

Tratamientos Térmicos del Acero

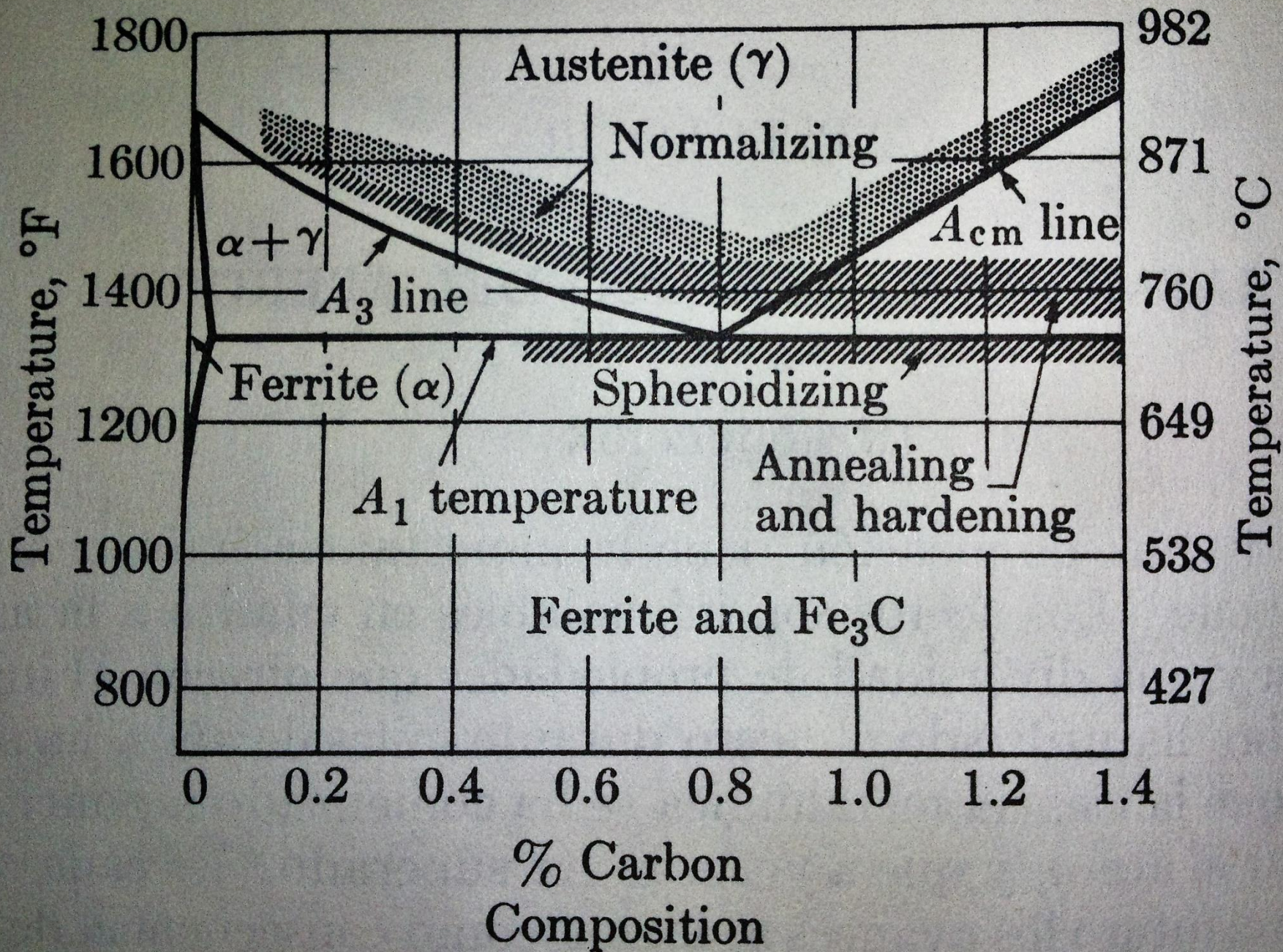
Tratamientos térmicos

- Estructuras de equilibrio

Austenita. Fase de alta temperatura que se obtiene calentando entre 28 a 56° por encima de la temperatura A_3 del acero.

Las temperaturas muy elevadas conducen al crecimiento de grano y consecuente agrietamiento durante el temple.

Regla empírica: calentar durante una hora por pulgada de espesor de material.



Recocido y normalizado

Se trata el metal para austenitizar; después del calentamiento se da un enfriamiento relativamente lento para propiciar la formación de microestructuras próximas a las de equilibrio.

Este uniformizado de la estructura mejora las propiedades del material y optimiza los tratamientos térmicos posteriores.

Productos que se tratan de este modo: productos forjados en general, piezas coladas, acero laminado en caliente.

Recocido.

Implica el enfriamiento en horno desde la temperatura de austenitización.

Al recocer aceros hipereutectoides, la austenitización de hacerse sólo ligeramente por encima del eutectoide. Si no se hace así, durante el enfriamiento se forma una red de cementita frágil en los límites de grano de la austenita.

En los aceros hipoeutectoides recocidos está presente ferrita proeutectoide y perlita gruesa.

El recocido se emplea a menudo para obtener una dureza apropiada en los tratamientos de maquinado.

Normalizado

Implica el enfriamiento al aire desde la temperatura de austenitización; por tanto, es un enfriamiento más rápido que el recocido.

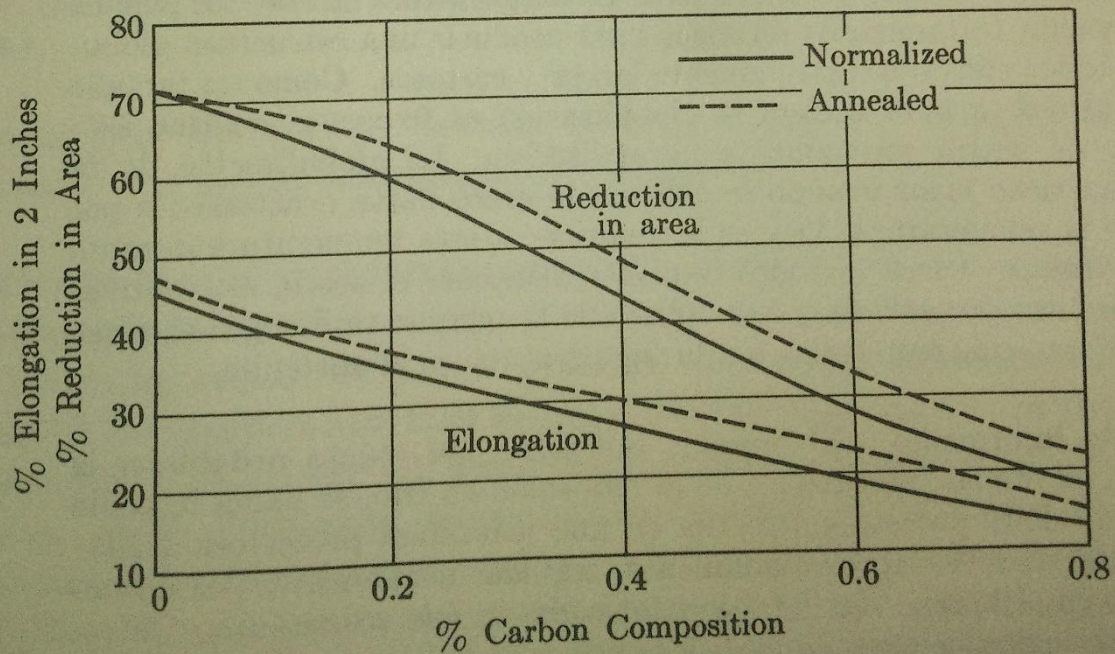
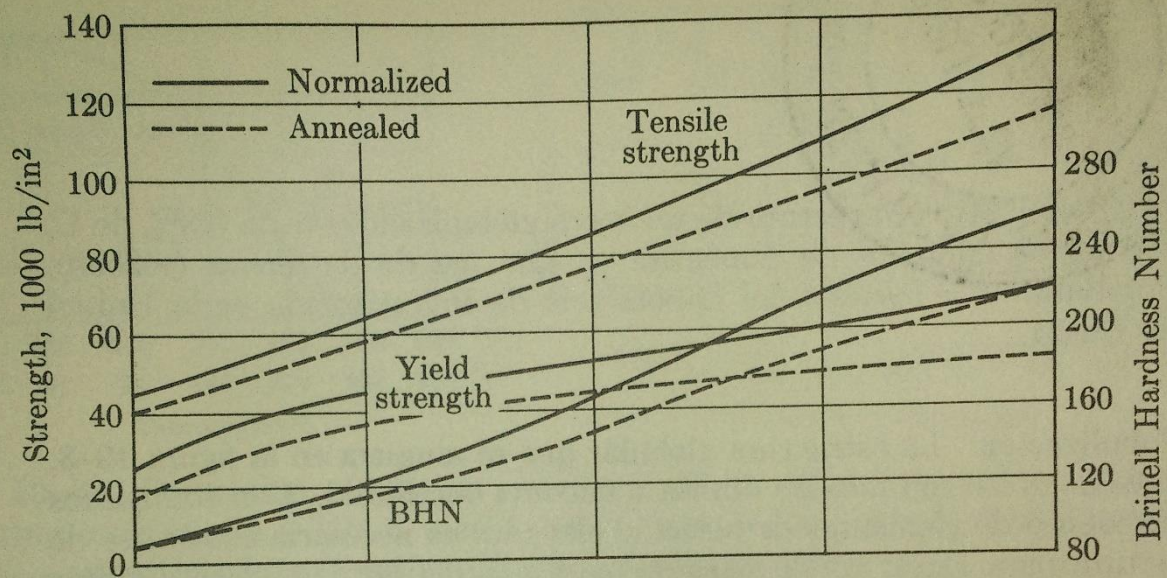
La temperatura de normalizado para el acero hipereutectoide está dentro de la región austenítica, ya que un enfriamiento rápido evita la formación de una red de cementita.

En los aceros hipoeutectoides, se suprime parcialmente la formación de ferrita proeutectoide, permitiendo la formación de una cantidad de perlita ligeramente más abundante que en el equilibrio.

Debido al enfriamiento más rápido, el tamaño de grano es más fino.

Los aceros normalizados tienen mayor resistencia que los aceros recocidos y son ligeramente menos dúctiles.

En ambos tipos la resistencia mecánica aumenta con el contenido de carbono (o aumento de la cantidad de perlita).



Globulización

Se producen glóbulos de cementita en una matriz dada.

Esta microestructura produce aceros de mínima dureza y máxima ductilidad.

Es útil en condiciones de maquinabilidad óptima, así como para evitar agrietamientos durante tratamientos en frío. Se suele usar en combinación con contenidos elevados de carbono o de aleantes.

Se obtiene a partir de aceros normalizados previamente, aprovechando el tamaño de grano fino. Se da cuando se calienta el acero normalizado hasta exactamente por debajo de la temperatura A_1 y se mantiene la temperatura por diez horas.

También se puede usar un tratamiento alternativo por encima y debajo de la temperatura A_1 o por transformación isotérmica a alta temperatura.

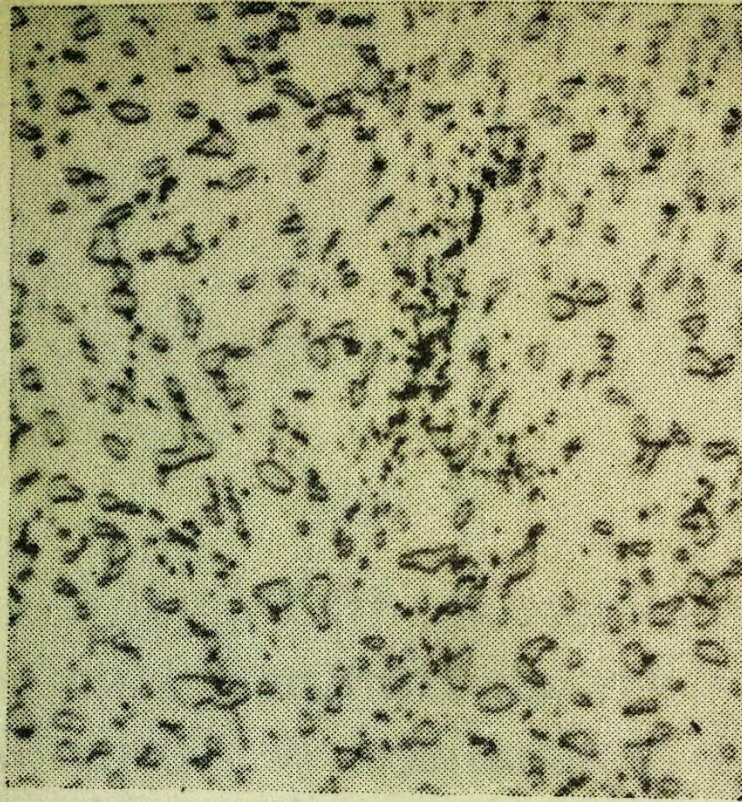


FIG. 10-3. Microstructure of a spheroidized 0.8% C steel, showing cementite spheroids in a matrix of ferrite ($\times 2500$.) (After Bain. Courtesy United States Steel Research Laboratory.)

Recocido intermedio

Tiene por objeto restablecer la ductilidad en etapas intermedias de la reducción en frío.

Se realiza en atmósfera protectora a 593-704°C seguido de un enfriamiento en horno.

Con este proceso, la ferrita deformada en frío recristaliza y la cementita proveniente de las zonas de perlita tiende a globulizarse.

La temperatura no es suficiente para producir una austenitización, por ello se le da este nombre de recocido intermedio.

Estructuras martensíticas

La martensita tiene las características de ser muy resistente mecánicamente, tener gran dureza y alta resistencia al desgaste. Estos materiales presentan resistencias a la tracción de más de 200 kg/mm² y son los materiales de ingeniería más resistentes.

La fase martensita es una estructura fuera del equilibrio que se obtiene del enfriamiento rápido de la austenita, usualmente con agua. Los aleantes facilitan la obtención de la martensita. Por ejemplo, cromo y níquel retardan la transformación de la austenita, de modo que un enfriamiento no tan rápido permite obtenerla, incluso en enfriamiento al aire.

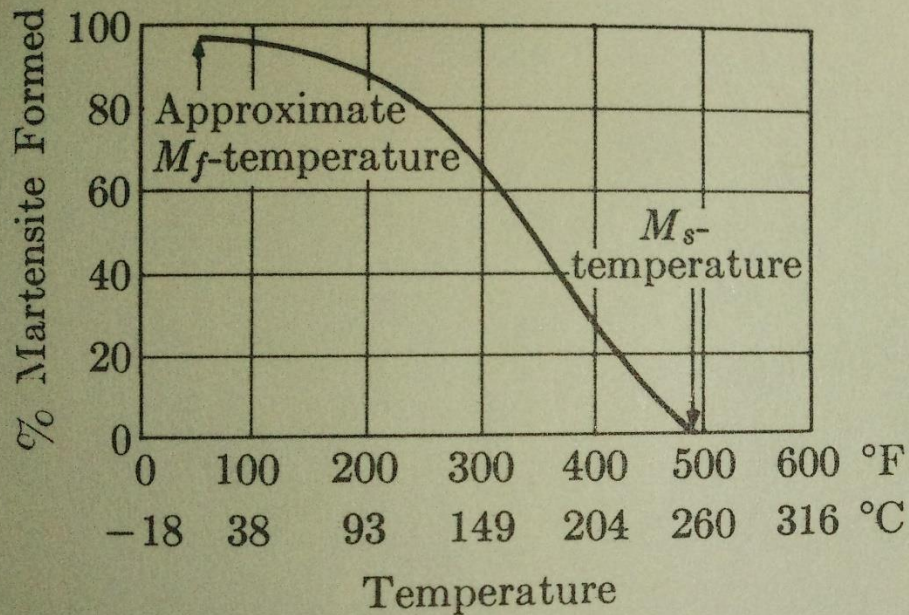


FIG. 10-4. Formation of martensite during cooling of a 0.75% C steel from the austenitizing temperature of 1750°F (954°C). (After Howard and Cohen.)

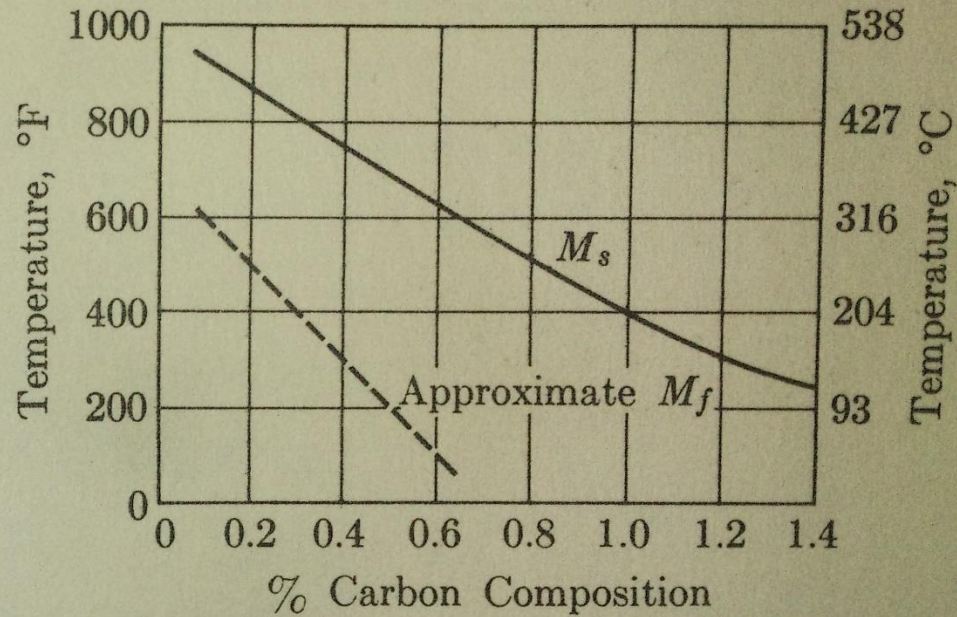


FIG. 10-5. Effect of carbon content on M_s and approximate M_f temperatures for unalloyed steels.

Durante el enfriamiento puede existir austenita metaestable hasta una temperatura crítica, usualmente entre 93-427°C, en la que comienza a formarse la nueva fase conocida como martensita.

Si el enfriamiento se detiene antes de alcanzar la temperatura final, se interrumpe la formación de martensita y se requerirá de un enfriamiento adicional.

El intervalo de inicio y fin de formación de martensita depende de la composición.

$$M_s = 500 - 322(\%C) - 33(\%Mn) - 22(\%Cr) - 16.7(\%Ni) - 11(\%Si) - 11(\%Mo)$$

Con estos datos se observa que la martensita no puede formarse completamente cuando se tienen contenidos altos de carbono o aleantes durante el temple a temperatura ambiente.

La austenita retenida así es indeseable en el acero, ya que influye negativamente en las propiedades mecánicas.

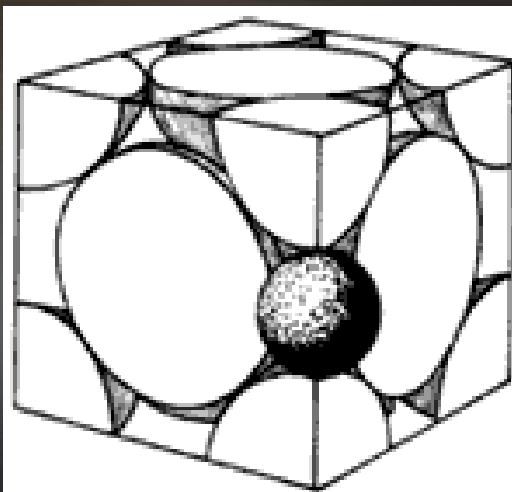
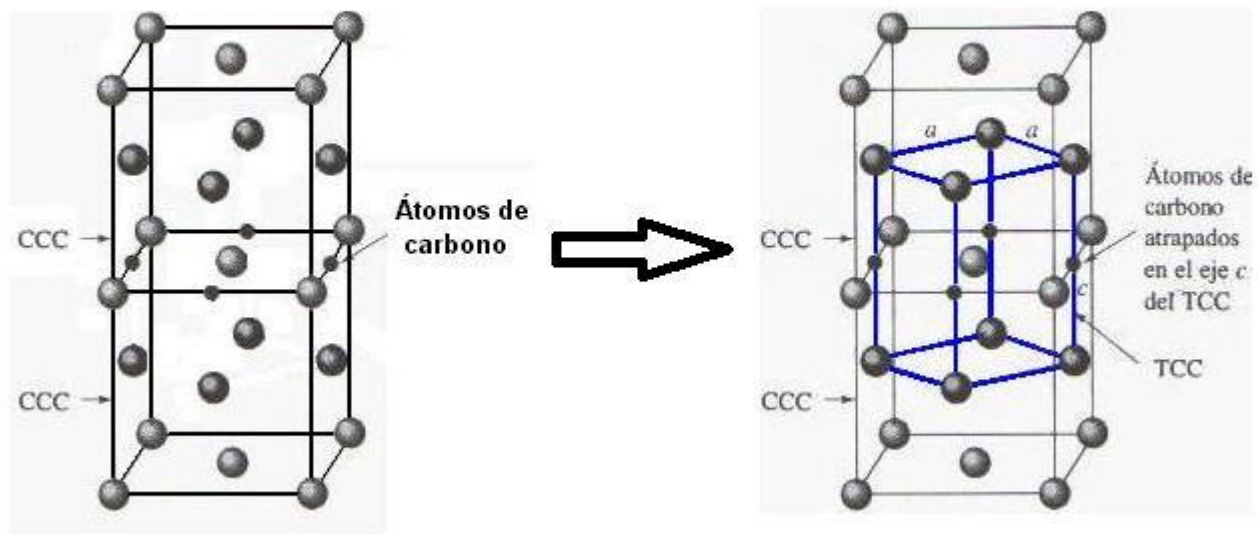
Las herramientas de corte deben austenizarse adecuadamente a 760°C para tener cementita no disuelta (globular) y austenita con 0.85% de C, aproximadamente. Esto ocasiona un punto M_s más alto que permite tener menor cantidad de austenita retenida.

Si se tiene una M_f menor que la ambiente, un enfriamiento posterior producirá martensita adicional. La refrigeración es más eficaz cuando se realiza inmediatamente después del temple, para evitar la estabilización de la austenita.

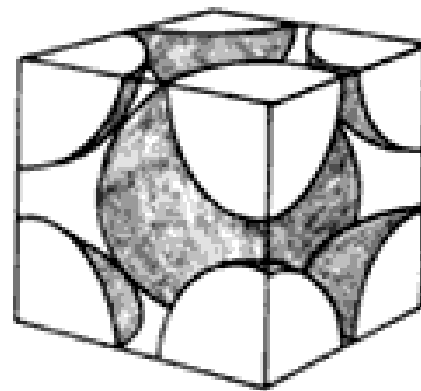
La transformación de la austenita tiene lugar sin difusión. La austenita es FCC y en el enfriamiento los átomos se desplazan coordinadamente unos con otros en una fracción de distancia atómica para producir una red tetragonal centrada.

Los átomos de C, sin tiempo suficiente para difundir, quedan atrapados en esta red a lo largo del eje c para ocasionar la tetragonalidad.

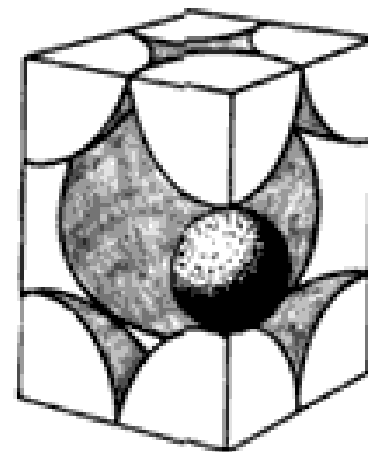
Esta red ocasiona un aumento de volumen de aproximadamente el 4%, por lo que puede haber distorsión y agrietamiento en los tratamientos térmicos comerciales.



AUSTENITA



FERRITA



MARTENSITA

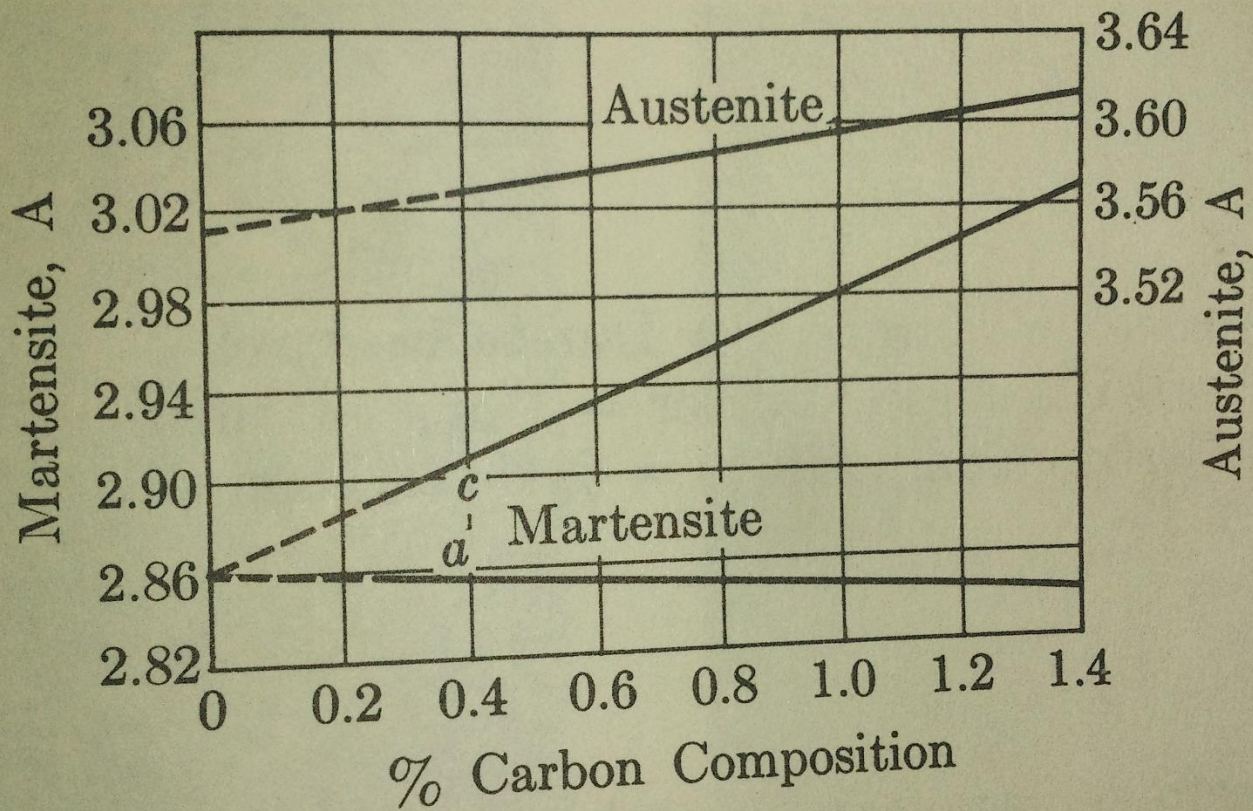


Fig. 10-7. Lattice constants at room temperature for face-centered cubic austenite and for body-centered tetragonal martensite. The lattice constants for austenite extrapolate to the lattice constant of body-centered cubic ferrite at 0% C.

La martensita forma placas finas que al microscopio se observan lenticulares.

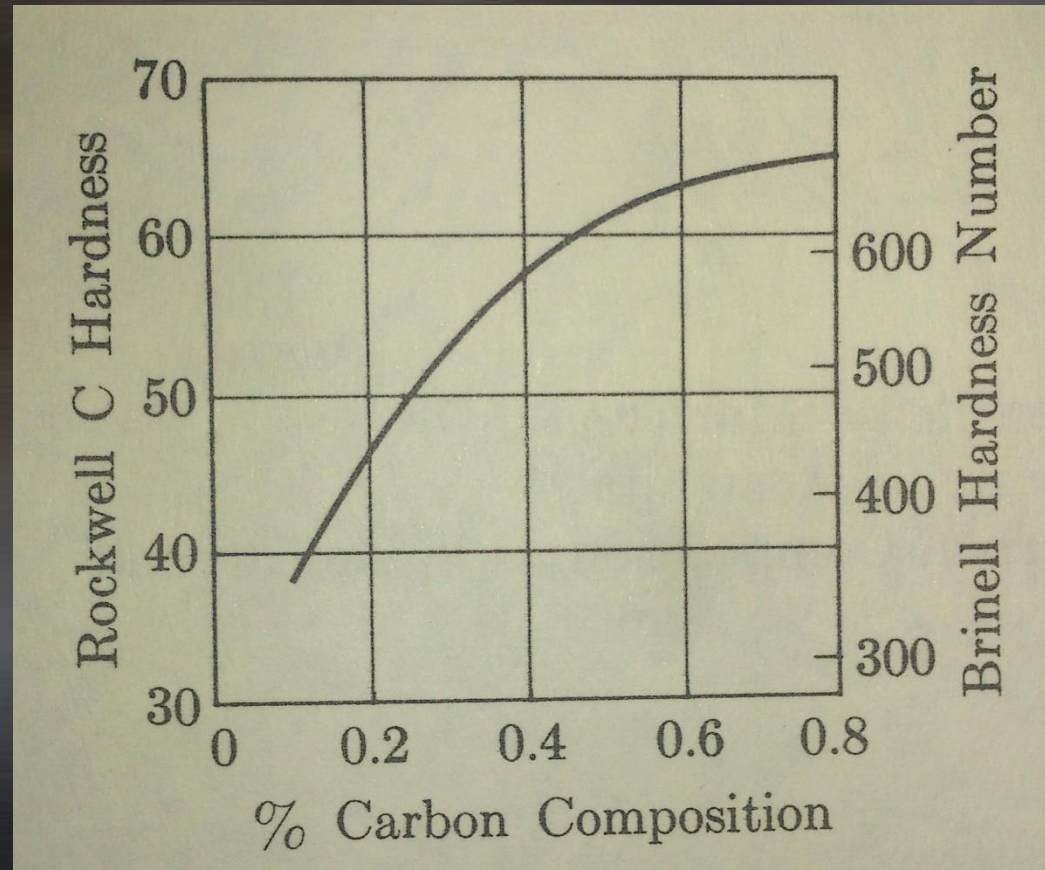
El efecto de endurecimiento de los átomos de C alineados a lo largo del eje c es muy grande en la martensita, alcanzando valores de hasta 65 Rockwell-C.

Se cree que esta dureza es debido a las intensas deformaciones localizadas entre los átomos de carbono atrapados en la martensita.



FIG. 10-6. Microstructure of 1.0% C steel quenched from an austenitizing temperature above the A_{cm} -line, showing dark plates of martensite with white, untransformed (retained) austenite. Hardness, Rockwell C 57. ($\times 1000$.) (Courtesy S. A. Oliver, M.I.T.)

Los aleantes se disuelven sustitucionalmente en la austenita y en la martensita, por lo que deforman relativamente poco la estructura y, por lo tanto, a la resistencia mecánica. Sin embargo, el contenido de carbono afecta de manera significativa a la dureza, tal como sería de suponer. La austenita retenida puede reducir la dureza hasta en 10 unidades Rockwell-C.



Revenido de la martensita

La martensita es muy frágil, por lo que el recalentamiento de la martensita facilita la obtención de combinaciones útiles de resistencia mecánica y ductilidad.

El calentamiento provoca el cambio de estructura de la martensita y la mejora de propiedades de la austenita retenida.

La martensita es inestable, por lo que al ser sometida a tratamiento térmico, tiende a volver a las fases estables. Por tanto, el revenido se realiza siempre por debajo de la temperatura A_1 , para propiciar que las fases estables sean ferrita y carburo de hierro.

Etapas de la transformación martensítica:

Primera etapa. La martensita con alto contenido de carbono se descompone en un carbono hexagonal intermedio (carburo ϵ) y en martensita intermedia baja en carbono.

Martensita \longrightarrow martensita (0.25%C) + Carburo ϵ (8.2%C)

Las partículas de carburo precipitan dentro de las placas de martensita de manera muy fina. Es una reacción rápida a 204°C, mientras que a temperaturas menores es más lenta. Se obtiene poco ablandamiento, pero se elimina algo de fragilidad y tensiones residuales.

Segunda etapa. La austenita retenida se convierte en bainita. Esta fase es de similar dureza a la martensita, por lo que la dureza del producto aumenta hasta que depende de la austenita presente.

Por cada porcentaje de austenita que se transforma, se produce una dilatación lineal aproximada de 0.001 mm por mm, en contraste con la primera y tercera etapas.

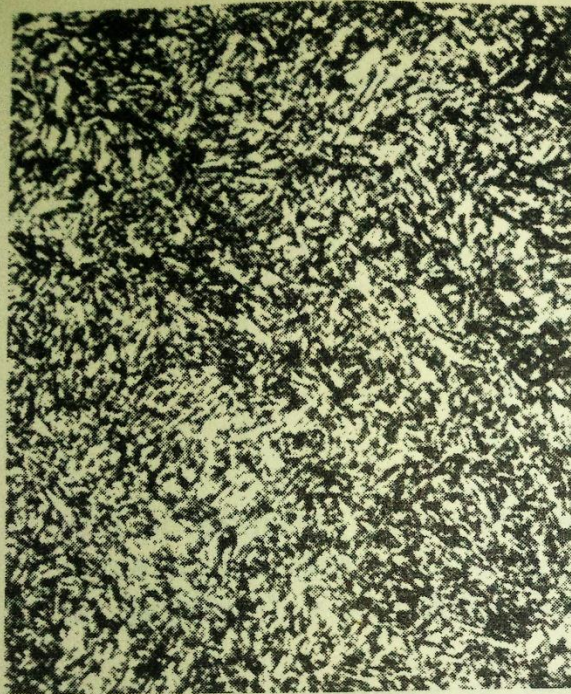
Si queda austenita retenida después del revenido, puede transformarse durante el servicio.

Tercera etapa. La ferrita y cementita se forman durante el revenido a temperaturas por encima de algunos cientos de grados F:

Martensita (0.25%C) + carburo ϵ \longrightarrow ferrita + cementita

La cementita se forma al inicio como láminas y películas submicroscópicas. A temperaturas y tiempos más elevados, se da la globulización, las esferas de cementita crecen y finalmente se hacen visibles hasta el microscopio óptico. El acero se reblandece y su ductilidad aumenta continuamente a medida que avanza el revenido durante esta etapa.

El revenido a 371-482°C (700-900°F) se usa ampliamente para aplicaciones con necesidades de ductilidad y tenacidad, así como resistencia mecánica elevada.



(a)



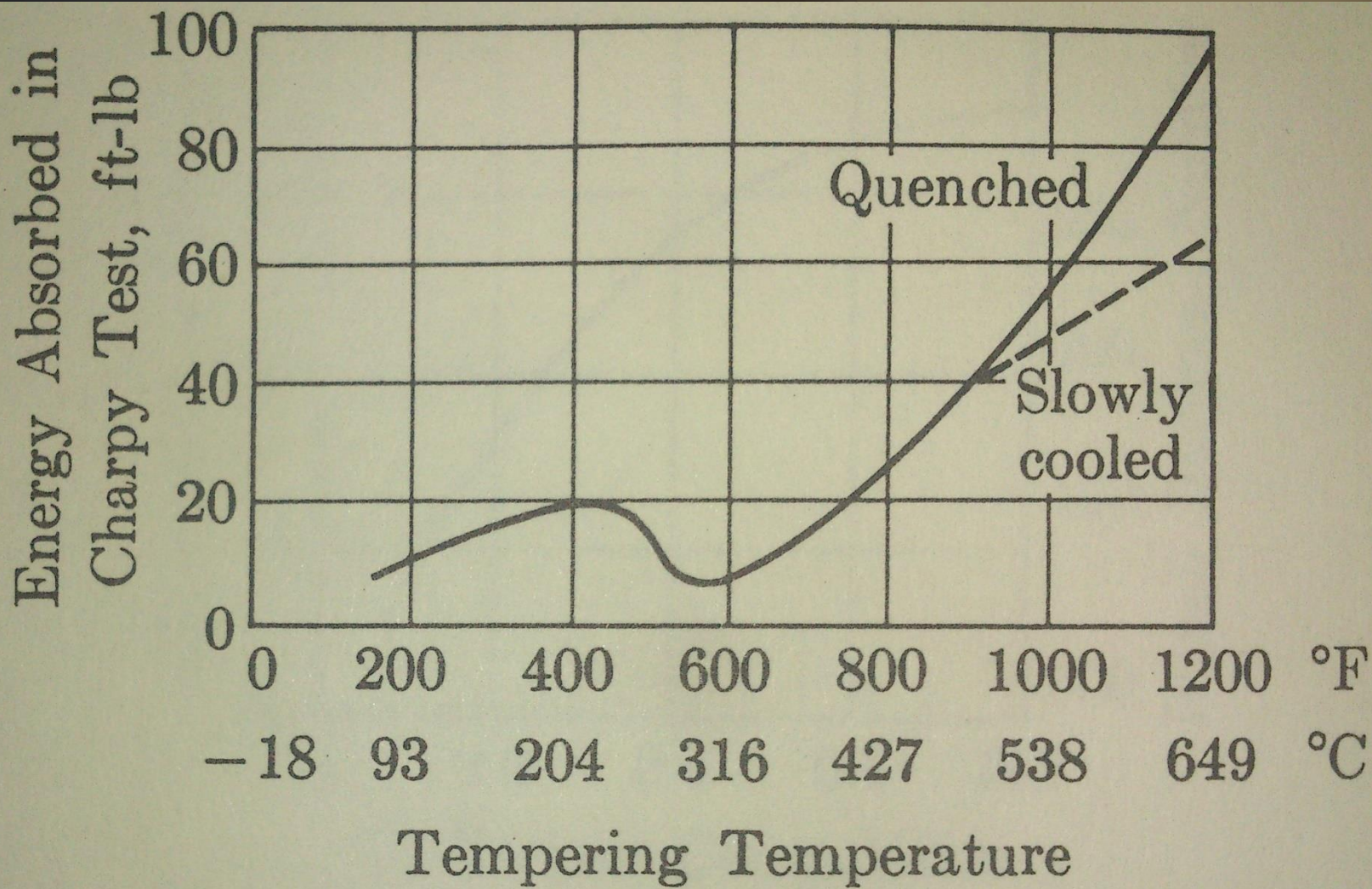
(b)

FIG. 10-9. (a) Microstructure of high-strength tension member for prestressing concrete. AISI 4140 steel, austenitized at 1550°F (843°C), quenched in oil, and tempered at 800°F (427°C). Rockwell C hardness 45. (×1000.) (Courtesy S. A. Oliver, M.I.T.) (b) Electron micrograph of a 0.42% C steel, quenched and tempered one hour at 800°F. Cementite films and particles are clearly resolved. (×15,000.) (Courtesy A. M. Turkalo, General Electric Research Laboratory.)

Durante la tercera etapa se producen dos tipos de fragilización.

Por encima de 260°C se obtiene un mínimo en la absorción de energía y el acero es susceptible de fractura frágil durante el servicio.

La fragilidad de revenido se produce en tratamientos prolongados a aprox. 482-566°C (900-1050°F) o durante el enfriamiento lento en este intervalo, después de un revenido a temperaturas más elevadas. Este efecto puede reducirse seleccionando tiempos y temperaturas adecuados, por medio de un enfriamiento rápido desde temperaturas elevadas de revenido, o bien con el uso de aceros aleados con molibdeno.



Cuarta etapa. Los carburos de aleación forman una dispersión fina y pueden producir un endurecimiento adicional, conocido como “endurecimiento secundario”.

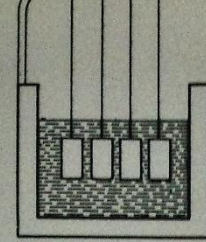
Estos aceros deben contener aleantes suficientes para producir carburos estables (cromo, wolframio, vanadio, molibdeno) a altas temperaturas de revenido.

No se pueden formar a temperaturas más bajas, debido a la mínima difusión a estas temperaturas de elementos aleantes, así como del carbono intersticial.

ESTRUCTURAS INTERMEDIAS

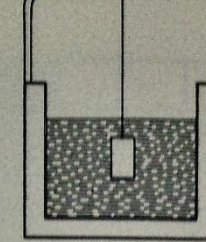
Existe una gran gama de estructuras al enfriar aceros austeníticos a velocidades intermedias entre el enfriamiento lento y el muy rápido. La investigación dentro del sistema hierro-carbono ha permitido conocer mejor la transformación de austenita en perlita y fases proeutectoides, descubrir la bainita y conocer mejor las condiciones para formación de martensita. Con estos fundamentos se han concebido nuevos tratamientos térmicos de gran importancia industrial para la producción de perlita, bainita y martensita en los aceros.

Transformaciones isotérmicas



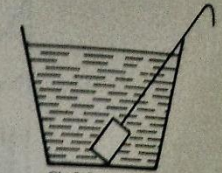
Molten salt bath
at 1425°F (774°C)

Austenitizing



Molten salt bath
at 1300°F (704°C)

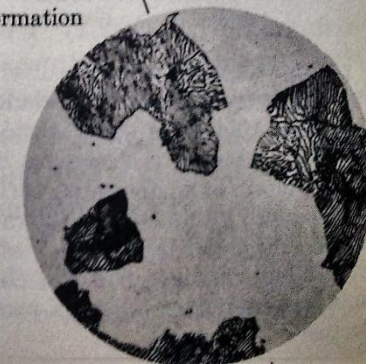
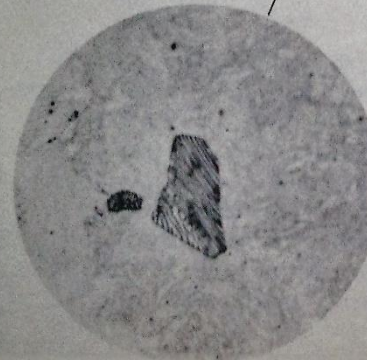
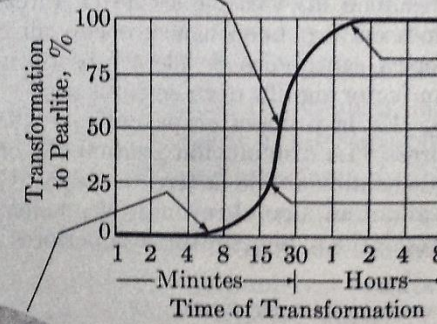
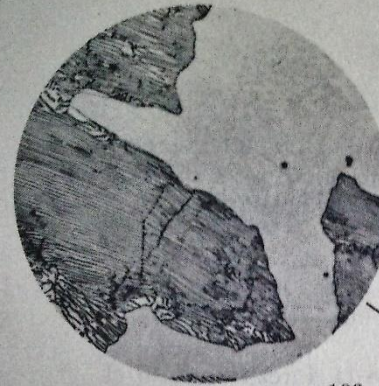
Isothermal heat treatment



Cold water

Quenching

(a)



Un diagrama T-I hace un resumen de las curvas de reacción isotérmicas para todas las temperaturas de reacción.

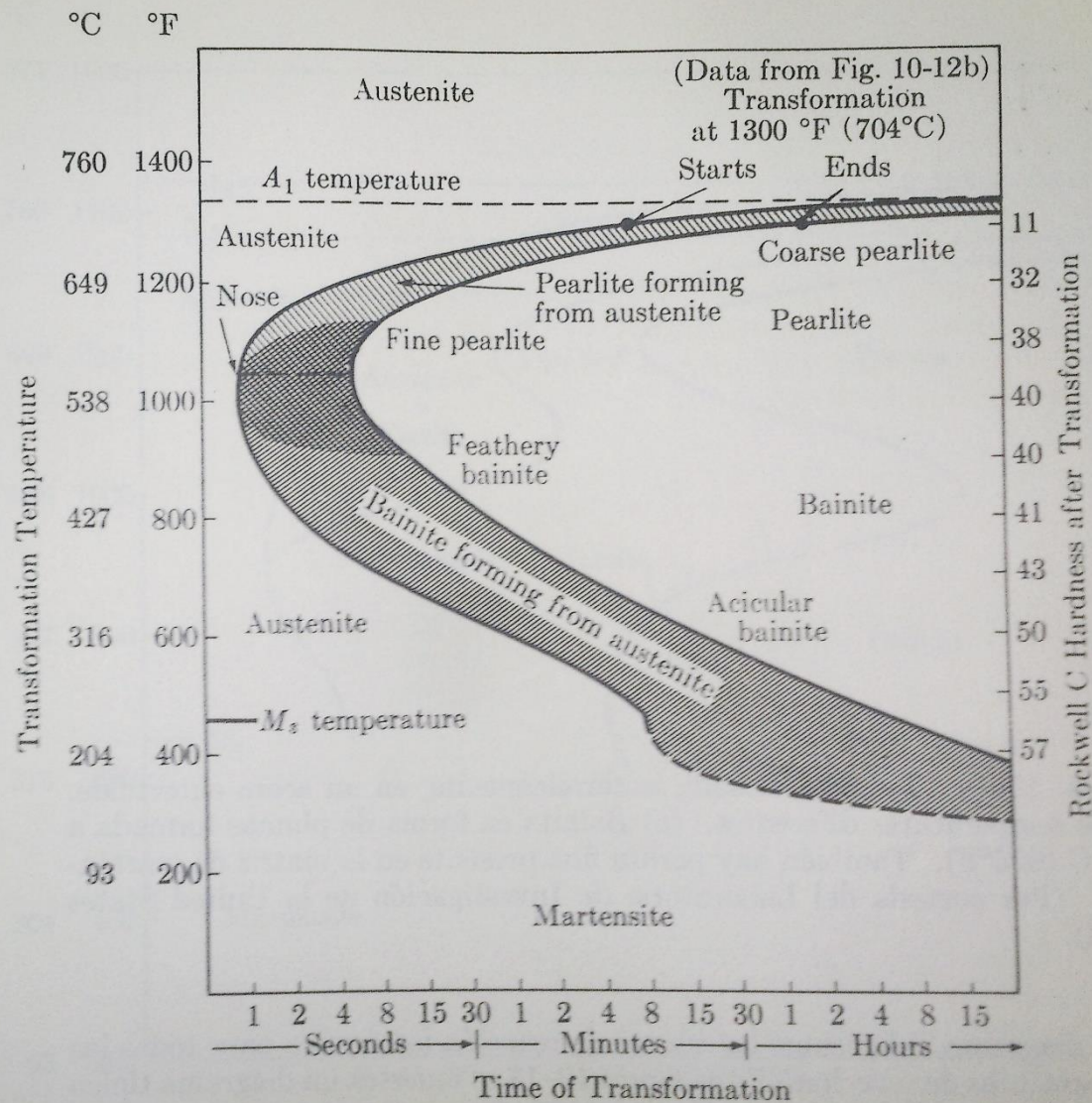


FIG. 10-13. Isothermal transformation diagram for decomposition of austenite in a eutectoid carbon steel.

Un diagrama T-I se lee de izquierda a derecha a cualquier temperatura elegida y las líneas encontradas representan los tiempos para el comienzo (1%) y el final de la reacción (99%).

La parte del diagrama entre las temperaturas A_1 y M_s se conoce como región de la “curva c” para la descomposición de la austenita.

En esta región, conforme la temperatura de transformación descende por debajo de A_1 , la reacción isotérmica va en aumento debido a que la austenita es cada vez menos estable, pero, a temperaturas más bajas, la velocidad de difusión es cada vez más lenta hasta alcanzar un efecto predominante y retardando la transformación.

Se puede observar que la velocidad de transformación y las propiedades de los productos dependen de la temperatura de transformación.

La perlita se transforma en todo el intervalo por encima de la nariz de la curva c, pero con el descenso de la temperatura, disminuye el espaciado interlaminar y aumenta su resistencia mecánica y dureza.

Por debajo de este punto, se forma una microestructura diferente de ferrita-carburo, el conocido como bainita.

La bainita varía desde la forma de “plumas” a temperaturas elevadas hasta formas laminares o aciculares a bajas temperaturas.

La bainita de bajas temperaturas se asemeja a la martensita revenida en dureza y microestructura.



(a)



(b)

FIG. 10-14. Bainite formed isothermally at two different temperatures in a eutectoid steel. (a) Feathery bainite formed at 925°F (496°C). Fine pearlite is also present in the martensite matrix. (b) Acicular bainite formed at 550°F (288°C). The matrix is martensite. (Courtesy United States Steel Research Laboratory.)

Cuando se tiene una temperatura por debajo de M_s se forma instantáneamente una pequeña cantidad de martensita en el enfriamiento, pero luego se transforma a bainita si se mantiene a cierta temperatura.

Los aleantes retardan la transformación isotérmica de la austenita. El elemento más potente en este aspecto es el carbono. El níquel tiene un efecto importante, ya que no forma carburos. Los elementos que forman carburos, como cromo y molibdeno, retrasan la transformación perlítica más que la bainítica, por lo que el diagrama cambia de forma a curvas c separadas.

Los aceros de alta aleación, por lo tanto, presentan curvas casi completamente separadas.

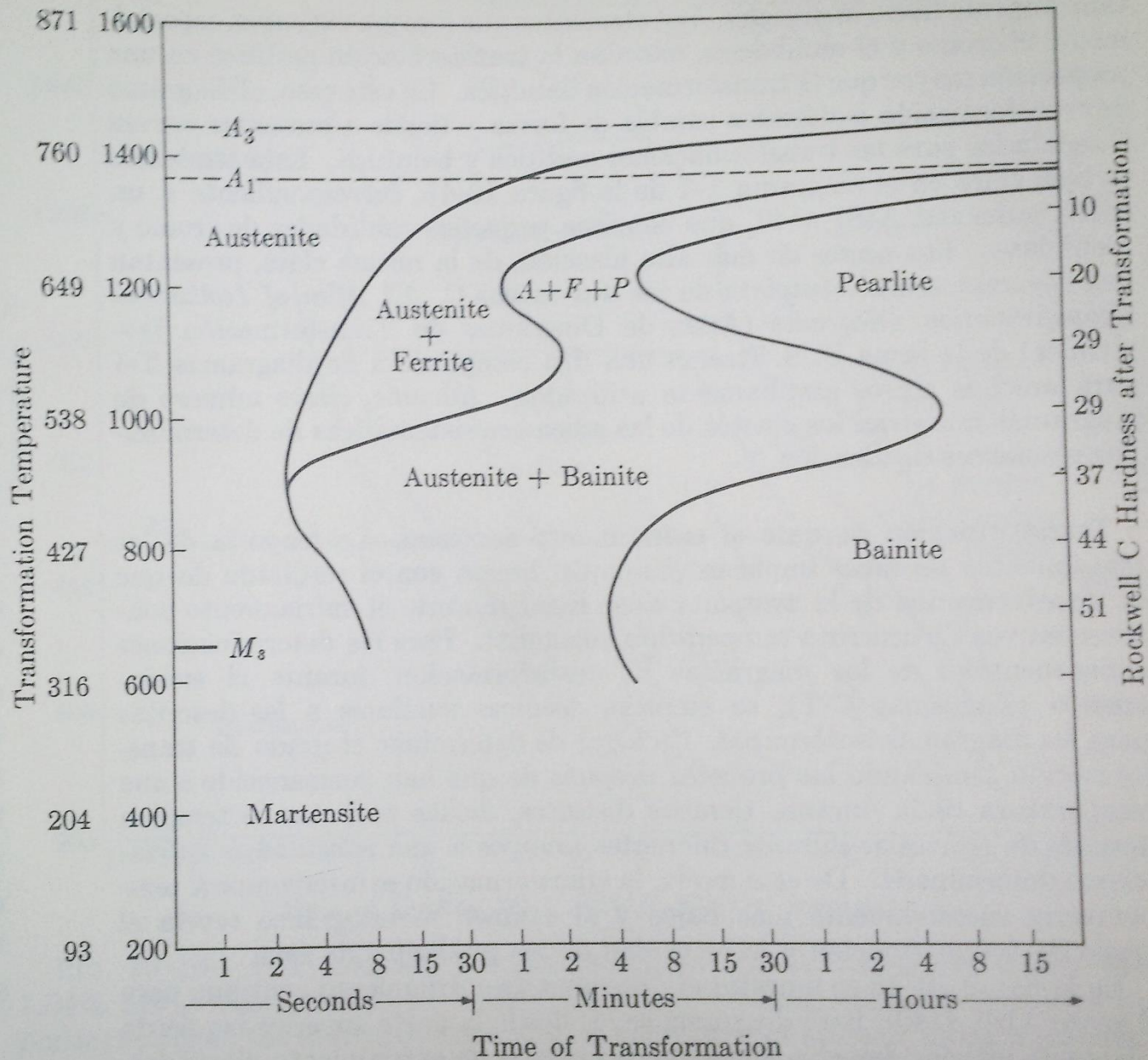


FIG. 10-15. I-T diagram for 4140 steel (0.37% C, 0.98% Cr, 0.21% Mo, 0.77% Mn). Austenitized at 1550°F (843°C). (After U. S. Steel, *Atlas of Isothermal Transformation Diagrams*.)

Diagramas de enfriamiento continuo

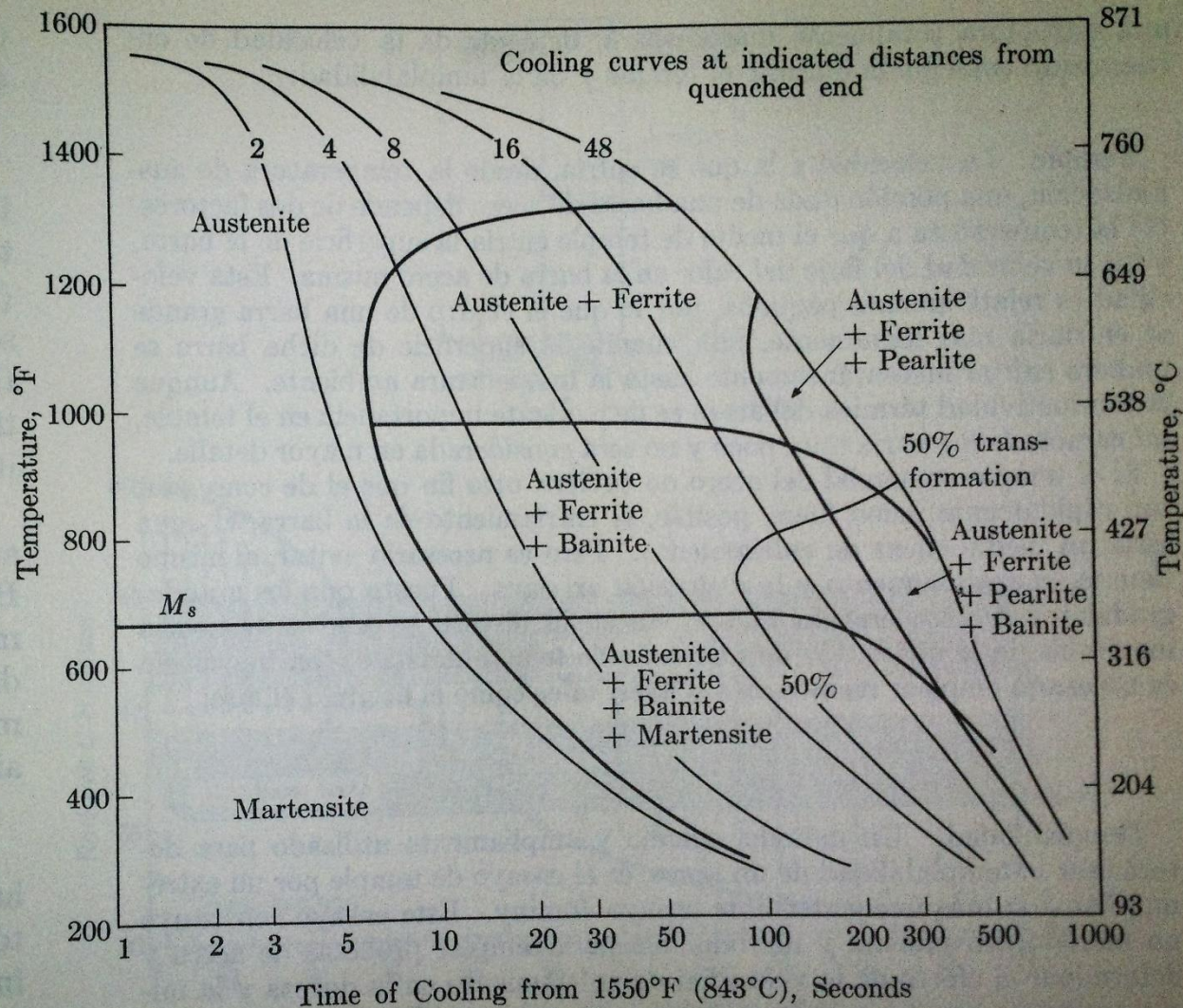


FIG. 10-16. C-T diagram for 4140 steel (0.44% C, 1.13% Cr, 0.15% Mo, 1.04% Mn). Austenitized at 1550°F (843°C). Cooling curves determined experimentally at the indicated distances, in sixteenths of an inch, along a standard end-quench specimen (described in next section). (After Blickwede and Hess, *Transactions American Society for Metals*.)

TABLA 13-2 ■ *Coficiente H, o severidad del templado, para varios medios de templado*

Medio	Coficiente H	Rapidez de enfriamiento en el centro de una barra de 1 pulg (°C/s)
Aceite (sin agitación)	0.25	18
Aceite (con agitación)	1.0	45
H ₂ O (sin agitación)	1.0	45
H ₂ O (con agitación)	4.0	190
Salmuera (sin agitación)	2.0	90
Salmuera (con agitación)	5.0	230

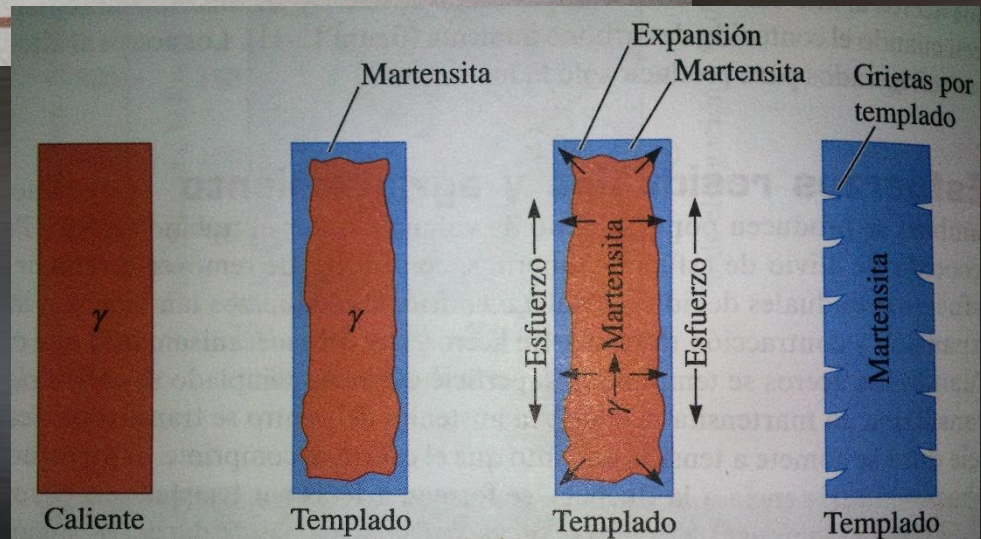


Figura 13-12 Formación de grietas por templado causadas por esfuerzos residuales producidos durante el templado. La figura ilustra el desarrollo de esfuerzos cuando la austenita se transforma en martensita durante el enfriamiento.

Temple

En un acero sólo se puede obtener una estructura totalmente martensítica si se le enfría a una velocidad superior a la crítica indicada en el diagrama de enfriamiento continuo.

Esta velocidad crítica disminuye al aumentar el contenido de carbono y aleantes: se dice que el acero posee una templabilidad más elevada.

Un acero de alta templabilidad permite obtener mayor cantidad de martensita en una pieza de cierto tamaño con un temple menos energético que el requerido por un acero de menor templabilidad.

Existen dos factores que influyen en la capacidad de enfriamiento:

1. La temperatura hasta la que se enfría la superficie de la barra con el medio de temple.
2. La velocidad de flujo de calor en la barra de acero.

Esta última velocidad es relativamente pequeña, debido a que se ve influenciada por las medidas de la barra de acero.

Un enfriamiento rápido permite obtener mayor cantidad de martensita; sin embargo, también provoca agrietamientos y distorsiones en las dimensiones de sólidos. El uso de agua a menudo provoca estos problemas, por lo que prefiere usarse aire o aceite en su lugar.

Los elementos aleantes permiten disminuir la temperatura M_s y obtener martensita a menores velocidades de enfriamiento.

Templabilidad

Los aceros al bajo carbono tienen baja templabilidad: sólo a velocidades altas de enfriamiento se obtiene martensita al 100%. En aceros de aleación se tiene alta templabilidad, por lo que se obtiene martensita enfriando incluso en aire.

La determinación de la templabilidad se realiza con el ensayo Jominy, usando una barra de acero de 4 in de largo y 1 in de diámetro austenitizada. Se coloca en un soporte y se rocía con agua por un extremo.

Con este tratamiento, se realizan pruebas de dureza a lo largo de la probeta para obtener la curva de templabilidad.

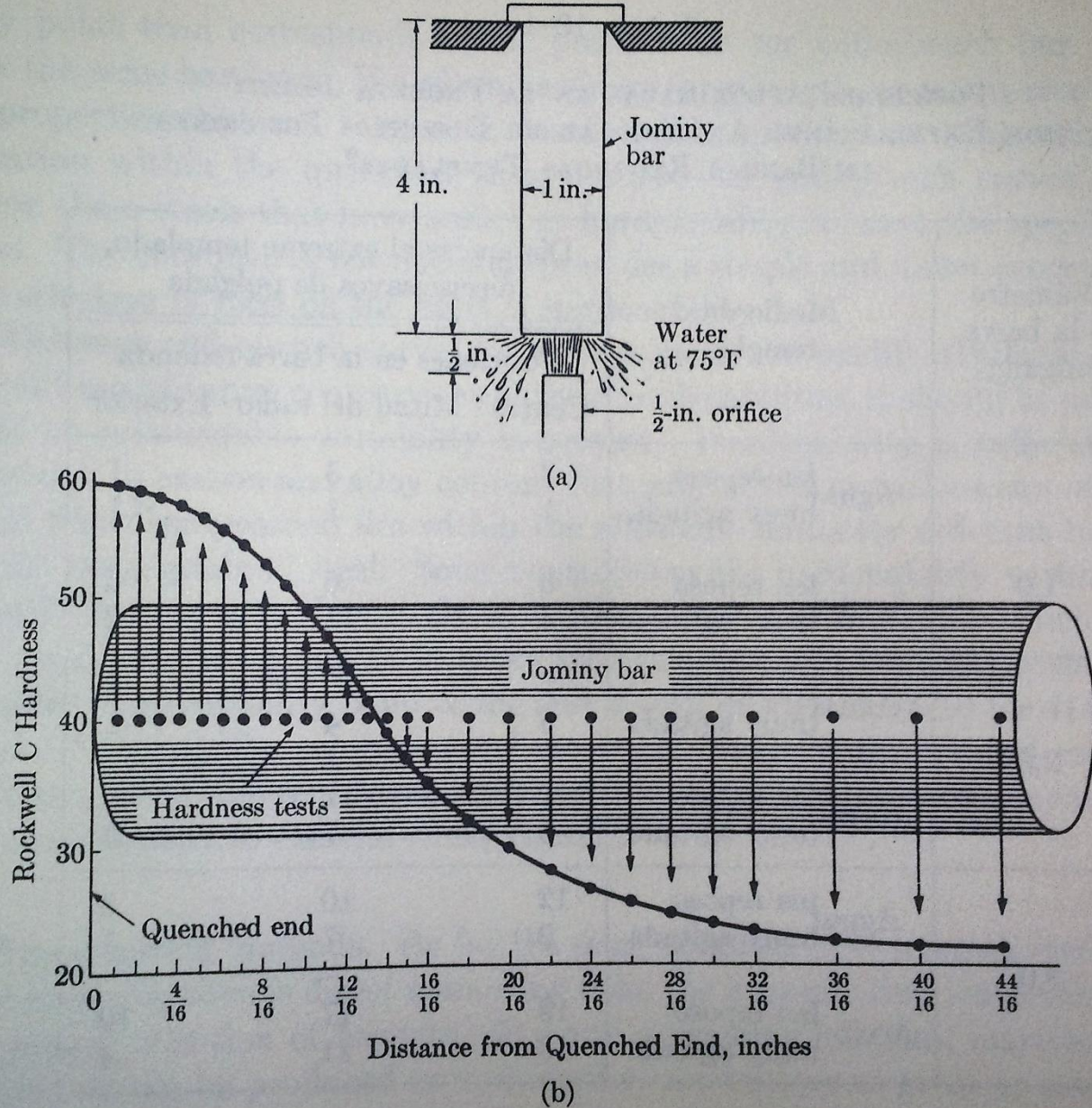
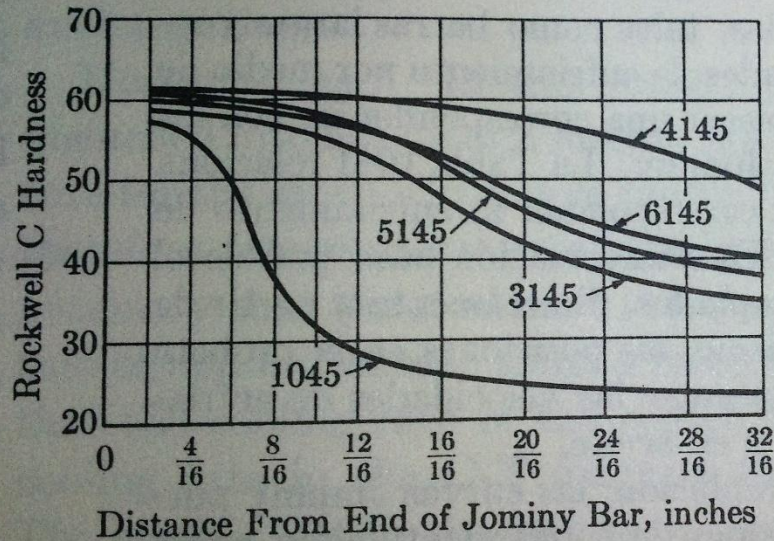
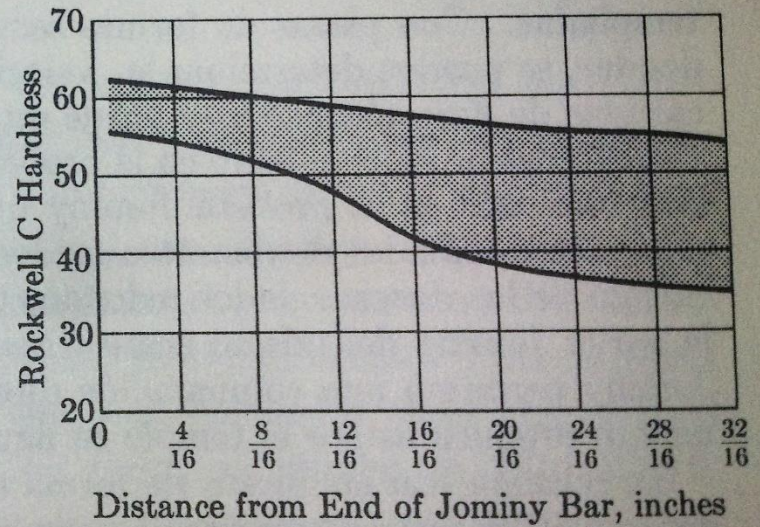


FIG. 10-17. The steps in obtaining an end-quench curve. (a) Procedure for end-quenching a Jominy bar after transfer to the quenching jig from the austenitizing furnace. (b) Jominy curve obtained by plotting the hardness values measured along the length of the quenched bar.



(a)



(b)

FIG. 10-18. (a) Typical end-quench curves for 0.45% C steels (Jominy).
 (b) Hardenability band for AISI 4145H steel.

TABLA 13-3 ■ Relación entre la rapidez de enfriamiento y la distancia Jominy

Distancia Jominy (pulg)	Rapidez de enfriamiento (°C/s)
$\frac{1}{16}$	315
$\frac{2}{16}$	110
$\frac{3}{16}$	50
$\frac{4}{16}$	36
$\frac{5}{16}$	28
$\frac{6}{16}$	22
$\frac{7}{16}$	17
$\frac{8}{16}$	15
$\frac{10}{16}$	10
$\frac{12}{16}$	8
$\frac{16}{16}$	5
$\frac{20}{16}$	3
$\frac{24}{16}$	2.8
$\frac{28}{16}$	2.5
$\frac{36}{16}$	2.2

Métodos de tratamiento térmico

El método clásico de tratamiento térmico es el temple desde la temperatura de austenitización.

Con una selección apropiada de templabilidad y medio de temple se puede producir una estructura martensítica incluso en secciones de varios centímetros de espesor.

Sin embargo, estos gradientes de temperatura ocasionan deformaciones y agrietamientos, con acumulación de tensiones térmicas.

Para reducir la distorsión y agrietamiento, se usan dos principales técnicas de templado: “martempering” y “austempering”.

Martempering o revenido martensítico

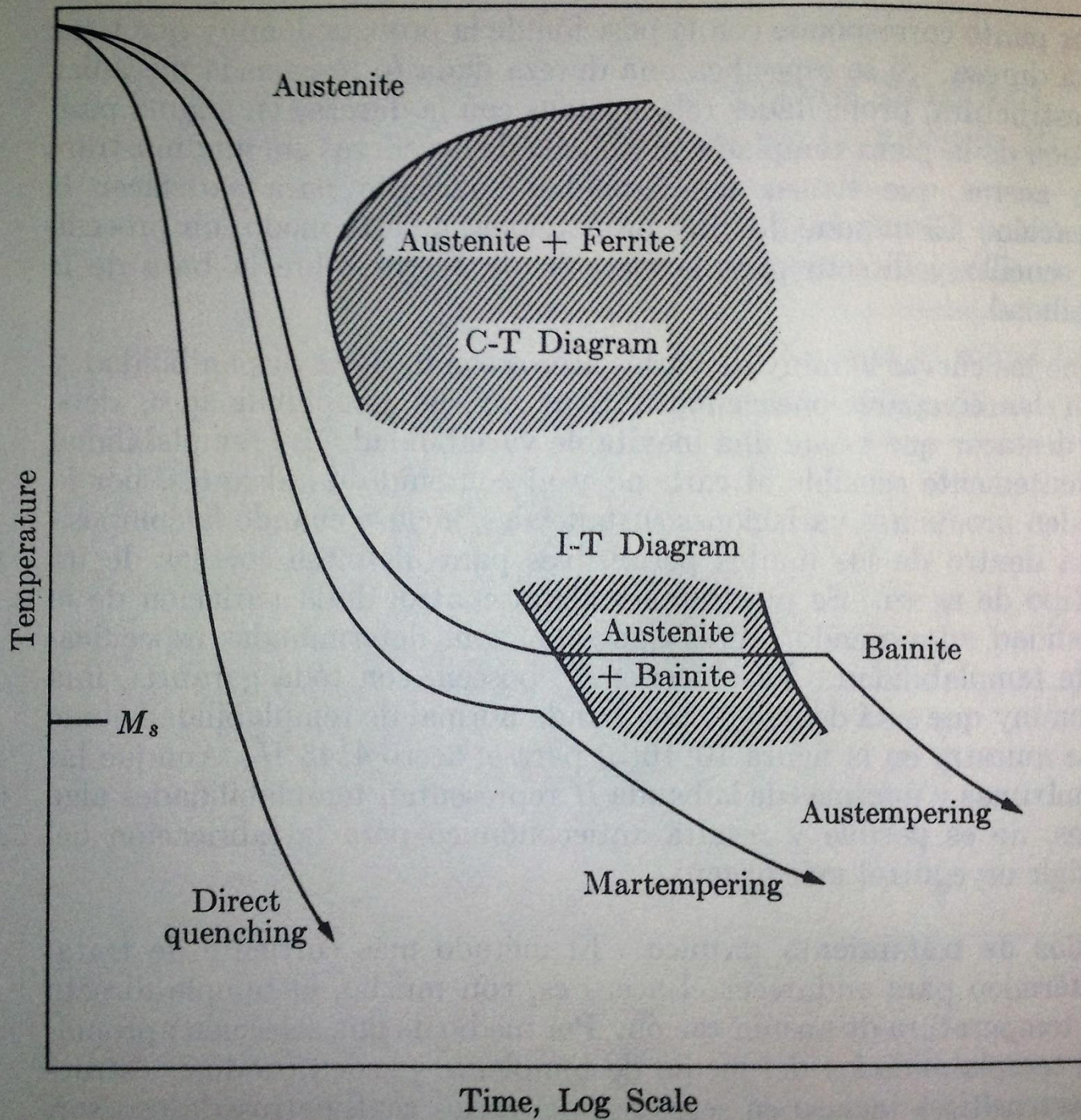
Se austeniza el acero y se templea en aceite caliente o baño de sales fundidas manteniendo por encima de la M_s del acero.

El acero debe tener suficiente templabilidad para evitar formación de productos diferentes a la martensita.

Se mantiene en el baño y se retira para evitar la formación de bainita. Se enfría en aire para formar martensita de manera gradual. Con este proceso, se reducen al mínimo las deformaciones. A continuación, el acero puede revenirse de manera normal.

Austempering o revenido austenítico

Se mantiene el acero en el baño hasta obtención de bainita completamente. No es necesario el revenido, manteniendo la temperatura a la de transformación adecuada.



Aceros especiales