni | 0,00 | 0,15 | 0,00 | 0,15 |
| Otros | 214,34 | 0,00 | 0,00 | 214,34 |
| Total | 3398,55 | 2859,24 | 2859,24 | 3398,55 |

Fuente: elaboración propia

Los resultados potenciales del procesamiento aluminotérmico de la carga se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Cantidad y composición química de los productos a generar durante el procesamiento aluminotérmico de la mezcla

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Metal** | | | **Cerámica** | | | **Gases** | | |
| Elemento | Masa, g | %-m | Elemento | Masa, g | %-m | Elemento | Masa, g | %-m |
| Mn | 483,49 | 38,03 | Al2O3 | 1722,25 | 92,51 | ZnO | 1,78 | 3,47 |
| Cr | 108,50 | 8,53 | MgO | 89,31 | 4,80 | SO2 | 48,45 | 94,48 |
| Fe | 417,31 | 32,83 | CaO | 20,39 | 1,10 | As2S5 | 0,07 | 0,14 |
| Si | 211,84 | 16,66 | Na2O | 12,96 | 0,70 | PbO | 0,96 | 1,87 |
| Cu | 0,98 | 0,08 | K2O | 2,40 | 0,13 | P | 0,02 | 0,03 |
| Al | 34,01 | 2,68 | P | 0,02 | 0,00 | Total | 51,28 | 100,0 |
| P | 0,05 | 0,00 | Ca3(PO4)2 | 2,28 | 0,12 |
| S | 4,04 | 0,32 | S | 12,11 | 0,65 |
| V | 10,81 | 0,85 | Total | 1861,71 | 100,0 |
| Sr | 0,03 | 0,00 |  |  |  |
| Ni | 0,15 | 0,01 |  |  |  |
| Total | 1271,2 | 100,00 |  |  |  |

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 4 se puede apreciar que como resultado del procesamiento aluminotérmico de la carga deben obtenerse 1271,2 g de metal, formada por: Mn: 38,03 %; Cr: 8,53 %; Fe: 32,83 %; Si: 16,66 %; Al: 2,68 %; S: 0,32 %; V: 0,85 %, junto a otros elementos en concentraciones por debajo de 0,1 %. Por otro lado, deben generarse 1861,7 g de cerámica (escoria), la que deben estar formadas por un 92,5 % de Al2O3, 4,8 % de MgO, 1,1 % de CaO, además de otros elementos en concentraciones por debajo del 1 %.

El procesamiento pirometalúrgico también genera 51,28 g de gases, los cuales deben estar formados principalmente por un 94,48 % de SO2, 3,47 % de óxido de cinc y 1,87 % de óxido de plomo.

El cinc presente en las virutas de aluminio y el generado, producto de la reacción (9), debe volatilizarse a temperaturas entre 1000 y 1 300 ºC formando parte, como partículas sólidas, de la corriente gaseosa, el cual al entrar en contacto con el oxígeno se oxida nuevamente de acuerdo con la ecuación (15) (Dvořák y Hong, 2017).

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Zn(g) | + | ½O2(g) | = | ZnO(s) | (15) |

Como resultado de la determinación de los calores de reacción se obtuvo que carga formulada es capaz de generar 775,2 cal/g, cantidad de calor suficiente para el autosostenimiento del proceso al ser superior a las 550 cal/g y de permitir la adecuada separación del metal y la cerámica al superar las 650 cal/g (Riss and Khodorovsky, 1975).

**3.2 Resultados del procesamiento pirometalúrgico de la carga**

El procesamiento aluminotérmico de la carga formulada se desarrolló de manera autosostenida, con adecuado encendido y fácil separación del metal de la cerámica. La aleación obtenida fue caracterizada químicamente, mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX), obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5: Composición química en % de masa de la aleación MnCrSi obtenida (en %-m)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Si | Mn | Cu | V | S | Al | Ni | Cr | P | Zn | Fe |
| 19,30 | 29,05 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 5,68 | 0,12 | 10,98 | 0,10 | 0,02 | 7,14 |

Fuente: elaboración propia

Si se comparan los datos de composición química del metal, calculados a partir del balance de masa (Tabla 4) con la composición real de la aleación obtenida, determinada mediante FRX (Tabla 5), se puede apreciar que los valores más cercanos a los predeterminados le correspondieron al silicio, cromo y manganeso con diferencias del 14, 22 y 31 % respectivamente, observándose en la tabla que el manganeso disminuyó mientras que el silicio y cromo aumentaron. Estos tres elementos representan cerca del 60 % de la composición de la aleación obtenida.

Las mayores diferencias, con relación a los valores estimados, le correspondieron al vanadio seguido del azufre, lo cual puede estar relacionado con alta afinidad de estos dos elementos por el oxígeno. Este comportamiento provocó que disminuyera apreciablemente la cantidad de vanadio en la aleación reduciéndose de esta manera los efectos positivos que ejerce el vanadio sobre la aleación obtenida. Por otro lado, la disminución del contenido de azufre en el metal mejora apreciablemente la calidad de la aleación.

El contenido de hierro fue muy inferior al valor estimado, mientras que el de aluminio aumentó, lo cual puede estar relacionado a una menor eficiencia en la reducción de los óxidos de hierro, quedando en la cerámica en forma de espinelas de hierro fundamentalmente (hercinita). En el caso particular del aluminio, su incremento puede estar relacionado con la menor reducción del hierro y con la adición de un exceso de reductor en la carga.

Como resultado se obtuvieron 905 g de metal para un rendimiento de 71,2 % y 2083 g de cerámica para un rendimiento de 111, 9 %. El relativamente bajo rendimiento metálico puede estar asociado a la oxidación de algunos elementos de alta afinidad por el oxígeno y a la disminución de los niveles de reducción de algunos óxidos metálicos, por tanto, quedan formando parte de la cerámica, lo cual trae consigo un incremento en los rendimientos de cerámica.

La aleación obtenida se caracteriza por su alta fragilidad, lo que facilitó y abarató su pulverización para su empleo como carga de aleación de electrodos tubulares revestidos. Los electrodos fabricados con la aleación obtenida pueden ser utilizados para el recargue de piezas que trabajan en condiciones de desgaste abrasivo (Rodríguez, et al., 2019), donde las variaciones en los contenidos de carbono en la carga de aleación pueden definir las características del mecanismo de desgaste y por tanto su campo de aplicación.

De manera general se puede afirmar que la aleación obtenida reúne los requisitos fundamentales para su empleo como carga de aleación de consumibles de soldadura, aleación que permite depositar manganeso, silicio y cromo al cordón de soldadura, contando dentro de ella los dos elementos clásicamente usados desoxidantes (Mn y Si), donde además el Mn puede actuar como desulfurante y desfosforante.

La ferroaleación obtenida se evalúa actualmente en el Centro de Investigaciones de Soldadura de la UCLV en la fabricación de electrodos tubulares revestidos. La Figura 1 muestra una foto de los electrodos tubulares fabricados, sin revestir (A) y revestidos (B).



Fuente: elaboración propia

Figura 1. Electrodos tubulares fabricados. A: Sin revestir, B: Revestidos.

Las cerámicas obtenidas se caracterizan por su elevada dureza, lo cual fue comprobado mediante ensayos de rayado sobre el vidrio demostrando que su dureza es superior a 5,5 en la escala de Mohs, dado esto por el contenido de corindón (> 90 %), seguido de un 4,8 % de MgO, el cual debe formar espinelas cuya dureza es de 7,5. Por tanto, las cerámicas obtenidas deben tener una dureza en la escala de Mosh entre 7,5 y 9.

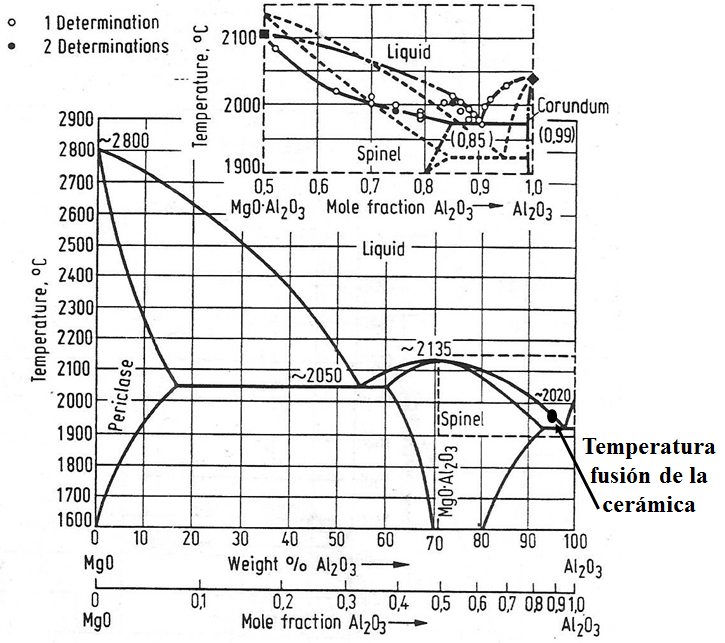
La temperatura de fusión en grados Celcios de las cerámicas puede ser estimada a partir de los datos composición química, calculados utilizando la expresión empírica reportada por Torres, 1971.

(14)

donde: Al2O3representa el contenido de alúmina (en %-m) de la escoria y RO, el contenido (en %-m) de los óxidos alcalino térreos de calcio y magnesio presentes ([Torres, 1971](#_ENREF_8)).

Del cálculo se obtuvo que la temperatura de fusión de la cerámica es 1959 ºC. Aunque la fórmula (14) resulta ser una herramienta útil debe tomarse sólo como referencia de un resultado (Torres, 1971), permitiendo hacer una valoración del potencial de las escorias como material refractario.

La temperatura de fusión de la cerámica obtenida, también puede ser estimada a partir de la Figura 2, diagrama de fase para el sistema Al2O3-MgO (Slag atlas, 1981), en el cual se puede apreciar que la temperatura de fusión está por encima de 1950 ºC, lo cual le confiere características refractarias a este producto, siendo posible su empleo tanto para la obtención de materiales abrasivos como refractarios, productos estos de alta demanda en la industria.



Fuente: elaboración propia

Figura 2. Diagrama de fase Al2O3-MgO (Slag atlas, 1981).

**4. Conclusiones**

1. El procesamiento pirometalúrgico de cargas compuestas por pirolusita, cromitas refractarias, catalizadores agotados de V2O5 de la fabricación de ácido sulfúrico, cascarilla de laminación y virutas de aluminio, permitió obtener ferroaleaciones con 29,05 % de Mn, 10,98 % de Cr y 19,30 % de Si, de alta fragilidad.
2. El rendimiento metálico, obtenido del procesamiento aluminotérmico, fue 71,2 % y el de cerámica 111,2 % lo cual está asociado a la oxidación de elementos de alta afinidad por el oxígeno y a la disminución de los niveles de reducción de algunos óxidos metálicos.
3. La composición química de la aleación MnCrSi unido a su relativamente fácil trituración y molienda garantizan su empleo en el desarrollo de cargas de aleación de consumibles de soldadura por arco eléctrico, los cuales tienen un amplio campo de aplicación en la recuperación de piezas.
4. Como resultado del procesamiento pirometalúrgico se generaron cerámicas formadas por > 90 % de Al2O3 y un 4,8 % de MgO, con temperatura de fusión superior 1900 ºC y alta dureza, las que pueden ser usadas en la fabricación de materiales abrasivos y refractarios.

**5. Referencias bibliográficas**

1. Amini, K., Bahrami, A. & Sabet H. 2015: Evaluation of Microstructure and Wear Behavior of Iron-based Hard-facing Coatings on the Mo40 Steel. International Journal of ISSI 12, No.1, 1-8.
2. Arangurent, F. & Mallol, A. 1963: Siderurgía. Ed, Dorssat S,A, Madrid, 617 pp.
3. Berciano, J. E., Tremps, E., Fernández, D. & de Elio, S. 2009: Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte I, ACERÍA ELÉCTRICA”. Universidad Politécnica de Madrid.
4. Castellanos, J. et al. (2001). Balances de masa y energía. Métodos clásicos y técnicas no convencionales. Editorial Samuel Feijoo, UCLV, 167 p.
5. Dvořák, P., Hong N. VU. 2017: Zinc Recovery from Flue Dust. Journal of the Polish Mineral Engineering Society. Inżynieria Mineralna, Styczeń, Czerwiec, January – June, 195-199
6. Gasik, M. (2013). Handbook of Ferroalloys. Theory and Technology-Butterworth Heinemann, 520 p.
7. González-Cabrera, O., Gómez-Pérez, C., Kairús-Hernández-Díaz & Vázquez-Badillo. 2016: Comparación de oscilogramas eléctricos al rellenar con electrodos doblemente recubiertos. Ingeniería Mecánica. Vol. 19. No. 3, septiembre-diciembre, 128-136.
8. González-Cabrera, O., Gómez‐Pérez, C., Quintana‐Puchol, R., Perdomo‐González, L., Miguel‐Oria, N & López‐Fontanills. R. 2014: Alternativa de doble recubrimiento para electrodo destinado al proceso de relleno manual con arco eléctrico. Ingeniería Mecánica. Vol. 17. No. 3, septiembre-diciembre, 245-254.
9. Kenchireddy, K., C. T. Jayadeva, C. Sreenivasan, A. 2014: Some studies of hardfacing and metallurgical properties of mild steel using shielded metal arc welding processes. Global Journal Of Engineering Science And Researches. Kenchireddy, 1(4), 30-33.
10. Kozyrev, N., Galevsky, G., Kryukov, R., Titova, D. & Shurupov, V. 2016: New materials for welding and surfacing. Materials Science and Engineering 150 012031.
11. Perdomo González, L.; Quintana Puchol, R.; Gómez Pérez, C.R.; Cruz Crespo, A. (2015). Obtención simultánea de ferromanganeso y materiales abrasivos por reducción aluminotérmica usando pirolusita sin tostación previa y residuos sólidos industriales. Minería y Geología Vol.31/ 2015/No2. ISMM/Cuba. pp. 95-112.
12. Perdomo, L., Quintana-Puchol, R., Cruz-Crespo, A., Gómez-Pérez, C. (2018). Obtención en horno eléctrico de arco de aleaciones del sistema Fe-Mn-Cr-C y escorias destinadas al desarrollo de consumibles de soldadura. Minería y Geología / v.33 n.1 / enero-marzo / 2018 / p. 92-10
13. Perdomo, L., Quintana-Puchol, R., Rodríguez-Pérez, M., Rabassa-Rabassa, D., Cruz-Crespo, A. (2021). Recuperación del vanadio contenido en catalizadores agotados de la Fábrica Patricio Lumumba mediante aluminotermia. Minería y Geología / v.37 n.3 / julio-septiembre / 2021 / p. 303-317.
14. Perry, R. H & Green, D.W. Perryꞌs Chemical Engineers Handbook. Seventh edition. Mc Graw Hill. USA. 1999, p. 2-187 a 2-195. ISBN 0-07-049841-5.
15. Quintana, R., Cruz, A., Perdomo, L., García, L., Formoso, A & Cores, A. (2003): Eficiencia de la transferencia de elementos aleantes en fundentes durante el proceso de soldadura automática por arco submergido. Rev, Metal, Madrid, 39. Languages publishing house, Moscow, 278 p
16. Rodríguez Pérez, M., Perdomo González, L., Alfonso, I. (2019) Mejora de la resistencia al desgaste abrasivo de un revestimiento Fe-Cr-Mn-C mediante la adición de V. Revista Matéria, v.24, n.1 , 2019
17. Riss, A. and khodorovsky, Y. (1975). Production of ferroalloys. Ed. Foreign
18. Slag atlas (1981). Bearbeitet vom AusschuB metallurgische Grundlagen. Prepared by the Committee for Fundamental Metallurgy. Verlag Stahleisen M. B. H. Düsseldorf.
19. [Torres, A. (1971](#_ENREF_8)). Tecnología de los refractarios. Ediciones de ciencia técnica. Instituto cubano del libro. La Habana, 219 pp.