

Proceso de nitruración gaseosa en los aceros SAE 4340, SAE 4140, SAE 0-1, SAE 1045

TESIS Para optar el Título Profesional de: INGENIERO METALÚRGICO

AUTORA

SHEILA CÓRDOVA VALENCIA

LIMA - PERU 2003

..	1
AGRADECIMIENTO .	3
RESUMEN .	5
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .	7
1.1. La Nitruación. .	7
1.1.1. Antecedentes del Proceso .	8
1.2. Hipótesis . .	8
1.3. Justificación: .	9
1.4. Objetivos : . .	9
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEORICOS .	11
2.1. Nitruación .	11
2.2. Historia de la Nitruación .	12
2.3. Diagrama de fases de Fe - N . .	13
2.3.1. Fases Presentes en la Nitruación : . .	15
2.4. Influencia de los elementos de aleación .	16
2.5. Propiedades de los aceros Nitruados .	18
2.5.1. Concepto de Dureza en Nitruación . .	18
2.6. Mecanismo de Formación de capa Nitruada .	19
2.6.1. La Teoría de la Difusión .	19
2.6.2. Formación de la capa Nitruada . .	22
2.6.3. La actividad del nitrógeno .	24
2.6.4. Capa de Combinación o Capa Blanca, .	25
2.6.5. Zona de Difusión .	26
2.7. Temperatura de Nitruación .	26
2.8. Determinación de la profundidad de Nitruación .	27
2.8.1. Nitruabilidad (13) .	28
2.9. Nitruación Gaseosa .	30

2.9.1. Tecnología de la Nitruración con gas .	31
2.9.2. Características del proceso de Lecho Fluidizado .	33
2.9.3. Nitruración en aceros para herramientas .	33
CAPÍTULO III. MATERIALES Y EQUIPOS .	35
3.1. Equipo para la nitruración . .	35
3.1.1. Instrumentos : .	36
3.2. Características del Horno de Atmósfera Controlada .	36
3.2.1. Parámetros del Tratamiento Térmico .	36
3.2.2. Especificaciones del Horno .	37
CAPÍTULO IV. PARTE EXPERIMENTAL .	39
4.1. Selección de los aceros para el estudio .	39
4.1.1. Características del acero SAE 4340 (34 CrNiMo ₆) .	39
4.1.2. Características del acero SAE 4140 (42CrMoS4H) . .	41
4.1.3. Características del acero SAE O-1 (Thyrodur 2510) . .	42
4.1.4. Características del acero SAE 1045 (CK 45) . .	42
4.2. Marcha del proceso de Nitruración con gas. .	43
4.3. Preparación de las probetas . .	49
4.3.1. Montaje de las probetas .	50
4.4. Análisis metalográfico . .	51
4.5. PRUEBAS DE MICRODUREZA .	55
4.5.1. MEDICIÓN DE LA CAPA DE COMPUESTOS (CAPA BLANCA) .	61
4.6. Aplicación de la segunda Ley de Fick .	62
4.6.1. Ecuación de difusión : .	62
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS . .	65
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES . .	67
CAPÍTULO VII. RECOMENDACIONES .	69
BIBLIOGRAFÍA .	71
ANEXOS .	73

DEDICATORIA *Gracias a Dios por darle un sentido profundo a mi vida. Dedicado con cariño a mi madre LUZMILA por inculcarme valores en mi formación como persona útil en la sociedad A mi hermana MARGOTH por su apoyo y comprensión cuando lo necesitaba*

AGRADECIMIENTO

Expreso mi agradecimiento a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos a través de su Escuela Académica Profesional de Ingeniería metalúrgica por mi formación académica y profesional.

Mi reconocimiento a los Ingenieros Samuel Rosario Francia y Juan Carlos Yacono Llanos por todo su apoyo en la elaboración y culminación de este trabajo de investigación.

A la empresa Aceros del Perú SAC , en especial a los ingenieros Jorge Muñoz Najjar y José Roa Llanos como también a todo el personal de la empresa por la ayuda brindada.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación Tratamiento Termoquímico de Nitruración con Gases se utilizaron los aceros SAE 4140, SAE 4340, SAE 1045, SAE O1, seleccionados para el estudio de acuerdo a una evaluación en cuanto a frecuencia de uso, costo, calidad, con la finalidad de investigar su comportamiento en un proceso de nitruración con parámetros definidos como temperatura de 560 °C, tiempo de 6 horas y en un horno de lecho Fluidizado.

La motivación de este estudio esta basado en el aporte que el tratamiento termoquímico pueda dar a estos aceros seleccionados mejorando sus propiedades mecánicas como buena resistencia al desgaste, a la abrasión, estabilidad dimensional, entre otras propiedades que adquieren en este proceso.

La evaluación se toma desde la marcha del proceso, teniendo como parámetros la composición del acero, temperatura, flujo de amoníaco(NH_3), tiempo de tratamiento.

Los resultados obtenidos muestran mayores durezas alcanzadas en los aceros que tienen mayores elementos aleantes formadores de nitruros

Se ha tenido una idea más clara del proceso usando Diagramas de equilibrio Fe-N, Micro estructuras de una superficie nitrurada y Curvas de Microdureza, Tablas de coeficiente de difusión (aplicando la segunda ley de Fick).

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. La Nitruración.

La nitrocarburación, la sulfonitruración son variantes de una misma familia de tratamientos termoquímicos que designamos con el nombre genérico de “Nitruración”, Todos estos tratamientos permiten la obtención de estructuras que tienen las siguientes características:

1. Capa de combinación o de compuestos formada por nitruros de hierro.
2. Capa o zona de difusión, formada por nitrógeno difundido con los elementos de aleación.

El proceso de nitruración es un tratamiento termoquímico que normalmente conlleva la introducción de nitrógeno atómico en la fase ferrítica, en el intervalo de $T^{\circ} 500 - 590^{\circ}C$ y por tanto no ocurren transformaciones de fase. El método se uso por primera vez a finales de 1920 desde entonces su aplicación ha aumentado continuamente debido a que se puede aplicar a un número mayor de aceros diferentes al que se pensó originalmente.

La nitruración gaseosa permite el endurecimiento parcial de piezas de casi cualquier forma, mediante el temple de capas protectoras. Las durezas alcanzadas dependen de los elementos formadores de nitruros existentes en el acero.

La Nitruración en gas se aplica a numerosas piezas sometidas a condiciones de desgaste en construcciones de motores, máquinas-herramientas y aviones entre otros.

Los aceros seleccionados fueron de acuerdo a un estudio realizado de los aceros comerciales más usados para este tratamiento en nuestro medio. (1)

1.1.1. Antecedentes del Proceso

Anthony Dinunzi y Robert E. Duffy de la Corporación Procedyne (New Brunswick, NJ USA), presentaron un artículo en la revista **Industrial Heating** en julio de 1990, acerca del proceso económico de nitruración en Lecho Fluidizado para obtener una profundidad de capa con un mínimo de capa blanca, el objetivo era desarrollar una capa total de 0.070 " en 3 de los aceros nitrurables mas usados 4140, 4340 y nitroaleación 135 M . Todos los trabajos de nitruración fueron hechos con el sistema ahorrador de gases a bajo flujo (LFGS), la base endurecida para cada uno de los tres materiales fueron 4140,(29-31 Rc); 4340,(29-30 Rc); 135M (28-30 Rc), todas las nitruraciones fueron realizadas a 526°C , se realizaron 2 pruebas , la técnica fue usar 20 horas de nitruración seguidas por 4 horas de difusión, para la primera prueba, la segunda fue realizar la misma técnica pero por 6 días.

Los resultados de las pruebas del largo ciclo de nitruración de lecho Fluidizado muestra que esto fue posible para obtener el primer objetivo de formación a 0.070" de capa total. Sin embargo estos resultados fueron mezclados para el segundo objetivo que era controlar la formación de la capa blanca.

Los resultados de estas pruebas muestran que el lecho Fluidizado es capaz de formar rápidamente capas nitruradas y para una mayor profundidad en comparación con otros tipos de hornos.

Ciertas técnicas han sido establecidas para controlar la formación de la capa blanca en la fase inicial de un largo ciclo de nitrurado, pero esto no tiene efecto para profundidades de capa después de 0.035"-0.040"(40 Hr de nitrurado, 8 Hr de difusión) y con capas hondas (0.050" y otras), estas capas presentan un serio problema de agrietamiento.

Los dos grandes costos de operación asociados con la nitruración son la energía y la atmósfera del gas. En general los lechos Fluidizado consumen más atmósfera de gas por hora que la Nitruración con gas convencional. Estos costos son mas que compensados por la energía economizada que resulta de ciclos cortos y de altas densidades de carga. (2)

1.2. Hipótesis

- A temperaturas más elevadas(>590°C) aparece la combinación hierro - nitrógeno (Fe - N) frágiles no deseables , donde aparece el eutéctico braunita.

- El grado de aumento de dureza superficial depende exclusivamente de la composición química del material a nitrurar.
- A mayor tiempo de proceso, mayor espesor de capa y menor dureza, cuando el espesor de la capa es grande, no solo se reduce el límite de fatiga, sino que aumenta las deformaciones de la pieza en el horno.

1.3. Justificación:

En la actualidad Industrias como la del plástico, empresas de servicios de Metalmecánica, Procesos de Extrusión y Trefilado y otros, en sus elementos de máquina que requieran dureza superficial y estabilidad dimensional están requiriendo la aplicación del Tratamiento Termoquímico en ciertos tipos de piezas, buscando obtener cada vez mejores resultados en el trabajo de la misma, por lo tanto mayor eficiencia en su producción.

Si bien hay nuevas tecnologías y materiales para obtener piezas las características similares a las obtenidas con los Tratamientos Termoquímicos en particular con nitruración gaseosa, los usuarios aun desconocen todas las propiedades que los aceros pueden obtener con este proceso y sus limitaciones en su uso.

El presente trabajo de investigación fue hecho con el propósito de dar al usuario una mayor información sobre las bondades que alcanzan los materiales con este tratamiento para un mejor rendimiento de las piezas, desde la selección de la calidad de aceros más usados en nuestro medio, dando mayor énfasis a usos más específicos de acuerdo a los parámetros que proponemos.

1.4. Objetivos :

Para el presente estudio se plantearon los siguientes objetivos :

- Conocer las propiedades alcanzadas por los aceros seleccionados en el proceso de nitruración gaseosa a 560°C y con un tiempo de 6 horas de proceso.
- Comparar las propiedades alcanzadas en los aceros de baja aleación con los de mediana aleación después del proceso de nitruración.
- Que mediante el conocimiento de estas propiedades alcanzadas en el proceso, nos ayude a darle un mejor uso en la industria. Brindando mayor información a los usuarios.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1. Nitruración

La Nitruración es un proceso para endurecimiento superficial de aceros al carbono y aleados en una atmósfera constituida por una mezcla en proporciones adecuadas de gas amoníaco y amoníaco disociado. (3). La nitruración se suele realizar a 500 . . . 600 °C (nitruración a baja temperatura), por lo tanto no ocurre transformación de fase. (4). La efectividad del proceso depende de la formación de nitruros en el acero por la reacción de nitrógeno con el Fe y ciertos elementos de aleación. Aunque a temperaturas adecuadas y con la atmósfera apropiada, todos los aceros son capaces de formar nitruros de hierro, los mejores resultados se obtienen en aquellos aceros que contienen uno o más de los principales elementos de aleación que forman el nitruro. Estos elementos son aluminio, cromo, vanadio y molibdeno.

Como resultado de la nitruración el acero adquiere alta dureza de la capa superficial que no se altera durante el calentamiento hasta 400 . . 450 °C, resistencia elevada al desgaste y baja tendencia a la formación de ralladuras; alto límite de fatiga; alta resistencia a la cavitación .

Superficies más duras aproximadamente de 70 HRC, se obtienen con aceros aleados al aluminio, conocidos como nitroaleaciones, que son aceros al carbono medio que contienen también cromo y molibdeno. Para algunas aplicaciones en las que es aceptable menor dureza, se utilizan aceros estándar al carbono medio que contiene cromo y molibdeno (series AISI 4100, 4300). La nitruración también se ha aplicado a aceros inoxidables y aceros para herramientas destinadas a ciertos fines.

El acero generalmente se endurece y reviene entre 595°C y 709°C para producir una estructura sorbítica de máxima tenacidad en la parte interna y luego nitrurada.

Como la nitruración se realiza a temperaturas relativamente bajas y no se necesita templado, la distorsión se reduce a un mínimo, aunque algún crecimiento ocurre debido al aumento en volumen de la superficie endurecida, sin embargo, este crecimiento es constante y predecible, para una pieza y ciclo dados de tal modo que en la mayoría de los casos las piezas pueden maquinarse muy próximas a sus dimensiones finales antes de la nitruración. Esto es una ventaja de la nitruración sobre la carburización. Algunas piezas complejas que no pueden endurecerse superficialmente a satisfacción por carburización se han nitrurado sin dificultad. La resistencia al desgaste es una característica sobresaliente de la porción externa nitrurada y origina su selección en la mayoría de las aplicaciones. (4)

2.2. Historia de la Nitruración

La acción endurecedora que el nitrógeno ejerce sobre el hierro y los aceros, fue descubierta por Fremy hacia el año 1861, cuando experimentaba la acción del amoníaco sobre las piezas de acero calentadas a elevadas temperaturas.

A pesar del gran interés que parecía tener el proceso, pasaron muchos años sin que este método se pudiera aplicar industrialmente con éxito; debido a la fragilidad con que quedaba la capa superficial dura de los aceros nitrurados.

En 1905 el francés Hjalmar Braune anunció que en sus trabajos había descubierto la existencia de un eutectoide formado por hierro y nitruro de hierro Fe_4N , en las capas frágiles de los aceros nitrurados, que era parecido a la perlita. A este eutectoide se le llamó Braunita en recuerdo de su descubridor.

Después de terminada la primera guerra Europea, en el año 1923, el doctor Fry, de la casa Krupp, descubrió que el problema de fragilidad de la capa exterior de las piezas nitruradas podía ser resuelto con el empleo de una temperatura de nitruración relativamente baja (unos 500°C aproximadamente) y con el uso de aceros aleados con aluminio, cromo y molibdeno en lugar de aceros ordinarios al carbono.

Si se realiza el proceso a temperaturas muy próximas a 500°C no aparece braunita en la capa superficial, como ocurre cuando el tratamiento se realiza a temperaturas elevadas y como normalmente se venía haciendo hasta que Fry realizó sus investigaciones. Estudiando con ayuda del microscopio la capa periférica de las piezas nitruradas, se ve que, en general, está formada por dos capas de aspecto diferente: una

exterior blanca, muy delgada y muy frágil, cuyo espesor suele variar de 0.005 mm, y otra interior de mayor espesor, oscura, que es verdaderamente importante. Se ha comprobado que esta última capa está formada por nitruros de elementos aleados, y en cambio en la exterior blanca, además de los nitruros aleados, aparece también el nitruro de hierro. La capa exterior blanca, generalmente de muy poco espesor, es muy perjudicial y su aparición debe evitarse en cuanto sea posible, siendo en cambio la capa interna de mayor espesor formada por los nitruros de aluminio, cromo y molibdeno la de mayor interés en el proceso y la verdaderamente fundamental. Generalmente, la capa exterior blanca queda eliminada, cuando a las piezas se les da un ligero rectificado.

En los procesos industriales esas capas periféricas duras se forman cuando a la temperatura de nitruración (que como hemos dicho antes es de unos 500° aproximadamente), se pone el nitrógeno atómico en contacto con la superficie del acero. Entonces el nitrógeno se difunde desde la superficie hacia el interior de las piezas de acero y se forman nitruros submicroscópicos en su zona periférica que, veremos más adelante, son los causantes del aumento de dureza.

El nitrógeno que se emplea en el proceso proviene del amoníaco que, al ponerse a elevada temperatura en contacto con el acero caliente que actúa como un verdadero agente catalizador, se disocia en nitrógeno e hidrógeno atómico produciéndose las siguientes reacciones:

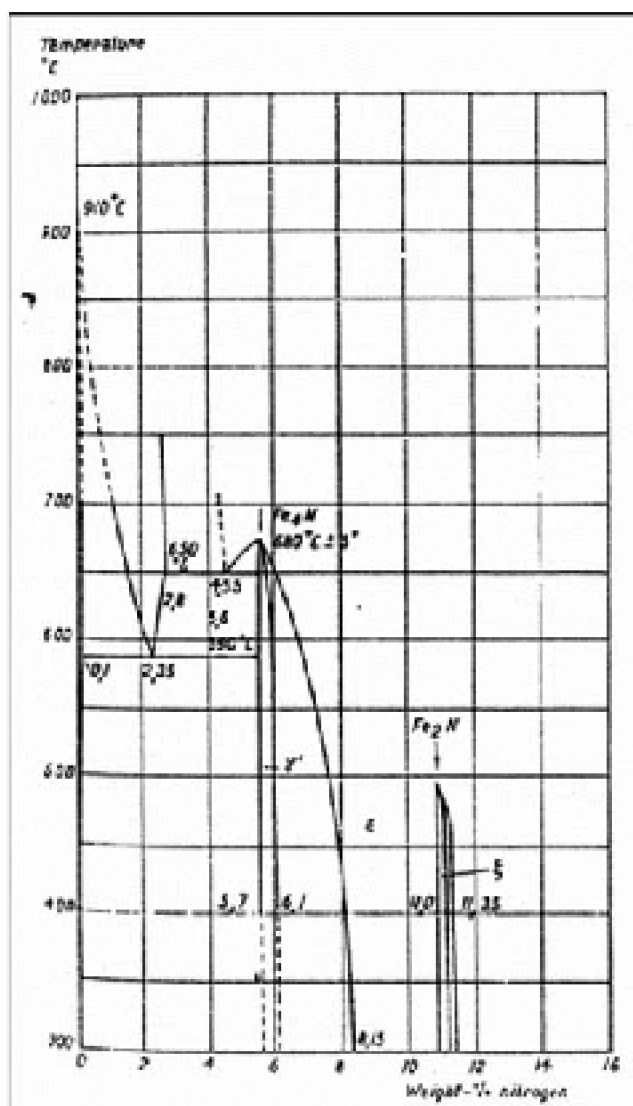


Siendo el nitrógeno atómico el agente fundamental en la nitruración.

Únicamente una pequeña proporción del nitrógeno reacciona con el acero, transformándose rápidamente el resto en nitrógeno molecular inerte. El hidrógeno también se encuentra en los primeros momentos en estado atómico, pero pasa luego rápidamente al estado molecular. (5)

2.3. Diagrama de fases de Fe - N

El hierro puede formar con el nitrógeno distintas combinaciones, el diagrama Fe-N (Diag. N° 01) señala los principales constituyentes que pueden aparecer. El hierro en el estado líquido y sólido disuelve poco nitrógeno. (6)



Diag. N° 01. DIAGRAMA DE EQUILIBRIO PARA EL Fe-N

A. La fase α, es la ferrita nitrogenada con una red cúbica centrada en el cuerpo y con periodos, según el contenido de nitrógeno, de 0,28664. 0,2877 μm . La solubilidad del Nitrógeno en el hierro α a la temperatura eutectoide no supera el 0.10 %, descendiendo a la temperatura ambiente hasta el 0,004 %.

La solubilidad del la fase α en nitrógeno es baja a temperatura de nitruración y prácticamente nula a temperatura ambiente.

B. La fase γ es la austenita nitrogenada, tiene la red cúbica centrada en las caras ($a = 0,3613$ para 1,45 % de N y $a = 0,3648$ para el 2,79 % de N), la solubilidad máxima del nitrógeno en la fase γ es de 2,8 % a 560 °C la fase γ sufre descomposición eutectoide $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma'$.

En condiciones de un fuerte subenfriamiento la fase experimenta la transformación martensítica formando la fase α' (martensita nitrogenada) con la red tetragonal centrada en el cuerpo; durante el calentamiento (revenido) la martensita nitrogenada (fase α') se

descompone formando primeramente la fase α'' (Fe_6N_2) al aumentar la temperatura de revenido, la fase γ : $\alpha \rightarrow \alpha' + \alpha'' \rightarrow \alpha + \gamma'$.

C. La fase γ' es la solución sólida a base de nitruro de Fe_4N con la red cúbica centrada en las caras ($a = 0.3791 \dots 0.3801$ nm) con una zona estrecha de homogeneidad de un 5,3 ... 5,75 % de N (según otros datos, un 5,77 ... 5,88 % de N); la fase γ' es estable sólo hasta 680 °C a una temperatura más altas se forma la fase ϵ . Su dureza es 4 a 5 veces más alta que la del hierro puro ($\text{HV} \approx 800$).

D. La fase ϵ es la solución sólida intersticial, la base de nitruro Fe_2N y Fe_3N (4,55 ... 11,0 % de N), la red cristalina es hexagonal ($a = 0,2702 \dots 0,2764$ nm, $c = 0,433 \dots 0,441$ nm, dependiendo del contenido de nitrógeno). A 650°C y con una concentración de nitrógeno de 4,5 % la fase ϵ sufre la descomposición eutectoide en las fases γ y γ' .

A la temperatura de nitruración utilizadas corrientemente, el nitrógeno se disuelve en el hierro sólo hasta 0,1 %, cuando se excede este valor se forma el nitruro γ' (Fe_4N), si la concentración de nitrógeno no excede 6 % el nitruro γ' empieza a transformarse en ϵ . Por debajo de 500 °C empieza a formarse el nitruro ϵ (Fe_2N).

Cuando se observan al microscopio óptico las fases γ' y ϵ se ven como una capa superficial blanca. Simultáneamente con el aumento del espesor de la capa blanca durante la nitruración, el nitrógeno se difunde más en el acero. Cuando se excede el límite de solubilidad, los nitruros se precipitan en los límites de grano y sobre ciertos planos cristalográficos.

Entre los elementos de aleación se usan Al, Cr, Mo, como formadores de nitruros, El nitrógeno junto con el carbono, forman carbonitruros. (4)

2.3.1. Fases Presentes en la Nitruración :

Existe para las fases de posibles equilibrios entre el hierro y nitrógeno un diagrama similar al Fe-C, en el que el porcentaje de nitrógeno proyectado en las abscisas sustituyen al del carbono las temperaturas prevalecen en el eje de ordenadas.

El nitrógeno se disuelve en el hierro alfa formando una solución sólida Fe-alfa-N cuyo contenido máximo de nitrógeno en la ferrita es de 0.11% N. Esta solución saturada, no visible al microscopio, forma un eutectoide a 590 °C del 2.35 % N denominado braunita.

El mayor interés del diagrama Fe-N se centra en la presencia de los nitruros de hierro que se puedan formar dando origen a las siguientes fases:

- Nitruro Fe_4N , que cristaliza en el sistema cúbico de caras centradas con un contenido de 5.69 % N, que es mezcla de hierro alfa mas eutectoide ($\text{N} = 0.11 + 5.58$).

Este nitruro no es frágil y se forma por precipitación en enfriamientos muy lentos o revenidos a 300°C, distinguiéndose metalográficamente en la zona de difusión por las clásicas agujas de nitruros.

La cantidad de precipitados Fe_4N , es mayor en los procesos de nitruración en sales que en nitruración gaseosa.

- Nitruro Fe_2N , de gran fragilidad y es principal constituyente de la "capa blanca" que

puede formarse en la nitruración gaseosa. Este nitruro no está presente en la nitruración de sales debido a que el nitrógeno difuso a través de los cianatos no alcanza porcentajes tan elevados para formar dicha fase ($N = 11.41\%$).

- Nitruro FeN , cristaliza en el sistema hexagonal compacto, manteniéndose homogéneo desde 4.35 a 11 % N, aparece en la zona de compuestos (VZ) de las piezas nitruradas en baños de sales. En la nitruración gaseosa esta fase se presenta como nitruro Fe_3N .

2.4. Influencia de los elementos de aleación

La presencia de los elementos de aleación y del carbono no cambia la cinética de formación de la capa nitrurada, con el crecimiento de las interfases saturadas, se forma al mismo tiempo los nitruros de los elementos de adición CrN , MoN , AlN , así como los carbonitruros del tipo $Fe_3(C,N)$, la alta dureza se debe más a los nitruros de los elementos de aleación que a los del Fe . (7)

De los elementos de aleación comúnmente usados en los aceros comerciales el aluminio, cromo, vanadio, tungsteno y molibdeno son beneficiosos en nitruración porque ellos forman nitruros que son estables a las temperaturas de nitruración. El molibdeno además de esta contribución como un formador de nitruros también reduce el riesgo de fragilización a temperaturas de nitruración. Otros elementos de aleación tales como el níquel, cobre, silicio y manganeso tienen pequeño efecto sobre las características de nitruración.

Puesto que a temperaturas adecuadas todos los aceros son capaces de formar nitruros en presencia de nitrógeno naciente, los resultados de nitruración son más favorables en los aceros que contienen uno o más de los mejores elementos de aleación para la formación de nitruros. El aluminio es el formador de nitruros más fuerte de los elementos comunes de aleación, el aluminio presente en los aceros (0.85 a 1.50% Al) rinde los mejores resultados de nitruración en términos de contenido total de aleaciones, el contenido de cromo en los aceros puede aproximarse a estos resultados si su contenido es lo suficientemente elevado. El carbón en los aceros no es muy conveniente para nitruración con gases porque ellos forman una cubierta extremadamente quebradiza o frágil, estos se desprenden fácilmente y el incremento de dureza en la zona de difusión es pequeña. (8)

a.- El carbono.- El contenido de carbono de todos estos aceros de nitruración no influye en la dureza, ni en la profundidad de la capa nitrurada, utilizándose diversos porcentajes de acuerdo con las características mecánicas que se quieren obtener en el núcleo.

Hay que evitar en las piezas descarburizaciones superficiales, eliminando por mecanizado las que hubiera antes de la nitruración, porque en las zonas donde el porcentaje de carbono es muy bajo, se forman capas con nitruros de hierro que son muy frágiles y pueden ocasionar el desprendimiento de las capas superficiales.

b.- El molibdeno.- El molibdeno aumenta la dureza de la capa exterior, mejora la tenacidad del núcleo y evita la fragilidad de Krupp, que suelen presentar los aceros sin molibdeno al permanecer durante mucho tiempo a temperaturas de 580°C esto es el caso de los aceros que hayan sido previamente templados y revenidos.

c.- El aluminio.- El Aluminio se usa como desoxidante y afinador de grano en el proceso de fabricación. Estrecha la región gamma, por lo que los aceros con más del 1.0% de aluminio son ferríticos, si el contenido de carbono es pequeño. Inhibe el crecimiento del grano.

El Aluminio incrementa la resistencia a la formación de cascarilla, la resistencia a la corrosión y la sensibilidad al envejecimiento.

Por su alta tendencia a la formación de nitruros, se adiciona en proporciones de hasta el 1.3% a los aceros para nitrurar. Este elemento de aleación es el más importante cuando se quieren obtener las máximas durezas, pero debe ir acompañado de otros elementos para evitar que las capas nitruradas resulten demasiado frágiles. (9)

d.- El cromo.- El cromo es un intenso formador de carburos y estrecha la región gamma. Cuando se añade para incrementar la resistencia a la corrosión, se debe disolver totalmente en la matriz y no debe formar carburo alguno.

El cromo aminora en proporción importante, la velocidad crítica de enfriamiento para el temple, por lo que los aceros que contienen más del 12% de Cr. Templan incluso por enfriamiento al aire.

Este elemento, incrementa la resistencia a la tracción el límite elástico, la resistencia mecánica en caliente, la dureza, la templabilidad, la resistencia a la fatiga, la resistencia al desgaste, la tenacidad, la resistencia al calor, la resistencia a la corrosión, a la formación de cascarilla, a la remanencia y a la fuerza coercitiva.

Por las mejoras que produce al acero, se le emplea en los aceros para cementar, templar, revenir y para nitrurar, por ser altamente favorecedor de la formación de nitruros. El Cromo ayuda a incrementar la capa dura y la influencia del aluminio y del molibdeno.

e.- El nitrógeno.- El Nitrógeno incrementa la resistencia a la tracción, el límite elástico, la resistencia mecánica en caliente, la dureza, la templabilidad, la resistencia al desgaste, la fragilidad, la tendencia a la segregación, la sensibilidad al envejecimiento y a la corrosión.

f.- El vanadio.- Promueve la formación de estructura de grano fino en aceros tratados térmicamente, incrementando la resistencia y tenacidad además de tener un efecto significativo en la templabilidad.

El vanadio también aumenta la dureza al rojo de un acero, se usa en cantidades entre 0.15-1.0% en unión con Cr. W, etc.

Aumenta la resistencia al desgaste y disminuye la tenacidad.

Incrementa la profundidad de nitruración y el espesor de las capas duras.

2.5. Propiedades de los aceros Nitrurados

a. Resistencia al desgaste , la mejor resistencia al desgaste la tiene la capa nitrurada con una zona desarrollada de nitruros Fe_3N , Fe_4N y sobretodo $\text{Fe}_3(\text{N},\text{C})$ con contenido educido de nitrógeno. La formula de nitruro frágil Fe_2N provoca su desmenuzamiento lo que empeora la resistencia al desgaste. La resistencia al desgaste de la zona de nitruración interna en los aceros aleados es superior a la del nitruro Fe_3N , pero inferior a la del carbonitruto $\text{Fe}_3(\text{N},\text{C})$. El aumento de dureza no siempre conduce al incremento de la resistencia al desgaste (4).

b. Alta resistencia al templado y alta dureza a elevadas temperaturas, Estas son propiedades valiosas de aceros nitrurados. espues de la nitruración el acero puede ser calentado hasta la misma temperatura con la cual fue nitrurada, para su excelente resistencia al desgaste y dureza a elevada temperatura, por esta combinación, puede ser usado con buenos resultados para trabajo en caliente, sin embargo la opción del acero y tiempo de nitruración debe ser adaptado para condiciones de trabajo convenientes.

c. Alto grado de fatiga y baja sensibilidad a la indentación, En general el grado de fatiga aumenta con la profundidad de la capa nitrurada. El efecto de indentación sobre el grado de fatiga es extremadamente marcado. El efecto de este desfavorable factor es disminuido por las cargas comprensivas que son introducidas dentro del acero durante la nitruración. Por lo tanto la nitruración es un proceso muy usado si el propósito es incrementar el grado de fatiga de componentes de las máquinas. La profundidad de nitruración entrega el máximo grado de fatiga, esta sin embargo depende del alma y espesor del material, la fatiga es obtenida con una profundidad de nitruración de 0.4 mm.

d. Resistencia a la corrosión , Como resultado de la nitruración la resistencia a la corrosión de los aceros que no son inoxidable es incrementada.. En aceros inoxidable la resistencia a la corrosión es reducida porque el cromo está enlazado con los nitruros. La temperatura usada durante la nitruración puede también desestabilizar al acero inoxidable 18/8 susceptible a la corrosión intercrystalina. La resistencia a la corrosión atmosférica, así como la producida por ambientes marinos, esto es cierto solo si se elimina la capa blanca. La resistencia es elevada para superficies nitruradas y pulidas.

Excelente control dimensional. Escasa formación de óxidos por rozamiento en piezas ajustadas (gripado).

Se obtiene mayor dureza que no se consiguen con otros procesos de endurecimiento superficial, según la composición del acero. (10)

2.5.1. Concepto de Dureza en Nitruración

La influencia del nitrógeno sobre las propiedades mecánicas de dureza es relativamente pequeña para los aceros corrientes. La dureza de un acero no aleado es de 105 HB .

El nitruro Fe_4N tiene una dureza comparable a la cementita (HB = 900) de donde

se deduce que el eutectoide : fase - Fe₄N debe tener una dureza comparable a la perlita; de aquí el escaso interés que ofrece la nitruración como proceso de aumento de la dureza en los aceros ordinarios. En cambio en los aceros aleados, como el Al, Cr, V, W, y Mo forman nitruros insolubles en Fe alfa precipitando en partículas submicroscópicas repartidas en la ferrita, esta dispersión deforma la red cristalina ocasionando una elevada dureza.

El concepto de dureza en los tratamientos de nitruración tiene una importancia secundaria, es uno de los factores posibles a tener en consideración. No con una más elevada dureza se consiguen mejores resultados frente a las propiedades realmente interesantes de resistencia a la fatiga, al desgaste, y al gripaje que son las características preponderantes del proceso.

El grado de aumento de la dureza superficial depende exclusivamente de la composición química del material a nitrurar ; en cambio, el proceso a seguir sea en sales o en gas tiene mucho menos importancia.

La dureza de una porción externa nitrurada no se ve afectada al calentar a temperaturas inferiores a la original temperatura de nitruración. Una dureza sustancial de por lo menos 65 °C se retiene en marcado contraste con una superficie endurecida por carburización, la cual empieza a perder su dureza a relativamente bajas temperaturas

2.6. Mecanismo de Formación de capa Nitrurada

2.6.1. La Teoría de la Difusión

La difusión se entiende al movimiento de átomos dentro de una disolución. A nivel atómico, la difusión consiste en la emigración de los átomos de un sitio de la red a otro sitio. En los materiales sólidos, los átomos están en continuo movimiento, cambian rápidamente de posición. La movilidad atómica exige dos condiciones: 1) un lugar vecino vacío, y 2) el átomo debe tener suficiente energía como para romper los enlaces con los átomos vecinos y distorsionar la red durante el desplazamiento. Esta energía es de naturaleza vibratoria. A una temperatura determinada, alguna pequeña fracción del número total de átomos es capaz de difundir debido a la magnitud de su energía vibratoria. Esta fracción aumenta al ascender la temperatura.

a.- Difusión Intersticial

La difusión implica a átomos que van desde una posición intersticial a otra vecina desocupada. El mecanismo tiene lugar por interdifusión de solutos tales como hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno que tienen átomos pequeños, idóneos para ocupar posiciones intersticiales. Este fenómeno se denomina difusión intersticial. Los átomos de soluto sustitucionales raramente ocupan posiciones intersticiales y no difunden por este mecanismo.(4)

En la mayoría de las aleaciones, la difusión intersticial ocurre más rápidamente que

la difusión por vacantes, ya que los átomos intersticiales son más pequeños que las vacantes y tienen mayor movilidad. Teniendo en cuenta que hay más posiciones intersticiales vacías que vacantes, la probabilidad del movimiento atómico intersticial es mayor que la difusión por vacantes.

Este mecanismo de difusión intersticial desajustada es poco común, debido a que el átomo no se ajusta o acomoda fácilmente en el intersticio, que es más pequeño.

Se ha logrado mucho éxito en la investigación de la difusión intersticial, especialmente en metales cúbicos centrados en el cuerpo, con una técnica totalmente diferente. Esta técnica tiene la ventaja de que se la pueda emplear a temperaturas muy bajas donde los métodos normales de estudiar la difusión son inoperantes debido a las muy altas velocidades de difusión (11).

b.- Energía de activación

Un átomo que se difunde debe escurrirse entre los átomos circundantes para ocupar su nueva posición.

El átomo está originalmente en un sitio de baja energía, relativamente estable. Para desplazarse a otro lugar, el átomo debe atravesar una barrera de energía potencial que requiere una energía de activación Q . El calor proporciona al átomo la energía para vencer esta barrera.

La energía de activación es menor en la difusión intersticial que en la difusión para vacantes. (11)

c.- Difusión en los metales

Por difusión se entiende el desplazamiento de los átomos en el cuerpo cristalino a distancias que superan las medias interatómicas de la sustancia dada. En la industria los más usados son los procesos de tratamiento termoquímico basados en la difusión en el hierro de los no metales C, N, B. Estos elementos cuyo radio atómico es pequeño, forman con el hierro soluciones sólidas intersticiales. La difusión de C, N y B se desarrolla de acuerdo con el mecanismo internodal (donde el átomo se desplaza dentro del cristal, saltando de un espacio internodal a otro) .

La temperatura ejerce gran influencia en los coeficientes y en las velocidades de difusión

Para llevar a cabo un fenómeno elemental de difusión el átomo debe vencer una barrera de energía. La energía necesaria para vencer la barrera de energía $E_{max.}$, al pasar el átomo de una posición a otra de la red se suele llamar, energía de activación (o calor de difusión) y se designa con la letra Q .

La probabilidad de que el átomo de saltos de una posición de equilibrio a otra se determina por la frecuencia con la cual surgen las fluctuaciones que superan Q . El tiempo relativo durante el cual el átomo tiene la energía necesaria para vencer la barrera es proporcional a $\exp(-Q/RT)$. (4)

La ley de influencia de la temperatura sobre el coeficiente de difusión primeramente fue establecida experimentalmente (Ley de Arrhenius) y después argumentada teóricamente sobre la base de la teoría atómica de la difusión y se describe:

$$D = D_0 \exp(-Q/RT)$$

Donde:

D = es la difusibilidad o coeficiente de difusión.

D_0 = factor de frecuencia independiente de la temperatura (m^2/s)

Q = energía de activación (J/mol)

R = Cte. de gases 8,31 J/mol-°K, 1987 cal/mol-°K ó 8,62x 10⁻⁵eV/átomo.

T = temperatura absoluta(°K).

d.- La Segunda Ley de Fick

La segunda ley de Fick es una ecuación en derivadas parciales, para la solución unívoca de la cual es indispensable prefijar las condiciones iniciales y de frontera a los que debe satisfacer la concentración del elemento difundido.

La segunda ley de Fick para procesos no estacionarios (una variación de concentración de elementos con respecto al tiempo).

La mayoría de las situaciones practicas de difusión son en estado no estacionario. En una zona determinada del sólido, el flujo de difusión y el gradiente de difusión varían con el tiempo, generando acumulación o agotamiento de las sustancias que difunden.

Ecuación:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right)$$

Si el coeficiente de difusión es independiente de la composición, lo cual deberá comprobarse para cada situación particular de difusión, la Ecuación se simplifica:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

En la práctica una solución importante es la de un sólido semiinfinito cuya concentración superficial se mantiene constante. Aquí la concentración de las especies difusoras C varía con la distancia x, tiempo t y la difusividad D. La ecuación resultante es:

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

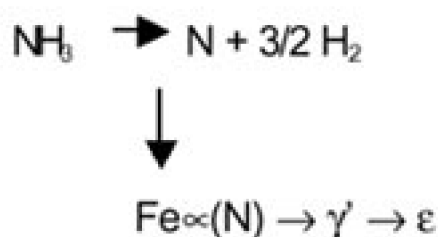
En la cual la función erf (y) es la integral normalizada de probabilidad o función gaussiana de error . los valores de erf (y), lo mismo que otras funciones matemáticas

comunes se encuentran tabuladas.

La importancia de la curva obtenida reside en la interrelación demostrada del tiempo, distancia, difusividad y concentración durante la difusión.

2.6.2. Formación de la capa Nitrurada

El proceso de nitruración del hierro y de acero se realiza en una atmósfera de amoníaco parcialmente disociado:



La disociación térmica de amoníaco es un proceso de ionización que va acompañado de la formación de iones en el espacio útil del horno. Durante el calentamiento ordinario el potencial de nitrógeno se determina por los iones negativos de amoníaco.

La constante de equilibrio de esta reacción es la siguiente:

$$K = \frac{(a_N \rho_{H_2}^{3/2})}{\rho_{NH_3}}$$

Donde a_N es la actividad del nitrógeno en el metal; ρ_{NH_3} y ρ_{H_2} son las presiones parciales del NH_3 y H_2 respectivamente, en la mezcla gaseosa.

La actividad del nitrógeno en el metal determina la actividad de la atmósfera saturante:

$$a_N^o = K \frac{\rho_{NH_3}}{\rho_{H_2}^{3/2}}$$

ya que con el equilibrio estas actividades son iguales.

Para una temperatura dada la actividad se determina por la relación entre las presiones parciales del amoníaco y el hidrógeno, la cual se denomina potencial de nitrógeno o capacidad saturante de la atmósfera

$$a_{N/T}^o = \frac{\rho_{NH_3}}{\rho_{H_2}^{3/2}} = \pi N_o$$

El potencial de nitrógeno puede relacionarse con la composición de la atmósfera saturante y la presión mediante la correlación:

$$\pi N_o = \frac{A (1 - \alpha) (100 + \alpha)^{1/2}}{(\beta + 1,5 \alpha A)^{3/2}}$$

donde A es el contenido de NH_3 en la mezcla gaseosa; β , el contenido de H_2 en la mezcla gaseosa; α , el grado de disociación del NH_3 ; p , la presión general de la mezcla.

De esta forma, se puede hallar la dependencia de la actividad de la atmósfera saturante respecto a la temperatura, presión y composición de la mezcla gaseosa, es decir, determinar la concentración de nitrógeno que la atmósfera dada puede asegurar en la pieza. Para la mezcla de CH_4 con NH_3 el potencial de carbono π_c , según el grado de disociación del amoníaco (α), se determina de la ecuación:

$$\pi_c = \frac{[(1 - \alpha)(1 + \alpha\lambda)]}{(1,5 \alpha\lambda)^2}$$

Análogamente se describen las atmósferas de amoníaco con otros gases diluentes (propano, gas endotérmico, gas endo - exotérmico, etc.).

El Mecanismo de Formación de la capa nitrurada en el hierro se somete a la regla general de acuerdo con la cual en la capa difusiva se forma zonas monofásicas en concordancia con las regiones monofásicas del diagrama de estado Fe-N, que se intersecan por la isoterma a la temperatura de saturación dada, las capas difusivas se forman en la misma consecuencia que las zonas monofásicas en el diagrama de estado para la temperatura dada.

La velocidad de crecimiento de cada fase se determina por la intensidad de los procesos difusivos que transcurren en las fases situadas mas arriba y más abajo.

La difusión del nitrógeno en la fase alfa (α) es mucho más rápida que en la fase gamma (γ) y en la fase épsilon (ϵ). Los coeficientes de difusión para las diferentes fases de la capa nitrurada se muestran a continuación:

$$D_N^\alpha = 4,67 \times 10^{-4} \exp\left[\frac{-17950}{RT}\right], \quad R = 1,987;$$

$$D_N^\gamma = 3,35 \times 10^{-3} \exp\left[\frac{-34,600}{RT}\right]$$

$$D_N^{\gamma'} = 8,404 \times 10^{-6} \exp\left[\frac{-23,036}{RT}\right] \frac{c_N^{\gamma'}}{5,9002 - c_N^{\gamma'}};$$

$$D_N^\epsilon = 0,277 \exp\left[\frac{-35,250}{RT}\right]$$

Al nitrurar los aceros aleados se forman las fases ϵ y γ'

[(FeMe)₂₋₃(N,C) y (FeMe)₄N] Aleados.

Los elementos de transición W, Mo, Cr, Ti, V, diluidos en ferrita aumentan la solubilidad del nitrógeno en la fase alfa (α) formando nitruros especiales.

En la fase épsilon (ϵ) los elementos de aleación disminuyen la concentración de nitrógeno y su espesor. (4)

2.6.3. La actividad del nitrógeno

Es otro de los factores controlados durante la nitruración de acuerdo con las leyes que gobiernan la difusión, el grado de penetración es gobernado por la temperatura y el contenido de nitrógeno que puede ser compuesto en el extremo de la capa de acero.

Durante la nitruración con gas la actividad del nitrógeno es controlada por el grado de disociación y el tipo de flujo de el gas y la ecuación siguiente es asumida:

$$A_N \sim a \times v$$

Donde :

A_N = Actividad del nitrógeno atómico

a = grado de disociación

v = tipo de flujo

La actividad del nitrógeno es una función del número de moléculas de amoníaco disociado en la superficie del acero por unidad de tiempo.

En la práctica el contenido de nitrógeno puede ser verificado por medio del grado de disociación y controlado por el tipo de flujo. (3)

Una alta actividad del nitrógeno es obtenido con alta proporción de flujo el cual tiene un bajo grado de disociación. Una baja actividad del nitrógeno es obtenido con bajos flujos los cuales tienen un alto grado de disociación.

El grado de disociación incrementado con la temperatura para que por el efecto de la temperatura una constante de grado de disociación pueda ser asegurado con un alto flujo de gas. El grado de disociación atómica depende de la temperatura del horno, de la velocidad a que se hace circular el amoniaco y de la presión observadas dentro de las cajas. es preciso controlar el grado de disociación del amoniaco manteniéndolo entre los límites establecidos.

Durante la nitruración en una atmósfera de amoniaco el grado de disociación del amoniaco a 500...560°C constituye el 20...40%; a 540...560°C, el 40...60% y a 600...650°C, el 50...70%.

El grado de disociación del amoniaco es el equivalente de la actividad saturante de la atmósfera y representa la relación entre el volumen de amoniaco disociado y el volumen total de gas. Por lo común, la atmósfera se controla por la composición de la mezcla de amoníaco, nitrógeno e hidrógeno que sale del horno, mediante disociómetros manuales o automáticos. Al desviarse el grado de disociación de los valores prefijados en la tecnología, el consumo de amoniaco se regula con las válvulas de aguja en la tubería o el balón de amoníaco.

El control automático y la regulación del grado de disociación del amoníaco se basan en la aplicación del método de volumen viscosimétrico con gas (disociómetros tipo S3PI-2, S3PI-3, S3PI-4) o del termoconductimétrico con gas (gasoanalizador soviético TKG-4).

Un incremento en el grado de disociación de 30 a 50 % a 510°C implica una reducción en la cantidad de amoníaco por cada 25 %. Si el grado de disociación es incrementado de 50 a 60 % estos incrementos son aceptables en la vida de servicio de los componentes de nitruración con gas.

2.6.4. Capa de Combinación o Capa Blanca,

Una superficie endurecida por nitruración consta de dos zonas distintas. En la zona exterior, los elementos que forman nitruros, incluyendo el hierro. Esta región, que varía en espesor hasta un máximo de unos 0.002 pulg. Comúnmente se conoce como capa blanca, debido a su apariencia después de un ataque químico con nital. Degenera la zona por debajo de la capa blanca, llamada Capa de difusión, donde han precipitado los nitruros aleados.

Son dos los eutectoides que presenta el diagrama Fe-N : el primero a 650°C y el segundo a 590°C. Desde el punto de vista de la nitruración, es el segundo (590°C) el que tiene interés, ya que juega una parte activa en las fases o soluciones sólidas intersticiales presentes en las capas nitruradas: alfa (α), épsilon (ϵ), gamma prima (γ'). (1)

A temperaturas más elevadas aparecen combinaciones hierro-nitrógeno (Fe-N) frágiles y no deseables. El principal causante de esa fragilidad es el eutectoide llamado braumita, que se forma a altas temperaturas de nitruración (> 590°C).

La presencia de carbono en el acero favorece la formación de carbonitruros épsilon (ϵ), particularmente a temperaturas próximas a 570°C dicho carbono contribuye,

igualmente, a la elevación de la dureza de la capa de combinación, gracias a la formación de nitrocarburos. Estos nitrocarburos aumentan considerablemente las propiedades de la capa. El espesor de la capa según los procesos y las condiciones de trabajo está comprendido entre 5 y 20 micras. Esta capa es la capa blanca, puesto que es de color blanco como aparece vista al microscopio, después de atacada la probeta con Nital de 2 á 4%.

La profundidad de la región externa del nitruro la determina la rapidez de difusión del nitrógeno, desde la capa blanca hasta la región que esta por debajo, por tanto el medio de nitruración debe contener sólo suficiente nitrógeno activo para mantener la capa blanca. Cualquier incremento más allá de este punto sirve para aumentar la profundidad de la capa blanca y afecta el espesor de la capa interna. La concentración de nitrógeno activo sobre la superficie del acero, que determina la profundidad de la capa blanca, la fija el grado de disociación del amoniaco.

2.6.5. Zona de Difusión

En el hierro puro, o acero sin alear, el nitrógeno se difunde en solución sólida, durante el proceso de nitruración, produciendo endurecimiento que varia según el enriquecimiento del nitrógeno. La solución sólida se conserva si el metal se enfría rápidamente a partir de la temperatura de nitruración. Por el contrario, si el enfriamiento es lento, los nitruros se precipitan y condicionan una segunda posibilidad de endurecimientos a la mayor o menor precipitación de los mismos. Los elementos de aleación (formadores de nitruros) presentan una mayor afinidad para formar nitruros cuanto más elevada sea la temperatura de formación de los mismos. La red cristalográfica y sus parámetros cristalinos proporcionan información sobre los intersticios en los cuales se puede ubicar, terminar, y crecer en la matriz ferrítica. (1)

El endurecimiento de la zona de difusión está relacionada por la presencia de elementos de aleación que tienen afinidad por el nitrógeno y que son en su totalidad, los mismos elementos formadores también de carburos (Cromo, Molibdeno, Vanadio, Aluminio, etc.), el resto de elementos no genera endurecimiento en el proceso de nitruración por que tampoco forman nitruros.

Por último, hay que evitar, como sea, la formación de nitruros (o carbonitruros) de cierto grosor que estén concentrados en la zona de difusión, generalmente paralelos a la superficie nitrurada y perpendiculares al flujo de difusión. Son los llamados cabello de ángel, dichos nitruros son peligrosos frente a los riesgos de desconchamiento de la capa nitrurada durante el trabajo de la pieza correspondiente, el control del potencial del nitrógeno puede evitar este fenómeno.

Las fases que presentan mayor interés en nitruración son: épsilon (ϵ), gamma prima (γ'); que dependerá del tipo de acero.

2.7. Temperatura de Nitruración

La Temperatura de Nitruración generalmente esta entre 530 - 580°C. No sobrepasando ese intervalo de temperaturas, se evita la presencia del eutectico braumita que, como ya comentamos, comunica a la capa nitrurada una gran fragilidad.

La temperatura ideal de nitruración está situada a unos 20°C por debajo del Eutectico en el diagrama Fe-N , 570°C. Son varios los motivos que inciden en mantener esta temperatura estable durante el tratamiento.

La elevación de la temperatura de nitruración clásica para las piezas de aceros de construcción se determina por los requisitos que se exigen del espesor y dureza de la capa, Cuando la dureza es alta y el espesor de la capa es pequeño, se recomienda aplicar la T° baja; cuando los espesores son grandes y es alta la dureza , la nitruración se realiza en un régimen de dos etapas : primeramente a 500 - 520°C y después a 540 - 600 °C, lo que permite reducir bruscamente la duración del proceso. La elevación de la temperatura de la nitruración provoca el aumento de tendencia al alaveo y deformaciones.

1. A temperaturas superiores a la indicada nos encontramos con una actividad mas progresiva del carbono frente al nitrógeno. Por encima de los 600°C llegaríamos a la zona denominada "carbonitruración". Este fenómeno implica la formación del hierro gamma originando una zona de compuestos heterogénea. En segundo término tenemos que el cianato a temperaturas superiores a los 580°C es inestable, originándose una mayor transformación en carbonatos que desequilibraría el baño nitrurante.

2. A temperaturas más bajas de 570°C, la capa de compuestos disminuye progresivamente de espesor, a 450°C no se aprecia al microscopio, no obstante, los efectos de nitruración en cuanto a resistencia a la fatiga se refiere, los resultados son sensiblemente idénticos según ensayos realizados en la escuela central de Lyon (Francia) con máquinas de flexión y rotación alternativa tipo Faville.

2.8. Determinación de la profundidad de Nitruración

La profundidad de nitruración está determinada de acuerdo con la toma de medidas HV sobre una sección cruzada a través de una superficie nitrurada.

La selección del método y su exactitud depende de la naturaleza de la capa delgada y de su espesor, puesto que el método usado también afectará el resultado obtenido.

El espesor total de la superficie de la capa delgada está definida por la distancia desde la superficie al límite después del cual la dureza del metal natural es obtenida.

El espesor efectivo está definido por la distancia desde la superficie al límite posterior en el cual la dureza requerida(dureza referencial) es obtenida.

La profundidad de las capas nitruradas que se obtienen normalmente en la industria varía de 0,2 a 0,7 mm y su espesor depende principalmente de la temperatura y del tiempo de duración del tratamiento. A 500° con 25 horas se consigue 0.20 mm de espesor de capa y con 80 horas 0,68 mm, aproximadamente. Para reducir la duración de

la nitruración se han propuesto diversas combinaciones de procesos fraccionados. Algunos recomiendan nitrurar primero a 510°C solamente durante algunas horas para obtener una gran dureza superficial y luego continuar la nitruración 535°C- 550°C. Otros, en cambio recomiendan comenzar nitrurado durante 10 horas a 650°C y luego 15 horas a 510°C-530°C. Sin embargo, parece que estos métodos dan capas nitruradas frágiles y no han tenido mucha aceptación (10).

La profundidad de nitruración tiene una importancia relativa. Disponemos de una constante que es la temperatura, la penetración del nitrógeno dependerá del tiempo y la clase del material. Para los aceros aleados la profundidad de capa es siempre inferior que en los aceros al carbono. Varios ensayos realizados en el laboratorio y a escala industrial han demostrado que con penetraciones de nitrógeno en tiempos superiores a las tres y media horas no se consigue mejorar la resistencia mecánica de las piezas tratadas.

En realidad, se requiere de tiempos muy largos de tratamiento, del orden de 40 á 80 horas para los espesores normalmente utilizados de 0,25 a 0,40 mm. Espesores que, también, dependen de la temperatura de nitruración.

Para conseguir propiedades óptimas no se debe tratar de obtener un espesor grande de la capa. Cuando el espesor de la capa es grande, no sólo se reduce el límite de fatiga, sino que, además, aumentan las deformaciones de la pieza en el horno, con una temperatura y espesor de la capa mínimos, las magnitudes de alaveo y deformación son pequeñas.

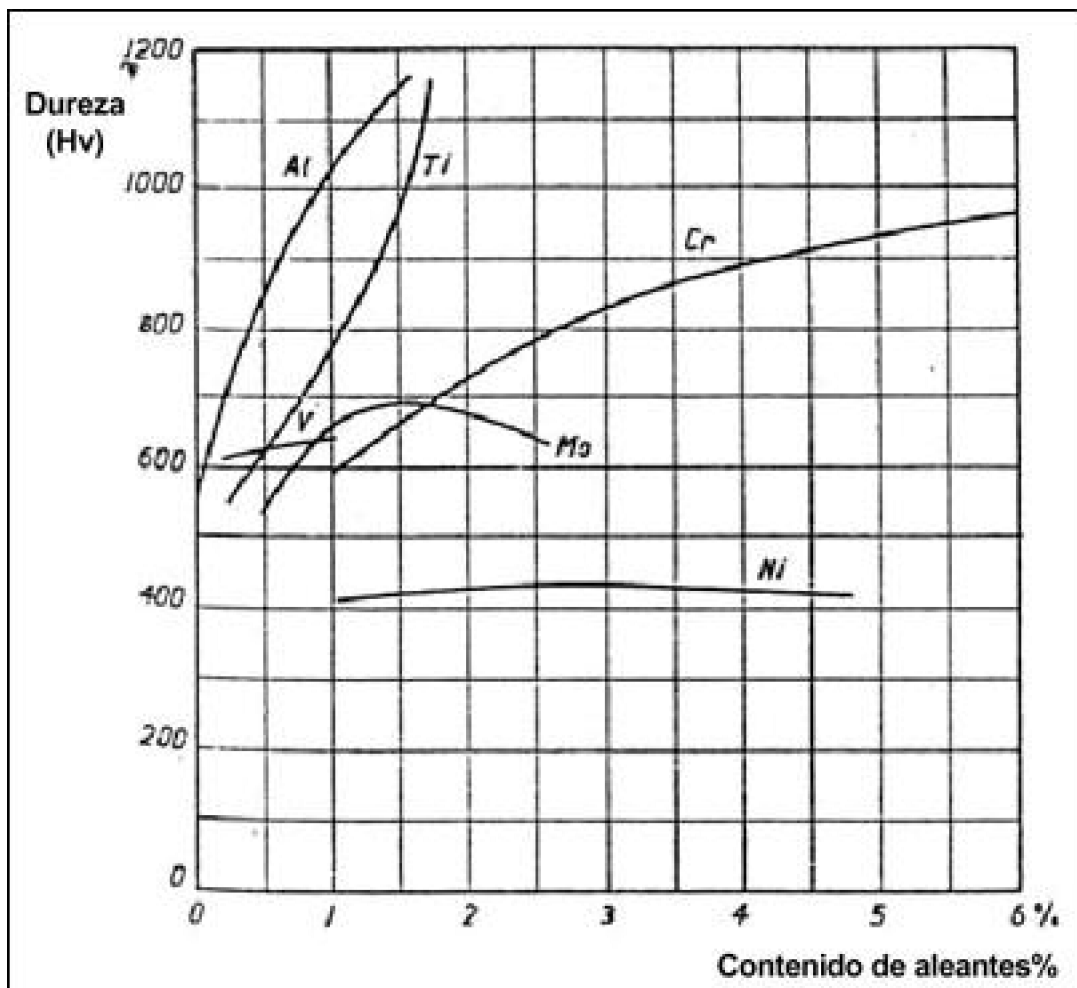
2.8.1. Nitrurabilidad (13)

El concepto Nitrurabilidad se asocia a la capacidad del acero de absorber nitrógeno e incrementar la dureza superficial. La influencia de los elementos de aleación en la formación de nitruros y por lo tanto en la dureza es característica de cada elemento y varía según su concentración. El espesor de la capa en general disminuye con el aumento del contenido de aleantes.

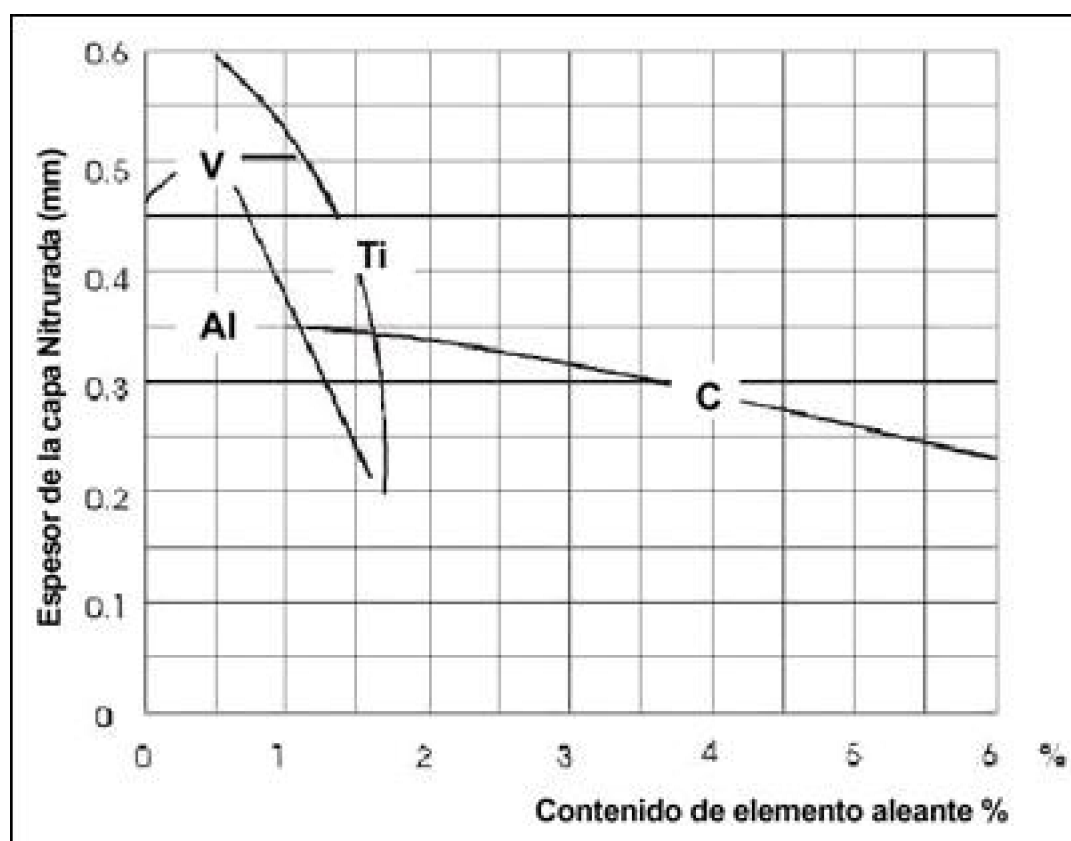
La reducción del espesor de capa provocada por los elementos de aleación es por que estos forman nitruros y tienen un efecto retardador en la difusión de nitrógeno. La nitrurabilidad también es afectada por la microestructura y el tamaño de grano del acero. Un contenido elevado de ferrita favorece la difusión de nitrógeno mientras que un tamaño de grano grande puede avorecer la formación de nitruros o carbonitruros intergranulares que al aumentar de tamaño producen fisuras o fragilidad. Usualmente las piezas que van a ser nitruradas son templadas y revenidas previo a la nitruración, a temperatura de 500 - 650 °C.

Este tratamiento permite la precipitación y coalescencia de los carburos en bordes de grano por lo que éstos resultan menos efectivos para difundir el nitrógeno precisamente en el rango de temperatura donde la difusión en borde de grano puede competir con la difusión en volumen.

Este fenómeno permite explicar porque también el cargo no tiende a reducir el espesor de la capa nitrurada.



Diag. N° 02. Influencia de los elementos de aleación sobre la dureza después del nitrurado. Aleación base 0,35%C, 0,30% Si, 0,70% Mn.



Diag. N° 03 Influencia de los elementos de aleación en el espesor de capa nitrurada medida a 400 Hv. Nitrurado 8 Horas, a 520 °C.

2.9. Nitruración Gaseosa

El gas utilizado para este proceso es el amoníaco NH_3 que a temperatura superior a los 500°C y en contacto con el acero se disocia produciendo nitrógeno e hidrógeno.

La disociación parcial del amoníaco (NH_3) que produce el nitrógeno en forma atómica, activo, es el medio nitrurante más usado.

El equilibrio de la reacción:



Dicho equilibrio depende:

- Temperatura
- Presión
- Flujo de amoníaco
- La acción catalítica del acero de la pieza a nitrurar.

El nitrógeno naciente se incorpora por difusión en cantidades suficientes en el interior del acero y una parte restante reacciona con el hidrógeno pasando a su estado molecular para iniciar un nuevo ciclo.

Si la interacción se efectúa por encima de la temperatura eutectoide (591°C) la capa nitrurada consta de 4 fases (de la mayor concentración de Nitrógeno en la superficie hacia el interior) : $\epsilon \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$.

En enfriamientos, por debajo de 591°C, la fase γ se descompone en el eutectoide $\alpha + \gamma'$ y la capa nitrurada consta de 3 fases $\epsilon \rightarrow \gamma' \rightarrow \alpha$, entre fase y fase se produce una discontinuidad en la concentración de nitrógeno que corresponde a los límites de composición de cada fase.

El proceso se realiza en tres etapas:

a.- Disociación térmica del amoníaco.

b.- Absorción del nitrógeno por el hierro alfa (Fe α), Bajo la formula de solución sólida épsilon (ϵ) durante el primer periodo de nitruración. Posteriormente, absorción se hace bajo la forma de nitruro gamma prima (γ').

c.- Difusión, finalmente, del nitrógeno hacia el interior del núcleo de la pieza.

El nitrógeno que no es absorbido, de inmediato, se transforma en nitrógeno molecular inactivo (N₂).

La superficie nitrurada presenta: (1) una primera capa de combinación compuesta de nitruros épsilon(ϵ) y algunas líneas correspondientes a nitruros gamma(γ'), capa blanca de gran dureza y resistente al desgaste; y (2) de una capa de difusión, capa interior subyacente mas oscura y muy resistente a la fatiga. (1)

Este proceso es tan lento, debido a que sólo una pequeña proporción de los átomos de nitrógeno, reaccionan con el acero y los átomos que no son inmediatamente absorbidos por las piezas, se transforman instantáneamente en nitrógeno molecular inactivo para el tratamiento.

La nitruración gaseosa permite el endurecimiento parcial de piezas de casi cualquier forma, mediante el temple de capas protectoras. Las durezas alcanzadas dependen de los formadores de nitruros existentes en el acero y pueden obtenerse dureza vickers a 800 a 1200 equivalentes a 68-72 HRC.

2.9.1. Tecnología de la Nitruración con gas

El tratamiento térmico previo, consiste en el temple y revenido a 560 - 650°C es decir, sobre una estructura sorbítica para evitar las variaciones dimensionales de las piezas después del tratamiento, de esta forma no hay un cambio estructural que pueda afectar a las tolerancias de las piezas acabadas. Para las piezas importantes de configuración complicada, antes del rectificado se recomienda efectuar el revenido estabilizante para eliminar las tensiones internas, que surgen inevitablemente durante el corte y pueden ser la causa de deformaciones elevadas en el proceso de nitruración. El revenido estabilizante se lleva a cabo en el transcurso de 3...10 h a una temperatura de 20...40°C

superior a la de nitruración, con un enfriamiento ulterior lento (horno, aire).

Como regla general, al nitrurar las piezas fabricadas de aceros de las clases perlítica, martensítica y austenítica, sus dimensiones aumentan. En relación con esto, antes del tratamiento químico-térmico se prevé la disminución de las dimensiones geométricas de las piezas.

Protección de los puntos no sujetos a la nitruración, Se puede proteger sumergiendo las zonas a proteger en un baño fundido del 60 % de plomo y 40 % de estaño. Posteriormente antes de iniciar el ciclo nitrurante, deberemos desengrasar bien el material con tricloroetileno e introducir las piezas en el horno libre de humedad. (4)

Todos los aceros que se puedan temprar deben hacerlo y revenirse antes de ser nitrurados. Como se ha indicado la temperatura de revenido debe ser suficientemente alta para garantizar la estabilidad dimensional a la temperatura de nitruración. (14)

La preparación de las piezas para la nitruración debe seguir,

a. Desengrasado por método electroquímico, mediante el lavado en bencina u otros medios para la eliminación del aceite, de la emulsión y de grasa como de las distintas impurezas.

b. Los aceros altos en cromo antes de la nitruración necesitan un tratamiento previo de las superficies para eliminar la película de óxidos, que impide la difusión del nitrógeno en el metal. La nitruración de estos aceros en la despasivación preliminar lleva a la disminución del espesor de la capa, a su irregularidad y, como consecuencia, a una dureza «pintoja».

Para reducir la fragilidad de la capa nitrurada y economizar amoniaco se recomienda la nitruración en amoniaco diluido con nitrógeno (con gas nitrogenado $N_2 + 4\%$ de H_2) hasta un 70...80% (en volumen) o con amoníaco preliminarmente disociado ($N_2 + H_2$).²

La nitruración de las piezas hechas de aceros de construcción, resistentes a la corrosión y al calor, se suele realizar a 500...600°C.

La elección de la temperatura de nitruración clásica para las piezas de aceros de construcción se determina por los requisitos que se exigen del espesor y dureza de la capa: cuando la dureza es alta y el espesor de la capa es pequeño, se recomienda aplicar una temperatura baja; cuando los espesores son grandes y es alta la dureza, la nitruración se realiza en un régimen de dos etapas: primeramente a 500...520°C y después a 540...600°C, lo que permite reducir bruscamente la duración del proceso. La elevación de la temperatura de nitruración provoca el aumento del alabeo y deformaciones. Las piezas pueden ser procesada en canastillas, debido a la inherente uniformidad de fluidización completa ecualización atmosférica y la penetración a través de la densa carga.

Las piezas que se van a nitrurar se colocaran en una canastilla, a través del cual se proporciona continuamente la atmósfera de nitruración .

Una vez ya cargada la canastilla es introducida dentro del horno de lecho Fluidizado con una temperatura de operación dentro de una atmósfera de nitrógeno.

Para el enfriamiento, Al final del ciclo las piezas pueden ser removidas y puestas

dentro de un ambiente de enfriamiento rápido operando con nitrógeno.

Las piezas procesadas tendrán un acabado gris claro.

2.9.2. Características del proceso de Lecho Fluidizado

Los hornos para tratamiento térmico en lecho Fluidizado han causado un fuerte impacto en la Industria del Tratamiento de los metales. Cuando comparamos a los métodos convencionales de tratamientos Térmicos los de lecho fluidizado ofrecen una calidad superior, menor tiempo por ciclos y costos de operación menores.

El tratamiento térmico en lecho fluidizado es conocido por su versatilidad en el proceso, temple total, en el caso de la cementación superficial y profunda, carbonitruración, nitrocarburo, todos pueden realizarse en un solo horno, adecuando temperatura y seleccionando la composición de gas correspondiente.

Los Tratamientos Térmicos superficiales de nitruración son particularmente tratados en lecho fluidizado porque su alta densidad precisan de un control en el proceso, con menor costo y rapidez.

Típicamente la nitruración en lecho Fluidizado está en función de la temperatura entre 524 °C y 560 °C. La atmósfera del gas Fluidizado consiste en anhídrido de amonio y nitrógeno. (11)

El fluido ofrece varias ventajas en su proceso, primero, aparte del gas convencional y el sistema iónico la alta velocidad de transferencia de calor dada por el lecho Fluidizado brinda también grandes cargas y alcanza rápidamente y equitativamente la temperatura del proceso.

La velocidad de transferencia de calor del lecho que opera a 538°C es aproximadamente 2.5 - 3 veces más rápido que en una nitruración con gas convencional. La Segunda ventaja es la característica del flujo de gas en el proceso. El gas ingresa en la parte inferior de la retorta a través del plato difusor con aproximadamente 5 - 10 PSI. (15)

2.9.3. Nitruración en aceros para herramientas

El término "nitrurado", como más comúnmente se usa, se refiere al temple de la superficie de ciertos aceros tenaces aleados, por la adición de nitrógeno en la superficie. Esto se hace por tratamiento térmico y terminado de las partes en un gas adecuado -comúnmente amoníaco-, a una temperatura alrededor de 538° a 566°C, la cual está por debajo de la temperatura usual de estirado de estos aceros.

Los únicos aceros para herramientas para los cuales esto es lo indicado, son los que tienen temperatura de revenido mayores de 538 °C y principalmente los aceros de alta velocidad. (16)

a.- características mecánicas

La resistencia del núcleo central de las piezas nitruradas suele variar de 75 a 135

Kg/mm^2 , llegándose en algunas ocasiones hasta 150 Kg/mm^2 .

Cuando interesan resistencias muy elevadas hay que utilizar aceros con 0,40 a 0,50% de carbono, revenido a 550°C , y para bajas resistencias aceros de 0,20 a 0,30% de carbono con revenidos a 700°C .

Ya hemos señalado anteriormente que la dureza superficial es variable y depende de la composición. Con los aceros al aluminio del primer grupo se alcanza dureza de 1.000 a 1.100 Vickers. Con los aceros altos en cromo 800 a 850 Vickers y con los cromo-molibdeno y cromo-vanadio 650 a 800 Vickers.

Numerosos investigadores han observado que las piezas nitruradas tienen una excepcional resistencia a la fatiga con poca sensibilidad a la influencia de las entallas. Esto parece que es debido a ciertos esfuerzos de compresión que se desarrollan en la superficie de las piezas como consecuencia del aumento de volumen que experimentan por la nitruración.

b.- Nitruración de herramientas de acero rápido

Se puede mejorar el rendimiento de muchas herramientas y matrices, nitrurándolas superficialmente.

Las herramientas deben ser templadas y revenidas antes de la nitruración y nunca deben rectificarse después porque desaparecería la capa nitrurada que es de muy pequeño espesor.

Con este tratamiento se obtienen durezas de 900 a 1,100 Vickers muy superiores a las que se consiguen normalmente con los aceros rápidos después del temple y revenido.

(5)

CAPÍTULO III. MATERIALES Y EQUIPOS

3.1. Equipo para la nitruración

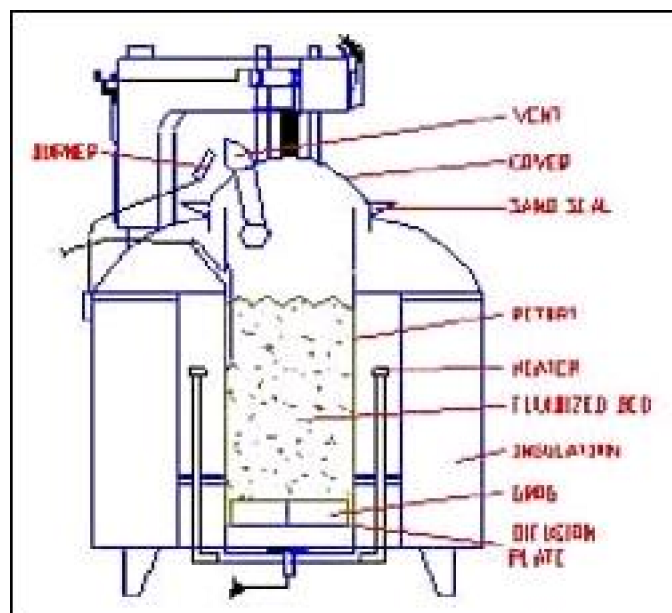


FIG. 3.1 HORNO DE ATMÓSFERA CONTROLADA CON LECHO FLUIDIZADO

- Horno de Lecho Fluidizado con Atmósfera Controlada para Temple PROCEDYNE CORP. (Escala 0 - 850 °C y dimensiones de 50 cm de diámetro x 1.20 m de altura.)
- Tablero de flujómetro: Aire (0 - 100 m³/h), alto flujo de nitrógeno (0 - 56 m³/h) y, bajo flujo de nitrógeno (0 - 2,1 m³/h) y bajo flujo de amoníaco.
- Compresora de aire: INGERSOLL-RAND Intellisys, Capacidad 77 pies³/min., Potencia nominal: 20 HP, radio de operación 125 PSIG.
- Equipo de Nitrógeno : Tanques, Válvulas.
- Equipo de Amoníaco : tanque, válvulas.
- Microscopio Metalográfico : BUEHLER
- Durometro Vickers : BUEHLER Modelo Macromet 3.

3.1.1. Instrumentos :

- Equipos para medición y pinzas.
- Canastilla de Acero AISI 310.
- Lata de Acero AISI 310.
- Postes de acero y Colgador de postes de acero AISI 310.
- Tacle eléctrico manual de 2 ton.

3.2. Características del Horno de Atmósfera Controlada

Es un horno de resistencia no metálica, el material no metálico utilizado en la fabricación de resistencia es Carburo de Silicio (SiC), barra de carburo de silicio triple.

Objetivo : Para nitrurar cualquier material de aleación nitrurable, 4340, 4130 y 4140.

3.2.1. Parámetros del Tratamiento Térmico

Proceso	Nitruración.
Combinación	Dependiendo de la geometría de las piezas no es importante la posición de estas debido a que no requieren ser templadas para obtener la dureza.
Temperatura	Generalmente 510°C a 570°C (538°C es común).
Tiempo del ciclo	Dependiendo del material y de la profundidad de capa requerida los materiales arriba Indicados forman profundidades de capa en el rango de 0.001" por hora.
Atmósfera	60% NITRÓGENO - 40% AMONIACO.
Templado	Templado en lecho Fluidizado o enfriamiento rápido dependiendo de las condiciones requeridas de la superficie.

NOTAS .- Control de la capa blanca : Difusión 1 hora en 100% de nitrógeno por cada 4 á 6 horas de nitrurado,5% gas natural es adicionado para la nitruración en la atmósfera para ayudar en el encendido para la disociación del amoniaco. (17)

3.2.2. Especificaciones del Horno

Material del lecho: Oxido de Aluminio - 120 mallas, 1700 lb. (771 Kg.)

Materiales de construcción:

- Retorta .- Acero Inoxidable tipo 316.
- Plato de Difusión.- Aleación HT tipo 330.
- Bidas .- Acero con Acero inoxidable aislado 316 H T embutido.
- Descarga.- Acero con textura azul final.
- Cabina.- Compartimiento NEMA 12 para controles y para control del contactor.
- Calentamiento.- Calentadores externos eléctricos para retorta.
- Aislamiento.- Lana de escoria.

CAPÍTULO IV. PARTE EXPERIMENTAL

4.1. Selección de los aceros para el estudio

Los aceros seleccionados para el estudio, fueron de acuerdo a su uso en la industria en nuestro medio, primero se seleccionaron dos aceros ambos bonificados aptos para la Nitruración(SAE 4140, 4340) , teniendo estos aceros propiedades favorables para el proceso(elementos aleantes). Luego se seleccionó un acero al carbono(SAE 1045), para conocer su comportamiento en el proceso, siendo este un acero muy usado en nuestro medio , por su flexibilidad en el trabajo, se sabe también que es fácil de adquirirlo por su bajo costo y porque se encuentra en el mercado fácilmente, finalmente se seleccionó el acero para trabajado en frío(SAE O-1) acero templable, acero que por sus propiedades(composición ,curva de revenido) no es muy favorable al proceso de nitruración ,pero en algunas ocasiones es posible hacerlo.

A continuación se describe las características de los aceros seleccionados:

4.1.1. Características del acero SAE 4340 (34 CrNiMo₆)

Composición Química: 0.38-0.43%C; 0.7-0.9%Cr; 1.65-2.0%Ni; 0.6-0.8%Mn; 0.2-0.3%Mo; 0.15-0.35%Si; 0.009%P; 0.002%S; 0.093%Cu

Estado de suministro : Bonificado

Dureza de suministro : 275-320 HB

Propiedades:

- Conserva la dureza y resistencia a alta temperatura debido al cromo, manganeso y molibdeno.
- Mejora la resistencia al desgaste de la superficie endurecida y la tenacidad del núcleo debido al cromo, níquel, molibdeno y manganeso.
- Tienen alta templeabilidad hasta en medidas grandes proporcionada por el cromo, níquel, manganeso y molibdeno.
- Son menos susceptibles al fragilizado, debido al revenido, lo que permite recocerlo a altas temperaturas para eliminar tensiones debido al efecto del cromo, níquel y molibdeno.
- Altamente resistente a la tracción, torsión y a cambios de flexión, debido al efecto de manganeso, molibdeno y el carbono.
- Puede utilizarse para trabajo en caliente ($T < 400^{\circ}\text{C}$).
- Insensible al sobrecalentamiento en el forjado y libre de propensión a rotura de revenido, debido al cromo, níquel y manganeso.
- Por su estado de suministro de bonificado, permite su aplicación sin necesidad de tratamiento térmico adicional.

Aplicaciones:

- Se usa mucho en la industria de la aeronáutica para las partes estructurales del ensamble de las alas, fuselaje y tren de aterrizaje, ejes para hélices de aviones.
- Partes de maquinarias y repuestos de mayores dimensiones sometidos a altos esfuerzos dinámicos como pernos y tuercas de alta tensión, cigüeñales, ejes de leva, árboles de transmisión, barras de torsión, ejes cardán, ejes de bombas, tornillos sin fin, rodillos de transportadora, vástagos, pines, brazos de dirección, discos de embrague. De uso en Matrices de grandes masas para estampar en caliente (bielas, cigüeñales).

Tratamiento Térmico:

- Temple: $830-860^{\circ}\text{C}$; Medio de enfriamiento: Aceite; 55 HRC
- Revenido: 100°C (54HRC); 200°C (53HRC); 300°C (52HRC); 400°C (51-45.3HRC); 500°C (49-41HRC); 600°C (44-31.5HRC).
- Recocido $690-720^{\circ}\text{C}$; 23 HRC
- Cementación: $T^{\circ} : 940^{\circ}\text{C}$; 62 HRC
- Nitruración: $T=560^{\circ}\text{C}$; $t=6$ horas
- Carbonitruración: $T=880^{\circ}\text{C}$; $t=1.5$ horas (14)

4.1.2. Características del acero SAE 4140 (42CrMoS4H)

Composición Química: 0.38-0.43%C; 0.8-1.1%Cr; 0.12%Ni; 0.75-1.0%Mn; 0.15-0.25%Mo; 0.15-0.35%Si; 0.02%P; 0.003%S; 0.19%Cu.

Estado de suministro : Bonificado.

Dureza de suministro : 275-300 HB

Propiedades :

- Conserva la dureza y resistencia a alta temperatura por el cromo y manganeso.
- Son menos susceptibles al fragilizado, debido al revenido por el cromo y molibdeno.
- Poseen buenas características de endurecido profundo, de ductilidad y de capacidad para soldarse, por el manganeso y molibdeno.
- Para construcción de maquinarias posee alta resistencia en medidas pequeñas y medianas.
- Acero especial de bonificación con aleación cromo-molibdeno muy resistente a la tracción y a al torsión como también a cambios de flexión
- Indicado cuando los aceros son expuestos a altas exigencias de dobladuras alternadas y de medianas secciones transversales. Al ser suministrado en estado bonificado permite su aplicación sin necesidad de tratamiento adicional pero puede ser templado al aceite para tener propiedades más elevadas.

Aplicaciones:

- Recipientes sujetos a presión, partes estructurales de los aviones, ejes de automóviles y para aplicaciones semejantes.
- Piezas de transmisión, ejes, piñones, coronas dentadas, pernos, columnas de prensas, vástagos.
- Partes de maquinarias y repuestos de dimensiones medianas con grandes exigencias en las propiedades ya mencionadas y también ciertos elementos para la construcción de motores como engranajes, pernos, tuercas, pines émbolos, árboles de transmisión, ejes de bombas, cañones de armas para cacería.
- Varillas roscadas para la industria petrolera.

Tratamiento Térmico:

- Temple : 820-860°C; Medio de enfriamiento: Aceite, Agua; 55 HR
- Revenido: 100°C (--HRC); 200°C (--HRC); 300°C (--HRC); 400°C (48.5-HRC); 500°C (38-41.8HRC); 600°C (30-41.8HRC).
- Recocido 700-730°C; b23 HRC
- Nitruración: T=560°C; t=6 horas (18)

4.1.3. Características del acero SAE O-1 (Thyrodur 2510)

Composición Química: 0.95%C; 0.6%Cr; 1.1%Mn; 0.10%V; 0.6%W.

Estado de suministro : Recocido.

Dureza de suministro : 230 HB Máx.

Propiedades :

- Con tratamiento térmico logra una buena combinación de dureza superficial y tenacidad con escasa deformación.
- Buen poder de corte.
- La mecanización en estado de recocido es más fácil que en los aceros de 12%Cr; pero la resistencia al desgaste es inferior y la deformación en temple un poco mayor.

Aplicaciones :

- Herramientas de corte y embutición para chapa hasta 6 mm de espesor, útiles de roscado, brocas, escariadores, calibres, herramientas de medición.
- En moldes para plásticos y para fundir plomo y zinc; en rodillos para cortar láminas y tubo; en fresas, guías y pines para matricería; en cuchillas para la industria del papel, en cabezales de torno, boquillas de taladros, mandriles, mordazas.
- Se utiliza en trabajos de baja producción.

Tratamiento Térmico:

- Temple: 780-820°C; Medio de enfriamiento: Aceite (80°C), 64HRC
- Revenido: 100°C (64HRC); 200°C (62HRC); 300°C (57HRC).
- Recocido 740-760°C .

4.1.4. Características del acero SAE 1045 (CK 45)

Composición Química: 0.48%C; 0.15%Cr; 0.06%Ni; 0.69%Mn; 0.02%Mo, 0.029%P; 0.037%S; 0.28%Si; 0.21%Cu; 0.041%Al.

Propiedades:

- Acero recocido apto para ser templado y revenido.

Aplicaciones:

- Coronas de arranque, catalinas y ejes transmisores de baja carga.
 - Piezas empleadas en la industria tales como: ejes, pernos, arandelas, tuercas, etc.
- (18)

4.2. Marcha del proceso de Nitruración con gas.

1. Encender el Tablero General, encender Tablero de Control del Horno 1.
2. Prender la Compresora para elevar la Temperatura del Horno.
3. Abrir las llaves del aire, en el Tablero de Control ($15\text{m}^3/\text{h}$) cambiar de Purg-Aire.
4. Fijar la temperatura a 560°C en el Tablero de Control, cuando la temperatura llegue a 560°C , cambiar de Aire-purgue, cerrar válvulas de aire y abrir válvulas de alto flujo de nitrógeno ($18\text{m}^3/\text{h}$)
5. Ingresar la carga, prender mechero y esperar por un tiempo de 20 min. Aproximadamente.
6. Esperar que la Termocupla este al rojo vivo para empezar el proceso de Nitruración.
7. En el Tablero de Control se cambia de Purga-Nitrógeno, se enciende el ahorrador de gas.
8. En el depósito de amoníaco, abrir la llave de paso (rojo) de amoníaco.
9. Regular bajo flujo de Nitrógeno a $1-2\text{m}^3/\text{h}$. Regular bajo flujo Amoníaco a $0.8\text{m}^3/\text{h}$
10. Esperar 5 horas, en este tiempo, controlando la temperatura.
11. Cada media hora se cierra automáticamente el paso del flujo de amoníaco y el flujo de bajo de nitrógeno, y se da paso al flujo alto de Nitrógeno sube a $18\text{m}^3/\text{h}$ y se regula a $15\text{m}^3/\text{h}$. La llama del mechero se apaga por el espacio de 2 minutos.
12. Pasado los 2 minutos nuevamente se activa el flujo bajo de amoníaco, flujo bajo de nitrógeno y se cierra el paso del flujo alto de nitrógeno.
13. Transcurridas 5 horas se cierra las válvulas de flujo bajo de amoníaco y flujo bajo de nitrógeno. Cambiar en el Tablero Nitro-Purgue.
14. Después de 45 minutos sacar el material y enfriarlo al aire.



FIG. 4.1. Barras de acero SAE 1045 en estado de Suministro



FIG. 4.2 Piezas en recepción antes de su tratamiento



Fig. 4.3. Planta de Tratamientos Térmicos



FIG. 4.4. Material colocado en la canastilla



FIG. 4.5. Material muy próximo al ingreso del horno 1



FIG. 4.6. Material en la boca del horno



FIG. 4.7. Flujómetro controlador de gases fluidizantes



FIG.4.8. Llama del Quemador de gases



FIG. 4.9. Material después del Nitrurado

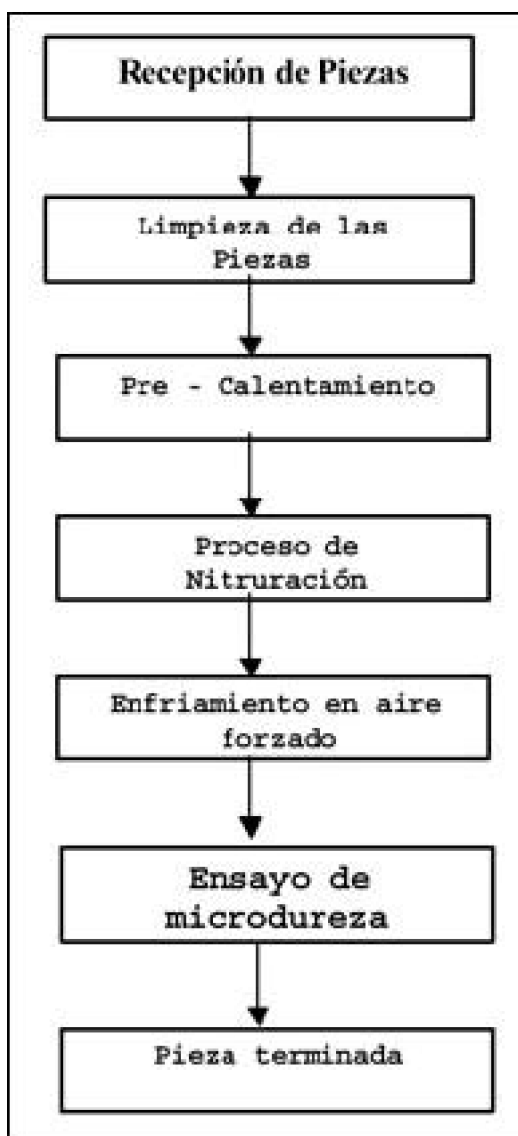


Fig. 4.10. Diagrama de flujo del proceso de Nitruración

4.3. Preparación de las probetas

La preparación de probetas de acero nitrurado, para revelar la verdadera micro estructura, requiere de técnicas más precisas que las normales empleadas. En primer lugar la extrema diferencia de dureza entre la superficie y el núcleo.

También la concentración de nitruros en la superficie (capa blanca) la primera en ser examinada metalográficamente

La probeta para el estudio fueron preparadas en una selección de diámetros para cada material: 19,5 mm (SAE 4340), 12,7 mm (SAE 4140), 14 mm. (SAE O-1), 19mm., (SAE 1045), todas con una longitud aproximada de 20mm.

Fueron cortadas tomando en cuenta que no pertenezcan al borde de la barra sino a 10 cm. como mínimo del final de la barra, después fueron pulidas para quitar la zona oxidada.



Después del tratamiento de nitruración las probetas fueron cortadas con discos abrasivos de alta velocidad para no dañarla capa.

Se tomó una de las partes para proceder al montaje. (15)

4.3.1. Montaje de las probetas

Para el montaje se uso resina sintética, posteriormente seria necesario para algunas pruebas el montaje en resina Termoendurecible, cuando era importante la preservación de bordes.

a.- Pasos :

La probeta previamente desengrasada es colocada en una base plana (vidrio) y colocarlo sobre la base tratando que la muestra quede centrada dentro del molde.

Se prepara la resina con su catalizador (cobalto 10 - 15 gotas, Peróxido de 5 -10 gotas) es homogenizado por agitación, teniendo cuidado de no levantar mucho para que no capte burbujas de aire.

Agregar la resina preparada al molde sin mover la muestra durante el llenado.

Después de un tiempo necesario para el fraguado, se realizó el desmontaje de la probeta.

b.- Desbaste :

Durante el desbaste se remueve la superficie dañada deformada que se genera en el corte.

Primero fue un desbaste grueso, para que la superficie este completamente plana y sin irregularidad (algunos casos se paso por esmeril suave) (malla 100)

Después se pasa desbaste fino para esto se usó una selección apropiada de papeles abrasivos (100, 150, 180, 200, 220, 240, 280, 320, 360, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 y 2000).

El abrasivo que se usó para el pulido fue oxido de aluminio o alúmina.

Según las técnicas convencionales entre cada etapa de desbaste al pasar de un papel a otro la probeta debe ser girada 90°.

Finalmente se realiza el pulido fino sobre un paño con un abrasivo de alúmina (0,5 um.)

Tenemos con esto la probeta lista para el ataque metalografico.

La mejor práctica es atacarla probeta pulida inmediatamente, volver a pulir muy

ligeramente (lo suficiente para remover evidencias de ataque) y luego atacar otra vez.

El Nital revela la capa blanca, la profundidad de endurecimiento y la microestructura de los aceros aleados nitrurados tales como el SAE 4140 y aceros al carbono nitrurados.
(19)

4.4. Análisis metalográfico

Luego del pulido las muestras se atacaron con el reactivo de ataque correspondientes para observar la estructura de los aceros seleccionados para el estudio.

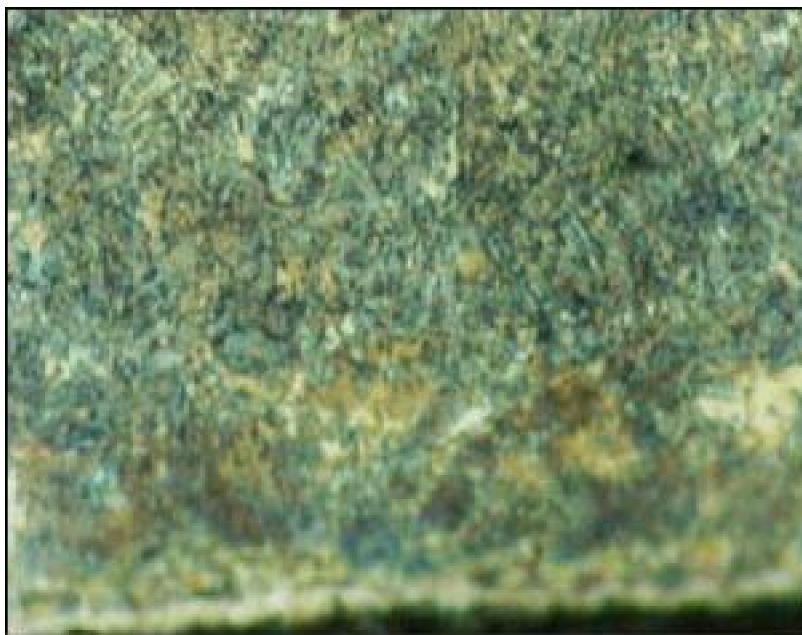
Reactivos :

- Reactivo - Nital 2%
- Alcohol metílico
- Ácido Nítrico Concentrado 2%
- Alcohol
- Algodón
- Papel Secante
- Temperatura : Ambiente.
- Tiempo de ataque : 20 - 30 Segundos.

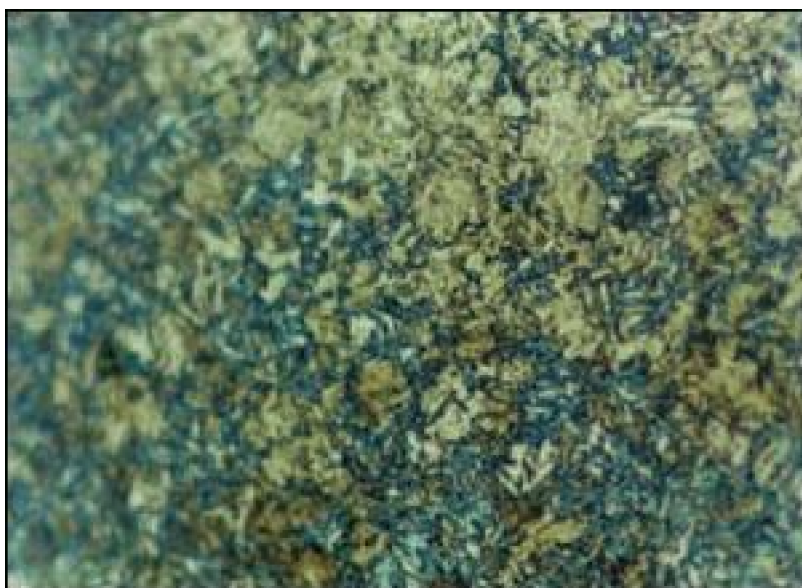
Se observa las estructuras en un microscopio BUEHLER empleando oculares a 100X, 200 X, 400X.

Se determina:

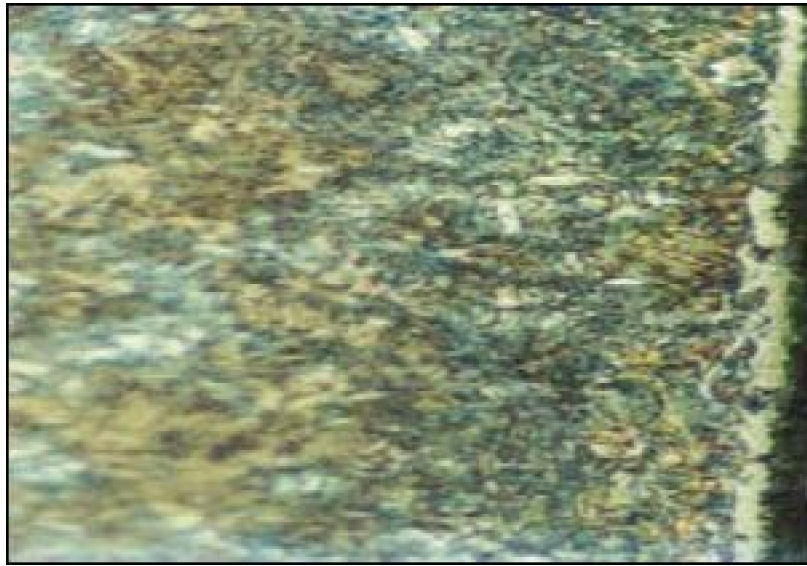
- SAE 1045 : Matriz de ferrita + perlita.
- SAE 4140 : Matriz de Martensita Revenida.
- SAE 4340 : Matriz de Martensita Revenida.
- SAE O 1 : Matriz de perlita + carburos precipitados.



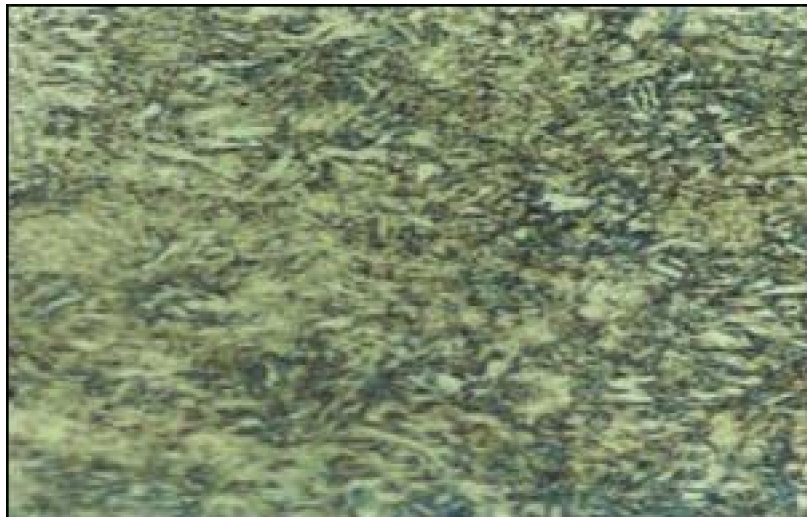
Fotomicrografía N° 1.1. Microestructura del acero SAE 4340, borde (se.observa la capa blanca de compuestos,400X, 5% nital)



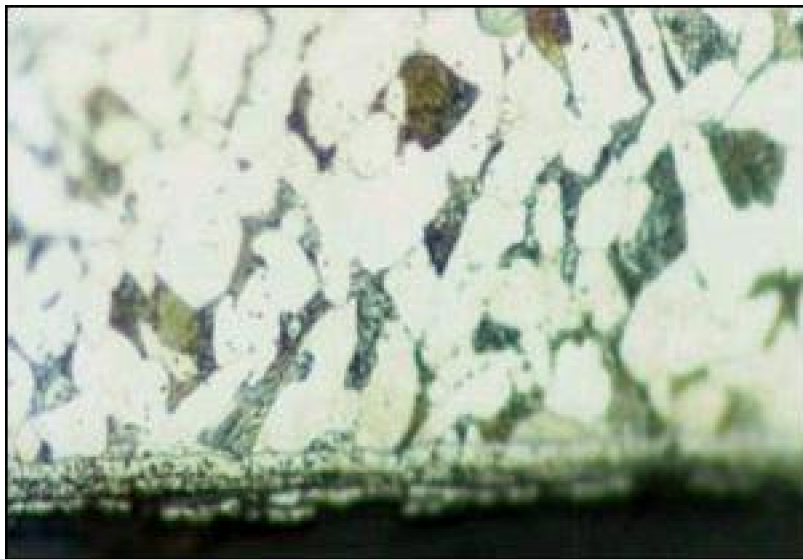
Fotomicrografía N° 1.2. Microestructura del acero SAE 4340, matriz (martencita revenida, 400X, 2% nital)



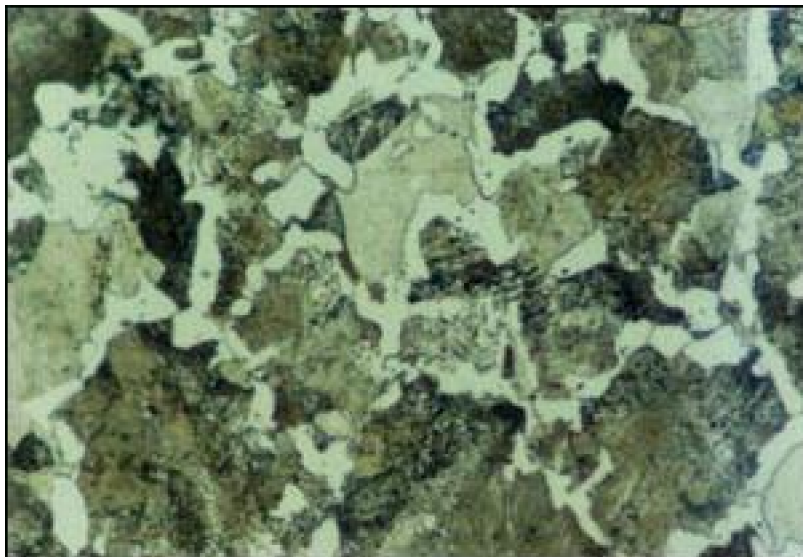
Fotomicrografía N° 1.3. Microestructura del acero SAE 4140, borde (capa blanca de compuestos, 400X, 5% nital)



Fotomicrografía N° 1.4. Microestructura del acero SAE 4140, matriz (martensita revenida, 400X, 2% nital)



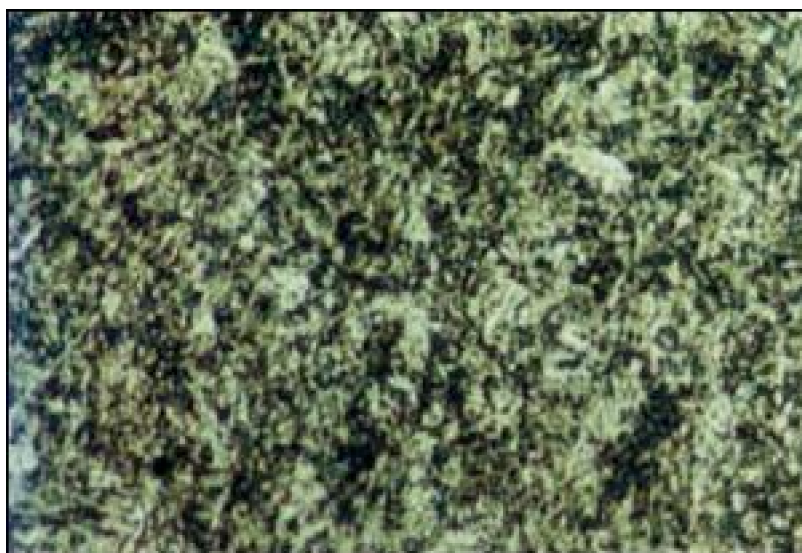
Fotomicrografía N° 1.5. Microestructura del acero SAE 1045, borde (capa blanca de compuestos, 400X, 5% nital)



Fotomicrografía N° 1.6. Microestructura del acero SAE 1045, matriz (ferrita + perlita, 400X, 2 % nital).



Fotomicrografía N° 1.7. Microestructura del acero SAE O-1, borde (capa blanca de compuestos, 400X, 5% nital)



Fotomicrografía N° 1.8. Microestructura del acero SAE O-1, matriz (perlita + carburos precipitados, 400X, 2% nital) .

4.5. PRUEBAS DE MICRODUREZA

Para la obtención de datos, se realizaron mediciones en las probetas preparadas, en las siguientes tablas 1, son para el acero SAE 4140, se tomaron 5 barridos (1.1,1.2,1.3, 1.4, 1.5) en diferentes zonas de la probeta, para este caso las distancias fueron de 0.1 mm. Las Pruebas (2-siguientes tablas se resumieron los datos tomando un promedio de las medidas

Muestra :	Acero AISI 4140
Composición :	%C 0.39-0.45, %Mo 0.15-0.30, %Si 0.1-0.4, %Cr 0.9-1.20, %Mn 0.6-0.9, %P 0.035, %S 0.02.
	Templado-Revenido(270-300 HB)
	Nitrurado : 5 horas, 560 °C.
Equipo :	Microdurometro Vickers LEITZ NLETZLAR Modelo 6293 Alemán .
Carga :	100 gr. (Fortsetzung) 981 mN.

Tabla N° 1.1. Datos obtenidos del promedio de las 5 pruebas realizadas al acero SAE 4140.

N° mediciones	X (mm)	Hv	HRC
1	61	618	56.2
2	111	572	53.7
3	161	514	50.0
4	211	420	42.8
5	261	366	36.9
6	311	336	34.1
7	361	309	32.1
Profun. de capa aprox.			0.31 mm

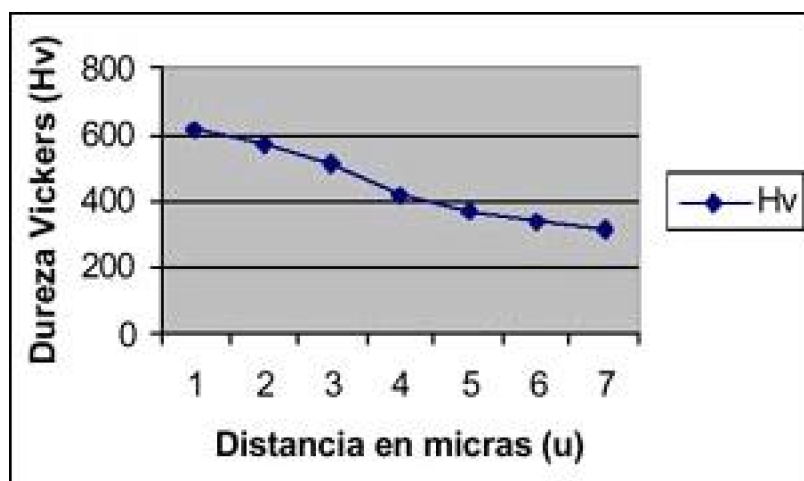


Fig. 4.11. Dureza superficial del acero SAE 4140

Prueba N° 2

Muestra :	Acero AISI 4340
Composición :	

Muestra :	Acero AISI 4340
	%C 0.3-0.38, %Mo 0.15-0.30, %Si 0.15-0.40, %Cr 1.3-1.7, %Ni 1.3-1.7,
	%Mn 0.5-0.8, %P 0.035, %S 0.04.
	Templado-Revenido(275-320 HB)
	Nitrurado : 5 horas, 560 °C.
Equipo :	Microdurometro Vickers BUEHLER Micromet 2003 .
Carga :	100 gr.

Tabla N° 1.2. Datos obtenidos de los ensayos de microdureza al acero SAE 4340.

N° Mediciones	X (micras)	X'	Hv	HRC
1		65.7	623.1	56.5
2	50	115.7	541.8	51.8
3	50	165.7	463.6	46.4
4	50	215.7	436.9	44.2
5	50	265.7	416.9	42.4
6	50	315.7	305.0	31.8
7	50	365.7	282.0	27.5
Profundidad de capa aprox.				0.31 mm

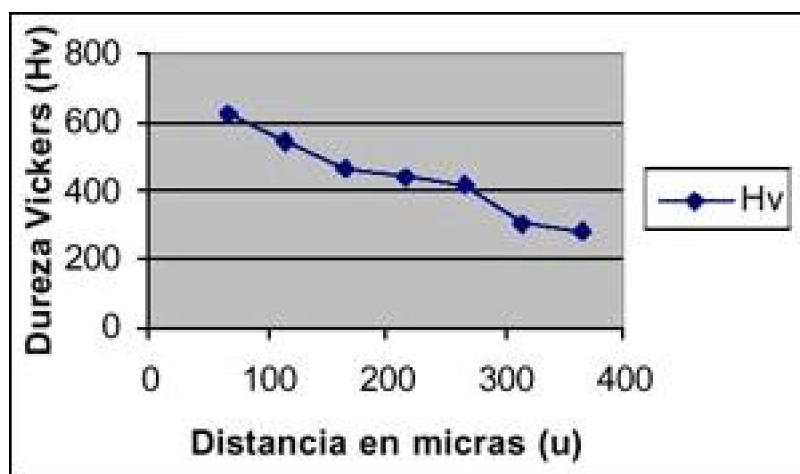


Fig. 4.12. Dureza superficial del acero SAE 4340.

Prueba N° 3

Muestra :	Acero AISI 1045
Composición :	

Muestra :	Acero AISI 1045
	%C 0.45-0.5, %Mo 0.10, %Si 0.15-0.35, %Cr 0.40, %Ni 0.40,
	%Mn 0.5-0.8, %P 0.03-0.04, %S 0.02.
	Recocido (207 HB máx.)
	Nitrurado : 5 horas, 560 °C.
Equipo :	Microdurometro Vickers BUEHLER Micromet 2003
Carga :	100 gr.

Tabla N° 1.3. Datos obtenidos de los ensayos de microdureza al acero SAE 1045.

N° mediciones	X (μ)	X' (μ)	Hv	HRC
1		63.9	434.8	44.0
2	50	113.9	408.7	41.6
3	50	163.9	390.2	39.8
4	50	213.9	355.1	36.1
5	50	263.9	305.1	30.3
6	50	313.9	260.1	24.0
Profundidad de capa aprox.				0.26 mm

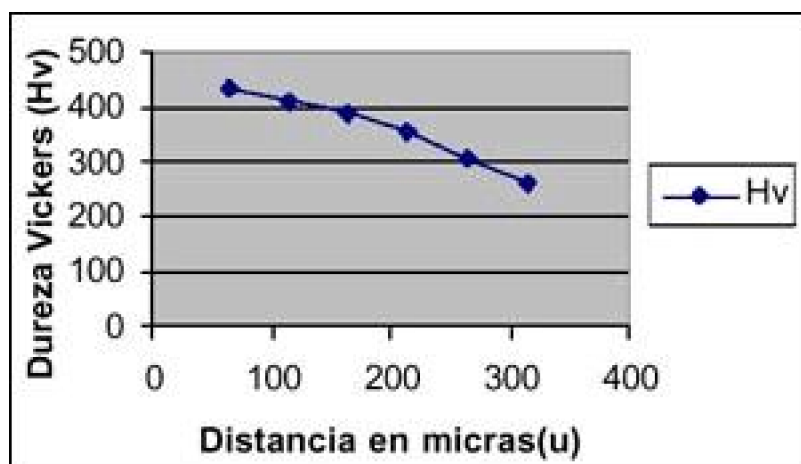


Fig. 4.13. Dureza superficial del acero SAE 1045

Prueba N° 4

Muestra :	Acero AISI O1
Composición :	%C 0.95, %Cr 0.60, %V 0.10, %W 0.6, %Mn 1.1.
	Recocido (230 HB máx.)
	Nitrurado : 5 horas, 560 °C.
Equipo :	Microdurometro Vickers BUEHLER Micromet 2003
Carga :	100 gr.

Tabla N° 1.4. Datos obtenidos de los ensayos de microdureza al acero SAE O1.

N° Mediciones	X (μ)	X'(μ)	Hv	HRC
1		62	475.4	47.3
2	50	112	439.1	44.4
3	50	162	379.6	38.7
4	50	212	332.9	33.6
5	50	262	285.4	27.3
6	50	312	240.0	20.3
Profundidad de capa aprox.				0.262 mm.

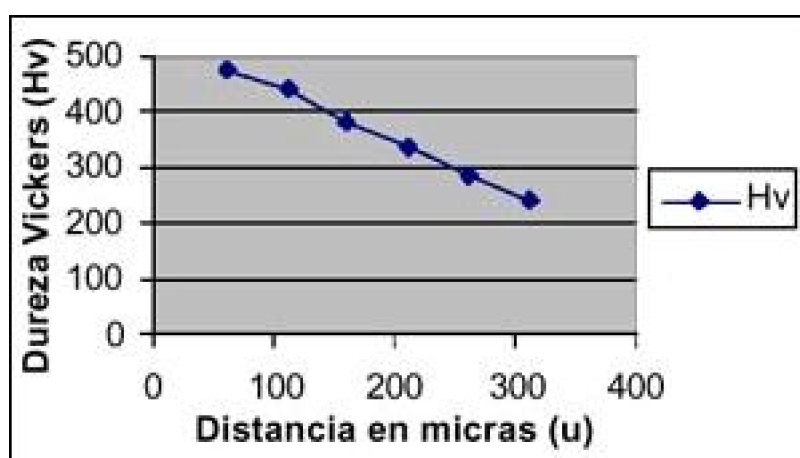


Fig. 4.14. Dureza superficial del acero SAE O1

Las siguientes tablas son para tiempos mayores de 10 a 15 horas.

Prueba N° 5

Muestra :	Acero AISI 4140
Composición :	C 0.39-0.45, %Mo 0.15-0.30, %Si 0.1-0.4, %Cr 0.9-1.20, %Mn 0.6-0.9, %P 0.035, %S 0.02.
	Templado-Revenido
	Nitrurado :10 horas, 560 °C.
Equipo :	Microdurometro Vickers BUEHLER Micromet 2003.
Carga :	100 gr.

Tabla N° 1.5. Datos obtenidos de los ensayos de microdureza al acero SAE 4140 en 10 horas de proceso.

N° Mediciones	X (μ)	X'(μ)	Hv	HRC
1		25	485.0	48.0
2	50	75	452.2	45.5
3	50	125	420.4	42.7
4	50	175	406.8	41.4
5	50	225	361.4	36.8
6	50	275	328.7	33.1
			295.0	29.2
Profundidad de capa aprox.				0.275 mm

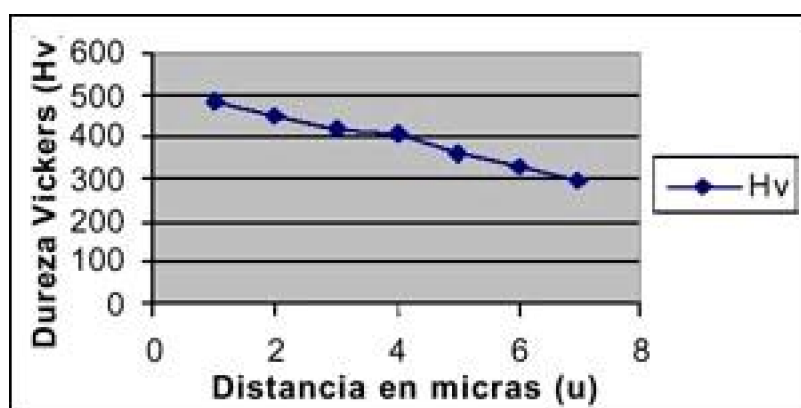


Fig. 4.15. Dureza superficial del acero SAE 4140 en 10 Hrs. de proceso

Prueba N° 6

Muestra :	Acero AISI 4140
Composición :	%C 0.39-0.45, %Mo 0.15-0.30, %Si 0.1-0.4, %Cr 0.9-1.20, %Mn 0.6-0.9, AAP 0.035, %S 0.02.
	Templado-Revenido
	Nitrurado : 15 horas, 560 °C.
Equipo :	Microdurometro Vickers BUEHLER Micromet 2003.
Carga :	100 gr

Tabla N° 1.6. Datos obtenidos de los ensayos de microdureza al acero SAE 4140 en 15 horas de proceso.

N° Mediciones	X (μ)	X' (μ)	Hv	HRC
1		25	473.0	47.1
2	50	75	443.4	44.7
3	50	125	408.0	41.6
4	50	175	393.8	40.1
5	50	225	322.0	32.8
Profundidad de capa aprox.				0.225 mm

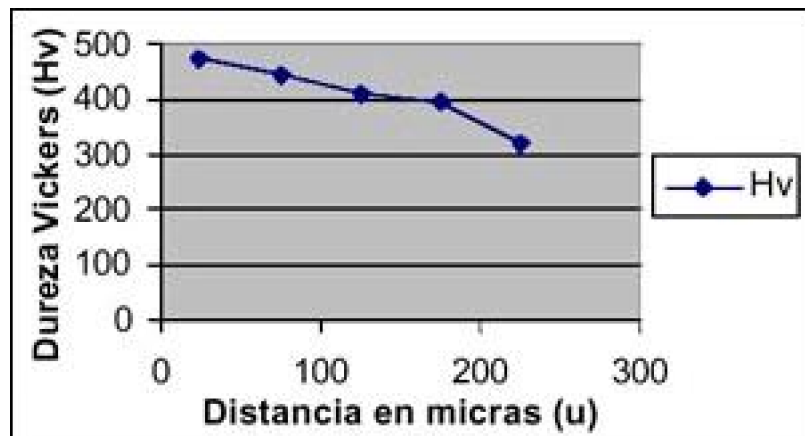


Fig. 4.16. Dureza superficial del acero SAE 4140 en 15 horas de proceso.

4.5.1. MEDICIÓN DE LA CAPA DE COMPUESTOS (CAPA BLANCA)

La prueba se realizó para observar la capa nitrurada, se usaron los siguientes materiales :

- Nital 5% (alcohol metílico 95%, ácido nítrico concentrado 5%)
- Agua Destilada
- Alcohol
- Algodón
- Papel Secante

Se observan las muestras al microscopio luego de ser atacadas con el reactivo y se toma las medidas de la capa blanca nitrurada.

Tabla N° 1. 7. Medida del espesor de la capa blanca de compuestos en los aceros nitrurados

Muestra	Medida (micras)
SAE 4140	10
SAE 4340	15
SAE 1045	10
SAE O1	12.1

4.6. Aplicación de la segunda Ley de Fick

4.6.1. Ecuación de difusión :

$$D = D_o \exp\left(-\frac{Q_d}{RT}\right)$$

$$D_N^{\alpha} = 4,7 \times 10^{-3} \left(-\frac{18,300}{1,987 \times 833}\right)$$

$$D_N^{\alpha} = 7,4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 / \text{s}.$$

De la fórmula :

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_o} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Se tiene los siguientes datos :

$C_o = 0$ (Concentración inicial de nitrógeno)

$C_s = 0,28 \%$ (Concentración máxima superficial de nitrógeno, se obtuvo del Diagrama Fe - N)

$C_x = 0.024 \%$ (Concentración de nitrógeno a una distancia x de la superficie en un tiempo t , se obtuvo este dato de una prueba de espectrometría de masa)

$D = 7,4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{seg.}$ (coeficiente de difusión)

$T = 21\ 600 \text{ seg.}$ (6 hrs), (tiempo en segundos)

$X = ?$ (espesor de la capa cementada para C_x)

Aplicando la fórmula :

$$\frac{0.024 - 0}{0.28 - 0} = 1 - \text{ferr}\left(\frac{x}{2\sqrt{7,4 \times 10^{-8} \times 21600}}\right)$$
$$0.9142 = \text{ferr}\left(\frac{x}{0.07995 \text{ cm}}\right)$$

De la tabla de valores de la función del error, se determina **z** por interpolación.

$$Z = 1.216$$

$$1.216 = \frac{X}{0.07995}$$

$$X = 0.09723 \text{ cm}$$

$$X = 0.9723 \text{ mm}$$

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De los cuadros de resultados de las pruebas de microdureza se puede observar que los aceros con mayor porcentaje de elementos aleantes como es el caso del acero SAE 4140, SAE 4340, tienen mayor dureza que los aceros SAE 1045, SAE 0-1, además estos aceros tienen una Temperatura de Revenido de 540°C - 680°C y la temperatura de nitruración se da en nuestro caso a 560°C.

El acero SAE 1045 tiene una Temperatura de revenido de 550°C, es un acero de mediano carbono que no tiene en su composición elementos aleantes formadores de nitruros.

En el caso del acero SAE 0-1, acero templable (acero para herramientas), en su curva de revenido se observa que a una temperatura de Tratamiento superior a 200°C su dureza empieza a disminuir y a 560°C se ha perdido toda su dureza, el cual haría innecesario templearlo.

De la Tabla N° 7 de medición de la microdureza en la capa de compuestos (capa blanca), esta capa es observable pero por el espesor tan delgado hace difícil su medición, pero no imposible, se disminuye la carga y se observa mayor espesor en los aceros SAE 0-1, SAE 4340, SAE 4140.

Según las Tablas N° 5 y 6, donde se da mayor tiempo de nitruración en las probetas SAE 4140, de 10 y 15 horas, se observa que la dureza disminuye, esto es que la Difusión

de Nitrógeno en el interior del acero tiene un límite según las condiciones del proceso y del fabricante cuando se excede el límite de solubilidad los nitruros se precipitan en los límites de grano y estos átomos que no son absorbidos por la pieza se transforman instantáneamente en nitrógeno molecular, el acero puede también estar reviniéndose.

Aplicando la Segunda Ley de Fick, como se observa los datos fueron obtenidos Teóricos y Prácticos, para obtener la concentración de nitrógeno después del tratamiento (C_x) se hizo una prueba de espectrometría de masa, la concentración (C_s) se obtuvo del Diagrama Fe-N, los otros datos son obtenidos del proceso. Para la prueba se usó el acero SAE 4140, porque al igual que el acero SAE 1045, se obtiene la misma cantidad de nitrógeno en la superficie después del nitrurado. Con estos datos se puede hallar la eficiencia.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

- La nitruración se realiza a temperatura más baja(560°C) que la eutectoide (590°C) , por lo tanto la capa está formada por ϵ , γ' , α , la capa nitrurada tiene una estructura compleja y esta constituida por las subcapas de distinta naturaleza ya mencionadas en el trabajo.
- Las mediciones de dureza se hicieron en la zona de difusión. En la capa de compuestos (capa blanca- Fe_2N) no es posible medir por ser una capa muy delgada, y el equipo usado no hace posible esta medición, esta capa muchas veces es eliminada por su fragilidad, en cambio el endurecimiento de la zona de difusión esta relacionada con la presencia de los elementos de aleación que tiene afinidad por el nitrógeno y de estos formadores de nitruros son los responsables de la dureza alcanzada.
- A esta temperatura del proceso (560°C) el efecto del material base sea recocido o bonificado es poca su influencia para el proceso de nitruración, tendrá efecto para la pieza final, con un acero bonificado se tiene mejores propiedades en el núcleo, sin embargo sería motivo de otro tema de investigación.
- A mayor tiempo de nitruración, la dureza disminuye, el acero SAE 4140 a 5 horas de proceso tiene una dureza de 56 HRC, a 10 horas una dureza de 48 HRC, finalmente a 15 horas una dureza 47 HRC. El incremento de profundidad no es muy definido porque los tiempos no fueron mayores.
- El trabajo de investigación es específico, con estado comparativo no se tiene

herramientas con sistemas de control específicos

- Es importante considerar la aplicación del Proceso en piezas que requieren un mayor tiempo de uso sin ser reemplazados, Un ejemplo concreto :

I.- La Empresa Fábrica Nacional de Baterías, fábrica piezas (ejes, bocinas) para las placas de las baterías .

PIEZAS	MATERIAL	Tiempo de duración	
		Con TT. de Nitrurac.	Sin T.T. de Nitruración
Ejes, Bocinas	Acero Bonificado SAE 4140	2 - 3 años	Menor a 6 meses

En la siguiente tabla se resume el análisis de la inversión en la pieza tratada y sin tratar :

PIEZAS	COSTOS TOTALES	TIEMPO DE VIDA	INVERS. POR 2 AÑOS
Con tratamiento	\$ 28.39	2 años	\$ 28.39
Sin tratamiento	\$ 12.41	6 meses	\$ 49.00
RECUPERACIÓN			\$ 20.61

Nota :

- Es preciso decir que el uso de estas piezas no es continuo, estas placas son usadas 180 días al año.
- Estas piezas eran anteriormente importadas previamente nitruradas, ahora estas piezas son fabricadas y se les da el tratamiento termoquímico de nitrado después.
- No se menciona el ahorro de tiempo por fabricación de piezas.
- Se concluye de este ejemplo la efectividad de este proceso, para estas piezas, y para el trabajo que realizan dando a la pieza un mejor acabado superficial, resistencia al desgaste, ahorro de tiempo como ya se mencionó en la fabricación de piezas, dando mayor vida útil a las piezas.

CAPÍTULO VII. RECOMENDACIONES

Del presente trabajo de investigación se puede recomendar:

- Evaluar el proceso de tratamiento de nitrurado en aceros para moldear plásticos como el acero P20 + Ni, siendo esto uno de los aceros más usados, por su buen acabado superficial.
- Investigar la bondad del proceso a mayores temperaturas de nitrurado trabajando con temperaturas mayor a 591°C. Donde se tienen cuatro fases $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \gamma' \rightarrow \epsilon$, también con temperaturas menores a 560°C. Y verificar el espesor de la capa dura.
- Se recomienda trabajar con un número mayor de muestras por calidad de acero para obtener mayores datos y que sean mas confiables, estableciendo una información estadística.
- Las probetas deben ser maquinadas con rectificado por ambos lados en forma paralela a su eje antes de ser nitrurada, para facilitar las pruebas metalograficas posteriores.
- Realizar pruebas con variables de tiempos mayores, para obtener un mejor análisis del espesor de capa.
- Los aceros que son templables deben ser templados antes de la nitruración, para ser bonificados para esto se debe revisar las curvas de revenido del material, este tratamiento es para mejorar las propiedades en el núcleo de la pieza.

BIBLIOGRAFÍA

- Martínez Baena M. / Palacios J. (2001), "Tratamientos Térmicos de Materiales Metálicos", España, Pág. 38 - 43.
- Dinunzy A. / Duffy Robert E. (1990), "Heat Treatment", U.S.A. Pág. 32 - 36.
- Avner S. (1988), "Introducción a la Metalurgia Física", McGraw-Hill, Interamericana de México.
- Lajtin Yu (1987), "Tratamiento Químico Térmico de los Metales", Editorial Mir., Moscú.
- Apraiz Barreira J. (1997), "Tratamiento Térmico de los Aceros", Ed. Limusa, 9º edición, España.
- Asdrúbal Valencia (1992), "Tecnología del Tratamiento Térmico de los Metales", Ed. Universidad de Antioquia, Colombia.
- Núñez Segundo / Andreone Carlos, (1994), "Aceros", Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina.
- ASM Handbook, (1991), "Heat Treating", Volumen 4, Ed. A.S.M.
- Grossman H.A./Bain E. C. (1972), "Principios del Tratamiento Térmico", Ed. Blume
- Thelning K. (1984), "Steel and Its Heat Treatment", E. Mackoy of Chatham Ltd., Great Britain.
- Askeland Donald, (1985), "La Ciencia e Ingeniería de los Materiales", Ed. Iberoamericana, México.

- Brophy Jere H. (1968), "Propiedades Termodinámicas", Ed. Limusa-Wiley S.A. México DF.
- Cabo A. (1982), "Tecnología de Tratamientos Térmicos", Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina.
- Grinber D. Maria K. (1994), "Tratamiento Térmico de los Aceros y sus Prácticas de Laboratorio", Limusa, Noriega Editores, México.
- Procedyne Corp. (1992), "Equipos para Tratamiento Térmico", New Brunswick, NJ. U.S.A.
- Feirer Jhon L. (1980), "Máquinas de Metales con Máquinas Herramientas", Ed. Continental S.A. de C.V., 2° Edición, México.
- Procedyne Corp. (1992), "Guía para el Proceso de Tratamientos Térmicos", New Brunswick NJ. U.S.A.
- Aceros del Perú SAC. (2002=), "Manual de Aceros Especiales Thyssenkrupp y Tratamientos Térmicos", Ed. Cassallo, 3° Edición, Perú.
- Zavaleta Nilthon, (2000), "Metalografía de Aceros y Fundiciones", Ed. Imprenta Gráfica Real S.A., Perú.
- Ortwd Kubaschewski, (1982) "Iron Binary Phase Diagrams", Ed. Springer-Verlog Berlin, Alemania.
- Shackelford James F., (1992); "Ciencia de los Materiales para Ingeniería" Ed. MacMillan, 3ª Ed., Publishing Company, U.S.A.

ANEXOS

I.- FOTOS DE LOS EQUIPOS USADOS



Fig. a Equipo de pulido



Fig. b Microscopio Metalografico. LU BOPHOT - NIKON



Fig. c Tablero del Microdurómetro Rockwell



Fig. d Microdurómetro Vickers BUEHLER



Fig. e Microdurómetro Rockwell BUEHLER



Fig. f Microdurómetro Vickers BUEHLER



Fig. g Tablero Digital del Microdurómetro Vickers BUEHLER