

rec1-INTRODUCCION

Así pues, el objetivo es el conocimiento de los procesos de tratamiento térmicos másicos y selectivos destinados a controlar las características resistentes de las piezas, así como el apunte de los defectos más importantes que podemos encontrarnos en su realización.

El campo de aplicación de los tratamientos térmicos másicos es para todas las piezas elaboradas, tanto como proceso principal destinado a conseguir características específicas (temple, nitruración), como en las que actúa como auxiliar para recuperar propiedades (recocido, revenido). Engranajes, bulones, matrices, piezas fundidas, laminadas, etc, son un pequeño ejemplo de las múltiples aplicaciones.

En los tratamientos térmicos selectivos la aplicación es en piezas de maquinaria que requieren características de alta dureza en la superficie y tenacidad en el resto: engranajes, matrices, levas, bulones, implantes quirúrgicos, etc. Por otra parte, algunas de estas técnicas son las que permiten el uso óptimo de los materiales cerámicos, de alta dureza y baja tenacidad, por incorporación superficial a piezas metálicas de respuesta tenaz.

2-TRATAMIENTOS TÉRMICOS MÁSCOS

$$t_s = \frac{dT}{dt} (T - T_a)$$

Son los que modifican las características en toda la masa de la pieza. Pueden tener una, dos o incluso tres etapas, si bien, lo más normal es de una etapa. En cada etapa la pieza es calentada en hornos específicos hasta alcanzar las temperaturas isotérmicas T con un gradiente de subida y bajada dT/dt especificado. El tiempo ts requerido para alcanzar la temperatura T viene expresado por la ecuación:

La selección de la velocidad de calentamiento está regulada por:

- La potencia térmica del horno.
- La transmisión del calor desde el exterior al interior de la pieza. Para evitar los problemas tensionales se limita el gradiente de temperaturas entre el centro y el exterior de la pieza.

La etapa de calentamiento debe llevarse acabo tan rápidamente como sea posible, para reducir al mínimo el crecimiento del grano y la descarburación de la superficie de la pieza tratada.

La etapa se culmina con el enfriamiento de la pieza de acuerdo con un gradiente dT/dt específico para cada tipo de ensayo y las características del material tratado. El tiempo de enfriamiento te, se determina en función de la velocidad de enfriamiento dT/dt.

2.1- EQUIPOS GENERICOS DE PROCESOS TÉRMICOS

Son constituidos por los hornos, en el que debe asegurarse el control de las temperaturas, registradas por pirómetros, de los tiempos y de la atmósfera del horno.

Los requisitos principales de un horno de tratamiento térmico son:

- Capacidad de mantener una temperatura controlada con precisión.
- Potencia de producción de calor suficiente para manejar rápidamente el volumen de carga para el que ha sido diseñado.
- Control adecuado de la atmósfera, para reducir al mínimo la oxidación.

2.1.1 Tipos de hornos

Los hornos de gas pueden ser del tipo de fuego directo, en el cual los productos de la combustión entran a la cámara de calentamiento. Alternativamente, pueden ser de combustión indirecta, de manera que la cámara del horno quede aislada de los productos de la combustión.

Un tercer tipo de horno calentado por gas, es el de tubos radiantes, en el cual un gas en combustión dentro de tubos metálicos, que se proyectan dentro de la cámara de calentamiento, y que constituyen la fuente de calor radiante.

Los hornos eléctricos son generalmente del tipo de resistencia. En algunos hornos de baño de sales, la propia sal actúa de conductor y es calentada por la electricidad que pasa a su través. En años recientes, los hornos de inducción de alta frecuencia, han encontrado cada vez a mayor aplicación en muchos procesos de tratamiento térmico.

En general, los hornos pueden clasificarse como del tipo intermitente o del tipo continuo. Los hornos intermitentes, que incluyen la variedad de baño líquido, son muy adecuados para lotes de fabricación pequeños y con ciclos variables de calentamiento. Un beneficio que se presenta particularmente del uso de un baño de sales es que, al sumergirla en el líquido salado, la pieza de trabajo se cubre de sal, que actúa como aislante que la protege del choque térmico debido a una velocidad de calentamiento demasiado rápido. Los hornos de tipo continuo se caracterizan por una eficiencia térmica más alta que los del tipo intermitente y por esta razón son más económicos en compañías de producción relativamente grandes.

Los hornos de tipo intermitente de alto rendimiento son generalmente de tipo horizontal; es decir, se cargan horizontalmente, a través de una puerta que se encuentra a un extremo de la cámara de calentamiento.

Los hornos de baño de sales son esencialmente del tipo de carga vertical. En este tipo de horno se sumergen en la sal uno o más pares de electrodos, los cuales, en el estado fundido, son conductores de la electricidad. Cada par de electrodos se encuentran próximos entre sí y, cuando pasa una corriente eléctrica a través de la sal fundida en la separación entre los electrodos, la sal se calienta por resistencia directa.

Los hornos continuos están provistos en alguna forma de mecanismo, generalmente una solera con cadena continua, para el transporte de piezas a través de la zona de calentamiento. Casi siempre se utiliza una atmósfera protectora. Puesto que el horno es de operación continua, la entrada y a la salida de la cámara de calentamiento deben ser selladas por algún aditamento flexible, generalmente una cortina de cadena. La entrada de aire, se evita, disponiendo de una pequeña presión positiva de gas en la cámara de calentamiento y equipando al horno con un túnel de entrada a través del cual circula lentamente el gas, llevándose con él cualquier masa de aire que tienda a entrar al horno.

2.1.2– Control de atmósferas

Durante el tratamiento térmico en atmósfera oxidante, el oxígeno provoca la oxidación de las superficies metálicas la adicional descarburización, que produce la formación de escamas en la superficie.

Para evitar estos defectos se adicionan en las cámaras gases inertes, especialmente nobles, como el helio, argón, etc.

2.2– RECOCIDO DE HOMOGENEIZACIÓN

El objetivo es homogeneizar la composición química de las piezas que por diversas causas mantienen composiciones heterogéneas entre diversos puntos.

Este defecto es habitual en procesos de colada cuando la velocidad de enfriamiento es más alta que aquella que la asimila a un proceso reversible.

El tratamiento térmico de homogeneización es de una sola etapa, y los valores de las variables temperatura (T) y tiempo (t) deben permitir la cumplimentación de los procesos de difusión.

2.2.1– Selección de variables

La selección de la temperatura se realiza atendiendo al principio de que los procesos de difusión se aceleran con la temperatura, con lo que seleccionando altos niveles de éstas, disminuimos en gran medida los tiempos y, por tanto, los costos.

La temperatura del tratamiento tiene la limitación impuesta por el punto de fusión de las fases interdendríticas, T_f , que son las mismas de las fases del sólido.

El tiempo es el que se requiere en los procesos de difusión para homogeneizar las composiciones, siendo una función inversa del coeficiente de difusión del elemento que se difunde, D.

2.3 RECOCIDO DE RECRISTALIZACIÓN

Es el proceso complementario al de deformación plástica con endurecimiento, destinado a recuperar las características resistentes iniciales como consecuencia de la regeneración de la estructura cristalina, pero no a recuperar la forma inicial.

También se aplica usando sólo la primera fase para realizar el alivio de tensiones que puedan quedar en las piezas que han sido sometidas a procesos de enfriamiento rápido, como es el caso de piezas coladas o soldadas.

2.3.1– Proceso

Se pueden distinguir tres subetapas:

- El alivio de tensiones o recuperación
- La recristalización
- En engrosamiento de grano

2.3.2 Selección de variables

La selección de la temperatura se realiza atendiendo al principio que la regeneración de la estructura cristalina es más rápida cuanto mayor es la temperatura, lo que determina tratamientos menos costosos. La limitación de las temperaturas es que no debe existir cambio de fase, a sólido si son aleaciones eutéctoides, o a líquido si estamos en diagramas de fase de sólido-líquido.

El tiempo de tratamiento es una función correlacionada con el nivel de acritud, A_c , la clase de material (n, Ci, Qc), y la temperatura de ensayo T_r por la expresión:

2.3.3– El tratamiento para el control del tamaño de grano

Diámetros de granos pequeños muestran mayores límites elásticos y resiliencia aunque menores alargamientos. El modelo de correlación del límite elástico Y_d con el diámetro del grano d_g es de la forma:

$$Y_d = Y + C_Y * d_g^{-1/2}$$

siendo Y y d_g parámetros identificadores del material.

Al final de la etapa de recristalización el tamaño de grano (d_g) está controlado por la acritud c la acritud crítica y h el parámetro que define el material.

Existe una deformación crítica, c_c , por debajo del cual no existe proceso de recristalización visible.

El tamaño de grano mínimo es el resultante para la deformación máxima que puede admitir antes de la rotura.

Todos los parámetros del modelo son característicos del material y estado inicial de la probeta ensayada. El engrosamiento anunciado responde al modelo:

El ciclo compuesto por la deformación plástica y recocido, con su recristalización y crecimiento de grano, en una sola vez o repetidas veces, permite alcanzar en tamaño de grano previamente determinado.

La obtención de grano fino se consigue haciendo nulo, el tiempo empleado en la fase de engrosamiento de grano, la acritud próxima a la máxima de rotura, y repitiendo el proceso sucesivos ciclos.

El grano muy fino se consigue tras sucesivos procesos de deformación con acritud máxima y recristalización, sin etapa de engrosamiento de grano.

La obtención del grano grueso se consigue con tiempo temperatura de engrosamiento de grano alto, baja acritud c y repitiendo el proceso sucesivos ciclos.

El grano muy grueso después de sucesivos procesos de acritud mínima, recristalización y etapa larga de engrosamiento de grano, a alta temperatura.

2.4 TRATAMIENTO DE ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACION

El objetivo es aumentar las características de carga de rotura y límite elástico, pero disminuyendo la tenacidad en aleaciones que muestran curvas de insolubilidad parcial, directas con la temperatura, delimitando una zona monofásica y otra bifásica.

2.4.1 Proceso

El bonificado es un proceso de doble etapa aunque algunas aplicaciones no utilizan la segunda etapa, lo que se denomina envejecimiento natural.

2.4.1.1 Solubilización

La aleación en estado de suministro se introduce en el horno hasta alcanzar la temperatura de T_s , temperatura que corresponde a zona monofásica.

El tiempo de permanencia es el adecuado para redissolver todos los precipitados que se hallan en borde de grano, con lo que se alcanza una estructura monofásica.

2.4.1.2 Temple

Significa el enfriamiento rápido de las probetas por inmersión en un fluido refrigerante. El enfriamiento debe ser de un gradiente tal que después del mismo, la estructura siga siendo monofásica, aunque alcanzada no en equilibrio reversible termodinámico, lo que se denomina metaestabilidad.

2.4.1.3 Envejecimiento

La etapa de envejecimiento aplicada después del temple queda definida por la temperatura, T_2 , y el tiempo de permanencia, t_2 . Ambos parámetros son variables fundamentales de esta etapa.

2.4.2 Selección de temperaturas y tiempos

El envejecimiento artificial, comparativamente con el natural, consigue mayores niveles de endurecimiento, en tiempos menores y con ablandamientos para tiempos mayores del máximo. Un modelo que parece ajustarse a esta correlación gráfica es el siguiente:

La selección de la temperatura se puede realizar al observar la optimización de las características resistentes. A temperaturas superiores a este óptimo, consiguen fuertes sobrevejecimientos y menores durezas máximas. Por el contrario, a temperaturas inferiores, no alcanzan los valores máximos y no muestran tendencia al sobrevejecimientos.

2.5 TRATAMIENTOS POR TRANSFORMACION EUTECTOIDE IRREVERSIBLE.

Son los que resultan de impedir los procesos de difusión y de nucleación y crecimiento de los nuevos cristales, en esas aleaciones con transformación eutectoide, lo que se consigue cuando la velocidad de enfriamiento es lo suficientemente alta. Estamos antes tres tipos de transformaciones bien diferenciadas. Las transformaciones martensíticas, las bainíticas y las perlíticas.

El objetivo de estos tratamientos es alcanzar mejoras importantes en las características resistentes de aleaciones que muestran alotropía.

2.5.1 Tratamientos perlíticos y bainíticos

El tratamiento de transformación perlítica también se le denomina recocido isotérmico, por diferenciación con los recocidos continuos que se describirán.

El tratamiento de transformación bainítica es un proceso de endurecimiento en función de las estructuras resultantes.

2.5.1.1 Proceso

El proceso de transformación perlítica y bainítica es de doble etapa:

- Etapa de austenización. El objetivo es conseguir una estructura totalmente austenítica con disolución completa del carbono y de los posibles carburos de elementos de aleación existentes. La temperatura debe ser ligeramente superior a la crítica superior T_{A3} .
- Etapa de enfriamiento rápido. El objetivo es mantener la austenita por debajo de temperaturas que en un proceso reversible, enfriamiento lento, no sería estable.
- Etapa de tratamiento isotérmico. El tratamiento isotérmico es aquel que se realiza a temperatura constante.
- Etapa de enfriamiento final. No tiene otro objetivo que alcanzar la temperatura ambiente después de que las transformaciones isotérmicas han sucedido.

2.5.1.2 Las variables de tratamiento isotérmico

La temperatura de mantenimiento T es la que controla la estructura resultante perlítica o bainítica y su correlación con el grado de endurecimiento alcanzado.

Se observa que en existe un tiempo mínimo de inicio y terminación de la transformación a una temperatura intermedia de tratamiento, punto de inflexión en la curva en forma de C.

Las microestructuras resultantes por encima de la nariz perlítica, son del tipo ferrítica–perlítica equiaxial.

Las estructuras obtenidas por debajo de la nariz perlítica se denominan bainitas. La bainita de las zonas altas, próximas a la nariz perlítica, son más blandas y se observan con formas arborescentes en láminas finas dirigidas en orientaciones preferentes dentro de cada nódulo. Las láminas son del tipo listón o aguja.

La bainita de las zonas bajas, lejanas de la nariz, son más duras y se identifican con placas de ferrita con precipitados de carburos muy finos con formas de hojas de cuchillo.

2.6 TRANSFORMACION MARTENSITICA

El **objetivo** de este tratamiento es alcanzar altas cotas de endurecimiento debido a un drástico cambio en su estructura perlítica hasta alcanzar la martensita.

El **ámbito de aplicación** se tiene en las aleaciones eutectoides.

2.6.1 Proceso

El proceso de transformación martensítica es de una sola etapa, si bien, la velocidad de enfriamiento es el parámetro importante.

2.6.2. Variables de la transformación martensítica

La temperatura es la variable que controla la cantidad de martensita transformada y, por tanto, del grado de endurecimiento alcanzado.

La transformación martensítica es una transformación independiente del tiempo y solo dependiente del valor absoluto de las temperaturas, lo que se define como **transformación atérmica**.

La velocidad de enfriamiento, V_e que es tangencial a las curvas de transformación isotérmica, determina la velocidad mínima requerida para conseguir la total transformación martensítica. Esta velocidad V_c , se denomina **Velocidad crítica de temple**.

2.6.3. Características de la martensita

Se observa un crecimiento en características de la martensita hasta alcanzar el contenido en carbono del eutectoide que corresponde al máximo. Las características residentes aumentan con el contenido en carbono de la austenita, que es idéntico al de la martensita resultante.

2.6.4. Grietas de temple

Es el defecto más importante que puede aparecer en el proceso de templado, lo que inhabilita totalmente la pieza pues es un alto concentrador de tensiones especialmente por su muy pequeño radio de fondo de entalla.

La probabilidad de agrietamiento aumenta con la severidad del temple, la dimensión de la pieza y cantidad de aleantes del acero, pues fomenta la formación de martensita en el núcleo.

2.6.4.1. Formación de tensiones y grietas de origen térmico

Las tensiones térmicas aparecen en la pieza por el gradiente de dilatación consecuencia lineal del gradiente de temperaturas.

$$t = l \times T$$

Las tensiones térmicas, t , vendrán calculadas a través del módulo de elasticidad E por la expresión:

$$t = E \times l \times T$$

Por causa de este estado de tensiones aparece un estado de deformaciones en la pieza definida por la curvatura hacia la fibra interior. Estas son las tensiones térmicas que aparecen en las piezas que en un proceso cinético de enfriamiento define un gradiente de temperaturas es su interior. Si las deformaciones que son causa de estas tensiones superan las que pueden facultar el material a las temperaturas existentes puede producirse grietas, denominadas térmicas.

Evidentemente las grietas se producen en las fibras que son solicitadas a tracción, normalmente en las partes exteriores.

El enfriamiento brusco de una pieza, sin transformación martensítica, incorpora tensiones internas pero no existe riesgo de formación de grietas.

2.6.4.2–Formación de grietas temple.

Es el proceso de enfriamiento con transformación martensítica se incorpora además el aumento de volumen específico que sucede en la transformación austenita–martensita. Significa un aumento de volumen en correlación con el descenso de temperatura, lo que es una consecuencia inversa a la contracción por el enfriamiento de coeficiente α .

Un cilindro que atraviesa las temperaturas de transformación martensítica.

Durante la primera etapa, el tiempo t_1 , las tensiones presentes se deben al gradiente de temperatura. La superficie, obligada por el centro a no contraerse tanto como debería, quedará traccionada, mientras el centro quedará comprimido.

Durante la segunda etapa, que ocurre entre los tiempos t_1 y t_2 , la superficie, que ya ha alcanzado la temperatura M_s y comienza su transformación a martensita, con la expansión característica.

2.6.5 Tratamientos térmicos para reducir grietas de temple

Se han diseñado procesos que reducen las grietas de temple bien por el control de la severidad, bien por procesos isotérmicos.

La reducción de la severidad del temple, como el temple en aceite en lugar de agua, se ha comprobado que rebaja el nivel de grietas.

Los tratamientos isotérmicos tienen los siguientes principios:

- Realizar la transformación martensítica sin gradiente de temperaturas entre las partes externas e internas: martempering.
- Sustituir la transformación martensítica por un tratamiento isotérmico bainítico de características muy próximas a la martensita: austempering.

2.6.5.1 Martempering

Este tratamiento se efectúa calentando el material y manteniéndolo a una temperatura superior a la crítica durante el tiempo suficiente para su completa austenización y enfriándolo a continuación en un baño de sal fundida, y que debe ser superior al punto Ms de comienzo.

2.6.5.2 Austempering

El Austempering consiste en calentar el material a una temperatura ligeramente superior a la crítica y enfriando luego en un baño en caliente que se mantiene a temperatura constante, durante el tiempo suficiente para que se verifique la total transformación de la austenita en bainita.

El enfriamiento de la primera fase debe ser lo suficientemente rápido que evite la formación de perlita.

2.7 TRATAMIENTO DE REVENIDO DE LA ESTRUCTURA MARTENSITICA

El revenido es el proceso que permite retornar la martensita a las fases estables originales, mejorando sus características dinámicas.

El campo de aplicación se centra en las aleaciones con composiciones de transformación eutectoide.

2.7.1 Proceso

El proceso de revenido es de una sola etapa. Si bien la condición de estar siempre conexo a la transformación martensítica, podríamos suponer que corresponde a la segunda etapa de un tratamiento completo de doble etapa en la que la primera corresponde al temple.

2.7.2 Las variables del revenido

La temperatura es la variable que controla las características de la martensita revenida. El tiempo podremos eliminarlo como variable si es superior a una hora.

Puede generalizarse que, las características, dureza, límite elástico y carga de rotura del acero templado y revenido decrecen exponencialmente con la temperatura par a valores de tiempo de una hora.

Por el contrario, en forma general, la resiliencia t_r y el alargamiento (A) manifiestan un incremento potencial con la temperatura de revenido.

El tratamiento de revenido a temperaturas bajas, $<200^\circ\text{C}$, mejora ligeramente la resiliencia mantiene sus características estáticas, lo que le hace aconsejable para piezas con solicitaciones, fundamentalmente estáticas.

El tratamiento de revenido a temperaturas altas, $>400^\circ\text{C}$, responde con resiliencias crecientes, aún rebajando sus características estáticas. Se aconseja para piezas sometidas a solicitaciones fundamentalmente dinámicas.

2.8 RECOCIDOS Y NORMALIZADOS SOBRE ALEACIONES EUTECTOIDES

Son tratamientos térmicos para la regeneración de las estructuras que pueden estar afectadas por deformaciones plásticas, transformaciones martensíticas o incluso segregaciones dendríticas. Y son aplicables a aleaciones con cambio de fase como el acero.

Son tratamientos de una sola etapa isotérmica, difiriendo exclusivamente en la velocidad de enfriamiento, V_e . Precisamente ésta es la variable de control del tratamiento que se controla de forma económica, asociada a

ciertos medios de fabricación. :

- En horno con puerta cerrada y sin potencia, **tratamiento de recocido**.
- Enfriamiento en aire calmado a 20°C, **tratamiento de normalizado**.

Puede observarse por comparación entre ambas, que el normalizado se identifica por:

- Estructura de granos más finos.
- Perlita con láminas más finas.
- Mayor dureza.

Podemos esperar que la microestructura después del enfriamiento indicado será la siguiente:

- Enfriamiento en horno.

El corte de las curvas se realiza por la parte superior, zona de las perlitas gruesas. La microestructura esperada es de granos equiaxiales de ferrita (F) y perlita (P) de tipo grosero.

El recocido es el tratamiento térmico industrial consistente en enfriar en horno a puerta cerrada sin calentamiento y que obtiene el máximo ablandamiento del acero con estructura de tipo ferrito-perlítica equiaxial de tamaños groseros tanto en los granos como en las láminas.

- El corte de las curvas de las S se realiza en las zonas inferiores de las transformaciones a perlitas y ferritas, próximas a la nariz perlítica. La microestructura esperada es de granos equiaxiales pequeños de ferrita (F) y perlita (P) de tipo fino. Su dureza es mayor que en el recocido, consecuencia del endurecimiento por densidad de granos y finura de la perlita.

2.9 SINTESIS DE LOS PROCESOS DE REGENERACIÓN DE ESTRUCTURAS EN ALEACIONES EUTECTOIDES.

Una aleación eutectoide, con soluto sobresaturado, dispone de , prácticamente, todas las posibilidades para su endurecimiento: a) aleación, b) transformación martensítica, c) envejecimiento y d) acritud.

Cada proceso de endurecimiento dispone de su correspondiente proceso de ablandamiento, que nos llevará a estructuras estables.

- Los procesos de estabilización desde la estructura austenítica son los que hemos analizado en la cuestión anterior: normalizado y recocido de austenización completa.
- Los procesos de estabilización desde la transformación martensítica como revenidos a altas temperaturas.
- Los procesos de estabilización después del endurecimiento por acritud, como procesos de recocido contra acritud.

En síntesis, los recocidos reciben el nombre de austenización o subcríticos según que su temperatura de tratamiento consiga la fase estable superior o inferior a la temperatura de austenización.

La microestructura se diferencia, bien, en las dimensiones de los granos, gruesos o finos, o también en la forma de la cementita laminar o globular. Las características resistentes, son función del estado citado: mayores resistencias para el grano fino, perlita laminar y contenido de perlita, y menores características para el grano grueso, cementita esferoidal y menor contenido de cementita.

3- TRATAMIENTOS TÉRMICOS SELECTIVOS.

El proceso completo de construcción de una pieza que al ser modificada la capa superficial, incluye los procesos de conformación por deformación plástica, tratamientos de estabilización de transformación martensítica y mecanización hasta su forma casi definitiva. Hasta aquí es la construcción del núcleo. Después se disponen de dos alternativas

- Tratamiento selectivo, superficial.
- Incorporación, mediante el proceso específico, a la capa endurecida, la que puede exigir la aplicación de un tratamiento térmico posterior.

3.1 TEMPLE SUPERFICIAL

La variación de características en la superficie de la pieza por temple superficial se fundamenta en la transformación martensítica selectiva: sólo se realiza en la capa contorneada por la superficie. Con este objetivo, las áreas superficiales que deben transformarse a martensita se calientan con suficiente potencia de forma que se creen fuertes gradientes negativos de temperatura hacia el interior de la pieza.

En este momento, un enfriamiento rápido superior a la velocidad crítica de temple transforma a martensita la capa más exterior, a través de la interfase y sin variaciones apreciables el resto de la pieza.

- La materia prima

El acero seleccionado debe tener en el tratamiento o estado elegido, la tenacidad requerida para el conjunto. Como debe sufrir transformación martensítica, el contenido en carbono debe ser el requerido para la dureza final de la martensita de la superficie, del orden de 0.4 a 0.6%.

Por idéntica razón debe disponer de elementos de aleación que mejoren la templabilidad, y permitan velocidades de enfriamiento no excesivamente altas.

- Los procesos específicos

El proceso de temple superficial más utilizado en la actualidad está basado en el calentamiento por medio de inducción eléctrica. Otro método de calentamiento superficial más tradicional es el de la llama producida por la combustión de diferentes gases. Y más modernamente se han utilizado como medios de calentamiento fuentes de calor eléctricas, electrónicas o mediante láseres.

3.1.1 Temple superficial por inducción.

El calentamiento superficial se realiza por el campo magnético creado en la superficie de la pieza, que compone el núcleo de una bobina inductora que la envuelve.

El enfriamiento se realiza mediante agua a presión con aditivos inhibidores de la corrosión, que se proyecta desde un anillo próximo a la bobina inductor.

Si el flujo magnético se crea por corrientes eléctricas de alta frecuencia, f , el flujo recorre la superficie de la pieza, de modo selectivo, produciendo el calentamiento tanto por corrientes inducidas de Eddy como por las pérdidas de histéresis.

La profundidad de penetración del calor h_m , hasta alcanzar la temperatura de austenización, está controlada por la potencia de la fuente, P_f , superficie sobre la que se aplica, S , frecuencia de la energía, f , y constante operativa, C_1 , en la forma:

$$h = C_1 P_f / S \sqrt{f} \text{ (mm)}$$

donde C_1 es función de la resistividad del material.

El espesor de la capa endurecida por temple por inducción, como función del proceso, es inverso a la frecuencia y directa con el tiempo de tratamiento.

El espesor de la capa templada puede controlarse pro medio de la frecuencia, f , y del tiempo de tratamiento, t .

3.1.2 Temple superficial a la llama.

En este proceso el calentamiento es producido por la combustión de gases de alta potencia calorífica como el acetileno, gas natural o propano.

El control de la profundidad de la capa austenizada se realiza por medio del flujo de gas combustible y el tiempo de permanencia de cada punto. Pero la potencia calorífica está limitada, pues la alta temperatura de la llama puede inducir sobrecalentamientos superficiales.

La ventaja principal del proceso de calentamiento por llama sobre el de inducción es que exige menor inversión, pero tiene algunos inconvenientes que dimanen de las condiciones de aplicación de la llama, como son:

- Menor control sobre el espesor por su menor potencia calorífica, descarburación.
- Riesgo superficial, si es llama oxidante.
- Peor incorporación a procesos automatizados.

3.1.3 Temple superficial por láser.

EL láser produce energía luminosa sobre todo el espectro electromagnético, desde el infrarrojo al ultravioleta, incluyendo la luz visible. El láser industrializado genera energía a una única longitud de onda, y es capaz de concentrarla en un rayo de muy baja divergencia el cual está coordinado en tiempo y fase. Esto permite focalizar alta energía en pequeñas áreas, lo que le hace idealmente aplicable al endurecimiento por austenización puntual o incluso por fusión local para soldadura. El efecto de enfriamiento producido por el entorno frío de la pieza produce el efecto de temple.

$$Y = Y_m - C_1 e^{-K t} - C_2 t$$

$$t = C_i A_c^{-n} e^{+\frac{Q_c}{R T_r}}$$

$$d_{g1}^2 - d_{g2}^2 = C_i t^{n/2} e^{-\frac{Q_c}{R T_r}}$$

$$Y = Y_m - C_1 e^{-K t} - C_2 t$$