

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**



**“ELIMINACION DE TENSIONES INTERNAS EN
ACEROS Y ESTABILIZACION DE CARBUROS
MEDIANTE TRATAMIENTO CRIOGENICO.”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE

INGENIERO MECANICO

FERNANDO MISAEL DIAZ LOPEZ

PROMOCION 2001-II

LIMA-PERU

2005

ÍNDICE TEMÁTICO

PROLOGO	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Alcances.....	5
1.3. Objetivos.....	7
2. FUNDAMENTOS ACERCA DEL DESGASTE EN	
MATERIALES	8
2.1. Definiciones.....	8
2.2. Mecanismos de desgaste.....	9
2.2.1. Desgaste abrasivo.....	10
2.2.2. Desgaste Adhesivo.....	11
2.2.3. Desgaste Corrosivo.....	12
2.3. Factores que influyen en el desgaste.....	13
2.4. Tribología.....	18
2.4.1. La Lubricación.....	20

3. CONCEPTOS TEÓRICOS DE LOS TRATAMIENTOS

TÉRMICOS	22
3.1. Microestructura del acero.....	22
3.1.1. Austenita.....	22
3.1.2. Martensita.....	23
3.2. Diagrama TTT.....	24
3.3. Tratamiento térmico de Temple.....	26
3.4. Tratamiento térmico de Revenido.....	30
3.5. Problemas en los tratamientos térmicos.....	35
3.5.1. Austenita retenida en la transformación martensítica.....	35
3.5.2. Decarburización.....	38

4. MÉTODOS PARA AUMENTAR LA RESISTENCIA AL

DESGASTE	41
4.1. Endurecimiento Superficial.....	42
4.1.1. Tratamientos Termoquímicos.....	42
4.1.2. Temple Superficial.....	49
4.2. Endurecimiento por precipitación.....	53

5. TENSIONES INTERNAS EN LOS MATERIALES.....

5.1. Tensiones internas debido al temple.....	55
5.2. Tensiones internas debido a la deformación.....	58
5.3. Efectos perjudiciales de las tensiones internas.....	59

6. TRATAMIENTO CRIOGÉNICO.....

6.1. Introducción al tratamiento criogénico.....	61
6.2. Historia del tratamiento Criogénico.....	61

6.3. Fundamentos del tratamiento criogénico.....	62
6.3.1. Visión general del tratamiento criogénico.....	62
6.3.2. Influencia del tratamiento criogénico en los materiales.....	63
6.3.3. Tipos de tratamientos criogénicos.....	65
6.3.4. Fases del tratamiento criogénico.....	72
6.3.5. Explicación del tratamiento criogénico.....	75
6.3.6. Revenido después del tratamiento criogénico.....	80
6.3.7. Cambios microestructurales debido al tratamiento criogénico.....	82
6.4. Ventajas del Tratamiento Criogénico.....	92
6.5. Equipos para el tratamiento criogénico.....	93
6.5.1. Consideraciones para la selección del procesador.....	93
6.5.2. Procesadores Criogénicos.....	97
6.5.3. Controles de Temperatura.....	105
6.5.4. Precios de procesadores criogénicos.....	106
6.6. Aplicaciones industriales del tratamiento criogénico.....	108
6.6.1. Herramientas de corte y herramientas en general.....	110
6.6.2. Insertos de carburo.....	115
6.6.3. Prensas punzonadoras, frenos, cizallas.....	117
6.6.4. Resistencia de las aleaciones de cobre, electrodos de soldadura.....	120
6.6.5. Aplicación en la industria papelera.....	121
6.6.6. Instrumentos musicales.....	123
6.6.7. Armas de fuego y armas en general.....	124

6.6.8. Automóviles, motocicletas, cargadores o excavadores de nieve, aeronaves y componentes marinos.....	127
6.6.9. Aplicación en la Industria plástica.....	130
6.6.10. Metales no ferrosos.....	132
6.6.11. Aplicación en la industria maderera.....	134
6.6.12. Aplicación en componentes electrónicos.....	138
6.6.13. Equipos deportivos.....	139
7. RESULTADOS OBTENIDOS.....	141
7.1. Descripción del problema con los discos de corte en Eternit.....	141
7.2. Características de los discos de corte de Eternit.....	142
7.3. Tratamiento efectuado en los discos de corte.....	143
7.4. Pruebas y ensayos realizados.....	144
7.5. Procesamiento de datos.....	145
8. COSTOS.....	148
8.1. Costos del tratamiento efectuado en los discos de corte de Eternit.....	148
8.2. Análisis comparativo.....	149
8.3. Costos del tratamiento en diversos tipos de materiales y herramientas.....	151
CONCLUSIONES.....	154
BIBLIOGRAFÍA.....	155
APÉNDICE.....	157

Dedicatoria

A Dios por el significado de la vida misma

A mi esposa Laura por estar siempre allí.

A mi familia por su incansable e inmensurable apoyo, a mi madre por la dicha de estar a su lado, a mi padre por su ejemplo de vida, a mi hermana por su paciencia, a Checo y a Luisa por aquellos primeros años vividos.

A mi amigo Miguel por su gran apoyo.

*Believe in me because I don't believe in anything
and I want to be someone to believe*

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El tratamiento criogénico comenzó a finales de 1800 cuando el Sr. James Dewar perfeccionó una técnica para comprimir y almacenar gases de la atmósfera. Estos gases comprimidos fueron súperenfriados y cualquier metal que se ponía en contacto con las bajas temperaturas mostraban algunos cambios en sus características, esto se pudo observar en los depósitos que almacenaban los gases.

Aproximadamente 150 años atrás, los relojeros suizos simplemente enterraban ciertas partes de los relojes en la nieve durante los largos meses de invierno para eliminar las tensiones residuales, este tratamiento lo usaron durante 100 años.

También se recuerda que muchos fabricantes de herramientas, desde 1940, almacenaban sus aceros en refrigeradoras durante meses para aumentar la resistencia al desgaste en caso de que se formara austenita residual pero generalmente para

eliminar tensiones residuales. No se tenía idea qué estaba pasando, pero sabían que había una mejora.

También fue común encontrar partes que se dejaban toda la noche fuera de las tiendas de herramientas en Gran Bretaña durante los meses de invierno.

Durante 1930 y 1940, todos estos hechos y el proceso fueron documentados y hubo muchas publicaciones acerca del tratamiento, en muchos astilleros se usaron temperaturas bajo cero para eliminar los esfuerzos residuales en piezas o juntas soldadas.

Por el año 1950, los fabricantes de herramientas empezaron a usar el hielo seco para ganar resistencia al desgaste en las herramientas que contenían austenita retenida producto del tratamiento térmico.

En los inicios de 1960, los ingenieros aeroespaciales aplicaron los beneficios de las temperaturas criogénicas para aliviar las tensiones en las piezas usadas en la exploración del espacio. Al poco tiempo, las fuerzas armadas usaron el tratamiento criogénico en aeronaves.

A finales de 1970 y comienzos de 1980, la criogénia usada para aumentar la resistencia al desgaste o eliminar tensiones residuales en algunos casos, empezó a conseguir mayor atención debido a que el costo asociado con el tratamiento

disminuyó esta hizo que surgieran nuevas compañías que hacían ese servicio, pero estas compañías no tuvieron ningún tipo de ayuda para surgir.

El Instituto Americano del Acero publicó artículos en revistas que intentaban ridiculizar el proceso y desvirtuar las opiniones de los usuarios acerca de los beneficios del tratamiento criogénico. Tales artículos y las informaciones erradas ayudaron a crear métodos peligrosos y perjudiciales para las herramientas procesadas con la criogénia en los primeros años de la industria. Desafortunadamente algunos de estos conceptos fueron causados por la ignorancia, pero algunos fueron probablemente hechos para ayudar a los productores de herramientas. Los productores de aceros querían aumentar sus ventas y se sentían amenazados por esta nueva y emergente tecnología.

Estas declaraciones fueron hechas para dañar o al menos no permitir el crecimiento de la reciente industria criogénica. Muchos de estos productores de aceros con el tiempo quebraron a causa de su falta de visión de futuro para invertir en nuevas tecnologías, nuevos equipos, etc. Algunas de las industrias sobrevivientes, ahora promueven el tratamiento criogénico.

La industria espacial fue una de las primeras en usar el tratamiento criogénico. Durante ese tiempo la NASA encontró muchas aplicaciones en donde la criogénia tenía excelentes resultados en el incremento de la resistencia al desgaste. Sus investigaciones continúan hoy en día y están teniendo un rol sobresaliente en sus trabajos.

En el Perú se realiza sólo el tratamiento criogénico subcero en la empresa Aceros Bohler del Perú S.A, este tratamiento se realiza a $- 80^{\circ}\text{C}$ y dura 2 días.

Entre las organizaciones internacionales que se dedican a promover este tratamiento tenemos la Sociedad Americana de Criogénia (CSA) y la Sociedad Americana de Materiales (ASM).

1.2 Alcances

Este trabajo empieza con la introducción del tratamiento criogénico en el capítulo 1.

En el capítulo 2 se describe la teoría de desgaste de los materiales.

En el capítulo 3 se explican algunos conceptos acerca de los tratamientos térmicos, que nos ayudarán a entender el tratamiento criogénico así como nos permitirán sustentar dicho tratamiento.

En el capítulo 4 se enumeran y explican los métodos para aumentar la resistencia al desgaste, esto abarca los métodos convencionales.

En el capítulo 5 se explican los orígenes de las tensiones internas de los materiales así como sus efectos perjudiciales.

En el capítulo 6 se hace un estudio conceptual del tratamiento criogénico describiendo las aplicaciones industriales, los equipos utilizados, los cambios microestructurales, las ventajas del tratamiento, etc.

En el capítulo 7 se hace una descripción de la experiencia realizada en la Fábrica Peruana Eternit S.A. respecto al tratamiento criogénico en los discos de corte, señalando las características de esta experiencia así como los resultados cuantitativos y cualitativos obtenidos.

En el capítulo 8 se hace mención de los costos involucrados en el tratamiento así como un análisis comparativo de la experiencia realizada en la Fábrica Peruana Eternit S.A.

Debo mencionar también que el fin de este trabajo no es abarcar todos los fundamentos sobre la ciencia criogénica, ni responder todas las preguntas que rodean a este tratamiento. Más bien, esta es una recopilación de mucha de la información disponible acerca de los efectos que el tratamiento criogénico tiene en la estructura del metal, así como una apreciación global del tratamiento. También se incluyen las teorías y conclusiones con respecto al uso óptimo del tratamiento criogénico en aceros.

Toda la información es tan actualizada como ha sido posible, ha sido recogida de varias bases de datos científicas e industriales así como informaciones de las empresas que brindan este servicio en Canadá y EE.UU.

1.3 Objetivos

El propósito principal de éste informe es explicar los conocimientos acerca del tratamiento criogénico, describir el tratamiento, sus aplicaciones, cuáles son los resultados, los beneficios que se obtienen y finalmente proponer una metodología para eliminar las tensiones internas en el metal mediante la aplicación de bajas temperaturas.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS ACERCA DEL DESGASTE EN MATERIALES

2.1 Definiciones

Para entender mejor el desgaste y los factores que lo ocasionan, se debe explicar los mecanismos del desgaste.

El desgaste es un proceso complicado, pero puede ser descrito como la pérdida física o remoción gradual de material en una superficie cuando se pone en contacto con otra superficie o sustancia erosiva.

El desgaste ocurre básicamente en todos los materiales y se evidencia cuando pequeñas partículas son arrancadas de la superficie por acción de otro material que se mueve en dirección contraria.

En industrias y otras aplicaciones, el costo de reemplazar elementos desgastados como engranajes y rodajes en equipos es cuantioso en dinero pero también en tiempo de paradas, pero la mayor pérdida es generalmente la pérdida de producción. El

desgaste es el factor número uno que limita la vida de las herramientas y componentes.

Hay numerosos ejemplos de desgaste en los procesos de manufactura, la mayoría de los cuales son indeseables: el desgaste de las herramientas en el maquinado de metales (la broca, la fresa, etc), el desgaste de los dados en las diferentes operaciones de manufactura de metales, la erosión de los moldes en fundición y el desgaste general de la maquinaria de producción.

Del lado positivo, algunos procesos se basan en la abrasión (uno de los mecanismos de desgaste): Esmerilado, pulido y el uso de piedras abrasivas en el fricciónado en tambor que es una forma de rebabeado.

El desgaste involucra tanto la acción mecánica, acción química como la combinación de ambos.

2.2 Mecanismos de Desgaste

Hay varios mecanismos como ocurre el desgaste, los principales mecanismos son:

- Desgaste Abrasivo
- Desgaste Adhesivo
- Desgaste Corrosivo

2.2.1 Desgaste Abrasivo.

El mecanismo del desgaste abrasivo es básicamente similar al maquinado, esmerilado o lapeado. Ocurre cuando una partícula que es más dura que la superficie afectada excava y forma surcos en el material. Esto es conocido como abrasión de dos materiales. La abrasión de dos materiales puede ser más efectiva cuando las partículas desprendidas de las superficies quedan atrapadas entre las dos superficies. Mientras las superficies se mueven, las partículas extrañas excavan y rayan el material en las áreas de la superficie más suave.

El tratamiento criogénico ayuda a reducir el desgaste abrasivo en los materiales ferrosos tratados térmicamente completando el proceso de tratamiento térmico, asegurando que se obtenga una estructura martensítica de grano fino, homogéneo, y denso. También existe una ganancia de finos microgramos de carburo mediante la precipitación de elementos durante el tratamiento criogénico. El tratamiento otorga una estructura de grano más fina que es más tenaz y más resistente al desgaste. La estructura que es más densa también es más resistente a la abrasión ya que las áreas más suaves están ahora mejor sostenidas y reforzadas mediante la formación de carburos.

El tratamiento criogénico también tiene efecto en metales no-ferrosos y plásticos. Pero el efecto solo se da a través del realineamiento de los cristales, que mejora las características de desgaste en materiales no ferrosos (metales, plásticos, o algunas fibras). Cuando se fabrica alguno de estos materiales,

algunas moléculas quedan atrapadas o fuera de posición durante el proceso de solidificación. Esto se observa cerca de la superficie donde el agua o aceite es usado en el proceso de solidificación. Cuando esto sucede, se forman grandes vacíos en la estructura molecular, que debilita el material. Estas áreas débiles serán las primeras en desgastarse.

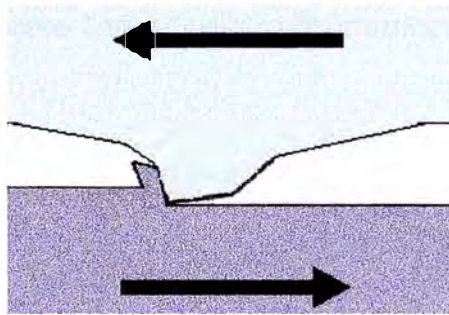


Figura 1.1 – Mecanismo de desgaste abrasivo.

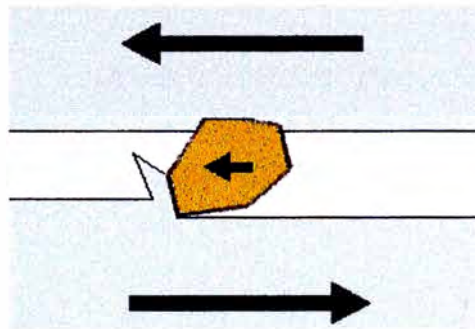


Figura 1.2 – Partícula abrasiva entre 2 superficies de contacto.

2.2.2 Desgaste Adhesivo.

La superficie de cualquier material puede verse y sentirse lisa, pero con la ayuda de un microscopio es fácil distinguir que existen una serie de picos y valles. Cuando dos materiales se mueven unas a través de otras y ocurre la unión de picos o asperezas, el movimiento continuo de la superficie requiere

del rompimiento de las juntas enlazadas. Debido a que generalmente el enlace de los picos o asperezas es más fuerte que las 2 superficies en contacto, cada vez que se rompe un enlace se remueve una pequeña partícula (llamada partícula de desgaste) de una de las superficies. Algunos elementos tienen una tendencia a pegarse o soldarse, tal es el caso del cromo, es por esta razón que cuando se trabaja con acero inoxidable comúnmente se evita usar materiales ricos en cromo.

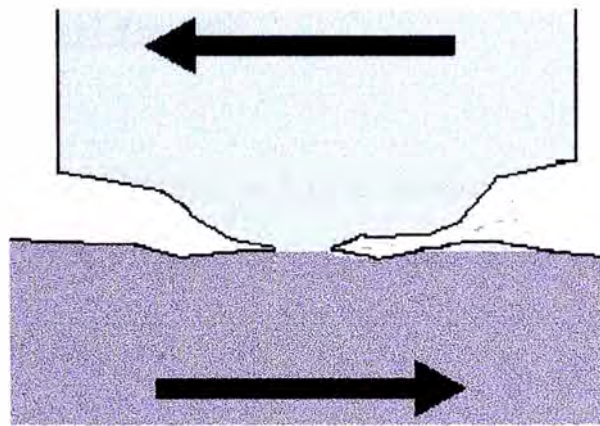


Figura 1.3 – Mecanismo de desgaste adhesivo.

2.2.3 Desgaste corrosivo.

Incluye la acción química y mecánica. La acción química causa la formación de una capa de óxido que afectará las características de desgaste de un material creando un punto de partida para acelerar el desgaste. Pero esto unido con las acciones mecánicas, incrementa enormemente las características de desgaste en las superficies del metal. El óxido comúnmente tiene propiedades muy diferentes al metal base, esto causa que el índice de desgaste sea afectado por la capa de óxido, es decir la película de óxido es más débil que el metal base,

lo cual facilita la remoción de las capas superficiales por abrasión u otras acciones de desgaste. La perturbación de la estructura molecular es mucho más difícil de aislar o separar porque existen muchas reacciones químicas que causan diferentes desgastes en diferentes materiales.

El tratamiento criogénico incrementa la resistencia a la formación de óxido.

2.3 Factores que influyen en el desgaste

El desgaste es un problema complicado porque el proceso de desgaste tiene muchas variables que afectan el nivel de resistencia del material. Estas variables son:

- Composición química.
- Dureza del material.
- Microestructura.
- Tenacidad.

También existen variables como:

- Atmósfera.
- Composición de materiales de contacto.
- Corrosión.
- Fuerza o presión aplicada en las piezas de contacto.
- Lubricación.
- La velocidad relativa de las piezas.

- El acabado final de las piezas.
- Temperatura de las piezas.

Ahora expliquemos cada una de las variables que afectan el desgaste.

2.3.1 Atmósfera

Definitivamente afecta la resistencia al desgaste. El desgaste es causado por la formación de óxido, suciedad y partículas de polvo, humedad, etc., encontrados en la atmósfera. En un ambiente agresivo el desgaste será mayor al desgaste que se produciría con un ambiente normal.

2.3.2 La Composición

La composición de los materiales que están en contacto afecta la resistencia al desgaste.

La mejor protección contra este tipo de desgaste es usar materiales disímiles. Por ejemplo, si se está produciendo un producto de acero inoxidable (la mayoría de los aceros inoxidables contienen de 17% a 24% de cromo), se debe evitar usar una herramienta con alto contenido de cromo como D2, en vez de eso, se deberá revisar las características y composiciones de otros aceros y escoger un material que evite el desgaste. Un acero rápido con molibdeno sería una mejor opción, así como el M2.

2.3.3 Corrosión.

Es a menudo controlable mediante la eliminación del problema químico y una vez más, el tratamiento criogénico fortalecerá al material haciéndolo menos propenso a la oxidación.

2.3.4 La Fuerza

La fuerza o presión aplicada a las partes en contacto causarán la fatiga del material así como esfuerzos o tensiones. El tratamiento criogénico eliminará en forma efectiva el esfuerzo de carga original y evitará el restablecimiento de esfuerzos en las piezas.

2.3.5 La dureza

La dureza afectará la resistencia al desgaste ya que la dureza reduce el socavamiento o desgaste asociado con el desgaste abrasivo. Muchas personas creen que el desgaste está directamente relacionado con el nivel de la dureza pero eso no es del todo cierto. Por ejemplo, se puede calentar un acero de herramienta D2 y revenir a 400° F (204° C), resultando con 62RC de dureza. También se puede hacer un doble revenido a 960° F (516° C) en la primera etapa, seguido por un revenido en 900° F (482° C) que produce una dureza de 58 RC. La última herramienta 58 RC producirá 30% más piezas cortadas que una pieza de más alta dureza.

El tratamiento criogénico generalmente no incrementa la dureza en metales mas que 1 o 2 puntos si éste ha sido tratado térmicamente en forma apropiada. Las herramientas tratadas térmicamente en forma inadecuada pueden incrementar mucho su nivel de dureza ya que el tratamiento criogénico está siendo usado para corregir un tratamiento térmico incorrecto. El tratamiento criogénico incrementa dramáticamente la resistencia, lo hace a través de los granos refinados, adicionando la formación de micro carburos y una estructura de Martensita muy firme. La misma herramienta D2 que mostró solamente un 30% de incremento en la resistencia al desgaste, mostrará un porcentaje de 100% a 600%.

2.3.6 Lubricación

La Lubricación puede ser realizada a través de muchas técnicas. Se puede mejorar la resistencia al desgaste a través de métodos de líquidos normales, revestimientos especiales o medios especiales de lubricación, además, si esto se combina con el tratamiento criogénico, el tiempo de vida puede ser considerablemente alterado. Si las herramientas son recubiertas con TiN, ionizadas, o tratadas con cualquiera de los cientos de procesos de enchapado, el tratamiento criogénico extenderá su vida considerablemente. Primero ayudará al recubrimiento a unirse a la base del material para formar una unión más fuerte. La estructura homogénea de Martensita puede extender la vida de la pieza de 100% a 600%, que es muy superior a una pieza que solo es revestida. La mejor combinación es el uso de revestimientos para evitar el

arranque de viruta, acompañada con un tratamiento criogénico para mejorar la resistencia al desgaste. Además, se debe recordar que el enchapado pierde la mayor parte de su vida en el primer afilado o maquinado. Mas o menos en el tercer maquinado, ya no existe. El tratamiento criogénico es un proceso de una sola vez que completa el proceso de tratamiento térmico.

2.3.7 La velocidad relativa

La velocidad relativa de las piezas entre dos objetos en contacto. El tratamiento criogénico tiene un efecto normal en las piezas para prevenir el desgaste abrasivo mediante la transformación de Martensita y el incremento de la precipitación de carburos.

2.3.8 El acabado de las superficies

El acabado de las superficies en las piezas puede ser mejorado mediante el tratamiento criogénico, esto reducirá el desgaste.

2.3.9 La temperatura de las piezas

Afecta el desgaste mediante la aceleración de la corrosión y la disminución de las propiedades mecánicas en el material. Los materiales con alto punto de fusión exhibirán el mayor desgaste. El tratamiento criogénico elimina los esfuerzos residuales en un material.

2.4 Tribología

La tribología es la ciencia y tecnología de superficies en movimiento relativo. Abarca muchos aspectos como fricción, lubricación y desgaste.

Las condiciones de la superficie de una pieza maquinada tiene influencia en el uso de la pieza por ejemplo puede originar el inicio de rajaduras en la superficie y esfuerzos residuales que influyen en las propiedades de fatiga y corrosión.

En una vista microscópica la superficie de una pieza maquinada no es totalmente plana y puede mostrar diferentes características como: microrajaduras, cráteres, ranuras, pulido, rebordes, inclusiones, deformación plástica, esfuerzos residuales, capa de óxido, etc.

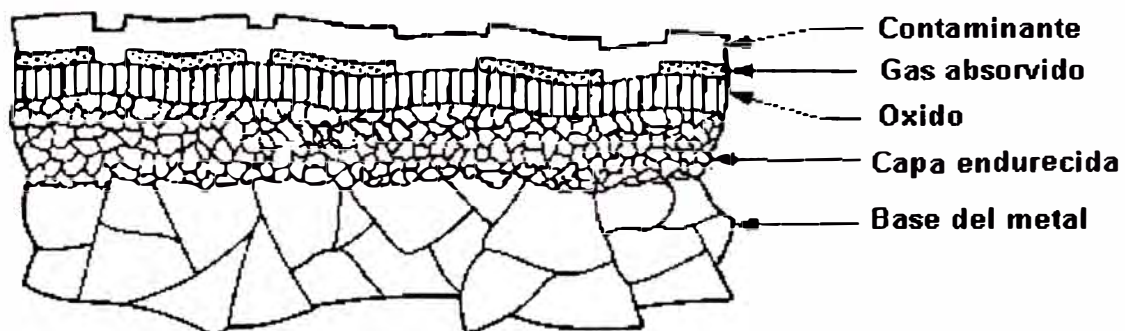


Figura 1.4 – Vista de una estructura de metal.

La fricción se define como la resistencia al movimiento entre 2 superficies en contacto bajo una carga normal. Es útil considerar que a microescala la interfase entre estas dos superficies en contacto no es totalmente plana.

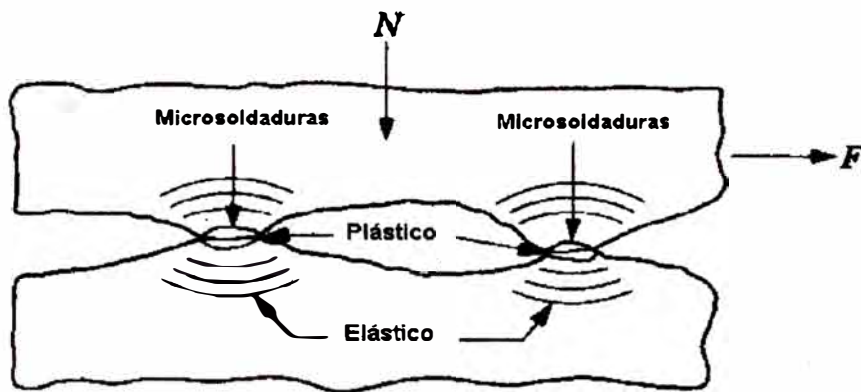


Figura 1.5 – Superficies en contacto durante la fricción.

Se pueden ofrecer varias formas de reducir la fricción y el desgaste. El más importante es la lubricación. Otras formas de reducir la fricción y el desgaste incluyen:

- Selección adecuada de los materiales.
- Los tratamientos superficiales.
- Adecuado control de las condiciones de operación.

El problema de seleccionar el material adecuado para aplicaciones que involucran fricción y desgaste frecuentemente se reduce a un asunto de dureza del material. Por ejemplo las herramientas para los procesos de producción, como el maquinado y formado, deben ser más duras que el material de trabajo. Además como la adhesión es un factor significativo en la fricción y el desgaste, es importante elegir materiales que no formen fácilmente enlaces adhesivos.

Pueden usarse varios tratamientos de superficie para reducir el desgaste, la mayoría de estos tratamientos están diseñados para aumentar la dureza en una de las dos superficies, de esta forma se incrementa la resistencia al desgaste.

El acabado de la superficie es un factor importante que influye sobre la fricción y el desgaste. Para superficies secas, la regla general es que mientras más lisas sean será mejor. Para superficies lubricadas, el asunto se vuelve mas complicado porque muchas veces es deseable que las superficies retengan lubricante y para esta retención se necesitan superficies que no sean totalmente lisas.

2.4.1 La Lubricación

La lubricación es la forma más efectiva para reducir la fricción y el desgaste, los lubricantes se usan ampliamente en el trabajo de metales y otros procesos de manufactura.

Pueden distinguirse 4 tipos de lubricación: Lubricación por película fluida, lubricación de límites, lubricación sólida y fricción seca (no-lubricación)

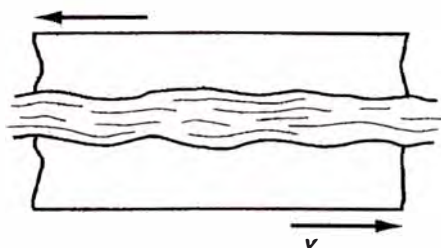


Figura 1.6 – Lubricación por película fluida.

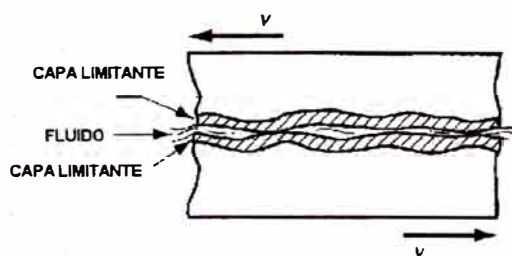


Figura 1.7 – Lubricación de límites

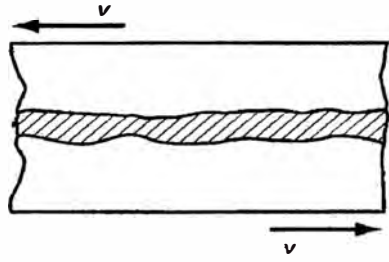


Figura 1.8 – Lubricación sólida

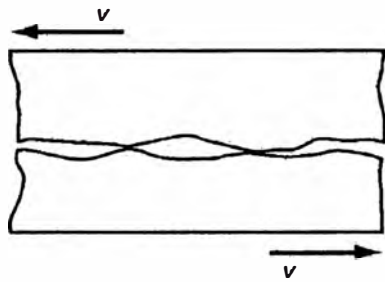


Figura 1.9 – Fricción seca

CAPITULO III

CONCEPTOS TEÓRICOS DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Para un mejor entendimiento del verdadero efecto del tratamiento criogénico en metales, hay algunos conceptos que debemos entender. Es aquí donde se establecen los fundamentos para que el proceso de tratamiento criogénico sea bien entendido.

3.1 Microestructura del Acero

Los constituyentes metálicos que pueden presentarse en los aceros son: Ferrita, Cementita, Perlita, Sorbita, Troostita, Martensita, Bainita, y Austenita. También pueden estar presentes constituyentes no metálicos como óxidos, silicatos, sulfuros y aluminatos. Las microestructuras que debemos entender son 2:

3.1.1 Austenita

Es el constituyente más denso de los aceros y está formado por una solución sólida por inserción de carbono en hierro gamma. Puede contener de 0 a 1.7% de carbono y es por lo tanto un constituyente de composición variable. La

austenita no es estable a la temperatura ambiente pero existen algunos aceros al cromo-níquel denominados Austeníticos cuya estructura es austenita a temperatura ambiente.

Generalmente se puede obtener una estructura Austenítica a la temperatura ambiente por enfriamiento rápido de aceros de alto contenido de carbono o de muy alta aleación.

La austenita está formada por cristales cúbicos de hierro γ que cristaliza en el sistema cúbico centrado en las caras, con una dureza de 300 Brinell, una resistencia a la tracción de 100 kg/mm² y un alargamiento del 30 %, no es magnética. La forma del grano de austenita es muy larga, áspera, y muy irregular.

3.1.2 Martensita

Es el constituyente típico de los aceros templados, está conformado por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en ferrita y se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde su estado austenítico a altas temperaturas.

El contenido de carbono suele variar desde muy poco carbono hasta el 1% de carbono, sus propiedades físicas varían con su composición aumentando su dureza, resistencia y fragilidad con el contenido de Carbono hasta un máximo

de 0.7 %C. Después de la cementita es el constituyente más duro de los aceros, tiene una dureza de 50 a 68 Rc, resistencia a la tracción de 170 a 250 kg/mm² y un alargamiento del 0.5 al 2.5 %, muy frágil y presenta un aspecto acicular formando grupos en zigzag con ángulos de 60°. Se presenta en forma de agujas y cristaliza en el sistema tetragonal centrada en el cuerpo.

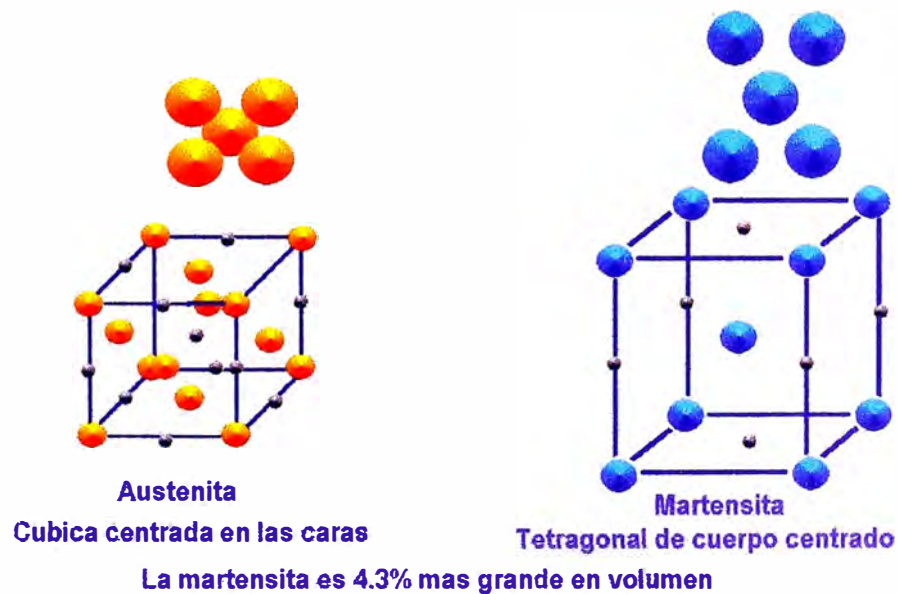


Figura 3.1 – Celdas unitarias de la Martensita y Austenita

3.2 Diagrama TTT (Tiempo – Temperatura – Transformación)

Sirven para explicar el comportamiento de un acero durante el enfriamiento desde altas temperaturas a partir de la zona de austenita, representan la relación entre la temperatura a la que tiene lugar la transformación y el tiempo que necesita la transformación desde que se inicia hasta su terminación. Un diagrama TTT es único para cada tipo de acero ya que cada metal tiene diferentes cantidades y variedades de elementos químicos.

Cada uno de estos elementos tienen diferentes reacciones unos a otros, que como resultado causan cambios predecibles en las características de los diagramas para cada tipo de metal.

Cada metal tiene su respectiva fórmula en la forma de su diagrama TTT. Cada diagrama TTT muestra con precisión el proceso de tratamiento térmico que se producirá.

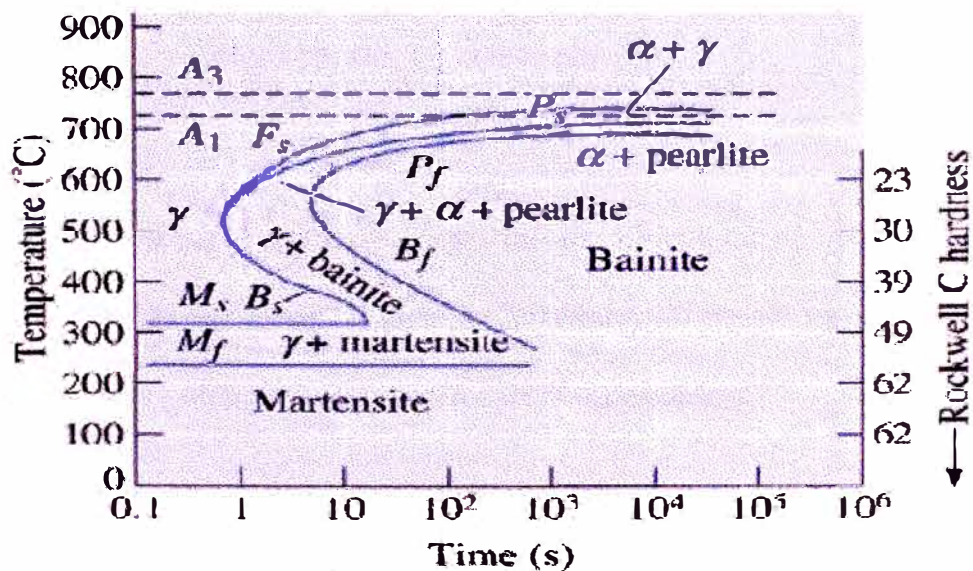


Figura 3.2 – Diagrama TTT del Acero 1050

Los diagramas TTT son de la forma como se muestra en la Figura 3.2. En ellos las ordenadas indican las temperaturas y las abscisas el tiempo graficado logarítmicamente.

Por su forma característica, estos diagramas han sido llamados curvas "S", sin embargo, la adición de elementos de aleación modifica dicha forma. Como se observa en la figura, estos diagramas consisten en dos curvas fundamentalmente, las

cuales denotan el inicio y fin de transformación, a la izquierda de ellas existe únicamente austenita metaestable, el intervalo de tiempo necesario para que la reacción se inicie se conoce como período de incubación. La sección entre las dos curvas es el tiempo de reacción y la parte a la derecha de la curva de fin de transformación, indica el producto formado. Por debajo de la horizontal, marcada por la temperatura M_s , el producto de la transformación será martensita.

Este diagrama señala a diferentes temperaturas, el tiempo necesario para que se inicie y complete la transformación isotérmica de la austenita en otros constituyentes.

Cada diagrama TTT esboza el proceso requerido para producir resultados esperados. Algunos metales necesitarán un rápido calentamiento hasta la temperatura de Austenización, mientras otros requerirán un calentamiento lento.

3.3 Tratamiento Térmico de Temple

Después que las partes han sido sometidas a la temperatura Austenítica durante un tiempo determinado, las partes necesitan ser templadas. El temple es la disipación controlada de calor a una velocidad específica para causar la transformación. Esta velocidad es determinada por los elementos aleantes que posee el material y el medio de enfriamiento.

Las fallas que pueden presentarse en los tratamientos térmicos de temple, se deben a un exceso o falta de temperatura de tratamiento o de velocidad de enfriamiento.

Cuando se utiliza un medio de enfriamiento de poca capacidad de disipación térmica, o se tarda un tiempo excesivo en introducir la pieza en el baño de temple obtendremos un comienzo de nucleación de estructura estable (con difusión) en los bordes de grano de la fase anterior que son los sitios de comienzo de recristalización. El resto del material será martensítico. Cuando la temperatura de calentamiento es insuficiente, quedan restos de material sin recristalizar, y no puede generarse la estructura martensítica total.

Otra causa de falla en los tratamientos térmicos de temple es el exceso de temperatura en el calentamiento. Se denomina hipertemple y la estructura obtenida es una martensita sumamente gruesa. En efecto, el exceso de temperatura durante la Austenización del material origina un tamaño de grano austenítico muy grande que al templar a su vez da por resultado una martensita muy basta. La estructura obtenida es una estructura muy dura y frágil que no se corrige con el revenido posterior. Para regenerar la estructura se impone un nuevo tratamiento de temple a temperatura de calentamiento correcta. El efecto de crecimiento del grano austenístico mencionado se observa también al mantener las piezas un tiempo excesivamente largo a la temperatura de austenización.

En aceros con elementos de aleación cuando efectuamos un hipertemple, producimos además de martensita gruesa, una cierta cantidad de austenita retenida. Esta se manifiesta en la presencia de un fondo blanco entre las gruesas agujas de martensita en la porción exterior de la pieza. Como la austenita es más blanda que la martensita se puede detectar fácilmente comparando la dureza periférica con la del material

subyacente. La austenita retenida es inestable y tiende a transformarse bajo las condiciones a que se somete la pieza en servicio. Esta transformación puede originar tensiones, deformaciones y fisuras. Para eliminar esta falla debemos tener en cuenta la causa de su formación. Si se formó exclusivamente por un hipertemple en un medio de severidad de temple muy elevada, puede eliminarse en parte en el proceso de revenido posterior. Pero si su causa radica en la de gran cantidad de elementos de aleación, éstos hacen descender los puntos críticos del acero, desplazando la temperatura necesaria del baño de enfriamiento a valores por debajo de la temperatura ambiente. En este caso, nuestro tratamiento ha sido incompleto y para terminar la reacción debemos bajar la temperatura de la aleación a valores alrededor de -20 a -80° C. Este enfriamiento adicional se llama tratamiento subcero y debe efectuarse inmediatamente después del temple, pues de lo contrario la austenita remanente se estabilizará y no será posible eliminarla.

Para conseguir la transformación de austenita a martensita, la temperatura de austenización debe ser eliminada de las partes. El diagrama TTT de cada tipo de material mostrará el punto hasta el cual el material deberá ser templado como parte del proceso de transformación. El tiempo para éste proceso es importante y debe ser controlado para alcanzar la transformación. En otras palabras, el éxito de la transformación es el resultado de un enfriamiento controlado del metal y tendrá gran influencia en la calidad y cantidad de martensita final.

Se puede enfriar el metal, desde altas temperaturas usando agua, aceite o aire para disipar el calor y causar que se produzca la transformación. El agua es el método de

temple más rápido. A menudo se añade sal al agua para obtener un agua salada. El agua salada ayuda a la superficie de la pieza recubriéndola durante el temple. El aceite es más usado porque tiene una viscosidad más alta y proporciona un tratamiento térmico más seguro porque enfría el metal más despacio que el agua. El aire es el medio más lento, pero nos da la mejor seguridad disminuyendo el choque térmico que se produce en los aceros. También disminuye las tensiones internas inherentes en todos los metales templados. Las partes templadas en agua y aceite, si no son hechas en un ambiente de atmósfera controlada, requerirán un considerable esmerilado para quitar la superficie descarburizada. El temple al aire puede estar protegido, requiriendo solo un mínimo esmerilado para recobrar una superficie limpia. El proceso de temple debería continuar hasta que las partes alcancen temperaturas menores de 150° F (66° C) o cualquier temperatura entre 70 – 150° F (21 – 66° C). Si el proceso de tratamiento térmico fue hecho siguiendo las instrucciones y el horno fue calibrado para dar temperaturas adecuadas, el acero siempre resultará con la dureza deseada. Si la pieza no tiene la dureza adecuada, es que el proceso de tratamiento térmico fue hecho incorrectamente.

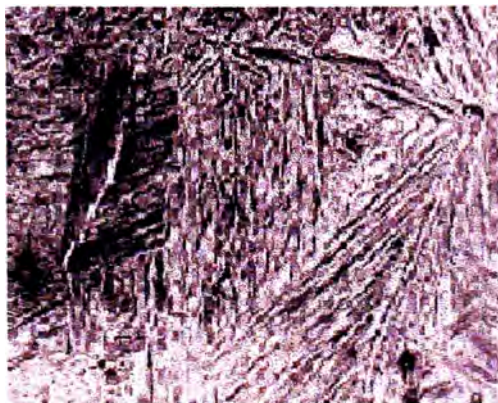


Figura 3.3 – Microestructura acicular de la martensita

Es erróneo aplicar un tratamiento criogénico directamente desde un templado. El riesgo de conseguir un choque térmico al practicar un tratamiento criogénico en aceros no revenidos es muy alto. Es más seguro, recomendable y siempre apropiado realizar el revenido inmediatamente después del temple y antes de realizar cualquier tratamiento criogénico, seguido otra vez de un segundo revenido.

El proceso de tratamiento criogénico continúa el proceso de tratamiento térmico y ayuda a obtener una estructura 100% martensítica. Este es el propósito de este informe. Pero antes de entrar al tema del tratamiento criogénico, debemos entender un proceso más, el revenido. El Revenido es muy importante para un buen tratamiento térmico y para el proceso de tratamiento criogénico.

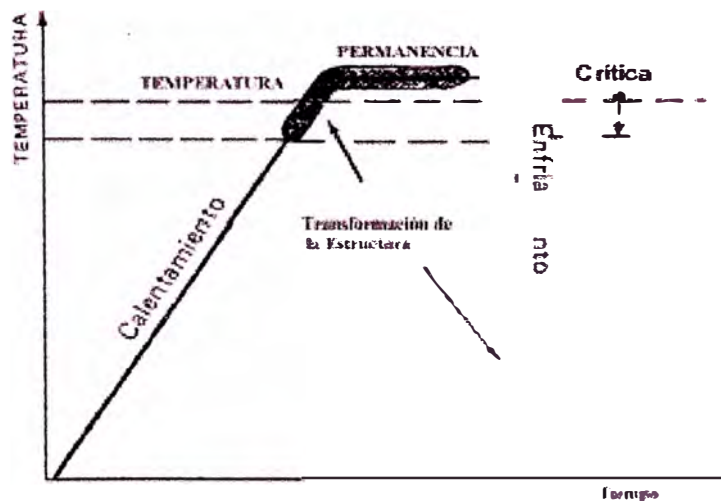


Figura 3.4 – Ciclo térmico usado en un Tratamiento Térmico de temple.

3.4 Tratamiento Térmico de Revenido

El revenido es un proceso de calentamiento del acero templado, a una temperatura por debajo de la temperatura crítica, seguido de un enfriamiento a una velocidad

conveniente. El objetivo del revenido es aliviar las tensiones internas de temple, así como llevar la pieza a una estructura que presente mayor resistencia al impacto, sacrificando algo la dureza alcanzada en el temple. Si en el acero endurecido está presente austenita retenida, el revenido servirá para producir una descomposición isotérmica de la austenita a bainita.

El revenido debe realizarse inmediatamente después del temple. El horno de revenido debe ser precalentado hasta una apropiada temperatura de revenido, después de esto las partes deben ser puestas en el horno.

Recordemos que nunca debemos sobre-revenir una pieza de acero. Existe una pequeña diferencia si la parte es revenida 6 horas o 6 días. En general, se puede decir que dentro del amplio intervalo de temperaturas de revenido, a medida que aumenta la temperatura disminuye la dureza y aumenta la tenacidad del acero.

Se pueden separar las temperaturas de revenido en varios intervalos:

Una temperatura de revenido comprendida entre 35 y 200° C induce la precipitación de un carburo de transición ϵ (Fe_2C), lo que produce un pequeño aumento en la dureza, particularmente en aceros de alto carbono.

En el intervalo entre 200 y 400° C continúa la precipitación y el crecimiento del carburo de transición, a la vez que se transforma la austenita retenida, que pudiera existir en la estructura, a bainita inferior. Los carburos que se forman, debido a su

tamaño pequeño, no son reconocibles por medio del microscopio óptico, pero dan a la estructura atacada con el reactivo de nital un color oscuro muy intenso. Si se le observa a 9.000 aumentos (microscopio electrónico), el carburo precipitado se ve claramente. Parte de los carburos han precipitado en los bordes de las agujas de martensita originales.

El revenido entre 400 y 650° C se caracteriza por la transformación del carburo de transición a cementita, al mismo tiempo que continúa el crecimiento de los carburos. Esta aglomeración de las partículas de carburo permite observar la matriz ferrítica más limpia, por lo que las estructuras atacadas tienen un color más claro. Esta estructura se conocía antiguamente como sorbita y los carburos pueden ser reconocibles a la observación microscópica a 500 aumentos.

Si se eleva la temperatura de revenido aún más, en el intervalo entre 650 y 725° C, se produce la formación de partículas grandes de cementita globular. Esta estructura es muy blanda y tenaz y es similar a la estructura formada por cementita esferoidal, obtenida directamente a partir de la perlita durante un recocido de globulización.

Después de que la parte es templada desde la temperatura de austenización, por debajo de 150° F (66° C), debemos revenir la pieza, usando la temperatura fijada para alcanzar la dureza Rc final.

A veces es conveniente hacer 2 veces o incluso 3 veces el revenido para incrementar su resistencia al desgaste refinando su estructura de grano. También existe un

segundo endurecimiento que se da en algunos aceros de alta aleación. Si se duplica o triplica el revenido de un metal es muy importante que la pieza sea mantenida a la temperatura ambiente al menos 15 minutos antes del segundo o tercer revenido.

Después que se ha mantenido la pieza a la temperatura ambiente, se debe bajar la temperatura del horno 25 a 35° F (14 – 20° C) de la temperatura original y proceder con el segundo revenido. El revenido a la misma temperatura nuevamente tiene un pequeño efecto en la estructura de grano. Los 25° F (14° C) de diferencia causan el cambio óptimo y aseguran que el nivel de dureza se mantenga.

La posibilidad de que el proceso de doble revenido se realice en todos los tipos de aceros de herramienta en parte depende de la composición química del acero. Sin embargo, debe notarse que un segundo o tercer revenido puede ayudar a casi todos los aceros, refina la estructura de grano y ayudará a incrementar la resistencia al desgaste por medio de la eliminación de esfuerzos. También estabiliza la martensita formada y elimina la fragilidad – se debe recordar que cada revenido causa una transformación adicional en una cantidad menor que es inestable.

En un acero que ha sido endurecido 2 veces el temple inicial es suficiente para crear un alto porcentaje de transformación. Pero debido a que estos aceros son altamente aleados, hay una dificultad para que todos los carburos se precipiten y se transformen completamente. El segundo revenido aumenta la temperatura por encima del punto de transformación de grano de la martensita y cuando se enfría causa que este proceso de transformación secundario continúe. Con esto se necesita el tercer

revenido para estabilizar la martensita recién formada que se encuentra en la cantidad suficiente para ser tratada.

Si se quiere realizar un tratamiento criogénico durante este ciclo, muchos productores de acero recomiendan tratar criogénicamente entre el primer revenido y el segundo revenido, para causar una mejor transformación. No hay nada malo en realizar el segundo revenido, pero después de tratar criogénicamente el metal, la austenita ha sido transformada y el endurecimiento secundario es un proceso inútil. Es más recomendable, templar las partes y realizar el primer revenido para fijar el nivel de dureza. Una vez que la parte retorne a la temperatura de ambiente, realizar el segundo revenido para completar el segundo endurecimiento. Enfriar hasta la temperatura de ambiente y recién realizar el tratamiento criogénico. Después de la transformación criogénica sin austenita retenida en la estructura, todo lo que es necesario es un simple revenido a 300° F (149° C) o 350° F (177° C) para estabilizar cualquier martensita formada.

Si el metal ha sido tratado criogénicamente en forma adecuada, no hay o hay poca Austenita retenida en la estructura; entonces las altas temperaturas de revenido usadas para continuar el proceso de transformación no tienen efecto porque no hay nada que afectar. El único requerimiento e interés es arreglar o estabilizar la martensita formada.

La temperatura fijada de revenido después del tratamiento criogénico es 300° F (149° C). Esta temperatura puede ser modificada en algunos grados. Se usa 300° F (149° C)

porque es todo lo que se necesita para estabilizar la martensita. La martensita se estabilizará a 260° F (127° C), y yendo hasta 300° F (149° C), se asegura que el proceso haya sido efectivo. No se quiere causar un cambio en la dureza del metal. Esto pasaría si se usa una temperatura de revenido más alta que el primer revenido. Literalmente se estaría desperdiciando el primer revenido, reemplazando su efecto y causando una pérdida de dureza; solo se está realizando el revenido para estabilizar la martensita formada.

3.5 Problemas en los tratamientos térmicos

3.5.1 Austenita Retenida en la Transformación Martensítica

Lo que nos interesa en este informe es describir la transformación de la estructura de austenita en estructura de martensita. Hay muchas otras transformaciones que ocurren en el tratamiento térmico aparte de estas 2 estructuras, pero éstas son las más importantes para entender el tratamiento criogénico.

Cada acero tiene una temperatura M_s en la que se inicia la transformación de la austenita en martensita, el porcentaje de martensita que se transforma aumenta al descender la temperatura del acero hasta llegar a una temperatura M_f en la que se ha transformado ya el 100% y corresponde por lo tanto al fin de la transformación.

En general todos los elementos de aleación hacen descender M_s siendo el carbono el que más influencia tiene, es decir, a mayor % de carbono disminuye el M_s .

Las temperaturas M_s y M_f se modifican al variar la temperatura de austenización; al aumentar la temperatura de calentamiento descienden las temperaturas M_s y M_f aumentando en esos casos la cantidad de austenita retenida que aparece normalmente en los aceros de rápido enfriamiento. La temperatura M_f suele ser en general de 150° a 300° inferior a la temperatura M_s de cada acero.

Entonces en algunos aceros dependiendo de los factores antes mencionados, la transformación de la austenita en martensita no termina sino hasta por debajo de la temperatura ambiental, es por esto que queda austenita retenida en los aceros templados

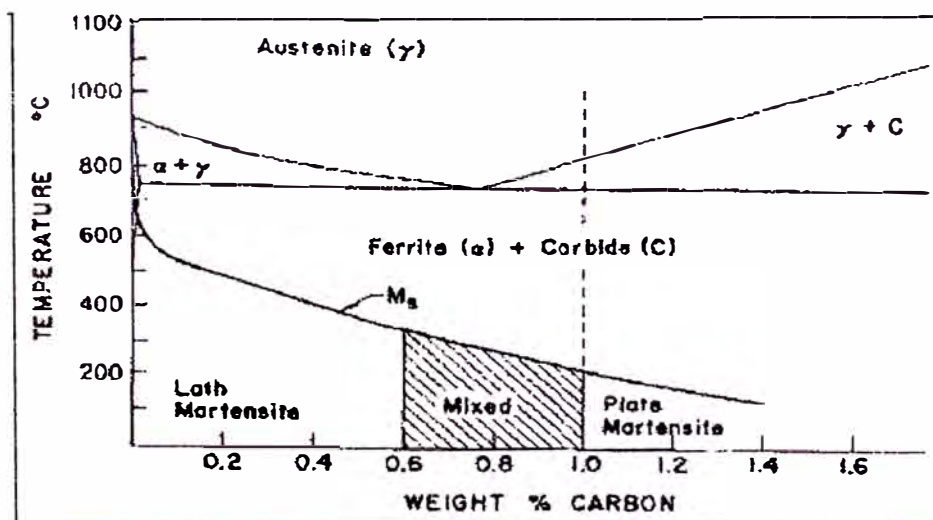


Figura 3.5 – Efecto del contenido de carbono en la temperatura M_s .

En general todos los elementos de aleación hacen descender M_s siendo el carbono el que más influencia tiene, es decir, a mayor % de carbono disminuye el M_s .

Las temperaturas M_s y M_f se modifican al variar la temperatura de austenización; al aumentar la temperatura de calentamiento descienden las temperaturas M_s y M_f aumentando en esos casos la cantidad de austenita retenida que aparece normalmente en los aceros de rápido enfriamiento. La temperatura M_f suele ser en general de 150° a 300° inferior a la temperatura M_s de cada acero.

Entonces en algunos aceros dependiendo de los factores antes mencionados, la transformación de la austenita en martensita no termina sino hasta por debajo de la temperatura ambiental, es por esto que queda austenita retenida en los aceros templados

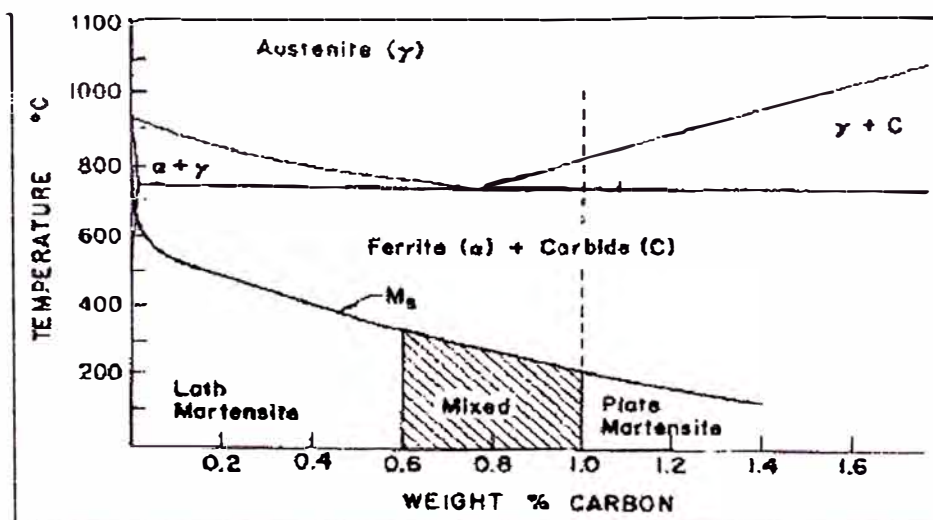


Figura 3.5 – Efecto del contenido de carbono en la temperatura M_s .

La austenita residual aparece junto a los cristales de martensita en la microestructura de los aceros templados debido a que el acero es de alta aleación o por haberse empleado una temperatura de temple muy elevada.

La cantidad de austenita residual que aparece en los aceros templados depende de diversos factores como la composición, temperatura de austenización, medio de enfriamiento, etc. En la figura 3.6 se puede ver la influencia del porcentaje de carbono en la cantidad de austenita residual que queda después del temple.

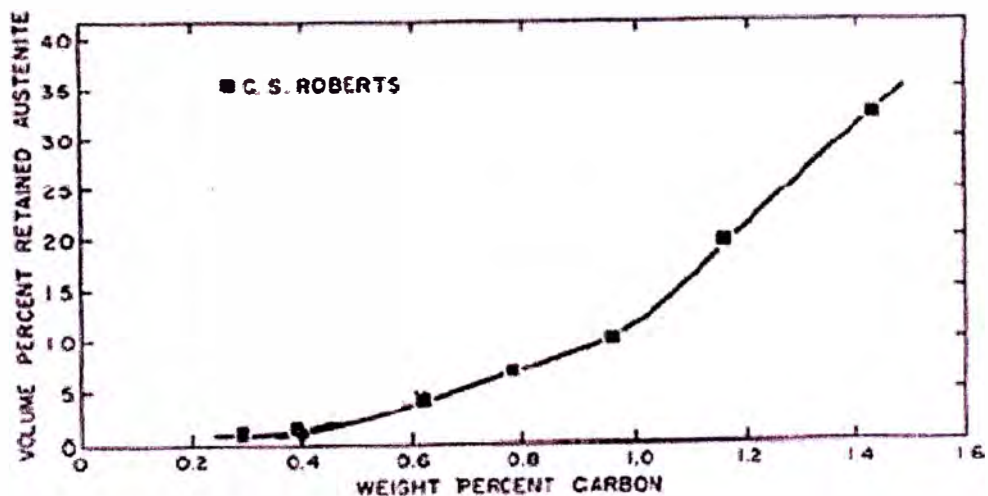


Figura 3.6 – Austenita residual en función del contenido en carbono de la austenita de los aceros al carbono.

En el temple de los diversos aceros el porcentaje de austenita residual suele variar entre los siguientes límites:

Aceros de 1% de carbono y 5% de cromo	25 a 35%
Aceros de 1,5% de carbono y 12% de cromo	15 a 30%

Aceros rápidos	15 a 25%
Aceros de herramientas de baja aleación	3 a 15%
Aceros al carbono	5 al 10%

El tratamiento criogénico corregirá este tipo de errores y reestructurará el metal. Con esto no se quiere dar la idea de que el tratamiento criogénico significa ocultar los errores del tratamiento térmico. Lo que se quiere es recordar que el tratamiento criogénico puede ayudar mucho en este aspecto.

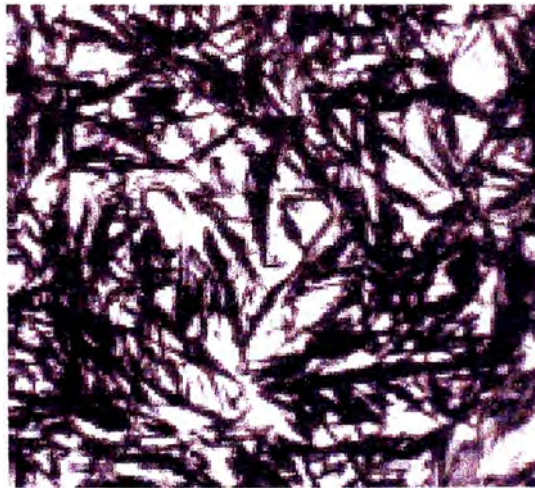


Figura 3.7 – Austenita retenida (blanca) atrapada entre las agujas de martensita(negra)(x1000) – Acero D2

3.5.2 Decarburización

Decarburización es la pérdida de carbono de la superficie de un metal. La profundidad de la decarburización es afectada cuando la temperatura y el tiempo de exposición se incrementan.

Cualquier metal ferroso expuesto a temperaturas superiores de 1000° F (538° C) será sujeto de decarburización a menos que el material se proteja en el calentamiento mediante algún procedimiento como por ejemplo mediante la utilización de una atmósfera protectora.

Para dar un buen entendimiento de los efectos de la temperatura en la superficie del metal, cualquier metal ferroso calentado por sobre 400° F (204° C) exhibirá en la superficie un color paja (amarillo claro) en el enfriamiento. Esto es una capa de óxido y es causada por la exposición de los elementos a nuestra atmósfera.

A temperaturas por encima de 600° F (316° C), los metales ferrosos se vuelven azules, llegando hasta un morado fuerte mientras la temperatura se incrementa. En realidad la decarburización o pérdida de carbono empieza en muy pequeñas cantidades por encima de 950° F (510° C), pero llega a ser más significativa cuando se alcanza la temperatura de 1000° F (538° C) o más, y empeora mientras la temperatura se incrementa. Es por eso que cuando las temperaturas superan los 1000° F (538° C), el metal debe ser protegido de la decarburización por uno de los métodos utilizados para evitar que el aire alcance la superficie calentada. Algunos de estos métodos incluyen el uso de chapas de acero inoxidable, gas de protección, etc. También hay pinturas de protección, o la superficie puede ser esmerilado para remover físicamente esta superficie inútil (inútil en el sentido de que el metal ferroso que ha perdido su carbono no puede retener o conseguir su dureza completa.)

En estado austenítico el acero es permeable a la penetración y salida de carbono. Es por eso que debe cuidarse la hermeticidad de los hornos de tratamiento puesto que el oxígeno ávido de carbono, descarbura los materiales cuanto mayor sea el contenido en carbono de la pieza. Esto origina un material más blando en la periferia. La descarburación se hace notar como una falla muy grave en los tratamientos de temple puesto que por debajo de cierto contenido de carbono los aceros no son templables.

CAPITULO IV

MÉTODOS PARA AUMENTAR LA RESISTENCIA AL DESGASTE

La forma más efectiva de disminuir la fricción es mediante una lubricación adecuada, pero existen procesos productivos donde es imposible que exista lubricación debido a las condiciones de producción. Además de la lubricación existen otras formas de reducir la fricción como por ejemplo:

- Aumentando la dureza del metal por temple, carburado o nitrurado, por impregnación de silicio o reforzando por recargue duro las partes resistentes al desgaste.
- Aumentando la resistencia a la compresión. Puede citarse como ejemplo el sinterizado de carburos, estos poseen excepcional dureza además de resistencia a la compresión, de aquí su alta resistencia al desgaste.
- Mejorando el acabado de la superficie, que es una condición esencial.

A continuación se detallan los métodos más usados para aumentar la resistencia al desgaste.

4.1 Endurecimiento Superficial

El endurecimiento superficial es un proceso que incluye una gran variedad de técnicas usadas para mejorar la resistencia al desgaste de las piezas sin afectar el interior. La combinación de una superficie dura y resistente es útil en piezas como levas o engranajes que deben tener una superficie muy dura para resistir el desgaste, y también un interior duro para resistir el impacto que ocurre durante el funcionamiento.

Básicamente existen 2 tipos de endurecimiento superficial:

- Tratamiento termoquímicos (Difusión Termoquímica: Carburización, etc.)
- Temple Superficial (Endurecimiento por flama, inducción, etc.)

4.1.1 Tratamientos Termoquímicos

Los tratamientos termoquímicos consisten en introducir en la capa exterior de las piezas algún elemento adicional para darle propiedades específicas, quiere decir que se modifica la composición química de la superficie adicionando carbono, nitrógeno o boro mediante el proceso de difusión. Se aplican

generalmente a los aceros. En la mayoría de los casos se adquiere un aumento de la resistencia a la abrasión sin perder la tenacidad del núcleo.

Estos procesos se aplican comúnmente a las partes de acero de bajo carbono para lograr una corteza exterior dura, resistente al desgaste reteniendo un corazón tenaz interno.

4.1.1.1 Cementación

Es el tratamiento de endurecimiento superficial más común. Consiste en el endurecimiento de la superficie externa del acero de bajo carbono, quedando el núcleo blando y dúctil. Como el carbono es el que genera la dureza en los aceros, en el método de cementado se tiene la posibilidad de aumentar la cantidad de carbono en los aceros de bajo contenido de carbono antes de ser endurecido. El carbono se agrega al calentar el acero a su temperatura crítica mientras se encuentra en contacto con un material carbonoso. Las temperaturas típicas de cementación se encuentran en la escala de 1600° a 1700° F (875 A 925° C), es decir, con el acero en estado Austenítico y el hierro en forma de hierro Gamma, que es cuando tiene mayor capacidad de disolución de carbono.

La cementación seguida de un temple produce un endurecimiento de la superficie alrededor de HRC = 60. La estructura correcta de una pieza de

acero cementada y enfriada lentamente desde la periferia hacia el interior es perlita, perlita con ferrita, y ferrita con pequeñas zonas de perlita. Después del tratamiento correcto de temple y revenido tenemos en la capa periférica martensita revenida y en el núcleo una estructura mixta de ferrita, bainita y martensita. La cantidad relativa de cada uno de estos constituyentes depende de la composición del acero y de la temperatura de temple utilizada.

Los métodos de cementado varían de acuerdo al medio que suministra el carbono. Los tres métodos de cementación más comunes son: cementado en caja, cementado gaseoso, cementado líquido. Algunas aplicaciones son: Piñones, coronas, ejes, levas, guías, chavetas, columnas, etc.

4.1.1.1 Cementado en caja

Consiste en el uso de carbón vegetal o coque mezclados con Carbonatos Alcalinos como Carbonatos de Bario, Calcio y Sodio, que se empacan en un recipiente cerrado junto con las piezas, este proceso produce una capa relativamente gruesa en la superficie de la pieza de entre 0.025 y 0.150 pulg. La duración de este proceso es de 6 a 10 horas.

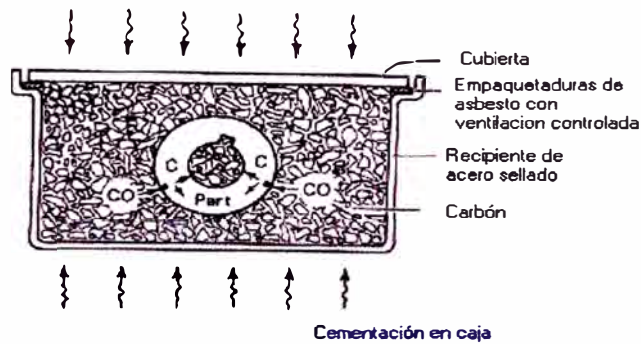


Figura 4.1 – Cementado en caja

4.1.1.1.2 Cementado gaseoso

La cementación con gases se efectúa colocando las piezas en una atmósfera carburante a las temperaturas de cementación, es decir, entre 850° C y 950° C. La atmósfera carburante está formada por una mezcla de gas activo y gas portador. El gas activo es generalmente metano, aunque puede utilizarse también Propano y butano. El gas portador es una mezcla de óxido de Carbono, hidrógeno y nitrógeno, con pequeños porcentajes de vapor de agua, anhídrido carbónico, etc. El espesor de la capa de este tratamiento es delgado, fluctuando entre 0.005 y 0.030 pulg. La duración de este proceso es de 1 hora aproximadamente.

4.1.1.1.3 Cementado líquido

Los baños de sales fundidas se utilizan mucho para cementación de piezas pequeñas, pues este procedimiento resulta más rápido y sencillo que la cementación con materias sólidas.

Emplea un baño de sal fundida que contiene Cianuro de sodio (NaCN), Cloruro de Bario (BaCl₂) y otros componentes para difundir el carbono dentro del acero, el espesor de capa de este tratamiento es un promedio de los 2 anteriores procesos. La duración de este proceso es de 1 a 6 horas.

4.1.1.2 Nitruración

La nitruración es un tratamiento termoquímico que consiste en la adición de nitrógeno atómico a la superficie, a temperaturas dentro del rango ferrítico (alrededor de los 510° C) y consecuentemente sin transformaciones de fase en el material base.

Para una mayor efectividad, el acero debe contener ciertos elementos aleantes tales como el aluminio (0.85 a 1.5%) o Cromo (5% o más). Estos elementos forman nitruros que precipitan como partículas muy finas en la superficie del acero endurecido. Los métodos de nitruración incluyen la nitruración gaseosa, en la cual las partes de acero se calientan en una atmósfera de amoníaco (u otra mezcla rica en nitrógeno), y nitruración líquida en la cual las partes se sumergen en baños de sales fundidas de cianuro. El espesor va desde 0.001 pulg. hasta cerca de 0.020 pulg., con durezas hasta de HRC 70.

Dicho tratamiento es especialmente aplicado en aceros y fundiciones con el objeto de aumentar la dureza superficial, la resistencia al desgaste, mejorar la vida a fatiga y la resistencia a corrosión (esto en ciertos casos).

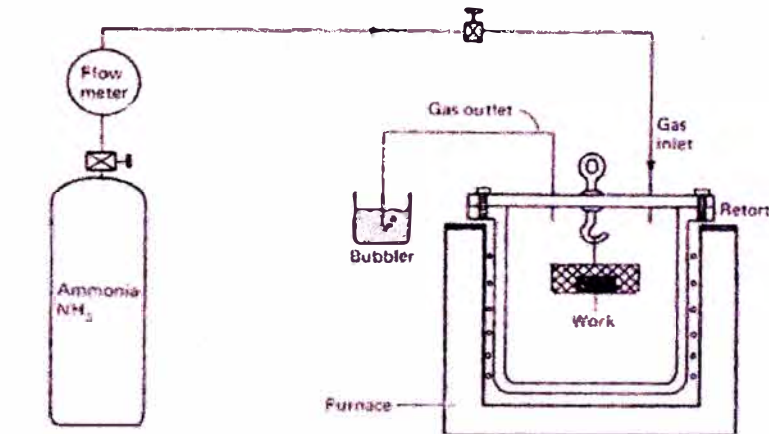


Figura 4.2 – Típica instalación para realizar la Nitruración

4.1.1.3 Carbonitruración

Cuando además de carbono se introduce también nitrógeno, éste forma nitruros sumamente duros que aumentan la resistencia a la abrasión pero producen capas de menor espesor. El proceso se llama carbonitruración cuando se hace en fase gaseosa o cianuración en fase líquida. Normalmente se realiza en un horno que contiene carbono y amoníaco (NH_3). El espesor de la capa fluctúa entre 0.003 y 0.020 pulg. La temperatura a la cual se realiza la Carbonitruración es próxima a 850°C . Una de las ventajas de este proceso es que un acero carbonitrurado templea más fácilmente que un acero cementado. La dureza de la capa periférica que suele variar de 60 – 65 Rockwell C depende del contenido

de carbono, del nitrógeno y de la cantidad de Austenita retenida que quede en el acero.

4.1.1.4 Sulfinización

Es un tratamiento que mejora extraordinariamente la resistencia al desgaste de las piezas de acero, por la acción del azufre que se incorpora a la masa metálica por calentamiento a baja temperatura (565° C) de las piezas en un baño de sales. Se absorbe C, N₂, y S. No aumenta la dureza, pero se emplea para aumentar la resistencia al desgaste. Es un caso particular ya que si bien no se obtiene una gran dureza superficial, se produce un gran aumento de la resistencia al desgaste.

Se suele usar un baño formado por dos sales: una de bajo punto de fusión constituida por carbonato sódico con cianuro sódico y con cloruro potásico; otra es una sal portadora del azufre constituida por cloruro potásico con cianuro sódico y sulfito sódico.

4.1.1.5 Cromización y Borización

Estos dos tratamientos adicionales de endurecimiento superficial difunden cromo y boro, respectivamente, en el acero para producir capas que tienen un espesor típico de solamente 0.001 a 0.002 pulg. El Cromizado requiere temperaturas más altas y tiempos más largos de

tratamiento que los tratamientos anteriores, pero la capa no solamente es dura y resistente al desgaste sino también resistente a la corrosión. Se empaacan las partes de acero con polvos o gránulos ricos en cromo.

El Borizado se lleva a cabo en aceros de herramienta, aleaciones basadas en Níquel y Cobalto y fundiciones de Hierro además de aceros al Carbono.

4.1.2 Temple superficial

Este método calienta solamente la superficie del trabajo o áreas limitadas de la superficie de trabajo. Se diferencian de los Tratamientos termoquímicos ya que estos no producen cambios químicos en la superficie. Aquí los tratamientos son exclusivamente térmicos. Existen varios tipos de temples superficiales, entre los cuales tenemos:

4.1.2.1 Endurecimiento por flama

Este método consiste en el calentamiento de la pieza de trabajo por medio de uno o más sopletes mediante una llama oxiacetilénica, seguido de un enfriamiento o temple rápido. Para conseguir que las capas duras queden bien adheridas al resto del material y para evitar posibles desconchamientos superficiales, debido a una transición demasiado brusca de las zonas duras a las blandas, conviene que el contenido en

carbono de los aceros esté comprendido entre 0.30 a 0.60% de C, así pues este procedimiento se aplica en aceros al carbono y aleados, en aceros de herramienta y fundiciones de hierro. Los combustibles incluyen el acetileno (C_2H_2), el propano (C_3H_5) y otros gases.

El endurecimiento por flama es una operación manual que no posee un control de temperatura, ni ciclos precisos de tiempo. Es un proceso rápido y versátil que se presta para producciones altas y para componentes grandes tales como engranajes que exceden la capacidad de los hornos. Con un control adecuado se endurecen solamente las superficies externas sin afectar las partes internas. La profundidad típica del endurecimiento es del orden de 0.10 pulg.

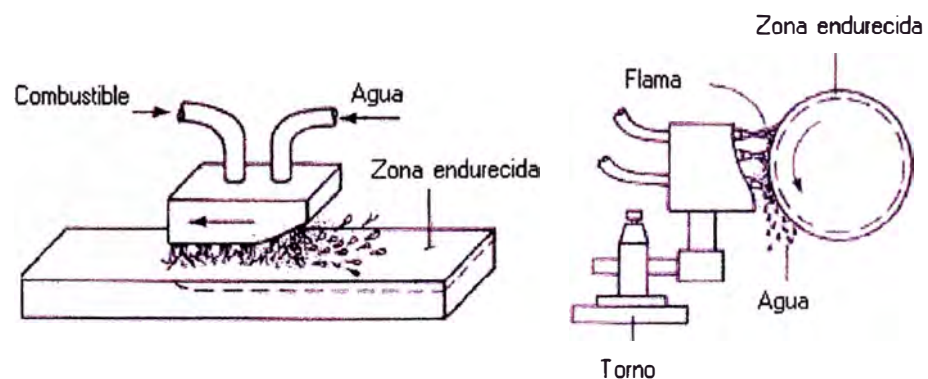


Figura 4.3 – Endurecimiento por flama

4.1.2.2 Endurecimiento por Inducción

Este método involucra la aplicación de energía generada electromagnéticamente por medio de una bobina de inducción conductora de electricidad en una parte de trabajo. El calentamiento por

inducción es un método ampliamente usado en la industria para procesos de soldadura fuerte, soldadura blanda y curado (o vulcanizado) de adhesivos, así como en varios tratamientos térmicos.

Cuando se usa para endurecimiento de aceros, el paso siguiente es un temple en agua o aceite. La bobina inductora del calentamiento conduce una corriente alterna de alta frecuencia que induce una corriente en la parte interna de la bobina para efectuar el calentamiento. El proceso puede calentar la superficie, una parte de la superficie o la masa entera de la pieza. Los tiempos del ciclo de calentamiento son cortos pudiéndose realizar en muy pocos segundos, en consecuencia el proceso es usado para producciones medias o altas.

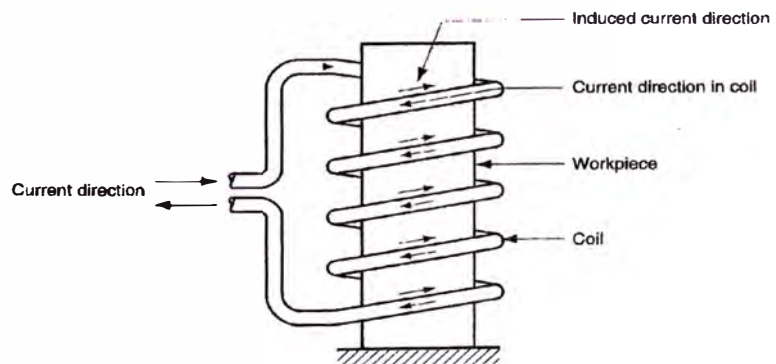


Figura 4.4 – Endurecimiento por inducción

4.1.2.3 Endurecimiento por haz de electrones

La tecnología del haz de electrones (HE) en la manufactura es relativamente nueva, sus aplicaciones incluyen el corte, la soldadura y el

tratamiento térmico. El tratamiento térmico HE implica el endurecimiento de las superficies localizadas del acero. El haz de electrones se genera en un cañón que se enfoca sobre una pequeña área y el resultado es una acumulación rápida de calor. Las temperaturas de Austenización se pueden lograr muchas veces en menos de un segundo. Cuando cesa el bombardeo de electrones, el área caliente se templea y endurece inmediatamente por transferencia de calor al metal circundante.

4.1.2.4 Endurecimiento por Rayo Láser

El láser es otra tecnología nueva cuyas aplicaciones incluyen corte, soldadura, medición e inspección y tratamiento térmico. En el endurecimiento del acero por rayo láser (RL), se enfoca un rayo de luz coherente de alta densidad en una pequeña área, se mueve generalmente a lo largo de una ruta definida sobre la superficie de trabajo. Esto causa calentamiento del acero dentro de la región austenita. Cuando el rayo se mueve de lugar, el área se templea inmediatamente por transferencia de calor al metal circundante. La ventaja del calentamiento por RL sobre el HE es que los rayos láser no requieren de vacío para lograr mejores resultados. Los niveles de densidad de energía en el calentamiento con HE y RL son más bajos que en el corte o la soldadura.

4.2 Endurecimiento por Precipitación

El endurecimiento por precipitación involucra la formación de finas partículas (precipitados) que actúan para bloquear el movimiento de las dislocaciones y hacer más resistente y duro al metal. Es el principal tratamiento térmico para hacer resistentes las aleaciones de aluminio, cobre, magnesio, níquel y otros metales no ferrosos. Los tratamientos de endurecimiento por precipitación se utilizan también para hacer resistentes numerosos aceros de aleación que no forman martensita por los métodos usuales.

La condición necesaria que determina si un sistema de aleación puede ser endurecido por precipitación es la presencia de una línea solvus, como se puede apreciar en los diagramas de fase. En este sistema, una composición que se puede endurecer por precipitación es aquella que contiene dos fases a temperatura ambiente, pero que se puede calentar a una temperatura tal que se disuelva la segunda fase.

El proceso de tratamiento térmico consiste en tres pasos: *(1) tratamiento de la solución*, en la cual se calienta la aleación a la temperatura T_s arriba de la línea solvus dentro de la región de la fase alfa y se sostiene por un periodo suficiente para disolver la fase beta, *(2) templado a temperatura ambiente* para crear una solución sólida sobresaturada y *(3) tratamiento por precipitación*, en la cual se calienta la aleación a una temperatura T_p debajo de T_s , para provocar la precipitación de partículas finas de la fase beta. Este tercer paso se llama envejecimiento. Este proceso puede ocurrir en algunas aleaciones a temperatura ambiente.

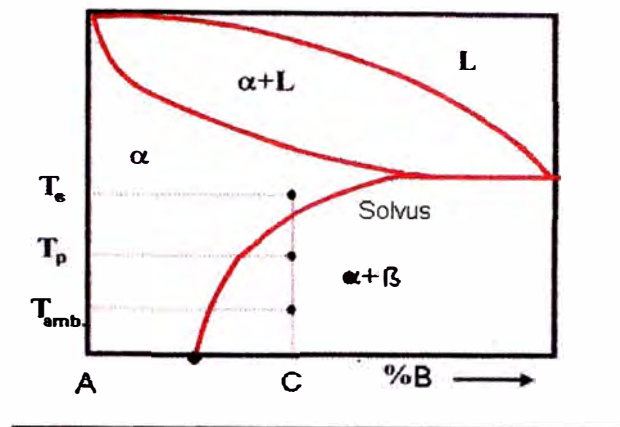


Figura 4.5 – Diagrama de fase de un sistema de aleación que puede endurecerse por precipitación

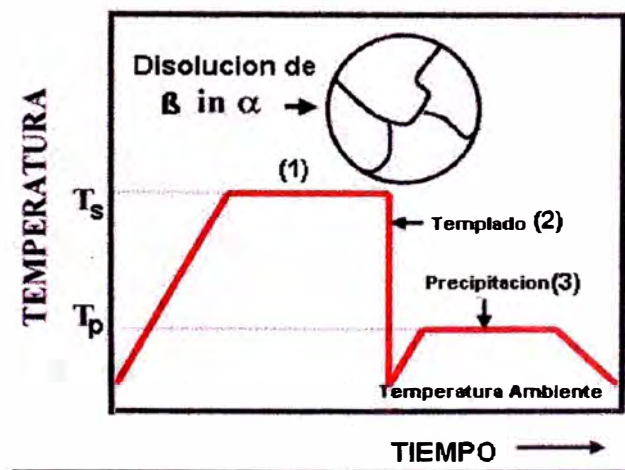


Figura 4.6 – Tratamiento térmico mostrando el tratamiento por precipitación (3)

Durante el paso de envejecimiento se logra una alta resistencia y dureza en la aleación. La combinación de tiempo y temperatura en el proceso de precipitación es crítica para lograr las propiedades deseadas de aleación.

CAPITULO V

TENSIONES INTERNAS EN LOS MATERIALES

Las tensiones que quedan en los metales después de una deformación en frío o un enfriamiento rápido se llaman tensiones residuales o internas. Las tensiones residuales son una de las tres características fundamentales que determinan el comportamiento de un metal en servicio y son tan importantes como las otras dos – composición química y microestructura.

En los metales tratados térmicamente, pueden producirse tensiones residuales muy elevadas que pueden quedar ocultas temporalmente y dar lugar a la rotura súbita de secciones en el acero. Para un mejor alcance de la naturaleza del esfuerzo y lo que causa, primero necesitamos entender los diferentes orígenes de las tensiones internas.

5.1 Tensiones internas debidos al temple

Con el cambio de volumen se producen esfuerzos residuales. La superficie del acero templado se enfría rápidamente, transformándose en martensita que tiene un volumen

mayor que la austenita. Cuando posteriormente la austenita del centro se transforma, la superficie dura queda en tensión, mientras que el centro se comprime. Si los esfuerzos residuales exceden el límite elástico, en la superficie se forman grietas de templeado.

Las piezas tratadas térmicamente experimentan muchos esfuerzos inducidos en las fases. Si consideramos una barra de acero, calentada hasta 1500° F (816° C), y sumergida en agua que está a 70° F (21° C). El rápido enfriamiento reduce la temperatura de la superficie mientras que la parte central o núcleo está tratando de restablecer el calor a sus puntos convergentes de temperatura de enfriamiento. La barra, antes de ser templada ha sido mantenida a una temperatura de austenización (en solución). Durante la fase de solución, la estructura molecular está en un estado líquido libre dentro de la capa. Las moléculas son, en este punto, no magnéticas, libres para moverse alrededor de la forma, y sujetas a la deformación plástica. La deformación plástica puede causar distorsión si las piezas no están sostenidas adecuadamente, apoyadas o si son trasladadas inadecuadamente cuando son retiradas del horno. La distorsión es el resultado de la deformación plástica en la forma de hundimiento.

En la fase de enfriamiento (temple), mientras la barra es sumergida en agua, el calor se disipa pero no se disipa uniformemente. Esto hace que la superficie se contraiga, causando deformación plástica y creando distorsión. El núcleo en este punto está sometido bajo esfuerzos compresivos de carga. Mientras el interior se enfría y se aproxima a la temperatura de la superficie, la contracción del núcleo interior causa

esfuerzo compresivo en la superficie. El esfuerzo longitudinal en la superficie producido por este enfriamiento brusco es aproximadamente 30 000 Lb/pulg² en aceros y 15 000 Lb/pulg² en metales no ferrosos. Los medios alternativos de enfriamiento pueden reducir la disipación de calor y reducir los esfuerzos, añada a esto la complejidad de la forma de las piezas con diferentes secciones cuadradas, imperfecciones, agujeros o muescas. Si el ángulo de entrada de la pieza al agua no es el adecuado, la configuración de esfuerzos reflejará esto. Aparte de todo esto el metal ha perdido carbono de la superficie y se forma un descascaramiento debido a la acción del enfriamiento, las rajaduras se propagan debido al esfuerzo. Estos deben ser eliminados mediante esmerilado, que puede localizar temperaturas mayores de 3000° F (1649° C) en la superficie, creando una capa de esfuerzo de tensión.

También, durante el tratamiento térmico y el subsiguiente temple, la austenita ha sido transformada en martensita, que causa una expansión de las células de grano creando esfuerzos compresivos en el interior y esfuerzos de tensión en la superficie. Los esfuerzos de tensión en la superficie pueden alcanzar 80,000 Lb/pulg² para barras cilíndricas. Si la pieza no es revenida, los esfuerzos naturales pueden liberarse y causar que la pieza explote o simplemente se raje. Si es revenida, la martensita se hace estable y los esfuerzos se liberan ligeramente (sólo ligeramente), ya que ellos requieren una temperatura más alta (1100° F o 583° C) que la temperatura de revenido. Se formará algo de martensita nueva durante el revenido creando otra capa de esfuerzo.

Al aparecer martensita tienen, por lo tanto, que surgir tensiones en la estructura. Si a esto se añade que el material no es uniformemente martensítico, se producirán pues tensiones adicionales en la pieza. Este contenido irregular de martensita puede atribuirse a un temple incompleto hasta el núcleo de la pieza o bien a cantidades variables de austenita residual o troostita en la estructura martensítica.

La mejor forma de eliminar los esfuerzos del tratamiento térmico de los metales es usando el tratamiento criogénico. Uno de los efectos del enfriamiento criogénico es eliminar los esfuerzos residuales.

5.2 Tensiones internas debido a la deformación

Los esfuerzos residuales se desarrollan durante la deformación. Una pequeña parte del esfuerzo aplicado – quizás aproximadamente el 10% – queda almacenada en el interior de la estructura en forma de una intrincada red de dislocaciones. Los esfuerzos residuales incrementan la energía total de la estructura.

Los esfuerzos residuales no están uniformemente distribuidos en todo el metal deformado. Por ejemplo, puede haber altos esfuerzos residuales a la compresión en la superficie de una placa laminada, mientras que en su centro quedan almacenados esfuerzos de tensión elevados. Si se maquina una pequeña porción de metal superficial de una pieza trabajada en frío, se eliminará metal que sólo contiene esfuerzos residuales a la compresión. Para que el equilibrio se restablezca, la placa tendrá que distorsionarse.

Los esfuerzos residuales también afectan la capacidad de la pieza para soportar una carga. Si se aplica un esfuerzo de tensión a un material que ya tenga esfuerzos residuales a la tensión, el esfuerzo total actuando sobre la pieza es la suma de los esfuerzos aplicado y residual. Pero si están almacenados esfuerzos a la compresión en la superficie de una pieza metálica, un esfuerzo a la tensión aplicado primero deberá equilibrar los esfuerzos residuales a la compresión. Ahora la pieza pudiera ser capaz de soportar una carga mayor a la normal.

Los esfuerzos residuales de compresión pueden ser perjudiciales o benéficos. A veces, componentes sujetos a falla por fatiga pueden ser endurecidos mediante el granallado. Al bombardear la superficie con perdigones de acero lanzados a alta velocidad, se introducen en la superficie esfuerzos residuales de compresión, que incrementan la resistencia de ésta a las fallas por fatiga.

5.3 Efectos perjudiciales de las tensiones internas

Las tensiones residuales pueden desarrollarse intencionalmente en los metales con objeto de mejorar sus propiedades mecánicas. No obstante, si alcanzan valores excesivamente altos, pueden llegar a ser una amenaza oculta para la seguridad del metal. Son corrientes los fallos debidos al desconocimiento de la existencia de tensiones elevadas. Algunas veces, sólo un ligero defecto en la superficie, como por ejemplo una raya profunda, pueden romper el equilibrio inestable de las fuerzas internas y producir la rotura.

Las tensiones residuales que aparecen por enfriamiento no uniforme en los aceros de autotemple, producen alabeo o abarquillado de la pieza. Una ligera corriente de aire en la sala de tratamientos térmicos es suficiente para producir deformaciones.

La deformación excesiva del alambre de acero, en su última pasada en el trefilado, puede determinar un fenómeno de curvatura en el alambre e incluso su abertura a lo largo de las fibras. En los cables fabricados con alambres demasiado tenaces, las fibras pueden separarse fácilmente en los puntos en que el cable está sometido a fricción contra una superficie dura.

En las ruedas de hierro moldeadas en coquilla se desarrollan fuertes tensiones debido al rápido enfriamiento del hierro líquido en el molde frío y si no se someten a un recocido adecuado, se producirá la rotura. También se producen grietas cuando la línea de separación entre la fundición blanca y la gris en la zona endurecida es muy pronunciada, es decir, cuando no hay una capa intermedia con estructura atruchada.

Las tensiones residuales desarrolladas durante el temple en agua, de redondos de acero cementados, producen fisuras circulares cuando el cambio en el contenido de carbono de la zona superficial no es gradual.

También es universalmente reconocido el efecto acelerador de las tensiones residuales sobre la corrosión.

CAPITULO VI

TRATAMIENTO CRIOGÉNICO

6.1 Introducción al Tratamiento criogénico

La palabra "criogénia" se deriva de la palabra griega "kryos" que significa frío. La criogénia simplemente es la ciencia o estudio de materiales a bajas temperaturas.

El tratamiento criogénico de metales es un campo nuevo en la ingeniería. En los últimos años hemos visto el incremento del uso de la criogénia (como resultado de la industria Aeroespacial) para mejorar la durabilidad de varios metales.

6.2 Historia del Tratamiento Criogénico

La Criogénia empezó a fines de 1800 cuando el Señor James Dewar perfeccionó una técnica para comprimir y almacenar los gases de la atmósfera en líquidos. Estos gases comprimidos fueron súperenfriados y cualquier metal que entraba en contacto

con estas temperaturas extremadamente bajas mostraba algunos cambios en sus características.

Los experimentos con temperaturas criogénicas continuaron y a principios de la Segunda Guerra Mundial (1940), los científicos descubrieron que los materiales sujetos a las temperaturas extremadamente bajas mostraban un incremento en la resistencia al desgaste.

Alrededor de 1960, ingenieros aeroespaciales aplicaron los beneficios de las temperaturas criogénicas para aliviar los esfuerzos de las piezas. Poco después, el ejército usó el tratamiento criogénico en aviones. En los inicios de 1970, los científicos de las universidades y centros de investigación empezaron a documentar los resultados de los ensayos en la industria de herramientas así como otras aplicaciones. En 1980, el costo asociado a éste proceso disminuyó y la comercialización del proceso empezó.

6.3 Fundamentos del Tratamiento Criogénico

6.3.1 Visión general del Tratamiento Criogénico

El tratamiento térmico da al acero su dureza así como su resistencia al desgaste y ductilidad. Incluso realizándose adecuadamente, el tratamiento térmico no puede eliminar toda la austenita retenida de un acero. Un tratamiento térmico

apropiado es una parte importante para aumentar la tenacidad, la dureza, durabilidad y resistencia al desgaste de las piezas.

Los beneficios que ocurren como resultado del tratamiento térmico no tienen lugar durante el calentamiento, sino más bien en el proceso de enfriamiento desde altas temperaturas. Los beneficios del temple no terminan a temperatura ambiente, muchas aleaciones continuarán mostrando mejoras significativas si el temple se prolonga más allá del nivel subcero, acercándose al cero absoluto. Ya que es imposible llegar a -460°F (un estado de movimiento molecular cero que elimina toda la tensión), las temperaturas criogénicas profundas son muy eficaces para aumentar la estabilidad dimensional y la resistencia al desgaste de la mayoría de las aleaciones.

El tratamiento criogénico es una continuación del proceso de tratamiento térmico en donde la estructura molecular continúa su transformación hacia una estructura más resistente llamada martensita. Después de ser procesada criogénicamente, esta martensita creada debe ser sometida a un proceso de revenido con calor para estabilizar la reciente microestructura inestable.

6.3.2 Influencia del Tratamiento Criogénico en los materiales

Explicaremos la influencia que tiene el tratamiento criogénico en los metales ferrosos, metales no ferrosos y plásticos.

El tratamiento criogénico, aplicado para mejorar la resistencia al desgaste en los metales ferrosos, es un proceso que se practica una sola vez, no necesita ser ejecutado nuevamente en la vida de una herramienta, a menos que la herramienta sea recocida o templada nuevamente. Los procesos de afilado o esmerilado posteriores no eliminan lo que el tratamiento criogénico ha realizado en la pieza. Tratar criogénicamente una pieza para eliminar esfuerzos es la única razón para realizar el proceso nuevamente.

La densidad de la estructura molecular en un material ferroso, no ferroso o plástico puede acumular una variedad de defectos e imperfecciones provenientes del proceso de solidificación. Mientras ocurre la solidificación, las moléculas cercanas a la superficie son a menudo atrapadas fuera de su posición ideal. Esto afecta los esfuerzos localizados y la resistencia al desgaste del material. Tratando criogénicamente el material solidificado, las moléculas regresan lentamente a la posición correcta. La densidad incrementada mejora el acabado de la superficie y ayuda a fortalecer los materiales no ferrosos y plásticos.

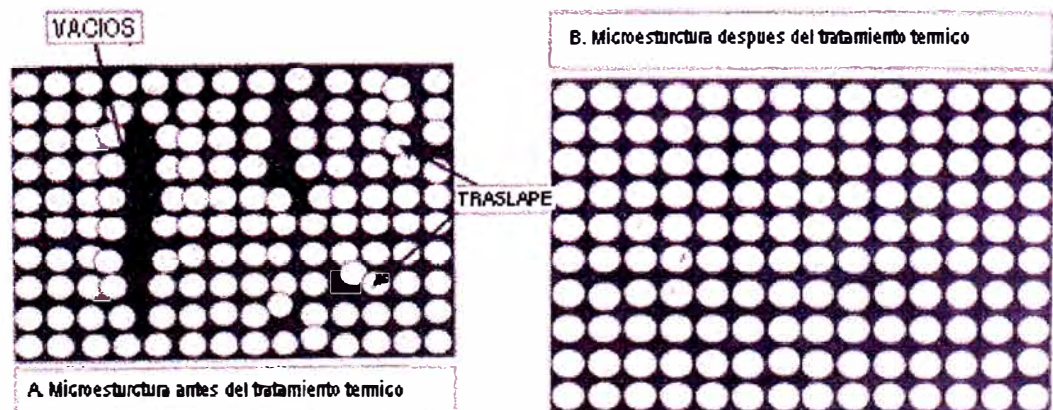


Figura 6.1 – Las moléculas solidificadas (A) son realineadas incrementando la densidad y mejorando el acabado de la superficie(B).

6.3.2.1 Influencia en Metales Ferrosos

El tratamiento criogénico, aplicado adecuadamente en metales ferrosos tratados térmicamente y revenidos, continúa el proceso de tratamiento térmico. La continuación es vista en la transformación de austenita a martensita. Seguido por un adecuado revenido, el acero exhibirá mejor resistencia al desgaste más otros atributos. Esos otros atributos incluyen eliminación de tensiones internas, estabilidad dimensional, durabilidad y algunas mejoras en la superficie. También se forman (precipitan) finas partículas de carbono (carburos de cromo, carburos de tungsteno, etc., dependiendo de los elementos aleantes en el acero) durante el tratamiento criogénico.

6.3.2.2 Influencia en Metales no ferrosos y Plásticos

El tratamiento criogénico fortalece la estructura molecular mediante un proceso que reordena las moléculas. El reordenamiento muestra una densa estructura molecular uniformemente alineada en todo el material, dándole una gran tenacidad y resistencia causada por el incremento de la resistencia en los enlaces de las moléculas.

6.3.3 Tipos de Tratamientos Criogénicos

Hay 3 tipos básicos de tratamientos criogénicos:

- **Tratamiento Subcero** que utiliza hielo seco (-109° F) (-78° C) .
- **Tratamiento Criogénico Seco** (utiliza N2 gaseoso)
- **Tratamiento Criogénico Profundo** (utiliza N2 líquido)

Existen personas y grupos que están experimentando tratamientos criogénicos profundos, usando gases y líquidos de Helio e Hidrógeno. Pero estos gases son mucho más costosos y no han probado ser necesarios para el tipo de trabajo que se realiza en materiales metálicos y no metálicos. El nitrógeno líquido es relativamente más barato y se puede emplear sin ningún problema.

El hielo seco usado con Kerosene, Alcohol, o algún medio no congelante para alcanzar temperaturas frías, puede (depende del tiempo adecuado) transformar aproximadamente entre 97 % a 99% de martensita como máximo. La cantidad final de transformación será afectada por el porcentaje de austenita retenida remanente después del revenido. El nitrógeno líquido, seco o húmedo, generalmente transformará entre 99.8 % hasta 99.9% como máximo.

La primera pregunta es si existe una diferencia importante entre estos dos rangos del tratamiento subcero y el tratamiento criogénico profundo. La respuesta es sí, incluso un pequeño porcentaje obtenido con nitrógeno líquido puede resultar en un incremento significativo en la resistencia al desgaste de muchas herramientas. El hielo seco no podría darle más del 80% de incremento puesto que no alcanza una temperatura lo suficientemente fría como para completar la transformación, como sí lo hace el nitrógeno líquido.

Pero eso no significa que el hielo seco no sea un método confiable o factible para algunas aplicaciones. La mejor proporción de transformación que se puede obtener a través de un tratamiento térmico practicado adecuadamente está entre 94% y 96% de formación de martensita. Nadie puede conseguir mejor transformación que esas debido a las variables incontrolables del tratamiento térmico. Incluso para alcanzar esas transformaciones óptimas se requiere que las temperaturas en todas las fases del proceso de tratamiento térmico sean las correctas, un óptimo temple con temperaturas muy bien controladas, tiempos óptimos en cada etapa del proceso. En términos simples, esto podría ser considerado un tratamiento térmico casi perfecto. En realidad, un tratamiento térmico típico hecho en un ambiente de producción generalmente alcanzará un 70 % a 90% de transformación, dependiendo del conocimiento y la habilidad de los operadores. También suele encontrarse que muchos productores de aceros para herramientas practican tratamientos térmicos obteniendo 40% o 50 %.

Si se tiene una pieza que le hicieron un tratamiento térmico no muy efectivo, al usar hielo seco (tratamiento Subcero), se podría obtener una enorme mejora, transformando y obteniendo incluso hasta un 90 % de martensita. Asimismo, el tratamiento con nitrógeno líquido también alcanzará enormes mejoras pero la mejora será menos significativa comparado con el porcentaje ganado por el simple método de hielo seco.

Si, por otro lado, se usa el proceso de hielo seco en un componente tratado adecuadamente, se verá una mejora, pero los resultados no serán tan notorios ni significativos como con el nitrógeno líquido. El método del hielo seco es puede ser usado para lotes pequeños, cuando no se dispone de un procesador de nitrógeno líquido. Los resultados son impredecibles con hielo seco, pero pueden servir como un buen ensayo para evaluar el próximo paso dentro de un procesador criogénico controlado.

Antes que se explique los diferentes procesos paso a paso debemos recordar y considerar que el revenido representa un papel importante en el proceso y es extremadamente esencial.

6.3.3.1 Tratamiento Criogénico Subcero con Hielo seco

Consiste en enfriar el material por unas cuantas horas a -78°C con la utilización de hielo seco. Este tratamiento solo cambia una parte de la austenita en martensita. Se creía que esta temperatura era suficiente para transformar toda la austenita retenida en martensita. Sin embargo, recientemente se ha demostrado que el incremento en la resistencia al desgaste ocurre con el tratamiento criogénico profundo.

Su eficiencia no es tan espectacular como con el nitrógeno líquido y es generalmente usado para pequeñas cantidades o para ensayos. Una vez

que los resultados son conocidos el siguiente paso es inevitablemente practicarlo con nitrógeno líquido.

Uno de los métodos para realizarlo es usar una caja de poliestireno (no usar una unidad de aluminio), el aislamiento es insuficiente y la pérdida de temperatura y congelamiento pasará en forma directa vía conducción y el hielo seco se disipará muy rápidamente. También, se debe evitar usar cualquier unidad de plástico porque estos pueden romperse a bajas temperaturas, los recipientes de poliestireno trabajan mejor. Se puede comprar hielo seco en forma de bloques en tu abastecedor de soldadura donde se producen descargando dióxido de carbono dentro de una cámara especial. Una vez que se consiga el hielo, se pone en una caja congeladora. Es mejor y más seguro cubrir la caja congeladora con una bolsa de basura para prevenir que el Kerosene disuelva el poliestireno y tenga fugas. El hielo seco es comúnmente envuelto en papel kraft o de pulpa sulfítica para facilitar su manejo, no se necesita eliminar todos los pedazos de papel, solo afectará que el hielo se vaporice más lentamente haciendo que el ciclo sea prolongado. Se ponen las herramientas, plásticos o piezas en la parte inferior del recipiente y se cubre con Kerosene K1 o alcohol. El Kerosene K1 es comúnmente usado porque no se congela a -109° F (-78° C). El alcohol puede ser usado pero se evapora. El propósito del Kerosene K1 en el proceso es llevar el frío hacia todas las partes uniformemente. Luego se debe poner la tapa pero debemos asegurarnos que el recipiente tenga un agujero de ventilación.

Se debe permitir que el hielo seco se disipe y vuelva a la temperatura ambiente lentamente a su propia velocidad. Dependiendo de cuanto hielo seco se use y la construcción del recipiente, podría tomar de 2 a 3 días. Un mínimo de 8 a 10 horas a la temperatura de -109°F (-78°C) dará mejores resultados.

Se debe tener mucho cuidado al manejar hielo seco. Las temperaturas de -109°F (-78°C) podrían causar quemaduras en la piel. El Kerosene K1 puede salpicar en los ojos. Se debe usar ropa para protegerse y una máscara protectora cuando se trabaje con estos materiales. No se debe tocar nada dentro del recipiente hasta que se sepa que se ha alcanzado la temperatura ambiente. Cuando se esté seguro que las piezas están a la temperatura ambiente, entonces se debe proceder a revenir las partes. El proceso de revenido se da levantado la temperatura hasta 300°F (149°C) y mantenerlo allí durante 2 horas por pulgada antes de realizar el enfriamiento hasta la temperatura ambiente.

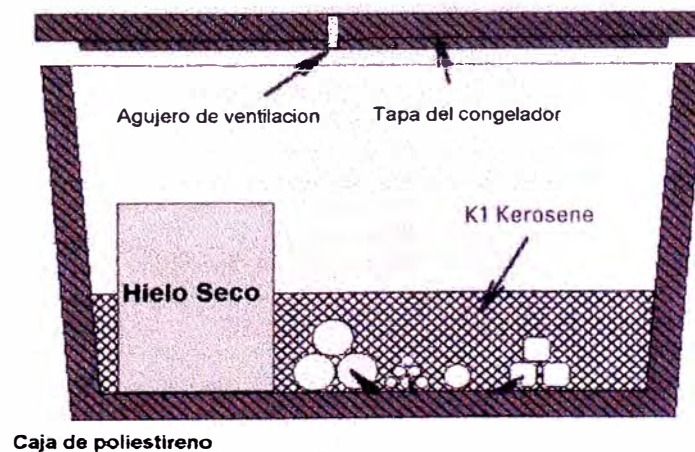


Figura 6.2 – Vista de un congelador de poliestireno usado para el tratamiento criogénico.

6.3.3.2 Tratamiento Criogénico Seco

Es un tratamiento muy parecido al tratamiento criogénico profundo, ya que utiliza nitrógeno, pero éste solo se utiliza en estado gaseoso, y las temperaturas mínimas que puede alcanzar son alrededor de los -160°C .

Con este tratamiento se logra eliminar mayor cantidad de austenita retenida que con el sub-zero, pero no se obtiene la precipitación de los llamados eta-carburos, que son indispensables para aumentar la resistencia al desgaste.

6.3.3.3 Tratamiento Criogénico Profundo

Consiste en dos etapas: la seca, que va de temperatura ambiente a -160°C y utiliza nitrógeno en forma de gas; y la húmeda, en la que se utiliza nitrógeno líquido para enfriar de -160°C a -196°C . Una vez que se alcanza esta temperatura criogénica, se mantiene entre 20 y 40 horas para asegurar la formación de toda la martensita y la precipitación de eta-carburos. Después se deja que el material se enfríe muy lentamente hasta la temperatura ambiente.

El ciclo criogénico completo puede tomar de 70 a 75 horas. Este procedimiento se realiza controlando exhaustivamente la temperatura

evitando así cualquier posibilidad de choque térmico en la pieza que se presenta cuando se experimentan cambios bruscos de temperatura.

Aparte del nitrógeno hay quienes usan el helio líquido y el hidrógeno pero estos no son muy usados debido a que son caros en comparación con el nitrógeno.

6.3.4 Fases del Tratamiento Criogénico

Con ayuda del siguiente gráfico 6.3 describiremos el proceso del tratamiento criogénico profundo por ser éste el más usado y en el cual se obtiene los mayores beneficios.

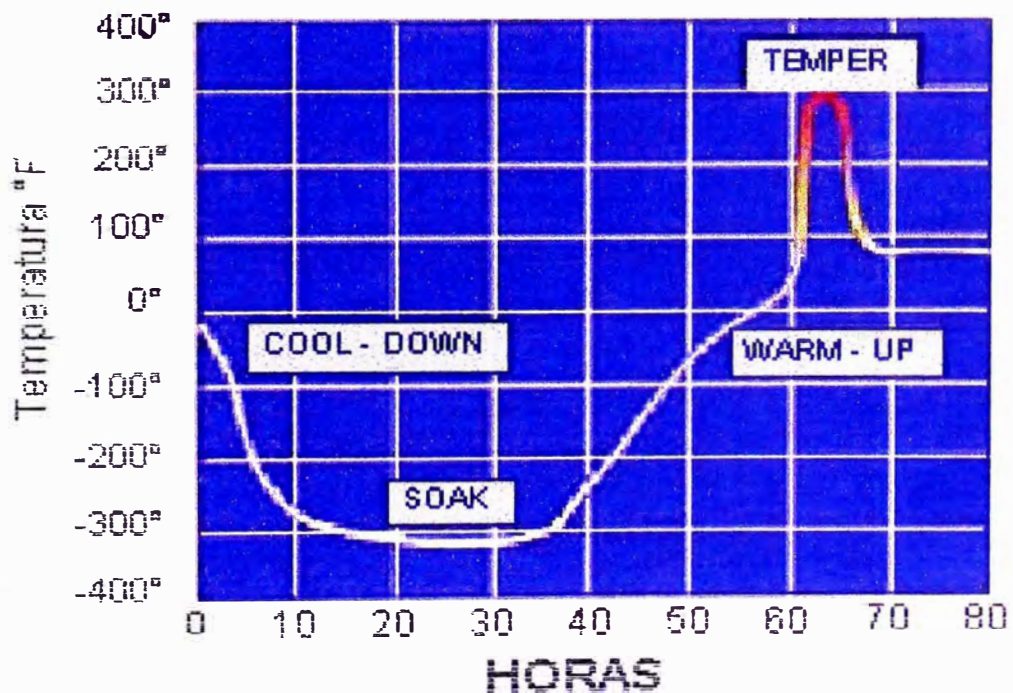


Figura 6.3 Fases del tratamiento criogénico profundo.

El proceso de tratamiento criogénico es diferente para cada uno de los materiales a ser procesados.

El proceso del tratamiento criogénico profundo está basado en un ciclo térmico predeterminado que consiste en enfriar las piezas en una cámara criogénica completamente controlada por una computadora. Este ciclo está formado por varias fases que son:

6.3.4.1 Fase de Enfriamiento

El material se enfría lentamente a razón de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ hasta alcanzar -196°C . Mientras el material se enfría, las moléculas se mueven lentamente a través de la estructura del material y se organizarán en su forma natural para unirse, enlazarse, durante la fase criogénica.

6.3.4.2 Fase Criogénica o de Permanencia

En esta fase se mantiene la pieza a una temperatura de -196°C un mínimo de 24 horas, dependiendo de la carga y del material a ser tratado.

La fase criogénica profunda debe durar un tiempo adecuado como para establecer un arreglo ordenado de cristales, incrementar la energía de enlace y debe lograr un equilibrio estructural a través de todo el metal.

Las temperaturas criogénicas profundas efectúan la transformación de austenita a martensita así como permiten que se precipiten los eta-carburos.

6.3.4.3 Fase de retorno a la temperatura ambiente

En esta fase se restaura el metal hasta alcanzar la temperatura ambiente. Esta fase debe realizarse con un estricto control de los cambios de temperatura. Aproximadamente dura entre 24 a 30 horas y se realiza sin añadir ninguna fuente externa de calor mas que la convección natural.

6.3.4.4 Revenido

Después de la fase anterior, la estructura martensítica puede resultar quebradiza, es por eso que finalmente se aplica un revenido a 150° C aproximadamente, dependiendo esta temperatura del material, este revenido se aplica para estabilizar la martensita creada y eliminar las tensiones residuales internas.

Este ciclo, evita cualquier posibilidad de choque o esfuerzos térmicos ocasionados por cambios bruscos de temperatura. El ciclo del tratamiento criogénico completo dura aproximadamente entre 70 a 75 horas.

El tratamiento criogénico no es un sustituto de otros tratamientos térmicos para el acero, sino una extensión del ciclo de temple y revenido. El tratamiento Criogénico Profundo no reemplaza el tratamiento térmico, el tratamiento Criogénico profundo completa lo que un buen tratamiento térmico empezó.

6.3.5 Explicación del Tratamiento Criogénico

Para realizar un tratamiento criogénico estándar las piezas deberían colocarse en bandejas, es preferible usar instalaciones o bandejas de acero inoxidable, etc., para que no se oxiden.

En la carga se puede incluir piezas de gran tamaño así como brocas de pequeño tamaño pero el tiempo del tratamiento será determinado de acuerdo a la masa de todas las piezas puestas en el procesador. La regla práctica para la fase criogénica o de permanencia es que las piezas deberían ser mantenidas a la temperatura de -320°F (-196°C) por un mínimo de 24 horas. Hay muchas opiniones acerca del tiempo necesario de permanencia de la pieza. Algunos dicen que entre 6 horas y 18 horas es suficiente. Bajo condiciones metalúrgicas de laboratorio, han sido observadas que 24 horas aseguran la transformación total hasta el núcleo mismo de las piezas de $\frac{1}{2}$ " hasta 3" de espesor de sección transversal. Mas allá de 3", la forma más segura es adicionar como mínimo 2 $\frac{1}{2}$ horas por cada pulgada adicional o fracción de la misma.

La explicación del porqué toma tanto tiempo es que a -320°F (-196°C), el movimiento de átomos en la estructura molecular se vuelve muy lenta. La razón por la que se usa periodos largos de permanencia no es sólo completar superficialmente la transformación de la austenita retenida a martensita, sino más bien establecer la uniformidad de la temperatura en toda la masa de la pieza, causando la transformación en toda la pieza. La austenita retenida empieza a transformarse en martensita cuando se alcanza temperaturas criogénicas subcero.

El tiempo de permanencia largo es necesario por 2 importantes razones:

Primero, los elementos aleantes y el carbono en las piezas forman grupos debido a la eliminación de la austenita retenida. Estos grupos, cuando se realiza un revenido, forman pequeños carburos precipitados, mejorando la resistencia al desgaste.

Segundo, la penetración de bajas temperaturas debe alcanzar una cierta profundidad. Tener una estructura martensítica localizada sólo en el núcleo parcialmente no es un resultado satisfactorio. Los ensayos han mostrado que las piezas menores que $1\frac{1}{2}$ " de sección transversal, remojadas (fase de permanencia) menos de 20 horas, pueden mostrar signos de transformación incompleta en el núcleo.

Los tiempos de permanencia cortos pueden ser suficientes para secciones transversales muy delgadas, pero por seguridad debería ser un mínimo de 24 horas. También pongamos el ejemplo que el procesador es capaz de contener 64 piezas de 6" x 6" x 6" cada bloque, que completamente llenará el espacio, sin espacio entre piezas, se debe calcular el tiempo de permanencia conveniente para que el núcleo central alcance la temperatura adecuada, no cuando los bloques exteriores o el procesador alcance la temperatura. Podría instalarse un controlador de temperatura con una termocupla localizada en el centro de la carga para leer la temperatura del núcleo interior; pero no siempre es práctico, y es más fácil asegurarse que las piezas sean mantenidas el tiempo necesario para obtener la penetración total. Un sobreremojo no es perjudicial y sólo nos asegura una buena transformación.

Las investigaciones han mostrado que mientras el nitrógeno líquido es introducido, la velocidad de enfriamiento debería ser entre 50 a 75° F (28 a 41° C) por hora para evitar el choque térmico. Hay algunos investigadores que afirman que la carga puede ser reducida desde la temperatura ambiente hasta -320° F (-196° C) en 2 horas. El enfriamiento lento es más seguro y más confiable. Si se decide usar el tratamiento seco, sólo se usa el gas del contenedor y el controlador llevará la carga hasta -300° F (-184° C) y lo mantendrá a ese nivel. Se debe entender que usando solo gas, es casi imposible alcanzar -320° F (-196° C) o mantenerlo. Por el método de inmersión del líquido, una vez que las partes alcanzan -250° F (-157° C), no hay peligro de

choque térmico y el nitrógeno líquido (LN₂) puede ser introducido en su forma líquida, empapando totalmente las piezas.

Es importante que todas las piezas se encuentren a una temperatura uniforme antes que el Nitrógeno líquido sea introducido. El ingreso del líquido en esta etapa del proceso tiene un tremendo efecto en los resultados finales de la estructura de grano de los componentes que han sido procesados, indistintamente de la forma, tamaño, complejidad, las piezas obtienen buenos resultados debido a la inmersión realizada con temperaturas perfectas, uniformes, homogéneas. En la forma gaseosa (a menudo llamada método seco), las piezas requerirán un tiempo de permanencia extra para asegurar la transformación en toda la masa de la pieza.

Si se tiene un procesador del método seco, la mayoría de los equipos procesadores deberían ser capaces de manejar el proceso húmedo tan bien como el seco.

En el método húmedo, las piezas alcanzarán -320° F (-196° C), además, se deben mantener a esa temperatura por un tiempo estimado para conseguir la penetración en toda la masa de la pieza. Otra importante reacción, cuando se usa el nitrógeno en forma líquida, es que cualquier molécula de agua presente es eliminada y la carga está técnicamente libre de H₂O. Las piezas deberían ser cubiertas o bañadas por 8 a 10 pulg. de nitrógeno líquido. El procesador y el recipiente pueden ser apagados y entonces permitirán retornar a la temperatura

ambiente a una proporción de calentamiento natural. Esto asegurará, para la mayoría de los procesadores, una transformación total de la estructura de grano y proporciona automáticamente un tiempo de permanencia de 24 a 30 horas durante el cual el líquido se desvanecerá o se convertirá en gas.

Después que el nitrógeno se convierte en gas, generalmente tomará otras 30 horas para retornar a la temperatura de ambiente si el procesador está adecuadamente aislado. Si una carga extremadamente grande o cargas pesadas están siendo procesadas, estos tiempos pueden extenderse en algunos casos hasta 70 horas, pero eso dependerá del tamaño del procesador, la masa de las piezas que están siendo procesadas y el aislamiento.

Una vez que el procesador es llevado hasta -320°F (-196°C) y el controlador y el recipiente de gas son apagados, se debe esperar 2 días sin hacer nada. No hay nada que puedas hacer hasta que la unidad retorne a la temperatura ambiente. Es debido a este factor que la mayoría de las compañías cargan sus procesadores los viernes, dejan trabajar al procesador los fines de semana y descargan los lunes cuando la temperatura alcanza la temperatura de ambiente.

La regla es que el procesador no debe ser abierto hasta alcanzar la temperatura del ambiente. Es vital que este peligroso proceso se haga en forma lenta y uniforme. Nunca debería usarse un calentador cerca del procesador para forzar que alcance la temperatura ambiente. Existe la posibilidad que los esfuerzos o tensiones regresen a las piezas, esta posibilidad se incrementa si las piezas son

forzadas calentándolas demasiado rápido. Mientras no se aplique calor y se deje el procesador cerrado hasta que alcance la temperatura ambiente, nunca se tendrá problemas de humedad en la cámara. No existirá humedad porque el uso del nitrógeno líquido eliminará toda la humedad o moléculas de agua que estuvieran en las piezas. Una vez que la cámara recibe la temperatura ambiente, puede ser descargado y preparado para el paso final – Revenido.

6.3.6 Revenido después del Tratamiento Criogénico

Hay muchas preguntas que deben ser resueltas para determinar el mejor método de revenido.

Si la temperatura de revenido original es conocida, entonces se deberían revenir las piezas calentándolas hasta 25 o 30° F (14 a 17° C) más bajos que la temperatura original de revenido. Se debe reducir la temperatura en esta cantidad porque hay un beneficio al bajar la temperatura de revenido en el segundo o tercer revenido. El primer revenido establece o fija el nivel de dureza final y continúa la transformación de la austenita a martensita. También refina la estructura de grano durante este proceso para darle una estructura homogénea y estabilizar la martensita recién formada. El segundo o el tercer revenido continúa el proceso de transformación y adicionalmente refina la estructura de grano. El tiempo debe ser 2 horas por pulgada de sección transversal.

Si la temperatura de revenido no es conocida, entonces la forma más segura es calentar la pieza entre 300 y 350° F (149 – 177° C) y mantenerla durante 2 horas por pulgada de sección transversal. Los aceros rápidos pueden ser revenidos a 350 – 400° F (177 – 204° C) sin problema.

Los aceros rápidos requieren temperaturas de revenido más altas que los aceros de herramientas estándares. Generalmente son revenidos la primera vez entre 1000° F (538° C) hasta 1100° F (593° C), seguido por un segundo y tercer revenido 25° F (14° C) más bajo que el revenido previo. Pero nosotros estamos hablando de materiales criogénicamente tratados así que las reglas cambian. Las piezas deben ser templadas y revenidas antes de ser procesadas criogénicamente no dependiendo del grado o calidad del material. Como se dijo anteriormente, el tratamiento criogénico completa la transformación de la austenita a martensita, así que no es necesario usar temperaturas de revenido altas. Todo lo que se necesita es estabilizar la martensita recién formada a 300° F (149° C) hasta 400° F (204° C) para aceros rápidos.

No hay necesidad de revenir un material no ferroso. Primero, no hay martensita inestable presente, entonces no hay peligro de fracturas y roturas. Los metales no ferrosos al ser expuestos a 300° F (149° C) o 400° F (204° C) de temperatura pueden dañarse, no hay ningún beneficio que se pueda encontrar al realizar un revenido en un metal no ferroso.

Siempre que la austenita retenida es transformada en martensita, habrá un crecimiento en el tamaño físico de la pieza. Es importante que se considere esto antes de que se realice el proceso.

La línea inferior: 300 – 350° F (149 – 177° C) es suficiente para todos los metales ferrosos, y arriba hasta 400° F (204° C) es aceptable para aceros rápidos. El tratamiento criogénico es un proceso de una sola vez para metales ferrosos. El ciclo de revenido fija la estructura martensítica y la vuelve estable.

6.3.7 Cambios microestructurales debido al Tratamiento Criogénico

Como resultado del Tratamiento Criogénico ocurren tres cambios principales en la microestructura del acero. Estos cambios son las razones principales para el incremento de la resistencia al desgaste.

6.3.7.1 Eliminación de la austenita retenida

Cuando se forma martensita a partir de la austenita ocurre una gran expansión volumétrica. Durante el templado, conforme se van formando las placas de martensita, estas rodean y aíslan pequeños depósitos de austenita, que se deforman para acomodar la martensita de menor densidad. Sin embargo, para que se transformen los depósitos restantes de austenita, deberá deformarse la martensita circundante. Dado que la martensita es fuerte y se opone a la transformación, la martensita

existente o se fractura o bien la austenita se queda atrapada en la estructura como austenita retenida.

La austenita retenida puede resultar un problema grave. La martensita se ablanda y se hace más dúctil con el revenido, después del cual, la austenita retenida se enfría por debajo de las temperaturas M_s y M_f transformándose en martensita, ya que la martensita revenida que la rodea si puede deformarse. Pero ahora el acero contiene más martensita dura y frágil. Pudiera ser necesario un segundo revenido para eliminar la martensita que se ha formado a partir de la austenita retenida.

Este es un problema para los aceros de alto carbono. Las temperaturas de inicio y terminación de la martensita se reducen al aumentar el contenido de carbono. Para producir una estructura total de martensita, los aceros de alto carbono deben ser refrigerados.

La austenita retenida se puede obtener por dos razones: primero, por mala precisión de parámetros de templado, cosa que ocurre casi siempre; segundo porque en materiales de alta aleación, la línea final de formación de martensita, se encuentra por debajo de temperatura ambiente, y el proceso de templado solo enfría hasta temperatura ambiente. El rango de temperatura para la formación de martensita está determinado por el contenido de carbono del material.

La Figura 6.4 es un gráfico de las temperaturas de formación de martensita relacionados con el contenido de carbono. Los rangos no son exactos, simplemente muestran el concepto de crecimiento de la martensita con el enfriamiento. Como se muestra en el gráfico, la línea de terminación de la martensita (Mf) cae debajo del 0° C a aproximadamente 0.7% de carbono, por lo que el proceso de templeado no logra convertir toda la austenita en martensita. La presencia de otros elementos de aleación como el manganeso, cromo y el vanadio disminuirían aún más el valor de Mf.

La cantidad de austenita retenida después del temple puede variar entre 50% y 3%, dependiendo del material, la habilidad de los operadores y la exactitud del equipo de tratamiento térmico.

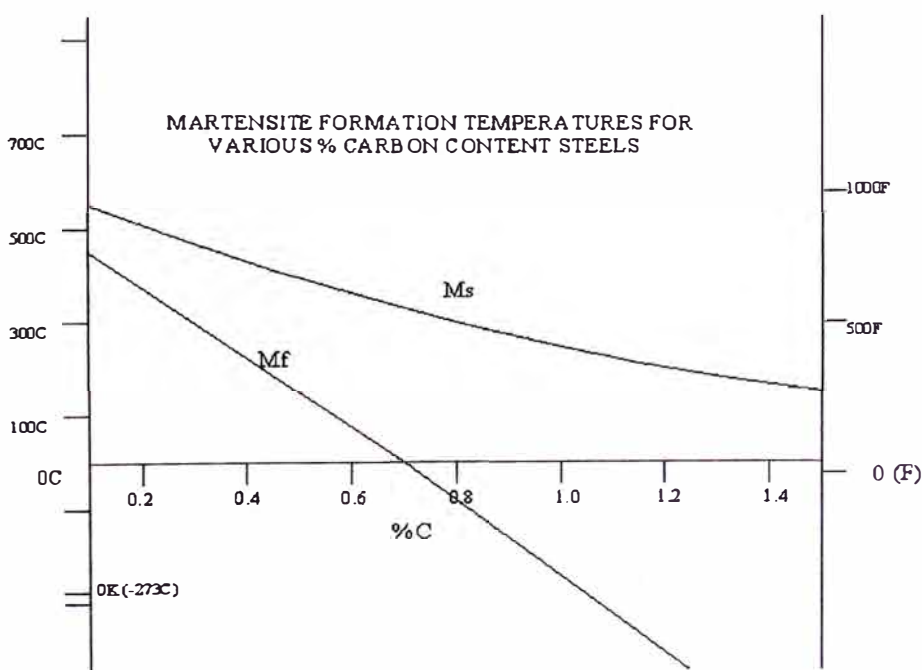


Figura 6.4 – Temperaturas de formación de martensita para aceros de varios % de carbono

El tratamiento criogénico es requerido para efectuar un cambio molecular completo en la mayoría de aceros, la austenita retenida (normalmente inestable a temperatura ambiente o superior) en el acero después del tratamiento térmico se transforma en martensita (una estructura de grano más refinada que es más uniforme, más durable, más fuerte y dimensionalmente más estable que la austenita).

El tratamiento criogénico continúa la transformación de austenita retenida en martensita. Un estudio dirigido por el Instituto Politécnico de Jassy, Rumania mostró que el tratamiento criogénico de un acero al carbono de 0.83% C, redujo el porcentaje de austenita retenida de 42.6% a 0.9% cuando se comparó con una pieza sin tratamiento criogénico.

La estructura de la martensita resiste mejor la deformación plástica que la estructura de la austenita, debido a que los pequeños átomos de carbono en el enrejado martensítico fijan los átomos de hierro más efectivamente que en el enrejado cúbico austenítico.

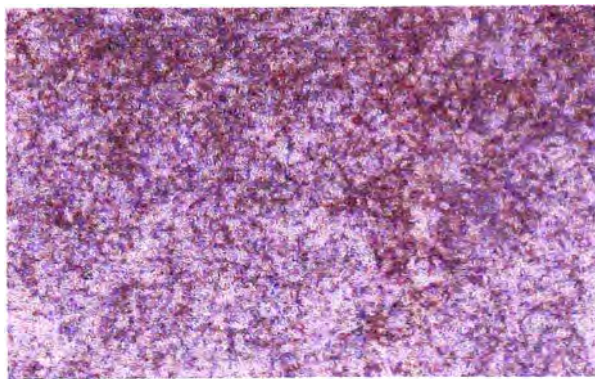


Figura 6.5 – Vista microscópica del acero de herramienta S7 antes del tratamiento criogénico

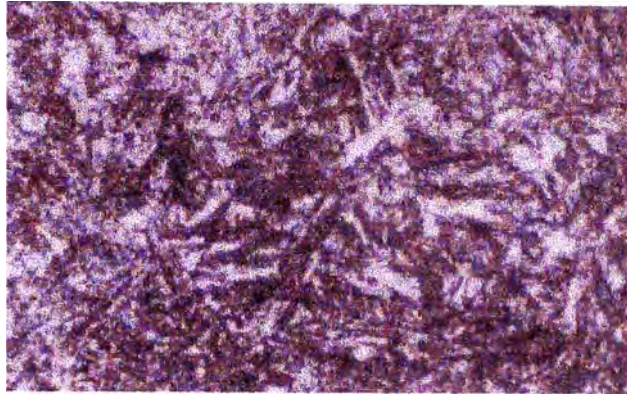


Figura 6.6 – Vista microscópica del acero de herramienta S7 después del tratamiento criogénico

6.3.7.2 Precipitados de eta carburos

Primero, las partículas de carburo existente son refinadas en su forma más estable. Esta esferoidización también alinea las partículas de carburo en una configuración más durable, libre de tensiones. Esto reduce el riesgo de fracturas inducidas por las tensiones.

Un segundo resultado del tratamiento criogénico es la formación de finas partículas de eta (η) carburos (precipitados) dispersadas en la estructura de la martensita, estos carburos se complementan a las partículas de carburo más grandes presentes antes del tratamiento criogénico. Dependiendo de los elementos aleantes en el acero, estas partículas podrían ser carburo de cromo, el carburo de tungsteno, carburos de vanadio, etc.

La formación de los eta-carburos, depende del tiempo de exposición a temperaturas criogénicas, y es la razón por la cual el tratamiento criogénico debe mantenerse por 20 horas a -196°C . Estas partículas de carburo son responsables de las características de resistencia al desgaste alcanzadas por los materiales, debido a una estructura más densa, más compacta y más resistente reduciendo la fricción, calor y desgaste.

Un reciente estudio realizado por Randall Barron, del Departamento de Ingeniería Mecánica, del Instituto Politécnico de Louisiana, en Ruston, Los Ángeles, encontró que la martensita y los finos carburos formados en la fase de permanencia del tratamiento criogénico profundo trabajan juntos para reducir el desgaste abrasivo. Las finas partículas de carburos sostienen la matriz de la martensita, haciendo menos probable que las micropartículas excaven el material de la herramienta y causen abrasión. Cuando una aspereza dura o partícula exterior se aprieta contra la superficie de la herramienta, los carburos resisten el desgaste impidiendo a la partícula rayar la superficie.

Este mecanismo de fortalecimiento es similar al hecho de que el concreto está hecho de cemento, piedras grandes y muy pequeñas (arena gruesa), las pequeñas y duras partículas de carburo dentro de la matriz de martensita ayudan a sostener la matriz y resisten la penetración de partículas externas en el desgaste abrasivo.

En un estudio realizado en el Instituto de Jassy en Rumania, los investigadores usaron un microscopio electrónico con un contador de partículas para evaluar los cambios adicionales en la estructura del acero tratado criogénicamente. El estudio determinó que el número de pequeños carburos contables aumentó en el acero tratado térmicamente de 33,000 partículas por milímetro cuadrado a más de 80,000 partículas por milímetro cuadrado como resultado del tratamiento criogénico. El aumento de los carburos incrementa la resistencia al desgaste de la pieza. Los carburos hacen una superficie muy dura y refinada en el acero que es más lisa y disminuye la fricción y el calor.

Cuando se forman los precipitados de carbono, la tensión interna en la martensita se reduce lo que minimiza la susceptibilidad al micro-agrietamiento.

6.3.7.3 Eliminación de Tensiones Residuales

Se podría marcar una gran diferencia ayudando a eliminar la distorsión en las piezas simplemente eliminando las tensiones de maquinado en áreas críticas de sección transversal, durante y después del maquinado.

Las tensiones residuales existen en todos los tipos de piezas desde motores hasta herramientas. La tensión se introduce en las piezas en el momento de forjar, fundir, tratar térmicamente y en el mecanizado.

Cuando las piezas se dilatan debido al calor generado durante el funcionamiento, las tensiones retenidas causan una expansión desigual, la inestabilidad dimensional se incrementa, y aumenta el desgaste.

La mayoría de los ingenieros de hoy en día están de acuerdo con esta afirmación y recomiendan un calentamiento a 1100° F (593° C) – y hasta 1900° F (1038° C) dependiendo de la calidad del material- seguido por un enfriamiento lento. Si es un acero tratado térmicamente, solo puede usarse temperaturas de revenido bajas o el nivel de dureza será destruido. El problema es que la pieza será descolorada a cualquier temperatura por encima de 400° F (204° C) si no se usa un horno atmosférico o un método de protección y eso puede ser costoso.

El alivio de tensiones ocurre cuando la masa entera de la pieza está a una temperatura uniforme (la superficie y la parte central), y después se enfría muy lentamente (menos de un grado por minuto) a través de un amplio rango de temperatura. El cero absoluto (-459.67° F) es conocido como el estado de movimiento molecular cero. Es esta proporción lenta de cambio de temperatura que permite que ocurra lo que es conocido como compresión térmica y la expansión térmica que es lo que lleva a cabo el alivio de tensión. Las temperaturas extremas frías durante el tratamiento criogénico así como el movimiento lento a nivel atómico, aumentan la energía de enlace molecular interior y promueve un equilibrio estructural en todo el material. El resultado final es un

material con una excelente uniformidad, la microestructura refinada y densa, dimensionalmente estabilizada que resistirá la distorsión y la flexión incrementando su durabilidad.

El tratamiento subcero o el tratamiento profundo hace que la estructura molecular descargue su energía acumulada, mientras que al mismo tiempo la estructura de grano es refinada en metales ferrosos tratados térmicamente, con la transformación de austenita en martensita.

También se observa el alivio de tensiones en aluminio, latón, cobre y plásticos. Lo que sucede a nivel molecular es que durante el proceso de producción del metal y el plástico, una porción de moléculas es atrapada fuera de posición durante la solidificación. Cuando se trabaja con metales – incluso el recalentamiento, laminado o perfilado de metales en la industria – estas moléculas están todavía encerradas en una posición fuera de fase. Estos vacíos y espacios adicionales entre las moléculas causan una pérdida de resistencia y tenacidad que podrían ser ganadas o recuperadas si las moléculas fuesen uniformemente apartadas o espaciadas una con relación a las otras. Los vacíos y espacios contienen y encierran esfuerzos y también crean nuevos esfuerzos durante posteriores operaciones de maquinado, afilado o fluctuaciones de temperatura.

El tratamiento criogénico cambia eso. Simplemente permite a las moléculas realinearse unas a otras de manera uniforme, formando una estructura homogénea. Los vacíos llegan a ser uniformes y el cuerpo del material llega a ser más consistente ya que las moléculas ahora están trabajando con las otras moléculas vecinas como un cuerpo uniforme. De esta manera hay un incremento en la resistencia, tenacidad y un alivio de tensiones cuando la estructura se sitúa en su posición adecuada. La superficie del material también es afectada por esta actividad. Si los vacíos se reducen, los vacíos en toda la superficie también se reducen, esto reduce la extensión de los picos y valles en la composición de la superficie. Este allanamiento ayuda a la reducción de la fricción y las tensiones.

El alineamiento de las partículas y el refinamiento de grano se combinan para eliminar las tensiones interiores.

Por otro lado el proceso de densificación causa la eliminación de vacancias en la estructura del enrejado forzando al material equilibrarse a -196° C y bajar la entropía en el material. Esta entropía más baja facilita el establecimiento de un amplio rango de orden en el material que hace que ocurra la minimización de parejas galvánicas en el material de esta manera mejora la resistencia a la corrosión de los materiales incluyendo los aceros inoxidable.

6.4 Ventajas del Tratamiento Criogénico

- El tiempo de vida útil de los materiales se incrementa entre 25% y 400%.
- Puede ahorrar más de 30% de sus costos actuales en compra de herramientas.
- Resistencia al desgaste: Aumenta considerablemente, de 25% a 400% convirtiendo la austenita retenida en martensita dependiendo del tipo de material.
- Dureza: en algunos casos incrementa de 1 a 3 puntos RC, dependiendo de la cantidad de austenita retenida.

Tenacidad: incrementa o se mantiene estable en aceros, en cualquier otro material la aumenta considerablemente, también disminuye la fragilidad del material.

- Esfuerzos residuales: se liberan por completo.
- Se forman microfinas partículas de carburo para reforzar la estructura del metal.
- Estabilidad dimensional: éste era el propósito original del tratamiento criogénico, estabiliza las dimensiones del material, ya que se obtiene una estructura 100% martensítica.
- Material más denso, reduce la vibración y distorsión.
- Aumenta la maquinabilidad.

- El tratamiento permite un mejor arreglo de los cristales, aumenta la energía de los enlaces atómicos y permite alcanzar un balance estructural a través de toda la masa.
- Estos cambios se dan en el 100% de la estructura, por lo que es necesario aplicarlos una sola vez. Los afilados o rectificadores posteriores no afectan los beneficios del tratamiento criogénico, por lo que el tratamiento mejora las propiedades durante todo el ciclo que tenga la herramienta.

6.5 Equipos para el Tratamiento Criogénico

6.5.1 Consideraciones para la selección del procesador criogénico

Una cosa crítica para el procesador es la falta de espesor de material en las paredes de la cámara del procesador, esto no les permite soportar los esfuerzos térmicos de ciclos criogénicos repetidos. La principal causa de fallas catastróficas en el procesador son las fallas por soldadura. Las rajaduras de soldadura son consecuencia de la expansión / contracción en diferentes planos. Cuando se usan paredes delgadas éstas experimentan expansiones y contracciones constantes causando severas flexiones en las paredes, alternándose producen tremendas condiciones de fatiga en las soldaduras. Las paredes gruesas también se contraen y expanden pero la flexión es reducida, además, la penetración de la soldadura puede ser mejorada en paredes gruesas. Hay cámaras en el mercado que usan paredes de 1/16" de espesor y procesadores con 1/4" de paredes de espesor.

Otro pobre diseño ofrecido por algunos fabricantes es el uso de elementos calefactores dentro de la cámara criogénica con el propósito de realizar revenidos. Hay muchas razones para evitar estas características como:

Si un procesador es calentado cuando todavía hay frío en la carga, se producirá condensación en las piezas, permitiendo que se formen óxidos en la superficie.

Si la humedad es desalojada por el calor, el óxido aún existirá a menos que haya una atmósfera pura de nitrógeno mantenida durante el ciclo bajo un controlador de presión positiva o parcial. Es muy común rociar antioxidantes químicos a todas las piezas (aceite o un inhibidor de óxidos) para prevenir la formación de agua en el procesador. Con un adecuado diseño y un adecuado procedimiento evitaremos la existencia de agua en el interior de la cámara, no solo después de procesar una carga, sino durante cualquier etapa del proceso.

La mayoría de los aislamientos en el mercado no están diseñados para soportar el calor (hasta 1200° F o 649° C) y el frío (-320° F o -196° C) del tratamiento criogénico, o para trabajos prolongados. Obviamente hay materiales aislantes que resisten hasta 1200° F (649° C) y -320° F (-196° C) pero no necesariamente los dos en un cambio rápido de temperatura como sucede en el tratamiento criogénico. El problema de usar procesadores para hacer ambas funciones es el desgaste o falla acelerada del aislamiento, causando pérdidas de eficiencia. El verdadero problema del deterioro del aislamiento es que esta falla seguirá porque la cubierta exterior del procesador no permitirá inspeccionar la falla, asumiendo entonces que todo está bien. Mientras ocurre la falla en el

aislamiento, se afecta la eficiencia del procesador. Esto permitirá una pérdida del frío o una filtración de calor que consumirá el nitrógeno líquido (LN₂). Considerando que los ciclos de calentamiento, permanencia y enfriamiento son preprogramados para una curva de temperatura predeterminada, las pérdidas de nitrógeno líquido continuarán aumentando, dando un costo mayor.

Uno de los inconvenientes con las unidades de paredes delgadas es la fragilidad de las paredes. Si una carga es mal manejada sacándola o introduciéndola a la cámara, la pared puede ser fácilmente agujereada. Es fácil soldar el agujero para parcharlo pero el tiempo del proceso y nitrógeno líquido pueden perderse. Se debe recordar que el aislamiento de vacío es una buena idea pero no es más productiva, ni más uniforme en temperatura que una unidad rectangular.

Muchos procesadores son construidos para resistir hasta 1200° F (649° C) para revenir aceros rápidos. Pero cuando los metales son revenidos después del tratamiento térmico, cada acero, y cada aplicación, tiene su óptima temperatura para cumplir ciertas aplicaciones de trabajo. Existe el peligro de que la pieza se pueda quebrar si se usan temperaturas de 500° F (260° C) hasta 800° F (427° C).

Algunas de las unidades en el mercado son peligrosas. Hay unidades que permiten a los operadores estar expuestos a temperaturas tan altas como 1200° F (649° C).

Dependiendo de cuanta carga sea introducida, este proceso de revenido puede producir temperaturas adecuadas para el revenido o en algunos casos no lograr el revenido debido a mucha carga. Esto también es riesgoso para la vida de la herramienta. El revenido debería ser realizado en equipos diseñados para revenido.

El tamaño del equipo depende mas o menos de la cantidad de material que va a ser procesado. Pero los procesadores grandes no necesariamente son mejores. Si la cámara no es llenada en toda su capacidad, habrá un mayor uso de nitrógeno líquido que el necesario. Si la unidad y la carga son grandes, el proceso tomará más tiempo que el descrito anteriormente.

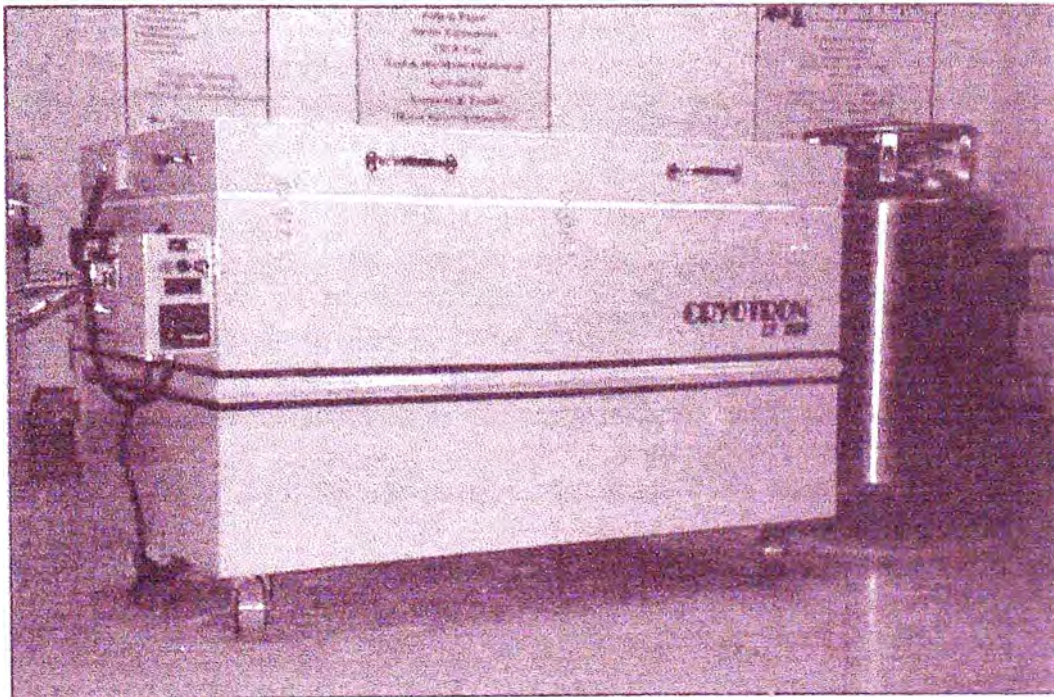


Figura 6.7 – Uno de los muchos modelos fabricados por Cryotron

6.5.2 Procesadores Criogénicos

Es un procesador controlado por computadora. Viene con curvas de enfriamiento programados en la computadora. Cualquier otra curva de enfriamiento deseada puede programarse fácilmente en el procesador.

Se convierte el nitrógeno líquido a gas antes de que entre en la cámara para que en ningún momento el nitrógeno líquido entre en contacto con las piezas asegurando así que se eliminen los peligros de cracking debido al rápido enfriamiento.

Por lo general todas las cámaras se construyen de planchas de acero inoxidable de bajo carbono de ¼". El diseño elimina las fallas por soldadura y flexión. Entre las paredes se encuentra un aislamiento generalmente de 6" para las aplicaciones criogénicas.

Está provisto de un controlador programable digital avanzado, que dirige la proporción de descenso, duración del remojo y las temperaturas seleccionadas para el proceso. También se acopla un sensor de temperatura RTD, este sistema proporciona una exactitud incomparable.

Dentro de las características estándares de los procesadores criogénicos tenemos:

- Controlador programable digital Tiempo /Temperatura
- Reloj digital
- Registrador
- Panel de control
- Paredes aisladas de 6", suelo y la tapa
- Equipo Hidráulico para levantar la tapa
- Funcionamiento en 110 Voltios o 220 Voltios
- Sensor de temperatura RTD
- Seguridad electrónica
- Mangueras flexibles de acero inoxidable 7 pies
- Manguera de escape de 9 pie
- Interfaz para PC

Algunos proveedores de procesadores criogénicos son:

Cryotron (Canadá)

Cryogenics International (USA)

300° Below, Inc. Cryogenic Tempering Services

Digital Quality Systems

Durable Metal Products

One Cryo

Integrated Cryogenics Systems

American Cryogenics Inc.

Cryosa (México)

Por ejemplo el modelo 701 Deep Cryogenic Processor de la compañía 300° Below tiene las siguientes especificaciones:

Tabla 6.1 – Características del procesador modelo 701 de 300° Below.

Capacity (size)	20.5 cubic feet
Capacity (weight)	1500 pounds
Dimensions:	Ext.95.5" L x 41" H x 29" W Int.70.5" L x 26.5" H x 19" W (179.1cm x 67.3cm x 48.3cm)
Operating Range:	Ambient temperature to -300F
Cooling Rate:	1.5 degrees per minute convective heat exchange
Average Cycle Time:	18 to 48 hours: descent time stay time @ -300 F ascent time
Insulation:	5" of urethane foam
Controller:	Pentium Computer w/8-12 channel controller, all software and programming included
Refrigerant:	R-134A/R-23/R-404A/Prop/LN2 Non-CFC
Compressors:	Two(2) - (□) HP each
Condenser:	1 st - Ambient to Cascade Hx 2 nd - Cascade Hx to Evaporator
Circulation:	Cold wall, thermal convection
Refrigerant Control:	Capillary
Evaporator (high stage)	Cascade condenser
Chamber:	Stainless steel
Cascade (low stage):	Cold Wall
Voltage:	230 VAC
Running Amps:	11.2 Amps
Supply Plug:	5-15 NEMA
Shipping (Cubic Feet):	114
Weight:	915 pounds

Entre algunos otros modelos tenemos:

Cryotron LT 400

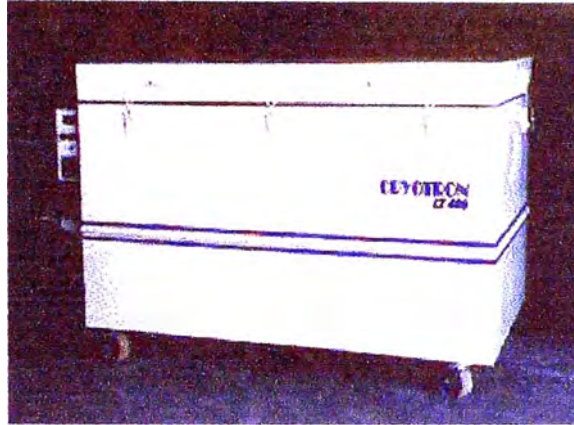


Figura 6.8 – Modelo LT400 Cryotron.

Caja interior - 60"L x 30"W x 30"H (1/4 pulgada acero Inoxidable)

Las paredes, Suelo y Tapa - 6" de Aislamiento

El peso: Aprox. 1875 libras

La Capacidad de la carga: 4000 libras

Cryotron LT 375



Figura 6.9 – Modelo LT375

Caja interior - 60"L x 30"W x 24"H (1/4 pulgada acero Inoxidable)

Las paredes, Suelo y Tapa - 6" de Aislamiento

El peso: Aprox. 1600 libras

La Capacidad de carga: 3200 libras

Cryotron LT 250



Figura 6.10 – Modelo LT250

Caja interior - 48"L x 24"W x 24"H (1/4 pulgada acero Inoxidable)

Las paredes, Suelo y Tapa - 6" de Aislamiento

El peso: Aprox. 1300 libras

La Capacidad de carga: 2500 libras

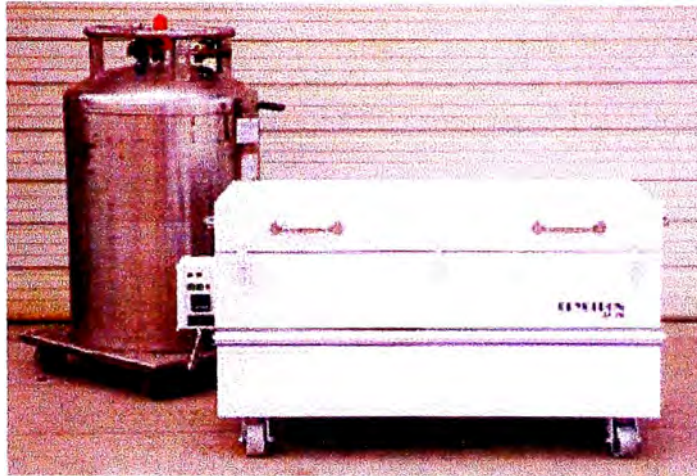
Cryotron LT 100

Figura 6.11 – Modelo LT100

Caja interior - 40"L x 16"W x 16"H (1/4 pulgada acero Inoxidable)

Las paredes, Suelo y Tapa - 6" de Aislamiento

El peso: Aprox. 875 libras

La Capacidad de carga: 650 libras

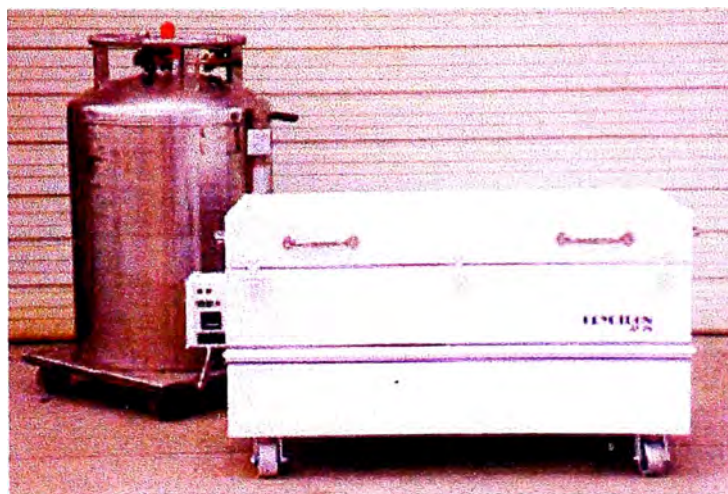
Cryotron LT 75

Figura 6.12 – Modelo LT75

Caja interior - 36"L x 12"W x 12"H (1/4 pulgada acero Inoxidable)

Las paredes, Suelo y Tapa - 6" de Aislamiento

El peso: Aprox. 775 libras

La Capacidad de carga: 650 libras

CI-420 – CRYOGENICS INTERNATIONAL



Figura 6.13 – Modelo CI-420

Dimensión interior - 40"L x 14"W x 12"H

CI-531 - CRYOGENICS INTERNATIONAL

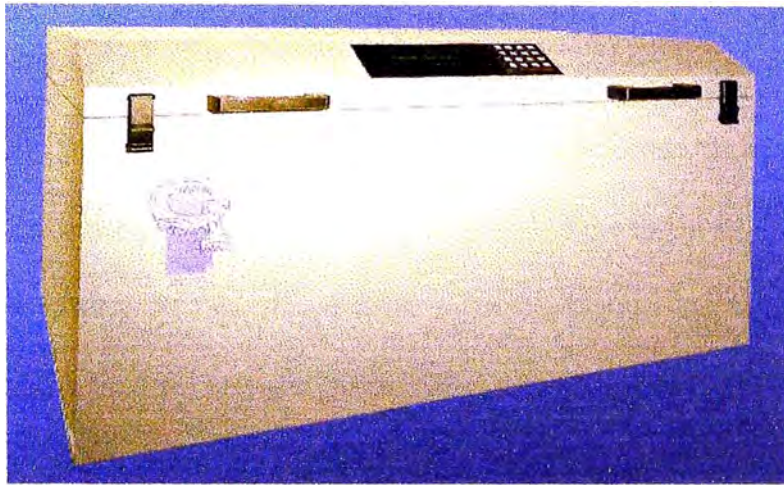


Figura 6.14 – Modelo CI-531

Dimensión interior - 30"L x 18"W x 17"H

CI-3125- CRYOGENICS INTERNATIONAL

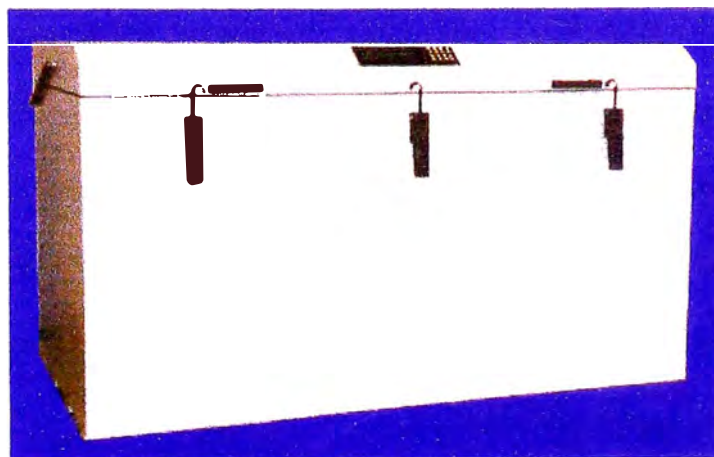


Figura 6.15 – Modelo CI-3125

Dimensiones interiores de 60" x 30" y 30". Este sistema de tratamiento criogénico profundo es capaz de conservar artículos muy grandes o pequeños. Equipado con la misma interfaz de uso fácil.

6.5.3 Controles de Temperatura

Un buen controlador de temperatura programable hace el trabajo fácil. Para la mayoría de las piezas, solo se necesita uno que pueda almacenar pocos programas. Hay procesadores controlados por computadora, pero obviamente cuestan un poco más, no son necesarios para un buen control de temperatura del proceso. El control de temperatura y del proceso usados en el tratamiento criogénico es simple, suficiente con un controlador de un solo programa, aproximadamente uno de \$ 250 trabaja muy bien. Estas unidades son suficientes para programar los cambios que pueden suceder durante el proceso. Un controlador de \$ 600 con 8 programas es mucho más de lo que se necesita. Es más importante establecer técnicas de carga adecuadas.

Las unidades controladas por computadora que existen en el mercado ofrecen pantallas con botones de selección desde donde se puede programar los parámetros del proceso. Pero también depende de que el operador introduzca la carga apropiada y que determine los parámetros para el proceso. Tan simple como es el proceso no parece ser necesaria otra característica. Si realmente se necesita una computadora, puede añadirse una tarjeta de comunicación RS 232, RS 485, o RS 422 para casi todos los controladores en el mercado. Pero los diagramas de registro trabajan bien y no requieren una computadora dedicada de recoger informaciones tan simples.

El registro de temperatura es a menudo vendido como una opción por la mayoría de los productores de equipos. Esto debería ser una característica estándar ya que puede valer su peso en oro. Nos da una verificación de lo que está sucediendo dentro del procesador. Debido a que el proceso dura mas o menos 3 días, es una buena idea monitorearlo y llevar un registro de lo que el procesador hace durante cada día.

Las termocuplas o RTD's pueden ser usados también. Parece haber muchas afirmaciones falsas acerca de la exactitud de la temperatura. Algunos fabricantes afirman que sus unidades mantendrán una exactitud de 1.5 o 1°. Ni los controladores de temperatura, ni las termocuplas ni los RTD's tienen esa exactitud, entonces es inexplicable que cualquiera pueda hacer esa afirmación. Incluso los controladores de última generación que cuestan miles de dólares no alcanzan esa exactitud, en el mejor de los casos estos alcanzan 1 ½° F y las termocuplas dependiendo del tipo usado tienen de 1 a 2° F de exactitud. Ahora la carga, el tipo de producto en la unidad, el flujo de gas, etc., todo eso afectará a la uniformidad de la temperatura en el procesador. Probablemente se alcance mas o menos 5° F.

6.5.4 Precios de procesadores criogénicos

Dependiendo de la capacidad, la precisión del procesador y de la forma de la entrada del procesador los precios pueden variar, la empresa DMP Cryosystems presupuesta sus equipos de la siguiente forma:

TOP LOADING CHEST

Chamber Size	Load Size	Cubic Feet	CryoTemper™ -300 to +550°F	CryoFurnace™ -300 to +1200°F
18w x 12d x 24L	14 x 10 x 20	3	\$23,972.00	\$28,722.00
24w x 24d x 36L	20 x 22 x 32	12	\$28,940.00	\$33,690.00
24w x 24d x 48L	20 x 22 x 44	16	\$31,033.00	\$36,203.00
30w x 30d x 48L	26 x 28 x 42	25	\$34,460.00	\$40,980.00
30w x 30d x 60L	26 x 28 x 54	31	\$36,740.00	\$44,160.00

FRONT LOADING SWING DOOR

Chamber Size	Load Size	Cubic Feet	CryoTemper™ -300 to +550°F	CryoFurnace™ -300 to +1200°F
30w x 42d x 30h	24 x 36 x 24	21	\$39,750.00	\$45,750.00
42w x 54d x 42h	36 x 48 x 36	55	\$45,500.00	\$54,500.00

FRONT LOADING GUILLOTINE DOOR

Chamber Size	Load Size	Cubic Feet	CryoTemper™ -300 to +550°F	CryoFurnace™ -300 to +1200°F
30w x 42d x 30h	24 x 36 x 24	21	\$46,750.00	\$52,750.00
42w x 54d x 42h	36 x 48 x 36	55	\$52,500.00	\$61,500.00

OPTIONS

Monitoring and Programming Software	\$1,800.00
Single Pen Strip Recorder	\$1960.00
Automatic Lockout Device	\$680.00

6.6 Aplicaciones Industriales del Tratamiento Criogénico

Después de años de haberse enseñado a las compañías como funciona este proceso, se ha visto ahorrar dinero en tiempo y energía, e incrementar sus ganancias debido a los beneficios que ofrece la herramienta tratada criogénicamente.

Entre los diferentes campos en los que se aplica este tratamiento tenemos:

- Industria Metalmecánica y de Fabricación
- Industria Plástica y de Caucho
- Sector Automotriz
- Industria Papelera
- Industria Forestal y Maderera
- Industria Electrónica
- Industria Cementera
- Industria de la Construcción
- Minería
- Industria Aeroespacial
- Industria Alimentaria (procesamiento de alimentos)
- Industria Petro-química
- Industria de Audio y música
- Industria Textil
- Imprenta
- Estampado

- Soldadura
- Fundiciones
- Agricultura
- Productos deportivos

Entre los materiales que se pueden procesar criogénicamente tenemos:

Aceros de herramientas, aceros inoxidable, aceros aleados, aleaciones no ferrosas, nylon, aluminio y sus aleaciones, carburos de tungsteno, materiales cerámicos, plásticos, cobre, titanio, latón, vidrio, bronce, etc.

En la siguiente tabla 6.2 se puede observar el % de incremento de la resistencia al desgaste de varios tipos de materiales usando el tratamiento criogénico a -110° F y a -310° F.

Tabla 6.2 – Tabla de % de incremento de la resistencia al desgaste de materiales

AISI #	Descripción del Acero	(-110 F)	(-310 F)
D-2	Alto carbono / Acero para matrices	316%	817%
A-2	Acero para matrices para trabajo en frío	204%	560%
S-7	Acero al silicio para herramientas	241%	503%
52100	Acero para cojinetes	195%	420%
A-10	Acero de herramienta grafitado	230%	264%
M-1	Acero rápido al molibdeno	145%	225%
M-2	Acero rápido Tungsteno / molibdeno	117%	203%
T-1	Acero rápido al Tungsteno	141%	176%

P-20	Acero para moldes	123%	130%
440	Acero inoxidable martensítico	128%	121%
430	Acero inoxidable ferrítico	116%	119%
303	Acero inoxidable austenítico	105%	110%
8620	Acero Níquel - cromo - molibdeno	112%	104%
C1020	Acero al carbono	97%	98%
AQS	Hierro fundido grafitado	96%	97%
T-2	Acero rápido al Tungsteno	72%	92%

FUENTE : Dr. R. F. Barron, Universidad Tecnológica de Louisiana

6.6.1 Herramientas de Corte y Herramientas en general

Entre las herramientas de Corte tratadas criogénicamente tenemos:

Cuchillas de sierra cinta	Cuchillas de la Cizalla
Escariador	Machos
Piezas fundidas	Cuchillas
Cincelador	Cuchillas de cepilladora
Cuchillas del Troquel cortador	Punzones
Terrajas	Brocas buriladoras
Brocas	Cuchillas de tajar
Piezas moldeadas en matriz	Tallador de engranajes
Fresa escariadora	Herramientas de troquelado
Pieza forjada	Herramientas de perforación

Las herramientas de corte son el mercado más grande para el proceso. La criogénia es muy útil para todas las herramientas, especialmente las de corte – carburos, aceros rápidos, herramientas revestidas o no revestidas. El incremento en el porcentaje de vida depende de muchos factores. El primero y más importante es el proceso de tratamiento térmico y la austenita retenida.

Otros factores que afectan los resultados son los correctos ángulos de corte. Diferentes aceros pueden requerir diferentes ángulos de corte, ángulos de inclinación, etc. Además, si se aplica un excesivo esmerilado, la herramienta no podrá hacer bien su trabajo esté o no tratada criogénicamente. Se necesita una adecuada lubricación y prácticas normales en el maquinado. Una vez que estos factores básicos estén bajo control, entonces el tratamiento criogénico será exitoso.

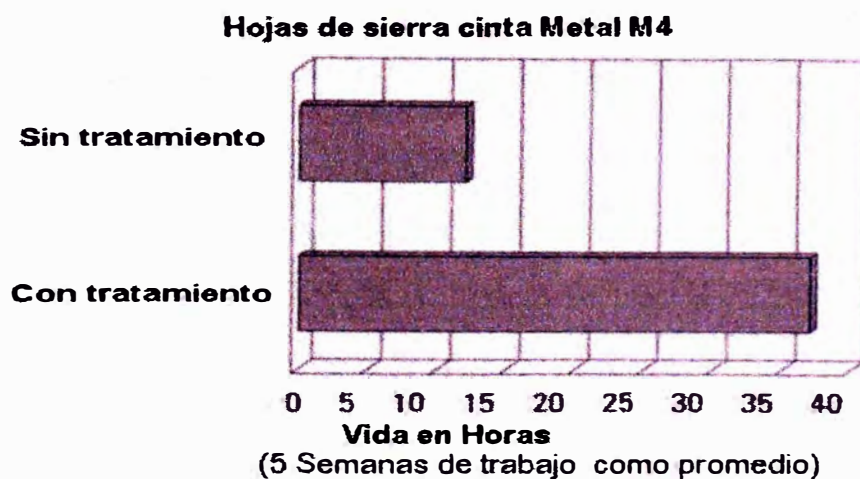


Figura 6.16 – Resultado del tratamiento criogénico en sierras cintas

No solo las herramientas se benefician sino que muy a menudo los productos producidos por la acción de las herramientas demostrarán mejoras. El aluminio vaciado a presión, fundido, colado, etc. criogénicamente procesado (para

eliminar tensiones) mostrará una reducción en la deformación o distorsión durante y después del maquinado. Esto es una gran ayuda para el maquinado cuando se producen piezas de tolerancias muy pequeñas o piezas que mantienen especificaciones de superficies planas.

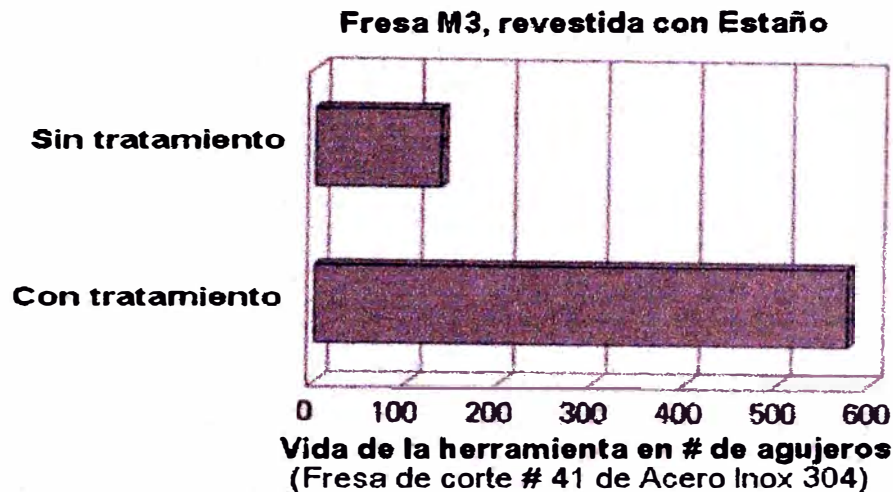


Figura 6.17 – Resultado del tratamiento criogénico en fresas

A diferencia del revestimiento, el proceso es efectivo en toda la herramienta, además, que pueden ser reafiladas y recibir los beneficios hasta que estén completamente gastadas. La tabla siguiente nos indica los resultados logrados por los usuarios finales, siguiendo el tratamiento criogénico.

Tabla 6.3 – % de incremento de resistencia al desgaste de herramientas

Herramienta	Industria	Material	Result.
Brocas	Industria aeronáutica	M42,M7,C2	300%
Fresa	Industria aeronáutica	M7	250%
Desbarbador	Universidad	Inconel	400%
Cortadora de engranajes	Industria metalmecánica	Ti-N coated	350%
Escariador	Industria metalmecánica	Carburos	300%

Estampas	Industria metalmecánica	M7	600%
Fresa	Industria aeroespacial	M42	450%
Fresa Helicoidal	Producción de turbinas	M2 -M7	300%
Rebanador	Industria plástica	M7	600%
Cincelador	Industria manufacturera	Carburos	500%
Desfibrador	Industria Papelera	M7	400%
Macho	Industria metalmecánica	C2 Carburo	600%
Dado	Fundición	Aleación Hi-Ni	300%
Escariador	Industria automotriz	Hi Níquel	250%
Fresa	Taller mecánico	Acero inox. 347	375%
Cortador de madera	Industria maderera	HSS	500%
Matriz de estampa	Industria manufacturera	D2	1000%
Electrodos	Soldadura	Soldadura	600%

El aluminio y el titanio también son procesados para poder estabilizarlos, ya que ellos son a menudo difíciles de manejar durante el mecanizado. Las herramientas o materiales múltiples (que constan de 2 o más piezas) necesitan ser separados en componentes individuales antes de ser procesadas, ya que los ratios de enfriamiento pueden variar ligeramente con los diferentes grados de metal.

Calsonic Yorozu Corporación, una subsidiaria de Tennessee de Isuzu, usa una gran cantidad de brocas helicoidales HSS para fabricar chasis. La broca es aproximadamente 1" de largo por 7/8" de diámetro y cuesta aproximadamente \$80. Dos brocas están montadas en un brazo de robot en una línea de ensamble y normalmente duran sólo para 100 agujeros. Tratar criogénicamente las

brocas costó aproximadamente \$10 y aumentó la vida de la herramienta entre 20% y 50%. La producción ahora está alcanzando entre 120 y 150 agujeros por broca con menos tiempo de paradas.

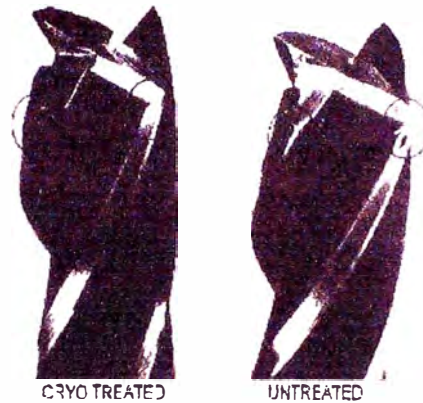


Figura 6.18 – Brocas M-42 de 7/8” de diámetro que fueron usadas en la máquina 355 T6

Tabla 6.4 – Resultados obtenidos por algunas compañías.

Compañía	Herramienta	Resultado
RS MACHINE & MFG. LTD, NISKU, ALBERTA	Fresas	100-200 %
TPS MCHINE, TPS, ALBERTA	Brocas	350-400%
REDWOOD PLASTIC, EDMONTON, ALBERTA	Cuchillas carburadas	150-200%
PETRO-CHEM FABRICATORS, EDMONTON, ALBERTA	Escariadores	100-150%
CENTRALWEB COLOR PRESS, EDMONTON, ALBERTA	Cuchillas de guillotina	100-150%
CHEETA MACHINING LTD, EDMONTON, ALBERTA	Escariadores	100-150%
KAMIN MACHINE CO. LTD, EDMONTON, ALBERTA	Fresas	100-150%
VANCOUVER GEAR WORKS, RICHMOND, BC	Cortadora de engranajes M2	100-150%

6.6.2 Insertos de Carburo

Cuchilla de martillo cincelador	Matriz de estampa
Troqueles cortadores	Herramientas de estampar
Brocas	Broca buriladora
Matriz de punzonar	Punzones
Fresa escariadora	Escariador
Herramientas de perforación	Hojas de sierra

**** Todas las herramientas anteriores son carburadas.***

Los insertos de carburo y herramientas carburadas responden de buena forma al tratamiento criogénico. Si no existe martensita o austenita en los carburos, la principal diferencia se da en la parte exterior del material donde se mantienen los granos de carburo en su lugar. La mayoría de los problemas asociados con el desgaste en carburos provienen o son producidos por la pérdida de granos de carburos en la superficie de corte porque los carburos no son sostenidos tan fuertemente como deberían estar.

El tratamiento criogénico aumenta la fuerza en que son sostenidos estos carburos para mantener los microgramos de carburos en la superficie externa. El tratamiento criogénico actúa también como aliviador de esfuerzos creados por las altas presiones del proceso de sinterización.

Generalmente los carburos tienden a duplicar su tiempo de vida una vez sometidos al tratamiento criogénico.

Hay otro factor que tiene efecto en algunas herramientas carburadas. En esas ocasiones, el tratamiento criogénico no duplica la vida de la herramienta de corte. En realidad no hace nada ¿porqué?. Algunos productores de carburos usan carburos reprocesados para fabricar una nueva herramienta carburada. Los carburos reprocesados son producidos tomando herramientas usadas, enfriándolos en nitrógeno líquido para hacerlos extremadamente frágiles y después se pulverizan para producir un material base que después es reformado en una nueva herramienta carburada. El resultado es que el material ya ha adquirido los beneficios del tratamiento criogénico y no mostrará ninguna mejora en un subsiguiente tratamiento.

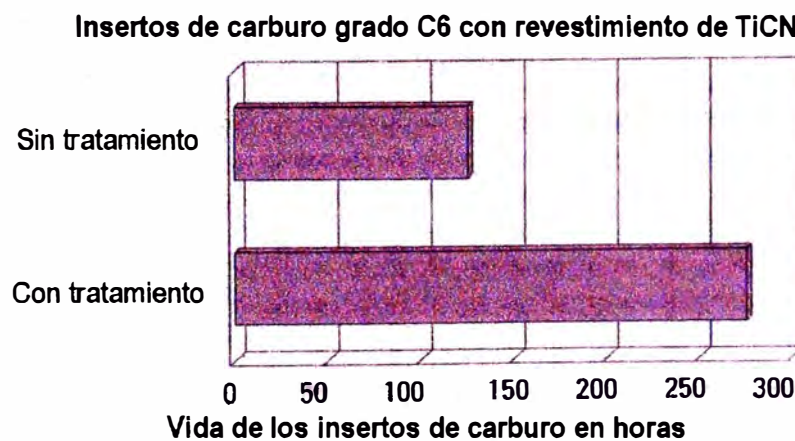


Figura 6.19 – Resultado del tratamiento criogénico en insertos de carburo

El tratamiento criogénico trabaja sinérgicamente con los revestimientos como el nitruro de titanio (TiN), los revestimientos actúan para reducir el coeficiente

de fricción entre la herramienta y el metal de corte. También actúan como una barrera para que la herramienta de corte no se suelde a la pieza. Los revestimientos generalmente no fallan por desgaste. El material debajo del revestimiento falla debido a la tensión repetida. El tratamiento criogénico retrasa la falla del material debajo del revestimiento y, por consiguiente, protege el revestimiento.



Figura 6.20 – Insertos de carburos antes y después del tratamiento criogénico

6.6.3 Prensas punzonadoras, frenos, cizallas

Matriz de punzonar

Frenos

Cuchillas trozadoras

Dados

Piezas fundidas

Matrices de estirar

Punzones

Herramientas laminadas

Cuchillas de cizallas

Matriz de estampa

Las herramientas de estampar y dados, punzones y cuchillas de corte se encuentran entre los primeros que muestran resultados positivos después de ser tratados criogénicamente. La mejor manera de procesar una nueva herramienta es tratarla criogénicamente y después esmerilar la pieza. El tratamiento criogénico no dificulta o facilita el proceso de esmerilado. Sin embargo, habrá una pequeña reintroducción de tensiones causadas por el intenso calor durante el proceso de esmerilado. Muchos fabricantes de herramientas no se dan cuenta que 3000° F (1649° C) o más se introducen a la superficie del metal durante el proceso de esmerilado. Estas tensiones recién creadas en la superficie externa pueden aliviarse mediante un tratamiento criogénico.

Se debe recordar que puede y debería haber un crecimiento después del proceso si existe una gran cantidad de austenita retenida. Inclusive buenos tratamientos térmicos con pequeñas cantidades de austenita retenida exhibirán algún crecimiento (pero será mucho menor). Se debería tratar de mantener siempre la misma dirección de grano para todos los componentes. En herramientas que ya han sido hechas y puestas en servicio, lo antes mencionado también se aplica.

Las matrices de estampar y los moldes de inyección de plástico usan el revenido para aliviar tensiones. Con el proceso de revenido se consigue un pequeño alivio de tensiones, sin embargo, con el tratamiento criogénico casi se consigue un completo alivio de tensiones y llega a ser un método útil para aliviar el aumento de tensiones posteriores. Se debe recordar que la

herramienta debe ser revenida después del primer tratamiento criogénico para estabilizar la martensita recién creada. No se requieren procesos posteriores de revenido ya que no existe transformación adicional de martensita.

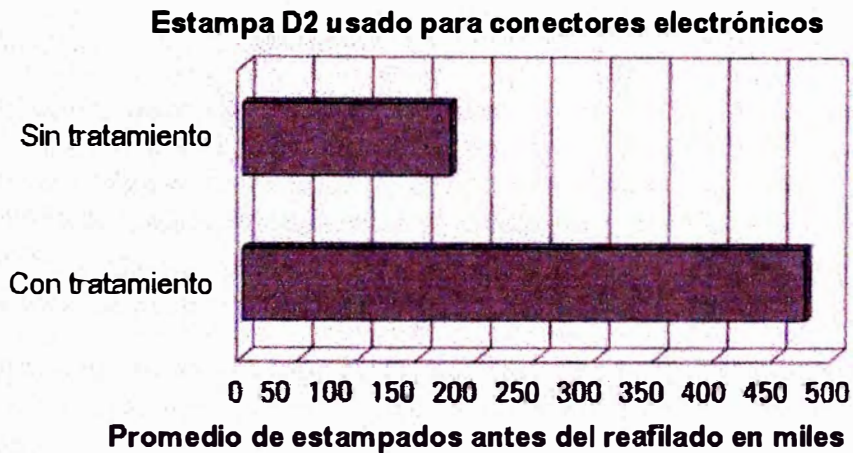


Figura 6.21 – Resultado del tratamiento criogénico en estampas

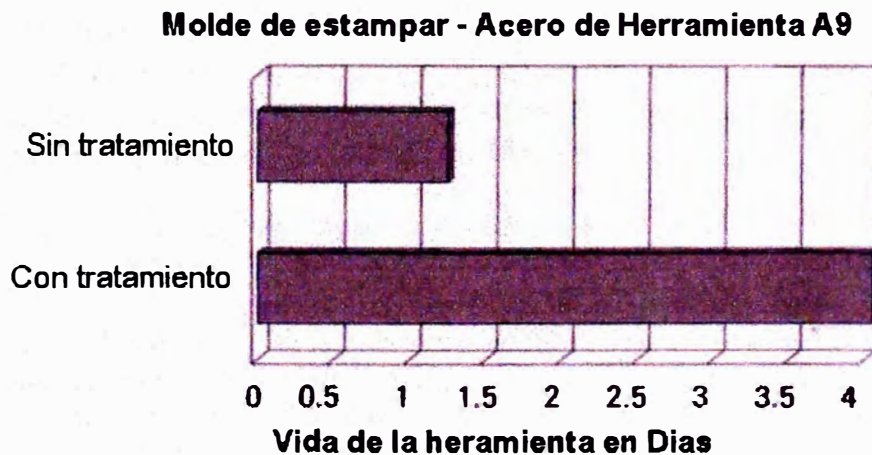


Figura 6.22 – Resultado del tratamiento criogénico en moldes de estampar

Otro beneficio del tratamiento criogénico en matrices es la reducción de la adherencia entre partes que es causada mediante un aumento de deformaciones de la superficie así como la aparición de picos. Debido a que en el tratamiento criogénico las superficies son niveladas, la posibilidad de colisión se reduce.



Figura 6.23 – Resultado del tratamiento criogénico en matrices de punzonar

6.6.4 Resistencia de las Aleaciones de Cobre, electrodos de soldadura y equipos de soldadura

El tratamiento criogénico mejora considerablemente la resistencia al desgaste y el tiempo de vida de las aleaciones de los electrodos de cobre. La resistencia a la deformación también se mejora considerablemente, y se requiere menos energía para operar la operación de soldadura.

Los ensayos documentados muestran que al menos un 100% (mínimo) de tiempo de vida se incrementa para los electrodos de cobre aleados, pero muchos usuarios reportan un 300% de aumento.

Hay muchas otras áreas en el campo de la soldadura por considerar. El primero, y el más obvio, son las uniones soldadas. El tratamiento criogénico y el proceso Subcero eliminan las tensiones en la soldadura.

Otras áreas para los soldadores son las guías de los alambres, las boquillas en la alimentación de alambre en las máquinas de soldadura. El desgaste de las boquillas mejora. En las boquillas para los equipos de corte por plasma también se mejora considerablemente la resistencia al desgaste. Las boquillas de corte por láser y las boquillas de chorreo de agua están siendo estudiadas, sin embargo, ya se han comprobado los resultados de las boquillas de los arenadores y de las boquillas usadas para pintar, mostrando resultados satisfactorios.

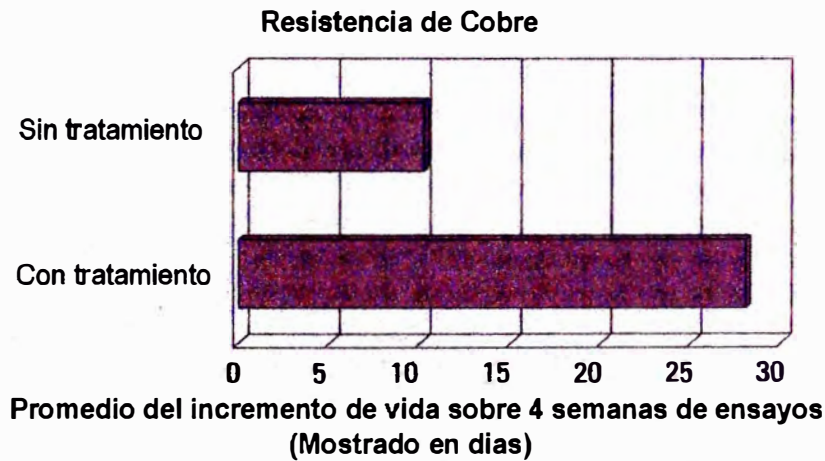


Figura 6.24 – Resultado del tratamiento criogénico en resistencias de cobre

6.6.5 Aplicación en la Industria Papelera

- | | |
|--------------------------|----------------------------|
| Ejes | Perforadores |
| Cuchillas de martillo | Punzones |
| Cuchillas trozadoras | Laminador de papel |
| Cubierta de matriz | Cuchillas de sierra |
| Cuchillas de guillotinas | Laminadores |
| Perforadores de papel | Cuchillas de desfibradoras |

Cuchillas de corte longitudinal

Recortadores

Cortadores de cintas

Cuchillas ranuradoras

Perforador de tejidos

Válvulas

El proceso ha sido hecho para alargar la disponibilidad de corte de las cuchillas de corte longitudinales y las cuchillas de las guillotinas. Una empresa productora de papel ha aumentado la duración de los ejes de sus máquinas principales de rollos de papel hasta en 12 años con grandes aumentos en la vida de estos ejes. Eso significa que se ha ahorrado mucho dinero.

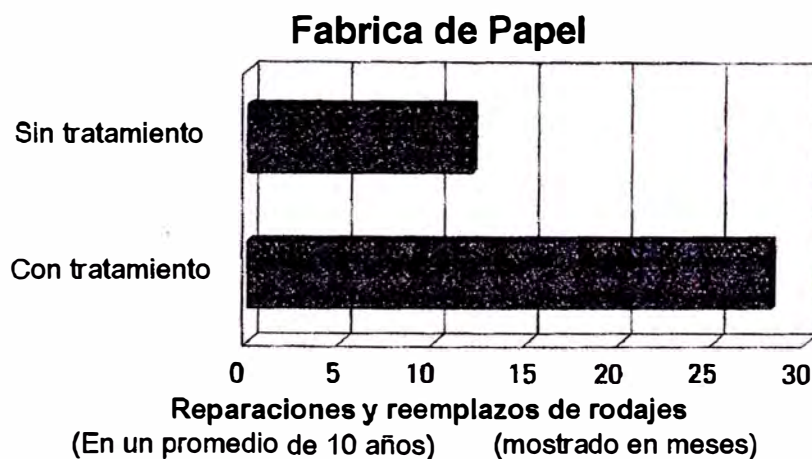


Figura 6.25 – Resultado del tratamiento criogénico en una fabrica de papel

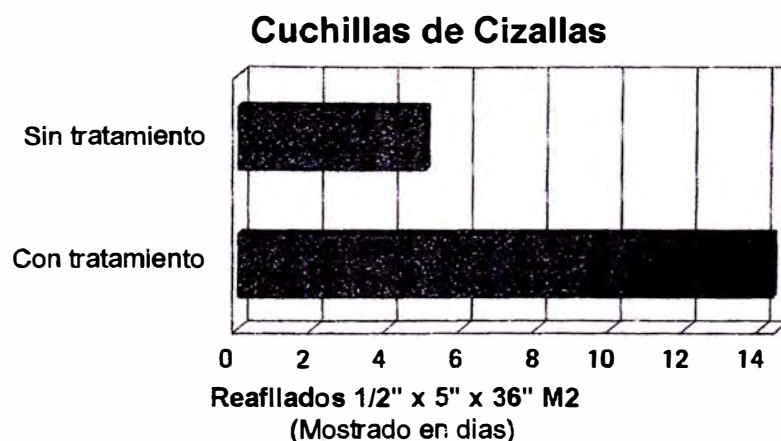


Figura 6.26 – Resultado del tratamiento criogénico en cuchillas de cizallas

El gráfico muestra el aumento promedio de vida desde 3.2 días para piezas no tratadas hasta 11.1 días en piezas tratadas en un período de 6 meses de ensayos.

6.6.6 Instrumentos musicales

Cuerdas de bajo

Saxofón

Platillos

Triángulos

Flautas

Trombones

Cuerdas de guitarra

Trompetas

Harmónicas

Tuba

Flautín

Los músicos siempre han deseado un instrumento que tenga una buena afinación. Un instrumento con una eficaz respuesta en los niveles lentos. Un instrumento dónde se corrigen fácilmente los problemas de entonación y que tenga un tono resonante y afinado.

La razón por la que muchos instrumentos no ofrecen estas características es en parte debido a los esfuerzos creados en el instrumento durante el proceso de fabricación. Muchas piezas individuales se fuerzan para adoptar su forma final. Esta tensión llamada tensión residual impide la resonancia que a su vez altera el desarrollo del tono, e incluso la afinación.

Los músicos de la Sinfónica y filarmónica alaban este proceso por producir mejores tonos en sus instrumentos musicales. Muchos de ellos dicen que este proceso tiene incidencia en el esfuerzo físico requerido para producir mejores sonidos musicales. Lo que está pasando para producir esa incidencia es que el tratamiento criogénico alivia las tensiones en varias partes del instrumento que, primero, nivelan y uniformizan las superficies del metal reduciendo la resistencia y la fricción del paso del aire por las válvulas. Esta acción de nivelación es causada por el realineamiento de las moléculas; el espacio entre las moléculas llega a ser uniforme y regular. Segundo, el alivio de esfuerzos elimina los esfuerzos residuales bruscos introducidos durante la fabricación del instrumento. Estas tensiones restringirían la formación de los tonos y harían que los músicos se esfuercen más para alcanzar el correcto tono de las notas. El tratamiento criogénico puede hacer que la música sea suave y fácil de producir. Simplemente mejora la resonancia del instrumento.

6.6.7 Armas de fuego y armas en general

Ejes de flechas de aluminio	Escopetas
Puntas de flechas	Revolver
Mecanismos de disparo	Pistolas
Cuchillas	Rifles

Primero, veamos la exactitud. La mayoría de los rifles tienen tensiones residuales y distorsiones a través de toda su estructura. Durante el disparo,

ocurre un calentamiento y enfriamiento que causará que el rifle se deforme irregularmente causando inexactitud en el disparo. Un rifle tratado criogénicamente disipará el calor más rápidamente y más uniformemente. La razón principal para la mejora de la exactitud es la eliminación de tensiones residuales que son inherentes en el rifle debido al proceso de fabricación. El rifle se pondrá más uniforme, libre de las tensiones y la microestructura más firme después del tratamiento criogénico profundo.

Un fabricante de rifles para el equipo olímpico de USA a mediados de 1980, desarrolló un rifle con mucha exactitud. Se usó un tipo de acero inoxidable, fueron producidos dos rifles del mismo material y fabricados bajo las mismas condiciones. El rifle criogénicamente tratado mostró mejor tensión de disparo. Después del examen metalúrgico, se determinó sin duda que las muestras de esfuerzos eran visibles en el rifle sin tratar.

Lo que este alivio de tensiones hace es eliminar la estructura inestable que responde al calor durante o después de cada disparo. Es bastante claro que el calor del disparo produce una reacción en las tensiones que causan la expansión / contracción.

Segundo, a causa del realineamiento de las moléculas, que se juntan y reorganizan la estructura de grano, la superficie del metal llega a uniformizarse, la porosidad del metal se reduce. En otras palabras los picos y los valles tienden a aplanarse. Esto no tiene nada que ver con la martensita o

austenita que nosotros sabemos es la principal razón para el incremento de la resistencia al desgaste. Esta nivelación de la superficie reduce el desgaste pero también incrementa la velocidad del proyectil causando un disparo más exacto.

Finalmente, el gatillo o mecanismo de disparo se beneficia del tratamiento criogénico aumentando su resistencia al desgaste.

Se han hecho algunos experimentos en balas tratadas, pero no se han confirmado los resultados, aparentemente la nivelación de la superficie de la bala antes de ser ensamblada a la pistola podría ayudar a que la bala produzca una trayectoria más exacta.

Los ejes de las flechas de aluminio tienden a volar de una forma más exacta una vez que las tensiones son eliminadas y las puntas de las flechas pueden ser afiladas de una forma más precisa.

Las cuchillas son una de las principales aplicaciones del tratamiento criogénico. Algunos de estos resultados son espectaculares. Las mejoras causan que debido a mejores afilados y mejor acabado final, se mejoren la resistencia de las cuchillas y reduzcan las imperfecciones. El proceso también reduce la pérdida de material ya que los afilados o maquinados ya no serán tan frecuentes como eran antes del tratamiento.

6.6.8 Automóviles, motocicletas, excavadores de nieve, aeronaves, y componentes Marinos

Ejes	Balancín
Rodamientos de bolas	Cojinetes
Árbol de levas	Bujías de encendido
Engranajes de transmisión	Transmisiones
Bielas	Juntas en U
Cigüeñal	Anillos
Camisetas de cilindros	Válvulas
Ejes del motor	Pistones
Múltiple de admisión	

Los componentes del motor tratados criogénicamente tendrán mejor resistencia al desgaste, pero el verdadero beneficio es el alivio de tensiones residuales. Cada parte, componente o pieza está hecha por severos maquinados, forjados, fundiciones, etc. Todas estas operaciones originan tensiones. Cada vez que la bujía se enciende, el combustible prende, el calor se transmite hacia las piezas o componentes, lo que produce que los componentes se expandan en diferentes direcciones a diferentes velocidades ya que los metales tienen diferentes coeficientes de expansión térmica. Esto causa fricción, desgaste y una pérdida de la potencia.

El tratamiento criogénico reduce el desgaste estabilizando los componentes. El proceso también nivela las superficies de los componentes, paredes del cilindro, anillos, pines y cada pieza que está en movimiento en el motor. La superficie nivelada reduce los problemas de adherencia y arrastre. En las piezas de transmisión, se produce la misma acción – los problemas de adherencia y arrastre son reducidos – pero, además, los engranajes tratados térmicamente mejoran su resistencia al desgaste debido a la transformación de la austenita. Esto, por tanto, permite facilitar la transmisión entre los dientes del engranaje.

La siguiente es una lista de otros efectos que el tratamiento criogénico tiene en motores, engranajes y partes móviles.

- Bloques de motores son más estables para el maquinado
- Fácil reemplazo de partes o piezas debido al mejoramiento de las conexiones
- Se reduce la fragilidad de las piezas.
- Reducción de la fricción.
- Disminución del desgaste y fragilidad en engranajes y ranuras.
- Los resortes de las válvulas duran más.
- Estabilidad y alivio de tensiones del aluminio.

Como se muestra en la figura 6.27, el pistón criogénicamente tratado tiene una superficie más resistente al desgaste, rindiendo mucho más. Esta aleación

mostrará estabilidad estructural, térmica y metalúrgica no encontrada en un pistón sin el tratamiento, así como el incremento de la resistencia al desgaste abrasivo. La fatiga se reducirá debido a una microestructura más compacta de la superficie. Además, se mejorará la resistencia a la corrosión proveniente de los gases reactivos calientes.

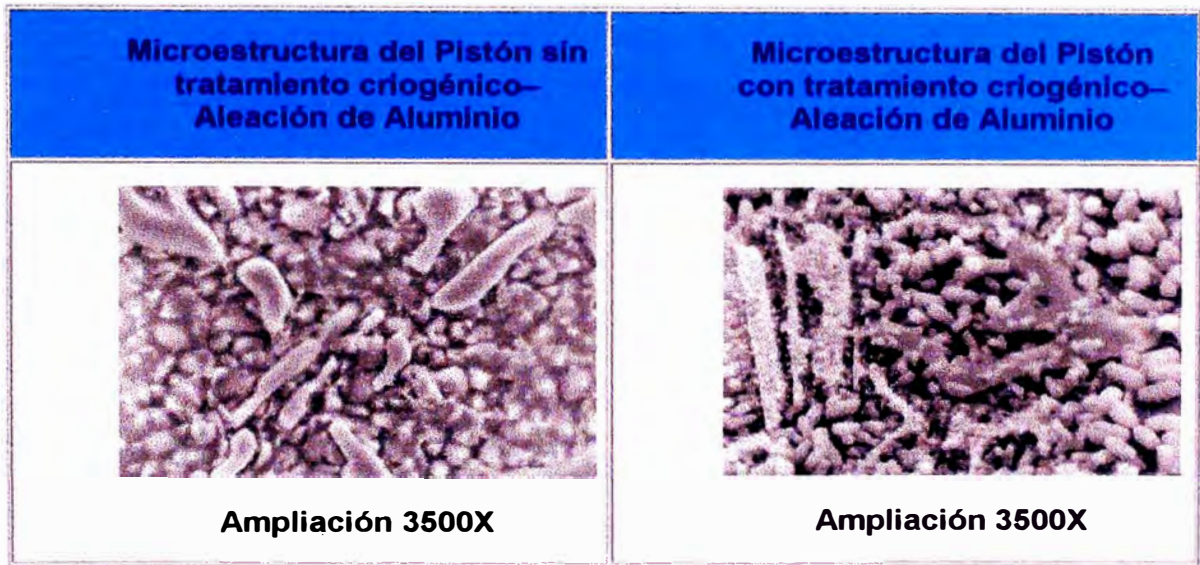


Figura 6.27 – Microestructura de un pistón de aluminio



Figura 6.28 – Beneficios del tratamiento criogénico en automóviles

A continuación se presenta un gráfico donde se observa el incremento de los caballos de fuerza después del tratamiento criogénico.

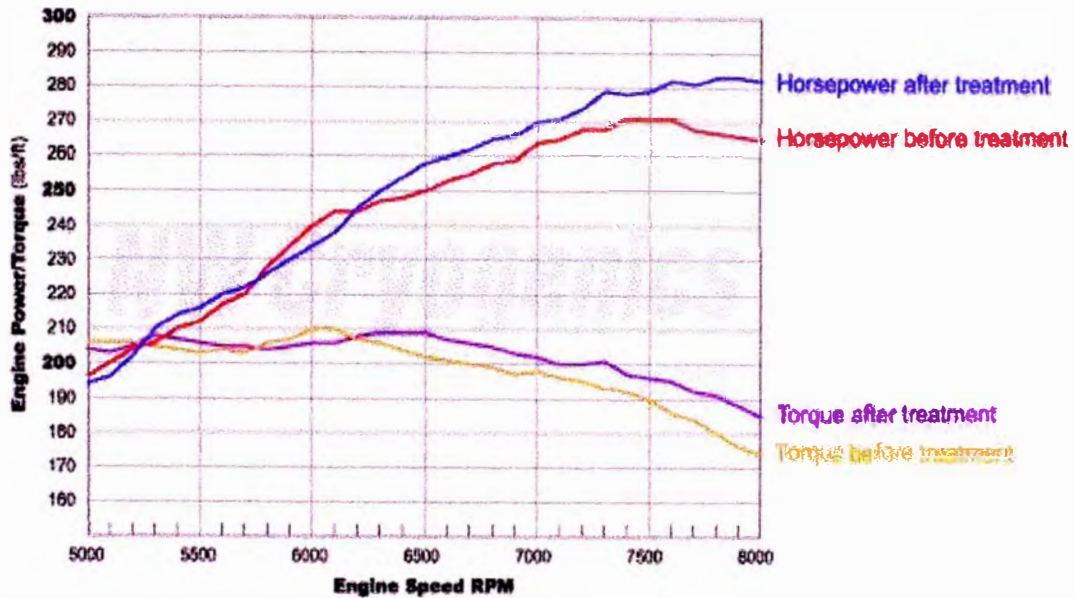


Figura 6.29 – Aumento de los caballos de fuerza debido al tratamiento criogénico

6.6.9 Aplicación en la Industria plástica

Cuchillas circulares

Pines

Matrices

Pasador eyector

Equipo de extrusión

Cuchillas granuladoras

Moldes de inyección

Fresa

Cortador rotatorio de metales

Cuchillas pulverizadoras

Brocas buriladoras

Cuchillas desfibradoras

Cuchillas de corte longitudinal

Teflón

Desbastador

Los plásticos criogénicamente tratados tienen muchos atributos deseables. Primero, los plásticos llegarán a ser más resistentes y más durables. Lo que pasa (como se sabe) es que cuando se hace una pieza de plástico, durante la etapa de solidificación, algunas moléculas se distribuyen en manera aleatoria y no uniforme.

Por otra parte las moléculas también se mueven a temperaturas bajo cero o temperaturas criogénicas, pero lentamente. Las moléculas se mueven y forman una configuración más densa, firme y realineada. Cuando retornan a la temperatura ambiente, las moléculas permanecen en la nueva configuración, produciendo más uniformidad y más espaciado que a su vez reduce las áreas o vacíos entre las matrices. El producto resultante tiene una mejor respuesta al desgaste y mejora el enlace entre moléculas. Este es un proceso de una sola vez que trata toda la pieza. No es solo un tratamiento superficial.

Otro efecto es la acción de nivelación en la superficie del material. Durante el realineamiento, las moléculas también se entrelazan mejor, lo que produce un cambio en la estructura de la superficie. Los picos y valles no desaparecen pero se atenúan considerablemente. Esto causa menos fricción y menos desgaste.

Con referencia a los moldes de plásticos – se debe tener mucho cuidado antes de tratar un molde con tolerancias exactas. Cuando se transforma grandes cantidades de austenita retenida, generalmente hay un cambio asociado al

crecimiento físico de la pieza. Si el molde tiene altas cantidades de austenita retenida y es físicamente imposible esmerilar o maquinarse el molde para ajustar las tolerancias, no se debe procesar el molde.

Los pines y los pines eyectores siempre deberían ser tratados criogénicamente para prevenir el cambio de tamaño que causan interferencias, fricción y fallas prematuras. Tratando criogénicamente estos pines se asegura la estabilización y que no haya crecimientos posteriores. La transformación de la estructura de grano permite prolongar el tiempo de funcionamiento de los moldes.

Todavía no se ha ensayado en todos los tipos y calidades de plásticos que existen.

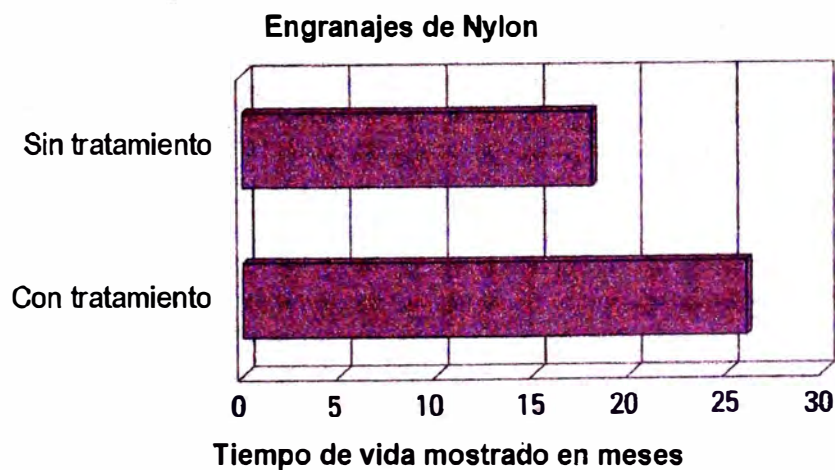


Figura 6.30 – Resultado del tratamiento criogénico en engranajes de nylon

6.6.10 Metales no ferrosos

Aluminio

Latón

Acero Inoxidable

Bronce

Carburo

Titanio

Cobalto

Los metales no ferrosos tratados criogénicamente exhibirán mejor respuesta al desgaste y más durabilidad. Durante el proceso de producción del metal (Aluminio, Latón, Acero inoxidable y Titanio), cuando se produce la solidificación, algunas moléculas se distribuyen en forma desordenada. Por otra parte las moléculas también se mueven a temperaturas bajo cero o temperaturas criogénicas, pero lentamente. Las moléculas se mueven y forman una configuración más densa, firme y realineada. Cuando retornan a la temperatura ambiente, las moléculas permanecen en la nueva configuración, produciendo más uniformidad y más espaciado que a su vez reduce las áreas o vacíos entre las matrices. El producto resultante tiene una mejor respuesta al desgaste y mejora el enlace entre moléculas. Este es un proceso de una sola vez que trata toda la pieza. No es sólo un tratamiento superficial.

Otro efecto es la acción de nivelación en la superficie del material. Durante el realineamiento, las moléculas también se entrelazan mejor, lo que produce un cambio en la estructura de la superficie. Los picos y valles no desaparecen pero se atenúan considerablemente. Esto causa menos fricción y menos desgaste.

El tratamiento criogénico también contribuye al alivio de tensiones en los siguientes materiales: Aluminio, Latón, Piezas fundidas, Cobre, piezas

maquinadas, Acero, Plásticos, Matrices, Moldes, piezas de precisión, piezas soldadas.

El tratamiento criogénico es una excelente forma de aliviar las tensiones en las piezas, antes, durante y después del maquinado. Es un proceso de alivio de tensiones completo, en toda la pieza. Este proceso funciona para piezas maquinadas, fundidas, plásticos o materiales compósitos. No destruye el contenido de carbono y deja la superficie limpia y libre de óxidos. Esencialmente amortigua o atenúa las tensiones en componentes maquinados o soldados.

El alivio de tensiones en materiales. Puede ser un hecho que ahorre dinero en las matrices de estampar y moldes de la industria. Las matrices o moldes deberían ser procesados después de tratamiento térmico pero antes de ser esmerilado o ensamblado para evitar la deformación dimensional o excederse de la tolerancia. Entonces una vez que la pieza ya está en producción, un rápido reproceso criogénico aliviará el aumento de las tensiones de compresión, haciendo que las herramientas y los moldes duren mucho más que los convencionales.

6.6.11 Aplicación en la Industria Maderera

Cuchillas de Sierra de cinta

Cuchillas de martillo cincelador

Cuchillas de Sierra de cadena

Formón

Cuchillas de sierras circulares	Cuchillas recíprocante
Cepillos	Lima
Brocas buriladoras	Gubias
Cuchillas de sierra caladora	Cuchillas de sierra de calar

El tratamiento criogénico es muy beneficioso para herramientas que trabajan con madera. Los carburos, acero rápidos, herramientas recubiertas o no, llegan a aumentar su tiempo de producción. Como sucede con las herramientas de corte, el incremento en el tiempo de vida depende de muchos factores fundamentales. El primero y más importante es el proceso de tratamiento térmico. Las herramientas que son fabricadas con un pobre o inadecuado tratamiento térmico mostrarán los mayores beneficios en cuanto a duración. Muy a menudo a causa de la naturaleza del producto o la economía, algunos tratamientos tienen que ser hechos de forma simple, no muy meticulosamente para fabricar el producto. Un pobre tratamiento puede ser el único método factible de tratar térmicamente un producto como las cuchillas de sierra cinta. La hoja de sierra debe ser afilada, los dientes cementados, pero en forma tal que no se quiebren al flexionarlos. Por esa razón, la hoja de sierra es a menudo solo endurecida con flama o inducción. Los dientes son llevados hasta la temperatura de austenización mediante una temperatura localizada, seguido por un baño de agua o aceite para templar los dientes. Después se aplica otra forma de calor para revenir los dientes. Todo esto es hecho en una banda que se transporta a varios pies por minuto. La estructura de grano cerca de la parte inferior del diente se encuentra en varias fases de transformación, y el revenido

fue realizado en forma tan rápida que aún existirá martensita inestable y una gran cantidad de austenita retenida.

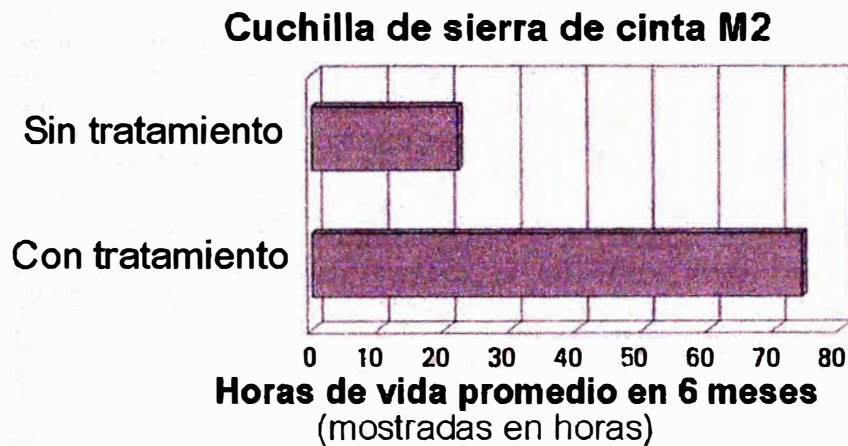


Figura 6.31 – Resultado del tratamiento criogénico en cuchillas de sierra.

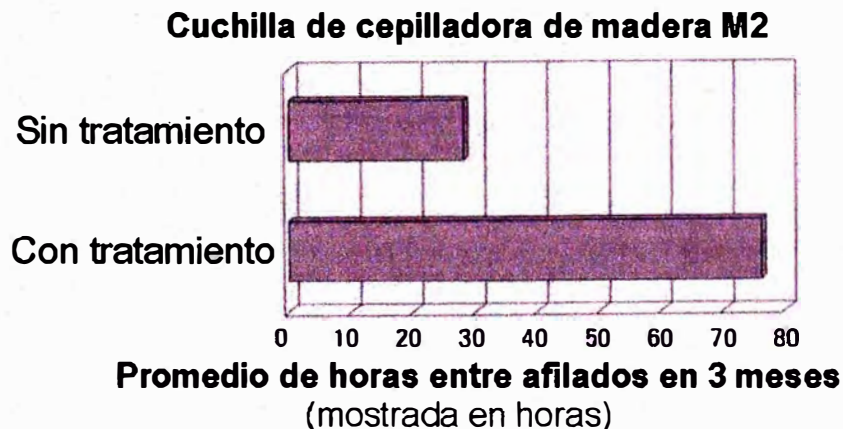


Figura 6.32 – Resultado del tratamiento criogénico en cuchillas de cepilladora.

Otro método de fabricación que causa muchos daños a la estructura del metal es el usado para hacer las sierras cintas de punta carburadas. El extremo que es soldado alcanza altas temperaturas de soldadura mediante el calor localizado aplicado en el punto de aplicación. Una vez que las puntas alcancen esto, son afiladas para formar una acción de corte uniforme. Pero todo este trabajo crea

tensiones en el material base que afecta el alineamiento de los dientes de corte mientras las tensiones ejercen presión sobre los dientes de una forma u otra. El otro factor involucrado es el material que une los granos de carburo en la superficie de corte. Una vez tratado criogénicamente, las tensiones son eliminadas y el material de unión se refuerza para dar mejor durabilidad lo que permite al carburo quedarse en ese lugar y durar más.

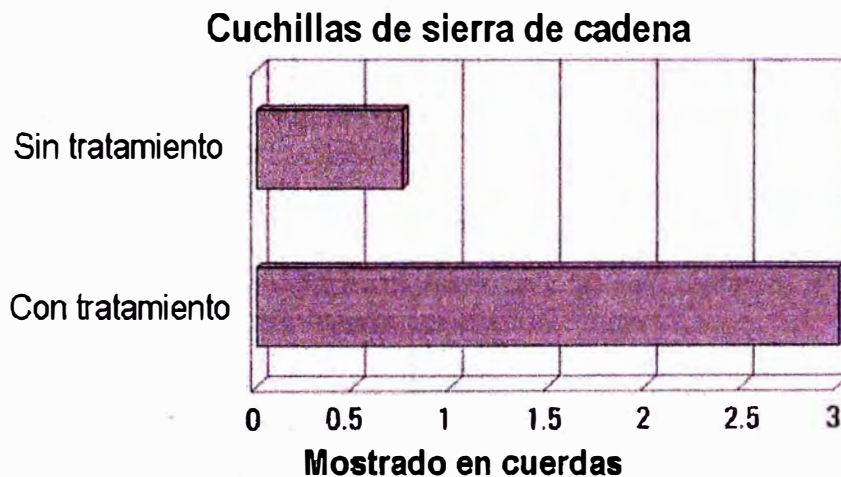


Figura 6.33 – Resultado del tratamiento criogénico en cuchillas de sierra de cadena

Otros factores que pueden afectar los resultados, son los ángulos de afilado o de corte. Las herramientas para trabajar madera pueden requerir una gran variedad de ángulos de corte, ángulos de ataque, holguras o juegos, etc. Además, si se practica un severo esmerilado o un pobre control de esmerilado, la herramienta no reflejará los beneficios con o sin tratamiento térmico. Muchas personas esmerilan las herramientas de corte y las vuelven azules, después hacen otra fina pasada para eliminar el color. Se necesita interpretar

correctamente la velocidad de esmerilado. Una vez que estos factores básicos estén bajo control, el tratamiento criogénico será realmente beneficioso.

6.6.12 Aplicación en componentes electrónicos

Parlantes

Tubos de vacío

Transformadores

Circuitos impresos

Cableado

Amplificadores

Componentes electrónicos

El tratamiento criogénico cambia la forma del flujo de corriente en un conductor. Así como el aluminio o Latón en las aplicaciones anteriormente mencionadas, el cobre, estaño y el plomo usados en la industria de la electrónica son afectados por el tratamiento criogénico. Todos estos materiales mostrarán un incremento en la resistencia al desgaste y más durabilidad, pero también mostrarán un mejor índice de conductividad. Cuando estos materiales se encuentra en el estado fundido durante el proceso de fabricación, mientras se da lugar la solidificación, algunas moléculas se distribuyen en forma desordenada. Por otra parte las moléculas también se mueven a temperaturas bajo cero o temperaturas criogénicas, pero lentamente. Las moléculas se mueven y forman una configuración más densa, firme y realineada. Cuando retornan a la temperatura ambiente, las moléculas permanecen en la nueva configuración, produciendo más uniformidad y más espaciado que a su vez reduce las áreas o vacíos entre las matrices. El producto resultante tiene un

mejor flujo de corriente eléctrica, también refuerza las uniones soldadas para evitar la rotura de las mismas. Los materiales de los circuitos impresos pierden las tensiones que tenían, esto ayuda a que duren más. El incremento en la conductividad ha sido medido entre 5% y 10%. Esto ayuda a que los cables, las uniones soldadas y transformadores funcionen más eficientemente.

6.6.13 Equipos deportivos

Bates de Aluminio para Béisbol

Palos de golf

Piezas de bicicletas

Anzuelos de pescar

Bolas de golf

Raquetas de tenis

Los palos de béisbol golpean la bola más lejos, usando menos energía del golfista. Tratando criogénicamente un bate de béisbol también se incrementará su tiempo de vida mediante la eliminación de tensiones no deseadas, permitiendo al bate mantener su forma. Uno de los problemas con los bates de aluminio es la tendencia a abollarse. Estas abolladuras provienen de esfuerzos desiguales dentro del bate. Eliminando los esfuerzos, el bate absorbe el impacto, reduciendo la deformación. Las distancias de bateo se incrementan en 2% a 3% y no suenan mucho.

Las cuchillas de los patines para hielo se mantienen afiladas un tiempo más largo y requieren de menos afilado (menos pérdida de material), muchos patinadores manifiestan poderse desplazar a una velocidad más rápida.

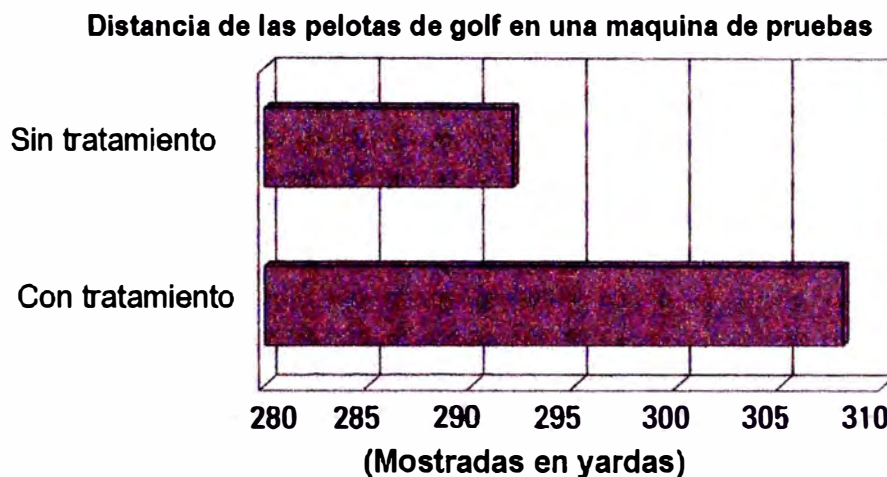


Figura 6.34 – Resultado del tratamiento criogénico en pelotas de golf

Los palos de golf que han sido tratados criogénicamente (metal, madera y acero) tendrán más exactitud, debido a la eliminación de la vibración existente. Cuando el palo de golf entra en contacto con la pelota, una tremenda cantidad de energía se libera. La mayor porción de la energía se transfiere a la pelota mientras vuela y la energía restante se transfiere al palo de golf en forma de vibración. El tratamiento criogénico no solo elimina la vibración del palo sino también reduce la energía perdida en la torsión y en el torque de la cabeza del palo lo que produce un vuelo más exacto de la pelota.

Las pelotas de golf que han sido tratados criogénicamente muestran un incremento en la distancia entre 5 a 10 yardas.

CAPITULO VII

RESULTADOS OBTENIDOS

7.1 Descripción del problema con los discos de corte en Eternit

Las planchas de Eternit están hechas a base de: caolín, bentonita, sílice, cemento, celulosa, carbonato de calcio, hidróxido de aluminio y agua. Estos elementos al mezclarse forman una pasta consistente la cual es cortada por los discos de corte a una velocidad de 1200 rpm, estos discos están acoplados a unos motores en la máquina Apiladora que giran a 1200 rpm y que dimensionan las planchas Superboard (1.22 x 2.44 m).

En la máquina Apiladora existen discos de corte transversal y discos de corte longitudinal. Estos discos están sometidos al desgaste abrasivo de la plancha de fibrocemento, fuerzas de impacto y vibración debido a los motores acoplados.

Estos discos eran afilados hasta 4 veces por turno (8 horas) con el fin de que no queden rebabas en las planchas después del corte.

Debido a los componentes abrasivos de las planchas como sílice y cemento, se tenía un consume acelerado del filo y por lo tanto continuas paradas en planta para el respectivo cambio de los discos.

7.2 Características de los discos de corte de Eternit

- **Material:** carburo – tungsteno
- **Diámetro exterior:** 295 mm
- **Espesor:** 3mm
- **Ángulo de corte:** 18 grados
- **Peso:** 1.9 Kg.
- **Marca:** LINSSEN
- **Dureza:** 65 RC

Los discos son afilados desde su diámetro original de 295mm hasta 240mm como límite de desgaste. El número de reafilados permitido es de 60 veces aproximadamente. La profundidad de afilado varia desde 0.8 mm hasta 1.2 mm en casos severos.

La piedra usada en el proceso de esmerilado es de marca Norton modelo ASD91R75B76 y el lubricante usado es el Aceite Emulsol, de Mobil.



Figura 7.1 – Disco de corte LINSSEN original.



Figura 7.2 – Maquina Apiladora en funcionamiento.

7.3 Tratamiento efectuado en los discos de corte

- **Tipo:** Criogénico sub-cero
- **Temperatura:** - 80°C

- **Duración del proceso:** 2 días
- **Empresa que realiza el servicio:** Aceros Bohler del Perú.
- **Dirección:** Luis Castro Ronceros N° 777 Lima – Perú
- **Representante:** Ing. Miguel Carrión Castilla.
- **Cargo:** Jefe de Planta
- **Teléfono:** (051) 425 – 4746 (051) 336 – 7872
- **E-mail:** traterm@bohlerperu.com

7.4 Pruebas y ensayos realizados

Desde diciembre del 2001 a octubre del 2003, se han efectuado ensayos comparativos de discos de corte con la finalidad de determinar la ganancia en vida útil.

Los discos tratados criogénicamente fueron instalados exclusivamente en la máquina Apiladora de planchas planas y los ensayos se efectuaron en las posiciones de los discos longitudinales y transversales.

Para el análisis de los ensayos se consideró la información siguiente:

- Tipo de disco (con o sin tratamiento)
- Posición de disco (longitudinal o transversal).
- Fechas y horas de entrada y salida, horas de funcionamiento.

- Números de afiladas
- Evolución de la calidad del corte (dentro del periodo de uso).
- Tipo de plancha (características: espesor)

El procedimiento de afilado de los discos de corte se realizó en un torno habilitado para dicha función, en el cual la piedra de afilado giraba a 1200 rpm y el disco a 90 – 95 rpm.

7.5 Procesamiento de datos

En la siguiente tabla se registran los resultados obtenidos en los discos de corte de la maquina Apiladora (Planta 2) para una producción de planchas superboard de 4 mm.

Tabla 7.1 – Duración del filo de los discos de corte.

Posición	Nº	Sin tratamiento		Con tratamiento		% Horas	% Metros
		Horas	Metros	Horas	Metros		
Long.	1	2.53	2,545.18	4.50	4,527.00	84.38	84.38
	2	2.40	2,414.40	4.59	4617.54		
Trans.	1	4.97	1,212.68	6.52	1,590.88	32.30	32.30
	2	4.88	1,190.72	6.51	1,588.44		
	3	4.93	1,202.92	6.52	1,590.88		

De la tabla 7.1 se puede observar que los discos de corte con tratamiento criogénico duraron casi el doble (84% más) que los discos que no se trataron criogénicamente, es decir, cortaron más metros de pasta antes de ser cambiados.

Además se observó que el acabado final del corte con los discos tratados criogénicamente era de mejor calidad (menos rebaba).

A continuación se muestran estos resultados en gráficos comparativos:

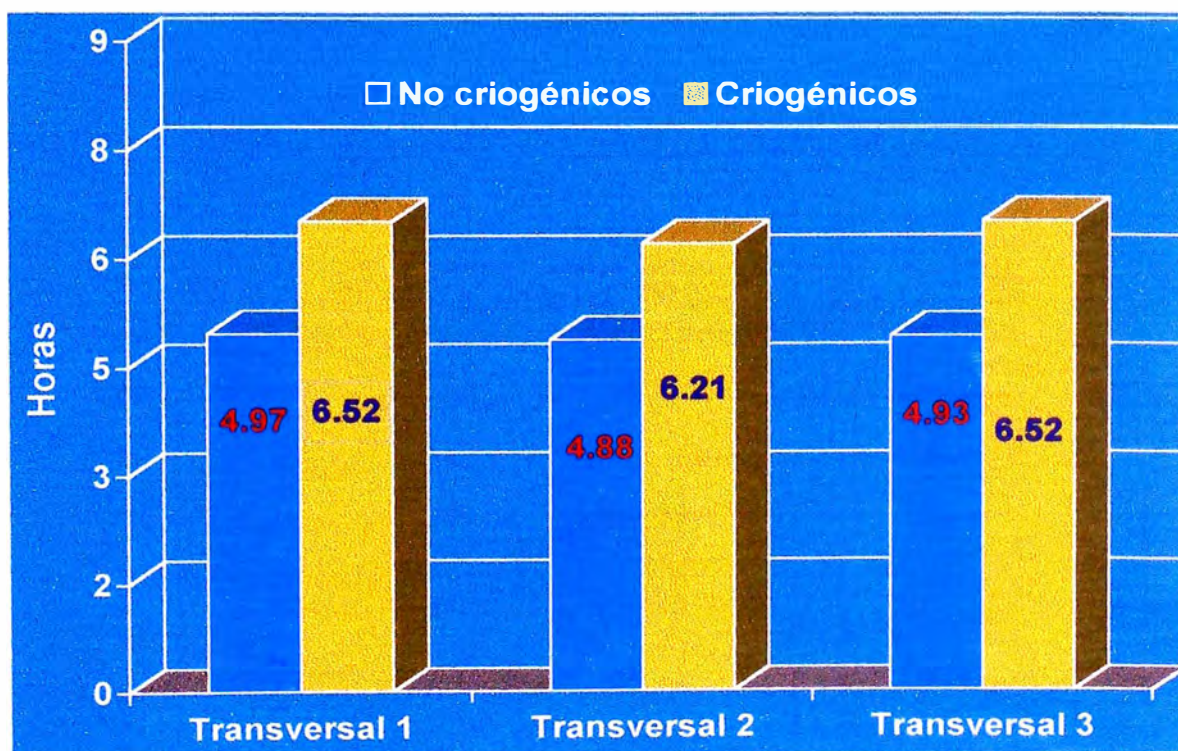


Figura 7.3 – Duración de discos transversales.

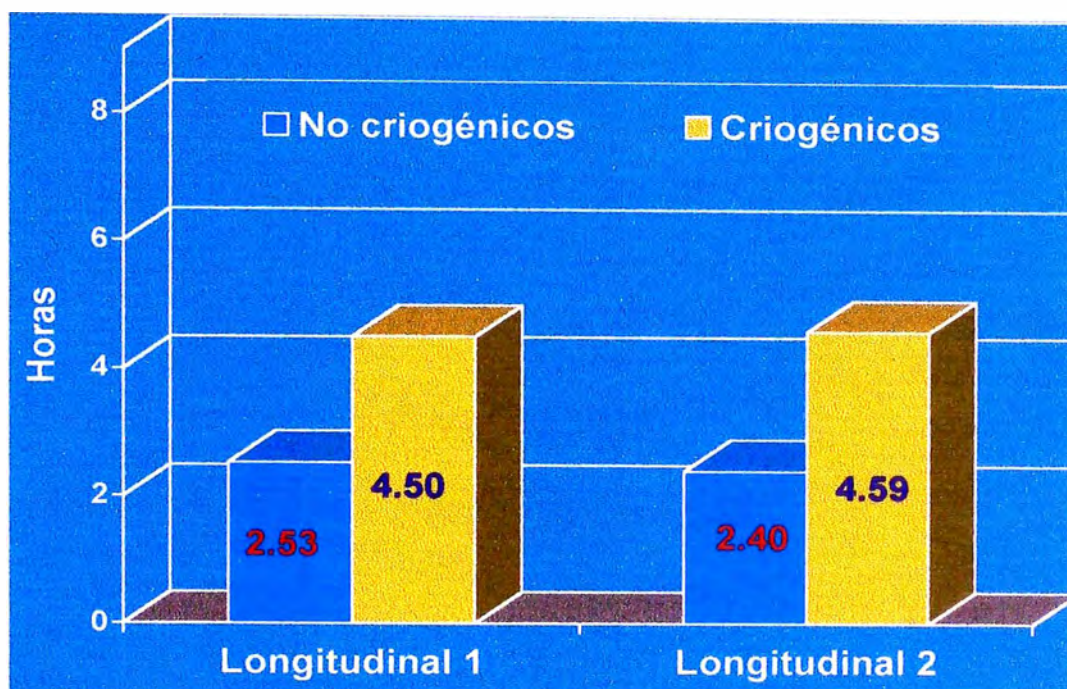


Figura 7.4 – Duración de discos longitudinales

También se redujeron los índices de paradas por cambio de discos de corte

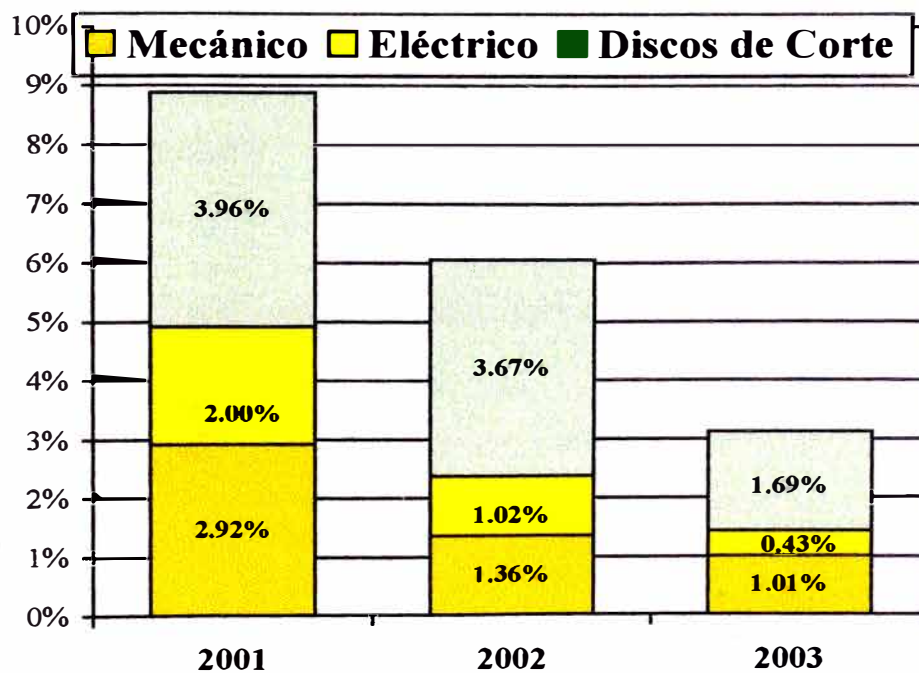


Figura 7.5 – Porcentaje de paradas de producción por discos de corte

CAPITULO VIII

COSTOS

8.1 Costos del tratamiento efectuado en los Discos de corte de Eternit

Como ya se ha dicho, el tratamiento usado para los discos de corte de Eternit es el Tratamiento Criogénico Subzero hasta $- 80^{\circ} \text{C}$, efectuado en Aceros Bohler del Perú.

El costo del tratamiento criogénico subzero en Aceros Bohler depende del peso de la herramienta y es el siguiente:

- Costo del tratamiento criogénico Subzero: U.S.\$ 1.77 x Kg.

Este tratamiento dura 2 días.

Ya que cada disco LINSENN pesa 1.9 Kg, el costo del tratamiento por disco de corte es:

- Costo del tratamiento por disco: U.S.\$ 3.36

8.2 Análisis Comparativo

A. Costo del tratamiento de los discos de corte en Bohler

Costo del tratamiento por disco US \$	Número de discos empleados al año	Costo del Disco de Corte LINSSEN US \$
3.36	16	2000.00

Costo del tratamiento de los 16 discos US \$	53.76
---	--------------

B. Ahorro por incremento de vida de los discos de corte

De los 16 discos de corte empleados al año 6 discos son longitudinales y 10 discos son transversales.

B.1 Discos longitudinales

Ahorro debido a los discos longitudinales (considerando un beneficio del 84% de aumento de vida) US \$	10,080.00
--	-----------

B.2 Discos transversales

Ahorro debido a los discos transversales (considerando un beneficio del 30% de aumento de vida) US \$	6,000.00
---	----------

Ahorro anual debido al aumento de vida de los discos de corte US \$	16,080.00
--	------------------

C. Ahorro por disminución de horas de máquina parada

Considerando solo la Planta 2, específicamente la máquina Apiladora.

Considerando 24 horas diarias durante 360 días de operación de la máquina Apiladora tenemos 8640 horas de operación de la máquina Apiladora.

Del año 2001 al 2003 hubo una disminución del: $3.96 - 1.69 = 2.27$ % de paradas de máquina.

Costo de maquina Apiladora parada por hora US \$ 200.00

Ahorro por disminución de horas de paradas - máquina apiladora US \$	39,225.60
---	------------------

D. Ahorro por disminución del tiempo de afilado de discos

Ahorro de tiempo empleado para afilar cada disco - Horas	0.5
--	-----

Considerando que cada disco puede ser reafilado 60 veces

Horas por reafilado de los 16 discos	480
--------------------------------------	-----

Considerando US \$ 2.00/ Hr el costo de mano de obra y de la máquina afiladora

Ahorro anual por disminución del tiempo de afilado de los discos US \$	960.00
---	---------------

**AHORRO TOTAL
ANUAL US \$**

56,211.84

Estos costos son sólo de la máquina Apiladora de Planta 2, siendo la máquina de Planta 5 un caso similar.

8.3 Costos del tratamiento en diversos tipos de materiales y herramientas

A continuación listaremos los precios del tratamiento criogénico profundo para diferentes tipos de herramientas:

Tabla 8.1 – Precios del tratamiento en fresas y machos

Fresas, Machos, Escariadores, Avellanador y Brocas buriladoras					
Longitud: 0-4" Dia.	Precio	Longitud: 4-8" Dia.	Precio	Longitud: 8-12" Dia.	Precio
1/4"	\$2.00	1/4"	\$3.00	1/4"	\$4.00
3/8"	\$3.00	3/8"	\$4.50	3/8"	\$6.00
1/2"	\$4.00	1/2"	\$6.00	1/2"	\$8.00
5/8"	\$5.00	5/8"	\$7.50	5/8"	\$10.00
3/4"	\$6.00	3/4"	\$9.00	3/4"	\$12.00
7/8"	\$7.00	7/8"	\$10.50	7/8"	\$14.00
1"	\$8.00	1"	\$12.00	1"	\$16.00

Tabla 8.2 – Precios del tratamiento en cuchillas circulares

Cortadores de engranajes, Cuchillas circulares*					
4" Dia. corte		5" Dia. corte.		6" Dia. corte	
Ancho frontal	Precio	Ancho frontal	Precio	Ancho frontal	Precio

Bielas	\$6.00	\$6.00	\$6.00	\$6.00	\$6.00	\$6.00
Pistones	\$5.00	\$5.00	\$6.00	\$6.00	\$6.00	\$6.00
Árbol de levas	\$15.00	\$15.00	\$20.00	\$20.00	\$25.00	\$30.00
Bombas de agua			\$15.00	\$15.00	\$20.00	\$20.00
Piñones			\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00
Portadiferencial			\$50.00	\$50.00	\$50.00	\$50.00
Cigüeñal	\$30.00	\$50.00	\$100.00	\$115.00	\$120.00	\$125.00
Bloque de motor	\$75.00	\$125.00	\$250.00	\$300.00	\$375.00	\$400.00

Tabla 8.5 – Precios del tratamiento en instrumentos musicales

Instrumentos musicales	
Ítem	Precio por Ítem
Cuerdas	\$1.00
Boquillas	\$7.00
Trompeta	\$14.50
Trombón	\$17.00
Campanas	\$20.00
Platillo	\$25.00
Flauta	\$45.00
Saxofón	\$80.00
Tuba 3/4	\$150.00
Tuba 4/4-5/4	\$155.00

CONCLUSIONES

- Incremento de la vida útil de los discos de corte longitudinales en un 84% comparado con los discos sin tratamiento.
- Incremento de la vida de los discos de corte transversales en un 30% comparado con los discos sin tratamiento.
- Disminución del tiempo de la operación de afilado de los discos de corte en un 50%.
- El acabado final del corte de los discos tratados criogénicamente es mejor comparado con los discos que no son tratados criogénicamente.
- Los discos con tratamiento criogénico son más resistentes a los impactos.

BIBLIOGRAFÍA

- /1/ **ASM Handbook**, Vol. 8, (1973), *ASM International, Materials Park, OH 44073.*
- /2/ **Cryogenics**, William E. Bryson, Hanser Garner, Cincinnati OH, 1999.
- /3/ **Ciencia e Ingeniería e los materiales**, Donald R. Askeland, International Thompson.
- /4/ **Tratamientos térmicos de Aceros y sus prácticas de Laboratorio**, Dora K. De Grinberg, Limusa, México, 1986.
- /5/ **Fallas de los tratamientos de los metales**, Nora Lindenvald, Argentina.
- /6/ **Tratamientos térmicos de los aceros**, José Apraiz Barreiro, Dossat, España.
- /7/ **Fundamentos de manufactura moderna**, Mikell Groover, México.
- /8/ **Diccionario para Ingenieros**, Luis Robb, Editorial Continental, Mexico, 2002.
- /9/ **Fundamentals of Engineering Materials**, Thornton, Peter A., and Vito J. Colangelo.. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 1985.
- /10/ **Deep Cryogenic Treatment of Tool Steels** , D.N.Collins, *Heat Treatment of Metals*, 1996.
- /11/ **Cryogenic Process Update Advanced Materials and Processes**, Dennis J. Kamody, June 1999.

- /12/ **Cryogenic Treatment of Metals to Improve Wear resistance**, R.F.Barron,
Cryogenics, August 1982, pp 409-413
- /13/ *Fuerst, J.D. Cryotreatment, Panacea or Black Magic. 30 may 1996. On-line.*
Available from Netscape http://www-csa.fnal.gov/csa_bin/csa_spring96/
- /14/ *Frozen Gears. 2 Jan 1998. On-line. Available from Netscape*
<http://www.carbotecheng.com/www.duro-chrome.com/articles>
- /15/ *History of Cryogenic Tempering. 3 Mar 1998. On-line. Available from Netscape*
<http://www.pm300.com/history>

APÉNDICE

**A.-RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LA
EMPRESA DIVERSIFIED CRYOGENICS.**

**B.-MICROGRAFÍA DE ALGUNOS METALES TRATADOS
CRIOGÉNICAMENTE.**

**C.-ROLE OF ETA-CARBIDE PRECIPITATIONS IN THE WEAR
RESISTANCE IMPROVEMENTS OF FE-12CR-MO-V-1.4C TOOL
STEEL BY CRYOGENIC TREATMENT.**

**D.-CRYOGENIC TREATMENT OF METAL PARTS BY RAHUL
CHILLA.**

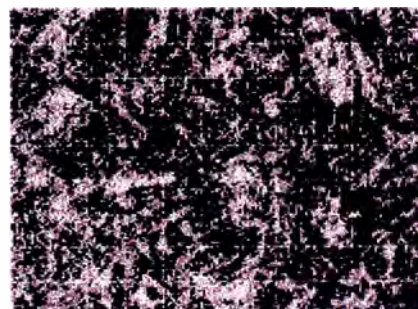
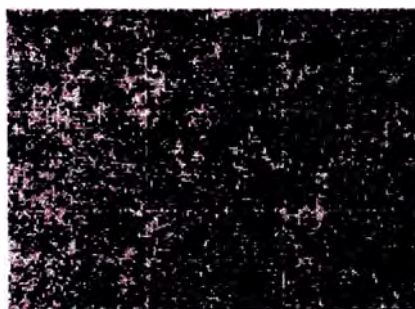
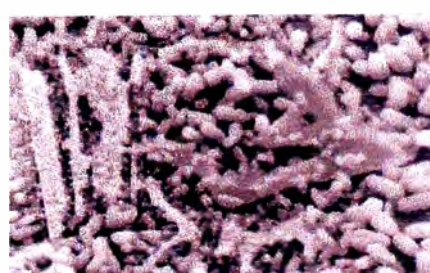
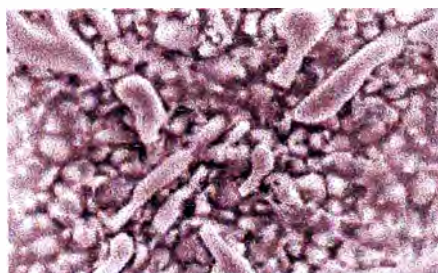
**A. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LA EMPRESA
DIVERSIFIED CRYOGENICS.**

Field Tool Test Results								
Tool Type	Tool Material	Type of Coating	Tool Mfg.	Application	Material Machined	Before Cryo	After Cryo	%Gain
DRILLING								
Drill 5/8	HSS	N/A		Drilling	304 Stainless	1,200	3,600	200%
Drill 24/32	Carbide	N/A		Drilling	12L14	20,000	24,500	23%
Drill	HSS/M2	N/A		Drilling	Alum Diecast	165	1,000	440%
Drill	HSS	Tin		Drilling	1010 Steel	2,500	7,500	300%
Drill 3/8	C2 Carbide	Tin		Drilling	1010 Steel	1/2-3/4 hr	12 hrs	1000%
Drill 3/8	C2 Carbide	N/A		Drilling	1010 Steel	12/-3/4 hr	1 1/2 hrs	400%
Drill 3/8	M42	N/A		Drilling	1040	200 parts	600 parts	200%
SCREW MACHINE								
Form Tool	C2 Carbide	N/A		Screw Machine	10B21	4,000	7,000	75%
Form Tool	C2 Carbide	Tin		Screw Machine	1010	1,000	2,500	150%
Form Tool	C2 Carbide	Tin		Screw Machine	1018	2,500	4,000	60%
Form Tool	C2 Carbide	N/A		Screw Machine	1010	1,000	2,000	100%
Form Tool	C2 Carbide	N/A		Screw Machine	1010 stress	3,000	7,600	153%
Form Tool	C2 Carbide	N/A		Screw Machine	1018	1,000	2,500	150%
INSERT TOOLING								
Insert	Carbide	Tin		Finish	12L14	9,000	20,000	122%
Insert	Carbide	Tin		Knee Tool	12L14	4,000	12,500	213%
Insert	Carbide	Tin		Cut-Off	12L14	4,000	12,500	213%

Insert	Carbide	N/A		Finish Form	1010	1,000	3,000	200%
Insert	Carbide	Tin		Finish	1010	2,500	3,000	20%
MISCELLANEOUS TOOLING								
Broach Spline	Carbide	N/A		Broaching	12L14	1,500	3,283	118%
Stacking Punch	Carbide	N/A		Punching	1010 Strs Prf	1,500	3,000	100%
Keyway Cutter	Carbide	Tin		Cutting	416 Stainless	500	700	40%
Cutter	Carbide	Tin		Cutting	1010	2,500	3,500	40%
BAND SAW BLADES								
Band Saw	Bi-Metal	N/A	Amada	Cutting	304 Stainless	4 1/2 hrs	13 1/2 hrs	300%
Band Saw	Bi-Metal	N/A	Morse	Cutting	A36	11 hrs	24 hrs	125%
Band Saw	Bi-Metal	N/A	Lennox	Cutting	A36	10 hrs	27 hrs	175%
METAL STAMPING/PUNCHING								
Die Set	CPM10U	N/A		Stamping	Copper	60,000	100,000	66%
Punch/Die	M2	N/A	Amada	Punching	1040	1 shift	2 shifts	100%
Punch/Die	M2	N/A	Cleveland	Punching	6061			300%

B.-MICROGRAFÍA DE ALGUNOS METALES TRATADOS**CRIOGÉNICAMENTE**

Metal	Antes del tratamiento criogénico	Después del tratamiento criogénico
--------------	---	---

S7**ALUMINIO**

C.-ROLE OF ETA-CARBIDE PRECIPITATIONS IN THE WEAR RESISTANCE IMPROVEMENTS OF FE-12CR-MO-V-1.4C TOOL STEEL BY CRYOGENIC TREATMENT.

1. Introduction

Cold treatment (subzero treatment), as an indispensable part of heat treatment of alloy tool steels, offered significant increases in the wear resistance. It is widely accepted that a major factor contributing toward its success is the removal of retained austenite. Conventional cold treatment has been carried out at higher than 173 K. This temperature is believed to be sufficient to fully transform any retained austenite to martensite in the quenched microstructure. However, more recent evidence has shown that wear resistance is further enhanced by cryogenic treatment at ultra-low temperature (ultra-subzero treatment), such as liquid nitrogen temperature. Despite the numerous practical success of cryogenic treatment and research projects undertaken worldwide, no conclusive metallurgical understanding of this treatment has been established.

A wide range of experimental techniques has been applied to investigate the atomic displacement of carbon and microstructural changes in martensite during tempering, including X-ray diffraction, electron microscopy and diffraction, Mossbauer spectroscopy, atom probe field ion microscopy, electrical resistivity, dilatometric and calorimetric analysis.

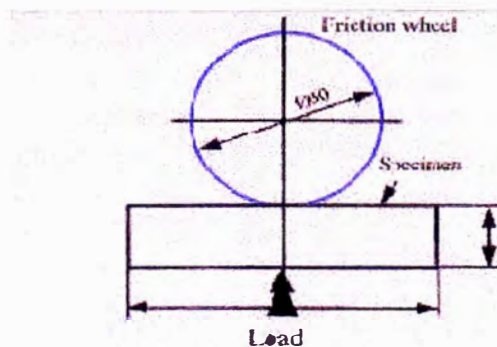
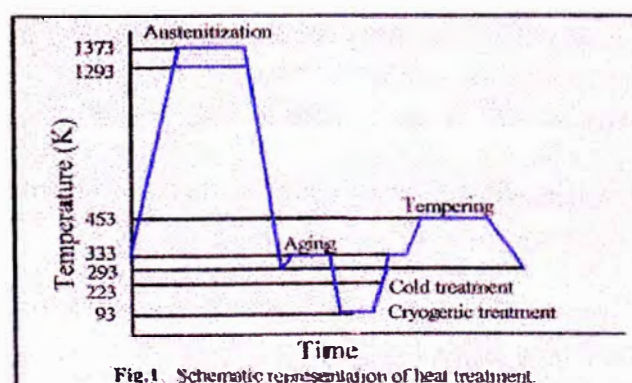
According to the present state of knowledge the structural evolution of martensite on tempering can be divided into the following sequence of processes: (a) the 0-th stage, the formation of carbon atom clusters, modulated structures and ordered structures, (b) the first stage, where the martensite decomposes into low carbon martensite containing 0.2 to 0.3 wt% C and transition carbide particle, (c) the second stage, the decomposition of retained austenite into ferrite and cementite, (d) the third stage conversion of the transition carbide into cementite and complete loss of the tetragonality of martensite.

Although a lot of words about tempering behavior have been done, a complete and satisfactory understanding of the mechanisms of the structural changes involved has not yet been obtained. The 0-th stage, *i.e.*, prior to carbide precipitation, and the first stage were of interest in the last decades. However, not so much attention has been paid to studying the effects of cryogenic treatment on the carbide precipitation in martensite during tempering.

The aims of the present study, therefore, are to investigate metallurgically the wear resistance and the microstructure of tempered alloy tool steels after quenching, after cold treatment at 223 K and after cryogenic treatment at 93 K.

2. Experimental Procedure

Alloy tool steel with composition (wt%), 1.44C, .3Si, 0.4Mn, 122CR, 0.84Mo, 0.43V, 0.022P and 0.008S was used. Heat treatment was performed at a constant heating rate of 0.17 K/s up to 1073 K in a vacuum furnace at 4×10^{-3} Pa. followed by quenching to room temperature and aging at 333 K to avoid crack. The martensite start temperature (M_s) of this alloy is approximately 373 K to avoid crack. Cold treatment at 223 K and cryogenic treatment at 93 K were carried out. Figure 1 shows a typical heat treatment cycle of experiments.



The specimens for the wear resistance with a size 25x50x10mm were ground and polished mechanically after tempering at 452 K for 1.8 ks. A schematic diagram of a sample-on-wheel wear test machine is shown in Figure 2. A friction wheel which has the same chemical composition as the specimens was quenched and tempered with a hardness HV780. **No lubrication was used.** The friction wheel rotated at a

peripheral speed from 0.5 to 3.62m/s, the sliding distance was from 200 to 600m and the applied load was 21N. The wear rate, $Ws=Bb^3/8rPL$, was calculated, where B is thickness of the wheel. b is width of wear, r is the radius of the wheel, P is the applied load, and L is the sliding distance.

The volume fraction of retained austenite was determined by X-ray phase analysis at room temperature. Peaks {211} of martensite and peaks {311} of the retained austenite were employed. The thin sheets of approximately 100 μ m in thickness for the observation of transmission electron microscopy (TEM) were austenitized and quenched by the same condition as mentioned above. The pressure of nitrogen atmosphere at 20 Pa was controlled in order to avoid decarburization due to oxidation and/or evaporation during heat treatment. According to chemical analysis, the carbon content of the heat treated sheets has been confirmed to be unchanged. Tempering was carried out at 453 K for 600s after cold treatment and cryogenic treatment. The \varnothing 3mm discs were punched and jet-polished to perforation using an electrolyte of 10% HClO₄ and 90% CH₃COOH at 283 K.

3. Results

3.1. Wear Resistance

The variation of the wear rate with sliding speed in Fig. 3 for specimens austenitized at 1293 K, quenched and ultra-subzero treated at 93 K. Finally tempering was carried out a 453 K for 1.8 ks. The wear rate of specimens after cryogenic treatment is smaller than that of-as-quenched specimens (without any subzero treatment) for whole sliding speed. Furthermore, it decreases dramatically at high sliding speed. The cryogenic treatment result show 110 to 600% improvement. The wear rate shows a minimum at the sliding speed of 1.14 and 1.63 m/s for specimens without and with cryogenic treatment, respectively.

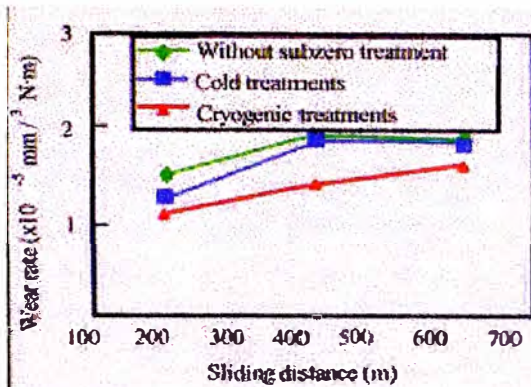


Fig. 4. Wear rate vs. sliding distance for specimens quenched, subzero treated at 223 K and ultra-subzero treated at 93 K, austenitization at 293 K and tempering at 453 K for 1.8 ks. Sliding speed is 1.14 m/s

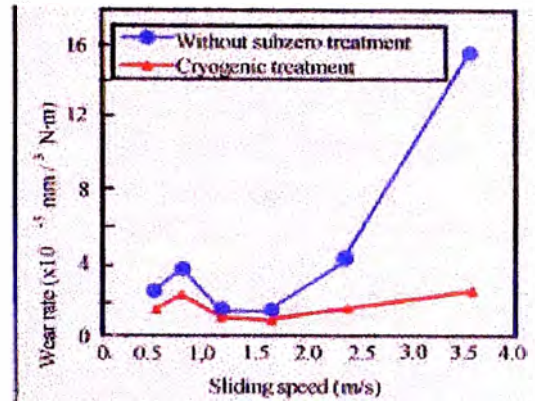


Fig. 5. Wear rate vs. sliding speed for specimens both with and without cryogenic treatment, austenitization at 1293 K and tempering at 453 K for 1.8 ks. Sliding distance is 200m.

In Fig. 4, the variation of the wear rate with sliding speed is shown for specimens quenched, subzero treated at 223 K and ultra-subzero treated at 93 K. The wear rate of as-quenched specimens is larger than that of specimens after cold treatment and cryogenic treatment at sliding distance 400 and 600m, the specimens after cold treatment have almost the same wear rate as as-quenched specimens. However, the specimen after cryogenic treatment have a smaller wear rate than as-quenched specimens and specimens after cold treatment for any sliding distance.

3.2 X-Ray Diffraction Analysis

The volume fraction of retained austenite is plotted against the subzero treatment temperature in Fig. 5 for specimens austenitized at 1293 and 1373 K. The volume fraction of retained austenite is 12% for as-quenched specimens after austenitization at 1293 K, and approximately 6% for specimens after cold and cryogenic treatment. However, it decreases with treating temperature going down for specimens austenitized at 1373 K. Cold treatment reduces the column fraction of retained austenite drastically. Nevertheless, cryogenic treatment reduces it slightly relative to cold treatment.

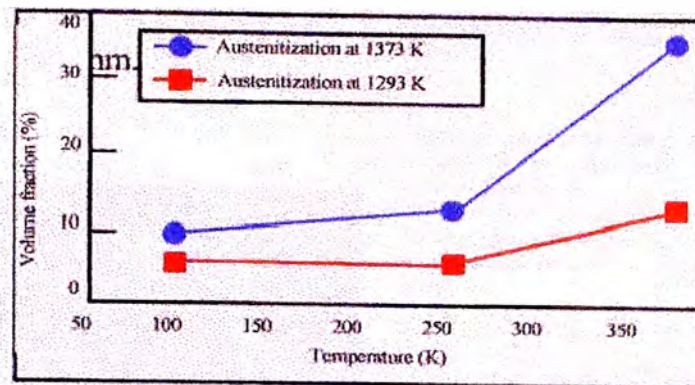


Fig.5. Volume fraction of retained austenite vs. subzero treatment temperatures

3.3 Structure Observation of TEM

3.3.1 As-quenched and Tempered Structure

The microstructure of as-quenched specimens consist of mainly fine twinned martensite and retained austenite, the spacing between twins being a few tens.

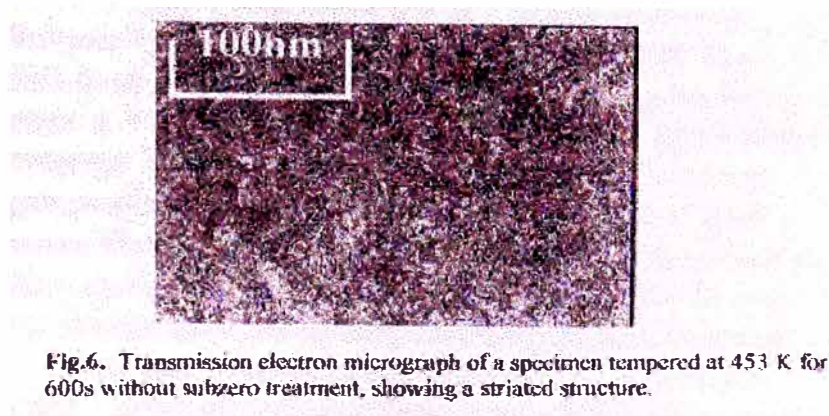


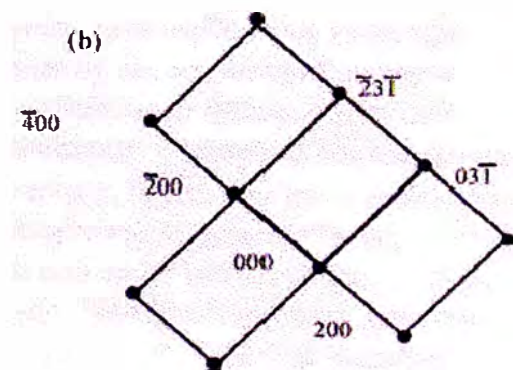
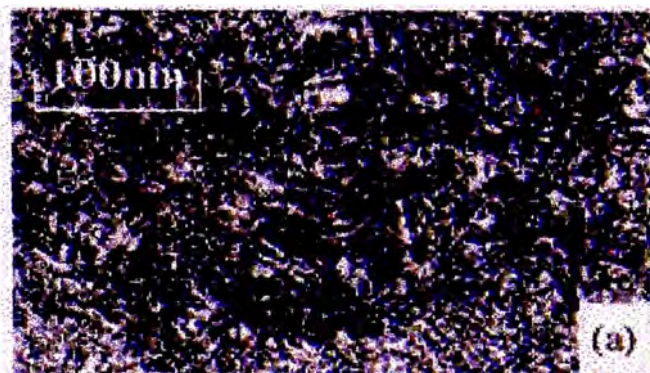
Fig.6. Transmission electron micrograph of a specimen tempered at 453 K for 600s without subzero treatment, showing a striated structure.

The bright-field image of Fig. 6 shows the microstructure of specimens quenched and tempered at 453 K for 600s. The structure is mainly constructed with martensite and retained austenite. In the martensitic regions, many plates are internally twinned and some of the twins are extremely fine, the spacing between twins being a few tens nm. On close examination, the twinned martensite shows coarse striated structure, which has been interpreted as the modulated structure produced by the spinodal decomposition, *i.e.*, two variants of the carbon-rich region. But there is a great difference from the results of Taylor and others. Only one set of fine parallel line

contrasts was seen in the bright-field image. The fine striations were spaced about 1nm apart on average.

3.3.2 Microstructure after Cold Treatment

Figure 7(a) shows the bright-field image of specimens subzero treated at 223 K and then tempered. Coarse tweedlike structure corresponding to two orientation variants was present. This fine scale modulated structure has a wavelength of about 5nm. **However, carbide cannot be observed in the modulated microstructure.** Figure 7(b) is an index pattern, which consists of a [013] martensite zone. Inspection of diffraction pattern revealed streaking due to spinodal decomposition during the 0-th stage of tempering.



(a) Bright-field electron micrograph of a specimen subzero treated at 223K and tempered, showing a tweedlike structure.

(b) Indexed pattern of tweedlike structure.

3.3.3 Microstructure after Cryogenic Treatment

The microstructure of the martensite after cryogenic treatment and tempering was remarkably changed, shown in Fig.8(a). In most of the areas appeared fine carbide particles developed in the boundary of twins. In different areas, fine carbide particles appeared at the points which have a considerable diffusing density. Some rodlike carbide particles parallel to each other appeared and varied in size from 5 to 10mm in cross-section and from 20 to 40 mm in length.

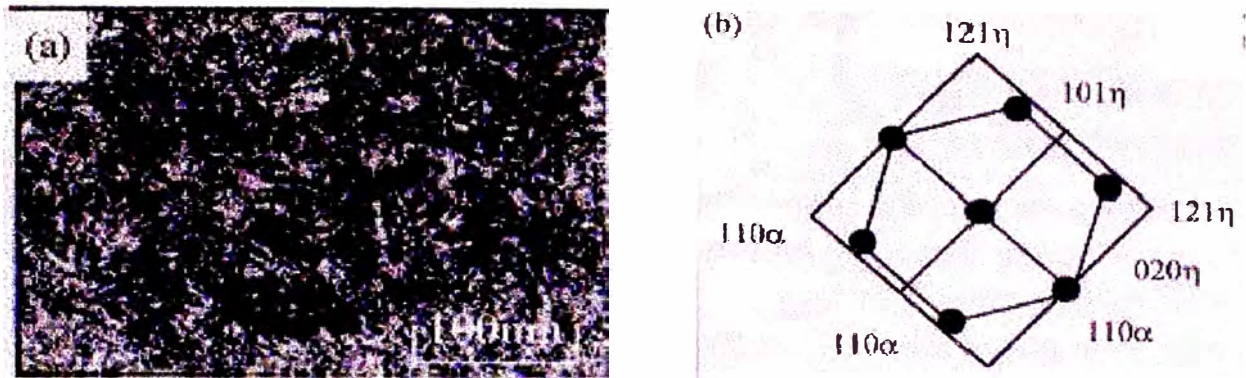


Fig.8.

(a) Transmission electron micrograph of carbide precipitation in a specimen ultra-subzero treated at 93 K and tempered.

(b) Indexed pattern showing a martensite matrix and η -carbide

4. Discussion

4.1 Relationship between Wear Resistance and Retained Austenite

From Fig. 5, the specimens austenitized at 1293 K, subzero treated at 223 K and ultra-subzero treated at 93 K have almost the same volume fraction of the retained austenite. However, the specimens after cryogenic treatment show wear resistance improvement considerably, as shown in Fig. 4. Although the specimens after cold treatment have smaller volume fraction of the retained austenite than that of the as-quenched ones, both have almost the same wear rate at sliding distances 400 and 600m. It is accepted that a major factor contributing to wear resistance improvement through subzero or ultra-subzero treatment is the removal of retained austenite and the formation of homogeneous martensitic structure although the hardness is hardly changed.

According to the scanning electron microscopy observation of the worn surface of hardened carbon tool steel tempered at temperature lower than 573 K by HU *et al.*, the predominant wear mechanisms were ploughing fatigue, fracture, and delamination. In this case, the wear rate may be controlled by crack nucleation and

propagation beneath the surface, which is related to the strength and toughness of the materials. Retained austenite may prevent crack propagation either by changing the growth direction of an advancing crack or by great absorption. It is suggested that cryogenic treatment makes a contribution to wear resistance due to fine h-carbide precipitation rather than the removal of retained austenite.

4.2 Mechanism of h-carbide Precipitation

A model of the bct-orthorhombic system transformation is proposed. It is known that the lattice deformation of martensite results from cryogenic treatment. Figures 9(a) and (b) represent the relationship between (010) h-carbide plane and (110) martensite plane. This existence of the lattice correspondence between two phases implies that (010) h-carbide plane is derived from (110) martensite plane, and [100], [010] and [001] h-carbide directions are derived from [110]. [110] and [001] martensite directions respectively. In the h-carbide structure, carbon atoms are in the octahedral interstices and iron or substitutional atoms take a hcp arrangement. The distance between neighbor iron atoms or substitutional atoms in h-carbide and martensite is $AB(h) > AB(x')$, $BC(h) < BC(x')$.

The lattice deformation is supposed to convert the parent bct lattice into an orthorhombic h-carbide lattice through the readjustment of iron or substitutional atoms due to contraction along [110] and [110] martensite direction and expansion along [001] martensite direction. Correspondingly, a slight shift of carbon atoms is required on (110) martensite planes in order to achieve carbon stacking of h-carbide. This can be present as follows in bct lattice, carbon atoms at $(1/2, 1/2, 0)$ and $(1/2, 1/2, 1)$ positions in (110) martensite planes shift $a/12[150]$, which may be explained $a/6[110] + a/4[110]$, and ones at $(0, 1, 1/2)$ and $(1, 0, 1/2)$ positions shift $a/12[150]$, i.e., $a/6[110] = a/4[110]$, where a means the lattice parameter of martensite. Furthermore, before contraction and expansion, a $a/6[110]$ shuffling of iron or substitutional atoms on alternate (110) martensite plane is necessary to meet the needs of stocking described by h-carbide structure. Alternatively, iron or substitutional atoms, the double circles indicate iron or substitutional atoms which belong to two unit cells and

the solid circles indicate carbon atoms. The shuffling direction of atoms is shown by an arrow. It is suggested by TEM observation and crystallographic analysis of carbide nucleates heterogeneously along the carbon-rich bands which develop during the spinodal decomposition of martensite. It is well known that precipitation of fine h-carbide enhances strength and toughness of martensite matrix, and further increase wear resistance.

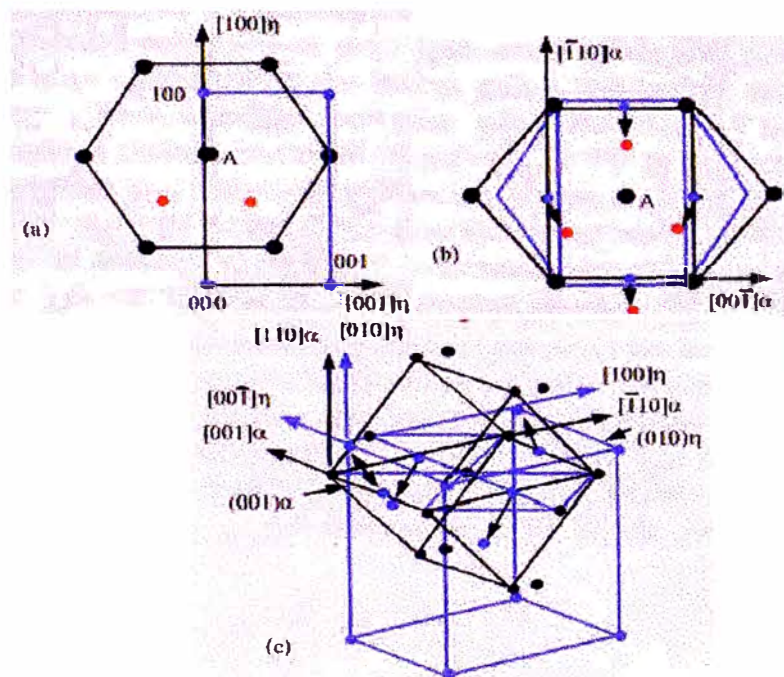


Fig.9. Atom arrangement on (010) η -carbide plane including a projection along [010] (a) martensite plane (b). Distortion of lattice and shift of carbon atom converts the hex lattice into the orthorhombic lattice. These transform the solid rectangle. (a): (•), carbon atom at 0; (◦), carbon atom at $1/2[010]$; (◦) iron or substitutional atom at $1/4[010]$. (b): (•), carbon atom before transformation from martensite to η -carbide. (◦), carbon atom after transformation. (◦), iron or substitutional atom (c): The hex-orthorhombic system transformation.

5. Conclusions

Cryogenic treatment increases wear resistance dramatically, especially at high sliding speed. The specimens after cryogenic treatment show a minimum of wear rate. Unlike cold treatment, cryogenic treatment promotes preferential precipitation of fine h-carbides. The formation mechanism of h-carbide is supposed to be as follows: iron or substitutional atoms expand and contract, and carbon atoms shift slightly due to lattice deformation as a result of cryogenic treatment. The mechanism that cryogenic treatment contributes to wear resistance is through the precipitation of fine h-carbide, which enhances strength and toughness of martensite matrix, rather than the removal of the retained austenite.

D. CRYOGENIC TREATMENT OF METAL PARTS BY RAHUL CHILLA

TEST 1

Name of the test : Abrasion and Wear Resistance test

Testing Machine used : Tile Abrasion Machine

Material of the Specimen : Mild Steel

Procedure: In this machine, the specimen is held in a chuck above a hardmetal rotating disc. Fine emery powder of an appropriate grade is applied on the disc and the specimen is lowered with a given adjustable load. The specimen suffers abrasion on the disc under the action of emery powder on the rotating disc.

The difference in weights of the specimen before and after the test shows the mass of metal lost in abrasion. We had used a digital weighing machine with an accuracy of 0.1 gram to weigh the specimens.

Test results:

Specimen 1 (untreated)	Specimen 2 (Cryo-treated)
Quantity of emery powder used: = 40grams	Quantity of emery powder used: = 40grams
Load Applied: 7.5 kg No of Revolutions: 1000	Load Applied: 7.5 kg No of Revolutions: 1000
Initial mass of the Specimen : = 580.4 grams	Initial mass of the Specimen: = 579.9 grams
Final mass of specimen after 1000 revolutions: = 577.6 gms.	Final mass of specimen after 1000 revolutions: = 578.1 gms.
Loss of metal in abrasion = $\Delta M = 580.4 - 577.6$ = 2.8 grams	Loss of metal in abrasion = $\Delta M = 579.9 - 578.1$ = 1.8 grams

Result: The loss of metal mass in abrasion of the cryo-treated specimen-2 was considerably less than that of the untreated specimen-1. Thus the cryo-processing increased the abrasion resistance of the specimen by 35.7%.

Conclusion: Abrasion resistance improves noticeably as a result of cryo -treatment.

TEST 2

Name of the test : Torsion Test

Testing machine used : Pendulum Type Torsion Testing Machine

Materials of Specimen : Mild steel and Cast Iron small shaft.

Diameter of specimen : 1.5 cm

Length of the specimen : 3.0 cms.

Note: The torque recorder of the machine actually records the 'failure profile' of the specimen during its loading and subsequent failure, on the graph paper attached on its drum.

Machine constant: 1 cm on the graph paper represents 544 kg-cm of torque. (This is a standard data for the machine)

Specimen 1 (Untreated)	Specimen 2 (Cryo-treated)
Twisting moment	Twisting moment
Cast Iron : 1305.6 kg-cm Mild Steel: 2012.8 kg-cm	Cast Iron : 2176 kg-cm Mild Steel : 2448 kg-cm

Result:

The cryotreatment enhanced the Torsional strength of Mild Steel as well as cast Iron. While the Mild Steel showed an improvement of ~22%, the strength of Cast Iron went up by ~66%.

Conclusion: This result is somewhat perplexing at this stage, because the Cast Iron is known to be a brittle metal. Its higher gain in torsional strength is to be noted with interest.

Machine generated load profile for Torsion Tests.

The machine generated load profiles on a graph paper were used for calculating the failure loads, for both the specimens.

(Machine constant : 1 cm = 544 kg-cms.)

TEST 3

Name of the test : Fatigue Test

Machine used : Rotary Bending Fatigue Testing Machine.

Material of the Specimens : Mild Steel

Dimension : Standard specimens were machined in the college workshop.

No of Tests : Two each.

Untreated Specimens		
Specimen	Load applied	No of Revolution at failure
Mild steel	100kg	17832, 18594

Cryo-treated Specimens		
Specimen	Load applied	No of Revolution at failure
Mild steel	100kg	28008, 27102

Result:

The number of revolutions for failure in case of cryogenically treated specimens exceeded that of the untreated specimens by: $(27,102 - 18,594 = 8508)$ to $(28,008 - 17,832 = 10,176)$

Enhancement = 45.7% to 61.6 %

Conclusion: Cryogenic treatment of the specimen has considerably enhanced the fatigue strength of the specimens.

TEST 4

Name of the test : Tensile Test

Machine used : Universal Testing Machine.

Dimensions of the specimen : Diameter 22mm, Length 1 meter.

No of Specimens : Two each.

Material : Mild Steel

Untreated specimen	Cryo-treated specimen
Load at failure:	Load at failure:
Rod 1: 16 Tons (Y.P. =14.5 Tons)	Rod 1: 17.10 (Y.P. =15 Tons)
Rod 2: 16 Tons (Y.P. =15.0 Tons)	Rod 2: 17.10 (Y.P. =15 Tons)

Result & Conclusion: The load for failure for the Cryo-treated mild steel specimen was is higher by **6.8 %**.

TEST 5

Name of the test :Shear Test

Machine used : Universal Testing Machine.

Dimensions of the specimen : Standard Specimens of 16 mm diameter.

Material : Brass, Copper and Mild steel.

No of tests Conducted : Two each.

Untreated	Cryo-treated
Average load of failure	Average load of failure
Brass : 11.5, 11.5 Tons	Brass : 11.7, 11.7
Copper : 7.7, 7.7	Copper : 7.7, 7.7
Mild Steel: 12.3, 12.3	Mild Steel: 12.7, 12.7

Result & Conclusion:

Copper has **not** shown any improvement.

There is negligible improvement of **1.7%** and **3.2%** in case of brass and M. S. respectively.

TEST 6

Name of the test : Brinell hardness Test

Testing Machine used : Brinell Hardness testing Machine

Indenter Ball diameter : 5 mms.

$$\text{BHN} = \frac{F}{(\pi/2) D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Material of the specimens : Copper, Brass and Mild Steel.

Measured Indentation Diameters:			
Specimen 1 (Untreated)		Specimen (Cryo-treated)	
Brass : 1.4 mm	BHN 107	Brass : 1.4 mm	BHN 107
Copper : 1.7 mm	BHN 159	Copper : 1.7 mm	BHN 159
M. S. : 1.2 mm	BHN 218	M. S. : 1.1 mm	BHN 260

Result & Conclusion:For brass and copper:

Cryo-treatment does not make non-ferrous metals like copper and its alloys harder. There was **no effect** on the Brinell hardness number.

For Mild Steel :

Initial hardness of Mild Steel specimen : BHN = 218

Final hardness after cryo -processing : BHN = 260

Cryotreatment increased the hardness from BHN 218 to BHN 260. Since the BHN is directly calibrated from pressure units, we can say that the hardness increased by **19.2%**

TEST 7

Name of the test : Charpy Impact test

Testing Machine used : Charpy Impact Testing Machine

Material of the specimens : Copper, Brass and Mild Steel.

Residual Energy values:

Material of Specimen	Striking energy	Specimen 1 (untreated)		Specimen 2 (Cryo-treated)	
		Residual energy	Energy consumed in impact	Residual energy	Energy consumed in impact
Mild steel	24.2	22.3	0.9	22.4	0.8
Copper	24.2	23.8	0.4	21.9	2.3
Brass	24.2	22.0	2.2	23.2	1.0

Result: The above values indicate that the cryotreatment resulted in higher energy consumption for copper and lower energy consumption for Mild Steel and Brass. This energy consumption is directly proportional to the impact strength.

Copper : Impact strength improved by 475% (+475%)

Brass : Impact strength decreased by 54.5% (-54.5%)

Mild Steel : Impact strength decreased by 11.1% (-11.1%)

Conclusion: These results show an opposite behavior between copper and brass which is unexpected and hence need re-verification by more tests. As the energy consumption is in single digits, we feel that the striking energy also need to be drastically lowered to obtain better measurements.

TEST 8

Name of the test : Transverse Test on Cast Iron Beam

Testing Machine used : Universal Testing Machine

Material of the specimen : Cast Iron.

Length of the specimen : 37 cms.

Breadth and Depth : 2.05 x 2.05 cms.

Simply support span : 30 cms.

Procedure: The square cross section beam of 37 centimeters length is supported on the machine bench with a span of 30 cms. The machine ram then applied the load at its center. The load applied at the time of bending up to a given depth is noted down on the meter.

Specimen 1 (Untreated beam)	Specimen 2 (Cryo-treated beam)
Load at failure: 690 kg	Load at failure: 530 kg

This test was repeated on 4 separate cryo-treated specimens. The results were same and hence these results are more reliable.

Result: The failure load for the Cryo -treated cast iron specimen was lower than the untreated one, indicating a decrease in its strength. The load capacity of cast Iron specimen beam got **poorer by 23.1%**.

Conclusion : In case of cast Iron beams the cryo-processing has **negative** effect and it actually reduces the load bearing capacity of the beam. Cast Iron is not used as a beam in the structures and hence the above result may be of interest somewhere else.

Summary of Test Results (Effect of Cryotreatment)

Test No.	Properties of metals	Specimen Materials	Increase(+) or decrease(-) in strength	Remark/s
1	Abrasion resistance	M. S.	+ 35.7%	
2	Torsional Strength	M. S.	+22.0%	The test for C. I. needs repetition
		C. I.	+66%	
3	Fatigue strength	M. S.	+ 45 to 61 %	
4	Tensile Strength	M. S.	+6.8%	
5	Shear strength	M. S.	+3.2%	
		Brass	+1.7%	
		Copper	Nil	
6	Hardness	M. S.	+19.2%	
		Brass	Nil	
		Copper	Nil	
7	Impact resistance	M. S.	-11.1%	The test for copper needs repetition
		Brass	-54.5%	
		Copper	+475%	
8	Transverse load cap.	C. I.	-23.1%	

Conclusions:

1. The above summary proves that the cryogenic treatment of metal parts enhances useful properties of most of the metals.
2. Many of the properties showed only a marginal improvement viz. 1 to 3% in case of shear strength. For Cast Iron the cryotreatment appears to have weakened it. Next cryotreatment is planned with different variables specially lower rate of cooling and warming -up. We also plan to introduce an added final stage of tempering at around 150 deg Celsius, that should stabilize the martensite formed during the cryotreatment.
3. Copper and its alloys did not gain much in above properties from the cryotreatment. Brass music instruments are however reported to improve by giving better notes.
4. The cryotreatment as a service and a science is in its initial stages in India, but has a vast potential in materials improvement field.