



ARTÍCULO TÉCNICO

Lincoln Electric
Mexicana

Abril 18, 2008

R. Arazo

Carretera Agua Fría 1000, Parque
Industrial Hassna II, Bodega 1.
Apodaca, Nuevo León, C.P. 66600,
México
Tel: 01 81 11 56 99 70-74

Un Vistazo a la Física del Arco Eléctrico

ANTECEDENTES

Una de las preguntas más frecuentes en el medio de la soldadura es: ¿Porqué en el proceso GTAW se comporta de manera diferente el efecto de penetración con respecto al resto de procesos de soldadura por arco eléctrico?.

Con este artículo quizás tengamos un panorama que nos ayude a formularnos una respuesta.

SUSTENTO

Los procesos de soldadura por arco eléctrico deben su naturaleza precisamente a este fenómeno, *el arco eléctrico*.

El arco eléctrico como lo refieren la mayoría de las publicaciones, no es mas que una chispa de electricidad sostenida de manera controlada entre dos piezas de algún medio que sirve de conductor "metal y en ocasiones carbón" a las que llamamos electrodos o en términos comunes: electrodo y trabajo.

En el arco eléctrico podemos distinguir básicamente 3 zonas (algunos estudios mas detallados a su vez refieren diferentes regiones en cada zona), la zona del ánodo o parte positiva, el cátodo o parte negativa y la columna de plasma. En corriente alterna igual existen ánodo y cátodo solo que estos cambian constantemente de acuerdo a la frecuencia de la corriente alterna.

La penetración es debida a la concentración del calor en alguna de las zonas: anódica o catódica, en la columna de plasma siempre es aun mas elevada que en ellas y prácticamente constante dependiendo del tipo de arco.



UN VISTAZO A LA FÍSICA DEL ARCO ELÉCTRICO DE SOLDADURA

Sin importar la naturaleza del procedimiento de soldadura empleado, en el arco eléctrico producido siempre hay una constante: ¿Voltaje, corriente eléctrica, flujo de electrones o temperatura?; estas son efectivamente variables muy importantes, sin embargo; en realidad cada una de ellas es un efecto subordinado a algo aún más elemental: *La colisión de partículas*.

El proceso de colisión (Energía cinética " $\frac{1}{2}mv^2$ ") en el arco eléctrico hace posible la conversión de energía eléctrica (Diferencia de potencial eV) en energía térmica y la consecuente transferencia de calor y de metal. Para comprender el proceso de colisiones es necesario hablar un poco del átomo.

En el arco eléctrico están involucradas tres partículas básicas: Electrones, átomos e iones (átomos con carencia o exceso de electrones). Un átomo e incluso un ión, por ejemplo de Argón, pesa 50,000 veces más que un electrón y es unas 5,000 veces más grande de diámetro. Algo similar a comparar Pelotas de playa con bolas de Ping-pong.

Supón que tomas algunos átomos y electrones "Pelotas de Playa y de Ping-pong" además supón dos situaciones: 1) que ambas tienen la propiedad de elasticidad ideal y 2) que la Pelota de playa tiene unos recintos pegajosos donde pueden quedar atoradas las de Ping-pong. Si metes las pelotas de Playa y de Ping-pong en una caja y las agitas moderadamente, las pelotas de Ping-pong atrapadas en los recintos pegajosos de las de Playa no se liberarán, eventualmente todas las pelotas se moverán a la misma velocidad. Algo similar ocurre con los átomos de un gas contenidos en un cilindro.

Si ahora tomas la caja y la agitas violentamente, las pelotas de Ping-pong serán liberadas inicialmente por los impactos entre Pelotas de Playa y aceleradas a altas velocidades teniendo algunos impactos con las pelotas de Playa y entre ellas liberando aún más pelotas de Ping-pong. Ocasionalmente algunas pelotas de Ping-pong quedaran atrapadas en los recintos pegajosos de las de Playa, pero seguramente serán liberadas nuevamente por subsecuentes colisiones.

Los pequeños y ligeros electrones se pueden mover a elevadas velocidades comparados con los pesados átomos e iones. La velocidad de los electrones es cercana a las 3,000 mph en tanto que los iones viajan a 0.50 mph en el arco eléctrico (es decir prácticamente permanecen estáticos), la velocidad de las partículas es un indicativo de la temperatura que producen al chocar. Cuando un electrón se incrusta en un recinto de un ión es emitido un destello lo que da origen al brillo del arco eléctrico.

La pegajosidad de los recintos de las Pelotas de Playa (átomos) varía de gas a gas y este grado de pegajosidad se llama Potencial de Ionización el cual se mide en electrón Volts. A mayor Potencial de Ionización es más difícil establecer arco de soldadura con ese gas y requiere mayor energía para liberar los electrones (ionizarse).

La liberación de electrones durante las colisiones es llamada ionización térmica y la distribución del movimiento entre las partículas es referida como equilibrio térmico.

La energía requerida para ionizar los átomos del gas en el arco eléctrico principalmente proviene del choque entre estos y los electrones emitidos por el cátodo al someterse al elevado calor del arco. Si el gas tiene elevado potencial de ionización o es un gas poli-atómico “mas de un átomo” (ejemplo: O₂ o CO₂) requiere mas energía para ionizarse haciendo que los electrones que choquen con ellos sean frenados de forma un poco mas sensible que si el gas tiene bajo potencial de ionización y su impacto final con el otro electrodo (ánodo) será de menor nivel de energía.

De manera similar, si el cátodo o emisor de electrones tiene mas poder de emisión (Función de Trabajo) el nivel de energía que llegue al otro electrodo (ánodo) será mayor.

El poder de emisión del cátodo depende del tipo de material que lo forma y tiene un valor constante para cada uno. Como regla general, los materiales con mejor conductividad tienen mas bajo poder Termoiónico o Función de Trabajo la cual se mide en electrón Volts.

Tabla 1. Primer y segundo Potencial de Ionización de algunos elementos Fuente: introducción a la Física del arco eléctrico. Paulo J. Modenesi		
Elemento	Vi (eV)	Vii (eV)
Aluminio	5.98	18.82
Argón	15.75	27.62
Calcio	6.11	11.87
Carbono	11.26	24.38
Cesio	3.89	25.10
Fierro	7.90	16.18
Helio	24.58	54.40
Hidrógeno	13.60	
Nitrógeno	14.54	29.61
Oxígeno	13.61	35.15
Potasio	4.34	31.81
Sodio	5.14	47.29
Titanio	6.83	13.63
Tungsteno	7.94	

Los metales refractarios como el tungsteno pueden ser cátodo termoiónico (al calentarse se vuelven emisores muy buenos de electrones), pero los metales con bajo del punto de ebullición tal como Fe, Al y los buenos conductores, no pueden ser cátodo termoiónico.

En el caso de materiales no-termoiónicos, el mecanismo de la emisión de electrones se debe considerar sin la emisión termoiónica.

Tabla 2. Función Termoiónica o de Trabajo de algunos elementos Fuente: introducción a la Física del arco eléctrico. Paulo J. Modenesi	
Elemento	ϕ (eV)
Aluminio	3.8-4.3
Cerio	1.7-2.6
Cesio	1.0-1.6
Cobalto	3.9-4.7
Cobre	3.1-3.7
Fierro	3.5-4.0
Oro	4.2-4.7
Magnesio	3.1-3.7
Molibdeno	4.0-4.8
Níquel	2.9-3.5
Platino	4.9-5.7
Titanio	3.8-4.5
Tungsteno	4.1-4.4
Zirconio	3.9-4.2

Tabla 3. Características de Cátodos Termoiónicos y no Termoiónicos Fuente: introducción a la Física del arco eléctrico. Paulo J. Modenesi	
Cátodo Termoiónico	Cátodo no-Termoiónico
Opera a alta temperatura, en general superiores a 3,500°K	Opera en un amplio intervalo de temperaturas, en general menores a 3,500°K
Densidades de Corriente Menores $10^6 - 10^8 A/m^2$	Densidad de Corriente Elevada $> 10^{11} A/m^2$
Punto catódico único, fijo o se mueve lentamente	Múltiples puntos catódicos que se mueven rápidamente
No existen evidencias de exceso de presión en la zona catódica	Presión por arriba de la atmosférica en la zona catódica
Vc (aprox. 5 V)	Vc (1 - 20 V)

En la vecindad de los electrodos el gas no se encuentra a tan alta temperatura como en la columna de plasma debido al efecto refrigerante de estos por lo cual no se establece la ionización ni se satisface la ley de la neutralidad de la carga. Esto genera un exceso de cargas positivas adyacentes al ánodo y negativas al cátodo, lo que provoca las caídas anódica V_a y catódica V_c , la energía total esta dada por:

$$V = V_o + V_a + V_c$$

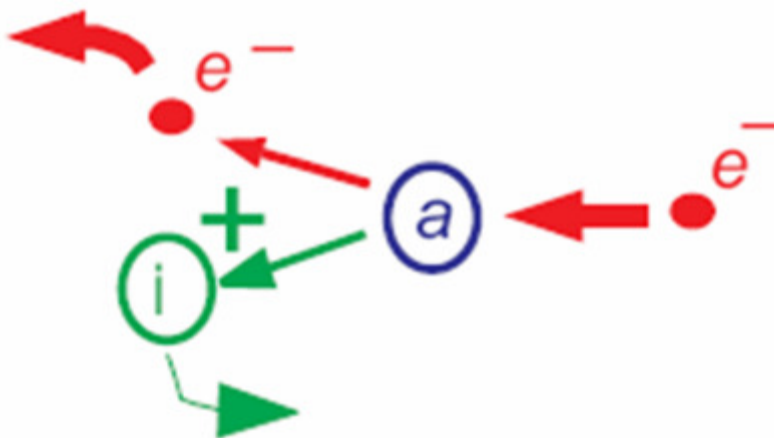
V representa el voltaje en los bornes de la fuente de poder y es la suma del voltaje anódico V_a , voltaje catódico V_c y el voltaje de la columna de plasma V_o .

El voltaje de la columna de plasma depende fuertemente del campo magnético generado por el paso de la corriente eléctrica a través del electrodo, el campo magnético a su vez esta influenciado por el potencial de ionización del gas.

Tanto el Voltaje Anódico como el catódico principalmente dependen de la Función de Trabajo del electrodo es decir de su capacidad de emitir electrones al calentarse.

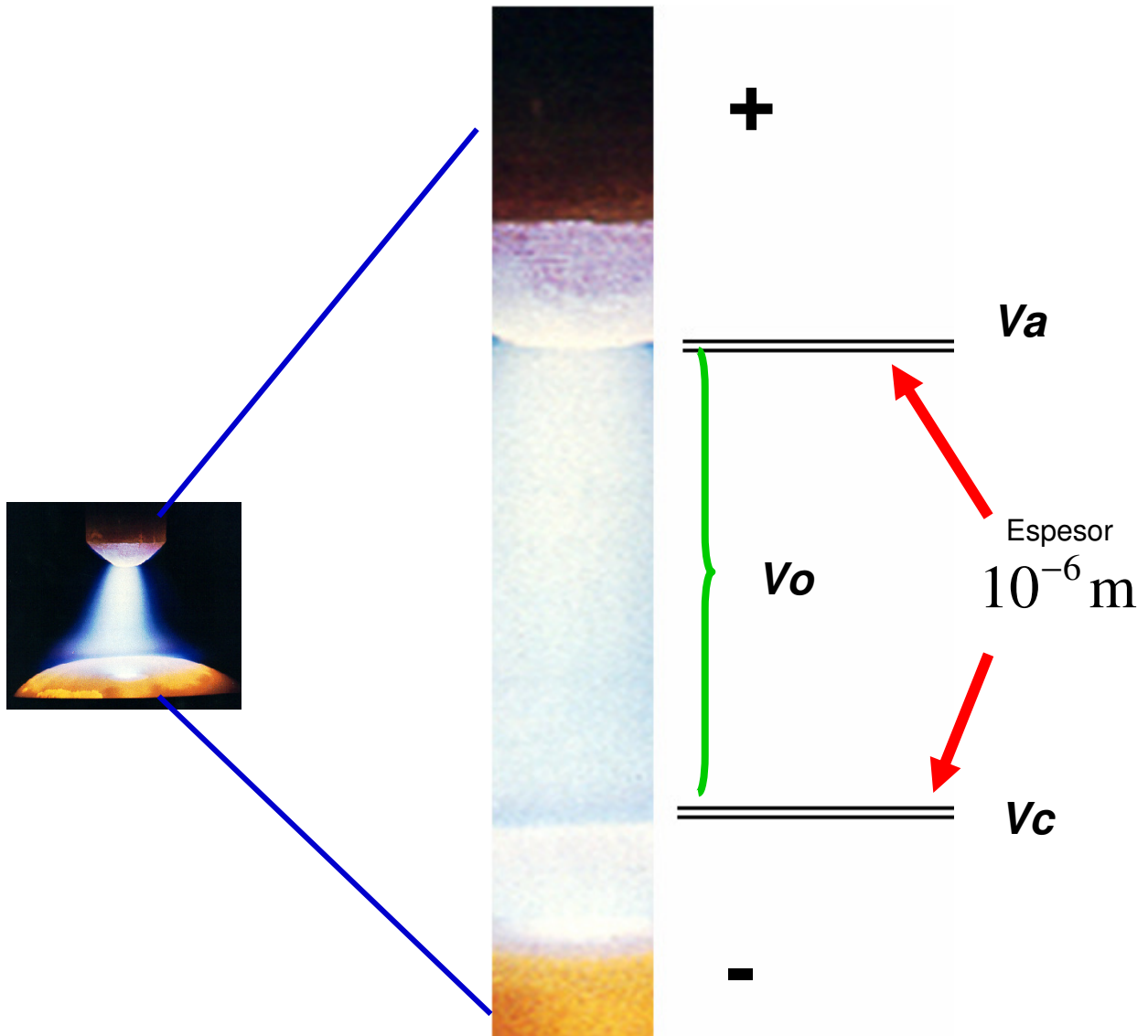
La zona que concentre el mayor potencial dispone de mas energía para acelerar los electrones haciendo que estos se impacten con mayor velocidad. Mayor energía cinética es transformada en mayor energía térmica "calor", fundiendo la zona del impacto.

La energía cínetica " $\frac{1}{2}mv^2$ " se modifica dependiendo de la masa " m " (cantidad de electrones emitidos por la Función Termoiónica del cátodo) y por la velocidad " v " (potencial disponible para acelerarlos una vez que se ha dado la ionización).



Ionización de un átomo

Fuente: introducción a la Física del arco eléctrico. Paulo J. Modenesi



V_a región de caída de tensión anódica

V_c región de caída de tensión catódica

V_o región de caída de tensión de la columna de plasma

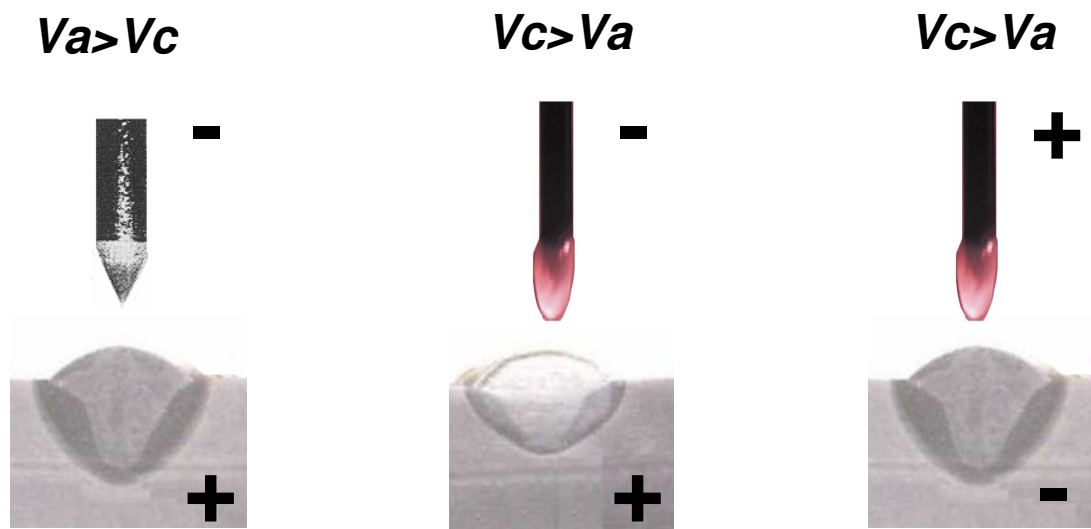
El Arco eléctrico es una suma de Tensiones

CONCLUSIONES

El efecto de penetración es regido por la energía cinética de los choques producidos en la superficie de los electrodos.

La principal evidencia de mayor energía cinética en cada zona del arco eléctrico es la caída de tensión existente en ellas. A mayor potencial mayor energía cinética y como consecuencia mayor calor y mayor penetración.

La diferencia de potencial en cada zona se debe al Potencial de Ionización del gas empleado y a la Función de Trabajo (Emisión Termoiónica del electrodo). Es posible cargar la Mayor Caída de Tensión como sea conveniente hacia el ánodo o cátodo dependiendo el efecto que se desea. Si el electrodo es Termoiónico tiene facilidad para emitir electrones por lo que se coloca en el cátodo “-” (emisor natural de electrones) dando un efecto multiplicador al numero de electrones disponibles y por lo tanto de choques de estos que se darán con el ánodo “+” ($V_a > V_c$) fundiéndolo. Al colocar el electrodo Termoiónico en el ánodo la moderada cantidad de electrones salientes del cátodo se impactará con los átomos de gas ionizándolo rápidamente y el efecto multiplicador hará que muchos electrones alcancen a colisionar con el ánodo fundiéndolo un poco a pesar del elevado punto de fusión del material refractario del electrodo. Si el electrodo es no termoiónico “Bajo punto de fusión” se puede colocar en el ánodo o cátodo, si se coloca en el cátodo “-” como no es tan buen emisor de electrones y si se combina con un gas de rápida ionización (bajo Potencial de Ionización pero “Poli-atómico”) , se requerirán mas choques de los escasos electrones recién emitidos para descomponer el gas casi a la salida del electrodo liberando gran cantidad de energía suficiente para fundirlo ($V_c > V_a$), muy pocos electrones lograrán impactar con el ánodo “+” y los que lo hagan llevarán un nivel de energía menor porque gran parte de ella la habrán perdido al descomponer el gas poli-atómico comúnmente empleado como medio de protección gaseosa, si el mismo electrodo no termoiónico se coloca en el ánodo “+”, ahora el trabajo es el que no tiene suficiente capacidad de emitir electrones y los pocos que sean emitidos se impactarán casi a su salida con los átomos de gas que demandan muchos choque para descomponerse, originando la elevada temperatura que lo funde y da el efecto de penetración ($V_c > V_a$).



GTAW

GMAW, SMAW, SAW, FCAW

Efecto de la penetración al cargar la Caída de Tensión al ánodo o cátodo en los procesos de soldadura por arco eléctrico

BIBLIOGRAFÍA

JAMES F. LINCOLN ARC WELDING FOUNDATION. The Procedure Hand Book of Arc Welding, 14 ed. 2000, USA.

HARRIS, William J. Physics in Welding. Monticello Books. 1970. USA

MODENESI, Paulo J. Introdução à Física do Arco Elétrico, E sua Aplicação na Soldagem dos Metais. Universidad Federal de Minas Gerais, 2007. Belo Horizonte.

SEFERIAN D. Las soldaduras. URMO S.A. de Editores, 1981, España.

RUIZ RUBIO Alfonso. Inspección Radiográfica de las Uniones Soldadas. URMO S.A. de Editores, 1981, España.

El artículo presentado es solo el punto de vista de quien lo redacta y procede de la interpretación del compendio de varias publicaciones del tema incluidos otros artículos que no se mencionan.

Monterrey, N.L. México, Abril 18 de 2008.
Rogelio Arazo Rodríguez.
Ingeniero Industrial, Esp. Procesos de Automatización y Robótica. IPN.
Ingeniero de Servicio. Lincoln Electric Mexicana.
rarazo@lincolnelectric.com.mx, arazo.r@hotmail.com