



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL BORURADO
DE ACEROS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A :

IRMA HERNANDEZ CASCO



EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA

MEXICO, D. F.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Jurado asignado:

Presidente	Prof. Bernardo Fabián Campillo Illanes
Vocal	Prof. José Bernardo Hernández Morales
Secretario	Prof. José Antonio Barrera Godínez
1er. Suplente	Prof. Alberto Ingalls Cruz
2o. Suplente	Prof. Balbina Ojeda Ramírez

Sitio donde se desarrolló el tema:

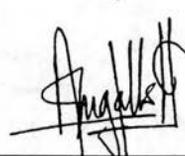
LABORATORIO 008 "TRATAMIENTOS TÉRMICOS", EDIFICIO "D",
FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

Asesor del tema:



DR. JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES

Supervisor técnico:



M. EN C. ALBERTO INGALLS CRUZ

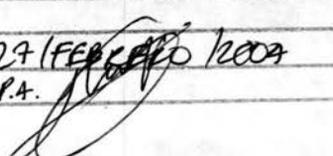
Sustentante:

Juene On

IRMA HERNÁNDEZ CASCO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

Nombre: HERNÁNDEZ CASCO
IRMA
Fecha: 27 FEBRERO 2009
Firma: P.A.



AGRADECIMIENTOS

A mi Universidad por la formación que me ha dado, especialmente a todos los profesores que han contribuido con sus conocimientos para mi formación y la de muchas otras personas.

A mi Familia, en especial a mis hermanas Irais y Lilia por haberme apoyado siempre.

A Jacobo Vargas Orihuela por su apoyo, su confianza y por todo lo que significa para mí.

A Román Tejeda Castillo, por su cariño, por su apoyo, su confianza y por ser como un segundo padre para mí.

Al M. en C. Antonio Huerta Cerdán por su amistad y por todo el apoyo que me brindó.

Agradezco sinceramente al M. en C. Sergio García Galán por las facilidades que me brindó para realizar las mediciones experimentales para esta tesis.

Agradezco muy especialmente a mi asesor Dr. Bernardo Hernández Morales por su apoyo y por su paciencia para concluir este trabajo.

ÍNDICE

ÍNDICE	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABLAS	vii
RESUMEN	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1 Tratamientos superficiales	3
2.2 Métodos de endurecimiento selectivo	4
2.3 Métodos difusivos	5
2.3.1 Formación de compuestos superficiales	5
2.3.2 Mecanismos involucrados en formación de capas superficiales	6
2.4 Tratamientos termoquímicos	8
2.4.1 Carburizado	8
2.4.2 Nitruado	9
2.4.3 Borurado	9
2.4.4 Carbonitrurado	15
3. OBJETIVO	16

4. PARTE EXPERIMENTAL	17
4.1 Tratamiento de borurado	17
4.1.1 Materiales	17
4.1.2 Preparación de las probetas	18
4.1.3 Contenedores	19
4.1.4 Condiciones experimentales	19
4.1.5 Preparación de la pasta	20
4.1.6 Preparación de las probetas dentro de los contenedores	21
4.1.7 Tratamiento termoquímico	21
4.2 Caracterización de las probetas boruradas	23
4.2.1 Preparación metalográfica de las piezas	23
4.2.2 Microdureza de las capas boruradas	24
4.2.3 Medición de espesores de capa	25
4.2.4 Fotografía de la capa borurada	26
4.2.5 Determinación de velocidad de corrosión	26
4.2.5.1 Probetas, equipo y medio corrosivo	26
4.2.5.2 Pruebas de corrosión realizadas	27
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
5.1 Acero 1045	29
5.1.1 Tratamiento a 900 °C	30
5.1.2 Tratamiento a 1000 °C	31
5.1.3 Tratamiento a 1100 °C	32
5.1.4 Velocidad de corrosión a 1000°C borurada durante 4 horas	33
5.1.5 Discusión	33
5.2 Acero 4140	37
5.2.1 Tratamiento a 900 °C	38
5.2.2 Tratamiento a 1000 °C	39

5.2.3 Tratamiento a 1100 °C	40
5.2.4 Velocidad de corrosión a 1000°C borurada durante 4 horas	41
5.2.5 Discusión	41
5.3 Acero 8620	45
5.3.1 Tratamiento a 900 °C	46
5.3.2 Tratamiento a 1000 °C	47
5.3.3 Tratamiento a 1100 °C	48
5.3.4 Velocidad de corrosión a 1000°C borurada durante 4 horas	49
5.3.5 Discusión	49
5.4 Acero O1	53
5.4.1 Tratamiento a 900 °C	54
5.4.2 Tratamiento a 1000 °C	55
5.4.3 Tratamiento a 1100 °C	56
5.4.4 Velocidad de corrosión a 1000°C borurada durante 4 horas	57
5.4.5 Discusión	58
5.5 Comentarios generales	61
6. CONCLUSIONES	63
7. BIBLIOGRAFÍA	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. El diagrama binario Fe-B ⁽⁶⁾ .	10
Figura 2.2. Corte isotérmico del diagrama ternario Fe-B-C a 900 °C ⁽⁷⁾ .	11
Figura 4.1 Dimensiones de las probetas utilizadas en el estudio experimental.	18
Figura 4.2 Dimensiones de los contenedores.	19
Figura 4.3 Probetas listas para tratamiento.	21
Figura 4.4 Secciones transversales utilizadas para metalografía.	23
Figura 4.5 Mordazas para preparación metalográfica	23
Figura 4.6 Distribución de microdurezas en la capa borurada.	25
Figura 4.7 Determinación de espesores de capa (ocular 10X).	26
Figura 5.1. Fotomicrografía de una zona cercana a la superficie de una probeta de acero 1045 borurada a una temperatura de 1100 °C, durante 6 horas (100 X).	29
Figura 5.2 Perfil de microdurezas, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para la probeta de acero 1045 borurada a 900 °C durante 2 horas.	30
Figura 5.3 Perfil de microdurezas, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para la probeta de acero 1045 borurada a 900 °C durante 4 horas.	31
Figura 5.4 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 1045 boruradas a 1100 °C durante 2,4 y 6 horas.	32
Figura 5.5 Curva Tafel obtenida para el acero 1045 borurado a 1000 °C durante 4 horas.	33
Figura 5.6 Espesor promedio de capa para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero 1045.	34
Figura 5.7 Durezas promedio de la capa borurada (símbolos) y de la matriz (líneas) para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero 1045.	35
Figura 5.8 Fotomicrografía de una zona cercana a la superficie de una probeta de acero 4140 borurada a una temperatura de 1000 °C, durante 6 horas.	36
Figura 5.9 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para	37

las probetas de acero 4140 boruradas a 900 °C durante 2,4 y 6 horas.	
Figura 5.10 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 4140 boruradas a 1000 °C durante 2,4 y 6 horas.	38
Figura 5.11 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 4140 boruradas a 1100 °C durante 2,4 y 6 horas.	39
Figura 5.12 Curva Tafel obtenida para la probeta de acero 4140 borurada a 1000 °C durante 4 horas.	40
Figura 5.13 Espesor promedio de capa para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero 4140.	41
Figura 5.14 Durezas promedio de la capa borurada (símbolos) y de la matriz (líneas) para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero 4140.	42
Figura 5.15. Fotomicrografía de una zona cercana a la superficie de una probeta de acero 8620 borurada a una temperatura de 1100 °C, durante 4 horas.	44
Figura 5.16 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 8620 boruradas a 900 °C durante 2,4 y 6 horas.	45
Figura 5.17 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 8620 boruradas a 1000 °C durante 2,4 y 6 horas.	46
Figura 5.18 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 8620 boruradas a 1100 °C durante 2,4 y 6 horas.	47
Figura 5.19 Curva Tafel obtenida para la probeta de acero 8620 borurada a 1000 °C durante 4 horas.	48
Figura 5.20 Espesor promedio de capa para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero 8620.	50
Figura 5.21 Durezas promedio de la capa borurada (símbolos) y de la matriz (líneas) para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero 8620.	50
Figura 5.21 Durezas promedio de la capa borurada (símbolos) y de la matriz (líneas) para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero 8620.	52
Figura 5.23 Fotomicrografía de una zona cercana a la superficie de un una probeta	52

de acero O1 borurada a una temperatura de 1000 °C, durante 4 horas.	
Figura 5.24 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero O1 boruradas a 900 °C durante 2,4 y 6 horas.	54
Figura 5.25 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero O1 boruradas a 1000 °C durante 2,4 y 6 horas.	55
Figura 5.26 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 8620 boruradas a 1100 °C durante 2,4 y 6 horas.	56
Figura 5.27 Curva Tafel obtenida para la probeta de acero O1 borurada a 1000 °C durante 4 horas.	56
Figura 5.28 Espesor promedio de capa para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero O1.	58
Figura 5.29 Durezas promedio de la capa borurada (símbolos) y de la matriz (líneas) para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero O1.	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1 Composición química nominal de los cuatro aceros utilizados.	17
Tabla 4.2 Temperaturas de normalizado para los aceros utilizados ⁽¹⁸⁾ .	18
Tabla 4.3 Matriz experimental de material y condiciones de tratamiento termoquímico de borurado.	20
Tabla 5.1 Espesores promedio de capa (μm) obtenidos para las probetas de acero 1045 tratadas a 900, 1000 y 1100 °C durante 2,4 y 6 horas.	30
Tabla 5.2 Espesores promedio de capa (μm) obtenidos para las probetas de acero 4140 tratadas a 900, 1000 y 1100 °C durante 2,4 y 6 horas.	38
Tabla 5.3 Espesores promedio de capa (μm) obtenidos para las probetas de acero 8620 tratadas a 900, 1000 y 1100 °C durante 2, 4 y 6 horas.	46
Tabla 5.4 Espesores promedio de capa (μm) obtenidos para las probetas de acero O1 tratadas a 900, 1000 y 1100 °C durante 2, 4 y 6 horas.	54

RESUMEN

En las últimas décadas se ha buscado reemplazar aceros con alta dureza, alta resistencia al desgaste y/o alta resistencia a la corrosión, pero con altos costos de producción, por aceros de menor costo tratados superficialmente para obtener propiedades superficiales similares. Esto ha impulsado el desarrollo de tratamientos termoquímicos tales como carburizado, nitrurado, carbonitrurado, borurado y boronitrurado, los cuales permiten obtener una superficie con buenas propiedades mecánicas y químicas sin sacrificar la tenacidad interna de las piezas; esto último es importante porque muchos de los componentes tratados termoquímicamente son sometidos a cargas cíclicas.

Todos los tratamientos termoquímicos antes mencionados se llevan a cabo en medios sólidos, líquidos o gaseosos. Es necesario caracterizar la respuesta de un proceso específico para poder establecer las mejores condiciones de tratamiento en el ámbito industrial. Es por esto, que en este trabajo se estudió experimentalmente el tratamiento termoquímico de borurado por medio de pasta en cuatro tipos de acero AISI (1045, 4140, 8620 y O1) sometiéndolos a diferentes condiciones de temperatura y de tiempo de tratamiento. Las probetas obtenidas permitieron determinar la microestructura superficial, la dureza, el espesor de la capa de boruros y la velocidad de corrosión obtenida al realizar el tratamiento de borurado a diferentes temperaturas y tiempos.

Se encontró que las probetas tratadas a 1100 °C muestran desprendimiento de capa para todos los aceros, siendo mayor para el acero O1, los tratamientos realizados a 900 y 1000 °C durante tiempos menores a 6 horas son los que mejor respuesta muestran al tratamiento de borurado.

1. INTRODUCCIÓN

La realización de tratamientos termoquímicos a los aceros es necesaria debido a que se pueden reemplazar componentes que se hacen con aceros de alto costo por aceros de costo menor pero tratados superficialmente. Con esto se logran alcanzar las propiedades mecánicas y químicas necesarias únicamente en la superficie, que es la única parte de la pieza sujeta a condiciones mecánicas y químicas severas en servicio.

Ejemplos de tratamientos termoquímicos son: carburizado, nitrurado, carbonitrurado, borurado y boronitrurado. Con estos tratamientos se logra modificar la microestructura y las propiedades mecánicas en la superficie de las piezas, como resultado de la formación de nuevos compuestos por medio de la introducción de elementos intersticiales en la matriz ferrosa; debe mencionarse que también se pueden modificar aleaciones no ferrosas.

El proceso de borurado (o boronizado) produce boruros en una capa superficial del componente tratado. La formación de boruros en la superficie de la pieza involucra fundamentalmente dos etapas: 1) formación de átomos de boro activos en la superficie de la pieza a partir de un medio borurante (que puede ser sólido, líquido o gaseoso) y 2) difusión de los átomos de boro en la red cristalina del acero para formar compuestos con el hierro de la matriz. En los aceros con gran cantidad de elementos formadores de carburos la forma de la capa de boruros es dentada, además se pueden formar capas de boruros planas.

Además de influir en la forma de la capa, los elementos aleantes influyen en el tamaño de la capa y en la composición de la misma, ya que se pueden formar boruros de otros elementos.

Las variables de proceso más importantes para un tratamiento termoquímico son: temperatura, tiempo de procesamiento y composición química del acero a tratar. Con el objetivo de generar información necesaria para optimizar el proceso termoquímico de borurado es que, en este trabajo se estudió la respuesta de varios tipos de aceros bajo diferentes condiciones de procesamiento.

2. ANTECEDENTES

2.1 Tratamientos superficiales

Un tratamiento superficial tiene el objetivo de cambiar las propiedades de un material por medio de la modificación de su superficie. Estos tratamientos se han utilizado para sustituir materiales de alto costo por materiales más baratos tratados superficialmente. Los tratamientos superficiales pueden aplicarse tanto en materiales ferrosos como en materiales no ferrosos.

En particular, un tratamiento termoquímico superficial es aquél en el que se modifica la estructura química de la superficie del material por medio de un agente químico activado térmicamente. Con este tipo de tratamientos se logra que el metal tratado tenga en su superficie mayor resistencia al desgaste, mayor dureza y mayor resistencia a la corrosión que la matriz, sin sacrificar la tenacidad de la ésta..

Además de la formación de una subcapa de martensita, la superficie de un metal puede modificarse mediante dos tipos de proceso⁽¹⁾: 1) los que involucran la formación de una capa adicional en la superficie de la pieza y 2) los que involucran la modificación superficial de la pieza sin modificar sus dimensiones.

Los procesos en los que se forma una capa adicional sobre la superficie son tratamientos que tienen un costo efectivo bajo; además se puede realizar el tratamiento a una gran variedad de piezas. El problema con este tipo de tratamientos es que en ocasiones la unión entre la capa y la superficie del metal no es suficientemente fuerte y se presenta desprendimiento de la capa. Por esto hay una disminución en la resistencia a la fatiga. Entre los métodos utilizados para realizar estos tratamientos se encuentran los recubrimientos, formación de capa por fusión, soldadura, etc.

El segundo grupo de procesos se puede dividir a su vez en dos: 1) métodos selectivos y 2) métodos difusivos. Los métodos selectivos se usan para transformar solamente ciertas zonas de la superficie. Estos métodos modifican la superficie involucrando transformación por calentamiento y temple. Muchos de estos métodos se utilizan en piezas de gran tamaño en las que se aprovecha el llamado autotemple. Los métodos difusivos modifican la composición química de la superficie por medio de agentes que difunden fácilmente en el material y que forman compuestos de alta dureza (carbono, boro, nitrógeno). Este tipo de tratamiento se utiliza para piezas de gran tamaño endurecidas en toda su superficie. Estos dos métodos se describen en detalle en las dos secciones siguientes.

2.2 Métodos de endurecimiento selectivo

En estos métodos se seleccionan secciones para ser modificadas (dependiendo del uso de la pieza) por medio de calentamiento y temple localizados. Los procesos más utilizados para endurecer selectivamente son los siguientes⁽¹⁾:

- Endurecimiento por flama: En este método se austeniza la sección de la pieza que va a ser tratada mediante calentamiento con una flama de oxiacetileno, para posteriormente templearla en agua produciendo una estructura martensítica en la sección tratada con una matriz de estructura diferente.
- Endurecimiento por inducción: En este proceso se coloca la pieza de acero en un campo magnético generado por corriente de alta frecuencia a través de un conductor; la frecuencia determina el espesor del endurecimiento dado que determina la penetración del campo magnético, que a su vez determina el espesor austenizado.
- Tratamiento térmico superficial con láser: Se genera calor suficiente por absorción de rayos láser en la sección de la pieza a ser tratada. Se utiliza en piezas de gran tamaño. Al absorberse el rayo láser, se alcanza la temperatura de austenización; como la pieza

es muy grande y la conductividad térmica del metal es alta, se forma martensita debido a la velocidad de enfriamiento por conducción de calor de la sección tratada al interior de la pieza (autotemple). Este tratamiento se puede realizar añadiendo elementos aleantes a la superficie, que den mayor dureza, resistencia a la corrosión y al desgaste.

- Endurecimiento con rayo de electrones: Este método se realiza utilizando un cañón generador de electrones, que viajan a alta velocidad y que al impactar la superficie provocan austenización de la sección, después se utiliza autotemple para formar martensita.

2.3 Métodos difusivos⁽¹⁾

Los métodos difusivos son procesos termoquímicos utilizados para modificar la superficie por la acción de un agente químico que, al estar a alta temperatura, es activado para absorberse y difundir en el interior de la pieza formando compuestos con alta dureza, alta resistencia a la corrosión y alta resistencia al desgaste.

2.3.1 Formación de compuestos superficiales

Para que las capas superficiales se formen es necesario contar con un medio que provea especies endurecedoras para el tratamiento. Las especies endurecedoras son aquellas que tienen un tamaño atómico mucho menor que el material base. Para los aceros se utilizan boro, carbono o nitrógeno, los cuales ocupan sitios intersticiales dentro de la estructura cristalina del acero. En algunos casos, como el del carbonitrurado, se combinan dos elementos.

Al encontrarse estos compuestos a alta temperatura los elementos endurecedores pasarán al estado atómico activado en la superficie e ingresarán a la red cristalina de la

pieza. En metales con estructuras fcc los átomos intersticiales ocupan los sitios en el centro del cubo; en metales con estructura bcc los átomos intersticiales se acomodan en las aristas del cubo y en sitios centrales.

La forma en que los elementos endurecedores penetran y forman compuestos con mejores propiedades mecánicas está controlada por un proceso específico para cada método de endurecimiento superficial termoquímico. Por ejemplo, para el nitrurado el proceso controlante es la disociación de los compuestos de nitrógeno provenientes del medio en la superficie del material, mientras que para el borurado a alta temperatura el paso controlante es la difusión ⁽²⁾. El proceso controlante también cambia dependiendo de la forma en que se aplica el tratamiento (gas, líquido o sólido).

2.3.2 Mecanismos involucrados en la formación de las capas endurecidas.

Los mecanismos de formación de capa involucran la creación de núcleos en la superficie de la pieza, la formación de átomos activos a partir del medio de tratamiento, la difusión de especies endurecedoras a sitios intersticiales o a vacancias de la pieza y la formación de compuestos.

La formación de átomos activos a partir del medio endurecedor se da generalmente en la superficie de la pieza, donde se crean sitios de nucleación que al entrar en contacto con el medio de tratamiento a altas temperaturas permiten que las especies pasen al estado atómico.

El transporte de las especies endurecedoras se lleva a cabo por difusión en presencia de gradientes de concentración. Shewmon ⁽³⁾ considera que en la formación de capas de alta dureza, las dimensiones de la pieza son apreciablemente mayores que la distancia de difusión. Por esta razón estos sistemas pueden verse como medios semi-infinitos de difusión a partir de la superficie. La solución de la ecuación diferencial que rige al proceso de difusión y permite conocer la concentración de especies endurecedoras a una distancia

determinada a partir de la superficie (cuando se considera que la concentración de la superficie se establece en tiempos muy pequeños comparados con la escala de tiempo del proceso) es la siguiente:

Donde

$$\frac{C_s - C}{C_s - C_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

C_s = Concentración de la especie endurecedora en la superficie.

C_0 = Concentración inicial de la especie endurecedora en la pieza.

C = Concentración en la distancia de interés.

D = Coeficiente de difusión.

t = Tiempo de tratamiento térmico

Del análisis realizado para medios semi-infinitos, se concluye que:

- La zona afectada por la difusión es proporcional a la raíz cuadrada del producto del coeficiente de difusión por el tiempo (\sqrt{Dt}).
- La velocidad de penetración es proporcional a ($\sqrt{D/t}$).
- Un espécimen mucho mayor que \sqrt{Dt} puede ser considerado infinitamente grueso.

Sin embargo, se debe considerar que al aumentar la concentración de la especie endurecedora en zonas cercanas a la superficie, la velocidad de difusión disminuye ya que los átomos que han ingresado a la retícula forman barreras para la difusión⁽⁴⁾.

2.4 Tratamientos termoquímicos

2.4.1 Carburizado⁽¹⁾

El carburizado es un tratamiento termoquímico de endurecimiento superficial en el que se aumenta la concentración de carbono para obtener una capa superficial con mucho mayor dureza que el centro, el cual conserva su tenacidad. Esta capa dura se obtiene al aumentar la concentración del carbono en la fase austenítica y realizar un temple para obtener martensita en la superficie.

Para realizar el temple se utiliza alguno de los siguientes métodos:

- Templado directo partiendo del medio carburizante.
- Calentamiento y temple de las partes carburizadas posterior al enfriamiento a temperatura ambiente.
- Doble temple: temple directo y luego retemplado a menor temperatura

Generalmente, en la superficie del acero se forma CO, el cual después formará carbono atómico activado que será absorbido en la superficie del acero donde se llevará a cabo la difusión formándose un gradiente de concentración que genera un gradiente de potencial que hace que el carbono migre hacia el interior de la pieza.

El tratamiento de carburizado se puede llevar a cabo por medio de gas (hidrocarburos), por empaquetamiento con compuestos sólidos (BaCO_3) o por inmersión en baños de sales (NaCN , KCN).

Como resultado del tratamiento termoquímico de carburizado, se obtiene un alto contenido de carbono en la superficie y, por ende, alta dureza superficial gracias a la formación de martensita durante el temple.

Las variables que deben de controlarse en este tratamiento son: temperatura, tiempo, atmósfera y medio carburante, además de la composición del acero.

2.4.2 Nitruado⁽¹⁾

Este tratamiento termoquímico es ferrítico, a diferencia del tratamiento de carburizado, que es austenítico. En este proceso los átomos de nitrógeno se introducen en la fase ferrítica a temperaturas de 500 a 590°C, formando Fe_2N y Fe_4N .

Con el nitruado se consigue aumentar la dureza de la superficie (disminuyendo el desprendimiento de la capa que ocurre en el carburizado), alta resistencia al templeado, baja sensibilidad para formar grietas por fatiga, mejor resistencia a la corrosión y estabilidad dimensional. Este tratamiento produce menor distorsión y deformación que el carburizado, además ocurre un cambio estructural pero poco cambio volumétrico.

Al introducirse el nitrógeno en la red cristalina del hierro alfa, forma compuestos con el hierro y con el carbono; al alcanzarse el límite de solubilidad del nitrógeno en esta fase los nitruros precipitan en los bordes de grano con ciertas orientaciones preferenciales. Otros elementos como el Al, Cr y Mo, se utilizan también como formadores de nitruros.

El nitruado puede realizarse mediante gas (NH_3), sales ($NaCN$ con KCN), plasma y polvo.

2.4.3 Borurado

El borurado es un tratamiento termoquímico que produce mayor dureza, resistencia a la corrosión y a la oxidación que el nitruado y el carburizado⁽⁵⁾. Para realizar el borurado se han desarrollado varios procesos, entre ellos están el empaquetamiento, inmersión en

sales fundidas, electroless y deposición electrolítica, sin embargo, este proceso es caro por los agentes que se utilizan para borurar.

Considerando que el sustrato fuera básicamente hierro, los compuestos que podrían formarse al difundir boro dentro de la matriz son FeB (fase ζ) y Fe₂B (fase ϵ), de acuerdo al diagrama de fases Fe-B⁽⁶⁾ (ver Figura 2.1). El diagrama ternario Fe-B-C ha sido reportado en la literatura⁽⁷⁾; este diagrama muestra que es posible precipitar Fe₃C, Fe₃(C,B) y Fe₂₃(C,B)₆, además de los dos intermetálicos mencionados anteriormente, para temperaturas iguales o menores a 900 °C. La Figura 2.2 muestra un corte isotérmico a 900 °C de este diagrama. La estructura cristalina de los compuestos intermetálicos FeB y Fe₂B, es rómbica y tetraédrica respectivamente⁽⁸⁾. Además de estos compuestos intermetálicos, pueden formarse boruros cerámicos y compuestos no oxidados.

B-Fe (Boron-Iron)

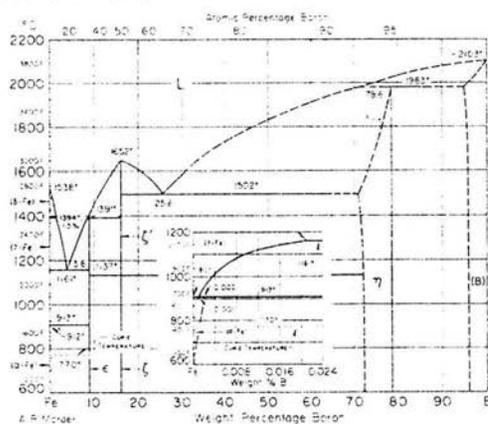


Figura 2.1. El diagrama binario Fe-B⁽⁶⁾.

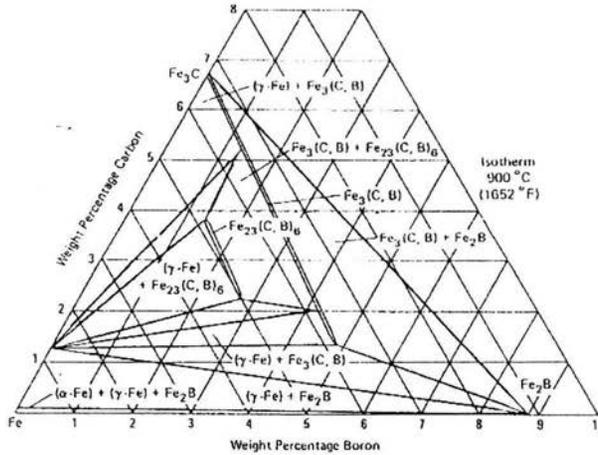


Figura 2.2. Corte isotérmico del diagrama ternario Fe-B-C a 900 °C ⁽⁷⁾.

Durante el borurado, los átomos libres de boro activo difunden al sitio reticular más cercano y bajo altos gradientes de concentración se mueven en la matriz a través de vacancias, formando Fe_2B . Cuando el Fe_2B crece hasta cierto espesor, la velocidad de difusión del boro baja y comienza a formarse FeB ⁽⁹⁾. Por esto en la superficie de la pieza se encuentra el FeB , mientras que el Fe_2B se encuentra más adentro de la capa.

Como se ha mencionado, la difusión del boro en el componente tratado termoquímicamente es una etapa importante del proceso. El coeficiente de difusión de boro en hierro puede calcularse a partir de ⁽¹⁰⁾:

$$D = A * \exp(-Q/RT)$$

Donde:

D es el coeficiente de difusión ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)

A = 106 $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$

Q = 259.6 kJ mol^{-1}

T es la temperatura (K)

Las capas formadas por tratamiento termoquímico de borurado requieren cumplir con ciertos requerimientos, dependiendo de la aplicación a la que serán sometidas. Entre estos requerimientos se puede encontrar: estabilidad térmica bajo condiciones de deformación y efectos de calor, resistencia a la formación de estructuras secundarias, alta conductividad térmica para que remuevan calor de las zonas de alta fricción, alta resistencia a la formación de grietas y fracturas y alto esfuerzo de deformación plástica.

Como ya se mencionó, en el proceso termoquímico de borurado la difusión de boro en la superficie metálica provoca la formación de Fe_2B o de $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$. La fase que contiene FeB es mucho más frágil que la capa monofásica Fe_2B ⁽¹¹⁾ por lo que es deseable obtener una sola fase Fe_2B . La formación de estas dos fases está en función de la temperatura de tratamiento, la composición y el potencial del medio borurante. El cambio de la zona monofásica o bifásica a la matriz no afectada por el tratamiento termoquímico se da en una zona de transición (con mayor dureza que la matriz). En la intercara entre la capa de boruros y la matriz se encuentra el silicio, que por ser insoluble en FeB y Fe_2B es segregado entre los granos aciculares⁽⁸⁾.

La cinética de formación de la capa de boruros es la siguiente: el boro activo se forma a partir del medio que lo rodea. Generalmente, a los compuestos borurantes se les agrega NaF y AlF_3 , que reaccionan con un compuesto de boro (B_4C es el más típico) para formar BF , que a su vez se descompone térmicamente para formar boro activo.

Los boruros nuclean en la superficie de la pieza, siendo la orientación al azar. Cuando empiezan a difundir dentro de la pieza, la orientación se vuelve preferencial en las direcciones perpendiculares a la superficie, mientras que en las otras direcciones la difusión es más lenta e incluso se suprime el crecimiento porque los granos chocan unos con otros impidiendo la difusión del boro^(12,13).

La forma de la capa depende de la composición del sustrato, en aceros aleados con gran cantidad de elementos formadores de carburos, la estructura acicular es más pronunciada⁽¹⁴⁾ que en aleaciones con pocos elementos aleantes, donde la capa es más

plana. En la mayoría de los casos la capa de boruros tiene una estructura dentada que es muy estable. A temperaturas superiores a 1000 °C esta estructura sufre una fusión en la superficie,⁽⁸⁾ contrario a lo representado por el diagrama de fases; esta fusión se debe a que las condiciones químicas de la superficie son diferentes a las del interior de la capa⁽⁸⁾.

Bajo ciertas condiciones se pueden obtener capas planas, que generalmente contienen concentradores de esfuerzos como poros, grietas y fronteras de intercara que llevan al rápido desarrollo de fracturas. Los esfuerzos se propagan a la zona de transición causando deformación plástica lo que genera grietas que llegan a la superficie causando grietas profundas y desprendimiento de la capa⁽¹³⁾.

La composición de la capa formada, depende de la temperatura, de la composición química del sustrato, del medio proveedor de boro y del tiempo de tratamiento. Dos procesos gobiernan el tratamiento termoquímico de borurado, la formación de boro activo y la difusión del boro. A altas temperaturas, el proceso es controlado por la difusión del boro⁽²⁾ y se puede representar por la ecuación siguiente:

$$d^2 = kT$$

Donde d es la distancia de penetración del boro (espesor de capa), T es la temperatura de tratamiento y k es una constante que depende de la temperatura según la ecuación de Arrhenius para la cual se han encontrado energías de activación de 171.2 ± 16.6 kJ/mol⁽²⁾.

El crecimiento de la capa genera un cambio en las dimensiones de la pieza, que se expresa por la fórmula siguiente:

$$\Delta l = cx$$

Donde x es el espesor de capa y c una constante específica para cada acero⁽²⁾.

Se ha observado que los elementos aleantes tienen una influencia importante en la formación de la capa. Por ejemplo, el silicio difunde en el hierro más lentamente que el boro, por lo que es rechazado por el boro produciendo una morfología dentada⁽⁹⁾. Otros elementos aleantes como el cobalto, manganeso, cromo, aluminio, tungsteno y molibdeno impiden la difusión del boro, si el contenido de estos elementos aleantes aumenta, la difusión del boro es impedida y se forma FeB, el cual contiene mayor cantidad de boro⁽¹¹⁾. Se han realizado estudios del efecto del cromo en la formación de la capa⁽¹⁵⁾ donde se ha encontrado que si la cantidad de cromo aumenta, la penetración del boro disminuye por la formación de compuestos ricos en boro.

En la formación de la capa es importante considerar ciertos aspectos, tales como la adhesión de la capa al sustrato. Como la capa de boruros tienen una fragilidad alta y su unión es relativamente baja, la susceptibilidad a la corrosión puede aumentar si la unión entre el sustrato y la capa no es suficientemente fuerte o su adhesión es inadecuada. Se han ideado métodos de borurado para modificar las propiedades de la capa, entre ellos se encuentran los siguientes:

Formación de compuestos eutécticos de boro: Se realiza primero el borurado convencional y luego se promueve el tratamiento eutéctico por medio de alta temperatura. Para realizar este tratamiento es necesario contar con equipos como hornos de inducción, o láser, puesto que se necesitan altas temperaturas para rebasar la temperatura eutéctica (1422K). En este tratamiento se forman $Fe_3(C, B)$, Fe_2B y $Fe_{23}(C, B)_6$, que disminuyen notablemente la fragilidad obtenida para la capa FeB/ Fe_2B , en ocasiones se añade un compuesto que reaccione exotérmicamente produciendo la temperatura necesaria para el tratamiento, al cual se le denomina autopropagación eutéctica⁽¹⁶⁾.

Borurado superplástico: En este tratamiento se realiza el tratamiento de borurado al mismo tiempo que se hace deformación plástica, con ello se producen granos equiaxiales en lugar de granos dentados. En este tipo de tratamiento no se permite que el silicio sea rechazado a la interfase matriz-capas, con lo que se mejoran las propiedades mecánicas comparadas con el borurado convencional⁽⁹⁾.

Borurado con láser: En este tratamiento se forma una microestructura eutéctica en la que el Fe_3B se propaga al interior de la capa. Con el láser se funde la superficie de la capa; al solidificar y conducir calor a través de la capa transforma su estructura formando estructuras globulares equiaxiales que disminuyen la dureza superficial pero mejoran la tenacidad y la ductilidad del acero⁽⁵⁾.

Tratamiento duplex: Este tratamiento se realiza para reducir y controlar la fricción extendiendo la vida de las piezas tratadas. Consiste en conjugar el tratamiento termoquímico de borurado con la depositación de un recubrimiento endurecedor como TiN, TiAlN o CrN⁽¹⁷⁾.

2.4.4 Carbonitrurado⁽¹⁾

El carbonitrurado es un proceso que involucra la introducción de átomos de carbono y de átomos de nitrógeno (en menor proporción que el carbono); se lleva a cabo a menores temperaturas que el carburizado (700 a 800°C). En este tratamiento se obtiene una capa de menor tamaño que en el carburizado, pero tiene la ventaja de darle mayor estabilidad dimensional a las piezas.

Generalmente se utiliza descomposición de amoníaco para producir nitrógeno que difunda a la pieza, este tipo de tratamiento se puede aplicar a piezas maquinadas. Además, el nitrógeno disminuye la velocidad de enfriamiento crítica.

En este tratamiento debe considerarse que el nitrógeno, como el manganeso, el carbono y el níquel es un estabilizador de austenita, por lo que el porcentaje de amoníaco en la atmósfera debe de ser controlado, de lo contrario, reduce la dureza de la capa formada, además en alta cantidad el nitrógeno forma poros y huecos, así que debe cuidarse que el porcentaje en la superficie no sea mayor de 0.4%.

3. OBJETIVO

Caracterizar el tipo de capa, la distribución de durezas, el espesor de capa y la velocidad de corrosión de los aceros AISI 1045, AISI 4140, AISI 8620 y AISI O1 sometidos al tratamiento termoquímico de borurado utilizando pasta como medio borurante. Se estudiaron tres temperaturas de proceso (900, 1000 y 1100 °C) durante 2, 4 y 6 horas para cada una de ellas. Con esta información se podrán establecer guías de aplicación de este tratamiento termoquímico en el ámbito industrial.

4. PARTE EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental consistió en la preparación de probetas de cuatro tipos de acero para su tratamiento termoquímico mediante el uso de pasta para borurado. Se diseñó y aplicó una matriz experimental (3 x 3) que combinó tiempos y temperaturas de borurado para todos los aceros. Los resultados del tratamiento de borurado sobre las probetas ensayadas se caracterizaron mediante técnicas que incluyeron el estudio de la microestructura obtenida, la microdureza y la resistencia a la corrosión.

4.1. Tratamiento de borurado

4.1.1 Materiales

Para el estudio experimental del tratamiento de borurado se utilizaron probetas cilíndricas (de ¼ in de diámetro por 3/8 in de altura) de cuatro aceros diferentes: AISI 1045, AISI 4140 , AISI 8620 y AISI O1 (la composición nominal de cada acero se muestra en la Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Composición química nominal de los cuatro aceros utilizados.

Acero	Tipo de Acero	%C	%Mn	%P (max)	%S (max)	%Si	%Ni	%Cr	%Mo	%W
1045	Acero al medio carbono	0.43-0.5	0.6-0.9	0.04	0.050					
4140	Acero aleado	0.38-0.43	0.75-1.00	0.035	0.040	0.15-0.30		0.80-1.10	0.15-0.25	
8620	Acero aleado	0.18-0.23	0.70-0.90	0.035	0.040	0.15-0.30	0.4-0.7	0.40-0.60	0.15-0.25	
O1	Acero de herramientas	0.9	1					0.5		0.5

4.1.2 Preparación de las probetas.

Para cada acero, se normalizaron barras cilíndricas de 15 cm de longitud, colocando en una charola las barras cubiertas por arena de moldeo para evitar la oxidación. Las charolas se introdujeron en una mufla para normalizar las barras a las temperaturas recomendadas en la literatura para cada acero⁽¹⁸⁾ (ver Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Temperaturas de normalizado para los aceros utilizados⁽¹⁸⁾.

Acero	Temperatura ° C
1045	900
4140	870
8620	925
O1	870

Una vez alcanzado el tiempo de normalizado las probetas se sacaron y se dejaron enfriar (con todo y arena) hasta la temperatura ambiente. Una vez frías, las barras se cortaron en secciones de aproximadamente 3/8 in de alto en una cortadora con disco de carburo de silicio rociado con agua, una de las caras planas de las probetas se desbastó con lijas para agua, con tamaños de grano 240, 320, 400 y 600 y se pulieron a espejo en paño fino con alúmina 0.05(ver Figura 4.1).

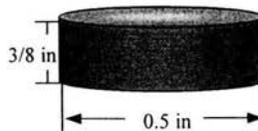


Figura 4.1 Dimensiones de las probetas utilizadas en el estudio experimental.

4.1.3 Contenedores.

Se utilizaron como contenedores piezas cilíndricas de hierro colado, que normalmente se utilizan para cerrar terminaciones de tuberías de agua. Las dimensiones de estas piezas fueron: 1.5 in de diámetro, 1.5 in de altura, y paredes de $\frac{1}{2}$ pulgada de espesor. Además, se utilizaron a modo de tapa piezas de las mismas características pero en posición invertida (con el fin de que la atmósfera en el contenedor se mantuviera controlada, minimizándose el contacto del oxígeno del aire dentro de la mufla con la pasta para borurar). En la Figura 4.2 se muestran los contenedores.

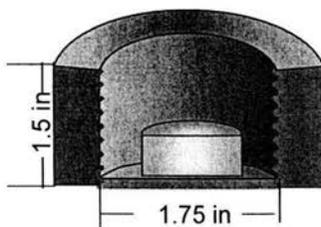


Figura 4.2 Dimensiones de los contenedores.

4.1.4 Condiciones experimentales.

Para cada acero se escogieron tres temperaturas de prueba: 900, 1000 y 1100 ° C; estas temperaturas se eligieron por encontrarse en el rango en el cual la austenita es la fase presente. Además las temperaturas que más se utilizan para realizar el tratamiento termoquímico de borurado en el ámbito industrial se encuentran en este rango. Los tiempos que se escogieron para realizar el tratamiento a cada temperatura fueron: 2, 4 y 6 horas, tiempos que son razonables para poder realizar el tratamiento térmico de manera comercial. La matriz de pruebas se presenta en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Matriz experimental de material y condiciones de tratamiento termoquímico de borurado.

Acero	Temperatura, ° C	Tiempo, h		
1045	900	2	4	6
	1000	2	4	6
	1100	2	4	4
4140	900	2	4	6
	1000	2	4	6
	1100	2	4	4
8620	900	2	4	6
	1000	2	4	6
	1100	2	4	4
O1	900	2	4	6
	1000	2	4	6
	1100	2	4	4

Para identificar cada pieza tratada se utilizó la nomenclatura siguiente: acero-temperatura de tratamiento-tiempo de tratamiento. Así, por ejemplo, la probeta de acero 1045 tratada a 900 ° C durante 2 horas se identificó como: 1045-900-2. Se trataron tres probetas de cada acero y para cada condición experimental.

4.1.5. Preparación de la pasta

Se utilizó pasta comercial Durborid, marca Durferrit soluble en agua (proporcionada por la empresa Especialidades Térmicas S.A.). El porcentaje de agua utilizado en la pasta fue de 10 % en volumen. La pasta y el agua se mezclaron, primero manualmente con una pala hasta dispersar el sólido que se encontraba depositado, y después con un agitador mecánico durante 7 minutos, tiempo en el que la pasta y el agua formaban una mezcla homogénea.

4.1.6 Preparación de las probetas dentro de los contenedores

Las probetas ya preparadas se colocaron en el centro del contenedor en posición vertical con la cara pulida a espejo hacia arriba. Se colocó la pasta encima y alrededor de la probeta, cuidando que todo el espacio quedara cubierto por pasta, hasta llenar aproximadamente 4/5 partes del contenedor con la pasta. La Figura 4.3 muestra la forma en la que se colocaron las probetas para realizar el tratamiento de borurado.

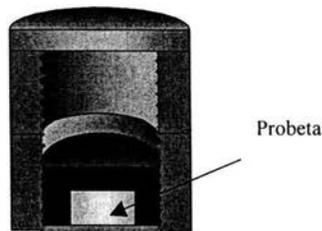


Figura 4.3 Probetas listas para tratamiento.

4. 1.7 Tratamiento termoquímico

Antes de realizar los tratamientos termoquímicos, se realizó una prueba para determinar el tiempo de calentamiento de las piezas dentro del horno. Esta información se utilizó para que el tiempo de tratamiento termoquímico no incluyera este tiempo de precalentamiento.

- a) Determinación del tiempo de precalentamiento de las piezas.

Para determinar el tiempo de precalentamiento de la superficie de las piezas a tratar, se colocó una probeta en el contenedor, en posición vertical y en el centro del contenedor, se rellenó el contenedor con pasta, se colocó un termopar en contacto con la superficie lateral de la probeta y se introdujo el contenedor en la mufla, la cual se encontraba a una temperatura de 1000 °C, que es la temperatura promedio de las utilizadas en este trabajo, y

se registró el cambio de temperatura en la superficie de la probeta hasta que el termopar marcó una temperatura de 1000 °C. El tiempo determinado fue de 22 minutos.

b) Tratamiento termoquímico de las probetas.

Las probetas se introdujeron a la mufla en juegos de seis, todas del mismo acero. La mufla se encontraba originalmente a la temperatura de tratamiento termoquímico. Se colocaron los contenedores en hileras de tres cada una, separadas aproximadamente 5 centímetros y se procesaron durante el tiempo de tratamiento requerido aumentándole el tiempo de precalentamiento (22 minutos).

Una vez alcanzado el tiempo de tratamiento más corto, se sacaron tres probetas de la mufla, las otras tres probetas se sacaron tres horas después.

c) Desmonte de las piezas.

Las probetas se desmontaron inmediatamente después de sacarlas de la mufla. Para ello, las probetas se golpearon contra el piso. Esto fue necesario porque la pasta al estar a la temperatura de tratamiento aumentó su volumen, y selló la unión tapa-contenedor base. Una vez quitada la tapa se procedió a desmontar la pieza; en algunas ocasiones era suficiente remover la pasta con una espátula para lograr liberar la probeta, en otras ocasiones, la superficie de la pasta endurecía demasiado rápido y era necesario golpearla con un cincel, para poder penetrar al interior de la pasta, que aún estaba suave, para luego remover la pasta con una espátula y poder sacar la probeta.

Las probetas se enjuagaron inmediatamente para quitar los residuos de pasta y evitar que hubiera endurecimiento de la pasta, enseguida se marcaron por la cara que quedó sobre el contenedor, para indicar que la cara contraria es la cara que se sometió a tratamiento termoquímico.

4.2 Caracterización de las probetas boruradas

4.2.1 Preparación metalográfica de las piezas.

Como se mencionó anteriormente, se prepararon tres probetas para cada acero y cada condición temperatura-tiempo. De cada condición temperatura-tiempo se cortó una probeta a la mitad con una cortadora de disco de diamante, enfriada con agua, a una velocidad de 300 rpm, con una carga de 350 gramos. De forma tal que se generó la mitad de un cilindro, lo que proporcionó un área transversal rectangular para la preparación metalográfica. En esta superficie se tuvieron tres caras sometidas a tratamiento termoquímico de borurado: la cara de la tapa superior del cilindro y dos caras correspondientes a los lados laterales del cilindro, todas las pruebas se realizaron sobre la capa formada en la tapa superior del cilindro. Las piezas cortadas se muestran en la Figura 4.4

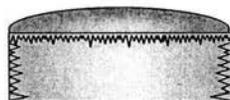


Figura 4.4 Secciones transversales utilizadas para metalografía.

Para realizar la preparación metalográfica se mandaron a hacer unas mordazas de placas de acrílico. Las mordazas se perforaron en sus dos extremos longitudinales, con una broca con tuerca de $\frac{1}{4}$ in, para colocar un tornillo que uniera a las dos placas. Entre las dos placas de acrílico se colocó un soporte de acrílico de aproximadamente 6mm de ancho, para dar estabilidad a la probeta al momento de preparar metalográficamente. La Figura 4.5 muestra las mordazas utilizadas.

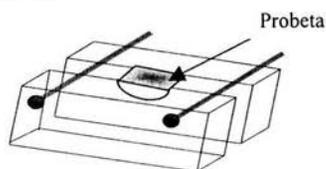


Figura 4.5 Mordazas para preparación metalográfica

Para montar las probetas en la mordaza se colocó la parte rectangular boca abajo y se pusieron dos placas de lámina de acero O1 de 1mm de espesor entre la probeta y las mordazas, las láminas tuvieron la función de proveer una interfase dura, para evitar que la diferencia en la dureza de la capa y la dureza de la mordaza creara redondeamiento de la capa de boruros.

Las probetas fueron desbastadas con lijas de agua de grano 240, 320, 400 y 600, en el orden en que fueron mencionadas. Después se pulieron con paño grueso y con alúmina 0.3 μm y luego con paño fino y alúmina 0.05 μm . Una vez que las caras estuvieron pulidas a espejo fueron atacadas con Nital 3 durante 30 segundos.

4.2.2 Microdureza de las capas boruradas.

La medición de la microdureza de la capa se realizó en las probetas tratadas metalográficamente. Para ello se utilizó un microdurómetro Vickers Shimadzu, con una carga de 0.980 N durante 30 segundos, realizándose las mediciones con el objetivo de 40 aumentos.

La forma en que se tomaron microdurezas fue la siguiente (ver Figura 4.6):

A partir de una posición de un milímetro desde la superficie lateral de la pieza, se hizo un primer barrido de microdurezas, el cual consistió en tomar entre 4 y 5 mediciones a lo largo de una línea imaginaria paralela al sentido de crecimiento de la capa, respetando la distancia de dos huellas entre cada medición(según la Norma ASTM E-92)⁽¹⁹⁾. Las mediciones se tomaron desplazando un poco la línea entre cada una de ellas para evitar que las identaciones quedaran muy juntas. Las mediciones subsecuentes se realizaron dejando un espacio de dos milímetros de la línea de medición anterior, realizándose 4 o 5 mediciones de microdureza. De las mediciones de microdureza hacia el interior de la capa, una de ellas correspondía a la dureza de la matriz, las demás se tomaron en el interior de la capa.

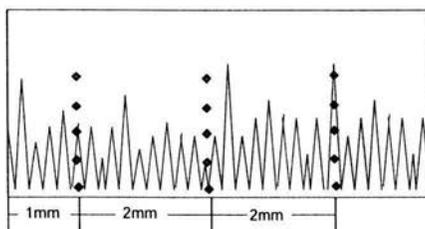


Figura 4.6 Ubicación de las mediciones de microdureza en la capa borurada.

Para cada indentación se calculó la microdureza con el microdurómetro: se marcó la longitud de cada diagonal de la indentación y el equipo automáticamente realizó los cálculos de microdureza, cada microdureza se determinó tres veces para después calcular el promedio de estas tres mediciones. Además, para cada indentación se midió la distancia entre la superficie plana de la probeta y el centro de la indentación, reportándose los resultados de microdureza en función de la distancia desde la superficie de la probeta.

4.2.3 Medición de espesores de capa.

El espesor de capa se midió con la misma probeta utilizada para la medición de microdurezas y con el mismo equipo, pero con el objetivo de 10 aumentos.

El espesor de capa se determinó de la manera siguiente:

A 10 aumentos se colocó una de las guías de medición del microdurómetro sobre la superficie de la capa borurada, la otra guía se colocó en el extremo de la capa, considerando que la mayor cantidad de picos de los boruros quedarán sobre esta guía; las mediciones se realizaron cada 0.25 mm. En la Figura 4.7 se muestra la forma en que se determinó el espesor de capa por éste método.

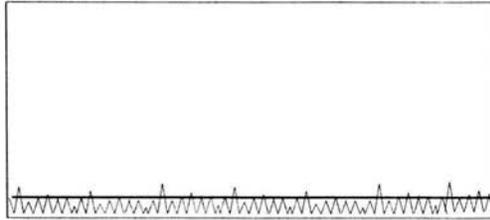


Figura 4.7 Determinación de espesores de capa (ocular 10X).

4.2.4 Fotografía de la capa borurada.

Se utilizó la probeta preparada metalográficamente para realizar las fotografías en un microscopio Shimadzu equipado con una cámara Olympus y un controlador de tiempo de exposición. Todas las fotografías se realizaron a 100 aumentos.

4.2.5 Determinación de las velocidades de corrosión.

Las velocidades de corrosión se tomaron considerando la condición media de temperatura y tiempo de tratamiento. Esta condición media fue de 4 horas a 1000 °C.

4.2.5.1 Probetas, equipo y medio corrosivo.

Una probeta borurada de cada acero y una probeta de cada acero sin tratamiento se lijó de la cara contraria a la de tratamiento para garantizar contacto eléctrico del circuito. Se utilizó un equipo GILL AC para realizar las pruebas, utilizándose una celda de acrílico, con un área de exposición para el electrodo de trabajo de 34 mm², el electrodo de referencia utilizado fue un electrodo de Calomel, y el electrodo auxiliar fue un electrodo de grafito. El

medio en el cual se corrieron las pruebas de corrosión fue una solución de sulfato de sodio 0.1M a temperatura ambiente.

4.2.5.2 Pruebas de corrosión realizadas.

Se realizaron dos pruebas de corrosión: primero se realizó una curva de polarización a una probeta tratada termoquímicamente de cada acero para determinar si se observaba pasivación de la capa de boruros. Como ningún acero se pasivó, no se determinó resistencia a la polarización (R_p).

Después de la curva de polarización se realizaron dos corridas de curva Tafel para probetas termoquímicamente tratadas y para la probeta sin tratamiento.

Las condiciones a las cuales se realizaron las pruebas de corrosión se describen a continuación.

- a) Curva de polarización. Se realizó en el GILL AC aplicando sobrepotencial negativo y sobrepotencial negativo a partir del potencial de reposo, a una velocidad de 60mV/min.
- b) Curva Tafel. Se realizó en el GILL AC aplicando un sobrepotencial catódico y sobrepotencial anódico de 300 mV, a una velocidad de 60 mV por minuto.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para cada una de las probetas boruradas. En particular, se muestran los resultados de: 1) metalografía, 2) microdureza, 3) espesor promedio de capa y 4) velocidad de corrosión, agrupados por tipo de acero. Los resultados obtenidos se discuten por tipo de acero, presentándose también una sección final de discusión general.

Los resultados de perfil de microdureza (en base a mediciones tomadas de acuerdo a la Figura 4.6) se presentan en forma gráfica. En estas gráficas se muestran agrupados los resultados de microdureza para cada acero a una temperatura dada y tiempos de tratamiento de 2, 4 y 6 horas. Dentro de cada gráfica, los resultados para cada tiempo se distinguen por el tipo de línea: la línea vertical muestra el espesor promedio de capa; la línea horizontal a la izquierda de la línea vertical muestra la dureza promedio dentro de la capa mientras que la línea horizontal a la derecha de la línea vertical muestra la dureza promedio en la matriz. Los promedios se calcularon utilizando de 20 a 25 mediciones.

En cada medición de dureza, se tiene asociado un error debido al equipo de ± 40 unidades de dureza Vickers. Por otra parte, el error en la medición del espesor de capa es de $\pm 20 \mu\text{m}$.

5.1 Acero 1045

En la Figura 5.1 se muestra la microestructura de una zona cercana a la superficie de una probeta de acero 1045 borurada a 900 °C durante 4 horas. En esta figura se pueden observar: 1) la capa de boruros formada, 2) el espesor de dicha capa, 3) la superficie de la probeta, 4) la matriz del acero y 5) los precipitados. Se muestra además la marca de una indentación realizada para la medición de microdureza y una fractura en la capa. Es importante notar que este es el tipo de capa que normalmente se obtiene al realizar el tratamiento de borurado en el acero 1045. Se observa que los dientes forman ángulos agudos en la punta, además se observa que el espesor de los dientes varía, quedando espacios sin boruros entre cada diente, en algunos casos se tienen precipitados, sobre todo cerca de la superficie.

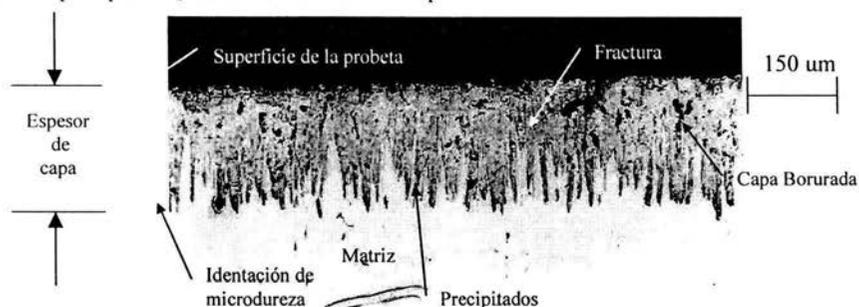


Figura 5.1. Fotomicrografía de una zona cercana a la superficie de una probeta de acero 1045 borurada a una temperatura de 1100 °C, durante 6 horas.

En la Tabla 5.1, se presentan los espesores de capa obtenidos para los 9 tratamientos de borurado realizados en el acero 1045. En la tabla se puede ver que para 1000 y 1100 °C, el tratamiento durante 2 horas no muestra variación, además se obtiene un mayor espesor para la probeta tratada durante 6 horas a 1000 °C.

Tabla 5.1 Espesores promedio de capa (μm) obtenidos para las probetas de acero 1045 tratadas a 900, 1000 y 1100 °C durante 2,4 y 6 horas.

Temperatura	2 horas	4 horas	6 horas
900 °C	15.2	57	108.2
1000 °C	97.4	138.2	219.3
1100 °C	97.1	174.9	196

5.1.1 Tratamiento a 900 °C

Para las probetas boruradas a 900 °C durante 2, 4 y 6 horas, se observaron capas de boruros muy uniformes, con poca cantidad de precipitados, además se observa que para ningún tiempo de tratamiento hubo desprendimiento de capa.

En la Figura 5.2 se observan las representaciones gráficas de dureza en capa y en la matriz a diferentes distancias de la superficie para el acero 1045 borurado durante 2, 4 y 6 horas; en estas gráficas puede observarse que las durezas promedio son de 1375, 1435 y 1411 HV y en la matriz son de 332, 409 y 278 HV respectivamente. Se puede observar también que dentro de la capa las durezas se encuentran dispersas, sin estar muy lejanas del valor promedio. En la matriz, los valores de dureza se ven uniformes.

En estas gráficas no se ve claramente la caída de durezas al pasar de la capa a la matriz. Para la probeta tratada durante 6 horas se observa una caída suave en el perfil de dureza.

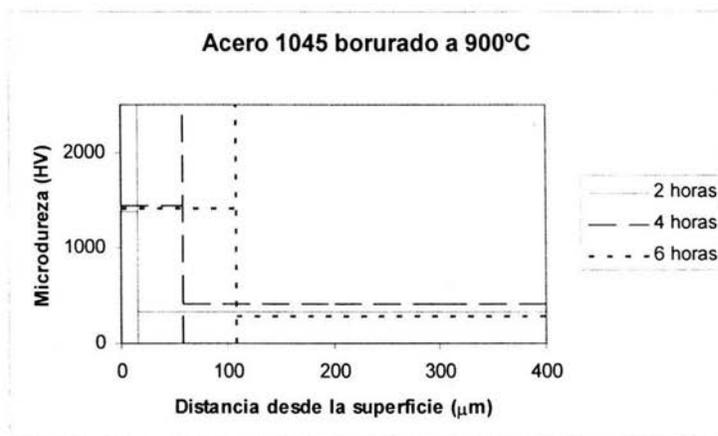


Figura 5.2 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 1045 boruradas a 900 °C durante 2,4 y 6 horas.

5.1.2 Tratamiento a 1000 °C

Para las probetas tratadas a 1000 °C, durante 2, 4 y 6 horas, se observaron capas relativamente uniformes cuya superficie no es plana. Para 6 horas de tratamiento se observó desprendimiento de capa aunque en pequeña cantidad; para los tres tiempos de tratamiento se observan precipitados cerca de la superficie.

La Figura 5.3 presenta los resultados de dureza para las probetas de acero 1045 boruradas a 1000 °C durante 2, 4 y 6 horas. Para estas probetas los valores de dureza promedio de capa son 1354, 1258 y 1385 HV respectivamente, y los valores de dureza promedio de matriz respectivos son 208, 284 y 223 HV. Para estas probetas se observa muy poca dispersión de valores dentro de la capa, además se observa que el perfil de durezas cae drásticamente al pasar de la capa a la matriz, aunque para la probeta borurada por 2 horas la caída se encuentra antes de alcanzarse el espesor promedio de capa.

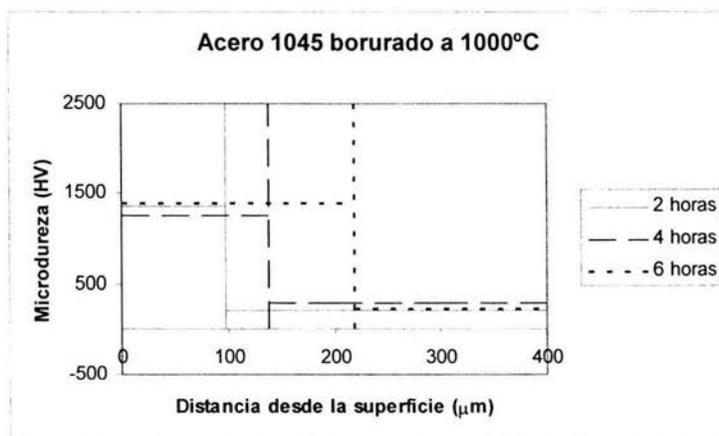


Figura 5.3 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 1045 boruradas a 1000 °C durante 2,4 y 6 horas.

5.1.3 Tratamiento a 1100 °C

Para las probetas boruradas a 1100 °C, durante 2, 4 y 6 horas se observó desprendimiento de capa, por lo que el espesor de capa no resultó ser uniforme, además se observa mayor cantidad de precipitados que para las probetas tratadas a 1000 °C. La cantidad de precipitados cerca de la superficie aumentó observándose también precipitados en la intercara capa-matriz. Se observó que en la capa sobre todo a 6 horas de tratamiento hay presencia de grietas.

En la Figura 5.4 se observa la gráfica de dureza contra distancia desde la superficie para las probetas boruradas a 1100 °C durante 2, 4 y 6 horas. Para estas probetas se obtuvieron durezas promedio de capa de 1233, 1260 y 1509 HV, para la matriz, las durezas que se obtienen son 833, 808 y 942 HV. Para las probetas boruradas durante 4 y 6 horas se observa que los valores de dureza dentro de la capa se encuentran muy cercanos al valor promedio de dureza, para la probeta borurada durante 2 horas se observa un mayor grado de dispersión. Para estas probetas se encontraron valores de dureza en la matriz más altos que para las probetas tratadas a 1000 y a 900 °C. En la matriz se observa que la distribución de valores de dureza es uniforme, y se observa que cerca de la línea del espesor promedio hay una caída en el valor de dureza por debajo del valor de dureza para la matriz.

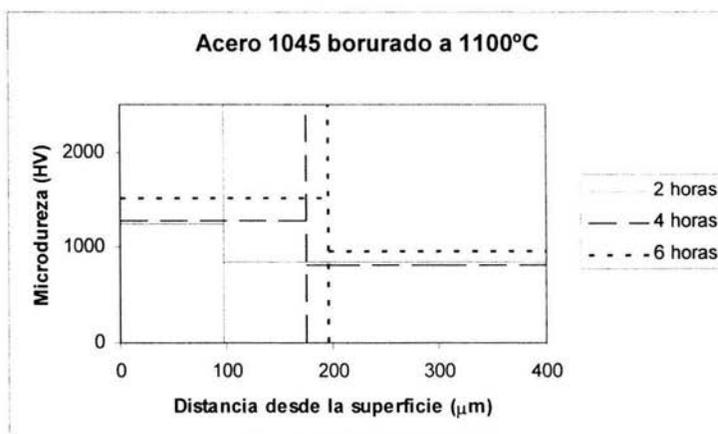


Figura 5.4 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 1045 boruradas a 1100 °C durante 2,4 y 6 horas.

5.1.4 Velocidad de corrosión a 1000°C borurada durante 4 horas

En la Figura 5.5 se muestra la curva Tafel obtenida para el acero 1045 borurado a 1000 °C durante 4 horas, para esta probeta se obtuvo una densidad de corriente de 0.1355 mA/cm² lo que produjo una velocidad de corrosión de 0.055785 mpy⁽²¹⁾. Cabe mencionar que para la probeta sin borurar se obtuvo una velocidad de corrosión de 0.114712 mpy. Por lo tanto, se observa que la velocidad de corrosión para el acero 1045 disminuyó casi en un 50 %.

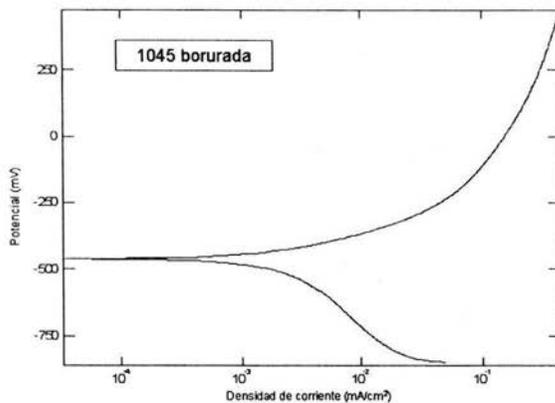


Figura 5.5 Curva Tafel obtenida para el acero 1045 borurado a 1000 °C durante 4 horas.

5.1.5 Discusión

En este acero, se observa que la forma de la capa es dentada, con una gran distancia entre las raíces de los dientes y sus puntas, además se obtiene una capa homogénea en espesor y en morfología. De estas observaciones se puede deducir que la velocidad de crecimiento en la dirección perpendicular a la superficie de la probeta fue homogénea y que la forma de la capa es dentada debido a la baja cantidad de elementos aleantes presentes en este acero.

Para las probetas boruradas a 900 °C no se observó desprendimiento, para las probetas boruradas a 1000 °C se observó desprendimiento ligero y para las probetas boruradas a 1100 °C, el desprendimiento fue significativo y aumentó gradualmente al

aumentar el tiempo de borurado. Además se presentaron precipitados cerca de la superficie de la probeta siendo más a mayor temperatura y tiempo de borurado. Además, los precipitados tendieron a acercarse a la intercara matriz-capas de boruros al aumentar estas dos variables. Según lo reportado en la literatura, este comportamiento puede asociarse con la expansión volumétrica y con la fragilización de la capa al formarse el FeB.

Para la probeta borurada a 1100 °C durante 6 horas se presentaron grietas que atraviesan completamente la capa, lo que sugiere que esta probeta estuvo sujeta a altos esfuerzos internos. La razón pudo ser la expansión volumétrica debida a la formación de la capa acompañada de la formación de FeB, creándose una intercara Fe₂B/FeB que es un sitio favorable para la creación y propagación de grietas.

En cuanto al espesor de capa, se puede ver en la Figura 5.6 que, para las probetas boruradas a 900 °C el espesor crece linealmente con el tiempo de tratamiento, mismo comportamiento que se observó para 1000 °C. Para la temperatura de 1100 °C, se observa que de 2 a 4 horas de borurado sí hay crecimiento de capa, pero de 4 a 6 horas ya no.

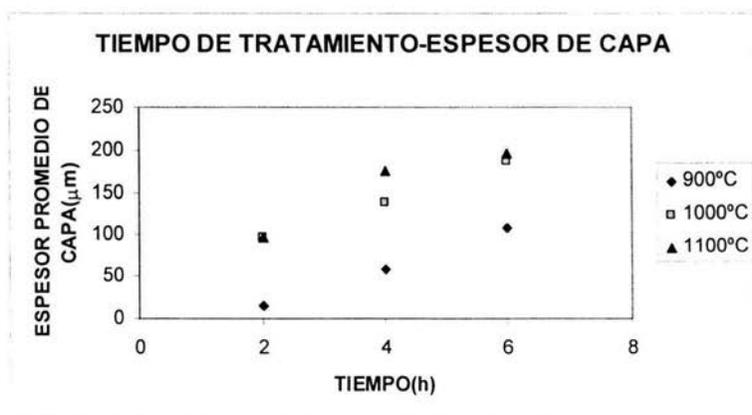


Figura 5.6 Espesor promedio de capa para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero 1045.

La Figura 5.7 muestra los valores de dureza promedio obtenidos para cada una de las probetas de acero 1045 boruradas durante 2, 4 y 6 horas. En esta figura se puede

observar que no hay gran diferencia de valores entre una condición de tratamiento y otra, pudiéndose determinar una dureza promedio para todas las capas de 1358 ± 92 HV. En cuanto a la dureza de la matriz, se puede ver que para 900 y 1000°C el valor de dureza es muy similar, mientras que para 1100 °C la dureza aumentó, lo cuál no tiene una explicación evidente, dado que el enfriamiento después de tratamiento termoquímico no es suficientemente rápido como para formar martensita.

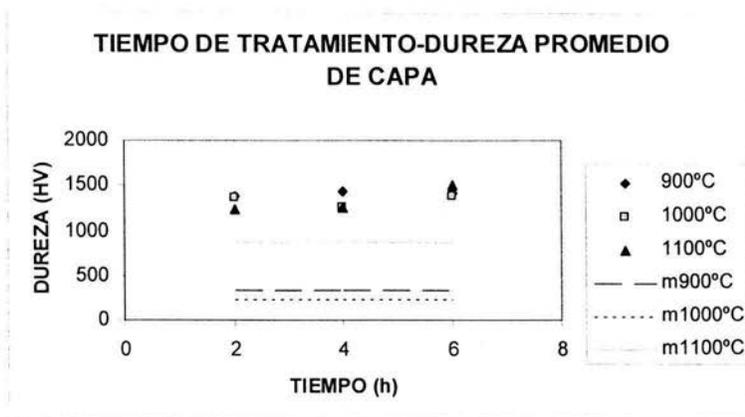


Figura 5.7 Durezas promedio de la capa borurada (símbolos) y de la matriz (líneas) para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero 1045.

Es importante mencionar aquí que, para las probetas boruradas a 900 °C durante 6 horas, 1000 °C durante 2 horas y 1100 °C durante 4 horas, se observa que la caída del perfil de durezas de la capa a la matriz se da en una distancia de la superficie menor que el espesor promedio determinado experimentalmente, esto sugiere que la forma de medición experimental del espesor de capa no fue lo suficientemente precisa.

En cuanto a las desviaciones de los valores con respecto al valor promedio de dureza en la capa debe mencionarse que para todas las probetas se consideraron los puntos menores o iguales al espesor promedio determinado experimentalmente.

La presencia de la capa borurada resulta no sólo en un aumento de la dureza sino también en una mejora en las propiedades químicas de la superficie. Así, la velocidad de corrosión para el acero 1045, borurado a 1000 °C durante 4 horas, disminuyó

significativamente comparándola con la velocidad de corrosión para el mismo acero sin borurar.

5.2 Acero 4140

La capa de boruros característica para el acero 4140 se muestra en la Figura 5.8, en ella puede verse la forma de los dientes, los cuales no tienen ángulos muy agudos en sus puntas, como sucede en el caso del acero 1045, además se observa que entre la base de los dientes y la punta no hay mucha distancia, por lo que los espacios sin formación de boruros son pequeños.



Figura 5.8 Fotomicrografía de una zona cercana a la superficie de una probeta de acero 4140 borurada a una temperatura de 1000 °C, durante 6 horas.

Los valores del espesor promedio obtenidos para las nueve probetas boruradas a 900, 1000 y 1100 °C se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Espesores promedio de capa (μm) obtenidos para las probetas de acero 4140 tratadas a 900, 1000 y 1100 °C durante 2,4 y 6 horas.

Temperatura	2 horas	4 horas	6 horas
900 °C	50	69.32	73.71
1000 °C	78.24	149.41	177.54
1100 °C	102	198.85	199.47

5.2.1 Tratamiento a 900 °C

Las metalografías de las probetas tratadas a 900 °C durante 2, 4 y 6 horas mostraron que no hubo desprendimiento de capa, que el espesor de capa es uniforme y que para las probetas boruradas durante 2 y 4 horas no hubo precipitados, mientras que la probeta borurada a 900 °C por 6 horas además de precipitados presentó desprendimiento.

La Figura 5.9, corresponde a los valores de dureza obtenidos para las probetas de acero 4140 boruradas a 900 °C, durante 2, 4 y 6 horas. Los valores de dureza promedio de capa para estas probetas fueron 1642, 1320 y 1776 HV, para las capas de boruros se observa que en las tres probetas hubo dispersión entre los valores de dureza y el valor de dureza promedio, los valores de dureza promedio para la matriz fueron 644, 650 y 660 HV respectivamente.

En los tres casos los perfiles de dureza muestran una caída al pasar de la capa a la matriz, en el caso de la probeta borurada por 2 horas la caída es drástica y se lleva a cabo a una distancia mucho mayor que el espesor promedio de capa; para la probeta borurada durante 4 horas la caída es drástica y se da en el espesor promedio; para la probeta de 6 horas se ve que hay una caída más suave en una distancia muy parecida al espesor promedio.

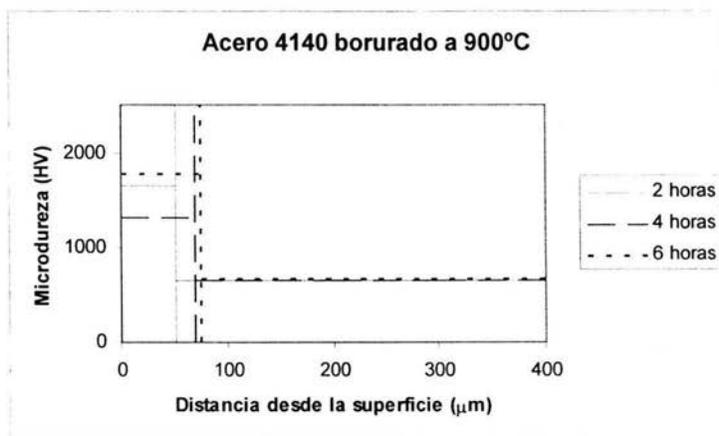


Figura 5.9 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 4140 boruradas a 900 °C durante 2,4 y 6 horas.

5.2.2 Tratamiento a 1000 °C

Para las probetas de acero 4140 boruradas a 1000 °C, se observaron precipitados, que aumentan al aumentar el tiempo de tratamiento, también se encontró que para todas las probetas tratadas a 1000 °C hubo desprendimiento de capa, aunque en mayor cantidad para 6 horas de tratamiento, en las probetas tratadas a 4 y 6 horas se observaron grietas que atraviesan toda la capa.

La figura 5.10 muestra los resultados de microdureza obtenidos para el acero 4140 borurado a 1000 °C, durante 2, 4 y 6 horas. Los valores respectivos de dureza promedio en la capa fueron 1440, 2180 y 1302 HV, el valor de dureza de la probeta borurada durante 4 horas es muy alto comparado con los valores obtenidos para los otros tiempos de borurado. Se observa también que para las probetas boruradas por 2 y 4 horas hay gran dispersión de valores dentro de la capa. Los valores de dureza de la matriz fueron 809, 670 y 660 HV.

Los perfiles de dureza caen marcadamente al pasar de la capa a la matriz: para la probeta borurada durante 2 horas la caída se da justo en el espesor promedio de capa, para 4 horas de borurado la caída de dureza se da después del espesor promedio de capa, y para la probeta borurada por 6 horas la disminución de dureza se da a una distancia menor que el espesor promedio de capa.

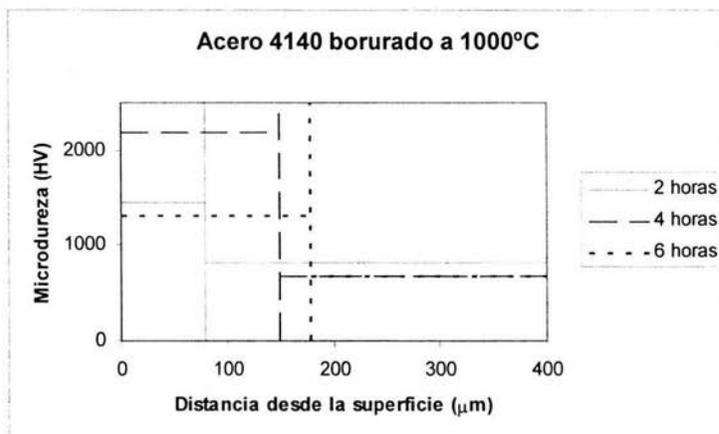


Figura 5.10 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 4140 boruradas a 1000 °C durante 2,4 y 6 horas.

5.2.3 Tratamiento a 1100 °C

Para las probetas tratadas a 1100 °C, durante 2, 4 y 6 horas se observó severo desprendimiento de capa, razón por la que el espesor de capa no es uniforme, además se observó gran cantidad de precipitados y grietas en la capa.

En la Figura 5.11 se presentan graficados los resultados de microdureza en la capa y en la matriz a diferentes distancias de la superficie para las probetas de acero 4140 boruradas a 1100 °C durante 2, 4 y 6 horas. Los valores de dureza de capa respectivos son 1702, 2154 y 1640 HV, los valores de dureza de la matriz fueron 569, 452 y 559 HV, los perfiles de dureza para estas probetas caen drásticamente al pasar de la capa a la matriz, para la probeta borurada durante 2 horas la caída es al alcanzarse el espesor promedio de capa, la probeta borurada por 4 horas presenta la caída de durezas después del espesor de capa promedio y la probeta borurada por 6 horas muestra dos líneas alrededor del espesor de capa promedio que podrían corresponder a la caída de durezas.

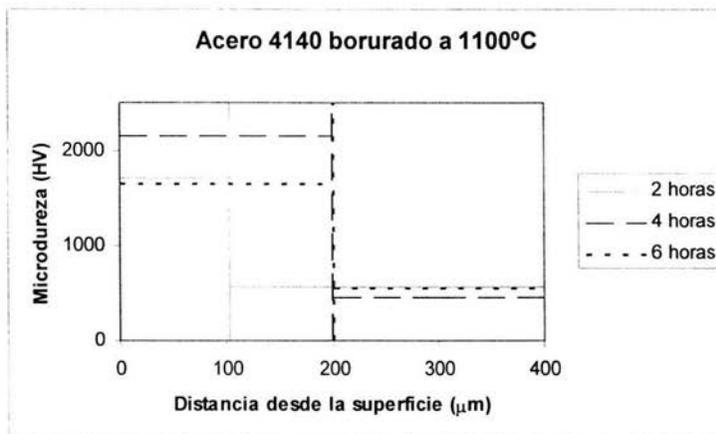


Figura 5.11 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 4140 boruradas a 1100 °C durante 2,4 y 6 horas.

5.2.4 Velocidad de corrosión a 1000°C borurada durante 4 horas

En la Figura 5.12 se muestra la curva Tafel obtenida para el acero 4140 borurado a 1000 °C, durante 4 horas. En esta figura se ve que la densidad de corriente obtenida para esta probeta fue de 0.1369 mA/cm² que corresponde a una velocidad de corrosión de 0.0625 mpy. Para la probeta sin borurar la velocidad de corrosión fue de 0.077962 mpy, lo que representa una ligera disminución en la velocidad de corrosión para la probeta borurada.

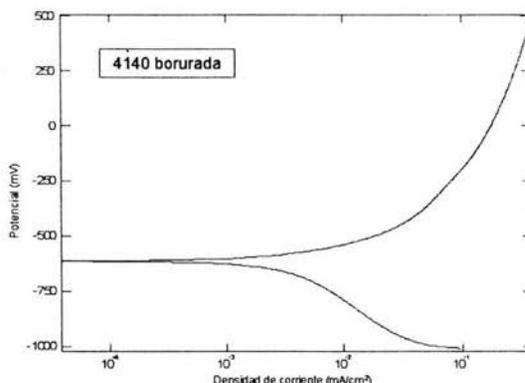


Figura 5.12 Curva Tafel obtenida para la probeta de acero 4140 borurada a 1000 °C durante 4 horas.

5.2.5 Discusión

Para este tipo de acero se encontró una capa regular, en la que la punta es redondeada, la unión entre dientes se da a espesores mayores que para los dientes de acero 1045, por lo que entre diente y diente no hay gran espacio sin formación de boruros.

También se observó que al aumentar la temperatura aumenta el desprendimiento de capa. A diferencia de las probetas de acero 1045 que no mostraron desprendimiento de capa a 900 °C, para la probeta de acero 4140 borurada a esta misma temperatura durante 6 horas se observa desprendimiento. Para las temperaturas de 1000 y 1100 °C el

desprendimiento es mayor a mayor tiempo de tratamiento y es mayor para las probetas boruradas a 1100 °C. Esto sugiere que en este acero la expansión volumétrica es mayor e incluso tiene consecuencias importantes a 900 °C, a diferencia del acero 1045, para el cual no hubo desprendimiento a la misma temperatura.

En cuanto a los precipitados, se observa el mismo comportamiento que para el desprendimiento de capa (a mayor temperatura y tiempo de tratamiento, la cantidad de precipitados es mayor) además en las probetas boruradas a 1100 °C durante 4 y 6 horas se presentaron grietas en la capa. La razón, al igual que para el acero 1045 puede deberse a la expansión volumétrica o a la formación de la intercara FeB/Fe₂B.

Los espesores de capa obtenidos para las probetas de acero 4140 boruradas a 900, 1000 y 1100 °C se muestran en la Figura 6.13. Se puede ver que el espesor de capa no aumenta de forma lineal al aumentar el tiempo de tratamiento: para 900 °C, el aumento en el espesor entre un tiempo de tratamiento y otro es pequeño, para 1000 °C sí hay un aumento importante de 2 a 4 horas de tratamiento, pero de 4 a 6 horas de tratamiento el aumento en el espesor es pequeño. Para 1100 °C, se ve un aumento en el espesor de capa al variar de 2 a 4 horas de tratamiento, pero de 4 a 6 horas el espesor de capa es el mismo, en este sentido es importante mencionar que esta capa es la que resultó tener mayor desprendimiento, razón por la cual no se observa variación entre el espesor de 4 y de 6 horas.

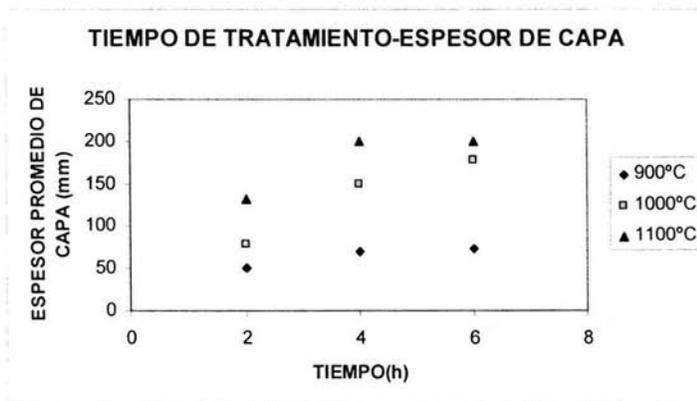


Figura 5.13 Espesor promedio de capa para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero 4140.

En la Figura 5.14, se muestran las durezas promedio en la capa borurada de acero 4140 obtenidas a las diferentes condiciones de temperatura y de tiempo. En esta figura se observa que las durezas para 2 horas de tratamiento se parecen en las tres temperaturas consideradas: para 4 horas se observa una diferencia marcada entre 900 y 1000 y 1100 °C, mientras que para 6 horas se observa una ligera diferencia entre cada temperatura. Se obtiene una dureza promedio de 1690 ± 319 HV.

En este acero, a diferencia del acero 1045, se observa mucha diferencia en el valor de dureza promedio dentro de la capa entre una condición de tratamiento y otra, lo que al determinar una dureza promedio para la capa de boruros formada en este acero produce una desviación muy grande. Para este acero se obtuvieron valores de dureza en la capa muy altos.

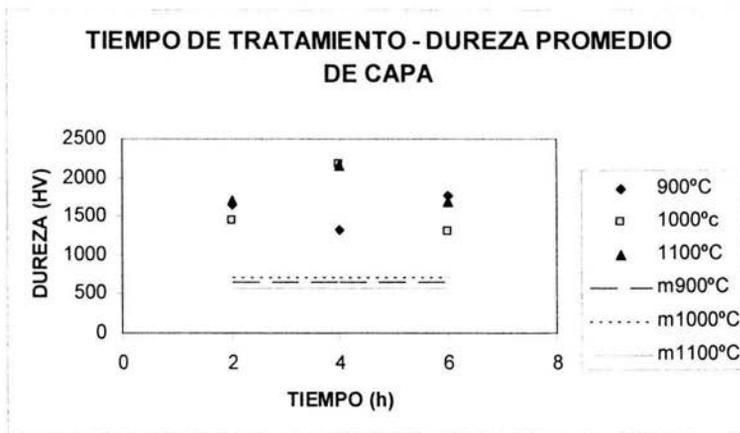


Figura 5.14 Durezas promedio de la capa borurada (símbolos) y de la matriz (líneas) para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero 4140.

En algunas gráficas de dureza contra distancia desde la superficie se observa que el espesor de capa determinado experimentalmente difiere bastante del espesor de capa mostrado por los valores de dureza, lo que reafirma lo dicho para el acero 1045: la forma de medir el espesor de capa no asegura valores reales.

Para la probeta de acero 4140 borurada a 1000 °C durante 4 horas se observó una disminución ligera en la velocidad de corrosión con respecto a la velocidad de corrosión

obtenida para la probeta del mismo acero sin borurar. Es decir, la presencia de la capa borurada no es tan efectiva para este acero como lo es para el acero 1045.

5.3 Acero 8620

En la Figura 5.15 se presenta la microestructura para un acero 8620 sometido a tratamiento de borurado. En esta figura se puede observar la capa de boruros característica para este acero. Los dientes presentan terminaciones redondeadas en lugar de ángulos agudos y el espesor de capa es muy irregular: También se observa que en la capa hay espacios en los que no hubo formación de boruros y que hay presencia de precipitados y de grietas que atraviesan la capa por completo.



Figura 5.15. Fotomicrografía de una zona cercana a la superficie de una probeta de acero 8620 borurada a una temperatura de 1100 °C, durante 4 horas.

En la Tabla 5.3, se muestran los espesores de capa obtenidos para los 9 tratamientos de borurado realizados en el acero 8620: a 900, 1000 y 1100 °C durante 2, 4 y 6 horas.

Tabla 5.3 Espesores promedio de capa (μm) obtenidos para las probetas de acero 8620 tratadas a 900, 1000 y 1100 °C durante 2, 4 y 6 horas.

Temperatura	2 horas	4 horas	6 horas
900 °C	47.2	77.64	80.4
1000 °C	81	116.9	166
1100 °C	106.5	185.5	285

5.3.1 Tratamiento a 900 °C

Para las probetas boruradas a esta temperatura se observó que casi no hay desprendimiento de capa, razón por la que el espesor se puede considerar uniforme, además se vio que el tamaño de los dientes varía y que hay una pequeña cantidad de precipitados.

En la Figura 5.16, se muestran los valores de dureza correspondientes a las probetas de acero 8620, boruradas a 900 °C durante 2, 4 y 6 horas, se puede observar que los valores de dureza promedio dentro de la capa de boruros son 1375, 1394 y 1136 HV respectivamente. En las gráficas correspondientes a 2 y 6 horas de borurado se ve que no hay gran dispersión de valores dentro de la capa de boruros; sin embargo, para la probeta borurada durante 4 horas sí se observa dispersión. Los valores de dureza promedio de la matriz son 328, 365 y 366 HV. En cuanto al perfil de durezas, se observa que para las probetas boruradas durante 2 y 6 horas la caída de dureza al pasar de la capa a la matriz es drástica y se da en el espesor promedio de capa, mientras que para la probeta borurada durante 4 horas el perfil muestra una caída más suave al pasar de la capa a la matriz, esta caída inicia antes de alcanzarse el espesor promedio de capa. Para los tres casos se observa que dentro de la matriz el valor de dureza es uniforme.

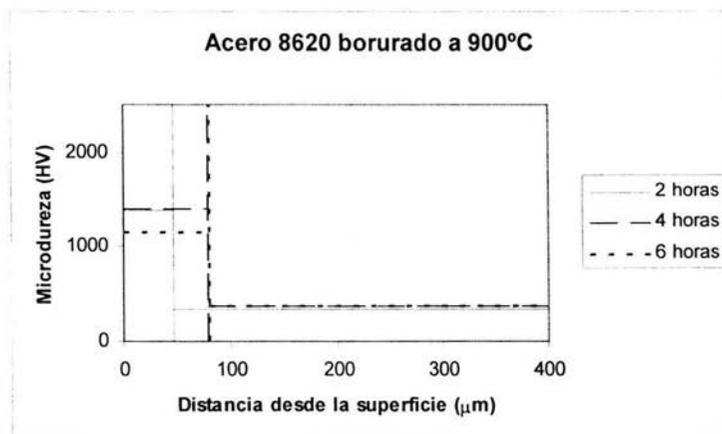


Figura 5.16 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 8620 boruradas a 900 °C durante 2,4 y 6 horas.

5.3.2 Tratamiento a 1000 °C

Para las probetas de acero 8620 boruradas a 1000 °C, se observó poco desprendimiento de capa y un espesor no uniforme, además para la probeta borurada durante 6 horas hubo formación de precipitados cerca de la superficie.

Los resultados de microdureza correspondientes a las probetas de acero 8620, boruradas durante 2, 4 y 6 horas se muestran en la Figura 5.17. Para estas probetas los valores de dureza promedio dentro de la capa son 1380, 1227 y 1795 HV. Para las tres probetas se observa dispersión en los valores de dureza dentro de la capa, siendo la dispersión mayor para la probeta borurada durante 6 horas, cabe mencionar que es para esta probeta para la que se obtuvieron mayores valores de dureza dentro de la capa, siendo el valor máximo obtenido de 2921 HV. Los valores de dureza promedio de la matriz fueron 326, 296 y 325 HV. Los perfiles de dureza caen marcadamente para las tres probetas, para las probetas boruradas durante 2 y 4 horas la caída se presenta antes del espesor de capa promedio, para la probeta borurada durante 6 horas la caída se da después del espesor de capa promedio.

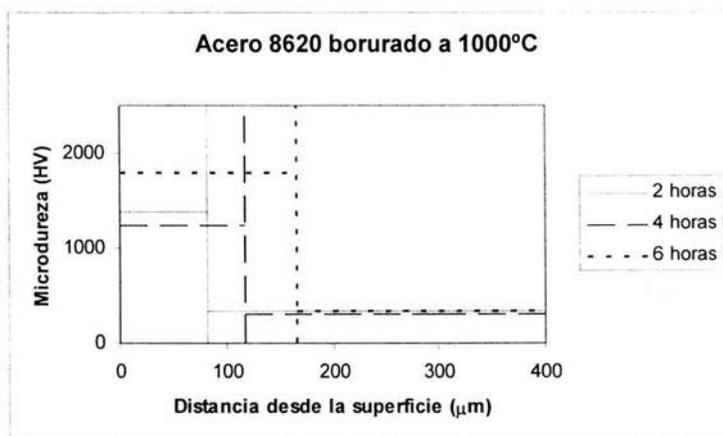


Figura 5.17 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 8620 boruradas a 1000 °C durante 2,4 y 6 horas.

5.3.3 Tratamiento a 1100 °C

Las probetas boruradas a 1100 °C durante 2, 4 y 6 horas presentaron desprendimiento de capa, pero el grado de desprendimiento no fue muy alto, se observó una cantidad significativa de precipitados y bastantes espacios sin borurar entre los dientes.

En la Figura 5.18 se muestran los valores de dureza obtenidos para las probetas de acero 8620 boruradas a 1100 °C durante 2, 4 y 6 horas, las durezas promedio correspondientes a estas probetas son 1077, 1228 y 1008 para la capa y 390, 328 y 485 para la matriz. Dentro de la capa se observa que para las probetas boruradas durante 2 y 4 horas el grado de dispersión es alto. Para las probetas boruradas durante 2 y 4 horas se observa que el perfil de durezas cae drásticamente al pasar de la capa a la matriz, mientras que para la probeta borurada durante 6 horas la caída de dureza es suave. Para la probeta borurada durante 2 horas se observa que antes del espesor de capa promedio hay dos valores de dureza que corresponden a la matriz; para la probeta borurada durante 4 horas hay un valor dentro de la matriz que está muy cerca del valor promedio de capa.

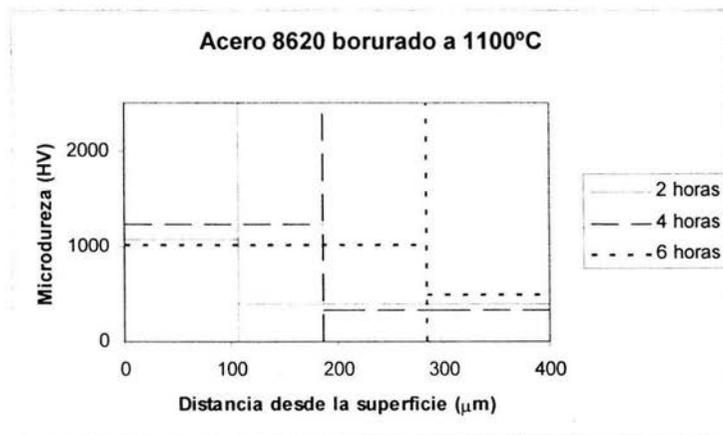


Figura 5.18 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 8620 boruradas a 1100 °C durante 2,4 y 6 horas.

5.3.4 Velocidad de corrosión a 1000°C borurada durante 4 horas

En la Figura 5.19 se muestra la curva Tafel obtenida para el acero 8620 borurado a 1000 °C, durante 4 horas. La densidad de corriente obtenida fue de 0.1871601 mA/cm², que corresponde a una velocidad de corrosión de 0.085886 mpy, contra 0.00000265 mpy para el mismo acero sin borurar, por lo que se observa que hubo un aumento en la velocidad de corrosión al realizar el tratamiento termoquímico de borurado.

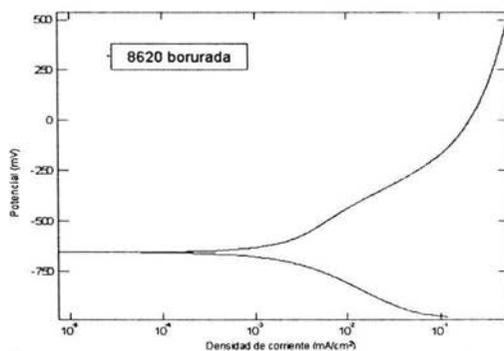


Figura 5.19 Curva Tafel obtenida para la probeta de acero 8620 borurada a 1000 °C durante 4 horas.

5.3.5 Discusión

La capa de boruros formada tiene un espesor irregular para todas las probetas, pues hay dientes que tienen mayor espesor aún siendo contiguos, las puntas de los dientes son redondeadas, igual que en el acero 4140. Lo que se explica porque la cantidad de elementos aleantes aumenta y la capa tiende a ser menos dentada, además se ve que el crecimiento de los granos en la dirección paralela a la superficie de las probetas ocurre a espesores de capa mayores que para los aceros 1045 y 4140.

A diferencia de los aceros 1045 y 4140, la capa de boruros formada en este acero muestra en su interior espacios en los que no hubo formación de boruros, lo que sugiere que hay algún tipo de compuesto que no permite la difusión del boro a través de él, aunque se necesita realizar un análisis químico para saber porqué se da este

comportamiento, el níquel, puede ser el responsable de este comportamiento, pues es el único elemento que no se encuentra en ninguno de los otros aceros estudiados.

Para este acero se tuvo el menor desprendimiento de capa, aunque también se presentaron precipitados, que aumentan al aumentar la temperatura y el tiempo de tratamiento, al igual las grietas, que en algunos casos atraviesan toda la capa. Por este comportamiento, se puede observar que la expansión volumétrica de este acero es menor que para los demás aceros aquí estudiados. Esto puede explicar porqué fue para este acero para el que se obtuvo un mayor espesor de capa, aunque también puede deberse que el coeficiente de difusión del boro sea mayor que en los otros aceros.

En la Figura 5.20 se muestran los espesores de capa obtenidos para las probetas de acero 8620 boruradas a 900, 1000 y 1100 °C, durante 2, 4 y 6 horas. En esta figura se puede ver que para las tres temperaturas de tratamiento el espesor de capa varía casi linealmente con el tiempo y la pendiente de las líneas espesor de capa-tiempo de tratamiento es ligeramente más pronunciada conforme aumenta la temperatura de borurado, lo que indica que a mayor temperatura el crecimiento de capa es mayor.

La Figura 5.21, muestra las durezas de capa y de matriz obtenidas para las probetas de acero 8620, boruradas a cada una de las condiciones de temperatura y tiempo. En esta figura se observa que el valor de la dureza de capa de boruros difiere mucho de un tratamiento a otro, para las tres probetas boruradas durante 4 horas el valor de dureza promedio en la capa es muy parecido, sin embargo para 6 horas de borurado el valor en la dureza es muy diferente. El valor promedio de dureza para esta capa es 1291 ± 233 HV. En este acero se puede justificar esa diferencia porque hubo zonas donde no había precipitados. La dureza de la matriz es muy parecida para las tres temperaturas a las que fue sometido este acero.

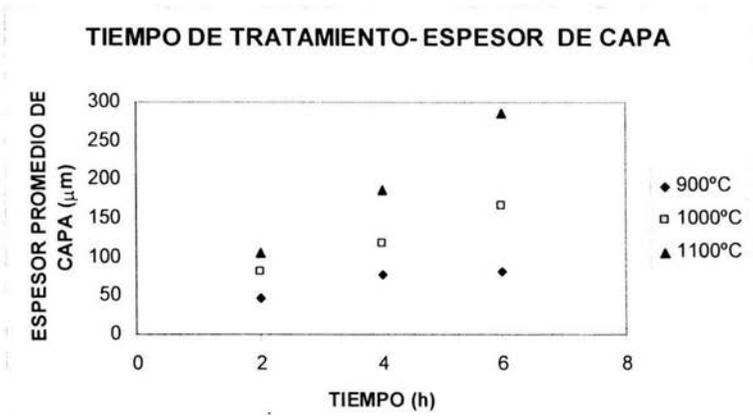


Figura 5.20 Espesor promedio de capa para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero 8620.

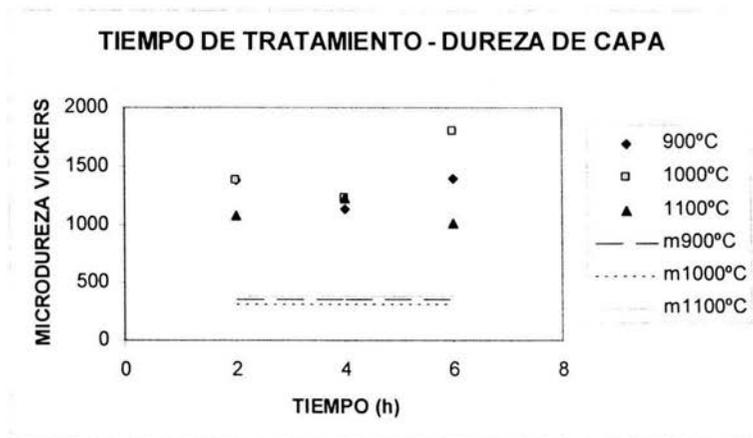


Figura 5.21 Durezas promedio de la capa borurada (símbolos) y de la matriz (líneas) para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero 8620.

En las gráficas de dureza contra distancia desde la superficie se puede ver que hay dispersión entre los valores de dureza promedio en la capa y los valores de dureza determinados experimentalmente. Para este acero se observa que el perfil de durezas cae casi a la distancia correspondiente al espesor de capa determinado experimentalmente.

La velocidad de corrosión obtenida para la probeta de acero 8620 es mucho mayor que la velocidad de corrosión obtenida para el acero sin tratamiento. Este resultado sorpresivo puede explicarse debido a la formación de grietas y al desprendimiento de capa, que tienen gran influencia en la velocidad de corrosión al formar canales que permiten que el medio corrosivo penetre hasta estar en contacto con el material sin borurar.

5.4 Acero O1

En las Figuras 5.22 y 5.23 se observan dos fotomicrografías correspondientes a capas de boruros para probetas de acero O1, la Figura 5.22 presenta la capa de boruros característica de los aceros O1, en esta figura se puede ver la capa como una banda continua de boruros, cuyo espesor podría considerarse uniforme, en la intercara capa-matriz se ve una franja separada de la capa en la que hay boruros precipitados inmersos en un compuesto de composición diferente a la de la capa o a la de la matriz (fase oscura en la que se encuentran los precipitados de boruros). Dentro de la capa se observa que hay muchos precipitados, sobre todo cerca de la superficie En la Figura 5.23 se observa que dentro de la capa de boruros pueden distinguirse dos fases, una que muestra claramente los dientes y otra que delimita a la banda de boruros.

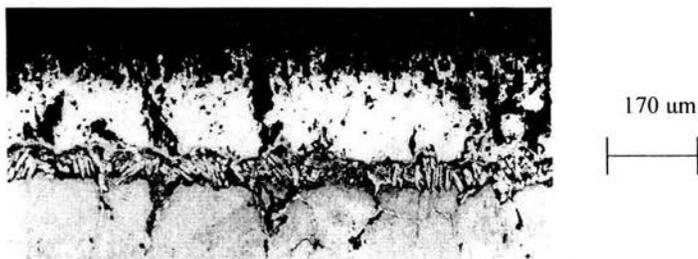


Figura 5.22 Fotomicrografía de una zona cercana a la superficie de un una probeta de acero O1 borurada a una temperatura de 1100 °C, durante 6 horas.



Figura 5.23 Fotomicrografía de una zona cercana a la superficie de un una probeta de acero O1 borurada a una temperatura de 1000 °C, durante 4 horas.

La Tabla 5.4 muestra los valores del espesor promedio obtenido para las probetas de acero O1, boruradas a 900, 1000, 1100 °C, durante 2, 4 y 6 horas.

Tabla 5.4 Espesores promedio de capa (μm) obtenidos para las probetas de acero O1 tratadas a 900, 1000 y 1100 °C durante 2, 4 y 6 horas.

Temperatura	2 horas	4 horas	6 horas
900 °C	42.91	98.7	98.73
1000 °C	57.2	150.5	150.1
1100 °C	98.73	140.9	223.7

5.4.1 Tratamiento a 900 °C

En las metalografías correspondientes a las probetas de acero O1, boruradas a una temperatura de 900 °C, durante 2, 4 y 6 horas se observó ligero desprendimiento de capa, por lo que el espesor resultó casi constante. Se observó poca cantidad de precipitados y para las probetas boruradas por 2 y 4 horas se observaron pequeños sitios dentro de la capa donde no hubo formación de boruros.

En la Figura 5.24, se muestran los valores de microdureza obtenidos para las probetas de acero O1, boruradas a una temperatura de 900 °C, durante 2, 4, y 6 horas, en estas figuras puede verse que los valores de dureza promedio dentro de la capa para 2, 4 y 6 horas de borurado son 1471, 1420 y 1488 HV respectivamente, valores que no muestran gran diferencia uno de otro, en las gráficas se observa que la dispersión de los valores con respecto al valor promedio de dureza no es muy grande para las probetas boruradas durante 2 y 4 horas, sin embargo, para la probeta tratada durante 6 horas, el grado de dispersión si resultó ser alto. En cuanto a la dureza promedio de la matriz no se observa gran diferencia en las probetas tratadas durante 2 y 6 horas (respectivamente 415 y 451 HV), pero para la probeta tratada durante 4 horas el valor promedio de dureza aumentó hasta un valor de 882 HV. En las gráficas se observa que el perfil de durezas cae drásticamente al pasar de la capa a la matriz para las probetas tratadas durante 2 y 6 horas, para la probeta borurada durante 4 horas el perfil de durezas muestra una caída que podría considerarse suave, mostrando en el espesor de capa promedio valores mucho menores que el valor de dureza promedio dentro de la matriz. En la matriz, el perfil de durezas es lineal para las tres probetas.

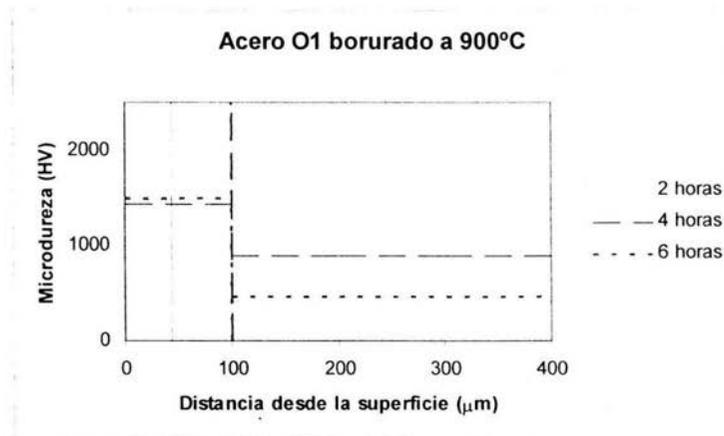


Figura 5.24 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero O1 boruradas a 900 °C durante 2,4 y 6 horas.

5.4.2 Tratamiento a 1000 °C

Para las probetas de acero O1 boruradas a 1000 °C durante 2, 4 y 6 horas se observa que hay desprendimiento de capa (que aumenta gradualmente al aumentar el tiempo de tratamiento), razón por la que el espesor de capa no es uniforme, además en las tres probetas se observan grietas que atraviesan totalmente la capa y una cantidad considerable de precipitados.

Los resultados de dureza obtenidos para las probetas de acero O1 boruradas a una temperatura de 1000 °C se presentan en la Figura 5.25, los valores de dureza promedio dentro de la capa son 1383, 1282 y 1203 HV respectivamente, estos valores no muestran gran variación entre sí. En la capa, los valores de dureza muestran gran dispersión para 2 y 6 horas. Para la matriz se observa que no hay gran diferencia en los valores para una probeta y otra. En cuanto al perfil de dureza se ve que para la probeta borurada por 2 horas, el valor de dureza cae drásticamente al pasar de la capa a la matriz; para la probeta borurada por 4 horas no se tiene suficiente información para asegurar que el perfil cae drásticamente, pero para la probeta borurada por 6 horas no se puede distinguir dónde cae el perfil, pues entre 100 y 150 micrómetros (espesor de capa promedio) hay valores de dureza que podrían corresponder a la matriz y valores que corresponden a la capa.

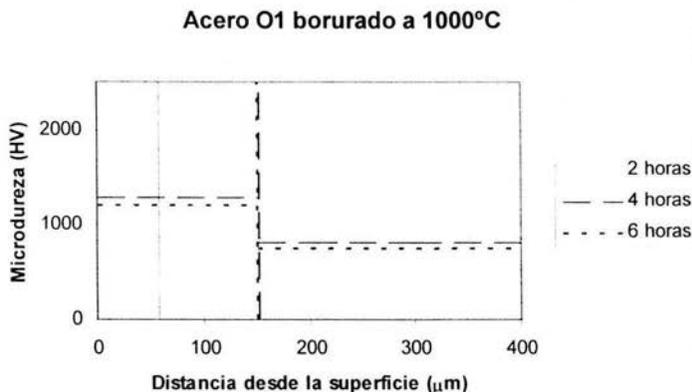


Figura 5.25 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero O1 boruradas a 1000 °C durante 2,4 y 6 horas.

5.4.3 Tratamiento a 1100 °C

En las probetas de acero O1 boruradas a 1100 °C durante 4 y 6 horas hubo severo desprendimiento de capa por lo que el espesor no fue uniforme. Para la probeta borurada durante 2 horas el grado de desprendimiento no fue tan grande. En las tres probetas se observaron algunas grietas y precipitados en gran cantidad, cabe mencionar que para estas probetas el desprendimiento fue visible durante el enfriamiento, ya que se presentó “descascamiento”.

La Figura 5.26 muestra los perfiles de dureza obtenidos para las probetas boruradas a 1100 °C durante 2, 4 y 6 horas, los valores de dureza para estas probetas son 1758, 1329 y 1402 HV, en la capa se observa que los valores de dureza muestran gran dispersión para la probeta borurada durante 2 horas, para las otras probetas los valores de dureza no varían demasiado. En la matriz los valores de dureza fueron 1002, 617 y 843 HV. Los perfiles de dureza muestran caídas drásticas al pasar de la capa a la matriz, cabe mencionar que para la probeta borurada por 4 horas a esta temperatura se observa que en el espesor promedio de capa la dureza cae a valores menores a la dureza promedio de la matriz.

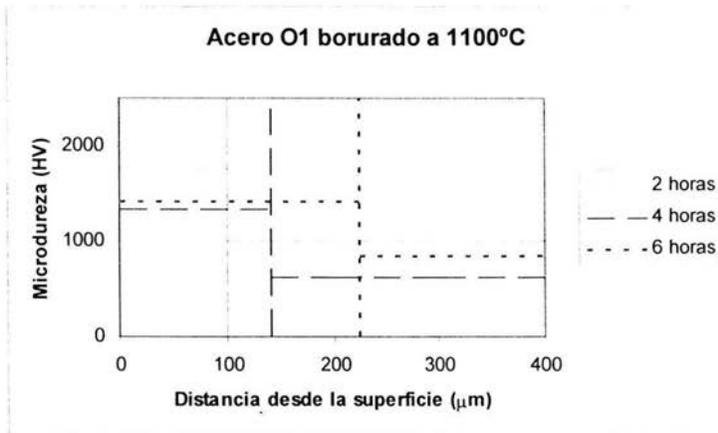


Figura 5.26 Perfil de microdureza, en la capa borurada y en la matriz, obtenido para las probetas de acero 8620 boruradas a 1100 °C durante 2,4 y 6 horas.

5.4.4 Velocidad de corrosión a 1000°C borurada durante 4 horas

En la Figura 5.27 se muestra la curva Tafel obtenida para el acero O1 borurado a 1000 °C, durante 4 horas. Esta probeta mostró una densidad de corriente de 0.214 mA/cm², que corresponde a una velocidad de corrosión de 0.0983 mpy, contra una velocidad de corrosión de 0.072024 mpy para la probeta sin borurar.

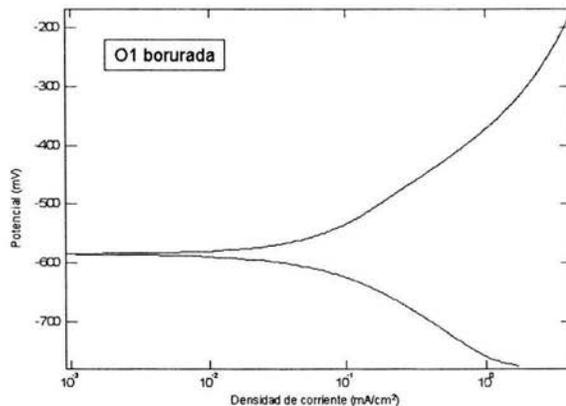


Figura 5.27 Curva Tafel obtenida para la probeta de acero O1 borurada a 1000 °C durante 4 horas.

5.4.5 Discusión

La forma de la capa de boruros es plana, a diferencia de la formada en los otros aceros, donde la capa formó dientes, debido al efecto del tungsteno como elemento aleante.

En la capa se aprecian dos fases, una que forma dientes y otra que forma el complemento para que la capa sea una banda continua. A diferencia de los otros aceros, aquí la existencia de dos capas es muy marcada, lo que puede ser debido a la existencia de estas dos capas. Esto pudo ser responsable de que el desprendimiento de la capa en este acero fuera notorio durante el enfriamiento, ya que se observaba expulsión de la superficie, caracterizada además por un sonido particular de agrietamiento.

Se presentó una zona entre la capa de boruros y la matriz en la que hay precipitados; en esta zona la microdureza mostró una disminución. Los precipitados se encuentran en una fase que presenta diferente apariencia que la matriz y que los boruros. En este caso, es importante mencionar que algunos elementos aleantes son segregados a la intercara matriz-capas de boruros, por lo que sería importante realizar un análisis químico de esta fase y estudiar el comportamiento del níquel en este acero.

La cantidad de precipitados aumentó conforme aumentó el tiempo de borurado, sobre todo cerca de la superficie. Se presentaron grietas en la capa para las probetas boruradas a 1100 °C durante 4 y 6 horas.

En la Figura 5.28, correspondiente al espesor de capa promedio obtenido para cada tratamiento de acero O1, se observa que para 900 °C el espesor aumenta de 2 a 4 horas de borurado, pero disminuye para 6 horas de borurado, lo que representa un desprendimiento muy grande. A 1000 °C el espesor aumenta de 2 a 4 horas, pero muestra una ligera disminución al pasar a 6 horas. Debe mencionarse que a mayor tiempo de borurado hubo mayor desprendimiento, para 1100 °C el espesor de capa aumenta casi linealmente al aumentar el tiempo de tratamiento, lo que podría sugerir que el desprendimiento de capa fue proporcional al tamaño de capa ya que para esta temperatura todas las probetas mostraron desprendimiento.

ESPESOR DE CAPA-TIEMPO DE TRATAMIENTO

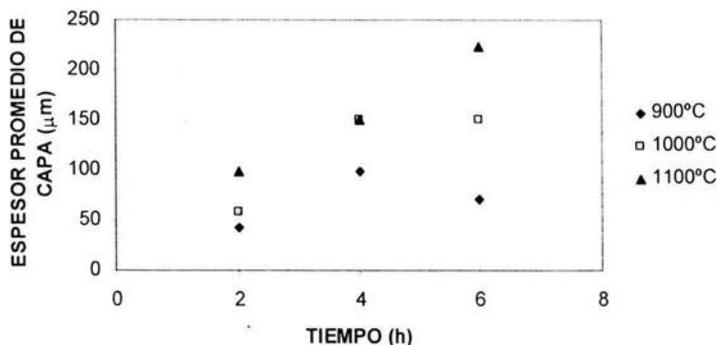


Figura 5.28 Espesor promedio de capa para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero O1.

En la Figura 5.29 se muestran los valores de dureza (dentro de la capa y en la matriz) que se obtuvieron para las probetas de acero O1. En esta figura puede verse que hay seis probetas que muestran valores de dureza muy parecidos, pero hay un valor (correspondiente a la probeta borurada a 1000 °C durante 4 horas) cuyo valor de dureza es mucho más alto que el de las otras probetas. Para estos datos se obtiene una dureza de capa para el acero O1 de 1523 ± 310 HV. En la matriz la dureza varía en un rango de 580 a 950 HV.

En cuanto a los perfiles de dureza, en la mayoría de las probetas se observa desviación de los valores con respecto al valor de dureza promedio dentro de la capa. Para algunas probetas, cerca del espesor promedio de capa, se ve una disminución del valor aún por debajo de la dureza de la matriz, esto puede deberse a que las mediciones se tomaron en posiciones donde existen precipitados que se encuentran entre la capa y la matriz, concretamente en la fase donde se encuentran inmersos, que muestra una apariencia diferente a la de la matriz y a la de la capa y que parece ser más suave que las otras fases.

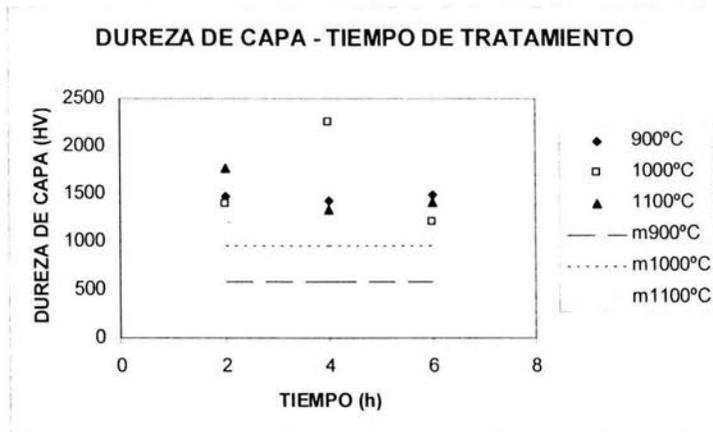


Figura 5.29 Durezas promedio de la capa borurada (símbolos) y de la matriz (líneas) para cada condición de temperatura y tiempo de borurado de probetas de acero O1.

Para la probeta de acero O1 borurada a 1000 °C durante 4 horas se obtuvo una velocidad de corrosión ligeramente mayor que la obtenida para la probeta del mismo acero sin borurado.

5.5 Comentarios generales

Para el acero 1045 se encontró que la temperatura de 1100°C no es conveniente para realizar el tratamiento termoquímico de borurado, porque produce gran desprendimiento de capa. Para este tipo de acero se obtuvieron valores de dureza de capa muy similares para todas las condiciones de tratamiento.

El acero 4140 muestra que a una temperatura de 900°C el tiempo no tiene demasiada influencia en el espesor de capa, además se observa que las condiciones óptimas de borurado para este acero son 1000°C durante 2 y 4 horas. Para estas probetas se observa mayor variación en los valores de dureza de capa que en el acero 1045.

Entre el acero 1045 y 4140 hay una pequeña diferencia en la morfología de la capa. Además en el acero 4140 se observa que los espacios sin boruros entre dientes son menores.

Para el acero 8620 es para el que se observa mayor desprendimiento de capa. Sin embargo, para este acero se observa que el espesor de capa aumenta proporcionalmente con el tiempo, para todas las temperaturas y los tiempos.

Los aceros 1045, 4140 y 8620 tienen una morfología de capa de boruros muy similar, la mayor diferencia es que para el acero 8620, dentro de la capa se presentan zonas donde no hubo formación de capa.

Para el acero O1, se encontró una morfología de capa muy diferente a la de los aceros 1045, 4140 y 8620: esta capa es continua, lo que sugiere que los mecanismos de formación de capa son diferentes. Para este acero se observó desprendimiento mucho mayor que para los otros aceros, el desprendimiento fue visible a simple vista. Como se mencionó anteriormente, esto podría ser por la cantidad de elementos aleantes en este acero, que provocan que la capa sea más plana que en el resto de los aceros.

Para todos los aceros a mayor temperatura hay mayor desprendimiento de capa, y el mismo efecto se observó con la variable tiempo de proceso. Esto puede deberse a que al aumentar la temperatura el coeficiente de difusión aumenta por lo que la distancia

de difusión, se incrementa, incrementándose la expansión volumétrica o bien por la oxidación de la capa.

En cuanto a las velocidades de corrosión, se observa que disminuyen en los aceros 1045 y 4140, mientras que los aceros 8620 y O1 muestran mayor velocidad de corrosión que las probetas que no fueron sometidas a tratamiento termoquímico de borurado, cabe mencionar que estas probetas son las que mostraron mayor desprendimiento y mayor cantidad de grietas y precipitados. Para las pruebas de corrosión es difícil obtener una conclusión, pues se necesita realizar una revisión de la superficie de la probeta para asegurar que se encuentra libre de fracturas y que el espesor de capa es uniforme, para que los resultados de corrosión sean confiables y representen a la realidad acertadamente.

Para este trabajo, no se consideró el efecto de la superficie y composición de cada acero en el papel que juega la superficie del acero como catalizador para que se forme boro activo y se introduzca dentro de la red, además no se investigó la formación de FeB a partir de Fe₂B y cómo afecta en la difusión del boro, pero sería interesante saberlo, pues eso proporcionaría herramientas para entender por qué se forma una capa diferente para cada acero, además de que podría permitir predecir de una manera cuantitativa el espesor de capa obtenido a cierta temperatura o durante cierto tiempo. Esto último permitiría realizar cálculos de tiempo y temperatura de tratamiento para aceros específicos para obtener un espesor adecuado sin que haya desprendimiento de capa.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos al aplicar el tratamiento termoquímico de borurado por medio de pasta a tres temperaturas (900,1000 y 1100 °C) durante tres tiempos diferentes (2, 4 y 6 horas) muestran que:

- El tipo de capa formada está determinado por la composición química del acero, siendo la forma de la capa dentada para tres tipos de acero y en forma de banda continua para el acero O1, sin embargo, se observan diferencias entre una y otra capa aun cuando tengan la misma forma.
- Al aumentar la temperatura el espesor de la capa aumenta aunque también aumenta el grado de desprendimiento.
- Al aumentar el tiempo de tratamiento el espesor de capa también aumenta. Además se observa que hay mayor desprendimiento de capa y mayor cantidad de precipitados; en algunos casos se observa que también hay grietas.

Algunas observaciones particulares para los aceros utilizados en este trabajo, se presentan a continuación:

- ▲ Para el acero 1045 es conveniente realizar el tratamiento termoquímico de borurado a una temperatura de 1000 °C durante tiempos menores o iguales a 4 horas.
- ▲ Para el acero 4140, es conveniente realizar el borurado a temperaturas de 900 o de 1000 °C pero no se recomienda a temperaturas mayores de 1000 °C, el tiempo de tratamiento debe ser menor a 6 horas.
- ▲ Para el acero 8620, no se recomienda utilizar borurado si se va a someter a la pieza a ambientes corrosivos. Además se debe de realizar el tratamiento a la menor

temperatura posible, de manera que se alcance el espesor deseado, tratando de evitar formación de grietas.

- ▲ Para el acero O1 se recomienda realizar el borurado solamente a temperaturas menores o iguales a 900 °C, y para aplicaciones en las que no haya esfuerzos externos involucrados, pues la capa puede desprenderse.
- ▲ Las capas que forman dientes tienen mayor adherencia a la matriz que la capa plana formada en el acero O1.
- ▲ Es conveniente tomar en cuenta el efecto de otras variables sobre el tratamiento termoquímico de borurado pues en este trabajo no se hicieron consideraciones como el que en algunas direcciones el tamaño de la capa de boruros sea mayor.
- ▲ Uno de los mayores problemas encontrados durante este trabajo fue que la pasta para borurar endurece al enfriarse siendo muy difícil quitarla llegando a provocar daño en la capa de boruros formada. Se recomienda trabajar en ésta línea para trabajos futuros.

En cuanto a la técnica de medición de espesor de capa se observó que no es muy confiable, pues arroja resultados que no coinciden con los datos obtenidos para el perfil de durezas, es probable que el hecho de medir a 50 aumentos provoque errores grandes.

7. BIBLIOGRAFÍA

- 1) **ASM Handbook**, Vol.4, Heat treating, 1991, ASM International, USA, p.p. 437-447
- 2) K. Genela, I. Ozbek y C. Bindal. "Kinetics of boriding of AISI W1 Steel", *Materials Chemistry and Physics*, 2003, Vol. 347, p.p. 311-314.
- 3) Shewmon Paul G. **Transformation in metals**, J. Williams Book Company, USA, 1983.
- 4) **Chemical Metallurgy. A tribute to Carl Wagner**. The Metallurgical Society of AIME, USA, 1981.
- 5) P. Gopalakrishnana, P. Shankar, R.V. Subbu Rao y M. Sundara, S.S. Ramakrishnana. "Laser surface modification of Low Carbon Boride Steels", *Materials Science and Engineering A*, 2000, Vol. 44, pp. 707-712.
- 6) **ASM Metals Reference Book. A Handbook of data about metals and metal working**, American Society for Metals, USA, 1991, p. 352.
- 7) **ASM Metals Reference Book. A Handbook of data about metals and metal working**, American Society for Metals, USA, 1991, p. 373.
- 8) P. X. Yan, X. M. Zhang, J. W. Xu, Z. G. Wu y Q. M. Song. "High-Temperature Behavior of the Boride Layer of 45 Carbon Steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, Vol. 71, pp.107-110.
- 9) C.-H. Xua, W. Gao y Y.-L. Yangb. "Superplastic Boronizing of Low Alloy Steel", *Journals of Materials Processing Technology*, 2001, Vol.108, p.p 349-355.

- 10) **Smithells Metals Reference Book**. 7a.ed. Butterworth-Heinemann, Great Britain, 1992.
- 11) Z.-S. Jiang, L.-X. Zhang, L.-G. Li, X.-R. Pei y T.-F. Li. "Structure of Boride Layers and the Transition Zone Produced by Boronization", *J. Heat Treating*, 1982, Vol.2, pp. 337-342
- 12) S. Sen, I. Ozbek, U. Sen y C. Bidal. "Mechanical Behavior of Borides Formed on Borided Cold Work Tool Steel", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 111, p.p. 210-219.
- 13) S.Yu. Tarasov, G.V. Trusova, A.V. Kolubaev y O.V. Sizova. "Structural Properties of Boride Coatings for Triboengineering", *Metals Science and Heat Treatment*, 1995, Vol. 37, p.p. 257-260.
- 14) Ya. B. Chernov, A.I. Anfinogenov y I.N. Veselov. "Special Features of the Technology of Boronizing Steel in a Calcium Chloride Melt", *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 41, 1999, pp. 511-515.
- 15) M. Carbuicchio. "Influence of Chromium on Boride Coatings Produced on Iron Alloys", *Thin solid films*, 1985, Vol. 126, p.p. 299-305.
- 16) C.L.Ge y R.C.Ye. "Research on Self Propagating Eutectic Boriding", *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, Vol. 124, p.p.14-18
- 17) B. Podgornik. "Coated Machine Elements-Fiction or Reality?", *Surface and Coatings Technology*, 2001, Vol. 146-147, p.p. 318-323.
- 18) **Heat Treater's Guide Standard Practices and Procedures for Steel**. Ed. P.M. Unterweiser, H.E. Boyer y J.J. Kubbs. American Society for Metals. Metals Park, Ohio, 1982.

- 19) **Annual book of ASTM standards 2000**. Section three. Metals Test Methods and Analytical Procedures. Vol. 03.01
- 20) A. S. Kholin. "Phase Composition and Crack Resistance of Alloy Boride Layers on Steel", *Metals Science and Heat Treatment*, 1999, Vol. 41, p.p. 159-163.
- 21) D. A. Jones. **Principles and Prevention of Corrosion**, 2a.ed Prentice Hall, USA, 1995.
- 22) L. Lina y K. Hanb, "Optimization of Surface Properties by Flame Spray Coating and Boriding", *Surface and Coatings Technology*, 2001, Vol. 135, p.p. 173-177.
- 23) K.-E. Thelning. **Steel and its Heat Treatment**, 2a.ed., Butterworths, England, 1984.