



UNIVERSIDAD
CIENFUEGOS
Carlos Rafael Rodríguez

Trabajo de Diploma

*Título: Nitruración Gaseosa. Su aplicación
en aceros inoxidable austeníticos*

Autor: Yabiel Pérez Gómez

Tutores: Dr. Luis M. Castellanos González

Ing: Yovany Llody García

Año 49 de la Revolución

curso 2006 - 2007



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

“Carlos Rafael Rodríguez”

Sistema de Documentación y Proyecto.

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez” como parte de la culminación de los estudios de la especialidad de Ingeniería Mecánica; autorizando a que el mismo sea utilizado por la Universidad de Cienfuegos para los fines que estimen convenientes, tanto de forma parcial como total, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

Firma del autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de este envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico.

Nombre y Apellidos. Firma.

Computación.

Nombre y Apellidos. Firma.

Firma de los tutores

Sistema de Documentación y Proyecto.

Nombre y Apellidos. Firma.

*Los científicos necesitamos especialmente la
imaginación...no bastan las matemáticas ni la lógica.*

María Mitchell.

A mi familia por ayudarme en los momentos más difíciles, a mi madre, mi novia y mi hermano.

-A Luis y Llody que más que tutores son amigos.

-A los amigos del aula por la amistad que nos une y ayudarme en los momentos difíciles.

-A los profesores por ayudarme en la carrera.

A mi madre, hermano, familia, a mi novia, y a todos aquellos que han luchado por verme desarrollar mi carrera a lo largo de todos estos años.

En este presente trabajo se exponen algunos fundamentos teóricos acerca del tratamiento químico térmico (TQT) específicamente de la nitruración y la reinstalación y puesta a punto de una la cámara de nitruración. En primer lugar se hace una revisión bibliográfica de este TQT empezando por la descripción de algunos aspectos generales y luego particularmente de la nitruración. Se utiliza como material de estudio base a nitrurar el acero austenítico AISI 316Ti, con vista al desarrollo de estudios posteriores. Haciendo corridas preliminares en diferentes estados estructurales.

Se hace una valoración de las posibles aplicaciones de los aceros AISI 316Ti nitrurados en las diferentes industrias con el fin de obtener mayor vida útil en las piezas.

Índice

Introducción..... 9

Capitulo I: Tratamiento termoquímico. Nitruración y aceros para nitrurar..... 10

1.1 Introducción. 10

1.2 Características generales del tratamiento termoquímico. 10

1.3 Adsorción en la superficie del metal de saturación..... 11

1.4 Difusión en los metales..... 13

1.5 Leyes fundamentales de la difusión y formalización de los procesos de TQT. 16

1.6 Nitruración. 18

 Aceros inoxidables 19

1.7 Aceros inoxidables..... 20

1.8 Tratamientos térmicos. 25

1.9 Aceros inoxidables austeníticos con acritud. 26

1.10 Tecnología de nitruración con gas. 33

1.11 El tratamiento térmico previo. 33

1.12 Protección del acero contra la nitruración..... 33

1.13 Preparación de las piezas para la nitruración. 34

1.14 Regímenes de nitruración de las piezas de máquinas y de la herramienta... 34

1.15 Mecanismos de formación y estructura de la capa nitrurada..... 35

1.16 Defectos de la nitruración y su prevención. 37

1.17 Nitruración de aceros de construcción..... 39

1.18 Nitruración de los aceros martensíticos de envejecimiento. 41

1.19 Control de la calidad de las piezas nitruradas. 43

1.20 Conclusiones parciales. 43

Capítulo II: Instalación del sistema de nitruración gaseosa, puesta a punto. .. 44

2.1 Introducción 44

2.2 Instalación del sistema de nitruración gaseosa y puesta a punto. 44

2.2 Construcción del disociómetro..... 46

2.3 Los pasos a seguir durante el TTQ fueron los siguientes: 49

2.4 La actividad del nitrógeno 49

2.5 Amoniaco, riesgo en la salud, Propiedades físicas y termodinámicas..... 50

2.6 Conclusiones parciales..... 54

Capitulo II: Trabajo experimental.Resultados..... 55

3.1 Introducción 55

3.2 Algunos problemas presentados en la industria del entorno por el deterioro de piezas de acero inoxidable.....	55
3.3 Corridas preliminares de nitruración en aceros inoxidable.....	65
3.4 Discusión de los resultados.	66
3.5 Conclusiones parciales.....	67
Conclusiones.....	68
Bibliografía.....	69
Recomendaciones.....	70
Anexos	72

Introducción

En la industria moderna se requiere de uso de acero inoxidable con capacidad de resistir la corrosión que tengan altas propiedades mecánicas; resistencia mecánica, resistencia al desgaste, tenacidad y dureza, entre otros. Los aceros inoxidables austeníticos de la serie AISI 300, de gran uso en la industria alimenticia, normalmente se pueden endurecer por acritud no siendo termoendurecibles. La nitruración gaseosa, aunque una vieja tecnología de Tratamiento Termoquímico, es una buena opción para lograr altas propiedades de resistencia al desgaste en los aceros inoxidables austeníticos, que son los más abundantes y recomendados para la industria química y alimenticia. Este trabajo se persigue los siguientes objetivos:

1. Reinstalación y puesta a punto el sistema de nitruración gaseosa
2. Efectuar corridas para estudios preliminares de la influencia de los parámetros estructurales en la cinética del proceso
3. Desarrollar propuestas de solución para elementos mecánicos de aceros inoxidables
4. Análisis de casos de deterioro de elementos de máquinas de aceros inoxidables que pueden ser resueltos aplicando la nitruración gaseosa.

En el capítulo 1 se presentan los conocimientos básicos y actualizados sobre los aceros inoxidables, los tratamientos termoquímicos en específico y lo referido a nitruración gaseosa. En el capítulo 2 se muestra como se instalo el sistema de nitruración gaseosa, la construcción del disociómetro y la calibración del mismo. En capitulo 3 se plasman los resultados de las corridas experimentales en el acero inoxidable 316Ti y valoran algunos casos de aplicación.

Capítulo I: Tratamiento termoquímico. Nitruración y aceros para nitrurar.

1.1 Introducción.

En este capítulo se presentan los resultados de la búsqueda de información sobre las temáticas que se abordan en este trabajo de diploma, entre los que están, los aceros inoxidables austeníticos, el tratamiento termoquímico y en específico lo relacionado con la nitruración gaseosa.

1.2 Características generales del tratamiento termoquímico.

El tratamiento químico térmico (TQT) combina las acciones térmicas y química con el fin de cambiar la composición química, estructura y cualidades de la capa superficial de un metal o una aleación. En la figura 1 se muestra el esquema de la clasificación general de los distintos tipos de TQT de los metales y las aleaciones. El TQT se realiza como resultado de la saturación por difusión de un metal o una aleación con no metales (C, N, B, y otros) o metales (Al, Cr, Zn, etc.) en un medio activo saturante a una temperatura determinada. Los métodos principales que se usan para el TQT, se exponen a continuación:

1. Saturación con mezclas de polvos (métodos por polvos)
2. Métodos de la saturación por difusión en medios gaseosos de flujo directo y de circulación.
3. Saturación por difusión en los metales o sales fundidas que contienen un elemento difusor.
4. Saturación en pastas y suspensiones.
5. Saturación por difusión con aplicación del vacío.

La elección de uno u otro método de saturación se realiza de acuerdo con el tipo de producción, las dimensiones exteriores del producto a trabajar, el grosor requerido de la capa, etc. El proceso del TQT es heterogéneo, es decir, se efectúa en diferentes fases contiguas, aisladas una de otra por la superficie interfacial. Los procesos heterogéneos transcurren en etapas múltiples. El TQT comprende tres etapas principales relacionadas entre sí:

1. Reacciones en el medio saturante.

- Formación de átomos activos en un ambiente saturante.
- Difusión de estas hacia la superficie del metal a tratar.
- Reacciones en el límite de separación de las fases, o sea, absorción (quimioadsorción) por la superficie de saturación de los átomos activos que se han formado.
- Difusión o traslación dentro del metal de los átomos absorbidos.

El flujo de los átomos activos hacia la superficie de saturación ha de superar el número de átomos que se trasladan de la superficie hacia dentro debido a la difusión. En el desarrollo de los procesos del TQT, en la mayoría de los casos, la velocidad del proceso se controla por la difusión. Todos los factores que aceleran el proceso de difusión (elevación de la temperatura y del gradiente de concentración, defectos estructurales, etc.) acortan la duración del proceso tecnológico del TQT. La concentración creada en la superficie por el elemento difundidor, depende de la corrección entre la velocidad concentración la que se traslada al interior. La concentración del elemento en la superficie depende de la actividad del medio saturante (potencial de la atmósfera) y de la velocidad con que se difunden los átomos desde la superficie al interior del metal: cuanto mayor sea la actividad de la atmósfera saturante (avance de los átomos activos) y más baja la velocidad de difusión, tanto mayor será la concentración superficial. Pero siendo excesiva la velocidad con que se trasladan los elementos los átomos del ambiente saturante, el elemento difundidor puede segregarse en la superficie a tratar, lo cual obstaculiza la saturación interior y rebaja la velocidad del TQT.

1.3 Adsorción en la superficie del metal de saturación.

Al interaccionar el medio saturante con la superficie a tratar, en la superficie metálica (absorbente) surge una acumulación (aumenta la concentración) del elemento difundidor (absorbato). Según el carácter de la interacción entre el absorbato y el absorbente, se diferencian la absorción física y la quimiabsorción. La absorción se produce a expensas de la energía libre de la capa superficial desequilibrada. Durante la absorción física las moléculas y los átomos se mantienen en la superficie por las fuerzas de Van der Waals, en tanto que el caso de quimioabsorción el absorbato reacciona químicamente, o sea, tiene lugar la transferencia electrónica. A veces la quimioabsorción se considera como

absorción de partículas preferentemente en forma de iones (absorción de iones). El calor de la quimioabsorción se aproxima, a la vez que al de absorción física, al de condensación. A diferencia de la quimioabsorción, la adsorción física no requiere de energía de activación. La absorción suele observarse a temperaturas inferiores al punto de ebullición del absorbato, mientras que la quimioabsorción es posible a temperaturas más altas. Durante la quimioabsorción se forma una capa muy fina (monomolecular), en comparación con la absorción física del absorbato. A veces el absorbente es catalizador, entonces se reduce la energía de activación y aumenta la velocidad de la reacción química. La energía de activación de la reacción $2NH_3 \rightarrow 2N \rightarrow 3H_2$ sin catalizador es de 296 KJ / mol mientras que en la superficie de los catalizadores (Mo, W) esta energía disminuye hasta 163 KJ / mol, siendo iguales las demás condiciones. Veamos la etapa de la absorción del proceso de TQT, basándose en el ejemplo de la nitruración de los metales de transición. La mayoría de los investigadores coinciden en la opinión de que la fuente originaria de todos procesos de nitruración es el nitrógeno molecular. Los aditivos e impurezas de otros elementos en el medio gaseoso pueden contribuir u obstaculizar la absorción del nitrógeno por la superficie a nitrurar. Por ejemplo, el oxígeno, se absorbe en la superficie de los metales más sólidamente que el nitrógeno y obstaculiza la interacción de este último con la superficie. Por esta razón, al calentar los metales en un medio de aire se produce la oxidación y no la nitruración. Debido a esto, antes de la nitruración o de otros procesos de saturación por difusión hace falta quitar la película de óxido mediante un procedimiento mecánico o químico.

La absorción del nitrógeno por la superficie de los metales de transición se acelera considerablemente en presencia del hidrógeno. Este hecho explica la alta actividad del amoníaco disociado, como medio nitrurante, en comparación con el nitrógeno molecular. En vista de que los metales de transición son de una afinidad mayor que la del hidrógeno, entonces, si se dispone de una energía suficiente para la activación, la molécula de hidrógeno, al chocar con la superficie, se disocia en átomos, los cuales ceden sus electrones al metal, facilitando asimismo la formación de iones negativos de nitrógeno. Se supone que durante la nitruración ordinaria en amoníaco y nitrógeno molecular la quimioabsorción finaliza con la formación de iones negativos de nitrógeno en la superficie sometida a la saturación. Este proceso transcurre con mayor dificultad en

un medio de nitrógeno molecular en comparación con la mezcla de este con el hidrógeno (en amoníaco disociado).

Durante la nitruración ordinaria la molécula de nitrógeno al incorporarse al campo de fuerzas del cristal metálico, bajo las fuerzas de Van der Waals comienza a moverse hacia la superficie, perdiendo la energía potencial y adquiriendo la cinética. De vez en cuando la energía cinética se hace tan grande que la molécula de nitrógeno, venciendo las fuerzas de repulsión, se acerca a la superficie a una distancia que posibilita una interacción electrónica de $0,1 \dots 0,2 \text{ N m}$. La molécula puede desintegrarse en dos átomos, que pierden la energía potencial y se atraen por la superficie a consecuencia de la adición de los electrones libres del metal a los átomos de nitrógeno, es decir, tiene lugar la quimioabsorción. Esta última en la mayoría de los casos, no solo produce la redistribución de la densidad electrónica, sino que también hace migrar, a distancias pequeñas, los iones absorbidos químicamente, lo cual causa una distribución espacial de estos próxima a la red cristalina de los nitruros. La experiencia ha mostrado que con el aumento de la cantidad relativa de los iones de nitrógeno elemental el proceso de nitruración se intensifica, lo cual está indisolublemente vinculado con el mejoramiento de las condiciones en que transcurre la quimioabsorción de los iones de nitrógeno. Al añadir una cantidad reducida de oxígeno puro, el número relativo de los iones de nitrógeno elemental disminuye bruscamente, surgen iones positivos de oxígeno y no se produce la nitruración. Así pues, el proceso de quimioabsorción está condicionado por el carácter de la interacción electrónica entre el nitrógeno y la superficie de saturación, siendo posible esta interacción al formarse iones de nitrógeno tanto negativo como positivo. Sin importar el mecanismo de saturación de la superficie del metal a tratar con el absorbato empleado, las partículas de este último se deben a difundir hacia el interior del cuerpo tratado.

1.4 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 las sustancias dadas. Si los desplazamientos de los átomos no están vinculados con el cambio de la concentración en volúmenes aislados, entonces dicho proceso se denomina autodifusión. La

autodifusión es el desplazamiento de los átomos en un metal puro. La difusión que va acompañada de un cambio de concentración, lo que tiene lugar en aleaciones, así como durante el TQT, recibe el nombre de heterodifusión. La difusión que provoca una recristalización fásica (formando nuevas fases), con frecuencia se denomina reactiva o de reacción, lo cual es injustificado ya que en este caso no hay ninguna reacción química. Es más correcto darle el nombre de difusión acompañada de transformaciones fásicas. Este tipo de difusión ocurre al saturar el acero con nitrógeno, cromo, silicio, etc. Como base de la difusión en los metales sirve el proceso atómico en el cual todo átomo efectúa vagabundeos más o menos accidentales, es decir, una serie de saltos entre las diferentes posiciones de equilibrio en la red cristalina. La noción de "difusión" no se aplica al movimiento de átomos aislados, sino al flujo macroscópico de la sustancia. Las traslaciones macroscópicas de la sustancia son el resultado de un enorme número de traslaciones pequeñas de átomos aislados. En el sistema de dos o más componentes la difusión es posible únicamente si uno de los componentes es soluble en el otro. Cualquier teoría atómica de la difusión debe comenzar con el estudio de esta última. Ante todo hay que contestar a la pregunta: ¿de que modo un átomo dado se traslada de una posición a otra? Para describir el proceso de difusión en un cuerpo cristalino (de un metal) se ofrece un gran número de posibles interpretaciones del mecanismo de difusión:

1. De intercambio
2. Anular
3. De vacancias
4. Internodal directo
5. Internodal por desalojamiento
6. De aglomeración (crowd)

El esquema de los diferentes mecanismos de la difusión de los metales es mostrado en la figura 1.1

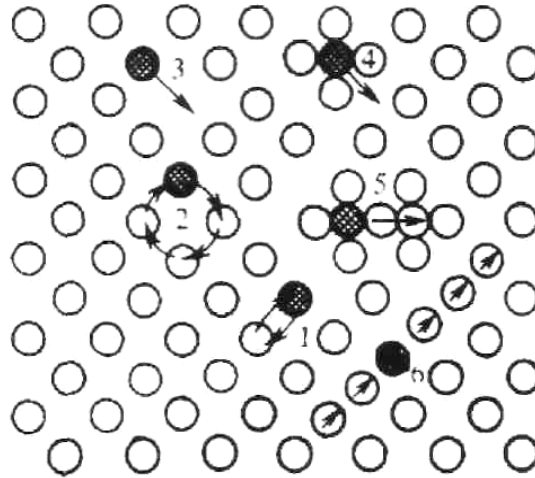


Figura 1.1. Difusión de los metales.

Todos los defectos estructurales de las vacancias, límites intergranulares y sublímites, la superficie exterior, dislocaciones, influyen en la movilidad difusiva de los átomos. Durante el TQT se realiza tanto la difusión volumétrica (en el interior de cada uno de los granos), la cual hace el aporte principal en el flujo difusivo, como la difusión en los límites intergranulares. La difusión a lo largo de los límites de los granos se da a una velocidad mucho mayor que en volumen del grano. Este fenómeno se debe a que los límites de los de ángulos múltiples, sea cual fuera su modelo físico, contienen una concentración grande de vacancias (huecos) y aperiodicidades en la atómica, lo cual aumenta la probabilidad disposición de transiciones de los átomos. Sobre la velocidad de difusión por las fronteras de los intergranulares ejercen fuerte influencia la desorientación mutua de los granos y su tamaño. De esta forma, cuanto más fino es el grano, tanto mayor será la extensión de las fronteras y con tanto mayor rapidez transcurre la difusión, y si las demás condiciones son iguales, el espesor de la capa de difusión resulta más grande. Como los límites intergranulares son los principales suministradores de vacancias (huecos) en los metales, el afinamiento del grano ha de aumentar el número de vacancias y así facilitar la difusión en el volumen del grano de los elementos de sustitución. Ejerce una influencia análoga la deformación plástica, la irradiación con partículas pesadas de gran energía (neutrones, protones, etc.). La succión por los límites intergranulares en el volumen de los granos, se realiza según el mecanismo de difusión volumétrica, mientras que los elementos de sustitución también se aspiran a lo largo de las dislocaciones.

1.5 Leyes fundamentales de la difusión y formalización de los procesos de TQT.

Al calcular los procesos de TQT, hay que obtener las relaciones cuantitativas unívocas entre los parámetros del proceso, o sea, formalizar el proceso. Para que las descripciones matemáticas de los procesos complicados sean formalizadas, se recomienda dividirlos en partes más simples, que se distingan por una misma esencia física. La formalización del TQT, en concordancia con sus procesos físicos básicos, consiste en lo siguiente:

1. Descripción de los procesos que transcurren en un ambiente activo, con el fin de determinar la relación entre los parámetros tecnológicos de entrada y la actividad (el potencial) del ambiente, de la cual depende la capacidad de este de saturar.
2. Formalización del enlace entre la actividad del ambiente y la transferencia de masa (flujo) del elemento difundidor en la pieza, teniendo en cuenta las propiedades del material a tratar.
3. Descripción de la cinética de saturación por difusión, la cual determina la composición física, la estructura y la distribución de la concentración del elemento en el espesor de la capa.

La descripción matemática de la fase de difusión está basada en las suposiciones expresadas por Fick y confirmadas reiteradamente en forma experimental. Fick escribió las ecuaciones principales de la difusión, considerando la penetración de la sustancia difundidora en la matriz de una manera análoga a la conducción del calor en el cuerpo a calentar. La primera ley de Fick, obtenida para la difusión estacionaria cuando la concentración del elemento difundidor no depende del tiempo, tiene la forma:

$$I = -D(\partial c / \partial x) \quad (1)$$

La primera ley demuestra que el flujo de la sustancia difundidora durante la difusión estacionaria es proporcional al gradiente de concentración y está dirigido hacia la disminución de la concentración. El coeficiente de proporcionalidad D se denomina constante de difusión y caracteriza la velocidad de difusión. El depende de la temperatura y la naturaleza de la sustancia difundidora y de la matriz. En el sistema internacional de unidades la unidad de medición de la constante de difusión es:

$$[D] = [I] / [\partial c / \partial x] = [m^2 / s] \quad (2)$$

Si la concentración cambia con el tiempo, entonces se emplea la ecuación de difusión, que refleja la variación de la concentración por la unidad de tiempo en un punto determinado de la zona difusiva (segunda ley de Fick):

$$\partial c(x, \tau) / \partial \tau = \partial / \partial x (D \partial c / \partial x) \quad (3)$$

Suponiendo que la constante de difusión depende en un grado insignificante de la concentración, lo cual se suele hacer en los cálculos prácticos, la ecuación de difusión se puede presentar en la forma:

$$\partial c(x, \tau) / \partial \tau = D \partial^2 c / \partial x^2 \quad (4)$$

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 las que deben satisfacer la concentración del elemento difundidor. Estas condiciones se determinan por un aspecto concreto de la pieza y el tratamiento termoquímico. La distribución inicial de la concentración del elemento difundidor en la capa, puede ser arbitraria.

Por lo general se supone igual a cero: $c(x, 0) = 0$. Las condiciones de frontera (en la frontera medio saturante - matriz) se determinan en función del mecanismo de TQT aceptado a priori.

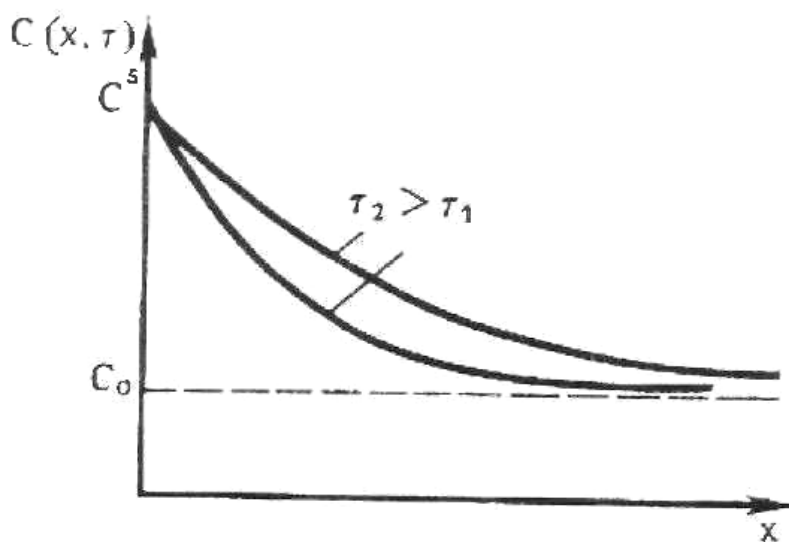


Fig 1.2. Distribución de la concentración del elemento difundidor de la capa, siendo constante la concentración superficial: $c^s(0, \tau) = \text{constante}$ y la concentración inicial c_0 .

$$c(0, \tau) = c^s(\tau) \quad (5)$$

significan, desde el punto de vista físico, que en el proceso dado de TQT la concentración del elemento difundidor en la superficie de la pieza $c(0, \tau)$ en un tiempo despreciablemente pequeño, se hace igual a la concentración equilibrada con el medio ambiente, en tanto que $c^s(\tau)$, al potencial del ambiente saturante. Con esta condición de frontera el factor cinético se desprecia y se supone que el proceso de TQT se limita totalmente con la etapa de difusión.

La condición de frontera de primer género es ampliamente usada en los cálculos prácticos de los procesos de TQT por la sencillez con que se obtiene la solución de la ecuación de difusión. Si en la superficie se mantiene una concentración constante del elemento difundidor $c(0, \tau) = c^s(\tau) = \text{constante}$, produciéndose la difusión en un espacio semiinfinito la solución de la ecuación (4) tiene la forma:

$$c(x, \tau) = c^s(\tau) [1 - \operatorname{erf}(x / 2\sqrt{D\tau})] \quad (6)$$

donde $c(x, \tau)$ es la concentración del elemento difundidor a la distancia x de la superficie en el momento de tiempo τ , $c^s(\tau)$ la concentración del elemento difundidor en la superficie durante el proceso de TQT.

1.6 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 dissociado. La nitruración se suele realizar a 500.... 600 °C (nitruración a baja temperatura), por lo tanto no ocurre transformación de fase. 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 se 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.

Aceros inoxidables

En numerosas aplicaciones se requieren aceros los que no bastan las propiedades mecánicas para un fin dado, sino que si exige de ellos resistencia a la oxidación y a la corrosión, fundamentalmente en medios salinos, ácidos y a alta temperaturas.

Los aceros inoxidables son aquellos que poseen cromo como elemento de aleación por encima del 12%. En dependencia del % de otros elementos de aleación y del % de carbono estos aceros pueden tener estructura ferríticas, ferríticas - martensíticas, ferríticas - austeníticas, martensítica y austenítica. Los austeníticos son los que además del Cr tienen alto % de Niquel de los otros elementos ganmángenos.

En este trabajo se hace referencia a dos grupos de acero inoxidable; los martensíticos, que son tratables térmicamente con temple y revenido y los austeníticos que se endurecen por deformación plástica en frío (acritud) o por alguna tratamiento termoquímico.

1.7 Aceros inoxidables.

En la Tabla 1 se presenta la composición de varios aceros inoxidables martensíticos; en ella, están recogidos los principales aceros de alta resistencia de este grupo, normalizados por AISI, así como los dos tipos fundamentales españoles, los F-312 y F-313, junto con algunos aceros comerciales especialmente desarrollados para su utilización como aceros de gran resistencia, y en algunos casos de forma que sus altas características mecánicas se conserven a temperaturas elevadas.

Los aceros inoxidables martensíticos pertenecen, en su casi totalidad, al tipo fundamental con 12 % de cromo. La razón de que el contenido en este elemento de los distintos aceros varíe entre límites muy estrechos es consecuencia, por una parte, de la necesidad de mantener un porcentaje de Cr superior al 10 % para conseguir la inoxidabilidad (figura 1.3), y por otra, al efecto estabilizador del hierro alfa producido por el Cr en las aleaciones férreas. En la (figura 1.4) se presenta el diagrama hierro-cromo y en él puede apreciarse que el bucle gamma (única zona de estabilidad del hierro gamma) se extiende hasta contenidos en cromo de 12 a 13 %, no siendo, por tanto, susceptibles de temple las aleaciones con mayor proporción de este elemento, por no poderse austenizar a ninguna temperatura. Si bien ciertos elementos de aleación desplazan hacia la derecha el extremo del bucle gamma [elementos austenizadores), permitiendo de esta forma utilizar mayores proporciones de Cr, su dosificación se realiza siempre en pequeñas proporciones a causa, principalmente, de su efecto sobre las temperaturas de transformación.

Tabla 1. Aceros inoxidables martensíticos.

Aceros	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	W	Otros
AISI 410	<0.15	<1	<1	12.50	-	-	-	-	-
AISI 416	<0.15	<1.25	<1	13	-	-	-	-	>0.155 s o Se
F-312 (AISI 420)	0.35	<1	<1	13	-	-	-	-	-
F-313 (AISI 431)	<0.20	<1	<1	16	-	-	-	-	-
AISI 418	0.17	0.40	.30	12.75	2	-	-	3	-
AISI 419	0.25	-	-	12	0.50	0.50	0.25	3.00	0.10N
AISI 422	0.20	0.65	0.50	12	0.75	1	0.30	1.00	-
AISI 422 M	0.28	0.85	0.25	12	0.20	2.25	0.50	1.70	-
12 Mo V	0.25	0.50	0.50	12	0.50	1	0.50	-	-

Los efectos más destacados del carbono son, aumentar de forma importante la dureza de la martensita y el endurecimiento secundario en el revenido, disminuyendo al mismo tiempo la ductilidad y tenacidad del acero muy sensiblemente cuando se utilizan altos niveles de C. Este elemento produce también una fuerte disminución de la temperatura y, por tanto, con altos contenidos en C resulta difícil obtener en el temple una estructura libre de austenita retenida.

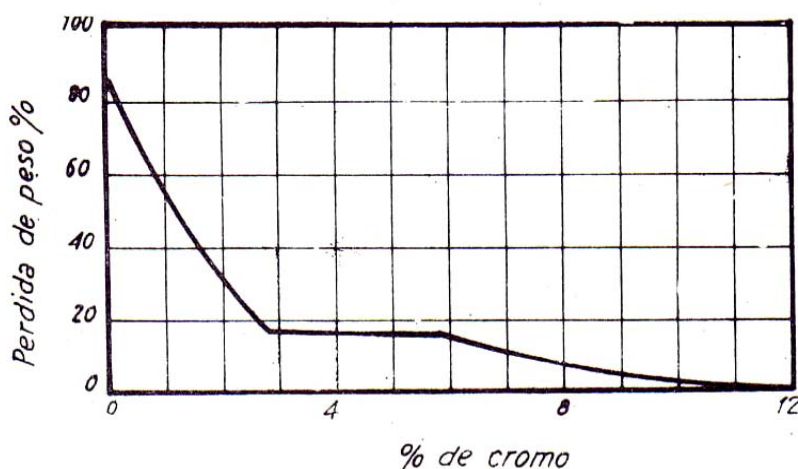


Fig. 1.3. Pérdida de peso de aleaciones Fe-Cr después de 10 años en una atmósfera industrial.

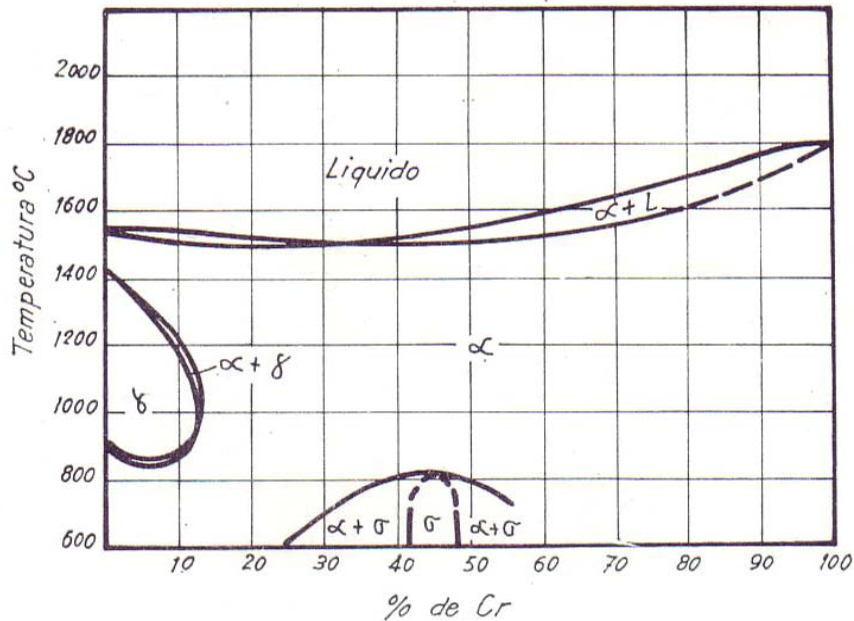


Fig. 1.4. Diagrama de equilibrio de las aleaciones Fe-Cr (2).

Por todas estas razones, el carbono de los aceros inoxidables martensíticos para utilidades estructurales se conserva, generalmente, inferior al 0,3%. El N tiene efectos similares a los del C, produciendo también un aumento en la dureza de la martensita y en la secundaria, aunque estos efectos se hacen menos sensibles al aumentar las temperaturas de revenido, de forma similar a lo que ocurre con el C.

El Ni es empleado como elemento de aleación en numerosos aceros inoxidables martensíticos, siendo un elemento altamente estabilizador de la austenita. Mejora en cierto grado la dureza de la martensita y la secundaria, provocando un desplazamiento del fenómeno de dureza secundaria hacia temperaturas de revenido más bajas, pero mejorando la resistencia con revenidos altos (600-700 °C). El Ni es particularmente efectivo, retardando el comienzo de las transformaciones isotérmicas, mejorando, por tanto, la templabilidad del acero; este efecto puede apreciarse en los diagramas de transformación isotérmica que se muestran en la figura 1.5. Las temperaturas de transformación se ven afectadas por el contenido en Ni, pues este elemento provoca el descenso de las temperaturas A₁ y M_s, lo que limita la utilización del Ni a proporciones inferiores al 3 %.

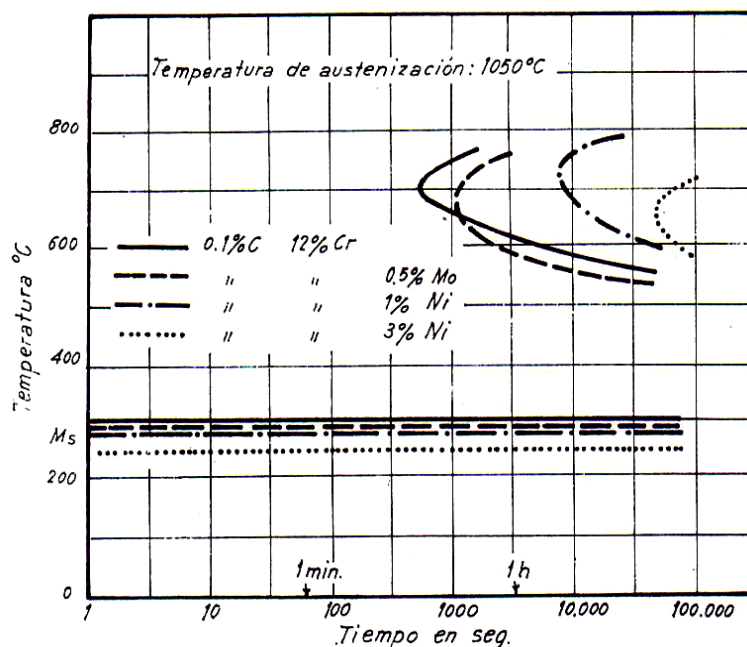


Fig. 1.5. Curvas de transformación isotérmicas de varios aceros martensíticos.

El Mn tiene efectos similares a los del Ni, si bien este último tiene la ventaja de ser un elemento austenizador más enérgico. Por esta razón no suele utilizarse el Mn en proporciones superiores al 1 %, si bien el contenido en este elemento de los aceros que estamos considerando, mejora, desde luego, su templabilidad, además de actuar como desoxidante y de evitar la fragilidad en caliente producida por las impurezas de S.

El cobre tiene un efecto despreciable sobre la dureza de la martensita, pero eleva notablemente la dureza secundaria, al parecer como consecuencia de provocar un aumento de los precipitados responsables de dicho endurecimiento. El Cu eleva también la dureza para revenidos altos.

Entre los elementos austenizadores, citaremos, finalmente, el Co, pues aunque su uso en aceros inoxidables martensíticos no está comercialmente extendido, quizá por razones económicas, presenta como elemento de aleación características importantes, han estudiado el efecto de este elemento en aceros con 0,1 % C 12 % Cr, mostrando que es posible alear porcentajes hasta del 10 % de Co, por ser muy ligera su tendencia a rebajar la temperatura, aumentando de forma considerable la dureza hasta temperaturas de revenido del orden de 500 °C

La adición, en los aceros inoxidables martensíticos de elementos estabilizadores del

hierro alfa, debe ser controlada minuciosamente para conseguir una estructura final libre de ferrita, pues, de lo contrario, las características mecánicas del acero disminuyen sensiblemente. Sin embargo, elementos formadores de ferrita como son el Si, Mo, W y V son utilizados con gran frecuencia, como consecuencia de sus positivos efectos sobre las características de estos aceros.

El Si, aumenta la dureza de los aceros inoxidables martensíticos para todas las temperaturas normales de revenido, siendo más marcado este efecto con revenidos altos; es, además, un activo desoxidante de los aceros. El Si, presenta una ligera tendencia a disminuir la temperatura M_s , no teniendo apenas influencia sobre la A_{c1} si bien tiende a elevarla. El contenido en Si de los aceros que consideramos, se conserva generalmente inferior al 1%, si bien en varios tipos la proporción empleada es algo mayor que la normal en los aceros de baja aleación.

Las adiciones de Mo, W y V elevan en general la dureza de los aceros con 12 % de Cr para cualquier temperatura de revenido, pero su efecto más importante es el de estabilizar los carburos precipitados durante el endurecimiento secundario, desplazando hacia temperaturas de revenido más altas las zonas de máxima dureza secundaria y manteniendo, por tanto, un alto nivel de resistencia con revenidos altos, siendo su efecto más notable en la zona de los 550-650 °C. Además, el Mo y el W, especialmente el primero, reducen la fragilidad en el revenido, contribuyendo a aumentar la templabilidad el Mo y el V y siendo, este último, un elemento afinador de grano. Debido a que estos tres elementos son estabilizadores del hierro alfa, su utilización está limitada por la posible aparición de ferrita en la estructura final, siendo bajo este punto de vista el V el más efectivo, y, por tanto, el más peligroso; sin embargo, sus beneficiosos efectos con revenidos altos y para servicio a temperaturas elevadas, hace que alguno de estos elementos, o una combinación de ellos, entre en la composición de muchos aceros del grupo que estamos considerando, como puede apreciarse en la Tabla 1.

La composición de los aceros inoxidables martensíticos es muy crítica, según se desprende del diagrama de equilibrio Fe-Cr (figura 1.4). Tratándose de aceros de alta resistencia, es importante que su estructura final esté libre de ferrita y, por tanto, las adiciones de elementos estabilizadores del hierro alfa deben ser compensadas con

otras de elementos austenizadores; pero al mismo tiempo, la tendencia de todos los elementos de aleación a bajar la temperatura y algunos también limita las adiciones totales de aleantes para permitir que la transformación martensítica se desarrolle de forma completa y evitar el riesgo de reaustenización durante revenidos altos.

1.8 Tratamientos térmicos.

El recocido de los aceros inoxidable martensíticos se realiza habitualmente calentando a 800 - 870 °C, enfriando lentamente (generalmente en el horno) hasta unos 550 °C posterior enfriamiento al aire hasta la temperatura ambiente, quedando el acero con dureza de 90-100 Rockwell.

El calentamiento para el temple suele realizarse a temperatura entre 950 y 1.100 °C, efectuándose a veces un precalentamiento a unos 700-800 °C. La temperatura de temple en estos aceros produce efectos sobre la dureza obtenida después de dicho tratamiento, a causa de que su composición crítica hace que pequeñas variaciones en la temperatura puedan producir ciertas cantidades de ferrita en su estructura. Este efecto puede apreciarse en la (figura 1.6), en la que se presentan las curvas dureza-temperatura de temple obtenidas en algunos de este grupo.

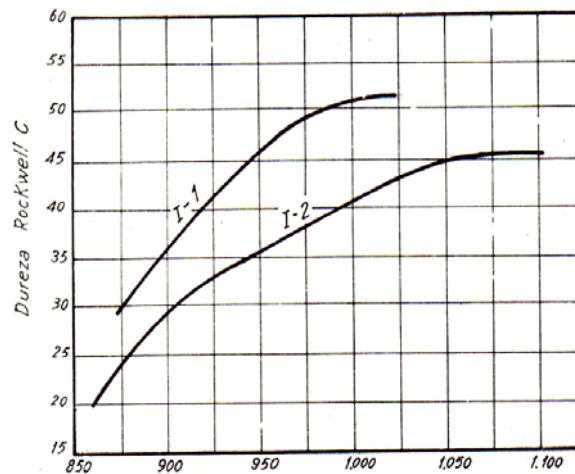


Fig 1.6. Variación de la dureza con la temperatura de temple en las coladas experimentales de aceros martensíticos.

En el revenido de los aceros inoxidable martensíticos, se presenta una zona de fragilidad entre los 370 °C y 590 °C; este enfriamiento es especialmente importante

con revenidos a temperaturas del orden de 450 - 540 °C y recibe a veces el nombre de «fragilidad de los 475 °C. En la figura 1.7 se muestra un ciclo térmico recomendado para aceros martensíticos AISI 420 y los resultados de dureza en función de la temperatura de revenido.

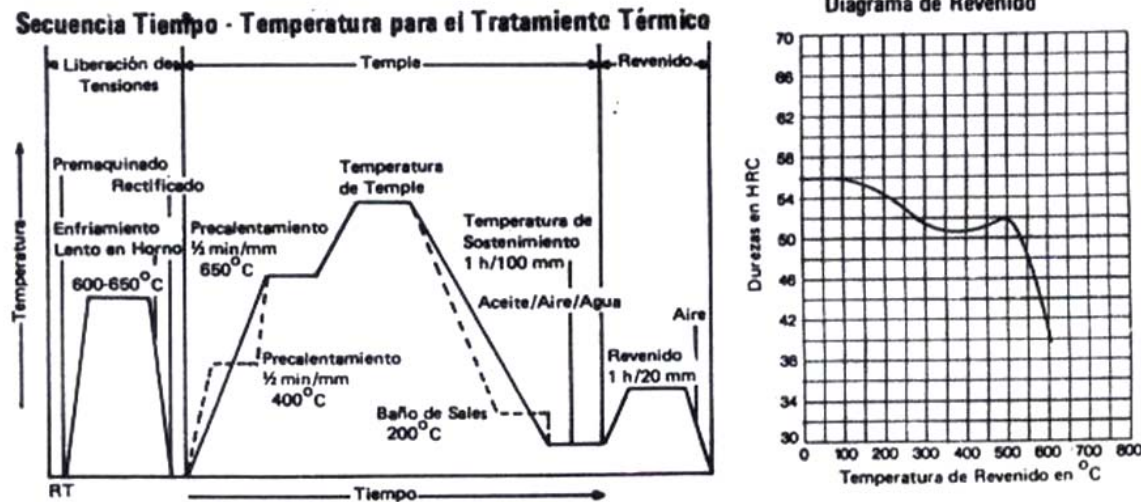


Fig.1.7. Ciclo térmico en el Tratamiento térmico del acero AISI 420 y Curva de dureza en función de la temperatura de revenido.

Las altas características mecánicas de los aceros inoxidables martensíticos, unidas a su resistencia a la oxidación y corrosión y a su buen comportamiento a temperaturas elevadas, hace que estos aceros sean ampliamente utilizados como materiales de recubrimiento y para la fabricación de depósitos de presión, en forma de chapas, así como para numerosas piezas y elementos, en la industria del transporte, industrias químicas y aeronáuticas, y fabricación de motores y turbinas.

1.9 Aceros inoxidables austeníticos con acritud.

Sí bien los aceros inoxidables austeníticos no pueden ser llevados a altos niveles de resistencia por medio de tratamientos térmicos, ya que no existen en ellos transformaciones estructurales, puede aprovecharse, sin embargo, su gran sensibilidad a la acritud para conseguir muy altas resistencias por medio de la deformación en frío. De esta forma, aceros del tipo 18-8 que tienen una resistencia de unos 80 Kg/mm en estado recocido, pueden llegar a los 180 Kg/mm mediante su deformación en frío.

Por tanto, los aceros austeníticos con acritud deben ser considerados como aceros de muy alta resistencia, si bien sus aplicaciones están limitadas por la dificultad de su conformación después del tratamiento mecánico que les confiere dicha acritud, y por el hecho de que temperaturas elevadas de servicio provocan, si se mantienen, durante tiempo suficiente, destrucción de los efectos de la acritud.

La Tabla 2 resume las composiciones de varios aceros inoxidables austeníticos utilizados con acritud.

Aceros	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	N
AISI 301	<0,15	<2	<1	17,-	7,-	-	-	-
AISI 302 (F-314)	<0,15	<2	<1	19,-	9,-	-	-	-
AISI 304	<0.08	<2	<1	18,-	10	-	-	-
AISI 201	<0,15	6.5	<1	17,-	4.50	-	-	<0,25
AISI 202	<0,15	8.75	<1	18,-	5,-	-	-	<0,25

Tabla 2. Aceros inoxidables austeníticos utilizables con acritud y tres aceros comerciales diseñados para su utilización con deformación en frío.

Como puede apreciarse, pueden ser utilizados en estado de acritud, tanto los aceros Cr-Ni del tipo 18-8, como los aceros austeníticos Cr-Mn y Cr-Ni-Mn, siendo frecuente la utilización del nitrógeno en sus composiciones, pues este elemento puede reemplazar en cierto grado la acción del níquel, mejorando, además, las características mecánicas del acero.

No siendo los aceros inoxidables austeníticos, en sí, materiales de elevada resistencia, sino que únicamente pueden ser considerados como tales en estado de acritud, no consideramos necesario hacer aquí una descripción de las características generales físicas, químicas y metalúrgicas de estos aceros, sino que nos ocuparemos del proceso de deformación en frío y sus efectos sobre las características mecánicas. Sin embargo, recordaremos muy brevemente algunas de las más importantes características de estos aceros.

Bajo el punto de vista físico, el peso específico, resistencia eléctrico específica y calor específico, son del mismo orden, aunque ligeramente superiores, a los de los aceros inoxidables martensíticos; la conductibilidad térmica es muy pequeña, del orden de

0,039 cal/cm °C para el acero 18-8, y el coeficiente de dilatación muy grande, de $16,9 \times 10^{-6}$ entre cero y 100 °C para el mismo acero. Otra característica destacada, es que estos aceros son magnéticos mientras conservan su estructura austenítica, pudiendo aumentar ligeramente su permeabilidad magnética cuando contengan algo de ferrita en su estructura, como consecuencia de su composición o de la precipitación de carburos por permanencia o temperaturas de 400– 900 °C.

Si bien las características mecánicas varían con la composición de los aceros, se pueden considerar como valores representativos una resistencia de 55-80 Kg/mm² con alargamientos del 40-60 %; el límite elástico no está bien definido, oscilando entre 20-40 Kg/mm² cuando se acepta un 0,2 % de deformación permanente. El módulo de elasticidad es de unos 20.000 Kg/mm² y la resiliencia alcanza valores muy altos, del orden de 20-30 Kgm/cm².

La resistencia a la oxidación y corrosión de los aceros inoxidables austeníticos del tipo 18-8 es muy elevada, conservando buenas características hasta los 850- 900 °C . Sin embargo, estos aceros se hacen muy sensibles a la corrosión intergranular cuando permanecen durante un cierto tiempo a temperaturas comprendidas entre 400 y 800 °C, variando la temperatura más peligrosa con el tiempo de permanencia. Esta corrosión es debida a la precipitación de carburos en los bordes de grano y consiguiente pérdida de cromo de las zonas adyacentes, que, por tanto, quedan vulnerables a la corrosión, y, además, ésta se encuentra favorecida por las tensiones locales existentes en los bordes de grano como consecuencia de la precipitación de los carburos. Este tipo de corrosión, muy peligroso en sí, no es de excesiva importancia para los aceros con deformación en frío, pues su servicio no puede prolongarse a temperaturas elevadas por la pérdida de sus características mecánicas,-esto justifica el que apenas se empleen para estos usos aceros de muy bajo carbono o estabilizados (con Ti o Nb), insensibles a dicha corrosión intergranular. Cuando en el acero se introduce titanio o niobio, combinándose con el carbono se forman respectivamente carburos del tipo $M_{23}C_6$. Estos carburos son pocos solubles en la austenita. El titanio y el niobio, combinándose con el carbono, impide la formación de carburos de cromo y evita la corrosión intercrystalina.

Como es lógico el titanio y el niobio debe introducirse en cantidades suficientes (para

fijar todo el carbono). Sin embargo, lo mas seguro para evitar los procesos que ocasionan el desarrollo de la corrosión intercrystalina es disminuir el carbono; los elementos estabilizadores (o sea, el titanio y el nobio) no hace mas que aminorarla.

Los aceros inoxidables austeníticos presentan un endurecimiento como consecuencia de su deformación en frío, superior al producido con iguales porcentajes de deformación en otros aceros de distintos aporte. Los aparatos, las instalaciones y las maquinas que se emplean para fabricar los materiales sintéticos no metálicos (plásticos-resinas, fibras de vidrio, etc.), abonos y otros productos químicos funcionan en medios ácidos activos, de los cuales los mas frecuentes suelen ser los ácido sulfúrico, clorhídrico, nítrico o fosforito y su mezcla en diversa concentración a distintas temperaturas.

Los aceros inoxidables que se han estudiado en el epígrafe anterior resultan ser insuficiente estables en estos medios y en otros de alta actividad química, para servicio en estos medios deben utilizarse los llamados aceros y alecciones resistentes a los ácidos.

El aumento de la estabilidad en los ácidos se consigue con la adición, a los aceros austeníticos, de molibdeno y sobre todo molibdeno y cobre, aumentando al mismo tiempo el contenido del niquel aceros del tipo Cr-Ni-Mo y Cr-Ni-Mo-Cu.

En los últimos años se producen aceros austeníticos estabilizados contra la corrosión intercrystalina de muy bajo carbono 316, 316L y 316 Ti, donde la L significa, Low Carbon, la composición química de este acero (se muestra tabla anexo 1). El acero objeto de estudio en este trabajo es el 316Ti muy utilizado en la industria alimenticia y química.

La especial sensibilidad a la acritud de este grupo de acero puede ser atribuida, en parte, a la poca estabilidad de la austenita, que bajo el efecto de las tensiones producidas por el trabajo en frío, se transforma parcialmente en martensita, provocando un gran endurecimiento. Esta transformación se manifiesta en varios aceros por el hecho de que se aumenta de forma sensible la permeabilidad magnética como consecuencia de la deformación en frío. Sin embargo, no es éste el único motivo del gran endurecimiento por acritud de los aceros inoxidables austeníticos, pues en aceros en que no aparecen cambios en la permeabilidad magnética con la deformación en frío, se pueden conseguir, sin embargo, importantes endurecimientos, como, por ejemplo,

ocurre con aceros con 25 % de Ni, en estas circunstancias, el endurecimiento debe atribuirse al efecto de las tensiones internas.

Bajo un punto de vista mecánico, la deformación en frío (acritud), produce una notable elevación de la dureza y la resistencia así como del límite elástico, el cual crece más rápidamente que la resistencia, llegando a alcanzar, con deformaciones importantes, valores que son del orden del 80-90 % de la misma. Tanto el alargamiento como la resiliencia disminuyen de forma importante, pero se pueden aplicar grandes deformaciones sin que ellas lleguen a tomar valores peligrosos.

La deformación en frío produce anisotropía en los aceros, manifestándose por una pequeña diferencia en los valores de la resistencia y límite elástico en sentido longitudinal y transversal, pero sobre todo, por la variación del módulo elástico, pues mientras disminuye en sentido longitudinal aumenta ligeramente en el transversal.

La resistencia a fatiga aumenta con la acritud, de forma que el límite de fatiga de los aceros inoxidables austeníticos con deformación en frío permanece prácticamente proporcional a su resistencia, según puede apreciarse en la (figura 1.8) para un acero austenítico del tipo 18-8.

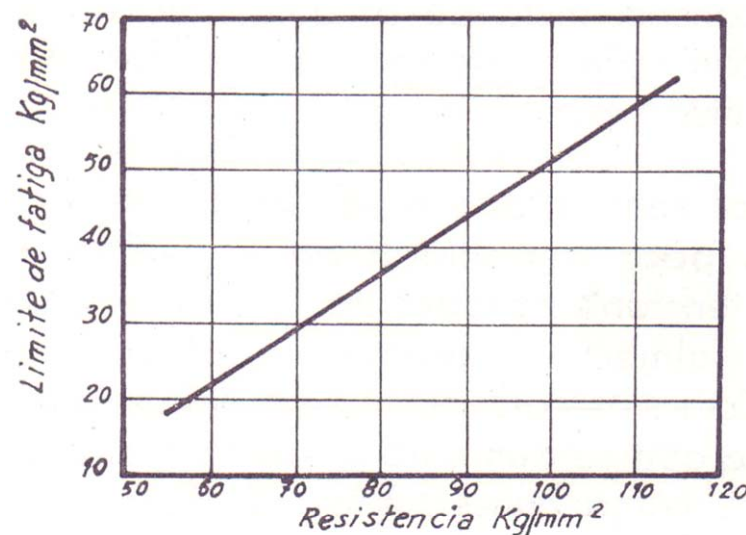


Fig.1.8 Variación del límite de fatiga con la austenita para un acero austenítico 18-8

Es práctica frecuente, en la utilización de los aceros inoxidables austeníticos con acritud, dar un recocido contra tensiones después de la laminación en frío. Este recocido suele hacerse a temperaturas de 300- 550 $^{\circ}\text{C}$, y con algunas horas de

duración, según el tipo de acero y las características que se desee obtener, siendo los recocidos más altos los indicados para obtener mejores características a temperaturas elevadas, aunque con ellos no se aprovecha al máximo, a temperatura ambiente, el endurecimiento provocado por la deformación en frío. Los recocidos contra tensiones tienen efectos beneficiosos sobre el módulo elástico longitudinal, el límite de fatiga y el límite elástico, mejorando muy ligeramente la resistencia y el alargamiento: En general, provocan una mayor isotropía del material.

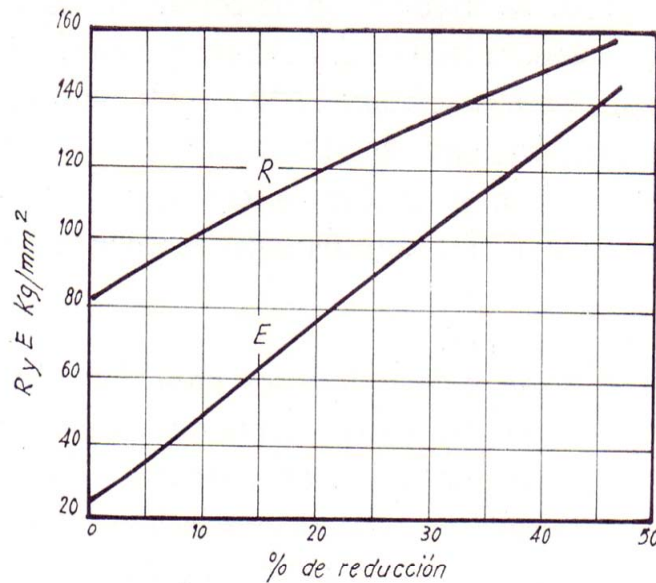


Fig.1.9 Influencia de las deformaciones en frío sobre características resistentes de un acero AISI 301.

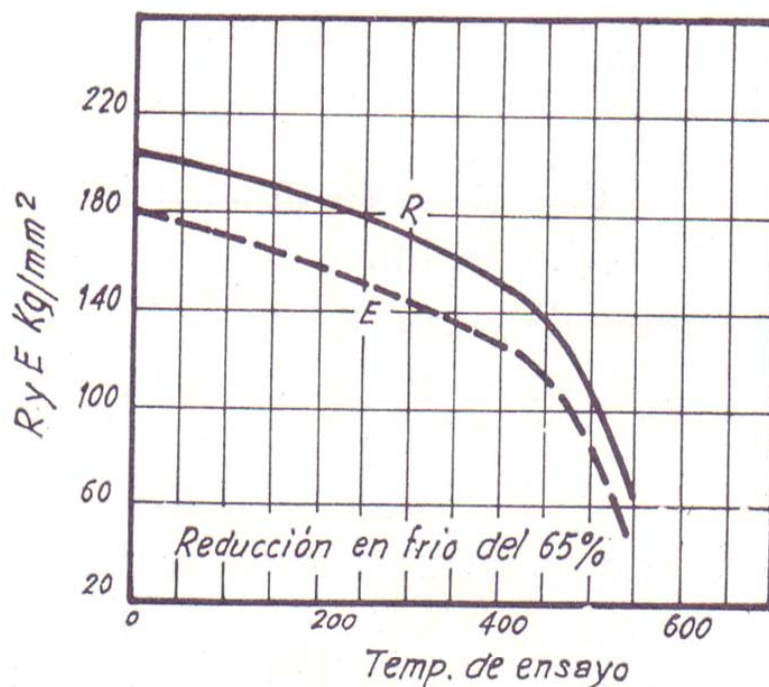


Fig.1.10 Variación de las características de un acero AISI -301 con acritud en función de la temperatura.

En la (figura 1.9) se presenta el efecto de la laminación en frío, expresada por el porcentaje de reducción producida sobre la resistencia y límite elástico longitudinal del acero AISI 301. La (figura 1.10) presenta un ejemplo del efecto de la elevación de la temperatura sobre las características mecánicas de los aceros inoxidables austeníticos con acritud; en ella se recoge la variación de la resistencia y límite elástico del mismo acero AISI 301, con 65 % de reducción en frío al aumentar la temperatura de ensayo. Se puede apreciar la brusca caída de características, Cuando la temperatura sobrepasa los 400 °C Debe tenerse en cuenta que los valores que aparecen en la figura 1.11 son para ensayos de tracción, suponiendo, por tanto, una corta permanencia a las temperaturas que se indican, en el caso de servicio prolongado a esas mismas temperaturas, las características mecánicas serían menores.

Los aceros inoxidables austeníticos presentan una magnífica tenacidad a temperaturas muy bajas, siendo materiales muy interesantes para la fabricación de depósitos y conductos de sustancias criogénicas (con temperaturas incluso inferiores a los 200 °C bajo cero), pues no presentan ninguna temperatura de transición, conservando siempre una fractura dúctil. Esta característica la conservan en cierto grado cuando son some-

tidos a un tratamiento de acritud.

1.10 Tecnología de nitruración con gas.

El proceso tecnológico de fabricación de los artículos nitrurados está constituido por las siguientes etapas:

1) Tratamiento térmico preliminar; 2) Tratamiento mecánico (incluyendo el rectificado); 3) protección de los puntos no sujetos a la nitruración; 4) nitruración; 5) rectificado definitivo o acabado del artículo de acuerdo con las tolerancias preestablecidas.

1.11 El tratamiento térmico previo.

Consiste en el temple y revenido a 560...650 °C Para evitar el alabeo de las piezas a la temperatura de revenido deberá ser de menos de 20...40 °C más alta que la de nitruración. Se suelen tratar las piezas brutas, pero para las piezas de poca sección (para diámetros menores de 60 mm) el tratamiento se aplica directamente en las barras laminadas. Al realizar el tratamiento térmico de los aceros al cromo-molibdeno-aluminio del tipo 38XM10A, es necesario tener en cuenta su gran tendencia a la descarburación. 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 los 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.

1.12 Protección del acero contra la nitruración.

El más usado es el método galvánico con estaño de los puntos no sometidos a la nitruración. El inconveniente del método es la extensión del estaño por la superficie de la pieza en el proceso de saturación del acero con nitrógeno. La fosfatación previa de las piezas impide el desplazamiento del estaño por la superficie. Además, la fosfatación contribuye al aumento del espesor de la capa y de la dureza. Para la protección local contra la nitruración de los aceros resistentes a la corrosión se emplean el niquelado

químico (de 8... 10 μm de espesor) o galvánico (hasta de 30 μm). Para una protección garantizada es imprescindible tener una capa de níquel densa y de grano fino con un espesor de no menos de 30 μm . Las precipitaciones de grano grueso no aseguran una protección fiable. En muchas fábricas, cuando no se requiere tener una frontera rigurosa entre las superficies nitrurada y no nitrurada, se emplea el vidrio líquido. Antes del recubrimiento las piezas se desengrasan, se lavan con agua caliente, después de lo cual se introducen en vidrio líquido. Luego las piezas se secan a 90.....120 °C durante 1,5 h. La película de vidrio líquido debe ser transparente, de aspecto vitreo, sin claros ni deterioros mecánicos.

1.13 Preparación de las piezas para la nitruración.

Antes de la nitruración la superficie de las piezas deberá ser desengrasada por el método electroquímico, mediante el lavado en bencina u otros medios para la eliminación del aceite, de la emulsión y de las diferentes impurezas. 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 sin la despasivación preliminar lleva a la disminución del espesor de la capa, a su irregularidad y como consecuencia, a una dureza "pintoja". La película de óxidos se elimina con el decapado en soluciones acuosas de ácidos, por ejemplo, del HCl o introduciendo en el espacio útil del horno cloruro de amonio NH_4Cl tetracloruro de carbono CCl_4 .

1.14 Regímenes de nitruración de las piezas de máquinas y de la herramienta.

La nitruración se suele realizar en una atmósfera de amoniaco disociado parcialmente. Para reducir la fragilidad de la capa nitrurada y economizar amoniaco se recomienda la nitruración en amoniaco diluido con nitrógeno (con gas nitrogenado ($\text{N}_2 + 4\%$ de H_2) hasta un 70...80 % (en volumen) o con amoniaco preliminarmente disociado ($\text{N}_2 + \text{H}_2$). La introducción del oxígeno, aire, gas carbónico y sus mezclas en la atmósfera de amoniaco e hidrógeno acelera el proceso de saturación por difusión del acero con nitrógeno. La cantidad óptima de oxígeno constituye 1...6 l por 10 l de amoniaco y con más frecuencia, 4 L por cada 100 L. 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 de la 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: primero a 500...520 °C y después a 540...600 , lo que permite reducir bruscamente la duración del proceso. La elevación de la temperatura de la nitruración provoca el aumento del alabeo y deformaciones, por eso para los aceros del tipo 38X2MK3A la temperatura se limita a 540...560 °C. Durante la nitruración en una atmósfera de amoníaco el grado de disociación del amoníaco a 500...560 °C constituye el 20...40 %; a 540...560, el 40...60 %; y a 600...650 °C, el 50...70 %. La herramienta hecha de acero ultrarápido se nitrura a 550...560 °C durante 1,5...2 h. 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 solo se reduce el límite de fatiga, sino que, además, aumentan las deformaciones (alabeo) de la pieza. Siendo razonable la colocación de las piezas en el horno, con una temperatura y espesor de la capa mínimos, las magnitudes de alabeo y deformación son pequeñas.

1.15 Mecanismos de formación y estructura de la capa nitrurada.

Fases en el sistema hierro-nitrógeno. El hierro con el nitrógeno forma las siguientes fases (fig. 1.11): la fase α es la ferrita nitrogenada con una cúbica centrada en el cuerpo y con periodos, según el contenido de nitrógeno, de 0,28664...0,2877 nm. La solubilidad del nitrógeno en el hierro α (fig. 4) a la temperatura eutectoide no supera el 0,10 %, descendiendo a la temperatura ambiente hasta el 0,004 %. La fase γ es la austenita nitrogenada, tiene la red cúbica centrada en las caras ($a = 0,3613$ para el 1,45 % de N y $a = 0,3648$ nm para el 2,79 % de N), la solubilidad máxima de nitrógeno en la fase γ es de 2,8 %. A 590 °C la fase γ sufre la descomposición eutectoide $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma'$. En condiciones de un fuerte subenfriamiento la fase experimenta la transformación martensítica formando la fase γ' (martensítica 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'' ($Fe_{16}N_2$) y al aumentar la temperatura de revenido, la fase $\gamma: \alpha \rightarrow \alpha' + \alpha'' \rightarrow \alpha + \gamma'$. La fase γ' es la solución sólida a base del nitruro Fe_4N con la red cúbica centrada en las caras ($a = 0,3791...0,3801$) 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 solo hasta 680 oC. A una temperatura más alta se forma la fase ϵ (fig. 4). La fase ϵ es la solución sólida a base del nitruro $Fe_{2-3}N$ (4,55...11,0 % de N), la red cristalina es hexagonal ($a = 0,2702...0,2764$ nm, $C = 0,433...0,441$ nm, dependiendo del contenido de nitrógeno). A 650 oC y con una concentración de nitrógeno de 4,5 % la fase ϵ sufre la descomposición eutectoide en las fases γ y γ' . La fase ξ , (FeN) tiene una red rómbica con átomos de nitrógeno distribuidos ordenadamente. La fase ξ es estable en una atmósfera de amoníaco hasta 450 oC.

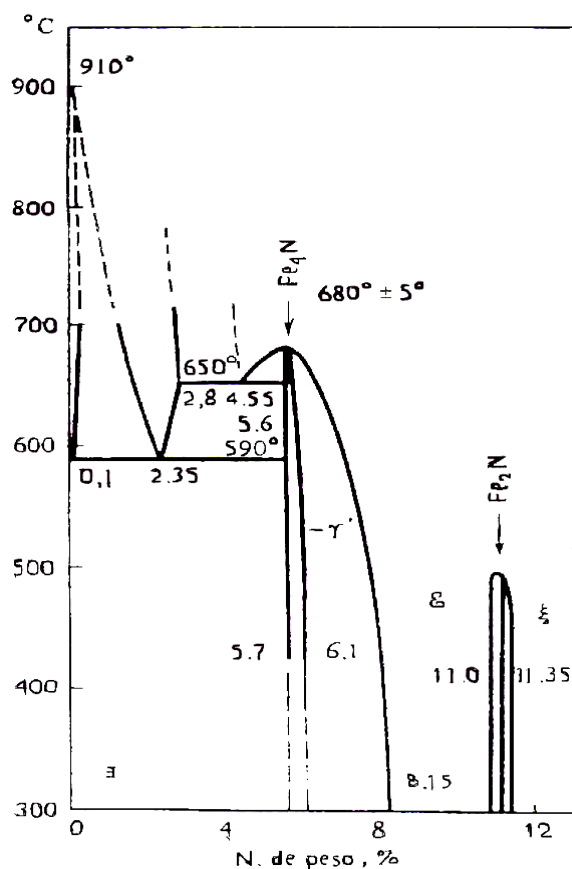


Fig. 1.11 Diagrama de hierro nitrógeno.

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 forman zonas monofásicas en concordancia con las regiones monofásicas de diagrama de estado (FeN) (fig. 1.11), que se interceptan por la isoterma a la temperatura dada. Las capas difusivas se forman en la misma consecuencia que las zonas monofásicas en el diagrama de estado. Cuando la capa difusiva está formada de capas múltiples, el espesor de algunas fases (por ejemplo, de la fase ε) a veces se expresa en fracciones del espesor total de la capa: $x_i / x_{to}t$, donde x_i es el espesor de la i -ésima capa.

1.16 Defectos de la nitruración y su prevención.

En el proceso de nitrución por gas pueden surgir los siguientes defectos:

La deformación y el alabeo son tan mayores, cuanto más alta es la temperatura del proceso y más gruesa la capa nitrurada. La deformación y el alabeo de las piezas nitruradas están condicionados por la naturaleza de la capa nitrurada, composición del acero, estructura irracional de las piezas, protección asimétrica y de baja calidad contra la saturación, alteración de la tecnología de tratamiento térmico previo y por una colocación incorrecta de las piezas durante el tratamiento. El aumento del volumen específico de la superficie durante la nitruración va acompañado de un aumento de las dimensiones geométricas de las piezas. Las dimensiones de la pieza aumentan por término medio un 4...6 %, en dependencia del espesor de la capa nitrurada, lo cual se debe tener en cuenta al determinar los sobrespesores. El aumento de la concentración de los elementos formadores de nitruros contribuye a la deformación. A la disminución del alabeo contribuyen el descenso de la temperatura de saturación, la reducción del espesor de la capa, la realización minuciosa del tratamiento térmico previo, la colocación y giro racional de las piezas en el proceso de nitruración.

La fragilidad y la descamación de la capa se determinan por la pureza y calidad del metal, por la desviación respecto a los regímenes de nitruración y de rectificado. En los lugares de inclusiones no metálicas, con cascarillas, grietas y otros defectos de continuidad se observa un hinchamiento de la capa provocado por una gran concentración de nitrógeno y por la formación de una cantidad elevada de la fase ε . Durante el rectificado semejante la capa se desmenuza. Los defectos de nitruración y rectificado aparecen en la superficie durante el proceso de rectificado o bruñido y tienen

el siguiente aspecto: de descamación de películas finas de la capa nitrurada en dirección del avance de la piedra rectificadora; de lesión de la superficie en gran escala por una erupción menuda, o sea, de desmenuzamientos puntuales (hasta 0,05 mm de profundidad), que surge durante las operaciones de acabado; de una red densa de grietas diminutas. La microestructura de la capa nitrurada que tiende a la descamación durante el rectificado, se caracteriza por la presencia en los límites de los granos auténticos de una red de nitruro desarrollada. La fragilidad puede ser causada por la decarburación superficial antes de la nitruración o por el sobrecalentamiento durante el tratamiento térmico previo. La estructura de grano grueso de los aceros siempre contribuye a que la superficie sea más frágil. Generalmente la fragilidad se observa en el acero 38X2MO

1. A. que contiene una máxima cantidad de aluminio. La zona frágil superficial puede ser eliminada por el rectificado a una profundidad de 10...50 μm sin reducir la dureza. Para disminuir la descamación se puede observar las condiciones óptimas del rectificado. Los avances transversal y longitudinal deben ser parámetros que eviten las quemaduras; la granulosis de las muelas de rectificar es de 60... 100 unidades. No se admite que las muelas se manchen de grasa.
2. La dureza baja y pintoja de la capa nitrurada está condicionada por la elevación de la temperatura de nitruración, un alto grado de disociación del amoníaco, interrupciones en el suministro de amoníaco, y también por el incumplimiento de la tecnología de tratamiento térmico previo. La dureza pintoja (irregular) de la superficie dentro de los límites de una sola pieza está provocada por la presencia en la superficie de endurecimiento de trazas de estaño o vidrio líquido (después de la nitruración parcial); por un desengrase insuficiente de las piezas y por la heterogeneidad granular de la estructura del acero. Las partes de grano fino tienen una dureza más alta que las partes de grano grueso.
3. Un espesor insuficiente de la capa está provocado por el descenso de la temperatura del proceso, por el aumento del grado de disociación del amoníaco y por la reducción de la exposición. Para corregir este defecto en el espesor de la capa se recurre a la nitruración repetida.

1.17 Nitruración de aceros de construcción.

Últimamente se someten a la nitruración los aceros al cromo, al cromo-vanadio, al cromo-manganeso, y otros sin aluminio, cuya capa nitrurada tiene una reducida dureza superficial, pero una alta resistencia al desgaste y a la rotura frágil. La reducción de la fragilidad de la capa nitrurada permite aplicar la nitruración en la fabricación de piezas con cantos y escotes agudos, y también piezas no rectificables. Así, por ejemplo, en la fabricación de maquinaria para los husillos de apoyo oscilantes y tornillos de avance se utilizan los aceros 40X, 40XΦA, 18XΓT, para las camisas, listones guías sobrejuntas y tornillos de avance se emplean los aceros 40XΦA, 20X3BA, y 20X3MBΦ. Para los elementos de máquina sometidos a grandes cargas, que trabajan en condiciones de esfuerzos cíclicos de flexión y de contacto, así como cegaste, se usan los aceros 18X2H4BA, 38XH3-MA, 30X3M, 38XΓM, etc. Cuantos más elementos formadores de nitruros contiene el acero, tanta más alta es la dureza superficial de la capa nitrurada. La influencia de la temperatura y el tiempo de nitruración en la dureza y el espesor de la capa nitrurada de los aceros de construcción y en la Fig. 1.12, la distribución de la dureza en el espesor de la capa nitrurada. Con el fin de acortar la duración del proceso en los últimos años fueron propuestos aceros, los cuales después de la nitruración a temperaturas elevadas (550...600 °C), aseguran una alta dureza en el espesor de la capa. En la ex URSS han sido elaborados aceros de aleación complicada que contienen ~ 0,5 % de Al (25XHMΦБЮ y 25XHMΦШЮ). En estos aceros la fase γ aleada con aluminio no se forma y no se observa un aumento de su dureza merced a la introducción del aluminio. El vanadio, que eleva la concentración del nitrógeno en la fase α y forma nitruros, ejerce la principal influencia en el aumento de la dureza y de la resistencia al desgaste.

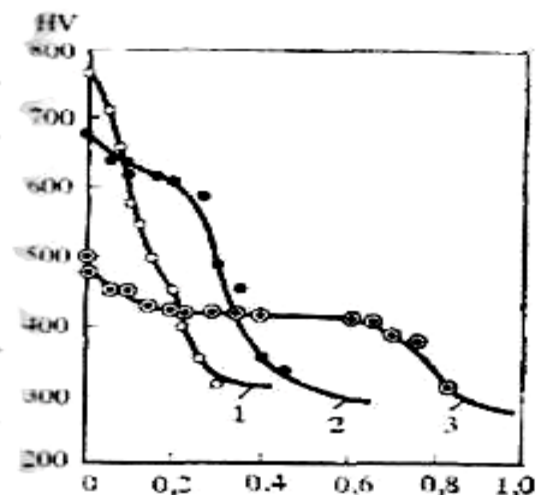


Fig. 1.12. Espesor de la capa mm

La nitruración de estos aceros se puede realizar a 550...600 oC, lo cual asegura el acortamiento de la duración del proceso, manteniéndose una alta dureza superficial (850...900 HV) y alta resistencia al desgaste. La resistencia al desgaste de la capa nitrurada en los aceros (25XHMΦБЮ y 25XHMΦШЮ) en condiciones que imitan el par de frotamiento camisa-segmento de émbolo es de 1,5 veces mayor que la de los aceros tipo 38X2MЮA. El niobio y zirconio retrasan el desarrollo de la zona de nitruros, afinan el grano, reducen la fragilidad de la capa nitrurada y elevan su dureza. El elemento de aleación de mayor perspectiva para la formación de aceros para nitrurar, es el vanadio, el cual a la par con el cromo aseguran buenas cualidades mecánicas del acero y permite obtener en un tiempo relativamente corto (a temperaturas elevadas de saturación) un espesor eficaz de la capa requerido, que es la zona de nitruración interna.

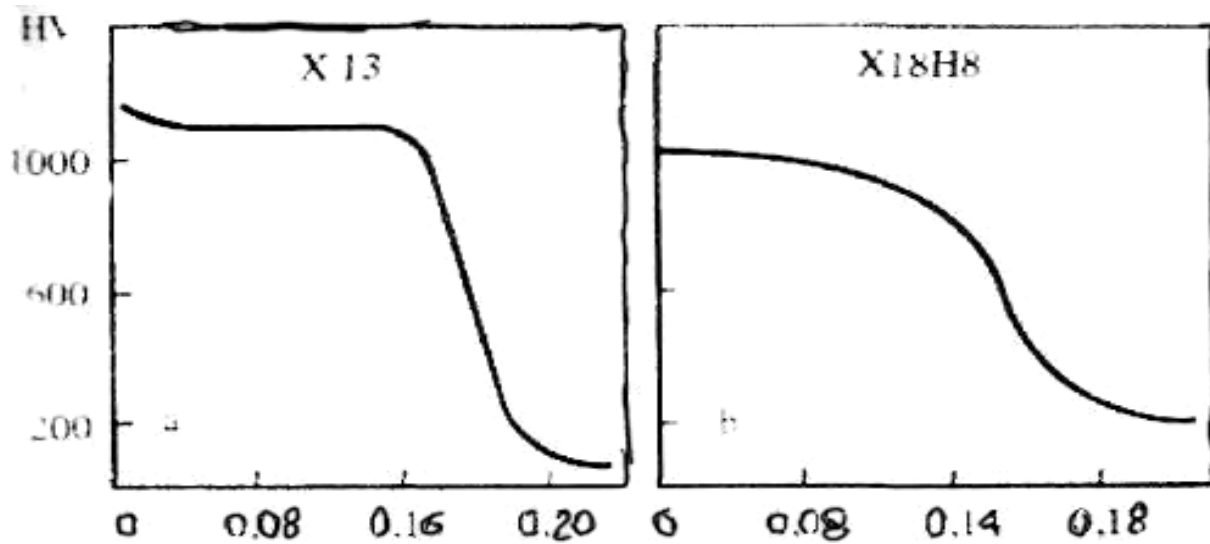


Figura 1.13. Espesor de la capa mm

La dureza, prácticamente, no varía en el espesor de la capa difusiva (Fig. 1.13), lo que permite someter los aceros nitrurados al bruñido y rectificado sin perder la dureza. La resistencia constructiva de estos aceros no es grande y se puede recomendar para las piezas que trabajan en condiciones de desgaste y fatiga elevadas, pero sin cargas dinámicas considerables. El TTM (tratamiento termomecánico) previo, sobre todo TMTAT (tratamiento mecánico a alta temperatura), de los aceros de construcción acelera el proceso de difusión del nitrógeno, lo que permite obtener capas más profundas, siendo las demás condiciones iguales. El TTM contribuye al desarrollo de la zona de nitruros.

1.18 Nitruración de los aceros martensíticos de envejecimiento.

La nitruración eleva la resistencia al desgaste y a las cargas alternativas de los aceros martensíticos de envejecimiento. Los aceros martensíticos de envejecimiento que se someten a la nitruración, se pueden dividir en tres grupos: aceros de gran resistencia ($\sigma_F = 1800 \dots 2100$ MPa) de la clase H18K9M5T; aceros de alta resistencia a la corrosión; aceros de baja aleación ($\sigma_F = 1000 \dots 1500$ MPa). La nitruración de los aceros H18K9M5T a $450 \dots 500$ °C conduce a la formación de capas difusivas no frágiles de $0.2 \dots 0.25$ mm de espesor con una dureza superficial de hasta 900 HV. La capa difusiva está constituida por la zona superficial de las fases ε y γ' y por la capa, situada por debajo, de martensita nitrurada con separaciones de fase γ' en exceso. Los

regímenes óptimos de nitruración son los siguientes: 500 °C, 24 h ó 450 °C, 48 h. La nitruración eleva la resistencia al desgaste y a la formación de ralladuras en condiciones de rozamiento de rodadura y de resbalamiento, sin cambiar prácticamente la resistencia mecánica y la sensibilidad del acero H18K9M5T a los concentradores de esfuerzos.

La nitruración eleva también el límite de fatiga. Después del envejecimiento el límite de fatiga de las muestras con incisiones del acero H18K9M5T, constituye 420...440 MPa, mientras que después de la nitruración en el régimen de 500 °C y 24 h, 640...660 MPa. También se nitruran con éxito los aceros de envejecimiento martensíticos resistentes a la corrosión. El acero 03X11H10M2T después de la nitruración a temperatura 450...650 °C durante 20...40 h, tiene una capa de 0,2...0,3 mm de espesor y una dureza de 900...1000HV. Los aceros de envejecimiento martensíticos de baja aleación 10X5Г2M, 10X5H2M, y 13X5Г2MДC2 después de nitrurados a 575...600 °C durante 6...24 h, permiten obtener capas difusivas hasta de 0,5 mm de espesor con alta dureza superficial de 850... 1000 HV. Cuanto *más* cromo haya en el acero, tanta más alta es la dureza. Con el aumento de la temperatura y duración de la nitruración, a medida que disminuye el contenido de cromo el espesor de la capa crece, a la vez que la fragilidad disminuye. Los aceros que contienen aluminio (08X3H2MБЮ) después de nitrurados tienen una dureza más alta. La nitruración reduce la resiliencia del acero y desplaza el umbral de fragilidad en frío a la región de temperaturas superiores, pero eleva considerablemente la resistencia de contacto al desgaste. La singularidad del endurecimiento por dispersión de los aceros de envejecimiento martensíticos consiste en la reducción de las dimensiones geométricas de las piezas en el proceso de envejecimiento. La contracción volumétrica ocurre de modo uniforme en toda la sección transversal y no va acompañada de alabeos y agrietamientos. Cuando la nitruración se combina con el envejecimiento a 420...480 °C durante 3...36 h, la contracción lineal constituye por término medio 0,9...1,2 μm/mm, mientras que el incremento de las dimensiones debido a la nitruración es de 2...4 μm. Dado que la contracción lineal en el proceso de envejecimiento y de incremento depende poco durante la nitruración de los regímenes de tratamiento, entonces, al fabricar las piezas de precisión, se puede prever de antemano el sobreespesor tecnológico correspondiente.

1.19 Control de la calidad de las piezas nitruradas.

La calidad de la nitruración se comprueba en la muestra testigo y directamente en las piezas. Se controlan el espesor de la capa, la dureza superficial, el alabeo y la deformación, las dimensiones y la calidad de la superficie. Las muestras testigos se someten al tratamiento térmico y se fabrican del mismo acero que las piezas a nitrurar. Después de la nitruración las piezas se someten al examen visual. La superficie nitrurada debe ser de color gris mate. La presencia de colores de revenido no es defecot. En todas las piezas se comprueba la ausencia de descamaciones, cizallamientos, y agrietamientos, sobre todo a lo largo de los bordes agudos, con un aumento de $\times 15\ldots 30$. El control de la dureza se realiza en las muestras testigos y directamente en las piezas mediante medidores de dureza del tipo Vickers con una carga de $50\ldots 100$ H. El control de la fragilidad de la capa nitrurada se efectúa por el aspecto de la huella de la pirámide de diamante de acuerdo con la escala de fragilidad VIAM. Los grados I y II de fragilidad de esta escala corresponden a las capas difusivas dúctiles capaces para funcionar, el grado IV indica que la pieza es totalmente inservible. El espesor de la capa difusiva se controla en las muestras testigos examinando al microscopio con un aumento de $\times 100\ldots 200$ las microprobetas transversales decapadas con la solución alcohólica de ácido nítrico al 4 %. Han sido elaborados métodos no destructores de control de la calidad nitruración con aparatos de resonancia, los cuales con frecuencias de $3\ldots 5$ Khz. aseguran el control del espesor de la capa en una gama de 0,1 a 0,5 mm y con una frecuencia de 500 Khz. evalúan la dureza superficial.

1.20 Conclusiones parciales.

En este capítulo se ha presentado la información básica necesaria sobre los tratamientos termoquímicos y específicamente se ha tratado con profundidad lo referido a la nitruración gaseosa y los aceros para nitrurar lo que permite una mejor comprensión de los capítulos siguientes en este trabajo.

Capítulo II: Instalación del sistema de nitruración gaseosa, puesta a punto.

2.1 Introducción

En este capítulo se muestran los resultados de un grupo de acciones para instalar el sistema de nitruración gaseosa, a partir de una cámara de gas construida en un trabajo anterior. Se desarrolla además, un grupo de tareas para lograr la hermeticidad de la misma, el logro de un flujo continuo de agua y la calibración del disociometro. También se tomaron medidas de seguridad en el trabajo con el amoniaco de manera que el sistema quede listo para las corridas de nitruración gaseosa.

2.2 Instalación del sistema de nitruración gaseosa y puesta a punto.

Para llevar a cabo el TTQ de nitruración gaseosa se reinstalo una cámara previamente construida con los detalles constructivos tecnológicos que se especificaran en este capítulo. La construcción de la cámara de gas fue hecha con chapa de acero X18H10T. El diseño de esta cámara desde el punto de vista de sus dimensiones fue realizado para utilizar como dispositivo de calentamiento un horno eléctrico tipo mufla con control de temperatura electrónico y de bóveda con sección rectangular de dimensiones 156 X 86 cm. y profundidad de 435 cm. La cavidad del agua delantera de la cámara tiene 235 X 175 X 55 cm. en la cual se pudiera alojar con cierta holgura la cámara. A dicho horno se le alargaron los cables de extensión del termopar que controla su temperatura de manera que permitiera su introducción por la parte delantera del mismo en la vaina que se encontraba en el interior de la cámara de nitrurar, y de esta manera a través del mismo se usaba el propio dispositivo de control de temperatura del horno para el establecimiento y control de la temperatura de la cámara durante el proceso de la nitruración.

La cámara estaba prevista con dos tomas para la circulación del agua en su parte delantera de forma que esto sirviera de choque térmico a la salida del calor del interior de la bóveda lo cual evitaba que se quemaran las mangueras de conexión para la entrada y salida del agua, amoniaco y confinaba la zona de calentamiento al interior de la bóveda.

El amoniaco se hace llegar a la cámara procedente de un balón luego del paso por un regulador de presión, un dispositivo de secado o deshumidificador y un flujómetro de bola. La función del regulador es la de reducir y fijar la presión admisible de trabajo del lado de la cámara, que resulta mucho menor que la presión existente en el balón. El dispositivo para la deshumidificación era un frasco lavador que contenía silicagel para eliminar la presencia de vapor de agua que pudiera traer consigo la oxidación de la superficie de las muestras y obstaculizara el proceso de nitruración de las mismas. Por último el flujómetro de bola permitía establecer un régimen de trabajo estable y con posibilidades de repetir las condiciones del TTQ en otra ocasión a través de volver a fijar los parámetros de temperatura en el interior de la cámara, presión a la entrada del sistema y flujo de amoniaco a través del mismo.

Como el grado de disociación del amoniaco resulta un parámetro importante del proceso, se previó su determinación periódica durante el TTQ. A este fin se construyó el disociómetro descrito a continuación el cual se instaló a la salida de la cámara para poder determinar qué fracción del amoniaco inyectado a la misma, el proceso de disociación que brindara los átomos de nitrógeno necesarios para la difusión a través de la superficie del material. La instalación cuenta con un juego de llaves de paso para desviar en un momento dado el flujo de gases de salida de la cámara (que este va hacia el depósito de agua de enfriamiento de la cámara donde se mezcla el agua con el amoniaco) con el disociómetro podemos establecer el grado de disociación que esta teniendo lugar.

La presión y el flujo de amoniaco dentro de la cámara, que son los parámetros que controlamos. Previo a la realización de las mediciones el disociómetro debe ser calibrado. La toma de entrada del amoniaco tiene una longitud tal que el ingreso del mismo se producía más bien en la parte trasera de la misma, de manera que tuviera oportunidad de disociarse luego de ponerse en contacto con las paredes calientes de la cámara y alcanzar la zona donde se ubicaron las muestras ya en estado disociado. A este fin la toma de salida era más corta y se encontraba más cercana a la parte delantera de la cámara.

El esquema general de la instalación con todos sus componentes se muestra en la figura 2.1

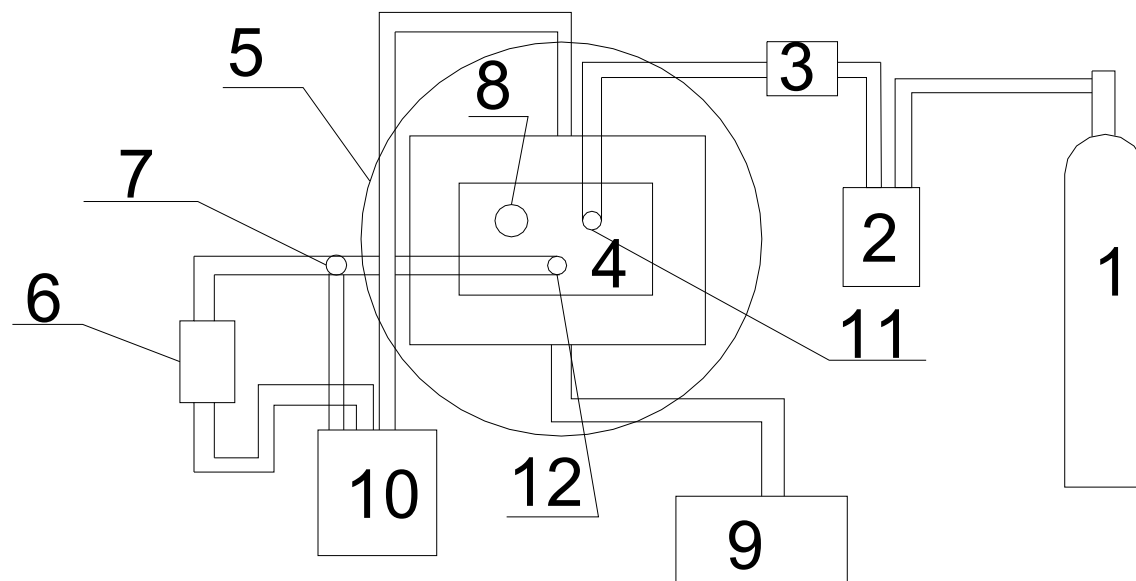


Figura 2.1 – 1-Balón de amoniaco; 2-Frasco lavado de cilicagel; 3- Flujómetro; 4- Cámara de nitruración; 5-Horno; 6-Disociómetro; 7-Llave de tres vías; 8- Termopar; 9- Fuente de agua; 10-Agua para el escape de amoniaco; 11-Entrada a la cámara del amoniaco; 12-Salida de la cámara de amoniaco

2.2 Construcción del disociómetro.

Otro elemento que es necesario construir es un disociómetro para controlar el grado de disociación (figura 2.2). El control de la disociación se realiza a cada hora. El principio de acción del disociómetro se basa en la capacidad del agua de absorber el amoníaco (un volumen de agua absorbe 723 volúmenes de amoníaco), no absorbiendo, sin embargo, los productos de la disociación, que son: el nitrógeno y el hidrógeno. El esquema del disociómetro se muestra en la figura 2.3. La medida del grado de disociación se realiza del modo siguiente:

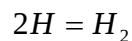
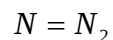
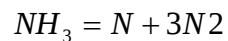
- 1 - El grifo 3, el cual se encuentra abierto. El grifo de tres pasos (5) debe ser puesto en la posición (T), los otros dos grifos de dos pasos deben ser abiertos y estar en estas posiciones: el grifo 2 horizontal y el grifo 4 vertical. Después de la purga con el gas durante 20 - 30 segundos, los grifos 2, 4 y 3 se cierran. Estos deben estar en las siguientes posiciones: el grifo 2 vertical, el grifo 4 horizontal y el grifo 3 vertical. El grifo 5 se queda en la posición en que estaba. Después de la purga de la bureta, el recipiente 1 se llena con agua, la cual está destinada a la medida

de la disociación.

- 2- Se llena la bureta con el gas (con la composición de trabajo). Se abre el grifo 3, el grifo 4 también debe ser abierto, los grifos 5 y 2 se quedan en la posición anterior y deben tener las siguientes posiciones: el grifo 5 en forma de T y el grifo 2 vertical. Después de 20 ' 30 segundos de fluir el gas, el grifo 4 se cierra (con la posición horizontal), después se cierra el grifo 3 (la posición vertical). De esta manera, la bureta queda llena con el gas, que consta de la mezcla $\text{NH}_3 + \text{N}_2$, de descomposición desconocida.
- 3- Para determinar el grado de disociación es necesario poner el grifo 5 de tres pasos en la posición que de paso hacia 2 y 4, entonces el agua se dirigirá a la bureta de medida. Sin embargo, el llenado de la bureta no será total, porque el agua absorbe solo el amoníaco. El volumen que no ha sido ocupado por el agua corresponde al grado de disociación del amoníaco. Al fijar el resultado de la medida el grifo 5 se sitúa en la posición inicial. Para repetir la medida del grado de disociación, todas las operaciones se repetirán de nuevo, según el esquema citado. El grado de disociación atómica depende de la temperatura del horno, de la velocidad a que se hace circular el amoníaco y de la presión observada dentro de las cajas. Es preciso controlar el grado de disociación del amoníaco manteniéndolo entre los límites establecidos.

Durante la nitruración en una atmósfera de amoníaco el grado de disociación del amoníaco 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 amoníaco es el equivalente de la actividad saturante de la atmósfera y representa la relación entre el volumen de amoníaco disociado y el volumen total de gas. Al mantener un grado alto de disociación de amoníaco, su gasto aumenta mucho, lo que no es racional desde los puntos de vista económico y técnico. 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 °C 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, 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.

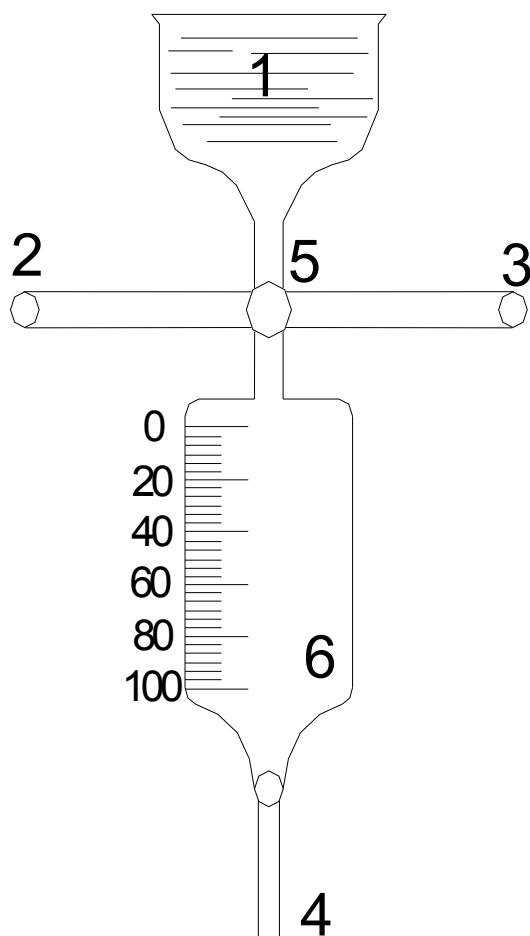


Figura 2.2 .Esquema del disociómetro. 1. Recipiente para el agua (100 cm³); 2, 3 y 4. Válvula de dos pasos; 5. Válvula de tres pasos; 6. Bureta de mediciones.

2.3 Los pasos a seguir durante el TTQ fueron los siguientes:

- 1) Preparación de las muestras a nitrurar. Las superficies de las muestras se limpiaron de forma que se eliminaran de éstas los óxidos con ayuda de papel de esmeril y decapación de la superficie con la solución de ácido clorhídrico
- 2) Colocación de las muestras en la cámara. Se colocaron sobre una pieza de cerámica con orificios de manera que no solo la superficie superior tuviera acceso al medio saturante.
- 3) Sellado de la cámara. La tapa con las mangueras de conexión del agua y el amoníaco se colocó con ayuda de una junta de goma en la entrada de la cámara y se apretaron los tornillos de sujeción de forma que hubiera hermeticidad y no se permitiera la salida de amoníaco a través de ella.
- 4) Colocación de la cámara en la bóveda del horno e introducción del termopar para el control de la temperatura en la vaina correspondiente.
- 5) Circulación de amoníaco para desalojar el aire presente en la cámara, selección de la temperatura en el control del horno y conexión del mismo para iniciar el proceso de calentamiento.
- 6) Control de los parámetros del TTQ a medida que se calienta el horno y se alcanza la temperatura de nitruración. Fijación de la hora en que se alcanza la temperatura deseada para conocer el tiempo de nitruración.
- 7) Control del grado de disociación periódicamente.
- 8) Cuando se cumplió el tiempo prefijado se apagó el horno, se extrajo el termopar y manteniendo el flujo de amoníaco y la circulación de agua se procedió a extraer la cámara del interior de la bóveda del horno para su más rápido enfriamiento y con posterioridad cuando la temperatura era menor se concluyó el enfriamiento con agua.
- 9) Apertura de la cámara y extracción de las muestras.

2.4 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 del gas y la ecuación siguiente es asumida:

$$AN \sim a * v$$

Donde:

AN = 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. 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 asegurada con un alto flujo 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 amoníaco 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. 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.

2.5 Amoníaco, riesgo en la salud, Propiedades físicas y termodinámicas.

En la puesta a punto de la instalación de la cámara de nitruración fue necesario usar medios de protección, en el llenado del balón de amoníaco el frigorífico de Cienfuegos se uso como protección un careta antigas. Fue de vital importancia tomar precauciones con el residuo de amoníaco utilizado en el proceso de nitruración, este

se mezclaba con agua para formar agua amoniacal, así de esta forma no se emitía a la atmósfera y no contaminando el medio ambiente y evitando una fuga del mismo.

Formula: NH_3

Peso molecular: 17.03 g/mol

Composición: N: 82.25 % y H: 17.75 %

Generalidades:

El amoníaco es un gas incoloro con olor característico, muy soluble en agua. Sus disoluciones acuosas son alcalinas y tienen un efecto corrosivo frente a metales y tejidos. El pH de disoluciones acuosas 0.1 M es de 11.2, característico de una base débil ($\text{pK}_a = 9.4$). A pesar de ser clasificado como un gas no inflamable, el amoníaco, puede arder bajo ciertas concentraciones en fase vapor y el riesgo de fuego aumenta en presencia de materiales combustibles. El gas es más ligero que el aire, sin embargo en fugas, los vapores llenan por completo la parte cercana al suelo. La fórmula química de la disolución acuosa de amoníaco que denominamos comúnmente "hidróxido de amonio", ha sido controvertida. Se ha demostrado experimentalmente que la fracción de NH_4OH es despreciable en dichas disoluciones. La forma correcta de escribir la fórmula es NH_3 (ac). Sin embargo, por tradición, se sigue hablando de "hidróxido de amonio, NH_4OH ", porque en esa forma es más fácil subrayar las propiedades alcalinas de las disoluciones de amoníaco.

La forma correcta de escribir la ionización del amoníaco en disoluciones acuosas, de acuerdo con el modelo de Brönsted es:



Riesgos:

Riesgos de fuego y explosión:

El amoníaco mezclado con muchos productos químicos puede generar incendios y/o explosiones (Ver Propiedades Químicas).

Los contenedores de amoníaco pueden explotar si se les expone al fuego o calor.

Riesgos a la salud:

Este producto es especialmente irritante y corrosivo, de aquí su peligrosidad.

Inhalación: Irrita y quema el tracto respiratorio produciendo laringitis, dificultad para

respirar, tos y dolor de pecho. En casos graves, produce edema pulmonar y neumonía, inclusive, puede ser fatal. En casos extremos de exposición a concentraciones altas, se presentan da os severos a los pulmones y efectos cardiovasculares secundarios que provocan convulsiones, coma y finalmente la muerte. Los principales efectos se detectan en el tracto respiratorio superior, debido a su gran solubilidad en los fluidos acuosos y por lo general son reversibles, sin embargo se ha informado de casos de bronquitis crónica provocada por este producto. Se ha informado que a concertaciones de 280 mg/m³, se produce irritación de la tráquea inmediatamente; a 1200 mg/m³, se produce tos; a 1700 mg/m³ existe el riesgo de muerte y a una concentración entre 3500 y 7000 mg/m³, la muerte es inminente. En estudios realizados con voluntarios, se encontró que personas expuestas a amoníaco y óxidos de nitrógeno a concentraciones superiores a 20 mg/m³ por 3 h/día durante 2 o 3 mese, presentaron mayor incidencia de enfermedades del tracto respiratorio superior que los no expuestos.

Contacto con ojos: Los irrita, tanto en forma gaseosa, como en disolución, provocando dolor, conjuntivitis, lagrimeo e incluso erosión de la córnea, lo que puede generar pérdida de la vista, pues penetra rápidamente en este. Esta irritación se presenta a concentraciones mayores de 20 mg/m³ y generalmente es reversible. En estudios con ratas, una concentración de 470 mg/m³ por 90 días, produjo opacidad de la córnea en una tercera parte de la población, mientras que el resto solo presentó irritación.

Contacto con la piel: Causa quemaduras y dolor y el contacto con el gas licuado causa congelación de la parte afectada. La piel se ve afectada a concertaciones de aproximadamente 7000 mg/m³.

Ingestión: Por ser cáustico, tiene un efecto destructivo de los tejidos, produciendo náusea, vómito y quemaduras en la boca, esófago, estómago e intestino delgado.

Por otra parte, en experimentos con conejillos de Indias, se encontró que la administración de sales de amonio en disolución provocó la muerte de todos los animales por edema pulmonar. El envenenamiento por sales de amonio provoca disfunción pulmonar y del sistema nervioso, generando aumento de la respiración, dificultad de movimiento, hiperexitabilidad al estímulo, convulsiones y coma.

Carcinogenicidad:

A pesar de que no existen evidencias que sugieran que el amoníaco es carcinogénico,

se ha observado en animales sometidos a este producto, un aumento en lesiones inflamatorias de colon y proliferación celular, lo que incrementa la susceptibilidad al cáncer. Sin embargo en experimentos con ratones a los que se les dio de beber disoluciones acuosas de este producto en un período largo, no se presentó ningún efecto de este tipo.

Mutagenicidad: Se encontró este efecto en estudios con *Escherichia coli*, pero en el tratamiento sólo quedaron vivos menos del 2 %. Lo mismo sucedió con *Drosophila melanogaster*.

Peligros reproductivos: No existe información al respecto.

Acciones de emergencia:

Primeros auxilios:

El personal que atienda la emergencia deberá vestir el equipo de seguridad adecuado, evitando todo contacto con el producto químico. En general, en todos los casos de exposición a amoníaco gas o en disolución acuosa, deben seguirse los siguientes pasos: Trasladar a la víctima a una zona bien ventilada, evaluar los signos vitales y asegurarse que no existen traumas. Si no hay pulso proporcionar rehabilitación cardiopulmonar, si no respira dar respiración artificial.

Propiedades físicas y termodinámicas.

ANHIDRO:

Punto de ebullición: -33.35°C

Punto de congelación: -77.7°C

Densidad (líquido): 0.6818 (-33.35°C y 1 atm); 0.6585 (-15°C y 2.332 atm); 0.6386 (0°C y 4.238 atm); 0.6175 (15°C y 7.188 atm); 0.5875 (35 y 13.321 atm).

Densidad de vapor (aire = 1): 0.6

Presión de vapor (a 25.7°C): 760 mm de Hg.

Límites de explosividad: 16-25 %

Temperatura de autoignición: 651°C

Solubilidad: muy soluble en etanol, cloroformo y éter etílico

Solubilidad en agua (% en peso): 42.8 (0°C), 33.1 (20°C), 23.4 (40°C), 14.1 (60°C)

Temperatura crítica: 133°C

Presión crítica: 11.425 KPa

Calor específico (J/Kg K): 2097.2 (0 °C), 2226.2 (100 °C) y 2105.6 (200 °C)

Calor de formación del gas (KJ/mol): -39.222 (0 K) y -46.222 (298 K)

Calor de vaporización: 5.581 Kcal. /mol

Capacidad calorífica (25 °C): 8.38 cal/mol/grado.

Solubilidad en etanol al 95 %: 15 % (20 °C) y 11 % (30 °C)

Solubilidad en etanol absoluto: 20 % (0 °C) y 10 % (25 °C).

Solubilidad en metanol: 16 % (25 °C)

El amoníaco disuelve a una gran variedad de sales y tiene una gran capacidad para ionizar electrolitos. Los metales alcalinos y los alcalinotérreos (excepto el berilio) se disuelven en él, al igual que el yodo, azufre y fósforo.

2.6 Conclusiones parciales.

Luego de un gran número de dificultades materiales y de abastecimiento de agua se logró:

- Reinstalar el sistema de de nitruración gaseosa.
- Calibrar el disociometro y lograr mantener la temperatura del horno a 580 °C por 60 horas para un grado de disociación de un 45-50% del amoniaco.

Capitulo II: Trabajo experimental.Resultados

3.1 Introducción

En este capitulo se presenta el desarrollo de las tareas experimentales en función de la solución de los problemas de la industria en la utilización de los aceros especiales inoxidables. Así como la utilización de la nitruración gaseosa para elevar las propiedades de dureza y resistencia al desgaste (en sus corridas preliminares). Las corridas de la nitruración constituyen ensayos preliminares para la puesta a punto del sistema y evaluación posterior (no en este trabajo) de la influencia de los parámetros estructurales; tamaño de grano inicial, grado de deformación plástica en frío y en la profundidad de capa.

3.2 Algunos problemas presentados en la industria del entorno por el deterioro de piezas de acero inoxidable.

1. Fallas en las válvulas de las bombas hidráulicas de las máquina de limpieza “JETIN”, esta máquina es utilizada para las limpiezas de superficies con incrustaciones, El equipo “ JETIN” de alta presión de agua produce una alta presión hidráulica y es proporcional a la presión del producto de agua y el volumen. La velocidad de agua es proporcional a la presión que existe en el orificio de la boquilla.

El impacto de alta presión de agua se puede quitar a depósitos de suciedades en las superficies sin dañar al material que se este limpiando. La máquina costa con un motor de diesel. Tiene aplicaciones:

- la limpieza de la superficie concreto.
- todos formas de limpieza incluso de las plantas industriales
- limpiezas de tubos de caldera
- la limpieza del interior de tuberías que suelen incrustarse.
- limpieza en los molinos
- limpiar los depósitos de caucho de las pistas de aterrizaje del avión, etc.

Ver (figura 3.1)

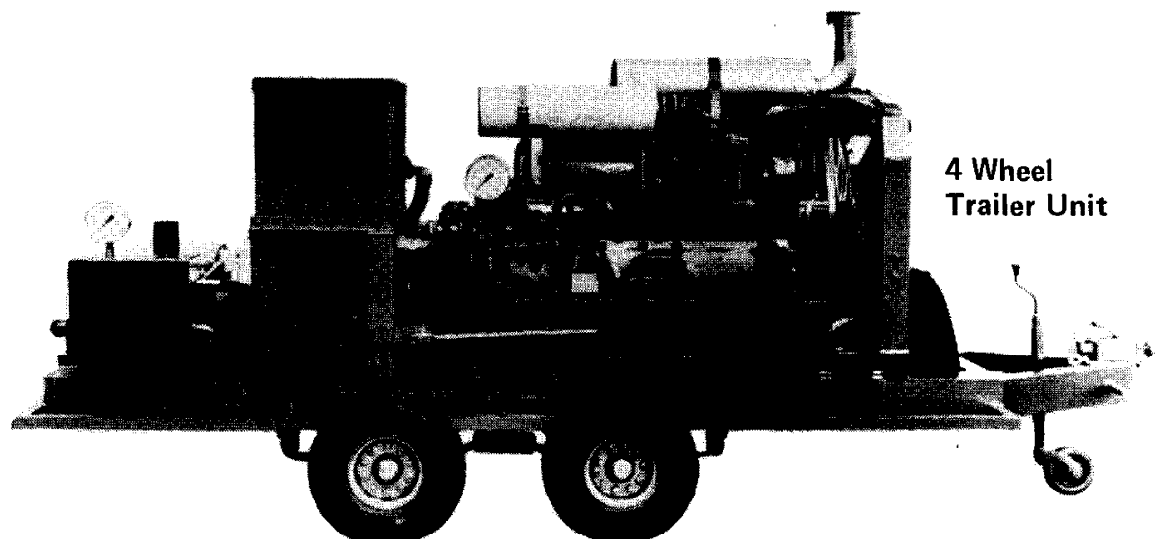


Fig. 3.1 Máquina "JETIN"

Caracterización de las válvulas de la bomba

Las válvulas son los elementos que permiten el paso del agua en un solo sentido, están compuestas por dos elementos de aceros inoxidables, uno fijo y otro móvil cerrándolo por la presión de agua en un sentido (abierto) y por un muelle en posición cerrada (ver fig. 3.2)

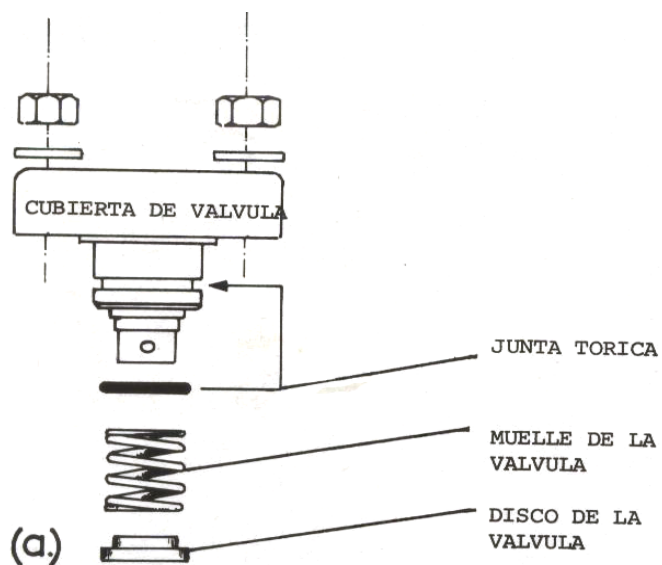


Fig. 3.2 .Válvula de de seguridad.

Estos dos elementos en las caras están pulidos a espejo en las caras de contacto plano para lograr la mayor hermeticidad, se hacen de aceros inoxidables endurecidos para, la presencia de óxidos en la superficies, el desgaste corrosivo –mecánico, la cavitación, deformaciones plásticas por impacto, el desgaste, las ralladuras en la superficie y el deterioro de los elementos, principalmente la pieza fija, (ver en la fig 3.3), las fallas en estos elementos hace que caiga la presión y la eficiencia de la maquina.



Fig. 3.3. Pieza fija de la válvula de seguridad.

Caracterización del material de las válvulas.

Composición química, estructura y propiedades. Las válvulas originales son: de aceros inoxidables ferríticos o martensíticos, el carácter de acero inoxidable se determina por aplicación de ataque químico de una solución del 30% de ácido nítrico en alcohol y con un imán se demuestra que no es austenítico. El análisis de dureza demuestra que el acero esta tratado térmicamente con temple y revenido, con dureza de 48-50 HRC.

De acuerdo a los resultados anteriores el acero pertenece a la familia de los aceros inoxidables martensíticos que podría ser el acero 420 (ver figura 1.7 del capítulo 1).

Datos de referencia del acero AISI 420 por catalogo.

DIN- Material- No	1.2316
Código	X 36 CrMo 17
Normas Internacionales	AISI 420 Modificado

Composición química	C	Cr	Mo
Análisis típico en %	0.36	16.0	1.2

Propiedades del acero

Acero con resistencia a la corrosión incrementada en comparación a del THYROPLAST 2083, permite obtener superficie pulida al espejo y presenta buena maquinabilidad. Este acero es generalmente suministrado en estado Bonificado.

Propiedades Físicas

Dilatación Térmica

$10^{-6} m(m^{\circ}C)$	20-100	20-200	20-300	20-400	20-500	20-600	20-700 °C
	10.5	11.0	11.0	12.0	-	-	-

Conductividad Térmica	W / (m °C)	20	350	700 °C
		17.2	21.0	24.7

Aplicaciones

Moldes para el procesamiento de plásticos que actúan corrosivamente tales como aminoplasticos y termoplásticos, además para la separación excesiva del ácido acético.

Forja

Forja °C	Enfriamiento
1050- 850	Lentamente, como por ejemplo en el horno

Tratamiento Térmico

Recocido °C	Enfriamiento	Dureza HB
760-800	Al horno	Max. 230

Temple °C	En	Dureza después del temple HRC
1020-1050	Aceite	49

Revenido °C	100	200	300	400	450	500	550	600
RC	49	47	46	46	47	45	39	32
N/mm ²	1570	1530	1480	1480	1530	1440	1230	1020

Durante el último año se han presentados fallas en numerosas máquinas de limpieza de este tipo en toda Cuba, siendo la falla principal la pérdida de capacidad de trabajo de las válvulas.

Soluciones emergentes dadas para lograr la funcionalidad de la bomba.

Solución 1 (Dada por los operarios y técnicos)

Uso de aceros inoxidables austeníticos, sin estudio previo, Resultado, corta duración por deformación plástica en la superficie de contacto del elemento de la fig. 3.4



Fig. 3.4. Asiento y disco de la válvula de seguridad.

Solución 2 (Dada por los operarios y técnicos)

Uso de acero al carbono ligeramente aleado de construcción para mejorar (composición química no define), con temple a la llama en agua, revenido sobre una plancha de acero caliente. No controlan ningún parámetro del tratamiento térmico.

Resultado: Se rajan las piezas en el trabajo y se oxidan con consecuencias secundarias que pueden ser de gran envergadura.

Dada la existencia de aceros inoxidables martensítico, se propone una solución temporal para lograr cumplir los compromisos de trabajo de limpieza en el CAI “14 de Julio” (solución 3).

Solución 3 (Dada en este trabajo)

Desarrollado por el autor de este trabajo con un alumno de proyecto I de IM – 31. Se hacen las piezas de acero al carbono 40X, se trata térmicamente, por el temple $T_{cal} = 840^{\circ}C$, medio del temple agua. Dureza después del temple 54 HRC.

Temperatura de revenido = $250^{\circ}C$

Tiempo de permanencia = 1.5 horas

Dureza obtenida 46 HRC

Las piezas fueron rectificadas en las superficies de contacto por una rectificadora plana y piladas a espejo de forma manual con pasta abrasiva.

Solución recomendada por el autor de este trabajo a mas largo plazo.

Usar acero 316, 316L, 316Ti u otro acero austenítico inoxidable, con tratamiento termoquímico de nitruración gaseosa.

Están en proceso de fabricación 6 juegos de válvulas en el taller T – 15 para su posterior nitruración en la universidad y que se evaluarían en una máquina operada por Ernesto Delgado colaborador e interesado como usuario de trabajo. Otra solución podía ser utilizar aceros inoxidables martensíticos de la familia 400, que fue utilizada originalmente por diseño, con temple y revenido además nitrurado.

No se ha logrado encontrar este acero en el mercado de Cuba. El que abunda es el acero austenítico inoxidable.

Otros problemas de falla en las piezas se aceros inoxidables en las bombas de cavidad progresiva en la Industria “Unión Láctea”.

Existen fallas en las bombas de cavidad progresiva. Los sellos mecánicos de aceros AISI 316Ti de estas bombas, fallan por el desgaste debido a partículas en suspensión en el líquido que bombea la bomba como por ejemplo: soya, tomate, guayaba, productos lácteos, etc. Estos productos tienen partículas en suspensión como son las semillas que son altamente corrosivos. Estas se adhieren en la junta y comienza el desgaste de la misma. En la Fig. 3.6 se muestra la interfase de sellaje del sello.

Principio de funcionamiento.

Al comenzar a rotar el árbol de la bomba todo el conjunto Fijador-Resorte-Pastilla Antifricción giran junto con el , estando el Asiento empotrado a la carcaza de la bomba, colocándose un anillo que garantiza el sellaje entre la carcaza y el asiento, la pastilla antifricción rota friccionando frontalmente con el asiento no permitiendo fugas entre sus superficies , a medida que se gasta la pastilla antifricción el resorte autorregulador los mantiene unidos hasta que se gaste completamente la misma, el retenedor de caucho el cual se encuentra unido a la pastilla garantiza el sellado perimetral del árbol de la

bomba. Este conjunto denominado “Sello Mecánico” es el utilizado en la actualidad en la gran mayoría de los equipos dinámicos de la industria y otros sectores para garantizar el estanco por el eje del equipo no permitiendo derrames.

En la figura 3.5 mostramos una descripción de todas las partes que componen un sello mecánico.

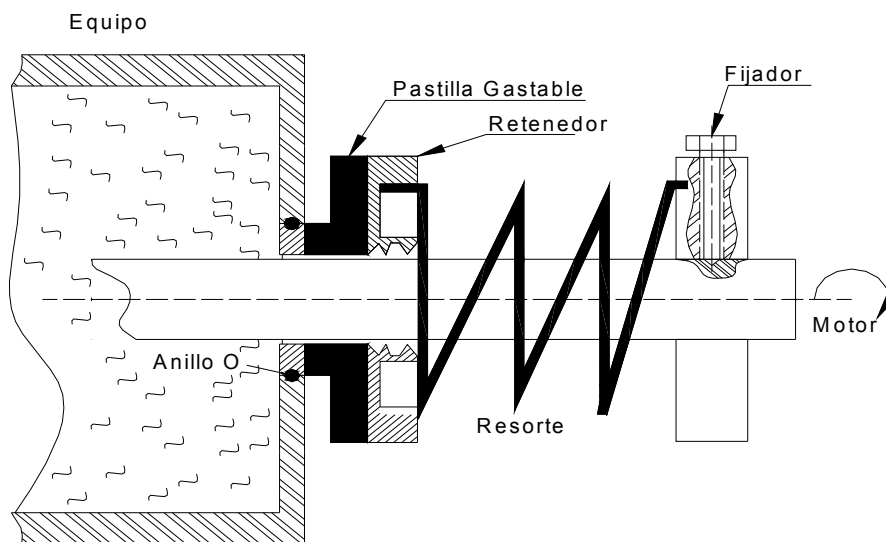


Fig. 3.5 Partes fundamentales de un sello mecánico.

Partes fundamentales:

1. **Fijador:** Pieza construida de Acero Inoxidable la cual tiene como función fundamental fijar todo el conjunto en revolución del sello al árbol de la bomba el cual le suministra la velocidad de giro.
2. **Resorte:** Resorte de acero inoxidable encargado de autorregular la unión de sellaje frontal entre la pastilla antifricción y el asiento antifricción.
3. **Reten:** Retenedor de caucho sintético encargado de garantizar la estanqueidad en todo el perímetro del árbol de la bomba no permitiendo salideros en la dirección paralela al eje de la bomba.
4. **Pastilla antifricción (Cara Rotatoria):** Pastilla fabricada de materiales compuestos antifricción, la cual fue formulada por los autores, obteniéndose un compuesto con bajo coeficiente de fricción, rigidez y moldeabilidad lo que facilita

su fabricación en moldes de acero lo que permite que su tecnología de fabricación sea productiva y económica.

5. **Asiento Antifricción (cara Fija):** Pieza de acero inoxidable austenítico diseñada con una cara frontal rectificada y endurecida por tratamiento térmico superficial (Nitrurada) que le confiere una alta dureza superficial y alta resistencia al desgaste.

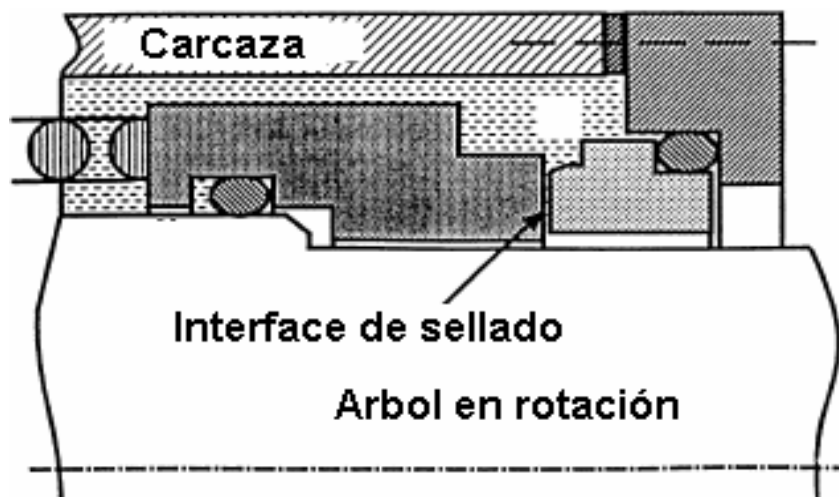
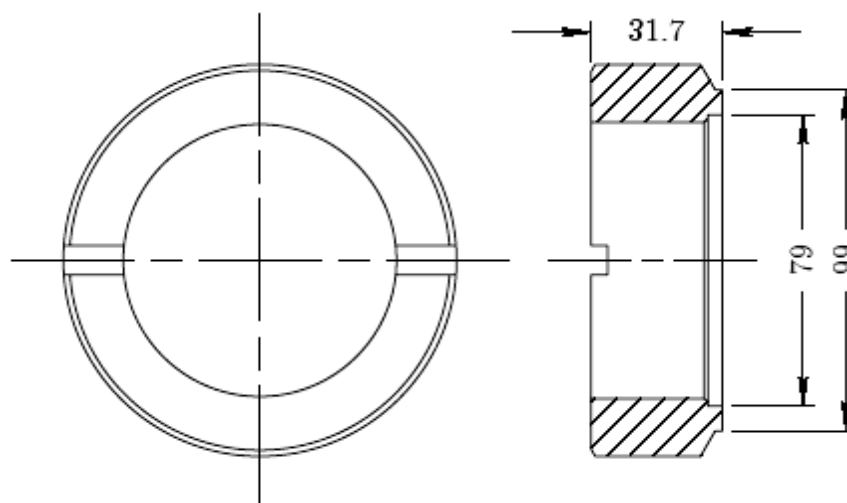
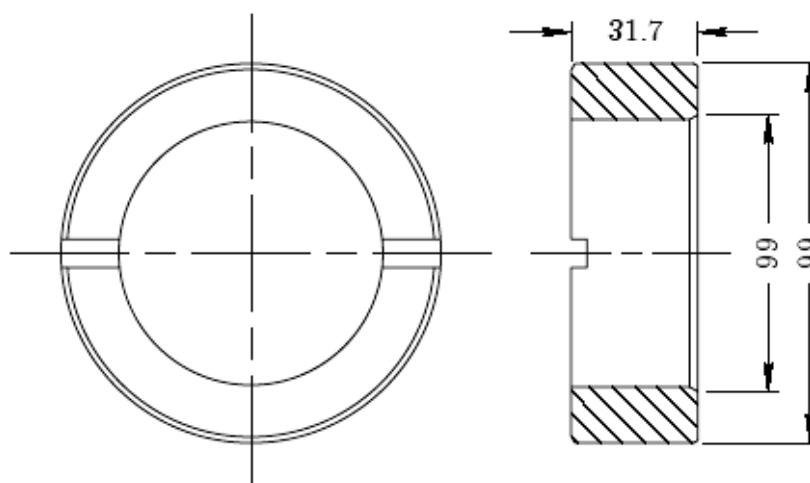


Fig. 3.6 Esquema de un sello mecánico.

A continuación mostramos las partes fundamentales del sello : La cara rotatoria donde es empleado el material formulado y la cara fija fabricada de acero inoxidable AISI 316 recubierta con una pastilla de carburo de silicio (Fig. 3.7)



Cara Rotatoria



Cara Fija

Fig. 3.7 Partes fundamentales del sello mecánico.

En resumen se demuestra que existe necesidad de utilización de aceros inoxidables con altas propiedades de dureza, resistencia al desgaste y tenacidad en diferentes industrias en Cuba. La nitruración gaseosa en elementos de aceros inoxidables austeníticos ó martensíticos luego del doble tratamiento térmico es una buena opción para tal efecto, incrementando la durabilidad de estos sistemas con un consecuente defecto económico que sería objeto de estudio posterior.

3.3 Corridas preliminares de nitruración en aceros inoxidables.

Parámetros del proceso de nitruración

Temperatura: 580 °C

Tempos seleccionados: 19, 41, 60 horas

Grado de disociación del amoniaco 40 – 50%

Flujo de amoniaco: 2.5 CFH

Aceros utilizados para la nitruración. Mecanismos de fortalecimiento.

Se utilizan varias probetas de acero para las corridas preliminares, de acuerdo a la siguiente tabla 3.1.

Acero	Diámetro (mm)	Estado	Deformación mm	Tiempo	Dureza HV
316Ti	16	Entrega	Laminado en frío	-	216
316Ti	16	Recocido 950 °C	-	-	161
316Ti	16	Con acritud por composición	$\delta = 0.20\%$	-	214
316Ti	16	Con acritud por composición	$\delta = 0.35\%$	-	241
316Ti	16	Entrega	Laminado en frío	19	322
316Ti	16	Entrega	Laminado en frío	41	340
316Ti	16	Entrega	Laminado en frío	60	380

Tabla 3.1 Recopilación de los datos de las corridas preliminares.

3.4 Discusión de los resultados.

El acero AISI 316Ti utilizado por ser laminado en frío, presenta endurecimiento por acritud en estado de entrega, con dureza 216 HV. Luego del recocido la dureza se reduce a 161 HV por el incremento del tamaño de grano y por la necesidad no básica producto del recocido.

Las probetas con 0.20% grado de deformación a partir del estado de recocido endurecen hasta 214 HV muy parecido al estado inicial del acero en estado de entrega. Con mayor grado de deformación 0.35%, la dureza se encuentra a 241 HV.

El endurecimiento por los efectos de la acritud no es muy alto es insuficiente para muchos fines en comparación con otros materiales ó métodos de fortalecimiento.

Los resultados de dureza de las muestras nitruradas, a pesar de buen control de los parámetros del proceso de nitruración y de haber efectuado el decapado químico de la película de óxido de cromo, no se corresponde con lo esperado y reportado en la literatura en aceros austeníticos nitrurados.

Las muestras nitruradas subieron ligeramente la dureza entre 322 HV y 380 HV. Es necesario un trabajo posterior para precisar las causa de la insuficiente dureza obtenida en las muestras de nitruradas. Puede haber influido negativamente la falta de fluido eléctrico de 4 horas al inicio del proceso de nitruración, el cual fue interrumpido y pudo ocurrir oxidación ó algún proceso de pasivación de la superficie, inhibiendo la difusión del nitrógeno.

La baja dureza superficial no permite hacer en estudio posterior propuesto en estas probetas para el análisis preliminar de la influencia de los factores estructurales de la cinética del proceso. Se hace necesario repetir los experimentos con nuevas probetas corrigiendo las posibles fallas en el proceso.

3.5 Conclusiones parciales.

Se demuestra que existen muchos elementos en sistemas mecánicos de la industria que son de aceros inoxidables, fundamentalmente en la industria alimenticia. Estas piezas normalmente se deterioran por desgaste. En el caso de los aceros al cromo – níquel austeníticos, que son los más utilizados, no tratables térmicamente, la acritud contribuye al fortalecimiento de estructura con un consecuente incremento de la dureza y la resistencia al desgaste. El crecimiento de las propiedades mecánicas por este método de fortalecimiento (acritud) es insuficiente para muchos fines. Una solución recomendada que contribuye a un incremento a la durabilidad de los aceros austeníticos es el TTQ de nitruración gaseosa. Los resultados obtenidos en las muestras nitruradas no son los esperados, pues debían obtenerse dureza superior a los 700HV.

Conclusiones

- 1 – Se logra reinstalar el sistema de nitruración gaseosa, con la calibración del disociómetro. Se mantiene el sistema trabajando por más de 60 horas.
- 2 – Se desarrollan las corridas para el acero AISI 316Ti con diferentes estados estructurales iniciales.
- 3 – Se desarrolla los ensayos de laboratorio previsto. Los resultados de dureza no corresponden con los esperados.
- 4 – Se hace el levantamiento de diferentes sistemas mecánicos con fallas de elementos de aceros inoxidable que pueden ser resuelto aplicando la nitruración gaseosa presentándose algunos casos.
- 5 – Se logra resolver temporalmente con este trabajo el funcionamiento de una maquina “JETIG” que desarrolla operaciones de limpieza en la industria cañera.

Bibliografía

Apraiz Barreiro, José. Tratamiento térmico de los aceros. / José Apraiz Barreir.-- España: Edit. Dossat S. A., 1981. -- 739 p.

Bokshtein, B. S. Difusión en metales. / B. S. Bokshtein. -- URSS: Edit. Mir. 1980.--219 p.

Gordon Cintra, Jorge. Tecnología del tratamiento térmico de los aceros. / Jorge Gordon Cintra. -- Villa Clara: Elab. UCLV, 1985. -- 164p.

Gulíáev, A. P. Metalografía. / A. P. Guliaev. -- URSS: Edit. Mir, 1978.--. 307 p.

Lajtin, Yu. Tratamiento químico térmico de los metales. / Yu. Lajtin, B. Arzamazov. -- Moscú: Edit. Mir, 1987. - 303 p.

Preobrazhenski. V. P. Mediciones termotécnicas y aparatos para efectuarlas. / V. P. Preobrazhenski. ~ URSS: Edit. Mir, 1980.-- 2 T.

Zúev, V. Tratamiento térmico de metales. / V. Zúev. — URSS: Edit. Mir, 1988.-- 253 p.

García Poogio, Jose. Aceros de alta resistencia. / Jose García Poogio.--Madrid -- :Edit.Mto, 1965 --500 p.

Nitruración. Tomado de: <http://es.wikipedia.org/wiki/Nitruraci%C3%B3n>

Tratamientos térmicos de nitruración. Tomado de:

<http://es.wikipedia.org/wiki/Nitruraci%C3%B3n>

Nitruración mas rápida: Tomado de:

<http://www.metalunivers.com/Tecnica/Hemeroteca/ArticuloCompleto.asp?ID=12092>.

Mayo del 2007.

Optimización del tratamiento termoquímico de nitruración. Tomado de:

http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0529101-130232//04CAP2.pdf.

Mayo del 2007.

Recomendaciones

- 1- Hacer estudios posteriores para determinar las causas de la insuficiencia dureza de las muestras de acero inoxidable nitruradas.
- 2- Desarrollar estudios posteriores de la influencia de los estados estructurales, grado de deformación plástica en frío y tamaño de grano, en la cinética del proceso de nitruración tanto para aceros al carbono y ligeramente aliados como para aceros inoxidables austeníticos.
- 3- Lograr mejores condiciones de trabajo para el desarrollo de las corridas de nitruración, mantener un flujo de agua constante, electricidad y amoniaco.

Anexos

1.2 - Conversión a otras marcas internacionales

Norma GOST	Código norma aleman	DIN	AFNOR	B.S.	UNÍ	JiS	SS	UNE	AISI	GB	EN			
06X18H11	1.4303	X50Ni8-I2	Z5CNI8-I1FF	305Si7 305519	X70NU8-I0 X80NiI9-I0	5U5305JI 5U5305	2337*	F.3513, XI80NH8-I2	308,305	ML0CH8NiI2*	X80NiI8-I2			
08X13	1.4000	X6CH4 X70I3	Z8CI2 Z8CI3FF	403Si7	X60I3	5U54I05 5U5403	2301	F.840I-AM-XI2CrI3 F.3II0-X60I3	4105 403;429	HOCrH*	X6CrI3			
08X161113M2Б	1.4580	X6CrNiMoNbI7- I2-2	Z6CNDNM7	318517	X6CrNiMoNbI7- I2	5US3I6JIL*	2343*	F.3536-X6CrNiMoNbI7-I2-	3I6Cb	-	X6CrNiMoNbI7-I2-			
08X17H13M2T	1.4573	XI0CrNiMoTiI8- I2	Z8CNDTI7.I	320S33	X60NiMoTiI7-I3	5ÜS3I6TÍ	2350*	F.3535-XCrNiMoTN7-I2-2	3I6Ti	-	X6CrNiMoTiI7-I2-			
08X17T	1.4510	X60TiI7	Z4CTI7	430517**	X6CrTiI7	SUS430LX	2325*	F.3H5-X5CrTiI7	30Ti;439 XM8	-	X5CrTiI7			
08X18H10	1.4301	X50NiI8-I0	Z4CNI9-I0FF Z6CNI8-I0	304Si6;LWCF 2I 304Si5	X5CrNiI8-I0	SUS304	2332 2333	F.355I; F.3504 ó F.354I	304H 304	0CrI8Ni9	X50NiI8-I0			
X18H10T	1.4541	X6CrNiTM8-I0	Z6CNTI8-I0	32IS3I 32IS5I;LW24	X6CrNiTiI8-II	5U532I	2337	F.3553-X7CrNiTiI8-II F.3523-X6CrNiTi 18-10	321	08CrI8NiIOTi	X6CrNiTiI8-I0			
08X18H12Б	1.4550	X6CrNiNbI8-I0	Z6CNNbI8-I0	347S20 347531 ANC3B	X6CrNiNbI8-II	5U5347	2338	F.3524-X6CrNiNbI8-I0	347 348	08CrI8NiI INb	X6CrNiNbI8-I0			
5X20H4AГ9	1.4871	X53CrMnNiN2I- 9	Z53CMN2I- 09Az	349S54	X53CrMnNiN2I- 9	5UH35; 5UH36	-	F.32I7-X53CrMnNiN2I-09	EV8	5Cr2IMn9Ni4N	X53CrMnNiN2I-9			
10X13CIЮ	1.4724	XI00AlI3	2I3CI3	403Si7	XI0CrAlI2	5U5405	-	F.3I52-XI0CrAlI3	405*	0CrI3Al*	XI0Cr5;AlI3			
10X17H13M2T	1.4571	X6CrNiMoTiI7-I2- 2	Z6CNOTI7-I2	320518 320531	X6CrNiMoTiI7I2	SUS3I6TÍ	2350	F.3535-X6CrNiMoTiI7-I2- 2	3I6Ti	0CrI8NiI2Mo2T	X6CrNiMoTiI7-I2- 2			
12 X13	1.4006	XI0CrI3 XI2CrI3	ZI0CI3 ZI0CI4	410521 ANCIA	XI0CrI3 XI2CrI3	5U54I0	2302	F.340I-XI0CrI3	410 CA-15	ICrI2	XI2CrI3			
12X17	1.4016	X6CrI7	Z8CI7	430517	X8CrI7	5US430	2320	F.3II3-X6CrI7	430	ICrI7	X6CrI7			
20A13	1.4021	X200I3	Z20CI3	420537	X20CrI3	5U5420JI	2303	F.3402-X20CrI3	420	2CrI3 •	X20CrI3			
20X20H14C2	1.4828	XI5CrNiSj20-I2	ZI7CN520-	309S24	XI6CrNi23-I4	5UH309	-	F.33I2-XI5ONi5I20-I2	309	2Cr23NiI3	XI5CrNi5j20-I2			
20X25H20C2	1.4841	XI5CrNi5j25-20	ZI2CNS25- 20	314525	XI6CrNi5j25-20	SUH3I0	-	F.33I0-XI5CrNi5j25-20	314,310	2Cr25Ni20	XI5CrNi5j20-I2			
40X10C2M	1.4731	0,35-0,45	1,90-2,60	<0,80	0,030	0,025	9,0-10,5	0,70-0,90	<0,60	-	0,30	-	<0,20	-
40X13	1.4034	0,36-0,45	<0,80	<0,80	0,030	0,025	12,0-14,0	-	<0,60	-	0,30	-	<0,20	-
55X20Г9AH4	1.4871	0,50-0,60	<0,45	8,0-10,0	0,040	0,030	20,0-22,0	<0,30	3,50-4,50	<0,20	0,30	-	<0,20	N 0,30-0,60

Anexo 1

2.2. ACEROS PARA NITRURAR

2.2.1 Aceros para nitrurar

Norma GOST	Código norma alemana	Composición química en %										
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Otros
35XM	1.7220	0,32-0,40	0,17-0,37	0,40-0,70	0,035	0,035	0,80-1,10	0,15-0,25	<0,30	-	0,30	-
38X2H2MA	1.6582	0,33-0,42	0,17-0,37	0,25-0,50	0,025	0,025	1,30-1,70	0,20-0,30	1,30-1,70	-	0,30	-
38X2MIOA	1.8509	0,35-0,42	0,25-0,45	0,30-0,60	0,025	0,025	1,35-1,65	0,15-0,25	<0,30	-	0,30	Al 0,70-1,10
38XГНМ	1.6546	0,37-0,43	0,17-0,37	0,70-1,00	0,035	0,035	0,40-0,60	0,15-0,25	0,40-0,70	-	-	.
40XΦ	1.7223	0,37-0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,025	0,025	0,60-1,10	»	<0,30	0,10-0,18	0,30	-
40XH	1.5711	0,36-0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,035	0,035	0,45-0,75	-	1,00-1,40	-	0,30	-
40X2H2MA	1.6565	0,35-0,42	0,17-0,37	0,30-0,60	0,025	0,025	1,25-1,65	0,20-0,30	1,35-1,75	-	0,30	-
40Г	1.1157	0,37-0,45	0,17-0,37	0,70-1,00	0,035	0,035	<0,30	-	<0,30	-	0,30	-

2.2.2 Conversión a otras normas internacionales

Norma GOST	Código norma alemana	DIN	AFNOR	B.S.	UNI	JIS	SS	UNE	AISI (SAE)	GB	EN
35XM	1.7220	34CrMo4	34CrMo4 35CD4	708A37	35CrMo35CrMo4F	SCM432 SCCrM3	2234	F.833I-AM34CrMo4 Ó F.I250-35CrMo4 Ó F.I254 -35CrMo4DF	4137 Ó 4135	35CrMo	34CrMo4
38X2H2MA	1.6582	34CrNiMo6	35NCD6 35CrNiMo6	816M40 817M40	35NiCrMo6KB	SNCM447	2541	F1272-40NiCrMo7	4337 4340	-	34NiCrMo6 SSNiCrMoK^

38X2MHOA	1.8509	41 CrAlMo7	40CAD6, 12	905M39	41CrAlMo7	905M39	2940	F. 1740-41 CrAlMo7	A355CLA E71400	38CrMoAl	-
38XГHM	1.6546	40NiCrMo2-2	40NCD2	311 -Type 7	40NiCrMo2(KB)	SNCM240	2541*	FI204-40NiCrMo2	8740	-	40CrNiMo2K ₀
40XΦ	1.7223	41CrMo4	42CD4TS	311 [- 1 708M40	41CrMo4	SCM440	2244	F8332-AM42CrMo4 6 F1252-40CrMo4	4140 y 4H2	40CrV	-
40XH	1.5711	40NiCr6	35NC6*	640M40	39NiCrMo3*	SNC236*	2244*	F.1272*	(*)3140	40CrNi	-
40X2H2MA	1.6565	40NiCrMo6	35NCD14*	817A37	40NiCrMo7*	SNCM439	2541*	FI272-40NiCrMo7	4340 9850	-	35NiCrMoK ₀ *
40Г	1.1157	40Mn4	35M5 40M5	150M36	42CrMo4*	SMn438H*	2541*	F.1202**	1035 1041	40Mn	-

*Puede ser útil como sustituto

**Puede ser útil como sustituto limitadamente(exigir contenido mínimo de C)

2.3.4. Aceros para nitrurar usados internacionalmente

Código norma alemana	Composición química en %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Otros
1.8515	0,28-0,35	0,15-0,40	0,40-0,70	0 035	0.035	2,80-3,30	0,30-0,50	<0,30	-	-	-
1.8519	0,28-0,35	0,15-0,40	0,40-0,70	0.035	0.035	2,30-2,80	0,30-0,50	-	0,20-0,30	-	-

1.8507	0,30-0,37	0,20-0,50	0,50-0,80	0.035	0.035	1,00-1,30	0,15-0,30	-	-	-	Al 0,80-1,20
2.4.4. Equivalencia de estos aceros											
Código norma alemana	Conversión GOST No Oficial	DIN	AFNOR	B.S.	UNI	JIS	SS	UNE	AISI (SAE)	GB	EN
1.8515	30X3M	31CrMo12	30CD12	722 M24	30CrMo12 31CrMo12	SCM430*	2240	F.1712- 31CrMo12	4130H**	30CrNi3*	-
1.8507	34X MfOA	34CrAlMo5	30CAD6.12	905 M31	34CrAlMo 7	SCM435*	2940**	F.1741- 4CrAlMo5	A355CLD	38CrMoAl*	-
*Puede ser útil como sustituto											
**Puede ser útil como sustituto limitadamente(exigir contenido mínimo de C)											