Título: Consideraciones sobre Soldadura Manual con Electrodo Revestido

Autor: Ing, Prof, M.Sc. Alejandro García Rodríguez.

Resumen:

El presente trabajo tiene como objetivo fundamental, promover reflexiones que conduzcan a valorar la importancia del proceso SMAW (Shielded Metal Arc Welding), identificando algunas relaciones entre, sus principales características y normas de producción, la fundamentación físico-química de su fenomenología y los principales aspectos que constituyen retos para los investigadores interesados de desarrollar la magia de la Soldadura Manual con Electrodo Revestido.

Palabras clave: Soldadura, Electrodo Revestido, SMAW.

INDICE

Introducción 1
1. Soldadura por arco con Electrodo Revestido..... 3
1.1 Selección de uno entre varios electrodos homólogos 4
2. Características generales del Proceso SMAW 5
2.1 Origen del arco..... 7
2.2 Función eléctrica del revestimiento 9
Conclusiones 10
Referencias Bibliográficas..... 11

Introducción

Cuando el sueco Oscar Kjellberg[1], en 1904, entregaba en una oficina de patentes, una nota escrita donde describía su invención de la soldadura por arco con electrodo revestido, nunca imaginó que sus esfuerzos serían coronados con un rotundo éxito a nivel mundial. Aún actualmente, después de haber permanecido en la élite de los procesos de soldadura por arco durante más de 100 años, el proceso SMAW, del inglés Shielded Metal Arc Welding, mantiene su vigencia pese a sus relativas desventajas respecto a los procesos automáticos de soldadura por arco.

A partir de 1980, se produjo una explosión en la automatización de la tecnología industrial que parecía desbancar, con el amplio desarrollo alcanzado por el equipamiento automático, a los procesos de soldadura manuales y semiautomáticos. No obstante, el proceso de soldadura por arco más común, SMAW, veintiocho años después, se ha mantenido insustituible en diversas aplicaciones en la industria de los denominados países desarrollados.

[1] Inventor de la soldadura con electrodo revestido, patentada en su país natal, en 1904. Instituyó el 12 de Septiembre de 1904, la empresa especializada en soldadura ESAB.

A partir de 1990, fue común en la literatura sobre soldadura [1-3], encontrar estudios sobre la soldadura con electrodos revestidos, así como de estudios de estabilidad del arco eléctrico de soldadura, asistidos por equipos digitalizadores del voltaje y la corriente de soldadura, que permiten registrar el desempeño del proceso y el procesamiento digital de la señal. Otros estudios [20-22], se enfocan hacia el desarrollo de sistemas y métodos para el control en tiempo real del equipamiento automático.

Dadas las condiciones geopolíticas y económicas del mundo contemporáneo, la descomunalmente desigual distribución de las producciones y los mercados basados en estos procesos automáticos, se concentró fundamentalmente durante las últimas tres décadas en los países más desarrollados del mundo. Las subsecuentes desigualdades en el desarrollo de las naciones hizo que, en la mayoría de los países pobres, se mantuviera aproximadamente constante el porcentaje de metal depositado por soldadura mediante el proceso SMAW, respecto a otros procesos, entre otras ventajas, por ser un equipamiento más barato, de gran versatilidad, con abundante de mano de obra calificada, bajos costos relativos de los consumibles y amplia gama de consumibles disponibles en el mercado. Consecuentemente, el escaso nivel alcanzado en el desarrollo industrial de la mayoría de los países subdesarrollados, no permite el empleo masivo de tecnologías de soldadura automática.

Más de 1500 fabricantes a nivel mundial, en unos 50 países, producen un amplio espectro de tipos de electrodos para la soldadura de aceros inoxidables u ordinarios, aluminio y metales no ferrosos [23].

La soldadura con electrodos revestidos, ha sido abordada desde el punto vista de la influencia de los materiales del revestimiento en las características operativas y económicas de los electrodos para soldar, producidos a partir de determinadas mezclas de minerales [4, 8-10].

Para el diseño y la puesta a punto de electrodos revestidos en Cuba, a partir de minerales y residuos industriales cubanos, se necesita un sistema y método capaz de evaluar su desempeño operativo, en relación a sus características metalúrgicas y económicas.

Según las normas de clasificación, la caracterización de electrodos para proceso SMAW se hace teniendo en cuenta, fundamentalmente, determinados rangos de composición química y propiedades mecánicas del metal depositado, por lo que dos electrodos que, bajo determinado régimen de trabajo, aporten metal con una composición química y propiedades mecánicas del depósito en rangos establecidos, pueden ser considerados electrodos homólogos en una clasificación. Debido a las diferencias operativas reportadas entre electrodos de la misma clasificación y diferentes fabricantes, la selección de uno entre varios electrodos homólogos resulta un proceso necesario que se efectúa sin procedimientos estandarizados.

El sensado en tiempo real del voltaje y la corriente de arco, permite evaluar el comportamiento de los fenómenos de transferencia de carga eléctrica y de transferencia metálica, los cuales están relacionados a la transferencia energética y de masa a través del arco, lo que define la calidad del producto obtenido por soldadura.

Existen métodos basados en el análisis de la estabilidad del arco producido en soldadura SMAW, que permiten registrar diferencias, durante el desempeño del proceso de soldadura, cuando se utilizan diferentes dosificaciones, naturalezas y orígenes de los materiales del revestimiento del electrodo [17]. Sin embargo,

existen aún divergencias de criterios entre los científicos en la búsqueda de parámetros más robustos de identificación, por lo que aún no existen procedimientos estandarizados para evaluar el desempeño de los electrodos durante la soldadura.

1. Soldadura por arco con Electrodo Revestido

El proceso de soldadura SMAW, por muchos años, ha sido una de las técnicas más comúnmente aplicadas en la fabricación de estructuras de acero. Es también conocido como Soldadura Manual por arco con Electrodo Revestido, del inglés Manual Metal Arc (MMA). En la industria de fabricación del Reino Unido, en inglés United King (UK), se conoce como Stick Welding (Soldadura de Soporte) [24].

Durante los años 80, se produjo un importante decrecimiento en el uso de electrodos revestidos en los países desarrollados. En 1991, en Latinoamérica, al menos el 80 % del metal depositado provenía de este tipo de consumibles de soldadura. Acompañando el notable incremento de la producción de acero en China e India, se observó un marcado incremento en el uso de electrodos manuales. La utilización de electrodos manuales a nivel mundial se estabilizó en un 20-30% del metal depositado a nivel mundial en 1990, dadas sus múltiples ventajas: Simplicidad, durabilidad y bajo costo del equipamiento requerido; posibilidad de ser usado en espacios abiertos y cerrados; amplio rango de consumibles para la mayoría de las aplicaciones; disponibilidad en pequeñas unidades y a relativamente bajo costo, generalmente se acepta que los consumibles representan entre el 1 - 2% del costo de la fabricación final; posibilidad de encontrar soldadores con adecuada destreza para la mayoría de las aplicaciones fácilmente [2].

En esta etapa, gracias al auge de la tecnología electrónica y la informática, se produjo un fuerte movimiento hacia la automatización de todo tipo de procesos tecnológicos, especialmente a los procesos automáticos de soldadura: Soldadura por Arco con Alambre y Protección Gaseosa, del inglés Gas Metal Arc Welding (GMAW); Soldadura con Arco Sumergido, del inglés Submerged Arc Welding (SAW); Soldadura por arco con Electrodo de Tungsteno y Protección Gaseosa, del inglés Gas Tungsten Arc Welding (GTAW); entre otros. También se desarrollaron métodos para incrementar la tasa de deposición de metal, utilizando uno o varios electrodos aumentando la productividad de la soldadura y la calidad de la unión soldada.

Según el boletín Industria Metalúrgica , coexistían en EUA, en los años 90, dentro de la gama de los procesos de arco eléctrico: Shielded Metal Arc Welding (SMAW), Gas Metal Arc Welding,(GMAW), Flux Cored Arc Welding (FCAW), Submerged Arc Welding (SAW), Electrogas Welding (EGW), Electroslag Welding (ESW); estimando que en 1991, el porcentaje de electrodos consumidos por tipo de proceso fue el siguiente: SMAW, 45%; GMAW, 34%; FCAW, 17%; SAW, 4%.

De la gama de procesos de soldadura, el proceso SMAW es uno de los más ampliamente utilizados. Si bien los fabricantes continúan automatizando los procesos para incrementar la productividad, SMAW se mantiene en gran parte del total de los negocios. Esto es debido a su versatilidad, bajos costos de accesorios y consumibles, simplicidad de la fuente de potencia, bajos costos de

mantenimiento, durabilidad, relativa simplicidad de operación y fácil configuración [9].
El proceso SMAW se usa ampliamente en la construcción, ya sea en aplicaciones estructurales o en reparaciones en aceros inoxidables u ordinarios, y metales no ferrosos. A causa de que el soldador debe detener la soldadura para reemplazar el electrodo, una vez consumido, el proceso SMAW está siendo desplazado hoy día por procesos de alambre continuo en algunas aplicaciones industriales. No obstante, el proceso SMAW está siendo ampliamente utilizado en trabajos de reparación y mantenimiento [25].
El proceso SMAW se utiliza por su versatilidad en una amplia gama de aplicaciones, tanto en taller, como a pié de obra en la soldadura de materiales de espesores superiores a 1,5 mm. Los sectores de mayor aplicación son la construcción naval, de máquinas, estructuras, tanques y esferas de almacenamiento, puentes, recipientes a presión y calderería. La selección de los electrodos tiene una influencia decisiva en la calidad y el costo de la soldadura .
La existencia de la necesidad de concretar producciones y recuperaciones unitarias de piezas complejas y realizar trabajos en lugares inaccesibles para el equipamiento automático, dada la robustez, adaptabilidad y simplicidad del equipamiento unido a sus bajos costos de mantenimiento, junto a otras características tratadas anteriormente, sostienen la amplia diseminación de este proceso a nivel mundial.

1.1 Selección de uno entre varios electrodos homólogos

El proceso de homologación de electrodos se basa en la certificación de las pruebas establecidas por la norma contra la que se desea homologar. La especificación ANSI/AWS A5.1 [4], por ejemplo, clasifica los electrodos revestidos en cuanto a: tipo de corriente, tipo de revestimiento, posiciones de soldadura, propiedades mecánicas y químicas del metal recién soldado y envejecido.
La clasificación E6013 de la especificación ANSI /AWS A5.1, define un electrodo revestido con una mezcla que contiene un alto contenido de titanio[2] y compuestos de potasio. Este electrodo presenta un excelente desempeño operativo, puede usarse para soldar tanto en corriente alterna, como en corriente directa de polaridad normal e invertida, en todas las posiciones de soldadura. En los últimos años, han sido publicados varios trabajos dirigidos al establecimiento de relaciones entre la composición química, la microestructura y las propiedades mecánicas del metal depositado, y su influencia en el comportamiento operacional de los electrodos E6013 [2].
El conocimiento sobre electrodos rutílicos se hace más importante cada día debido a la posibilidad de: usarlos en la soldadura subacuática mojada; generar conocimiento del sistema de escoria de rutilo posibilitando el empleo de materiales menos costosos en la fabricación de electrodos tubulares rutílicos “rutile flux wire” para todas las posiciones de soldadura y obtener formulaciones capaces de satisfacer los requerimientos de Grado 3 de las Sociedades de

[2] Óxido de titanio (T_iO_2). También conocido como rutilo.

Clasificación Unificada, del inglés Unified Classification Societies (ABS,BV[3][26], DnV[27][4]) para la industria naval. Por estas razones, en Latinoamérica, se ha inició un programa conjunto de investigación sobre el electrodo revestido AWS A5.1-91 de tipo E6013 [2].
Las características económicas de los electrodos son evaluadas en Cuba según la Norma Internacional ISO 2401-72 [28]. Entre los parámetros de consumo de los electrodos ordinarios se contemplan: coeficiente de fusión, coeficiente de depósito, productividad del proceso, coeficiente de pérdidas, eficiencia de depósito respecto al núcleo del electrodo, eficiencia del depósito sin considerar las pérdidas por colillas, eficiencia total del electrodo.
Si bien se brinda especial importancia en estas normas a las tasas de fusión y de deposición como principales parámetros, no se contemplan los consumos efectivos de potencia eléctrica, ni la facilidad de encendido y reencendido del arco, la facilidad desprendimiento de la escoria, aspectos que modifican la operatividad del electrodo influenciando los costos de las producciones. Por otra parte, no tienen en cuenta las facilidades de encendido, reencendido y mantenimiento del arco, lo cual tiene estrecha relación con la estabilidad en la transferencia de masa y carga a través del arco y la morfología del cordón.
Durante la prueba de un electrodo revestido en diferentes posiciones de soldadura, la estabilidad del proceso depende ante todo de la destreza del operario para mantener el punto de operación del proceso en rangos admisibles.
El procesamiento de los parámetros eléctricos del arco, fieles testigos del desempeño del proceso de soldadura, ha sido utilizado desde el inicio de la era de la automatización del equipamiento de soldadura.
Ante la existencia de miles de fabricantes diferentes de electrodos en distintas clasificaciones, es de vital importancia ante la amplia afluencia de estos materiales en el mercado mundial, disponer de una vía para diferenciar electrodos homólogos y escoger el que menor relación costo/beneficio presente en relación con determinada aplicación.
El proceso de selección de uno entre varios electrodos homólogos, abordando las características operativas instantáneas del proceso, no constituye aún un procedimiento estandarizado universalmente. En 1993, Farias [17], propone un método no convencional de evaluación operativa de electrodos revestidos, basado en el procesamiento digital y estadístico de la señales de voltaje y corriente del arco eléctrico de soldadura. Si bien no permite establecer relaciones exactas con los parámetros de las características económicas estandarizados por normas internacionales, si establece una cierta medida descriptiva de la estabilidad del proceso.

2. Características generales del Proceso SMAW

El proceso SMAW se inicia mientras, en presencia de una diferencia de voltaje entre la punta metálica del electrodo y la pieza de trabajo, es cortocircuitada el alma metálica[5] del electrodo revestido con la pieza a soldar; produciéndose al

[3] Bureau Veritas Group. Grupo fundado en Antwerp. Bélgica en 1828. Brinda servicios de certificación de producciones para la industria naval
[4] Det Norske Veritas. Sociedad de clasificación líder en el mundo. Fundada en Oslo 1864.
[5] Varilla metálica que constituye el núcleo del electrodo revestido. Su composición química varía acorde al tipo de metal base que se quiere soldar.

paso de la corriente el calentamiento por efecto Joule[6] del metal de la punta del electrodo y sus óxidos, que permite la emisión electrónica y la aparición de un flujo de electrones. Producto de las altas temperaturas alcanzadas durante este proceso, las sustancias componentes del revestimiento son descompuestas en gases, que junto a los vapores del metal del alma pueden ionizarse para establecer un plasma térmico, que produce suficiente energía como para unir metales por fusión. El material fundido de la punta del electrodo aporta gotas, que atraviesan el arco hasta ingresar al baño fundido, que una vez solidificado bajo la capa de escoria, constituirá el cordón de soldadura. La atmósfera gaseosa que protege el arco evita la oxidación y la nitruración a altas temperaturas del metal depositado y la capa de escoria protege al metal fundido y contribuye a desulfurar y desfosforar el mismo, lo cuál eleva las propiedades mecánicas del depósito. Durante el proceso se producen pérdidas metálicas por salpicadura, que atentan contra la economía del proceso. Despidiéndose además gases y radiaciones perjudiciales para la salud [12] (Figura 1).

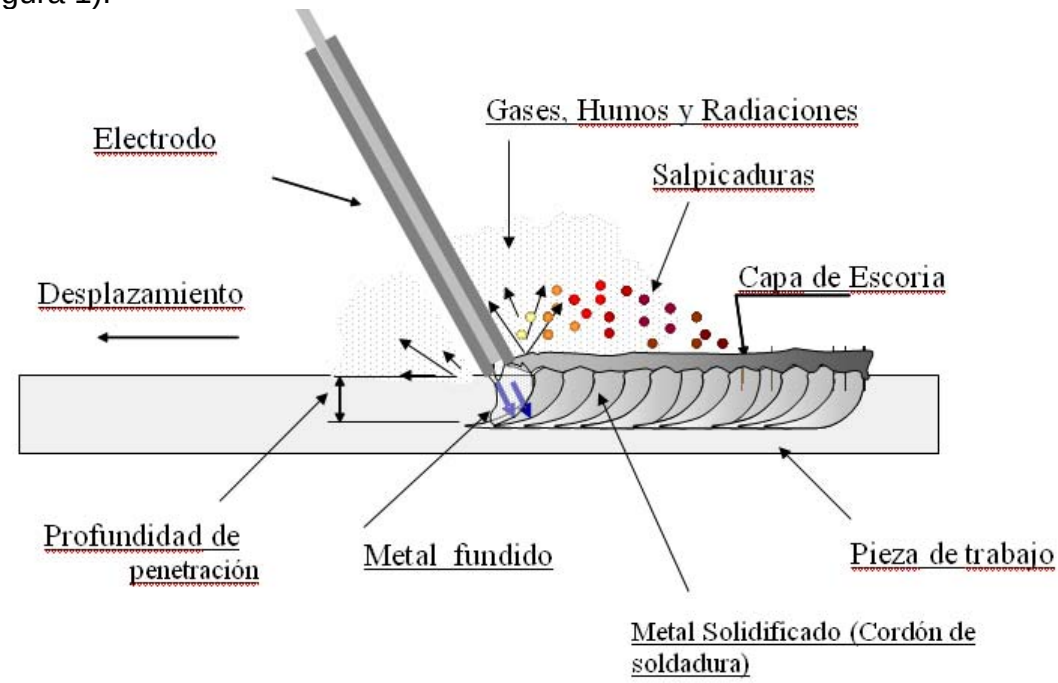

Figura 1: Representación esquemática del proceso SMAW durante su ejecución

El proceso puede efectuarse utilizando fuentes de corriente directa y alterna. La estabilidad del arco es más crítica en la soldadura con corriente alterna debido a la inversión de la polaridad a razón de ciento veinte veces por segundo, lo que provoca extinciones y reencendidos sucesivos del arco. La fuente debe tener una característica descendente, donde el voltaje cae mientras se incrementa la corriente de soldadura y viceversa, lo que produce la autorregulación del punto de operación cuando se suelda manualmente [29].

[6] Elevación de la temperatura debido a la transformación de la energía cinética de los electrones en calor producto de su interacción con las moléculas del conductor por el que circulan. Efecto descubierto por el físico británico James Prescott Joule en 1860.

Durante el proceso de fusión del electrodo, el metal se funde a una temperatura inferior a la del revestimiento, aproximadamente a 1535 grados Celsius para el acero. El revestimiento presenta una temperatura de fusión superior a la del alma metálica, debido a su contenido de materiales refractarios, fundiéndose con cierto retrazo debido a la distribución de las isotermas alrededor del arco. Esta diferencia origina la presencia de la llamada “copa” del electrodo (Figura 2).

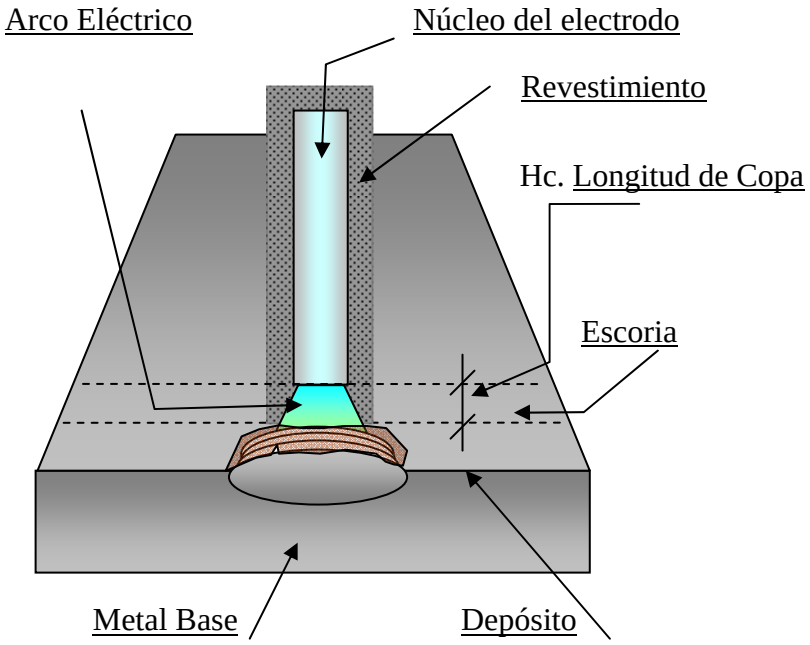

Figura 2: Representación esquemática del proceso SMAW cuando se apoya el revestimiento del electrodo en la pieza de trabajo.

Durante la soldadura manual es posible apoyar el electrodo sin ejercer demasiada presión sobre el borde del revestimiento, manteniendo constante el ángulo de incidencia del electrodo respecto a la pieza de trabajo y la longitud del arco de soldadura. También es posible soldar sin apoyar el electrodo con una longitud de arco mayor.
Ayudado por el mencionado proceso de autorregulación proporcionado por la característica de la fuente, el operador debe mantener proporcionalmente la velocidad de alimentación del electrodo respecto a la velocidad de fusión del mismo, así como una velocidad de soldadura constante para lograr una adecuada apariencia del cordón . La soldadura manual requiere diferentes grados de destreza del operador para distintas posiciones de soldadura, las posiciones vertical y sobre-cabeza, son las más exigentes.

2.1 Origen del arco

Hasta el momento en la soldadura han sido identificados tres tipos fundamentales de cátodo: el cátodo de descarga luminosa (Glow Cathode), el cátodo termoiónico (Thermionic Cathode), y el cátodo no-temoiónico (non-thermionic cathode) [29]. En la mancha catódica del cátodo no-termoiónico, la

temperatura es demasiado baja para la emisión termoiónica de los electrones. La soldadura con electrodos consumibles, introduce variaciones de temperatura en el cátodo producto de que el mismo es fundido y transferido a través del arco, invirtiéndose gran cantidad de energía en este proceso.
Lo esencial para cualquier teoría de cátodo frío (procesos con electrodo consumible) es identificar el mecanismo de conducción a través de la región de caída del cátodo.
La emisión de electrones desde una superficie puede ocurrir debido a la aplicación de un campo eléctrico externo [30], la densidad de corriente (Je) depende de la intensidad de campo (E), la función de trabajo de la superficie metálica y la Energía de Fermi[7] para el material del cátodo. Ha sido demostrado [29] que aún cuando la función de trabajo de la superficie metálica (trabajo de extracción de los electrones) cae por debajo de su rango normal de 3,5 a 4,5 eV debido a la influencia de las capas de óxido, digamos a valores de 2 eV, la emisión de campo solo puede ocurrir para densidades de corriente (J) mayores que 10^{11}A.m^{-2}. Los mecanismos que pudieran aumentar la corriente de campo pueden ser la rugosidad superficial, películas de óxido, inclusiones de impurezas no metálicas micrométricas, capas superficiales de iones positivos, elevadas temperaturas y variaciones de la fuerza del campo con el tiempo. Existen abundantes evidencias sobre la importancia de las capas de óxido del cátodo en ciertos arcos, incluyendo algunos usados en soldadura [31]. Finas capas aislantes de óxido en la superficie del cátodo pueden cargarse por la incidencia de iones positivos. Para películas de óxido de espesores menores de 5 x 10^{-9}m, el campo eléctrico a través de ella debe excederse sobre 2 x 10^{9} V.m^{-1} para la emisión de electrones por Efecto Túnel[8]. Si la película de óxido tiene un espesor menor que 10^{-8}m y es cargada por iones positivos de la caída del cátodo ante el campo eléctrico, se producen canales intermitentes eléctricamente conductivos. La emisión de electrones puede ocurrir por diferentes mecanismos. Se ha sugerido [32], que el campo eléctrico en la fase gaseosa del cátodo pudiera solo necesitar 10^{5} V.m^{-1} para desencadenar la emisión.
El uso de revestimientos no metálicos, que produce finas capas superficiales de óxido de materiales semiconductores a altas temperaturas, posibilita la soldadura con electrodo negativo y en corriente alterna (AC); el metal se transfiere en un mismo sentido (del electrodo a la pieza). Esto se debe fundamentalmente a que esas capas dan continuamente nuevos sitios de emisión cercanos a la punta del electrodo.

---

[7] Energía del nivel más alto ocupado por un sistema cuántico a temperatura cero. Cuando un sistema posee varios electrones, estos ocuparán niveles de energía mayores a medida que los niveles inferiores se van llenando.

[8] Efecto mecanocuántico que consiste en que una partícula pueda atravesar una barrera de potencial sin tener energía suficiente para rebasarla.

2.2 Función eléctrica del revestimiento

La composición, el origen, la dosificación y el tratamiento de las sustancias utilizadas en la fabricación del revestimiento de los electrodos, desempeña una función fundamental en la soldadura SMAW.
Para el revestimiento se suelen utilizar hasta cuarenta minerales y sustancias distintas, como arena de zirconio, rutilo, celulosa, caolín, mármol, polvo de hierro, FeSi, FeTi, FeMn, etc. La composición de los revestimientos suele ser muy compleja, generalmente se emplea una mezcla de sustancias orgánicas y minerales. En la fabricación de la pasta para el revestimiento, suelen intervenir óxidos naturales: óxidos de hierro, ilminita (50 por ciento óxido férrico y 50 por ciento óxido de titanio), sílice (óxido de silicio); silicatos naturales (caolín, talco, mica, feldespato, etc.), productos volátiles (celulosa, serrín, etc.), fundentes (fluorita), concentrados (carbonatos, óxidos (óxido de titanio)), ferroaleaciones (FeMn, FeSi, FeTi), aglomerantes (silicato sódico, silicato potásico) [1].
Las características de las sustancias del revestimiento posibilitan la ocurrencia de distintos fenómenos de naturaleza eléctrica, física y metalúrgica. La función eléctrica del revestimiento permite el encendido, reencendido y mantenimiento del arco, primeramente al disminuir el trabajo de extracción de los electrones al metal del electrodo, y luego, al aportar sustancias que se descomponen en gases de bajo potencial de ionización y, a la vez, no fácilmente disociables, pues la disociación es un proceso endotérmico que tiende a consumir calor y dificultar el encendido y mantenimiento del arco eléctrico .
La estabilidad del arco depende, entre otros factores, del estado de ionización de los gases comprendidos entre el ánodo y el cátodo, así como de la temperatura existente en el espacio interelectródico. Para un arco en corriente alterna es imprescindible un medio fuertemente ionizado. Por este motivo se añaden al revestimiento, entre otras sustancias, compuestos con elementos de bajo potencial de ionización, tales como óxidos y sales de sodio y de potasio .
El arco se apaga en cada semiciclo de la señal requiriendo reencenderse 120 veces por segundo cuando se suelda con corriente alterna (Figura 3).
Durante el tiempo que permanece apagado el arco, la temperatura disminuye proporcionalmente a la cantidad de partículas ionizadas, disminuyendo la conductividad eléctrica del plasma, por lo que la emisión electrónica debe reanudarse a partir del aumento del campo eléctrico, lo que produce un pico de reencendido e inmediatamente se retorna al voltaje de arco nominal cuando se ha alcanzado el potencial de ionización necesario para ionizar las partículas responsables de la conducción de corriente.

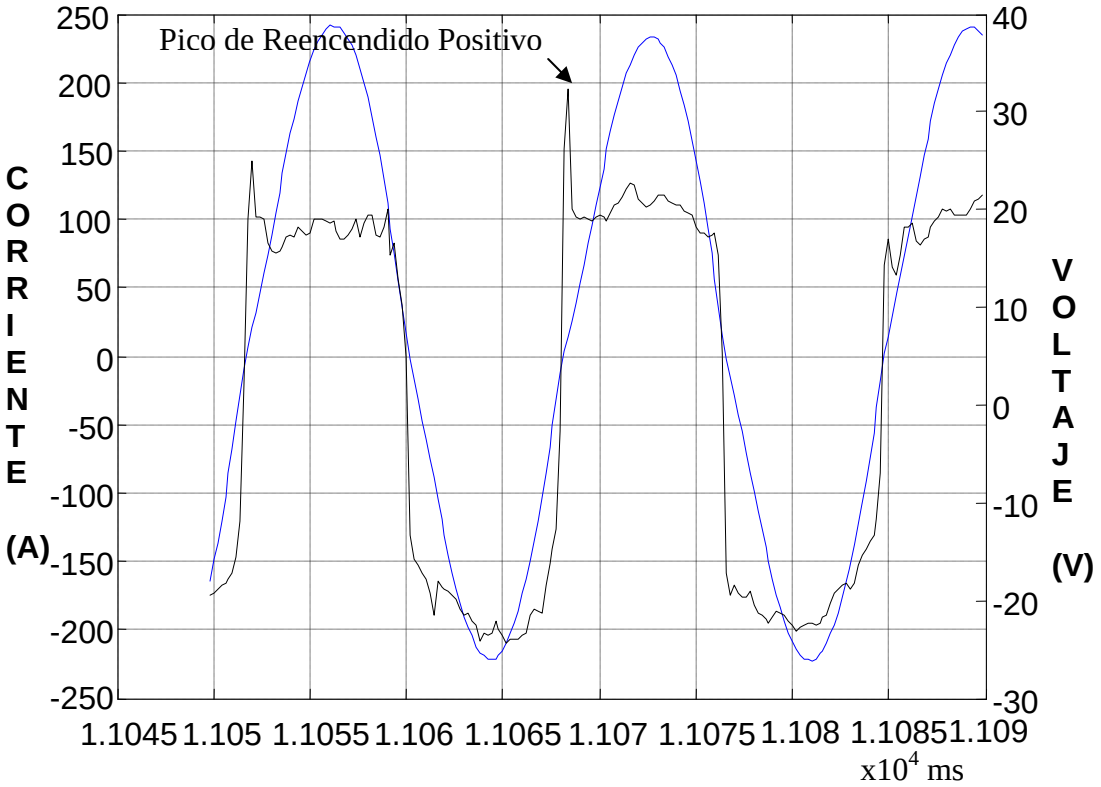

Figura 3: Voltaje y corriente de soldadura sincronizados en tiempo. Tomado de experimentación real (Soldadura AC. Electrodo E6013)

Conclusiones

1. Actualmente el proceso SMAW es el proceso de soldadura más diseminado a nivel mundial y seguirá empleándose por sus numerosas ventajas, resultando necesario el desarrollo de consumibles cada vez más eficientes y efectivos a partir de disímiles tipos de materiales para el desarrollo de nuevas y novedosas aplicaciones del proceso.
2. Las normas de clasificación y caracterización económica, aprobadas internacionalmente, no tienen en cuenta el análisis del desempeño eléctrico del proceso en relación a la morfología del cordón y otros aspectos de carácter metalúrgico, no ofrecen una caracterización operativa completa del desempeño del electrodo revestido.
3. Dada la amplia gama de fabricantes a nivel mundial, electrodos homólogos se están desarrollando utilizando minerales de diferentes naturalezas, composiciones, dosificaciones y tratamiento. De aquí pueden derivarse notables diferencias operativas a tener en cuenta durante los estudios de relación costo-beneficio en el momento de producir o comprar determinado tipo de electrodos.

Referencias Bibliográficas

1. Ramírez, J., Soldadura por Arco Manual con Electrodos Revestidos. 2003, Universidad Central de Venezuela.Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería. p. 15.
2. J.P.Farias, A.S., P.S.de S.Bálsamo,E.Surian, The effect of wollastonite on operational characteristics of AWS E6013 electrodes. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2004. **26**(3): p. 17.
3. Chu, W.-H., Automatización SMAW mediante control Fuzzy para controlador PID con ganancia programada. 2003. p. 108.
4. ANSI/AWS, Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding, Standard 5.1-91, Miami, Fl,. 1991, American National Standards Institute/American Welding Society.
5. 2401-72, T.C.I.T.I., Covered Electrodes. Determination of the Efficiency metal recovery and the deposition coefficient. 1972.
6. Roca, A.S., Nuevo criterio para el análisis de estabilidad del proceso de soldadura GMAW, empleando técnicas de Emisión Acústica e Inteligencia Artificial, in Facultad Ingeniería Mecánica.Departamento de Tecnología de Construcción de Maquinaria. 2006, Universidad de Oriente: Santiago de Cuba. p. 105.
7. Ponomarev, V., Arc Welding Process Statistical Analysis. Methodical Approaches, Analysis Conceptions, Experiences. 1997.
8. N. M. R. DE RISSONE, J.P.F., I. DE SOUZA BOTT, E. S. SURIAN, ANSI/AWS A5.1-91 E6013 Rutile electrodes: The Effect of Calcite. Welding Journal Supplement, 2002: p. 113-S - 124-S.
9. Chu, W.-H., Automatización SMAW mediante control Fuzzy para controlador PID con ganancia programada. 2004. p. 108.
10. B.E.Paton.et.al, Direccionamiento del proceso de soldadura por arco a través de la programación de la alimentación del alambre electrodo. Soldadura Automática, 1977. **#1**: p. 1-5.
11. Glizmanenco.D.L, Soldadura y Corte de los Metales. Segunda ed, ed. E.d.L.E.P.P.T.d.l. URSS. 1962, Moscú. (113) 474.
12. Cary, H.B., Modern Welding Technology third edition. 1996.
13. Weman, K., Welding Processes handbook. 2003, Cambridge: Woodhead Publishing Ltd. 189.
14. Pessoa, E.C.P. Estudo comparativo do Desempenho de Eletrodos Revestidos E6013,E7024 e E7018 em Soldagem Subacuática em Água Doce do ACO A36 Á Profundidades de 50 E 100 Metros. in Congresso Brasileiro do Engenharia do Fabricacao. 2003. Uberlandia. Brasil.
15. C.P.Pessoa, E. Study of Porosity Location in Fresh Water Wet Welds. in 22ND International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2003. Cancun, Mexico.
16. Souza, M.S.e., Validación de un sistema computarizado para el control de la calidad de electrodos revestidos, in Centro de Ciencias Exactas y Tecnología. 1995, Universidad Federal de Uberlandia: Uberlandia.
17. Farias, J.P., Metallic Mg as a coating component in C-Mn-Ni electrode. 1993, Universidad Federal de Santa Catarina, Brazil. p. 225.
18. ACINOX, S., Empresa productora de Aceros Inoxidables. 2008: Habana. Cuba.

19. COMETAL, Empresa de Estructuras Metálicas COMETAL. 2008: Habana.Cuba.
20. Hutchison, R.e.a., Method and apparatus for welding. 2004: United States Patent Application.
21. Hu, S.J.e.a., ONLINE MONITORING SYSTEM AND METHOD FOR A SHORT-CIRCUITING GAS METAL ARC WELDING PROCESS. 2004: United States Patent Application.
22. Dodge, R.e.a., System and method for facilitating welding system diagnostics. 2004: United States Patent Application.
23. ABS, Boletín American Bureau of Shipping (ABS). 2005.
24. Norrish, J., Advanced Welding Processes. New Manufacturing Processes and Materials Series, ed. D.A. John Wod. 1992, Philadelphia, New York: IOP Publishing LTD. 499.
25. Safety, C.C.f.O.H.a., WELDER Health and Safety Guide. 2003.
26. GV, B.V., BV Web Site. 2007.
27. Veritas, D.N., DNV Web Site. 2007.
28. ISO, ISO 2401-72. Organización Internacional para Estandarización. 1972.
29. J.F.Lancaster, The physics of welding. Second Edition. 1986. 340.
30. Fowler, R.H.a.N.L., Electron emission in intense electric fields. Proc. Roy. Soc., 1928 & 1929. **A119, A124**: p. p173, p699.
31. Guile, A.E. Processes at arc cathode roots on non-refractory arc cathodes with relatively thick oxide films. in Arc Physics and Weld Pool Behaviour. 1979. The welding Institute. London.
32. Guile, A.E., Studies of short electric arcs in transverse magnetics fields with application to arc welding. Welding in the world, 1970. **8**(1): p. 36.