

Título: Electrodo tubular revestido para la reparación de piezas sometidas a desgaste abrasivo en el sector azucarero

Title: Coated tubular electrode for hardfacing of pieces under abrasive wear in the sugar industry.

Autores: MSc. Tamara M. Ortiz Méndez*, Dr. Amado Cruz Crespo*, Dr. Manuel Rodríguez*, Dr. Lorenzo Perdomo González*, Rafael Fernández Fuentes*.

*Centro de Investigaciones de la Soldadura, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.acruz@uclv.edu.cu

RESUMEN

Se obtiene un electrodo tubular revestido para recargue duro de piezas que trabajan en condiciones de desgaste abrasivo en el sector azucarero. Este se fabrica mediante la adición de una ferroaleación en polvo en el alma, utilizando simultáneamente un proceso de conformado con cierre a tope. El alambre tubular obtenido en forma de bobina, con diámetro de 4 mm, es fraccionado a dimensiones de 350 mm de longitud y le es colocado un revestimiento tipo básico por inmersión. Con el electrodo que se obtiene es evaluada la potencialidad de su aplicación a partir de la obtención de un depósito con múltiples pasadas, estableciéndose los criterios básicos de su posible utilización frente al desgaste abrasivo.

Palabras claves: *Electrodo tubular revestido, Recubrimiento duro, Desgaste abrasivo.*

ABSTRACT:

A coated tubular electrode for hardfacing of pieces which work under abrasive wear conditions in the sugar industry is obtained. The above-mentioned is carried out by the addition in the electrode core of a ferroalloy in powder form, using simultaneously a forming process with butt closing. The obtained tubular wire, in reel form, with diameter 4 mm, is fractioned to longitude of 350 mm and recovered by immersion with a basic type coating. Using the obtained electrode his potential application is study by the evaluation of multi-layer weld and the basic criterion about their possible use under abrasive wear condition were established.

Keywords: *Coated tubular electrode, Hardfacing, Abrasive wear.*

INTRODUCCIÓN

Toda vez que la economía de Cuba está muy relacionada a la agricultura y la industria azucarera, se ha dedicado una especial atención al desarrollo de este sector, jugando un papel cada vez mayor la mecanización. ^[4; 5] Basados en esta perspectiva el país desarrolló, sobre la base de las circunstancias económicas particulares en un momento concreto, la construcción de maquinaria para dar respuesta a la demanda de este sector. A pesar de la atención prestada, las máquinas tienen afectada su durabilidad por un enemigo inevitable, el desgaste abrasivo, consubstancial al propio trabajo de muchos componentes.

Esta situación mencionada para Cuba es similar en mayor o menor medida para un número importante de países, principalmente aquellos que de una forma u otra centran una parte importante de sus economías en la producción azucarera o agrícola en general (en lo cual se incluye casi toda América Latina). En muchos casos el desgaste abrasivo es atenuado por medio de la aplicación de recubrimientos duros sobre un material más barato, cómo método de fabricación de piezas. En otros casos el recubrimiento es aplicado, no como

criterio de fabricación, sino como un método de recuperación para restaurar la vida útil de los elementos afectados, inclusive esta operación se hace "in situ", muchas veces en condiciones de campo. Por otra parte las piezas en las que se va a aplicar el recargue presentan frecuentemente una configuración compleja y dimensiones muy variadas. Todas estas circunstancias hacen que, aún cuando la variedad de los procesos para aplicar recubrimientos sea amplia, los recubrimientos por soldadura manual con electrodo revestido continúe siendo la forma más versátil para cubrir el número mayor de expectativas.

Por otro lado, los electrodos revestidos macizos para recargue duro presentan dificultades de operabilidad, toda vez que precisan un factor de revestimiento muy grande para garantizar el nivel de aleación del depósito deseado y el trabajo para bajas corrientes se hace difícil, lo cual afecta indudablemente el factor dilución, que debe ser preferiblemente bajo.

Teniendo como base estas circunstancias prácticas es fabricado un electrodo tubular que, dado su aporte de un sistema aleante al Fe-Cr-Mn-C, da la posibilidad de aplicación en una amplia gama de piezas sometidas a desgaste abrasivo en diferentes ramas de la economía, siendo de un peso muy significativo la industria azucarera por su alto grado de mecanización y su amplia difusión en toda Cuba. Ejemplos de estos elementos de máquinas en esta rama son: las cuchillas del molino, los peines raspadores, las cadenas de arrastre del conductor de caña, los machetes del nivelador, los martillos desfibradores, el transportador helicoidal de bagazo, la carcasa de la bomba de guarapo, entre otros.

DESARROLLO

Preparación de la carga aleante

Como carga aleante es utilizada una aleación obtenida en trabajos precedentes y cuya composición química media se da en la tabla 1 ^[2]. En sentido general la aleación a utilizar por sus contenidos de Cr, Mn y C debe estar representada en su composición física por carburos de estos elementos, favorables para la aplicación como carga aleante de materiales destinados al recargue. Es pertinente señalar que la relación de elementos de aleación Cr-Mn-C no es posible encontrarla en ferroaleaciones comerciales y por tanto, sólo sería posible haciendo la combinación de al menos FeCr y FeMn como aleaciones simples. Lo anterior, entre otros inconvenientes, lleva a la necesidad de trituración y molienda de 2 aleaciones en lugar de 1, siendo también probable una menor transferencia de los elementos debido a una mayor oxidación, cuando son adicionados independientes, ya que requieren de una energía extra para formar compuestos entre sí y con el carbono, con nuevas relaciones estequiométricas.

Tabla 1. Composición química media de la aleación obtenida, en % masa.

Cr	Mn	Fe	C	Si	P	S
41,54	23,83	18,32	5,02	5,1	0,02	0,002

La ferroaleación fue llevada a granulometría $\leq 0,25$ mm mediante un proceso de trituración en molino de mandíbula, con clasificación en ciclo cerrado y molienda en un molino de disco, con clasificación por tamizado.

Obtención de la mezcla para el revestimiento del electrodo

Como revestimiento para el electrodo tubular se decide aplicar uno de tipo básico, lo que indudablemente favorece la transferencia del Cr y el Mn al baño de soldadura y que es un tipo de revestimiento bastante frecuente en electrodos de aplicaciones similares, además de haber sido desarrollado y aplicado con éxito en trabajos precedentes en el Centro de Investigaciones de Soldadura, para otros sistemas aleantes ^[3, 8]. Para ello se adiciona caliza y fluorita en una relación 1:1, lo cual llevado a la relación de sus componentes mayoritarios en la escoria representa $\text{CaO}:\text{CaF}_2=0,57$. Por otra parte, como la suma de ambos componentes del sistema binario es 100 %, resolviendo el sistema sencillo de dos ecuaciones se obtiene que hay 63,7 % de CaF_2 y 36,3 % de CaO (se ha considerado la composición de la caliza: 0,34 % SiO_2 , 0,23 % Al_2O_3 , 0,17 % Fe_2O_3 , 0,68 % MgO , 98,57 % CaCO_3 ; y la de la Fluorita: 2,24 % SiO_2 , 0,43 % Al_2O_3 , 0,10 % MgO , 0,22 % CaO , 96,10 CaF_2).

Sobre el comportamiento termodinámico de este sistema binario particular hay criterios muy divergentes, en lo que respecta a la temperatura de líquidos ^[1]. De cualquier modo el alto contenido de CaF_2 sin dudas favorece la disminución de la temperatura de fusión y por tanto, parece bastante lógico considerar la curva obtenida por Eitel hacia la derecha de la eutéctica^[1]. A la mezcla mineral de caliza y fluorita se le añade grafito en una proporción de un 10 % de la masa de los 2 anteriores (caliza y fluorita), buscando en ello favorecer los procesos de desoxidación en el baño de soldadura y consecuentemente la transferencia de Mn y Cr, así como para facilitar un mayor aporte de carbono al depósito y con el propósito de mejorar la estabilidad del arco.

Para la preparación de la mezcla para el revestimiento los componentes citados fueron llevados a una granulometría $\leq 0,1$ mm y mezclados en un tambor rotatorio, con 30° de ángulo de inclinación. Los materiales fueron adicionados al mezclador en orden ascendente de sus densidades (grafito-caliza-fluorita) para lograr la homogenización a partir de un flujo a contracorriente de los materiales más ligeros, con una permanencia en el mezclador de 40 min.

Para la aglomeración de la mezcla se adicionó un 40 % de silicato de sodio a la masa seca homogenizada y se mezcló hasta obtener una pasta totalmente homogénea. Luego de ello se aplicó el revestimiento a los electrodos mediante el método de inmersión, para seguidamente secarlos al aire y calcinarlos en estufa a una temperatura de 160 °C.

La adición del silicato de sodio (29,39 % SiO_2 ; 10,10 % Na_2O ; 60,51 % H_2O), aporta SiO_2 y Na_2O al sistema de óxidos de la escoria a obtener, transformando inevitablemente el sistema binario de óxidos arriba valorado y siendo más lógica la consideración del sistema como ternario ^[1]. De cualquier modo la adición de silicato no provoca alteraciones sustancialmente significativas al sistema, siendo la composición final de la escoria a obtener con el revestimiento representada por los siguientes óxidos mayoritarios: 48,05 % CaF_2 , 27,6 % CaO , 14,55 % SiO_2 y 4,70 % Na_2O (para el sistema ternario de óxidos mayoritarios se cumple la relación $\text{CaF}_2:\text{CaO}:\text{SiO}_2=53,27:30,60:16,13$ %). Esta composición ubica a la escoria a obtener con el revestimiento del electrodo en una zona aledaña a la base del sistema ternario $\text{CaF}_2\text{-CaO-SiO}_2$ con temperatura próxima a los 1350 °C. La presencia de Na_2O ejerce su mayor influencia sobre la estabilidad del

arco por el bajo potencial de ionización que presenta el sodio, evidentemente los procesos de oxidación que tienen lugar en el baño de soldadura aportan al sistema de escoria ciertas cantidades de óxidos, pero ello no representaría en este caso una alteración sustancial del sistema.

Fabricación del electrodo tubular revestido

Para la obtención del electrodo tubular de 4 mm se siguieron experiencias precedentes realizadas en el Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS) de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, para otros sistemas aleantes [3, 7, 8].

La carga aleante obtenida fue llevada a granulometría menor de 0,25 mm en un molino de disco. Fueron obtenidas dos series de electrodos: Con granulometría de la carga aleante en el núcleo entre 0,1 mm y 0,25 mm (electrodo tubular CIS (0,1-0,25 mm)) y con tamaño de grano en el núcleo $\leq 0,1$ mm (electrodo tubular CIS (menor 0,1 mm)) que en esencia solo podría modificar el comportamiento operacional, perceptible en un estudio riguroso en tal sentido. El electrodo fue fabricado por conformado y trefilado, con sistema de cierre a tope, en una máquina para tales propósitos, existente en el Centro de Investigaciones de Soldadura. Fue empleada una cinta de acero al carbono AISI / SAE 1008 de 0,5 x 15mm (C- 0,085 %; Si- 0,27 %; Mn- 0,55 %; P- 0,035 %; S- 0,04%; Cr- 0,1%).

Una vez obtenido el alambre tubular en forma de bobina, este fue cortado a tamaño de 350 mm de longitud, con vistas a su enderezado y posterior aplicación de un revestimiento, para su empleo en el recargue por soldadura manual, siguiendo de igual modo experiencias precedentes en este sentido [3, 7, 8].

Con el electrodo fabricado para la variante CIS (0,1- 0,25 mm) fue obtenido un depósito de soldadura sobre una chapa de acero al carbono con múltiples pasadas, según la Norma SFA 5.13 [9], a fin de evitar el efecto de la dilución. Para ello fue empleado un régimen de soldadura de 100 A y un voltaje de 30 V. Al depósito obtenido le fue determinada la composición química (tabla 2).

Tabla 2. Composición química media del depósito obtenido con el electrodo tubular.

C	Cr	Mn	Si	P	S
3,27	12,34	4,09	2,78	0,018	0,009

Análisis de resultados

La microestructura y el comportamiento tribológico del depósito serán objeto de estudios rigurosos posteriores, ya que ello contribuye a explicar los mecanismos y fenómenos que operan en las condiciones concretas de aplicación, dando inclusive criterios para la optimización de las relaciones de los elementos del sistema aleante. No obstante, para los objetivos de este trabajo baste recordar que la Norma AWS 5.13 [9] sólo establece como criterio de evaluación para la clasificación de estos tipos de consumibles de recubrimiento duro el análisis químico de los elementos principales de aleación.

Sobre la base de la composición química del depósito se pueden hacer las primeras consideraciones acerca de su composición física. En la figura 1 se muestra un corte del diagrama de equilibrio de fases Fe-Cr-C

para 900 °C, en el cual se hace evidente la posible formación de carburos de Cr, dado por la relación Cr/C del depósito obtenido. De la tabla 2, si se considera el resto Fe en el depósito, la suma de Cr, C y Fe representaría un 93,10 %, que llevado a la consideración del sistema ternario de este sistema aleante y expresado en fracción molar sería: 0,13: 0,12: 0,75=C: Cr: Fe (ver tabla 3). La localización de este punto en el diagrama de la figura 1, no es posible por el alto contenido de carbono que se sale del máximo de la escala, no obstante es evidente la posible presencia de carburos de cromo y de solución sólida γ (austenita), para tal relación de composición. Es pertinente recordar que, sin dejar de ser válida en su sentido general la valoración, el diagrama no considera la presencia de Mn y Si, los cuales están en contenidos significativos en el depósito.

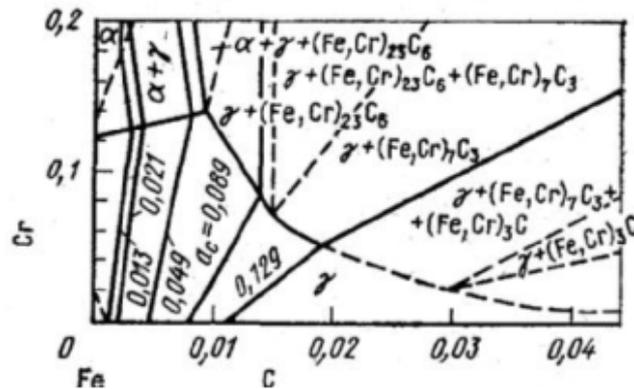


Figura 1. Corte del diagrama Fe-Cr-C a 900 °C (composición expresada en fracción molar). [6].

Tabla 3. Composición del depósito expresado en fracciones molares y atómicas

Elemento	C	Cr	Mn	Si	P	S	Fe
Fracc. Molar	0,1318	0,1147	0,0360	0,0480	0,0003	0,0001	0,6691

De otro lado podría hacerse la valoración del comportamiento independiente del manganeso en la composición física. En este caso y por analogía a lo realizado para el caso del sistema Fe-Cr-C se consideraría sólo el sistema ternario Fe-Mn-C que indudablemente adolece de más aproximaciones que el caso anterior, ya que la cantidad absoluta de Cr es 3 veces superior a la del Mn. En tal sentido, el efecto del Cr y el C serían quienes gobiernen las transformaciones de fase, lógicamente influenciada por el efecto del Mn y Si.

Otra valoración complementaria posible puede ser realizada sobre la base del diagrama ternario del sistema Fe-Cr-Mn, el cual lógicamente adolece aún de más imprecisiones que los anteriores por la ausencia del carbono.

Finalmente, si llevamos la composición porcentual de la tabla 2 al sistema cuaternario Fe-Cr-Mn-C (habiendo considerado el resto en la composición como Fe), estos representan el 97,19 % del total del depósito y se caracterizan por una relación: Fe:Cr:Mn:C=77,49:12,70:4,21:3,36 %. Todas las valoraciones anteriores sobre los sistemas ternarios independientes convergen con la ubicación de la composición del sistema en el diagrama cuaternario (ver figura 2), pues si localizamos el punto de composición con las

coordenadas encima señaladas en el sistema, estaremos en la región trifásica ferrita (α) + austenita (γ) + carburos (K).

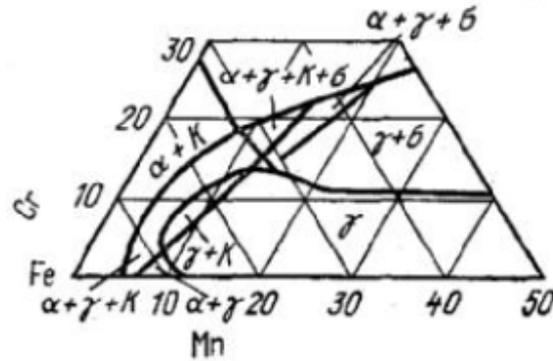


Figura 2. Corte del diagrama de estado cuaternario Fe-Cr-Mn-C para 650 °C (composición expresada en % masa, K -carburos). [6]

Es pertinente que se señale que todos los diagramas utilizados fueron obtenidos en condiciones de equilibrio, algo difícilmente alcanzable en las condiciones de un proceso de deposición por soldadura por las propias condiciones de historia térmica a que es sometido el depósito. Por otra parte, se ha dejado de considerar el contenido de silicio presente en el depósito que indudablemente ejerce efecto. De cualquier modo la posible formación de carburos de cromo, aleados con otros elementos formadores de carburos que se encuentran dentro del sistema aleante (manganeso y silicio), es un hecho prácticamente incuestionable y constituye un indicio de las cualidades del depósito en cuanto a su comportamiento adecuado en condiciones de desgaste abrasivo, caracterizado probablemente por valores de dureza en el entorno de 60 HRc. El planteamiento anterior se basa en las diferentes composiciones químicas que se recomiendan para enfrentar estas condiciones de trabajo, por ejemplo, la norma AWS A 5.13 establece 26 tipos de consumibles base hierro para SMAW. [9] De ellos 22 brindan buenas propiedades de resistencia al desgaste abrasivo, en su clasificación general, siendo los principales elementos del sistema aleante el carbono (1.5%-6.5%), el cromo (7.5%-40%), el manganeso (0.5%-6%), el silicio (0.5%-2.5%), el molibdeno (0-7%) y en dos casos se introduce el níquel (4%) y el titanio (1.8 %) por separado.

CONCLUSIONES

- El electrodo obtenido permite obtener depósitos que están representados por un 3,27 % C; 12,34 % Cr; 4,09 % Mn y 2,78 % Si. Esta composición posibilita predecir la formación de carburos, siendo en este caso predominantes los carburos de Cr por su concurrencia frente al Mn como formador de carburo y por su contenido absoluto en el depósito.
- De las características del material depositado se asevera que el metal es apropiado para el recargue superficial de piezas que trabajan en condiciones de desgaste abrasivo del sector azucarero.

BIBLIOGRAFIA

- [1] COMITTE FOR FUNDAMENTAL METALLURGY. Slag atlas, Edited by the verein Deutscher Eisenhüttenleute: Printed in Germany, 1981, 282 p.
- [2] CRUZ, A., Obtención de un fundente aglomerado aleado y un electrodo tubular revestido con el empleo de FeCrMn y escoria de la reducción carbotérmica de minerales, Congreso da Sociedade Brasileira de Soldagem, Belo Horizonte, Oct. 2006.
- [3] MORALES, R. F. et al., Fabricación de ferroaleaciones del tipo FeCrV a partir de residuales catalíticos para ser utilizados en cargas aleantes de soldadura. Disertación de Tesis Doctoral: Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa 2006, 152 p.
- [4] Ochoa Casal, Robell Raúl. Aspectos teóricos sobre el desgaste abrasivo en los elementos de trabajo de las maquinas agrícolas en Cuba. Obtenido en internet en el sitio http://www.monografias.com/Agricultura_y_Ganaderia/more8.shtml, el 30 de Septiembre de 2006
- [5] RIVAS, J.S. Tribological aspects for the shafts and bearings of sugar cane mills. Wear 261 (2006) 779–784. Obtenido en Internet en el sitio www.sciencedirect.com, el 28 February 2006.
- [6] PETROV, L. A. Manual de diagramas de estado, Editorial Metalurgia, Moscú, 1986, 646 pag.
- [7] RIVERA, B. V. Electrodo Tubular Revestido para la Soldadura de reacondicionamiento de piezas de hierro fundido gris. Disertación de Tesis Doctoral: UCLV, Santa Clara, 2003.
- [8] RODRÍGUEZ, P. M., Electrodo tubular revestidos para el Relleno Superficial de Centralizadores, Estabilizadores y Piezas Sometidas a Condiciones de Desgaste Similares. Disertación de Tesis Doctoral: UCLV, Santa Clara, 1992.
- [9] SFA 5.13- 2001, Parte C, Section II (AWS A5.13-2000), Specification for Surfacing Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, 2000, 305- 126 pp.