

NITRURACION DE ACERO EMPLEANDO UNA DESCARGA ELECTRICA LUMINISCENTE EN NITROGENO¹

Ing. Pedro Jarrín Coello

Ing. Paúl Ayora González M.Sc.*

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

ABSTRACT

In this paper the condition for glow discharge in a test chamber employing D.C. current is studied in order to produce nitriding of the surface of steel specimens. The discharge chamber is described as also the initial tests carried out.

Subjects as glow discharge and ionic nitriding are revised.

RESUMEN

Este estudio analiza las condiciones de la descarga luminiscente de corriente continua en una cámara con nitrógeno para acerar metales superficialmente.

Se describe la cámara de descarga, las condiciones de operación y las pruebas preliminares que se llevaron adelante en las piezas tratadas para determinar la validez de este proceso.

Se abordan temas como nitruración iónica y descargas luminiscentes; además se usaron diferentes métodos para determinar la dureza en las piezas tratadas.

INTRODUCCION

La nitruración es un procedimiento de endurecimiento superficial de aceros en el que por difusión de nitrógeno y ulterior formación de nitruros especiales se consiguen durezas extraordinarias en la periferia de las piezas de acero tratadas.

La nitruración también proporciona, a la superficie de las piezas de acero tratadas, resistencia al desgaste y a la corrosión. Otras características que se pueden obtener en las piezas nitruradas son: Ausencia de deformaciones, endurecimiento exclusivo de determinadas superficies de las piezas y la retención de la dureza a temperaturas elevadas.⁽²⁾

1. LA NITRURACION IONICA

La nitruración iónica se la realiza por medio de una descarga luminiscente sobre la superficie de la pieza (cátodo) en nitrógeno con una rarefacción de 1 a 10 mmHg (0.0013 a 0.013 atm) y a un potencial de trabajo de 350 a 600 V. El proceso dura entre 1 a 24 horas.⁽¹⁰⁾

Durante el bombardeo del cátodo con iones positivos de nitrógeno, la energía cinética del ión se gasta en calentar la superficie hasta la temperatura de saturación y en el desprendimiento de los electrones y átomos del hierro (pulverización catódica).⁽⁹⁾ Simultáneamente iones positivos de nitrógeno penetran en el material del cátodo, en cuyo seno reaccionan químicamente.

Para obtener una capa uniforme en toda la superficie de la piezas es necesario que la descarga cubra bien toda la superficie incluyendo las superficies interiores a nitrurar y que el espesor de la región oscura catódica sea de 1 a 2 mm.⁽¹⁰⁾

La nitruración iónica (en comparación con la termoquímica) tiene las siguientes ventajas:⁽¹⁴⁾

1. Acelera en 1,5 a 2 veces los procesos de difusión.
2. Se puede controlar la composición y estructura de la capa difundida.
3. Presenta deformaciones insignificantes de las piezas y una alta limpieza de la superficie.
4. Permite nitrurar los aceros resistentes a la corrosión y al calor.
5. El tiempo total del proceso se reduce debido a la disminución del tiempo de calentamiento y enfriamiento de la carga.
6. Posee gran rendimiento económico, eleva el coeficiente de aprovechamiento de la energía eléctrica, no es tóxica y responde a los requerimientos de defensa del medio ambiente.

El inconveniente de la nitruración es que se requieren aceros especiales, porque con los aceros al carbono no se logran altas durezas, además las instalaciones para la nitruración de muy alta eficiencia resultan costosas para talleres pequeños.

¹ Artículo presentado para las XVII Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional Quito, Ecuador de Junio de 1997

Difusión en los metales. La difusión de los sólidos se produce por el desplazamiento relativo de átomos o moléculas dentro de dichos sólidos. Para que cualquier átomo o molécula se mueva de una posición a otra dentro del retículo del cristal, debe traspasar la barrera de energía potencial y poseer un espacio en el cual pueda alojarse.

El concepto de difusión se aplica a un flujo macroscópico de la sustancia este desplazamiento es el resultado de un enorme número de traslaciones pequeñas de átomos aislados.

La probabilidad que un átomo dé saltos de una posición de equilibrio a otra depende exponencialmente de la temperatura. Es decir que la temperatura facilita el proceso de la difusión en los sólidos.

En la nitruración se incorpora nitrógeno en el acero por difusión. Debido a su pequeño radio atómico (0,52 Å en comparación con 0,71 Å del carbono) el nitrógeno atómico puede penetrar con facilidad en la red del hierro y mejor aún el ión por ser más pequeño.⁽¹⁶⁾

Formación de la capa nitrurada. A temperaturas inferiores a la eutécticoide (590°C) a la probabilidad que el nitrógeno forme nitruros es de 0.42% a 590°C y de 0.001% a la temperatura ambiente.⁽²⁾ Temperaturas mayores a 590°C lograrían una penetración mayor del nitrógeno pero las capas nitruradas serían frágiles y sin utilidad práctica.

Con el microscopio se observa que la periferia de las piezas nitruradas por procesos termoquímicos está formada por dos capas de aspecto diferente: una exterior blanca muy delgada y muy frágil (con espesores de 5 a 50 µm formada por nitruros Fe₂N y Fe₄N) y otra interior oscura de mayor espesor, que es la verdaderamente importante, conformada por nitruros de aluminio, cromo y molibdeno.⁽³⁾

Actualmente la tendencia es conseguir capas nitruradas de poco espesor, ya que una capa muy gruesa es frágil.⁽¹²⁾

En la nitruración de aceros aleados la penetración del nitrógeno a través de la red cristalina es difícil, lo cual no ocurre con los aceros al carbono.

Teóricamente todos los aceros pueden nitrurarse, pero en la práctica se eligen los que tienen elementos de aleación capaces de formar nitruros como: cromo, molibdeno, vanadio, wolframio, titanio, etc, y especialmente el aluminio que es el más poderoso formador de nitruros y con el cual se obtienen las máximas durezas.⁽²⁾

El contenido de carbono en los aceros (0.035% a 1.7%), no influye en la dureza, ni en la profundidad de la capa nitrurada, y se lo usa para lograr ciertas características mecánicas en el material base.⁽²⁾

2. DESCARGA LUMINISCENTE EN NITROGENO MOLECULAR.

Para evaluar el comportamiento eléctrico del gas se usa un tubo sellado provisto de dos electrodos fríos, planos y paralelos, separados una distancia fija; se determina la corriente que atraviesa el tubo en función de la tensión entre los electrodos hasta alcanzar una descarga autosostenida.

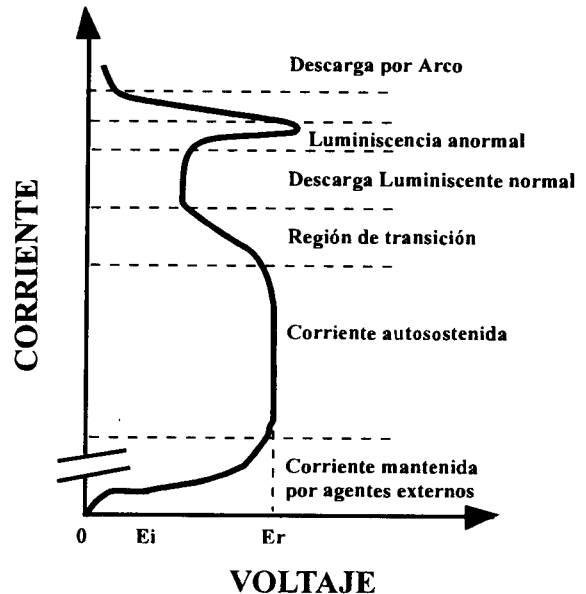


Fig. 1 Característica Corriente-Voltaje en un gas.⁽⁶⁾

Si después de pasar por la región de saturación se aumenta el voltaje esto provoca un consiguiente aumento en la corriente, este lapso produce una descarga llamada de Townsend.

Descarga Autosostenida. Es una descarga eléctrica en la que no interviene ningún agente externo que la desencadene y mantenga, el proceso es esencialmente dependiente de la emisión de electrones secundarios en el cátodo, debido al bombardeo con iones positivos.

La "condición" de descarga autosostenida se alcanza cuando por cada electrón primario absorbido en el ánodo se produce un electrón secundario en el cátodo.

La corriente en la descarga quedará limitada principalmente por la resistencia del circuito exterior pudiendo alcanzar valores elevados.

Los iones que golpean el cátodo se recombinan en la superficie del metal, o un poco más al interior del mismo, con los electrones de conducción libre o con iones negativos generados en la masa metálica del electrodo.

Ley de Paschen. Tratando el producto $p \cdot d$ como una variable única, Paschen encontró una relación funcional entre V , p y d :⁽¹¹⁾

$$V = f(p \cdot d)$$

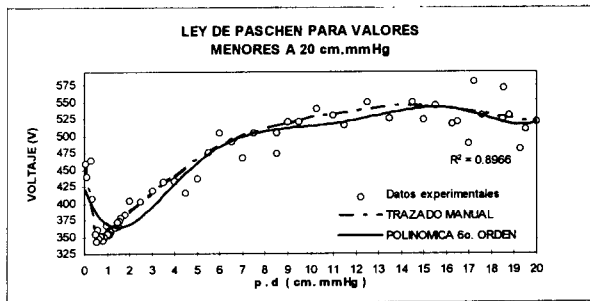


Fig. 2 Ley de Paschen para el nitrógeno.⁽⁶⁾

La Ley de Paschen presenta un mínimo a partir de la cual hacia la derecha de la función se registra una linealidad entre el voltaje de ruptura y el producto $p \cdot d$.

El punto de $p \cdot d$ mínimo corresponde a la alta eficiencia de ionización.⁽¹³⁾

La Ley de Paschen permite encontrar las condiciones más adecuadas para el manejo de los iones positivos que llegan al cátodo durante la nitruración iónica.

El mínimo voltaje de encendido de la descarga en el gas depende especialmente de la función de trabajo del material del cátodo y de la uniformidad del campo.

Descarga Luminiscente. Incrementando la tensión entre electrodos y luego de producirse la perforación del gas, se presenta la descarga luminiscente, la cual presenta zonas luminosas en el gas, brillantes y de color diverso.

Las distribuciones de la intensidad luminosa se pueden observar claramente en un tubo de descargas largo y estrecho.

La región que aparece junto al cátodo se denomina **Espacio oscuro de Aston**, es una región de poco espesor en la cual los electrones secundarios han adquirido solamente bajas velocidades. Está conformada principalmente por iones positivos que golpean el cátodo proceso que, como se indicó es muy importante para la nitruración.⁽¹⁶⁾

A continuación se presenta una suave luminiscencia conocida como **luminiscencia catódica**, luego el **espacio oscuro de Crookes** en el cual se emite luz muy tenue; a continuación la **luminiscencia negativa**, el **espacio oscuro de Faraday** y por último el **Plasma** o "columna positiva".

Si el espaciamiento de los electrodos se mantiene fijo y la presión disminuye, el espacio oscuro catódico, o espacio oscuro de Aston, se incrementa en espesor desplazando las otras regiones hacia el ánodo. Por tanto una disminución del producto $p \cdot d$ provoca un incremento del espacio oscuro de Aston.⁽¹¹⁾

La mayor parte del voltaje aplicado se concentra en la **caída catódica de potencial** que es el cambio de potencial que se registra entre la luminiscencia negativa y el cátodo; representa el potencial al cual se precipitan los iones positivos al dirigirse al cátodo.

Se ha determinado experimentalmente que para un gas y un material de cátodo dados, el valor de la caída catódica de potencial es del orden del valor mínimo de la tensión de descarga.⁽¹¹⁾

La caída catódica es la mayor caída de voltaje a lo largo del tubo de descarga y es funcionalmente la parte más importante de la descarga ya que su presencia permite que ésta se regenere.

La caída catódica es substancialmente independiente de la presión y su espesor, a temperatura ambiente, para el nitrógeno con cátodo de hierro es de 0.42 cm.mmHg.⁽⁴⁾

Disgregación en el cátodo. Durante una descarga luminiscente el cátodo está sometido a un constante bombardeo de los iones positivos. Este proceso puede causar una continua desintegración del cátodo con su consiguiente desgaste, por ello se lo conoce como disgregación o chisporroteo ("sputtering") del cátodo pero en compensación hay una elevación tónica de la temperatura, que facilita la difusión de iones nitrógeno en la superficie del cátodo.

La optimización de la formación de la capa nitrurada debe ser un compromiso entre los dos procesos.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Cámara de descargas. Para el análisis de la descarga luminiscente se construyó una cámara, con un diseño que permite versatilidad en la manipulación del tipo de electrodos, cambio de las probetas, variación de la distancia interelectrónica, ingreso y salida del gas.

La cámara consta de un cilindro transparente, que permite visualizar la descarga luminiscente con presiones de hasta 3 atmósferas (o mayores) y con presiones de vacío de 0.5 mmHg (10^{-3} atmósferas). Completan la cámara dos tapas de aluminio.

En el interior de este equipo se colocan las probetas a las cuales se les da el tratamiento. Estas probetas se alojan en una ranura en el cátodo de aluminio el cual tiene la forma de un electrodo plano con perfil de Rogowski con el fin de distribuir uniformemente el campo eléctrico sobre la pieza a tratar. El cátodo es entonces a la vez un electrodo, un controlador del campo y un dispositivo portaprobetas.

El nitrógeno que se usó es de tipo industrial, con una composición de 99.5% de N_2 , 0.5% de vapor de agua, aire y oxígeno.

Selección y control de voltajes y corrientes. Los valores iniciales del voltaje de encendido de la luminiscencia se produjeron con voltajes inferiores a 2000 V con presiones alrededor de 2 mmHg (para una distancia interelectródica fija de 52.2 cm). En la figura 3 se puede observar la variación de la corriente al variar el voltaje de encendido en la descarga luminiscente.

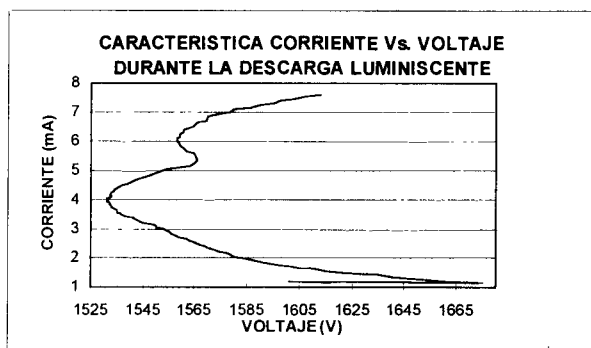


Fig. 3 Intensidad de corriente Vs. Voltaje para una descarga autosostenida.⁽⁶⁾

Visualización de la descarga luminiscente. Se puso especial énfasis en la observación del espacio oscuro catódico con el fin de obtener las condiciones más adecuadas para realizar la nitruración iónica.

Se observó que la disminución del voltaje acarrea una disminución de la intensidad luminosa a lo largo del tubo pero con ello no se hace evidente la región de oscuridad catódica.

Al disminuir la presión, con voltaje constante, la intensidad luminosa fue aumentando paulatinamente cubriendo cada vez más el cátodo.

La disminución de la presión provocó el aumento de la región oscura catódica y las otras regiones de la descarga luminiscente se fueron desplazando en dirección al ánodo.

Todas estas variaciones permiten concluir que la descarga responde a la variable de Paschen $p \cdot d$ y se emplea el punto de alta eficiencia de ionización como el óptimo para la descarga.

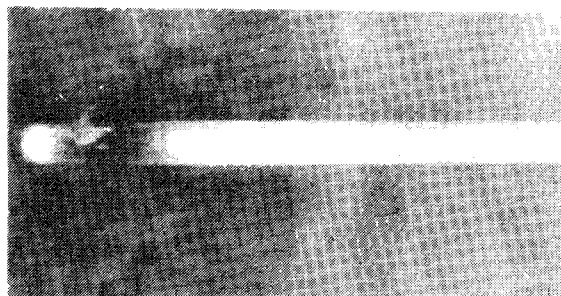


Foto 1. Descarga Luminiscente en nitrógeno obtenida con 1700 V y 1.2 mmHg. Distancia interelectródica de 52.2 cm.⁽⁶⁾

Proceso experimental. Se emplearon varias formas del ánodo para analizar su influencia en la descarga.

En la tabla 1 se detallan los valores de voltaje y corriente que se obtuvieron para cada tipo de electrodo.

Forma del ánodo	Distancia interelectródica (cm)	Presión (mmHg)	Voltaje de encendido (V)	Corriente (mA)
Aguja	6.3	1.5	421.7	5.27
Circular plano (1.5 cm de diámetro)	6	1.5	440	4.05
Redondeado y en punta	6.1	1.5	513.3	4.43
Cónico	6.1	1.5	496	4.83
Circular plano (3.5 cm de diámetro)	6	1.5	484	4.11
Semiesférico	6	1.5	439.3	4.24
Cañón ²	6	1.5	440.7	5.74

Tabla 1. Características de voltaje y corriente obtenidas para ánodos de diferente forma. Los voltajes son valores promediados.⁽⁶⁾

Para los experimentos con las probetas se usó el ánodo tipo aguja, ya que como se observa en la tabla 1 la descarga se produce al menor valor del voltaje con un valor alto de corriente comparado con los otros electrodos.

Las Probetas tienen una geometría definida de acuerdo a normas y sus dimensiones son de 75 mm x 25 mm x 5 mm. Las probetas fueron confeccionadas en acero común A-36 de bajo contenido en carbono (0.3%).

Antes de la nitruración las superficies de las piezas debe ser desengrasadas lavándolas en bencina u otros medios para la eliminación de aceite y otras impurezas. Las

² Electrodo con una forma similar a los usados en los tubos de descarga comerciales; su diseño permite dirigir de mejor forma la descarga luminiscente hacia el otro electrodo.

películas de óxido se eliminan con un pulido fino ó con el uso de ácidos como el HCl.

Pro-beta	Tiempo de exposición (horas)	Distancia interelectrónica (cm)	Presión (mmHg)	Electrodo tipo	Densidad de Corriente ³ (mA/cm ²)	Observaciones
2	1+2=3	7.5	2	Cono	0.645	Proceso en dos etapas
3	4.5	7.5	1.5	Cono	0.598	
4	6	7.5	1.5	Cono	0.692	
5	4.5	7.5	1.5	Cono	0.598	
6	3.3	1.3	1.5	Aguja	0.117	
7	10	0.5	1	Aguja	0.035	Se alimentó nitrógeno cada 2 horas
8	4+4=8	0.5	1.3	Aguja	0.035	Proceso en dos etapas
9	14	0.5	1.3	Aguja	0.035	
10	6	0.5	1.3	Aguja	0.0821	Se redujo el área a la mitad
11	6	15	1	Aguja	1.48	Se inyectó nitrógeno cada 5 minutos
12	6	15	0.5	Aguja	1.48	
13	4.5	16.1	0.5	Aguja	1.528	No se usó el portaprobetas

Tabla 2 Condiciones del tratamiento a las probetas.⁽⁶⁾

Según la Enciclopedia Metals Handbook⁽¹⁾ en la nitruración iónica se emplean densidades de corriente de 1mA / cm². Como se puede ver en la tabla 2 las densidades de corriente de los experimentos están alrededor de este valor.

Protección contra la nitruración. Para proteger ciertas áreas de piezas que no se desea nitrurar se usa el recubrimiento con una cinta aislante.

El proceso que se siguió para el tratamiento de cada una de las probetas fue el siguiente:

1. Limpieza de las probetas.
2. Ingreso de nitrógeno en la cámara y vaciado del mismo. Lavado con N₂.
3. Energización de la cámara de descargas y pulverización catódica por 10 minutos.
4. Cumplido el tiempo del tratamiento, se reduce el voltaje hasta cero y se deja enfriar la probeta.
5. Se saca la probeta de la cámara de descargas.
6. Se realizan las pruebas necesarias para comprobar el tratamiento.

Las probetas se sometieron a diferentes tiempos de exposición de 3, 4.5, 6 y 14 horas.

En la tabla 2 se detallan las condiciones en las que se realizó el tratamiento a las probetas:

³ Para calcular la densidad de corriente, el área de la probeta es de 7.5cmx2.5cm = 18.75 cm²

Pruebas en piezas estudiadas. Las piezas nitruradas deben presentar un color gris mate la presencia de manchas azuladas revela el ingreso de aire en la cámara durante el tratamiento.⁽¹²⁾

Las pruebas que se realizaron sobre las probetas tratadas fueron: ensayo metalográfico, ataque químico y ensayo de microdureza.

Ensayo Metalográfico Esta prueba consistió en observar las probetas a través de un microscopio metalográfico. Para ello se cortaron secciones de cada probeta y se los colocó en resina de poliéster, la cara perpendicular a la tratada se la preparó mediante lijado fino y ataque químico.

La observación de perfil estableció la presencia de una capa oscura que cubre todas las probetas pero no se pudo visualizar si ésta es causada por difusión o por la adhesión a la superficie, de algún compuesto.

En cada una de las probetas se determinó el espesor de la capa oscura formada. Los valores y las observaciones en cada probeta son las siguientes:

PROBETA No.	ESPESOR DE LA CAPA OSCURA (mm)	OBSERVACIONES
2	0.0508	No se distinguen cambios microestructurales; superficie de muy alta linealidad
3	0.0254	No se distinguen cambios microestructurales; superficie de muy alta linealidad
4	0.0381	Ligeros cambios estructurales en el material. Superficie lisa
5	0.0508 - 0.0635	Superficie muy lisa
6	0.0635 - 0.0762	Superficie muy lisa
7	0.0254	Superficie muy lisa
8	0.0254 - 0.0381	Superficie muy lisa
9	0.0254	Superficie muy lisa
10	0.0381	Superficie muy lisa
11	0.0381 - 0.0508	Superficie irregular aparentando corrosión.
12	0.0381 - 0.0508	No se distinguen cambios microestructurales; superficie extremadamente lisa
13	0.0381	Superficie muy lisa

Tabla 3 Resultados de las observaciones en las probetas tratadas.⁽⁶⁾

En todas las probetas se observó una muy alta lisura de las caras que fueron tratadas con la descarga en contraste con las caras que no lo fueron; excepto en el caso de la probeta (# 11) que fue tratada con nitrógeno alimentado cada 5 minutos donde se observó una superficie irregular y un deterioro de su estructura.

Ataque químico. El ataque de la solución de sulfato de cobre durante un día sobre dos de las probetas no arrojó resultados concluyentes.

Ensayo de microdureza. Se usó un equipo de microdureza, que tiene una punta de diamante, con el

cual se produjeron impresiones o indentaciones desde el borde de la capa tratada hacia el interior del material.

Con ayuda de un microscopio se mide la diagonal mayor y mediante una fórmula propia del equipo se establece la dureza, de cada medición, en escala Knoop. Mediante equivalencias se obtiene la dureza en escala Vickers.

En la **foto 2** se observan las indentaciones o impresiones Knoop de dureza que se realizaron sobre las probetas. En este caso se trata de la probeta # 4.

Se aprecia que las marcas tienen un espaciamiento uniforme y la longitud de la diagonal aumenta a medida que nos adentramos en el metal lo cual quiere decir que la dureza del material va disminuyendo.



Foto 2. Indentaciones de dureza Knoop realizadas por una punta de diamante de forma piramidal sobre el perfil de la cara de la probeta tratada. ⁽⁶⁾

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Este trabajo de investigación se concentró en la construcción de la cámara de descargas y los experimentos tienden principalmente a lograr que efectivamente se produzcan cambios de dureza superficial en las probetas por efecto del tratamiento de nitruración iónica. “Trabajos futuros serán más sistemáticos en cuanto al manejo de las variables y a la optimización del proceso”.

Las mediciones de dureza en cada probeta son valores aproximados y deben servir como referencia para establecer las tendencias que el proceso ha tenido en cada experimento donde se han variado ciertas magnitudes mientras se han mantenido constantes otras.

La recopilación de una mayor cantidad de mediciones por cada probeta habría permitido llevar adelante un procedimiento estadístico que establezca un mejor análisis de los resultados obtenidos, no se lo realizó por la disponibilidad restringida del equipo de medición y del tiempo de investigación.

El criterio que se siguió para establecer comparaciones entre las probetas tratadas fue el de seleccionar una magnitud que varíe para un grupo de probetas, pero cuyas restantes condiciones se mantengan constantes.

En la figura 4 se observa la comparación entre las probetas 3 y 4; la probeta tratada con 4.5 horas alcanza inicialmente valores de dureza mayores a la otra pero se observa además una fluctuación entre el primero y el segundo valor lo cual no se debe tomar muy en cuenta ya que la tendencia siempre debe ser de durezas mayores a dureza menores a medida que nos adentramos en el interior de la superficie tratada.

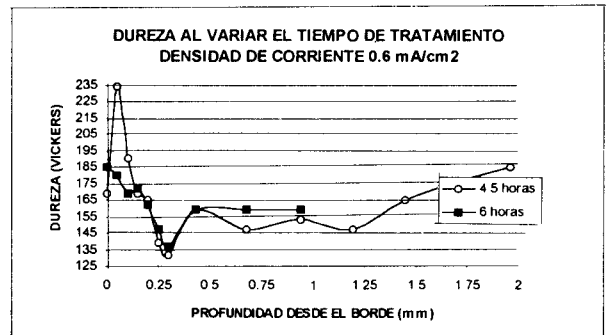


Fig. 4 Durezas al tener diferentes tiempos de exposición. ⁽⁶⁾

La figura 5 se diferencia de la anterior en que las probetas que aquí se comparan (8 y 9) fueron tratadas con tiempos de exposición de 8 y 14 horas. Con 8 horas de tratamiento, en un inicio, se alcanzan durezas mayores que con 14 horas pero a mayor profundidad esta tendencia se revierte; también se puede observar que la dureza del material base es el mismo para dos de las probetas.

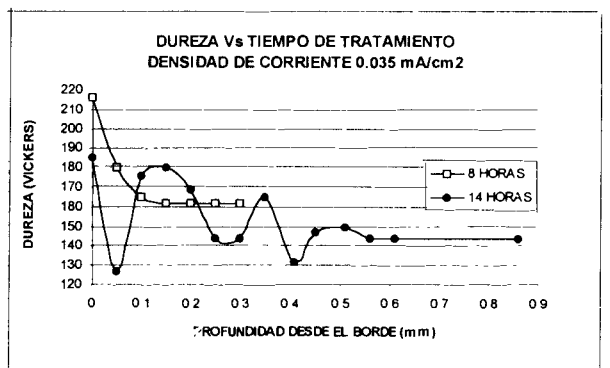


Fig. 5 Durezas al tener diferentes tiempos de exposición. Densidad de corriente 0.035mA/cm². ⁽⁶⁾

La probeta # 13 recibió un tratamiento sin el uso del portaprobetas. Para comparar las durezas que alcanzaron las caras de esta probeta se trazó la figura 6; en la misma se observa que la cara que estuvo de frente al ánodo registra durezas más altas. Esto justifica el empleo del portaprobetas para el análisis.

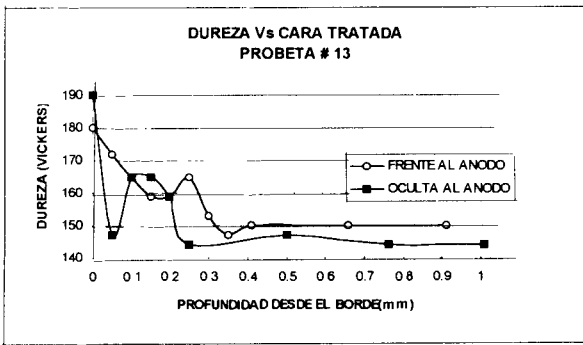


Fig. 6 Durezas en las caras opuestas de una probeta tratada con campo no uniforme.⁽⁶⁾

Finalmente en la gráfica 7 se recogen los valores de las durezas para todas las probetas. Se aprecia el descenso en la dureza a medida que se adentra en la masa del metal.

A partir de los valores de las durezas obtenidas se puede observar que desde el borde hasta 0.5 mm hacia el interior del material, en promedio, el descenso de la dureza es homogéneo, pero a partir de este valor, en algunos casos, se presentan irregularidades en la dureza del material.

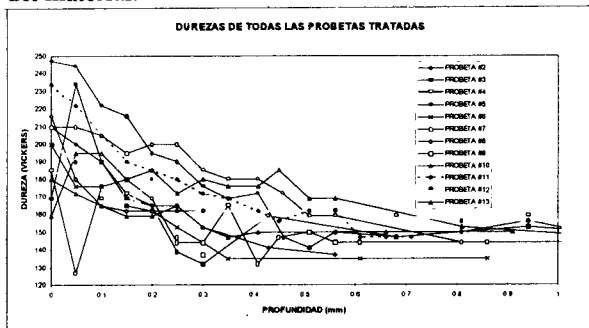


Fig. 7 Durezas obtenidas en todas las probetas tratadas.⁽⁶⁾

5 CONCLUSIONES

1. Se registraron incrementos máximos en la dureza, con el uso de este tratamiento, de hasta el 85 % con respecto al material original (acero A-36 de 0.3% de carbono).
2. Es necesario optimizar el proceso con un análisis particular de cada parámetro que pueda ser controlado.
3. Con el propósito de evitar que la descarga luminiscente se produzca en ciertas áreas del cátodo, fue suficiente cubrir estos espacios con una cinta aislante, para evitar que estos espacios intervengan en la luminiscencia.
4. Con campos homogéneos la descarga luminiscente se inicia con voltajes más elevados en contraste al uso de campos no homogéneos. Esto se pudo apreciar al variar los electrodos que se usaron como ánodo y al emplear fuentes de alimentación con diferente rizado.

5. Al disminuir el diámetro del tubo de descargas, manteniendo constantes los otros parámetros, la descarga se inició con voltajes menores; además las regiones de la descarga luminiscente se definen de mejor forma.

6. Se determinó que durante la descarga luminiscente, manteniendo la presión constante y aumentando el voltaje, el *plasma* o *columna positiva* ocupó mayor espacio y la luminiscencia catódica cubrió en mayor grado el cátodo, pero el descenso del voltaje no consiguió evidenciar la presencia del *espacio oscuro catódico*. La variación del voltaje tuvo más incidencia en la intensidad de la luminiscencia que en el establecimiento de las distintas regiones de la descarga luminiscente.

7. Manteniendo constante el voltaje se fue reduciendo la presión provocando con ello un aumento en la intensidad luminosa y el apareamiento de zonas de claridad y oscuridad a lo largo del tubo de descargas, es así como se hizo evidente la presencia de la región oscura catódica. Por lo tanto el descenso en la presión aumenta el espesor del espacio oscuro catódico y se le considera a esta región imprescindible para optimizar el proceso de nitruración iónica.

8. En todas las probetas tratadas se pudo observar, con ayuda del microscopio metalográfico, que la superficie tratada vista de perfil mantiene una alta lisura, que no se consigue por métodos de pulimento convencionales; esto se atribuye al trabajo de bombardeo de los iones del gas contra la superficie del cátodo.

9. El ataque de las probetas con sulfuro de cobre no permitió confirmar la validez del tratamiento de endurecimiento superficial ya que esta solución atacó por igual las caras tratadas y las no tratadas.

10. Con ayuda de un equipo para medir microdureza se observó que en todas las probetas se produjeron cambios en la dureza del material en mayor o menor grado; los valores de microdureza que se registraron en cada una de las probetas establecen que la influencia del tratamiento es evidente hasta una profundidad entre 400 a 500 μm .

11. La capa oscura que se forma sobre la superficie del metal es una capa difundida y no adosada.

12. Las caras tratadas con la descarga luminiscente presentan una coloración café y ciertas probetas tienen pequeñas manchas azuladas. Mediante indentaciones con el microdurómetro se estableció que en las manchas azuladas se presentaron durezas menores que en las zonas de color café.

13. Con campos uniformes se registraron durezas mayores que con campos no uniforme y al producir la

descarga en todo el volumen de las probetas todas sus caras se endurecieron en mayor o menor grado, pero de forma desigual.

BIBLIOGRAFIA

- (1) AMERICAN SOCIETY FOR METALS; Metals Handbook; Volumen 4: Heat treating; ninth edition; 1981; USA.
- (2) APRAIZ BARREIRO, José; Tratamientos térmicos de los aceros; Edit. Dossat; Madrid; 1968.
- (3) AVNER Sydney; Introducción a la Metalurgia Física; Segunda edición; McGraw-Hill; México; 1992.
- (4) COBINE, James; Gaseous Conductors, Dover Publications; Inc.;New York; 1958.
- (5) ELECTRA, Conferencia Internacional sobre Grandes Sistemas Eléctricos en Alto Voltaje. CIGRÉ No.32 Enero 1974. París.
- (6) JARRIN, Pedro; Descargas eléctricas en nitrógeno para el tratamiento superficial de metales; Tesis de grado; Escuela Politécnica Nacional; 1997.
- (7) JASTRZEBSKI, ZBIGNIEW; Naturaleza y propiedades de los materiales para ingeniería; Edit. Mir; Moscú; 1979.
- (8) KOLACHEV, B.A.; GABIDULLIN, R.M.; FIGUZOV, Yu; Tecnología de tratamiento térmico de los metales y aleaciones no férricas; Edit Mir; Moscú; trad. al español en 1983.
- (9) KOZLOV, Yu; Ciencia de los materiales; Edit. Mir; Moscú; edición en español 1986.
- (10) LAJTIN, Yu ; ARZAMASOV, B; Tratamiento químico térmico de los metales; Edit Mir; Moscú; trad. al español en 1987.
- (11) MILLMAN, Jacob; SEELY, Samuel; Electrónica; Edit. Labor, Barcelona, 1966.
- (12) PASCUAL, José; Técnica y práctica del tratamiento térmico de los metales férricos; Edit. Blume; Barcelona España; 1968.
- (13) ROTH, Arnold; Técnica de la Alta Tensión; Editorial Labor; Barcelona; 1966.
- (14) SERVICE DIAMOND TOOL COMPANY, Service diamond Hardness conversion chart, Michigan, USA.

(15) STÜDEMAN Hans; Tratamiento térmico de los aceros; Manual del ingeniero; Vol XII; Bilbao; España; 1980.

(16) WEED, Herman; DAVIS, Wells; Fundamentals of electron devices and circuits; Prentice Hall Inc; N.J.; USA; 1965.



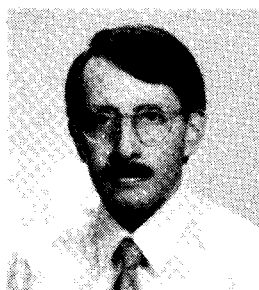
PEDRO JARRIN COELLO.

Realizó sus estudios secundarios en los Colegios Mejía y La Salle.

Se graduó de Ingeniero en Sistemas Eléctricos de Potencia en mayo de 1997 en la Escuela Politécnica Nacional.

Se ha desempeñado en proyectos de control de motores para sistemas de riego e Instalaciones eléctricas.

Sus áreas de interés son: Operación y control de Sistemas eléctricos de Potencia, Investigación e Innovación Tecnológica, Generación alternativa de energía, y Energía y Medio Ambiente.



PAUL AYORA GONZALEZ.*

Nació en Azogues, Ecuador en 1946. Se recibió de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional de Quito en 1971 y recibió el Master of Science in High Voltage Engineering en la Universidad de Manchester, Inglaterra, en 1977.

Ha ejercido la cátedra en la Escuela Politécnica Nacional por el lapso de 25 años, actualmente es profesor principal en las cátedras de Diseño en Alto Voltaje y Teoría Electromagnética y está dedicado a la Investigación en las áreas de Alto Voltaje y Materiales de Ingeniería.

* En esta ocasión el autor ha seleccionado el tema de este trabajo para presentarlo en las XVII JIEE de la Escuela Politécnica Nacional con ocasión de conmemorar sus 25 años de cátedra en esta prestigiosa institución.