درس خواص فیزیکی ومکانیکی مواد

دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران - دکتر مسعود رنگی سال ۱۳۹۴

فصل هفتم:
دیاگرام آهن- کربن و
عملیات حرارتی فولاد و آلومینیوم

- مقدمه:

- دانش و فهم دیاگرامهای فازی برای سیستم های آلیاژی بسیار مهم است. زیرا ارتباط بسیار نزدیکی بین ریزساختار و خواص مکانیکی وجود دارد (ضمناً نحوه تشکیل ریزساختار نیز به دیاگرام فازی بستگی دارد). بعلاوه، دیاگرامهای فازی اطلاعات بسیار با ارزشی را درباره ذوب، ریخته گری، تبلور و انجماد (Crystalization) و ... بدست می دهند.

- ما در این فصل به بررسی نکات ذیل خواهیم پرداخت:

- تعاریف مربوط به دیاگرامهای فازی و استحاله های فازها
- توضیح و تحلیل دیاگرامهای فازی
- توضیح دیاگرامهای دو تایی مهم از قبیل سیستم آهن – کربن
- توسعه و تکامل ریز ساختارهای تعادلی به هنگام سرد کردن (از مذاب)
- استحاله فازها (Phase transformation)
- عملیات حرارتی (Heat treatment)

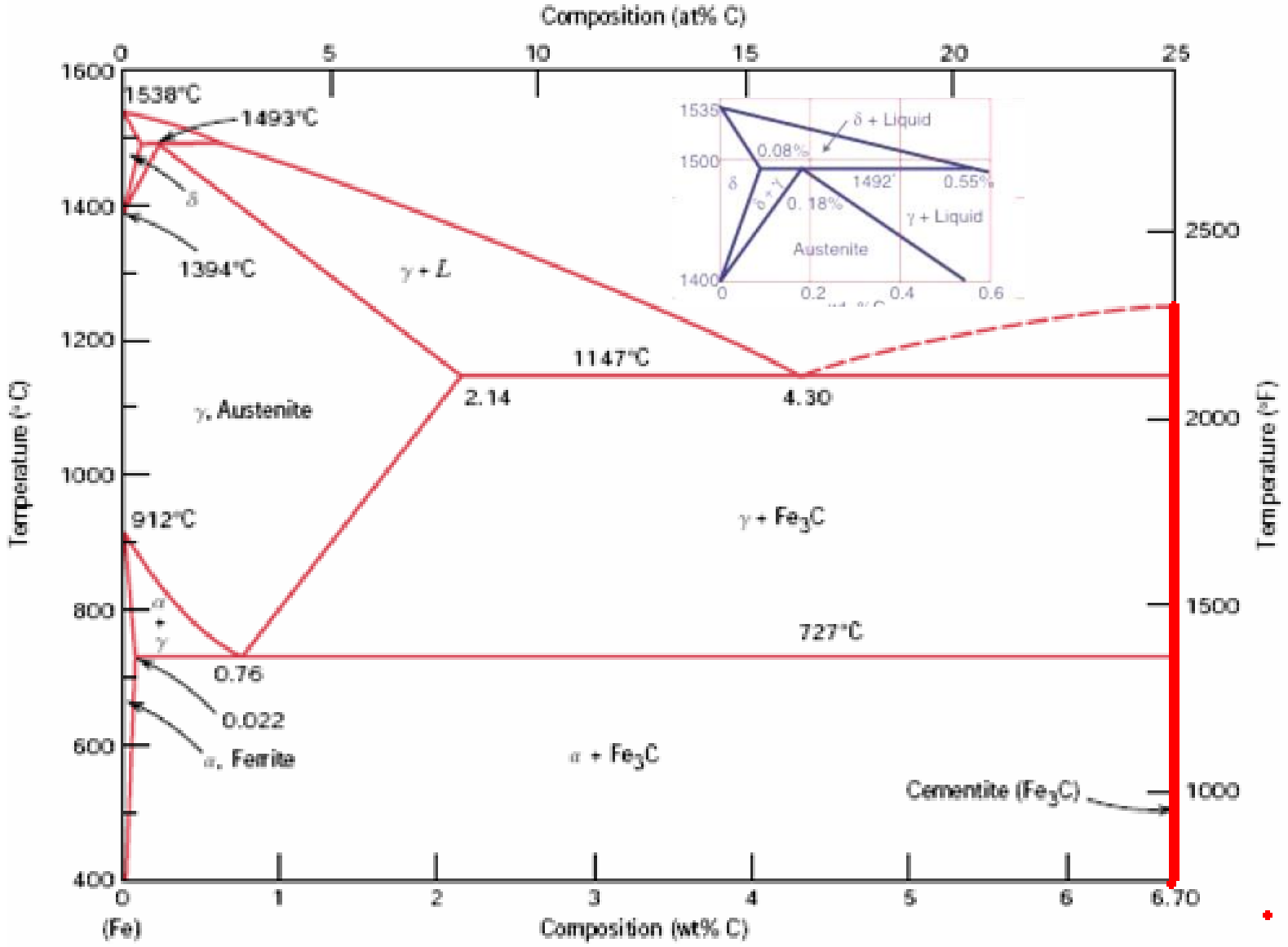
۷-۳- دیاگرام آهن – کربن

The Iron – Carbon System

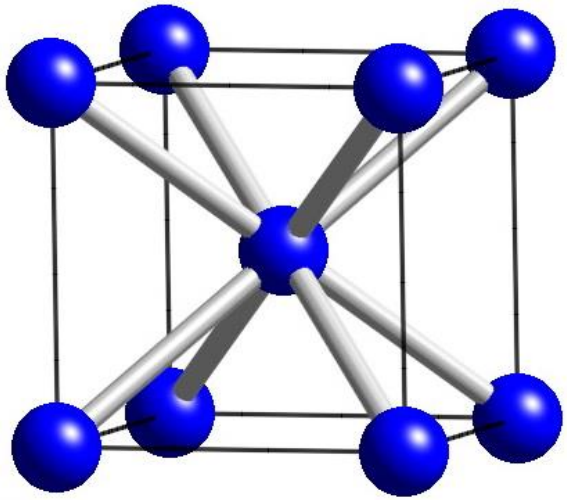
- شاید مهمترین سیستم صنعتی و آلیاژی دیاگرام آهن – کربن باشد. زیرا اکثر فولادها (بیش از چند هزار نوع) و انواع چدنها را می توان با این سیستم تحلیل کرد. ما در این قسمت به مطالعه دیاگرام آهن – کربن و نحوه توسعه و ایجاد ریز ساختار آن خواهیم پرداخت.

- **۷-۳-۱- دیاگرام آهن – کاربید آهن**
- **(Fe-Fe3C)**

- قسمتی از دیاگرام آهن – کربن در شکل ۲۰-۷ نشان داده شده است. نکات مهم این دیاگرام عبارتند از:

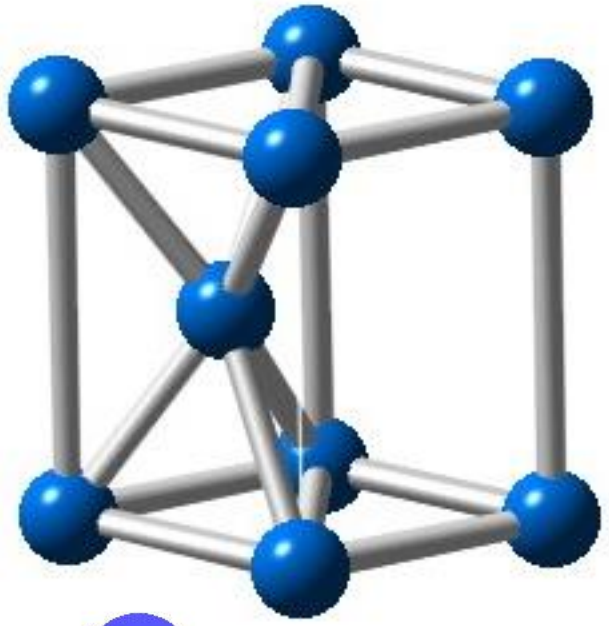

Composition (at% C)
0
5
10
15
20
25
1600
1400
1200
1000
800
600
400
1538°C
1493°C
δ
1394°C
γ + L
1147°C
2.14
4.30
γ, Austenite
912°C
γ + Fe3C
α
+
γ
727°C
0.76
0.022
α, Ferrite
α + Fe3C
Cementite (Fe3C)
2500
2000
1500
1000
0
1
2
3
4
5
6
6.70
(Fe)
Composition (wt% C)
Temperature (°C)
Temperature (°F)
1535
1500
1400
δ + Liquid
0.08%
δ
δ + γ
1492°
0.55%
0.18%
γ + Liquid
Austenite
0
0.2
0.4
0.6

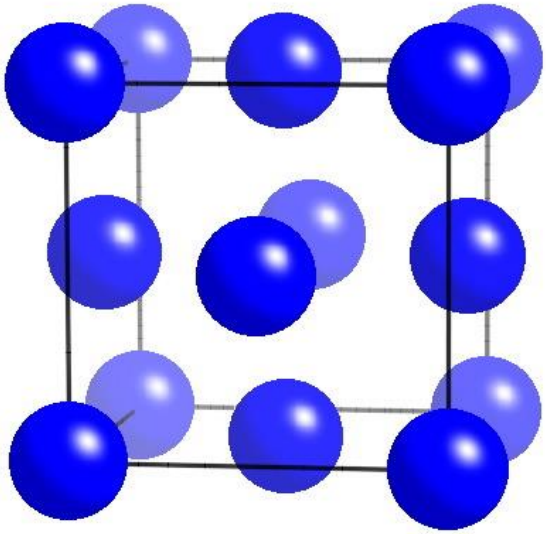
Allotropes of iron in three dimensions



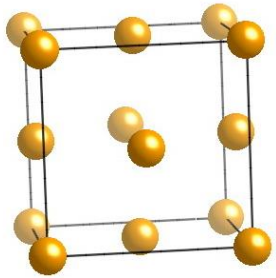
α

ε





γ



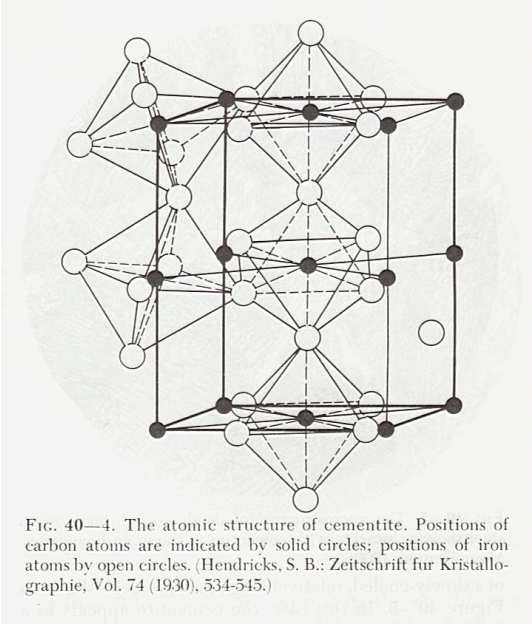
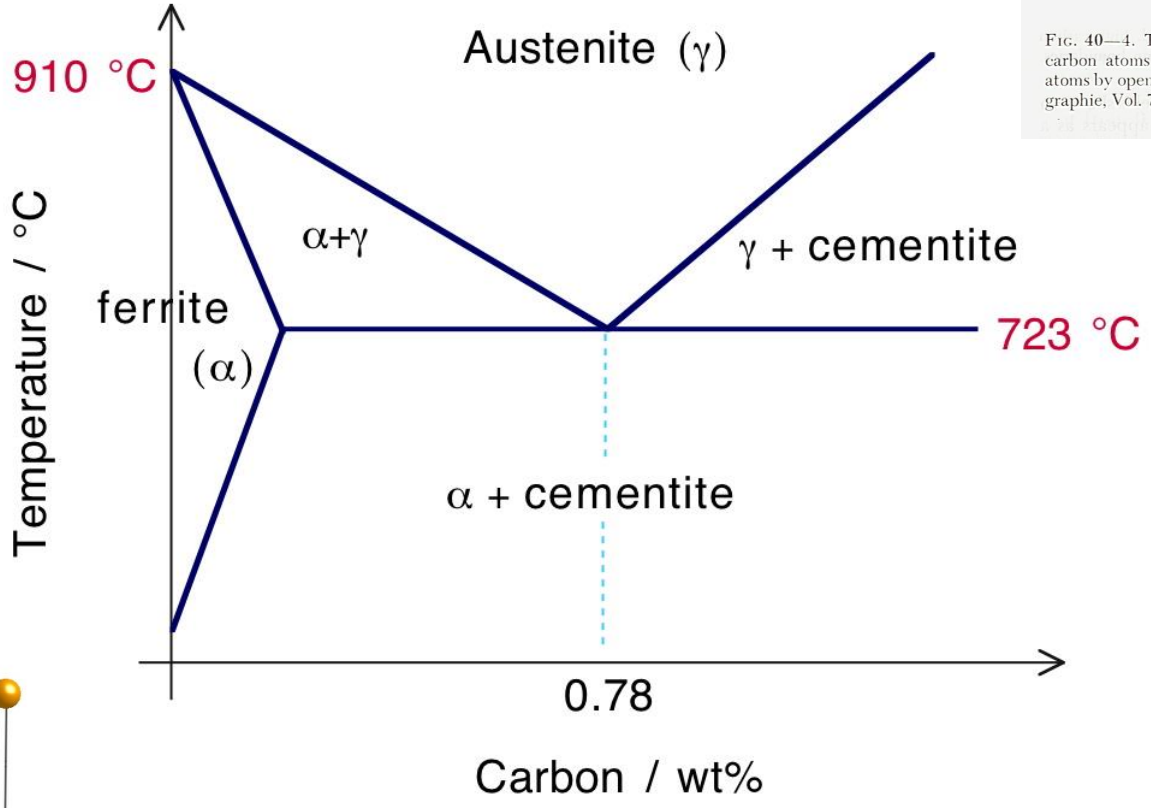
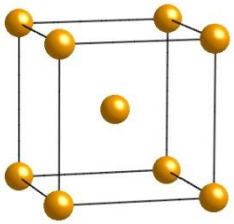
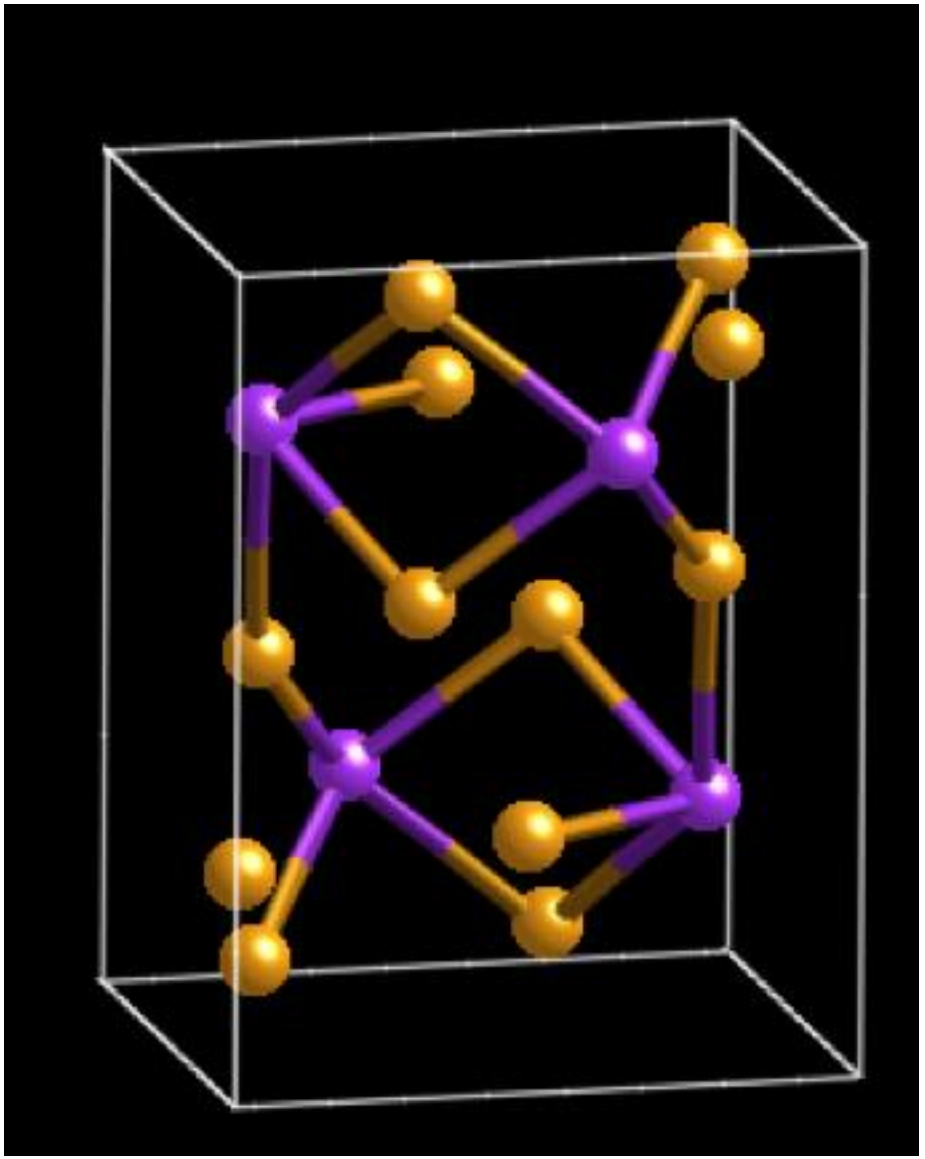


FIG. 40—4. The atomic structure of cementite. Positions of carbon atoms are indicated by solid circles; positions of iron atoms by open circles. (Hendricks, S. B.: Zeitschrift fur Kristallographie, Vol. 74 (1930), 534-545.)





Cementite
Fe_3C



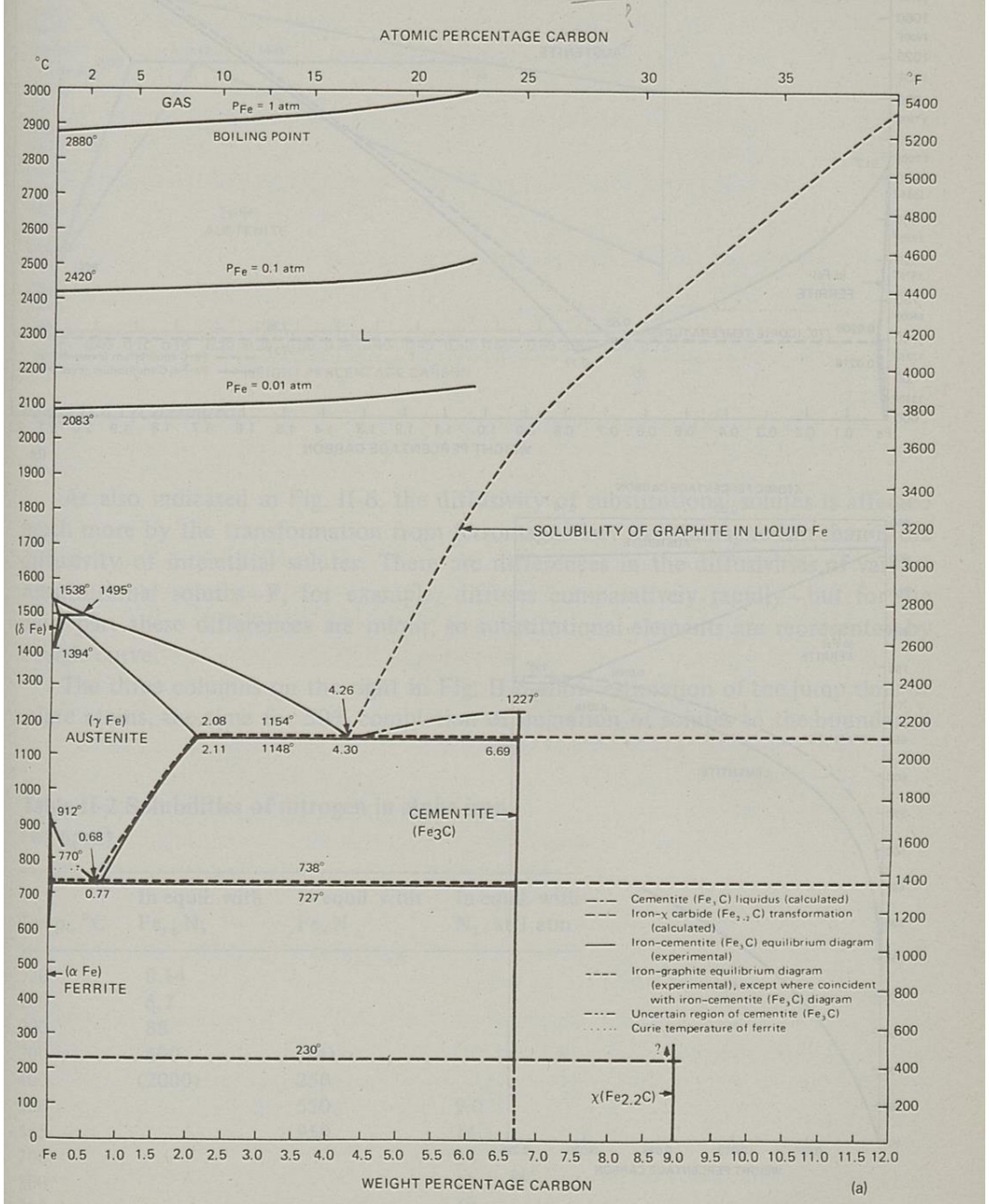
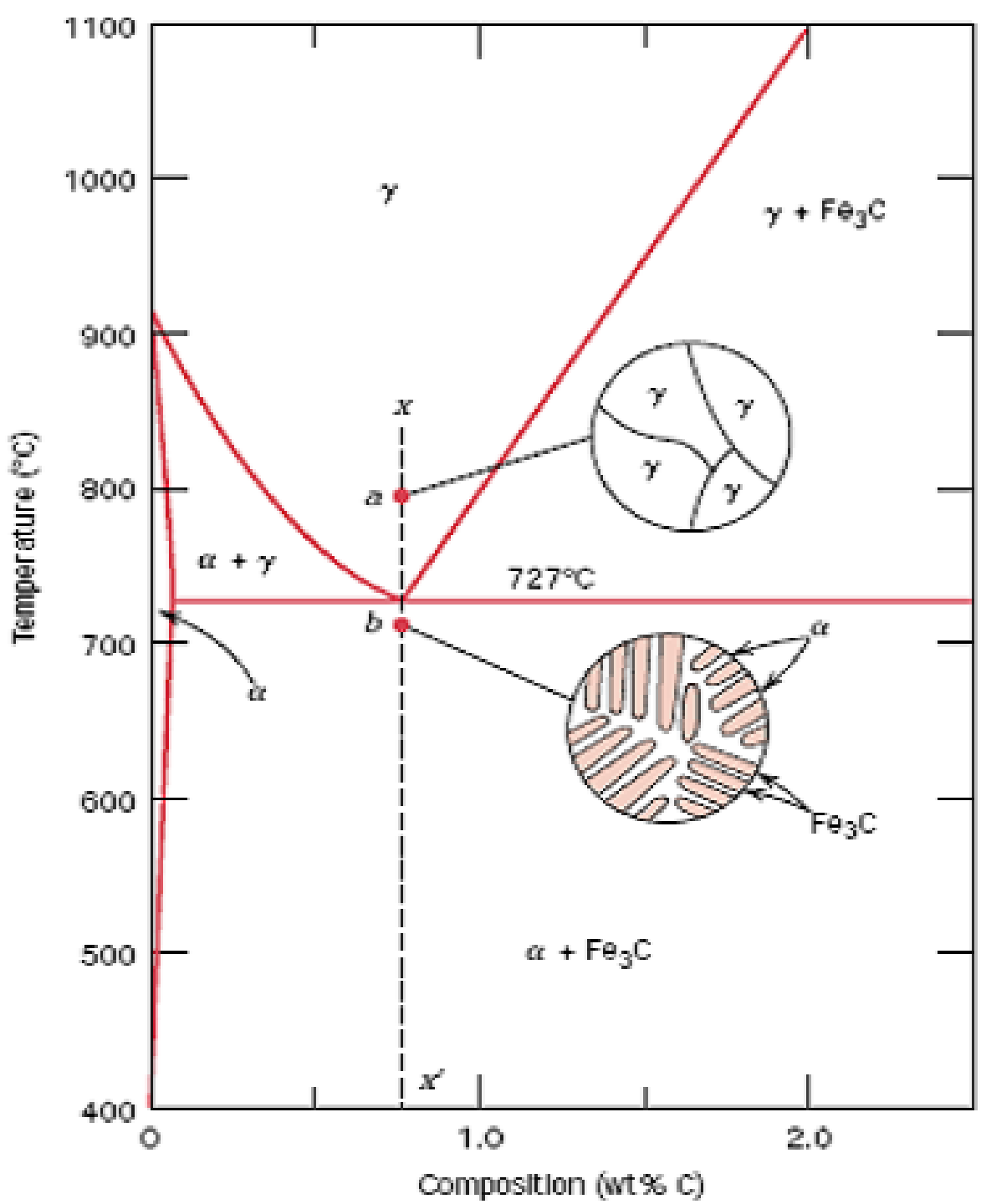


Figure II-4. (*a*) The carbon–iron phase diagram. (*b*) The eutectoid region. (*c*) Ferrite field, showing equilibrium between Fe–C, Fe–Fe_3C, and Fe–$Fe_{2.4}C$. (*d*) Delta ferrite field. (J. Chipman, *Metals Handbook*, 8th ed., vol. 8, Am. Soc. Met., Metals Park, Ohio, 1973, by permission.)

۷-۳-۲- توسعه و تکامل ریز ساختار در سیستم آهن – کربن

- ریز ساختار فولادها به درصد کربن و نوع عملیات حرارتی که بر روی آن صورت می گیرد بستگی دارد. ما در این فصل نحوه ایجاد ساختار ریز در هنگام سرد کردن تعادلی را بحث خواهیم کرد و تأثیر عملیات حرارتی بر روی ریز ساختار را در فصل بعدی مورد بحث قرار خواهیم داد. نحوه توسعه ریز ساختار در فولاد یوتکتوئید در شکل ۲۲-۷ نشان داده شده است.


1100
1000
900
800
700
600
500
400
0
1.0
2.0
Temperature (°C)
Composition (wt% C)
γ
γ + Fe3C
α + γ
α + Fe3C
727°C
x
x'
a
b
α
Fe3C

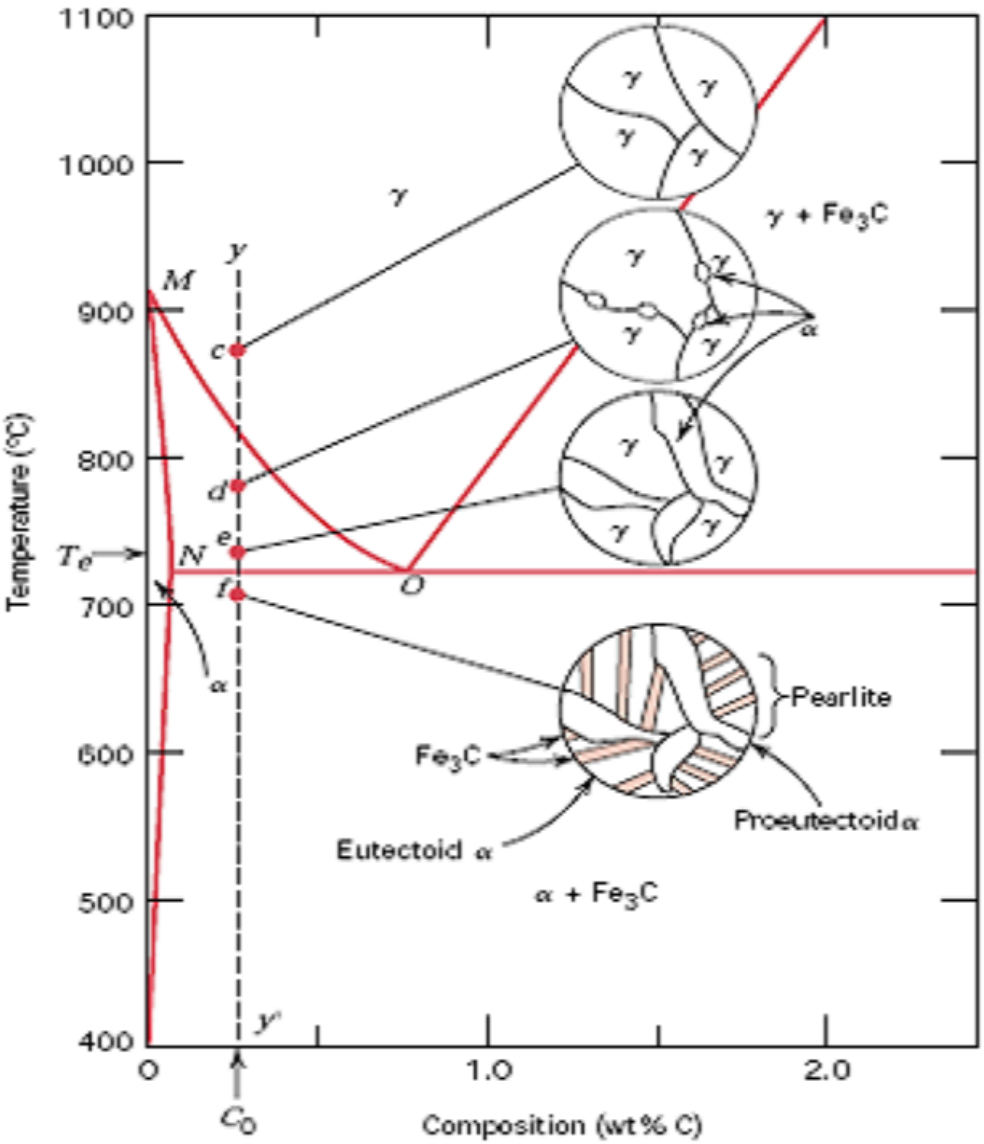
20 μm

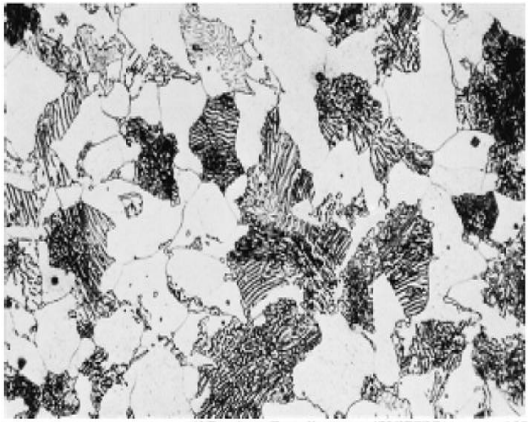
- در نقطه يوتكتوئيد، (γ)گاما با كربن 0.77 درصد به فريت (حاوي 0.022 درصد كربن) و سمانتيت Fe3C تجزيه مي شود. اين استحاله متضمن ديفوزيون كربن است (به خارج ازγ). اين ساختار لايه اي (حاوي فريت و سمانتيت) را پرليت مي نامند. خواص مكانيكي پرليت حد واسط فريت (نرم) و سمانتيت (سخت) است (شكل ۲۳-۷)

- **آلیاژهای ماقبل یوتکتوئید (هیپویوتکتوئید) Hypoeutectoid alloys**

- نحوه توسعه و تکامل آلیاژهای ما قبل یوتکتوئید در شکلهای ۲۴-۷ و ۲۵-۷ نشان داده شده است.

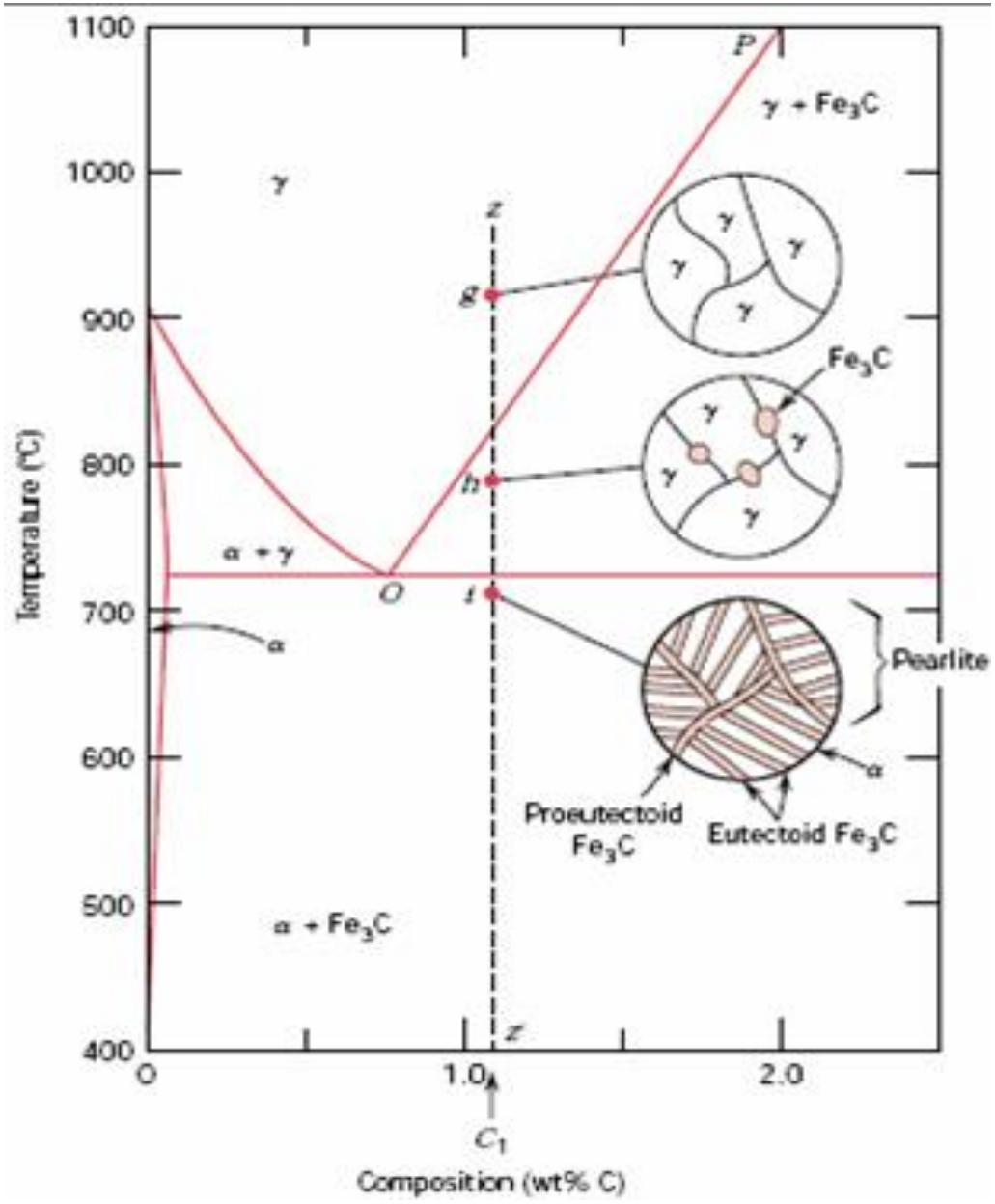
- فریت موجو در پرلیت را فریت یوتکتوئید و فریت منطقه دو فازه را فریت ما قبل یوتکتوئید (Proeutectoid) می نامند.

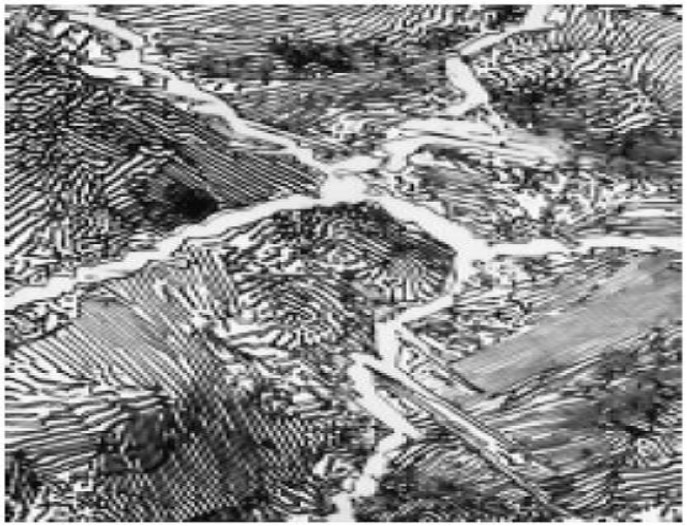

1100
1000
900
800
700
600
500
400
Temperature (°C)
T_e
M
N
O
y
y'
c
d
e
f
γ
γ + Fe3C
α
α + Fe3C
Pearlite
Fe3C
Eutectoid α
Proeutectoid α
0
1.0
2.0
C_0
Composition (wt % C)



- **آلیاژهاي ما بعد یوتکتوئید**
- **Hypereutetopod alloys**

- نحوه توسعه و تکامل زیر ساختار در آلیاژهای ما بعد (هیپر) یوتکتوئید در شکل ۲۶-۷ و ۲۷-۷ نشان داده شده است. سمانتیت تشکیل شده در منطقه دو فازه $\gamma + Fe_3C$ و سمانتیت ما قبل یوتکتوئید می نامند.


1100
1000
900
800
700
600
500
400
0
1.0
2.0
Temperature (°C)
Composition (wt% C)
C_1
P
$\gamma + Fe_3C$
γ
z
g
h
i
O
Fe_3C
$\alpha + \gamma$
α
Pearlite
Proeutectoid Fe_3C
Eutectoid Fe_3C
$\alpha + Fe_3C$
z'



- مثال: ۲-۷ براي آلياژ Fe-0.35C ۶۵/۹۹ و در نقطه درست زير يوتکتوئيد موارد ذيل را محاسبه کنيد:
  - a) درصد کلی فازهای فریت و سمانتیت
  - b) درصد کلی فریت و سمانتیت ما قبل یوتکتوئید
  - c) درصد فریت یوتکتوئید
  - حل:

a)

b) $W_P = \frac{0/35 - 0/022}{0/77 - 0/022} = 0/44$

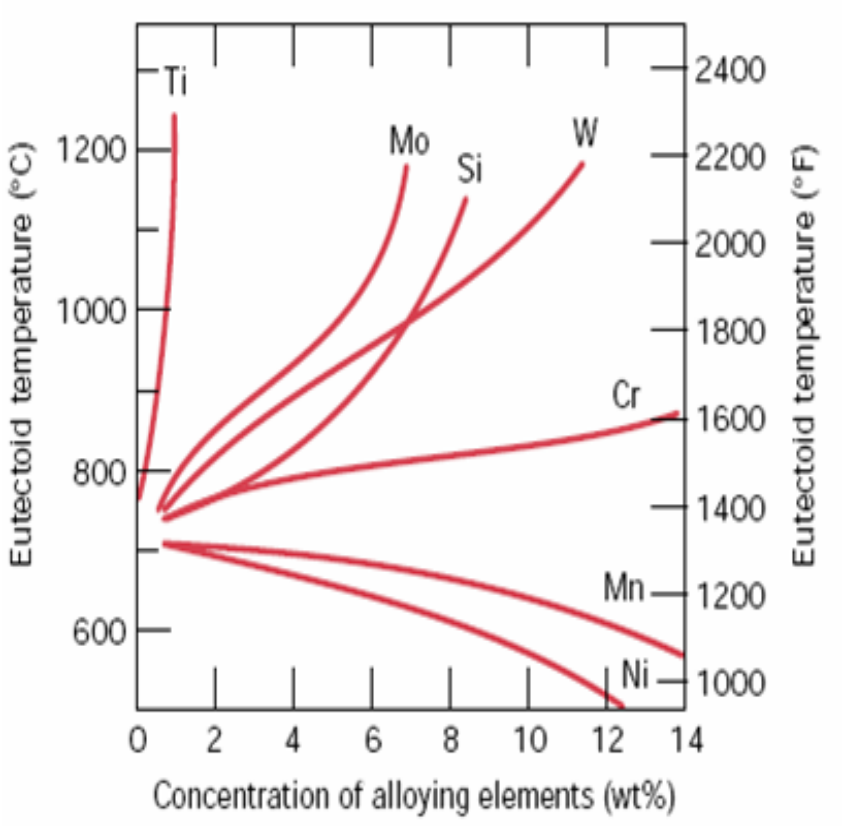
$$\%44, W_a = \frac{0/77 - 0/35}{0/77 - 0/022} 0/56$$

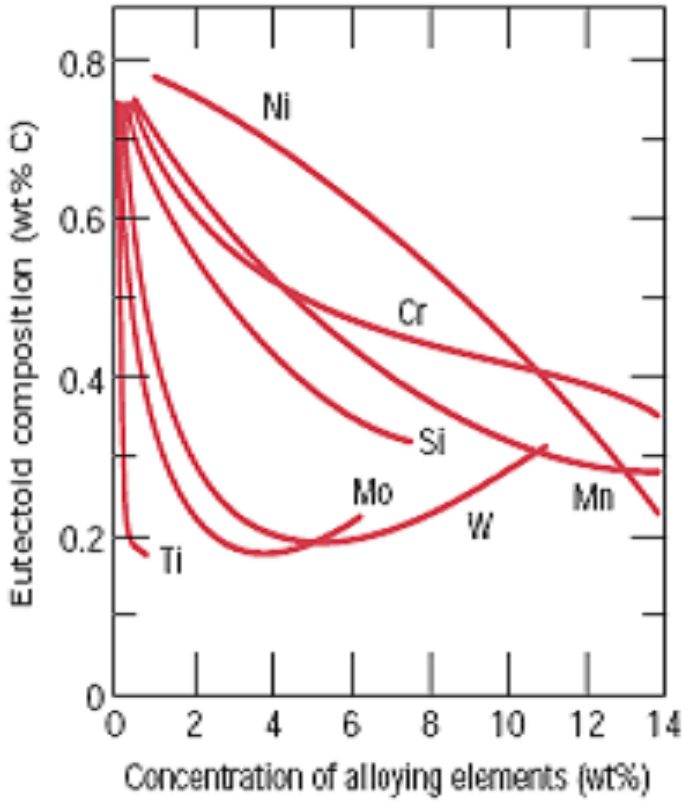
c) $W_a + W_{ac} = W_a \Rightarrow W_{ac} = W_a - W_a = 0.95 - 0.56 = 0.39$

٧-٤- تأثير عناصر آلياژي

The influence of other alloying elements

- اضافه کردن عناصر آلیاژی از قبیل کرم، نیکل، تیتانیوم و ... شکل منحنی آهن – کربن را تغییر می دهد، شاید مهمترین تغییر در این دیاگرام تغییر نقطه یوتکتوئید باشد. شکل ۲۸-۷ و ۲۹-۷ تأثیر افزایش عناصر آلیاژی را در دمای یوتکتوئید و ترکیب شیمیایی نقطه یوتکتوئید را نشان می دهند و مکانیزم این عمل به علت پدیده دیفوزیون می باشند.


Eutectoid temperature (°C)
Eutectoid temperature (°F)
Concentration of alloying elements (wt%)
Ti
Mo
Si
W
Cr
Mn
Ni
1200
1000
800
600
2400
2200
2000
1800
1600
1400
1200
1000
0
2
4
6
8
10
12
14


Eutectoid composition (wt% C)
Concentration of alloying elements (wt%)
Ni
Cr
Si
Mo
W
Mn
Ti
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
2
4
6
8
10
12
14

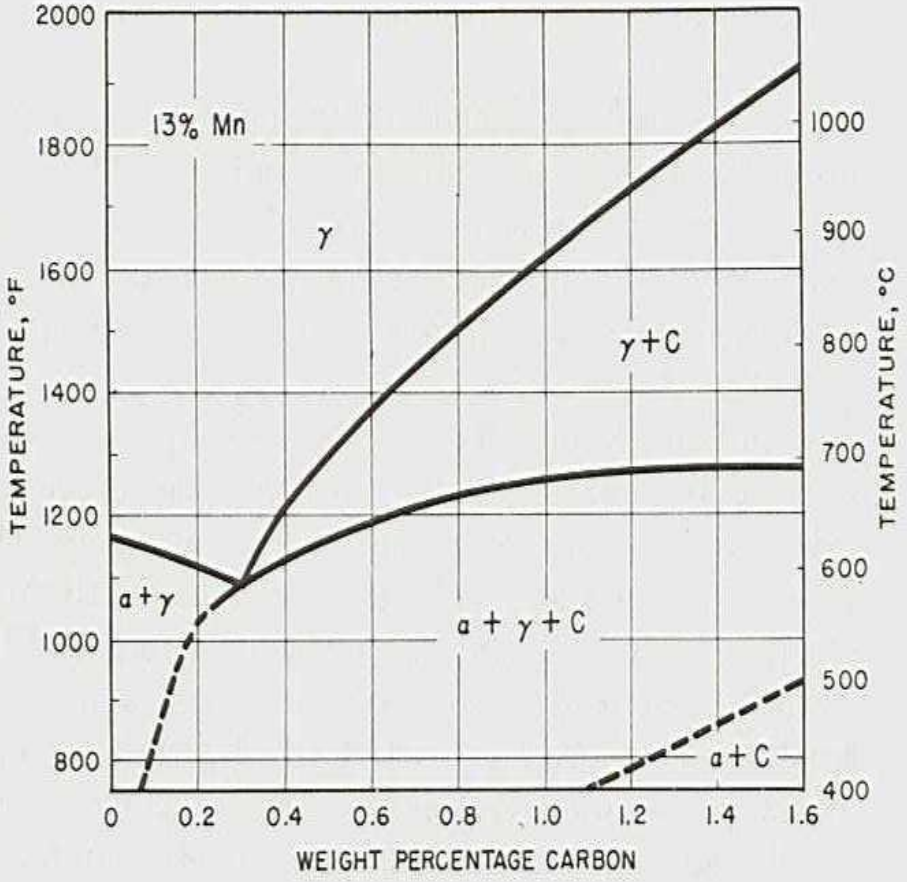


FIG. 40—13. Section of the Fe-C-Mn equilibrium diagram at 13 per cent manganese content. From "Metals Handbook" (American Society for Metals), 1948 Edition; page 1252.

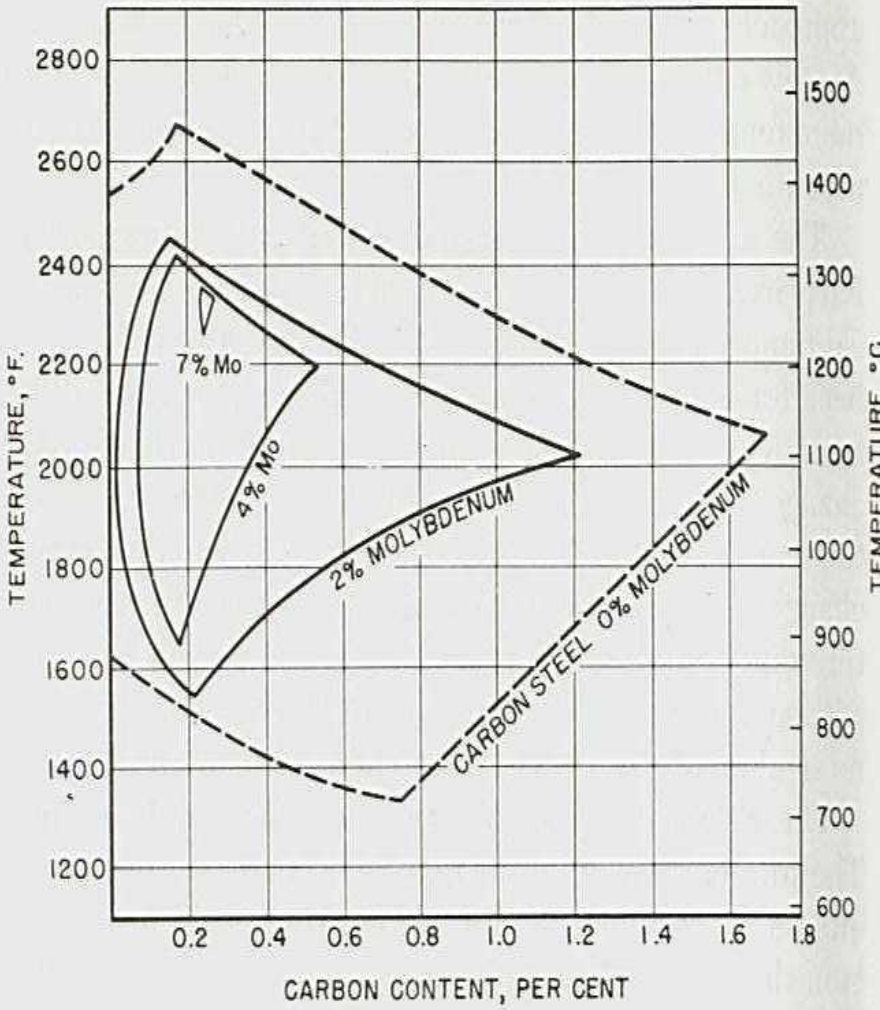
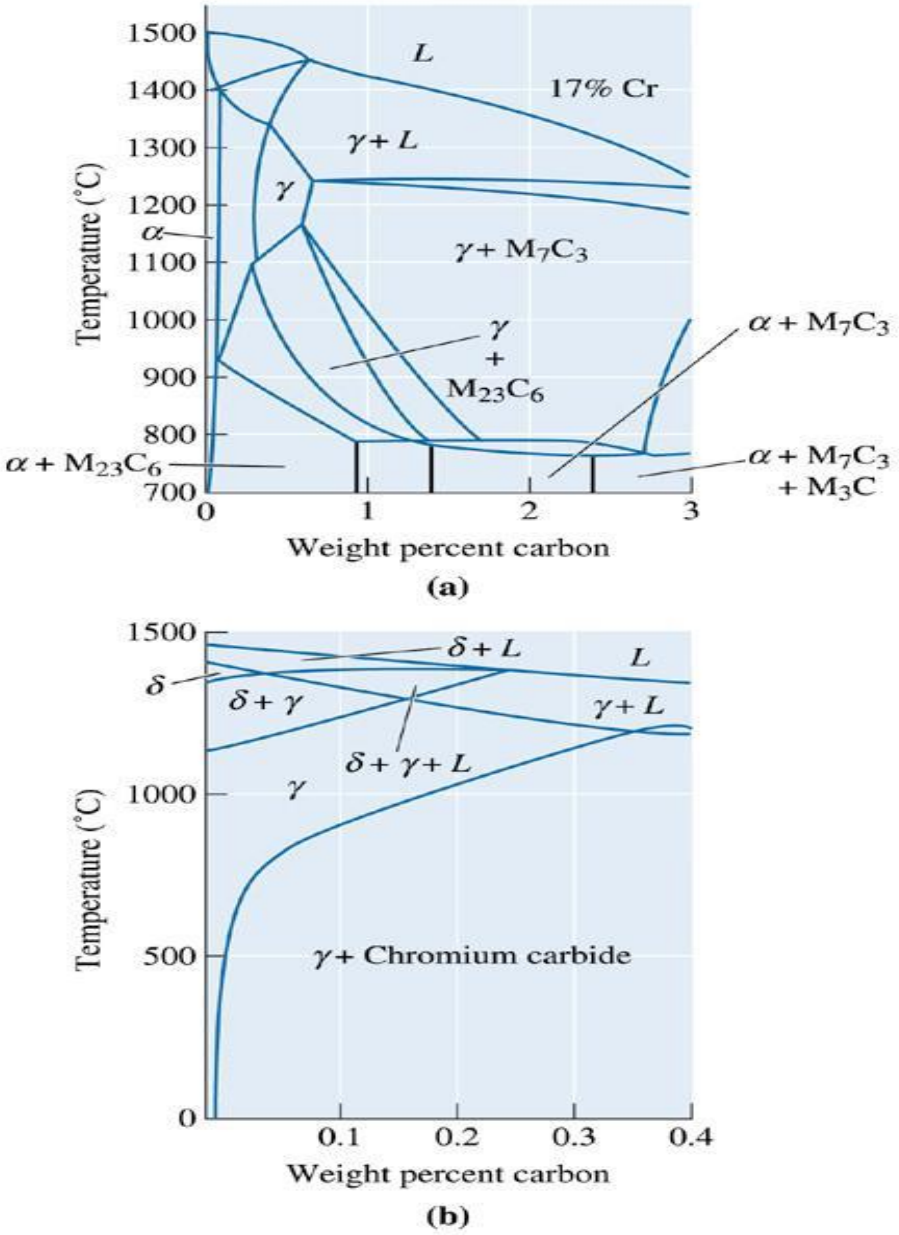
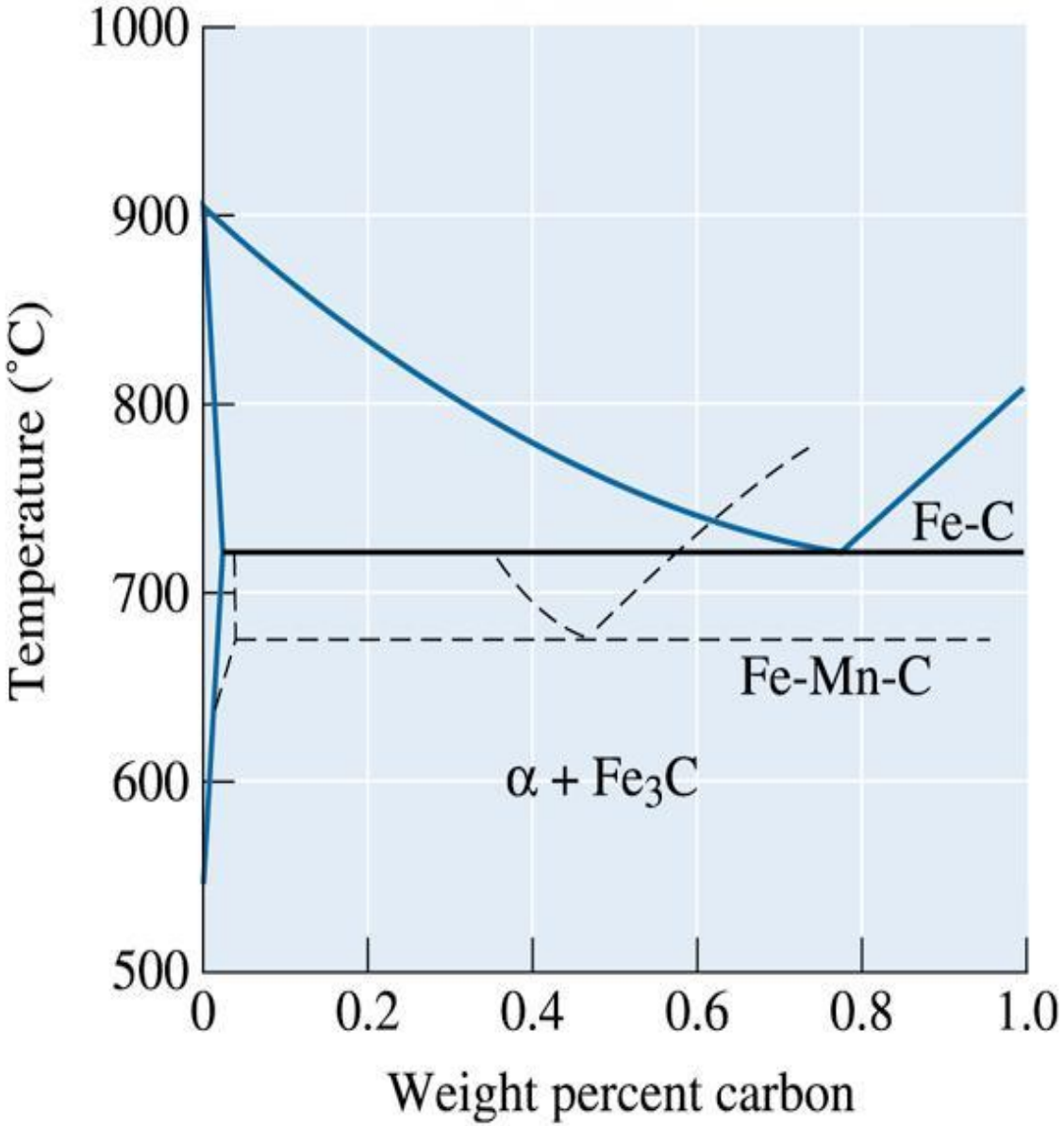


FIG. 40—14. The effect of molybdenum on the composition and temperature range over which austenite is stable. (After Bain.)

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.



(a) The effect of 17% chromium on the iron-carbon phase diagram. At low-carbon contents, ferrite is stable at all temperatures. (b) A section of the iron-chromium-nickel-carbon phase diagram at a constant 18% Cr-8% Ni. At low-carbon contents, austenite is stable at room temperatures.



The effect of 6% manganese on the stability ranges of the phases in the eutectoid portion of the Fe-Fe_3C phase diagram.

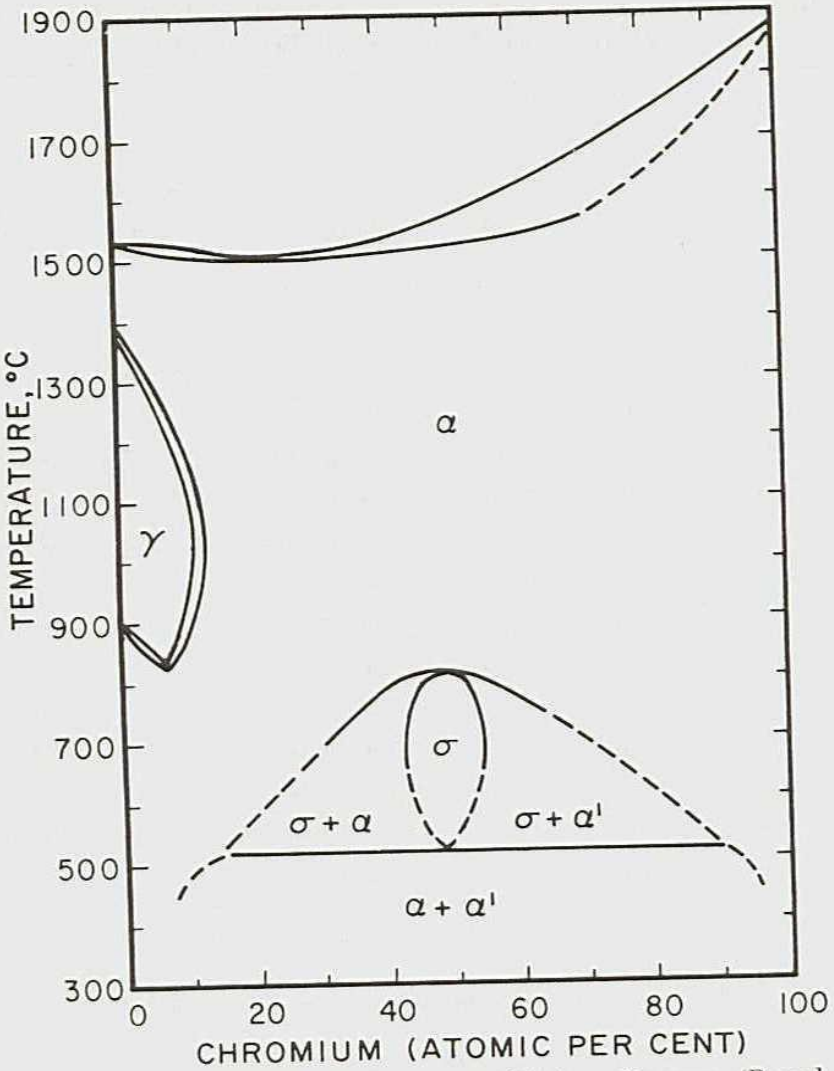
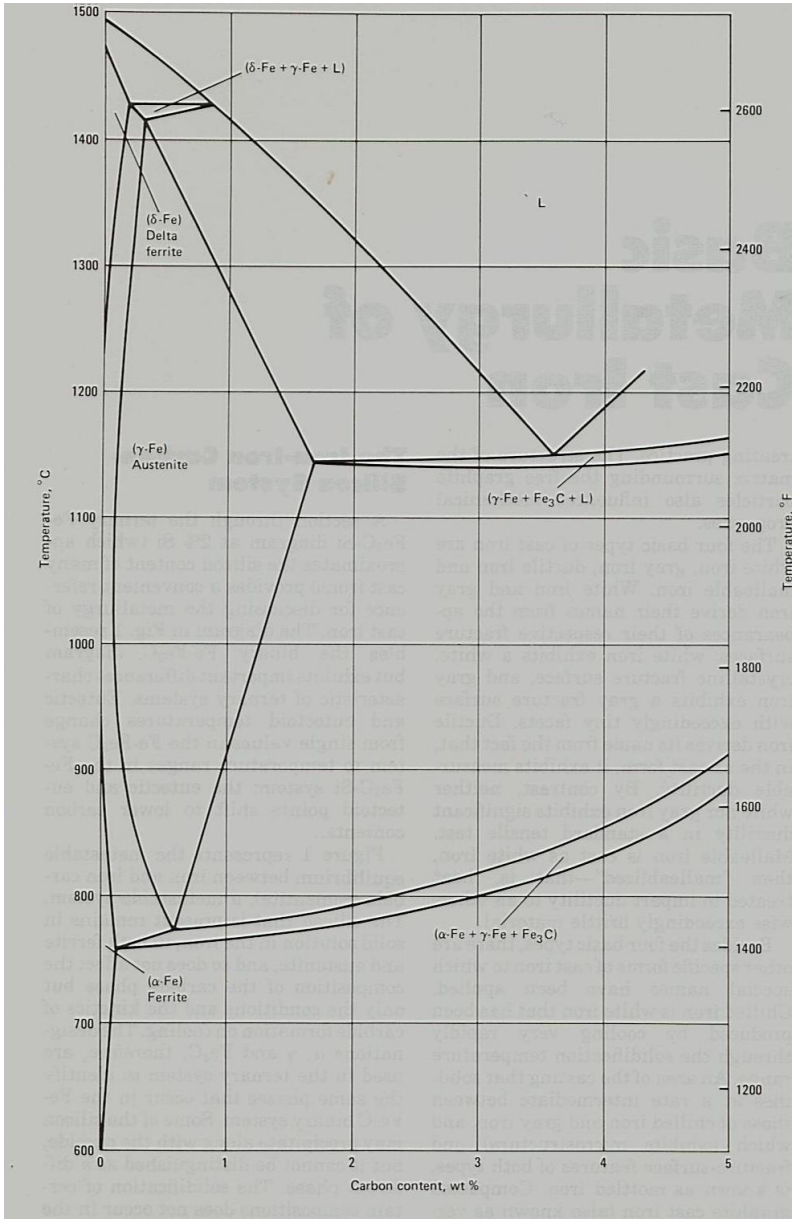


FIG. 46—1. The iron-chromium equilibrium diagram. (Based largely on Elliott's "Constitution of Binary Alloys" listed in the bibliography at the end of this chapter.)



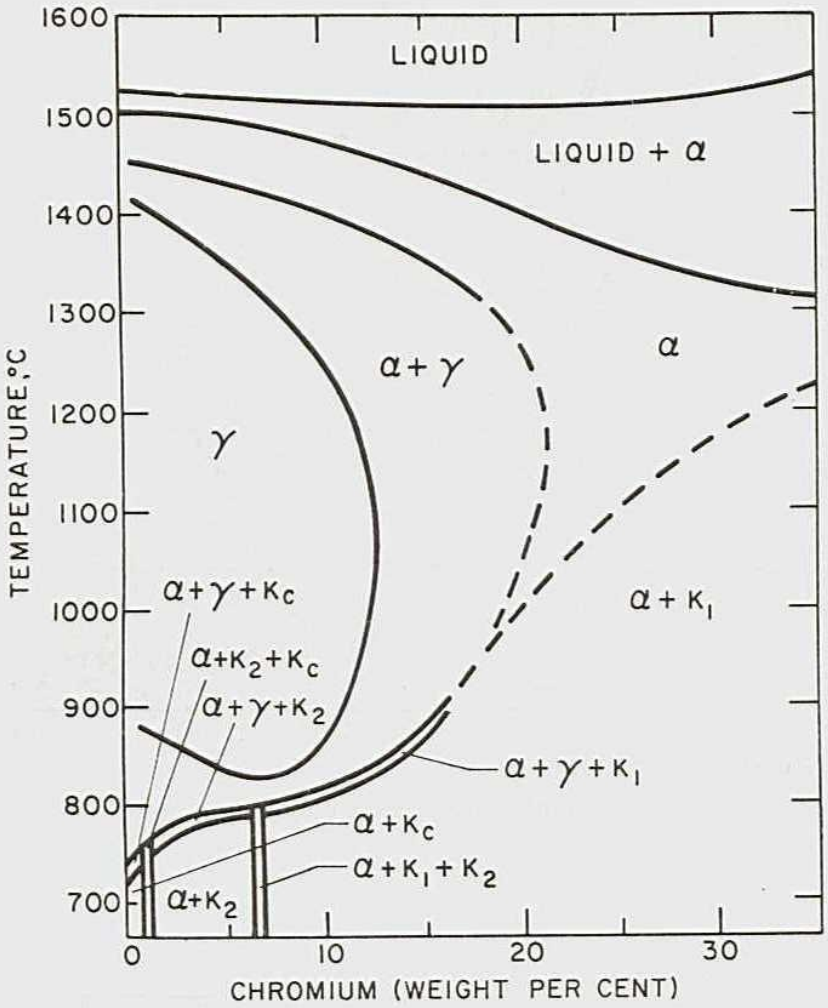


FIG. 46—8. Constant section at 0.05 per cent carbon through iron-chromium-carbon diagram. $K_c = Fe_3C$; $K_1 = (Fe,Cr)_{23}C_6$; $K_2 = (Fe, Cr)_7C_3$. (After Bungardt, Kunze and Horne: see bibliography.)

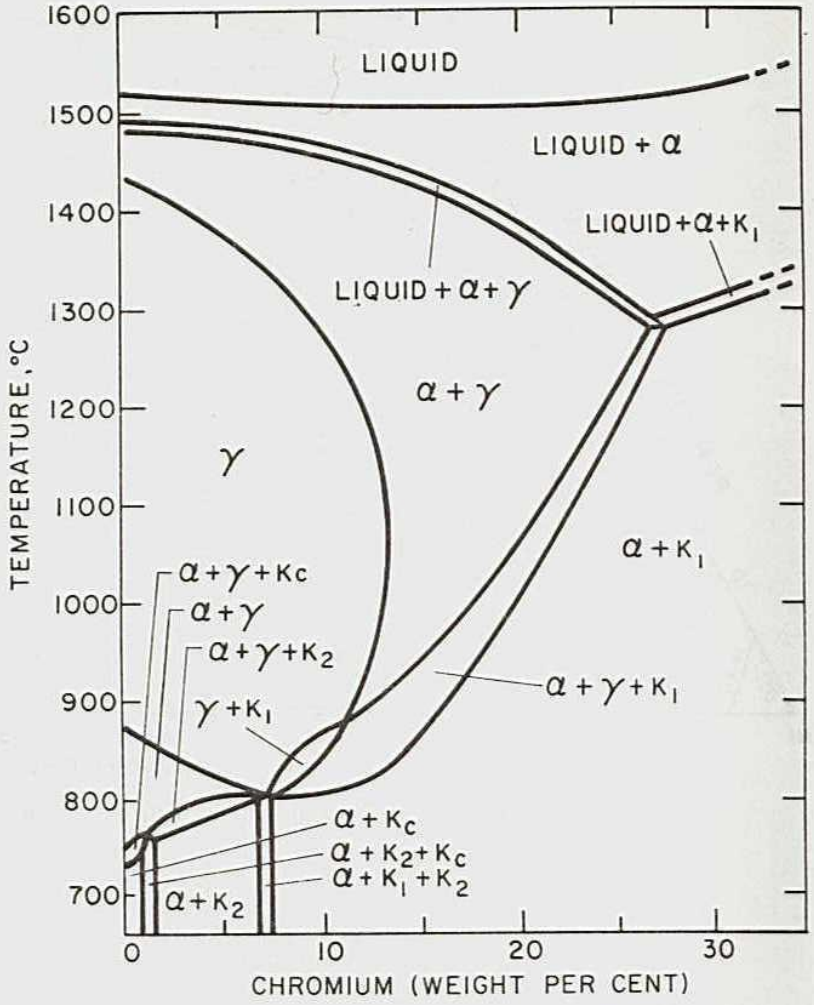


FIG. 46—9. Constant section at 0.10 per cent carbon through iron-chromium-carbon diagram. $K_c = Fe_3C$; $K_1 = (Fe,Cr)_{23}C_6$; $K_2 = (Fe, Cr)_7C_3$. (After Bungardt, Kunze and Horne: see bibliography.)

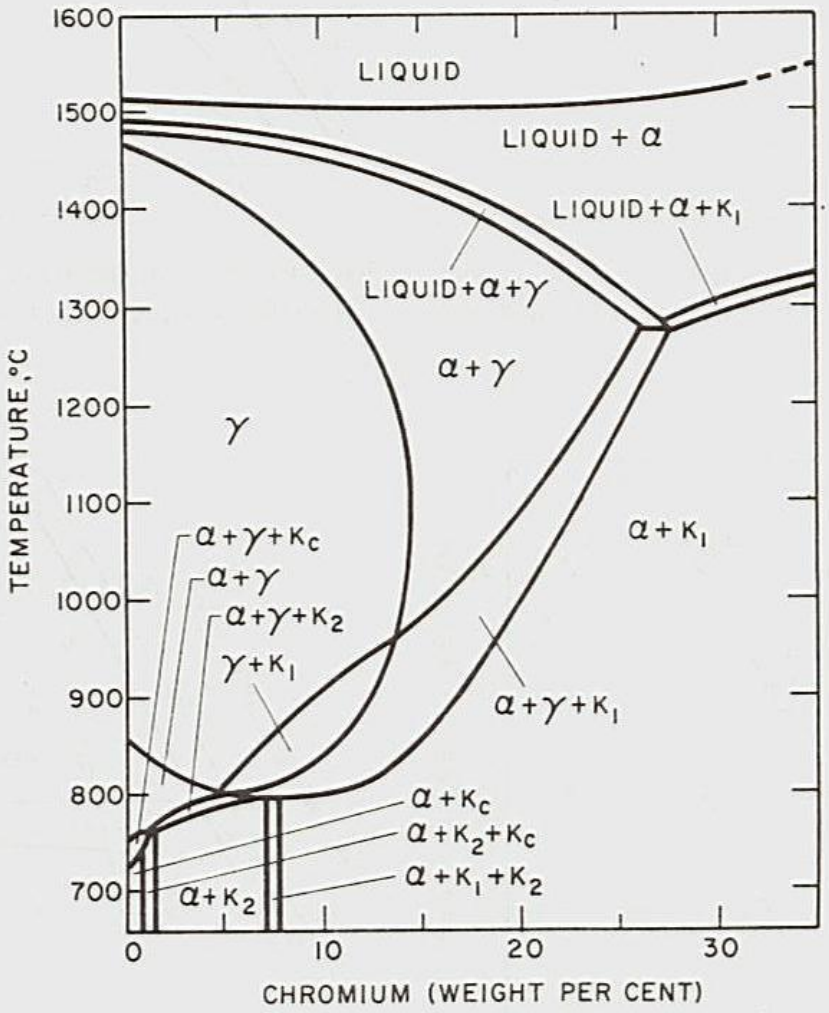


FIG. 46—10. Constant section at 0.20 per cent carbon through iron-chromium-carbon diagram. $K_c = Fe_3C$; $K_1 = (Fe,Cr)_{23}C_6$; $K_2 = (Fe,Cr)_7C_3$. (After Bungardt, Kunze and Horne: see bibliography.)

۷-۵- استحاله های فازی در فلزات

- استحاله فازی بحث بسیار مهمی است که برای اکثر فلزات، و عموماً برای فولادها و چدنها، شناخته شده است. این استحاله در حالت جامد صورت می گیرد و کینتیک واکنش حالت جامد و کسر واکنش یافته (y) تابع زمان (t) است و بصورت عمومی ذیل نوشته می شود:

$$y = 1 - \exp(-kt^n)$$ (معادله آوارمي)

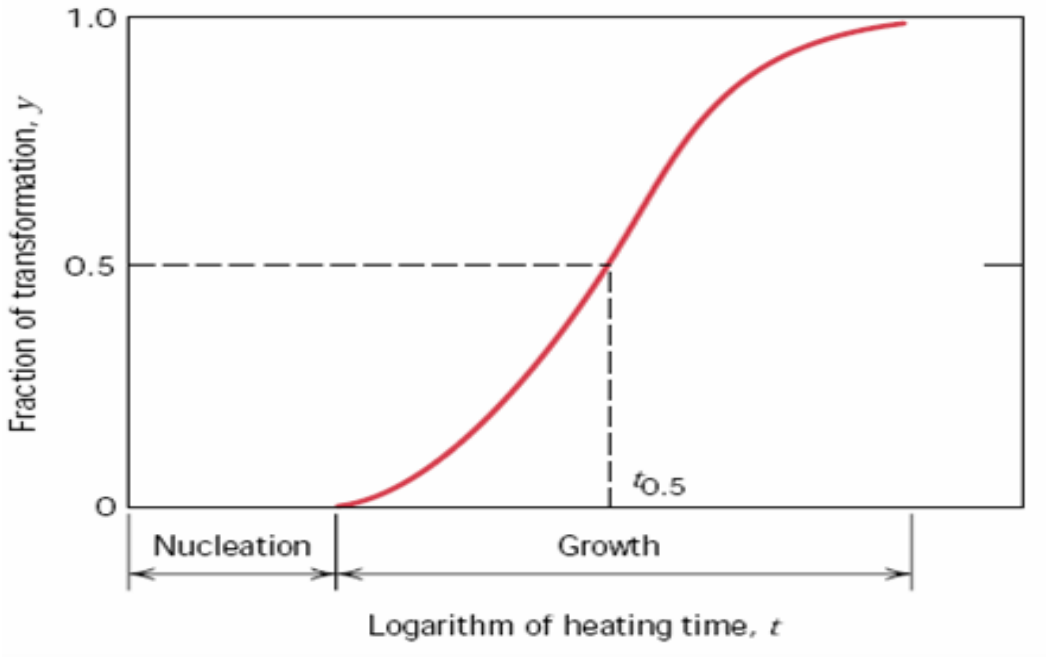
- n, k = ثوابت مستقل از زمان

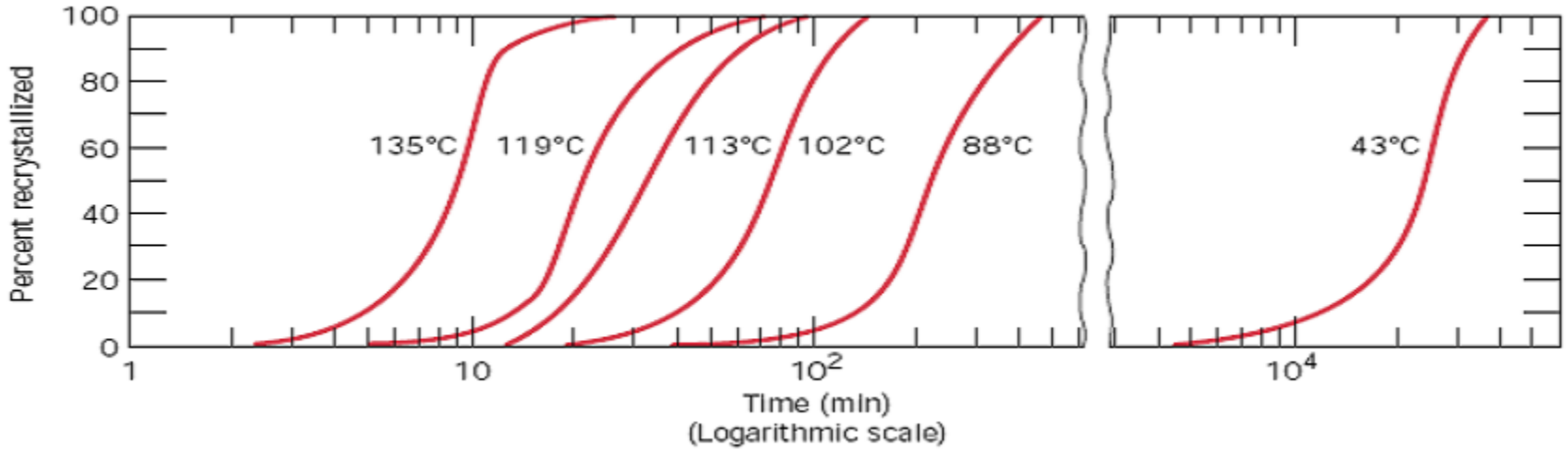
$$r = \frac{1}{t_{05}}$$

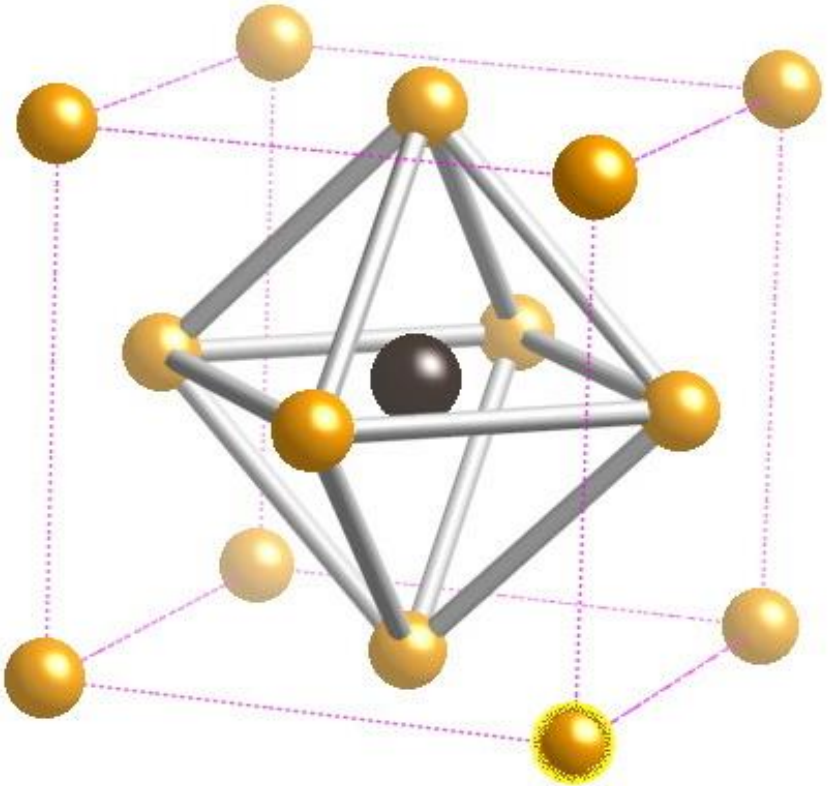
- سرعت انجام واکنش (استحاله) بصورت ذیل تعریف می شود. که در شکل ۷-۳۱ نشان داده شده است.

- تأثیر درجه حرارت بر سرعت انجام استحاله بصورت ذیل بیان می شود: (A=ثابت)

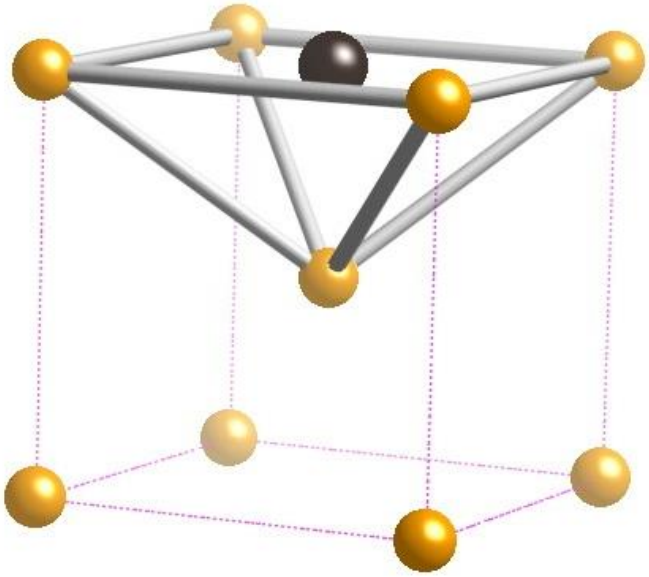
- تأثیر زمان و درجه حرارت در شکل ۳۱-۷ نشان داده شده است.







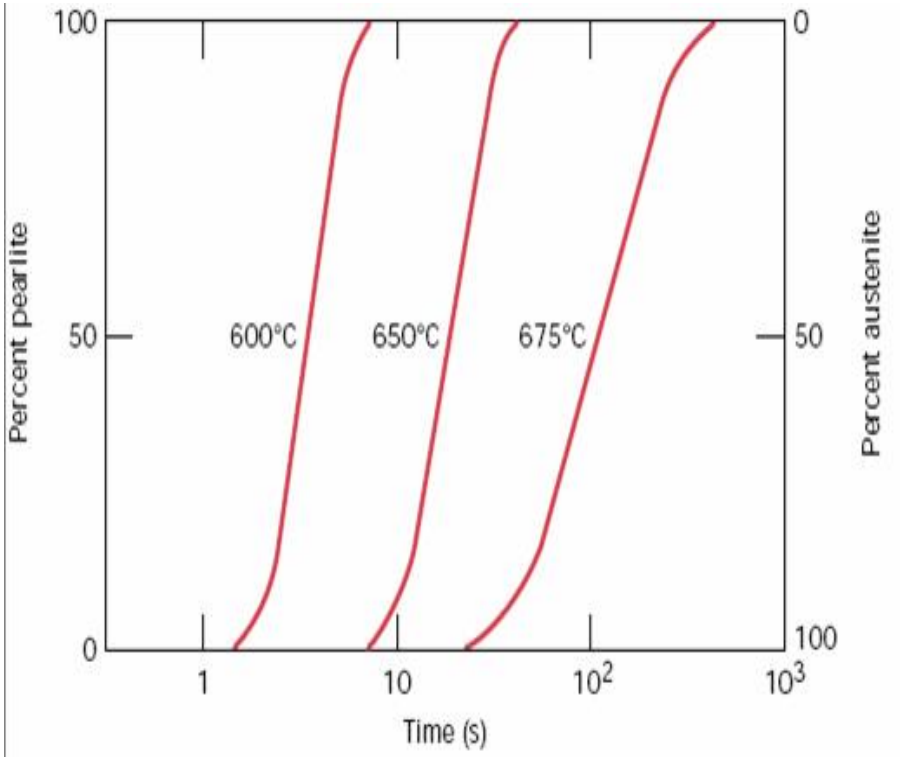
austenite



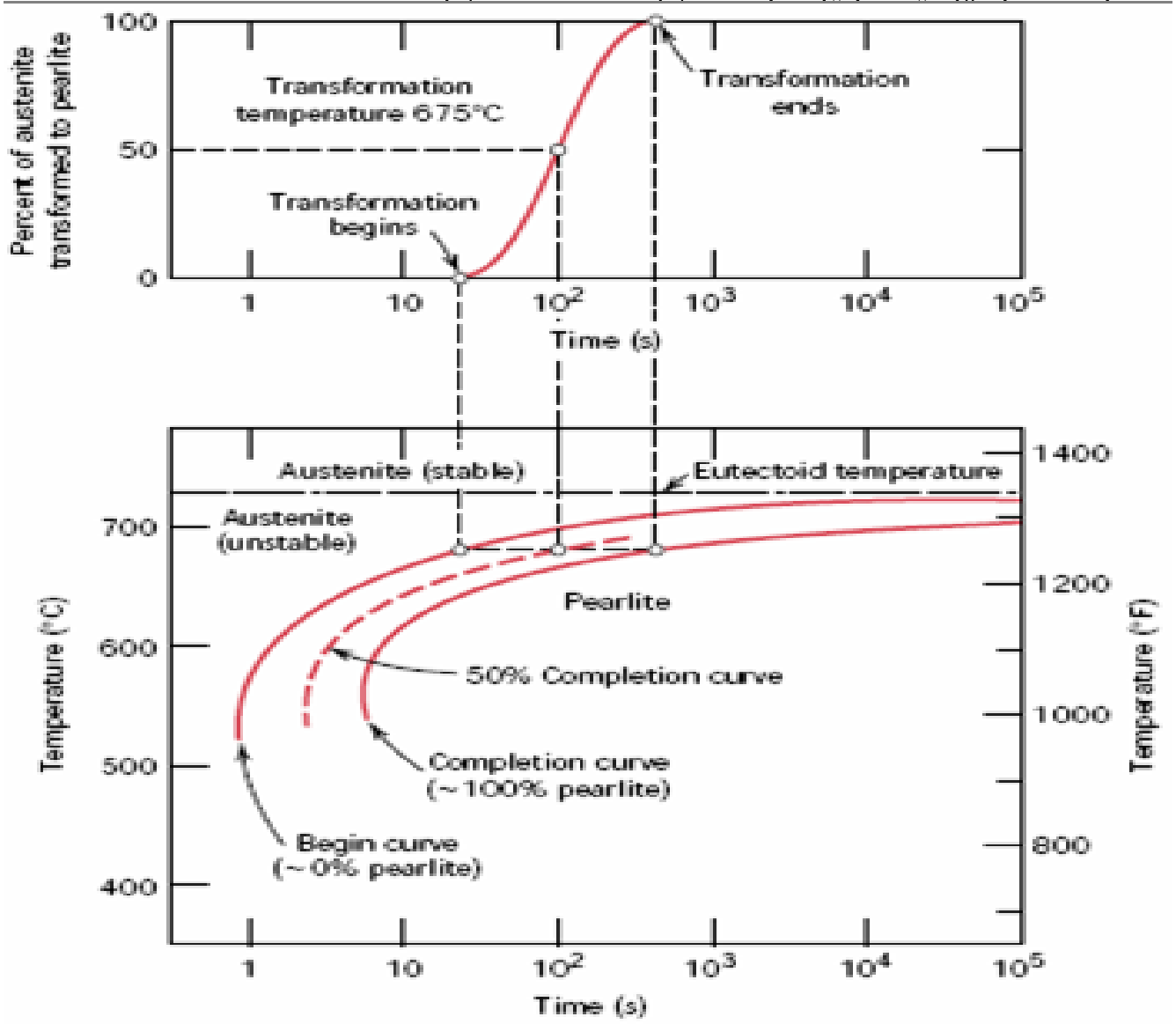
ferrite

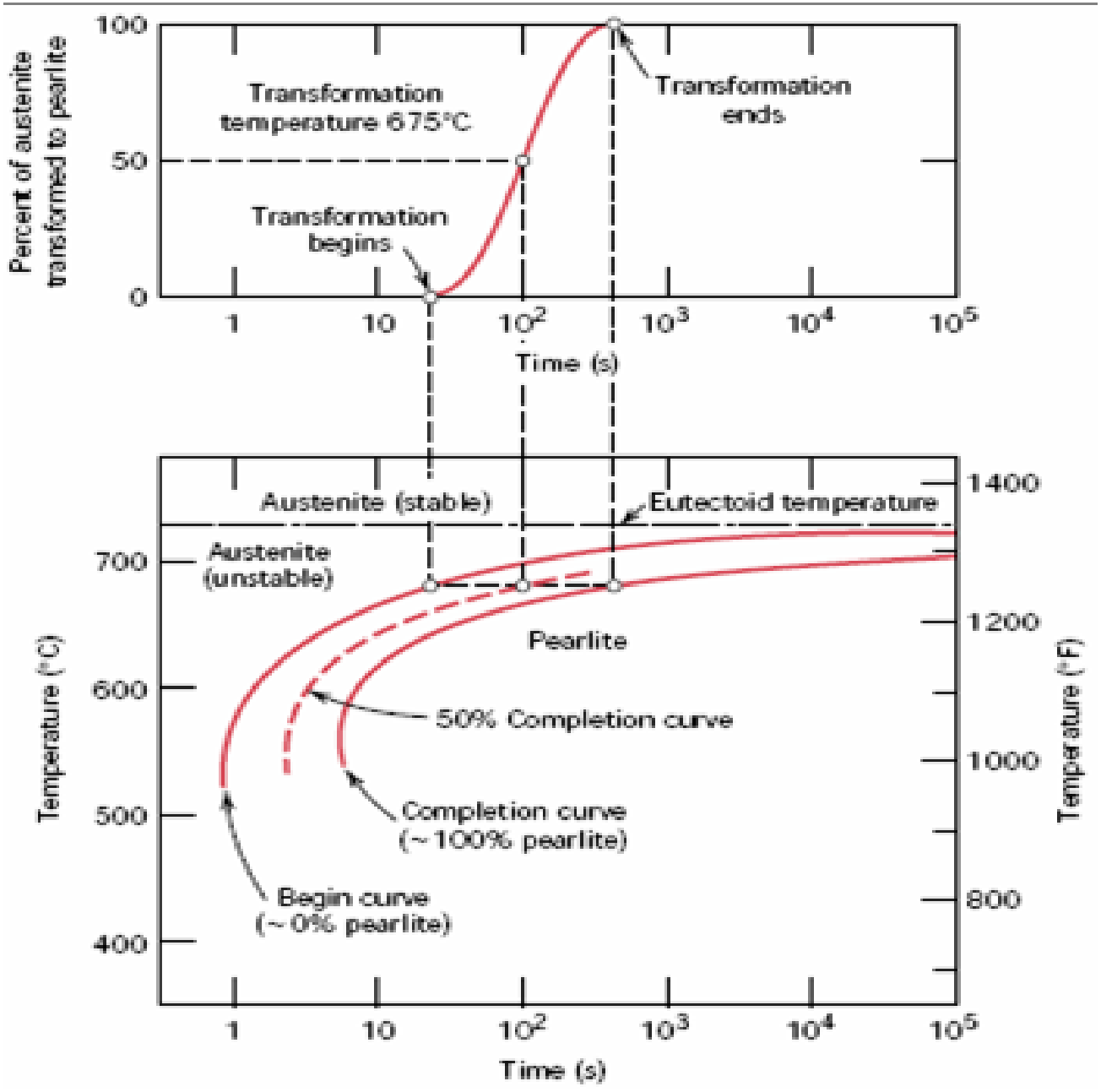
- **۷-۵-۱- تغییرات ریز ساختار و خواص در آلیاژهای آهن – کربن و دیاگرامهای استحاله ایزوترم (هم دما) یا منحنی های T.T.T**

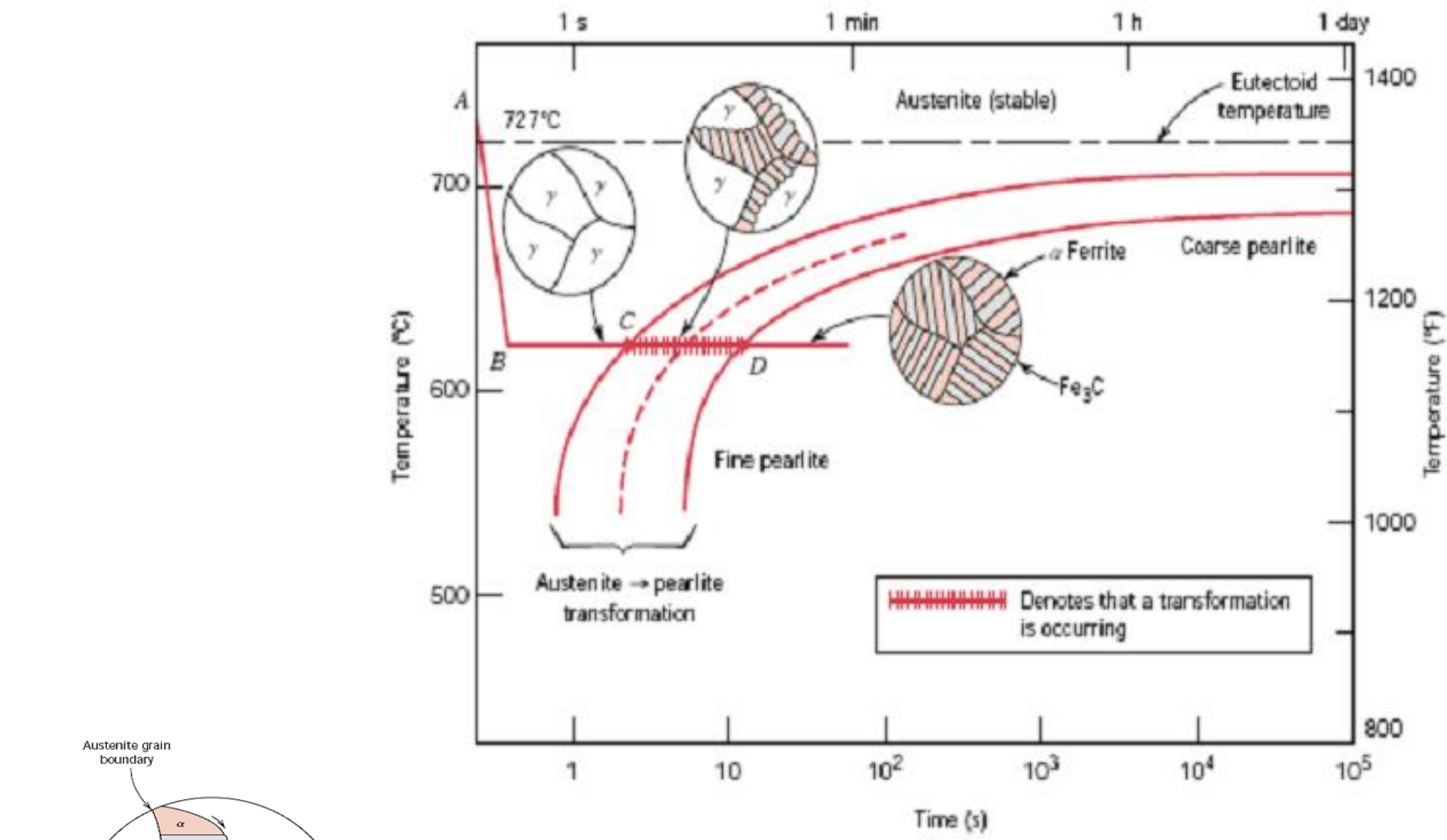
(Time–Temperature– Transformation)

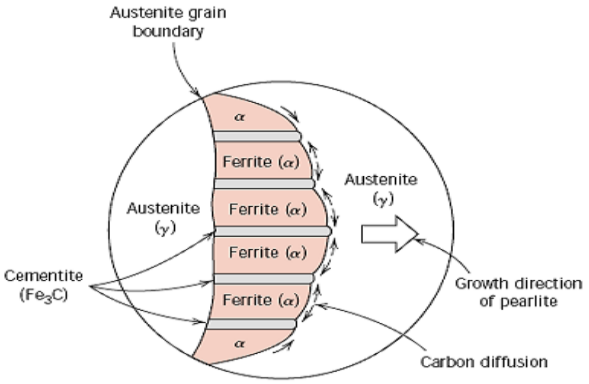


- تأثیر همزمان زمان و درجه حرارت در قسمت دوم شکل ۳۳-۷ نشان داده شده است (برای فولادی با ترکیب یوتکتوئید) یک دیاگرام TTT در شکل ۳۴-۷ نشان داده شده است.
- پرلیت درشت و پرلیت ریز در شکل ۳۵-۷ نشان داده شده اند.

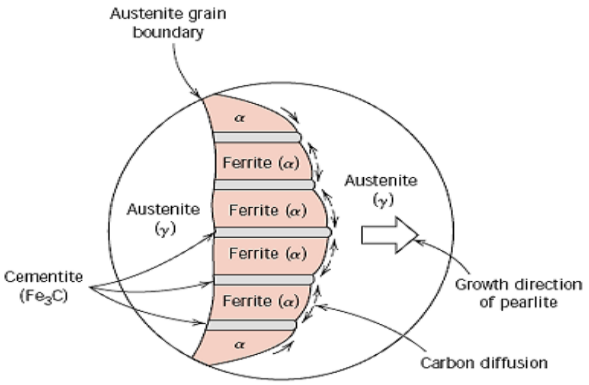


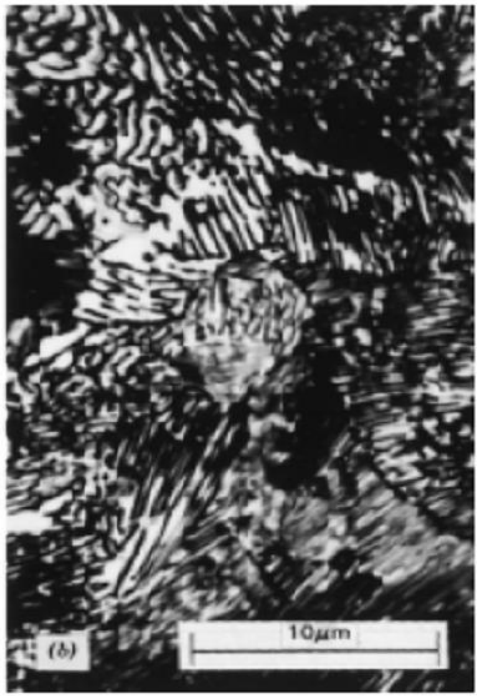

Percent of austenite transformed to pearlite
100
50
0
Transformation temperature 675°C
Transformation ends
Transformation begins
1
10
10^2
10^3
10^4
10^5
Time (s)
Austenite (stable)
Eutectoid temperature
Austenite (unstable)
Pearlite
50% Completion curve
Completion curve (~100% pearlite)
Begin curve (~0% pearlite)
Temperature (°C)
700
600
500
400
1400
1200
1000
800
Temperature (°F)
Time (s)


1 s
1 min
1 h
1 day
Austenite (stable)
Eutectoid temperature
727°C
A
B
C
D
γ
α Ferrite
Coarse pearlite
Fe3C
Fine pearlite
Austenite → pearlite transformation
Denotes that a transformation is occurring
Temperature (°C)
Temperature (°F)
Time (s)
1400
1200
1000
800
700
600
500
1
10
10^2
10^3
10^4
10^5


Austenite grain boundary
α
Ferrite (α)
Austenite (γ)
Cementite (Fe3C)
Growth direction of pearlite
Carbon diffusion

- پرلیت – Pearlite واکنش یوتکتوئید γ به $Fe_3C + \alpha$ تولید ساختار لایه ای می کند که آنرا پرلیت می نامند. (شکل ۳۲-۷)

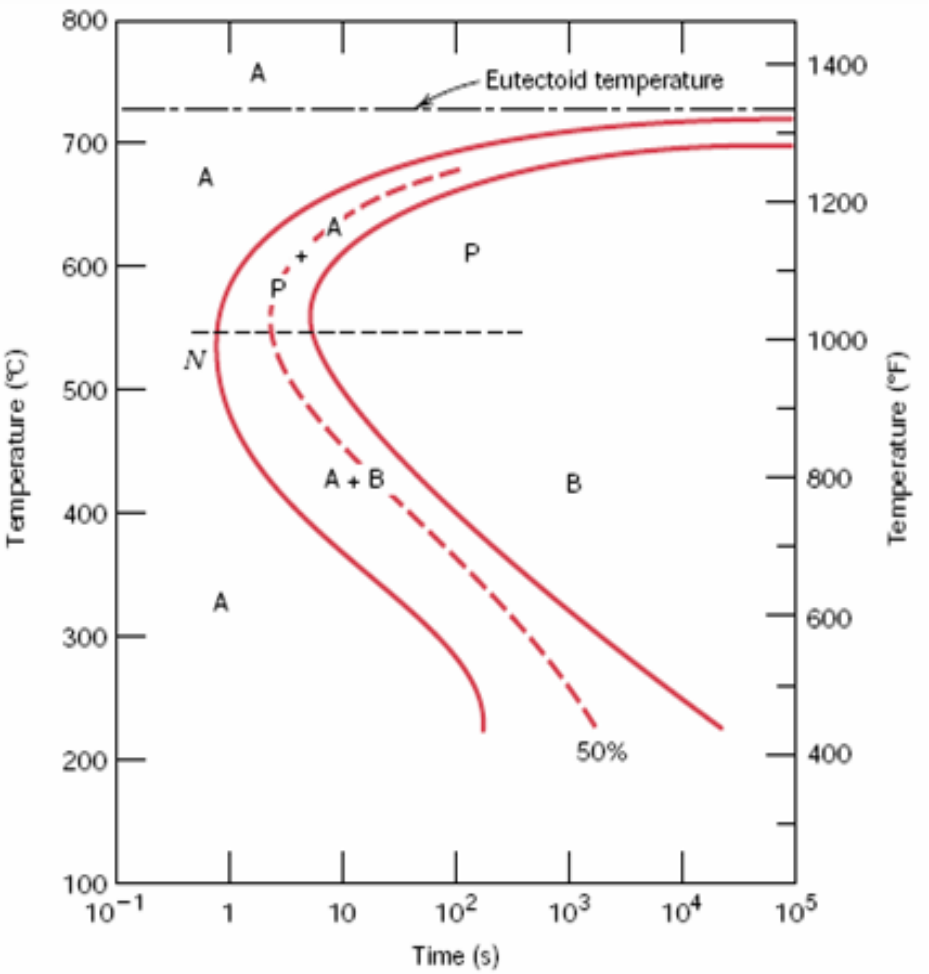


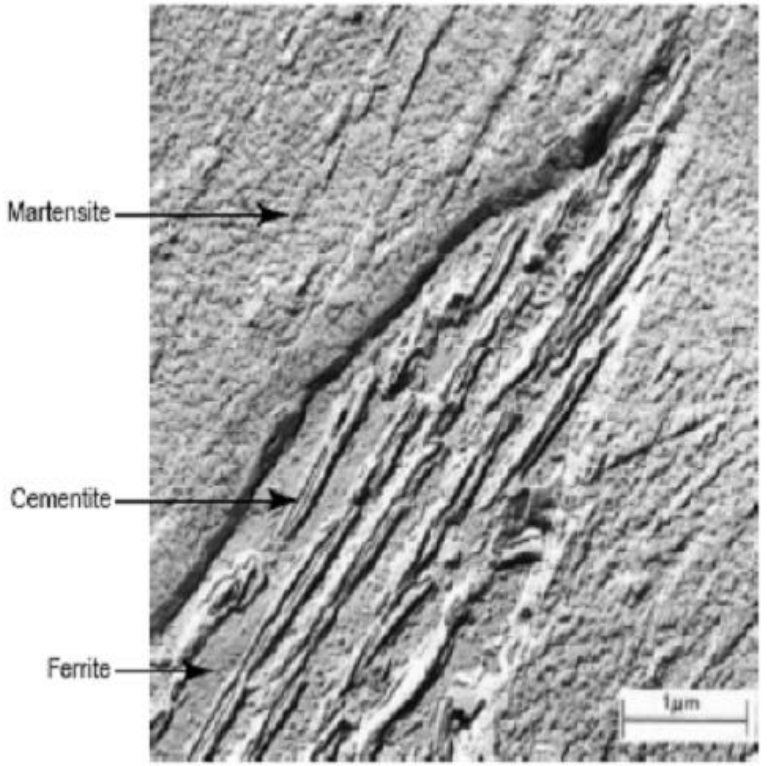


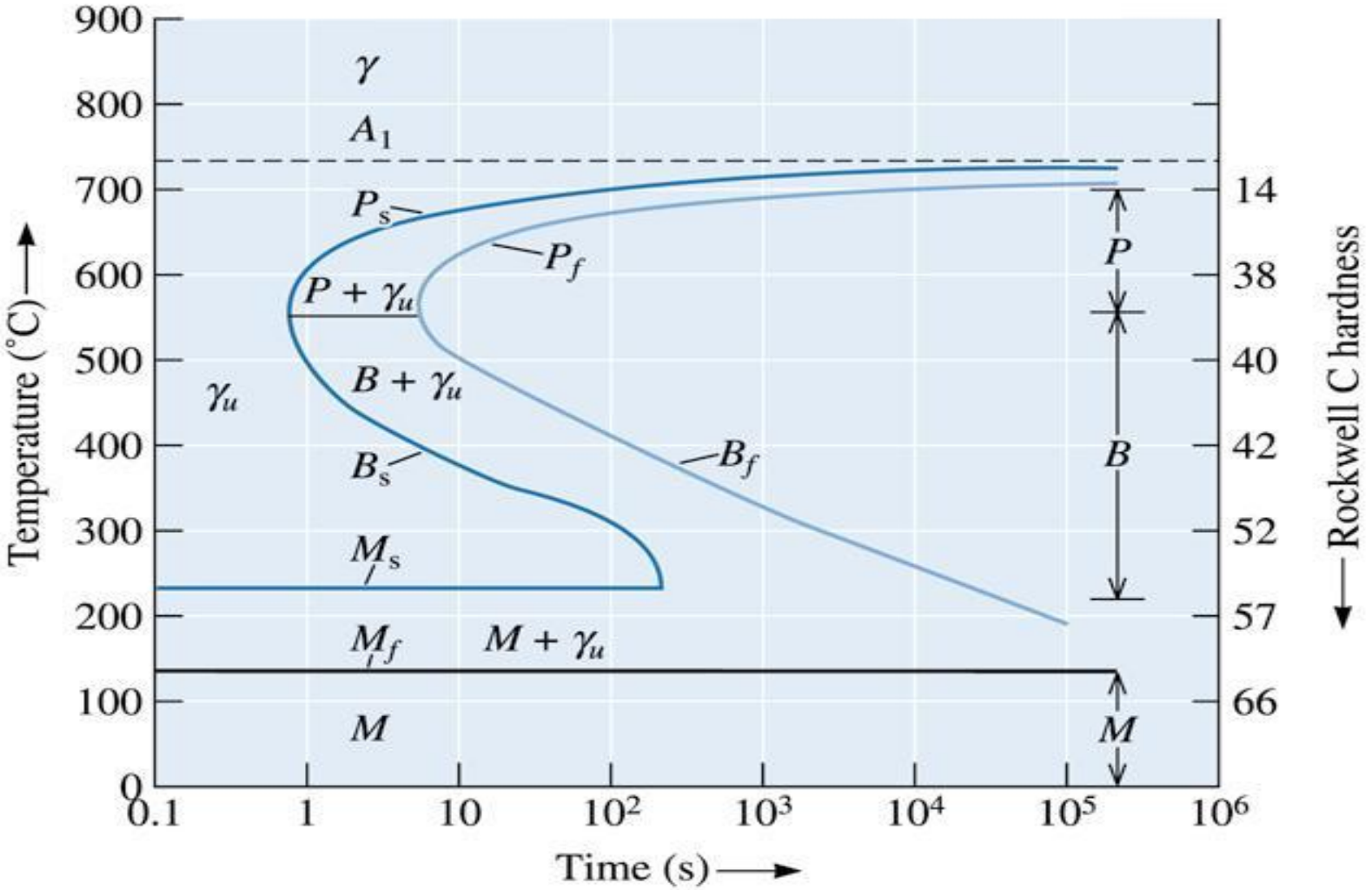
- **بینایت Bainite**

- این ساختار آنقدر ریز است که تنها با میکروسکپ الکترونی قابل مشاهده است (و حاوی سوزن یا ورقه های سمانتیت است) شکل ۳۶-۷ این استحاله (استحاله آستنیت به بینایت) در شکل ۳۷-۷ نشان داده شده است.

- این استحاله در قسمت پایین دماغه شروع و پایان می پذیرد.

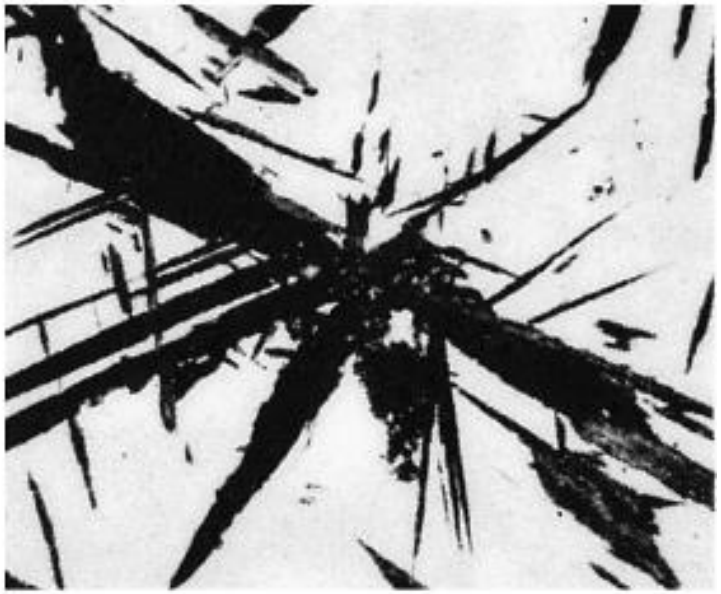






The time-temperature-transformation (TTT) diagram for an eutectoid steel.

(a)



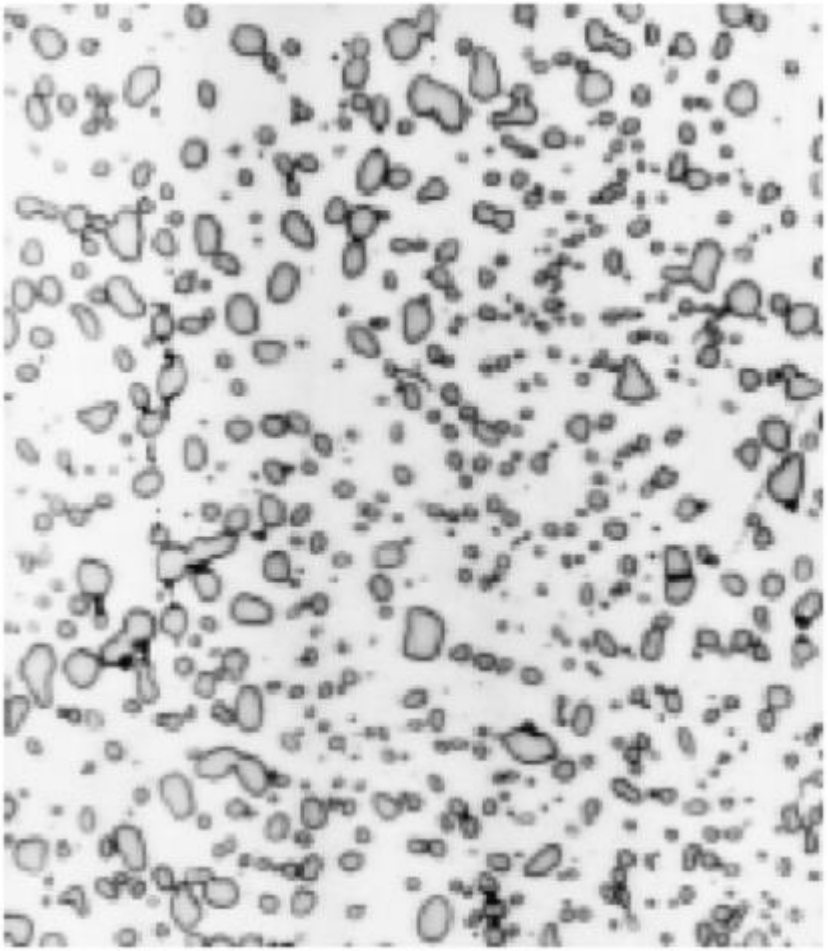
(b)

(a) Upper bainite (gray, feathery plates) (× 600).

(b) Lower bainite (dark needles) (× 400

- کروی شدن یا سمانتیت کروی (اسفرولیت) Spherolite

- اگر فولاد حاوی پرلیت یا بینایت در دمای $۷۰۰^{\circ}C$ و بمدت 24- 18 ساعت نگهداری شود، ساختار حاصله را سمانتیت کروی می نامند که در شکل ۳۸-۷ داده شده است. در این ساختار ذرات کروی سمانتیت در زمینه ای از فاز α پراکنده شده اند.

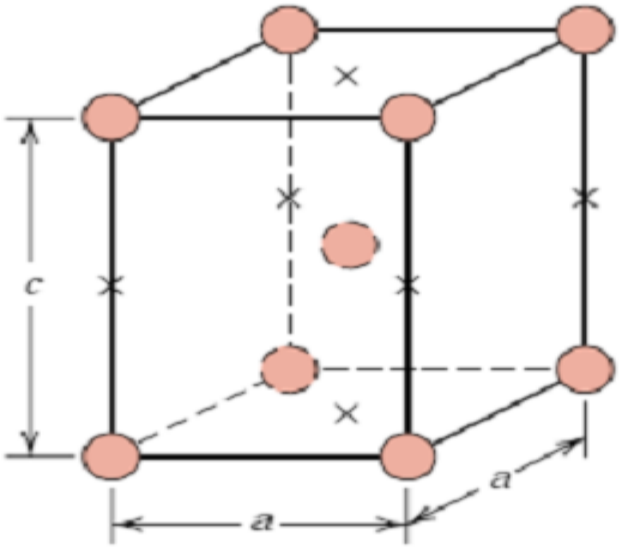


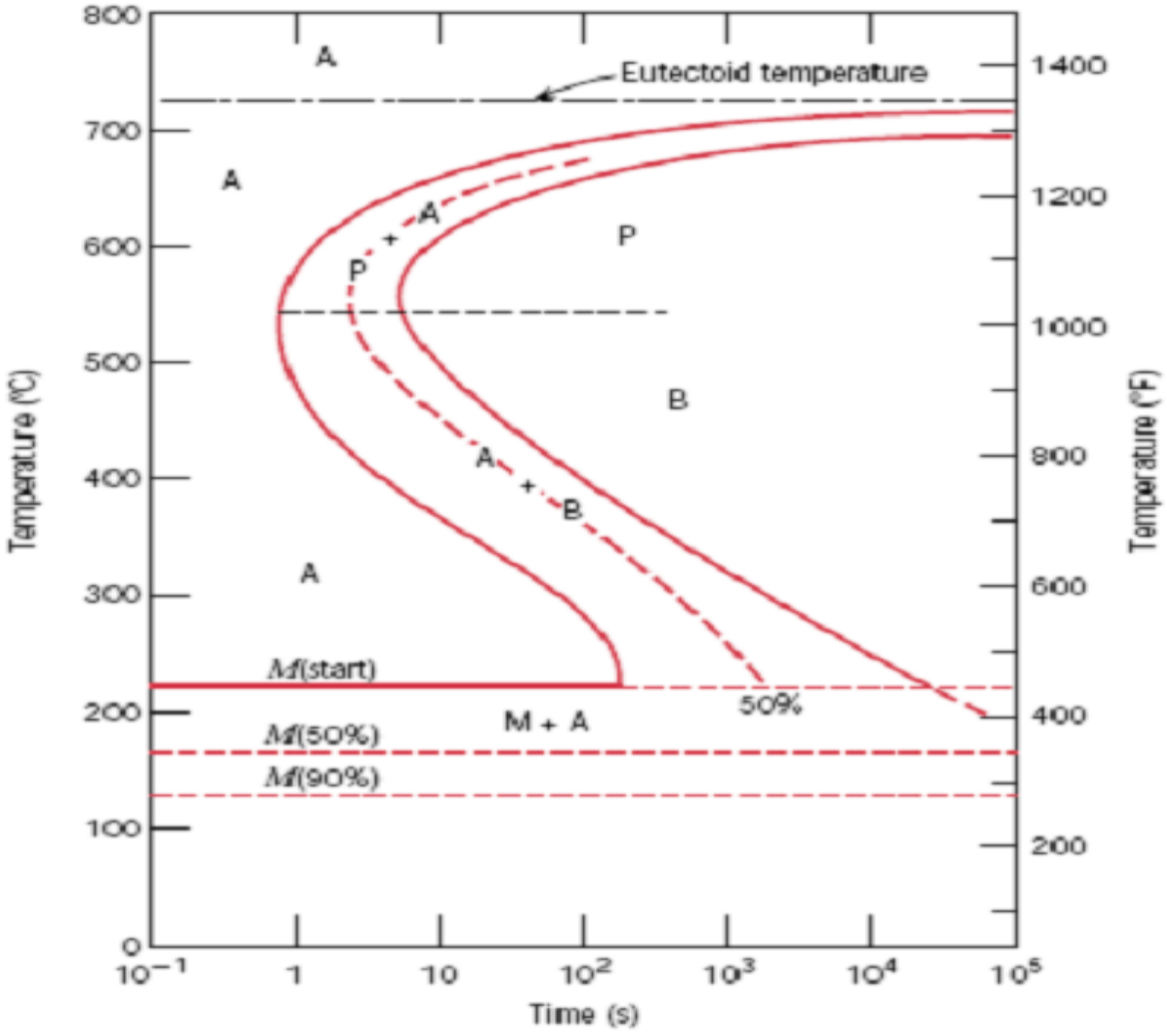
• مارتنزیت Martensite

- این فاز وقتی بوجود می آید که آهن γ (آستنیت) با سرعت خیلی زیاد (quenching) (۲۰۰۰/sec C) تا دمای اتاق سرد شود. این پروسه را اصطلاحاً تغییر حالت (استحاله) بدون نفوذ می نامند زیرا اتم های کربن فرصت نفوذ کردن را پیدا نمی کنند. شکل سوزنی یا ورقه ای فاز مارتنزیت در شکل ۳۹-۷ نشان داده شده است. این استحاله با سرعت صوت در قطعه صورت می گیرد. این فاز یک فاز تعادلی نیست و به این علت در دیاگرام آهن – کربن آورده نشده است. شکل ۴۰-۷ منحنی TTT تحول مارتنزیتی را نشان می دهد.

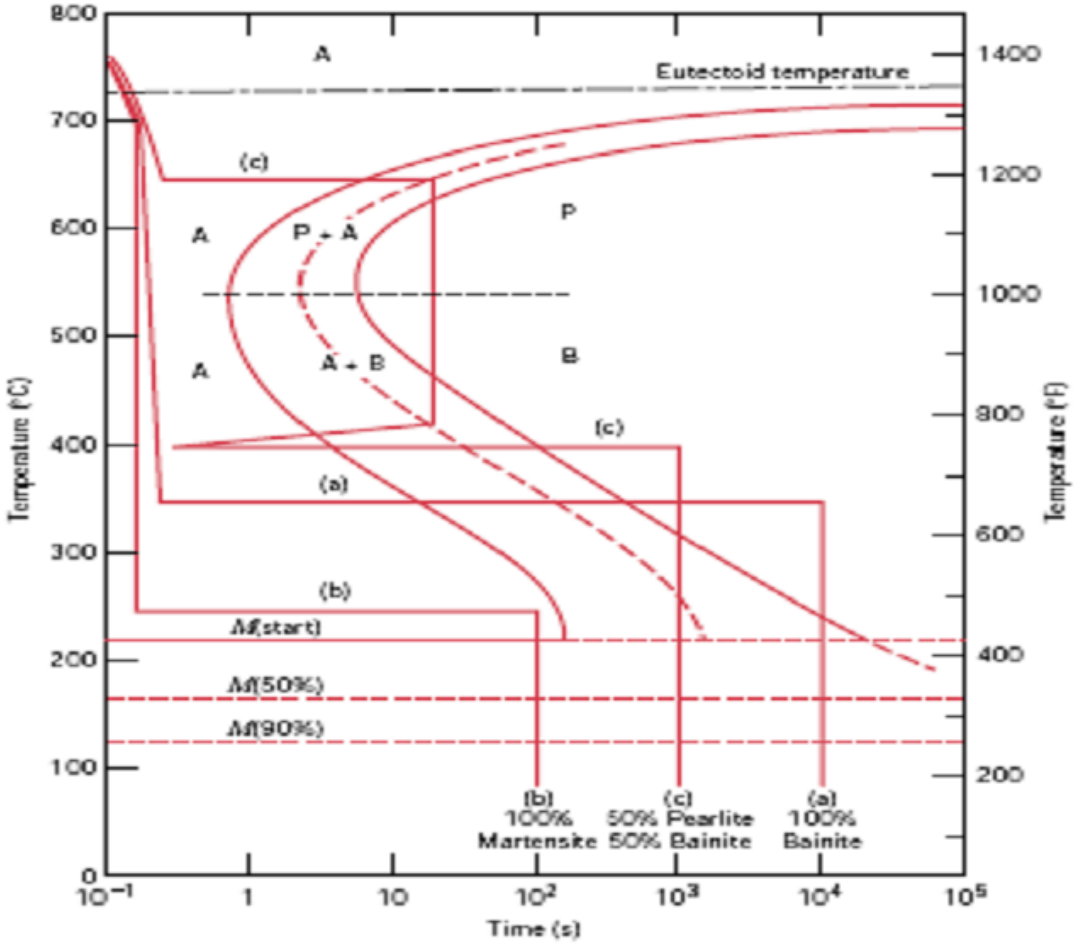
- حضور عناصر آلیاژی باعث شیفت در منحنی های TTT می شود (زمانهای طولانی تر و ایجاد دماغه جداگانه برای بینایت) که در شکل ۴۱-۷ نشان داده شده است.

Fig 7.39 , 7.40




Eutectoid temperature
A
P
B
A + P
A + B
M + A
Ms(start)
Ms(50%)
Ms(90%)
50%
Temperature (°C)
Temperature (°F)
Time (s)
800
700
600
500
400
300
200
100
0
1400
1200
1000
800
600
400
200
10⁻¹
1
10
10²
10³
10⁴
10⁵

مثال ۷-۳: با توجه به شکل ۷-۴۲ (که مشابه شکل ۷-۳۹ مي باشد) ريز ساختار حاصله و درصد تقريبي فازها را در شرايط ذيل بدست آوريد:



- a) سرد کردن سریع تا دمای $350^{\circ}C$، نگهداشتن قطعه بمدت 10^{4} ثانیه و سپس سرد کردن سریع تا دمای محیط
- b) سرد کردن سریع تا دمای $250^{\circ}C$ ، نگهداشتن قطعه بمدت ۱۰۰ ثانیه و سپس سرد کردن سریع تا دمای محیط
- c) سرد کردن سریع تا دمای $650^{\circ}C$ ، نگهداشتن قطعه بمدت ۲۰ ثانیه و سپس سرد کردن سریع تا دمای $400^{\circ}C$ و نگهداشتن قطعه به مدت 10^{3} ثانیه و سپس سرد کردن سریع تا دمای محیط

- **حل:**

- a) در این دما آستنیت بصورت هم دما به بینایت استحاله پیدا می کند. در حقیقت پس از ده ثانیه این واکنش شروع شده و حدود ۵۰۰ ثانیه طول می کشد تا تمام شود و کلاً ۱۰۰ درصد بینایت بوجود می آید. به عبارت دیگر سرد کردن سریع پس از 10^{4} ثانیه تأثیری در ساختار بینایی قطعه ندارد.

- b) اگر نمونه به مدت ۱۰۰ ثانیه در دمای $۲۵۰^{o}C$ نگهداری شود، فاز موجود γ هنوز است و اگر در این لحظه سریع سرد شود استحاله آستنیت به مارتنزیت (۱۰۰ درصد) بصورت صددرصد انجام می شود.

- c) در این حالت پس از گذشت ۷ ثانیه پرلیت شروع به تشکیل شدن می کند و پس از گذشت ۲۰ ثانیه تنها ۵۰ درصد آستنیت به پرلیت متحول گشته است. با سرد کردن سریع از $650^{o}C$ به $۴۰۰^{o}C$ تغییر چندانی در نحوه استحاله صورت نمی گیرد و اگر $۱۰^{۳}$ ثانیه در این دما نگهداری شود الباقی مارتنزیت به بینایت استحاله پیدا خواهد کرد. بنابراین ساختار حاصله حاوی ۵۰ درصد پرلیت و ۵۰ درصد بینایت خواهد بود.

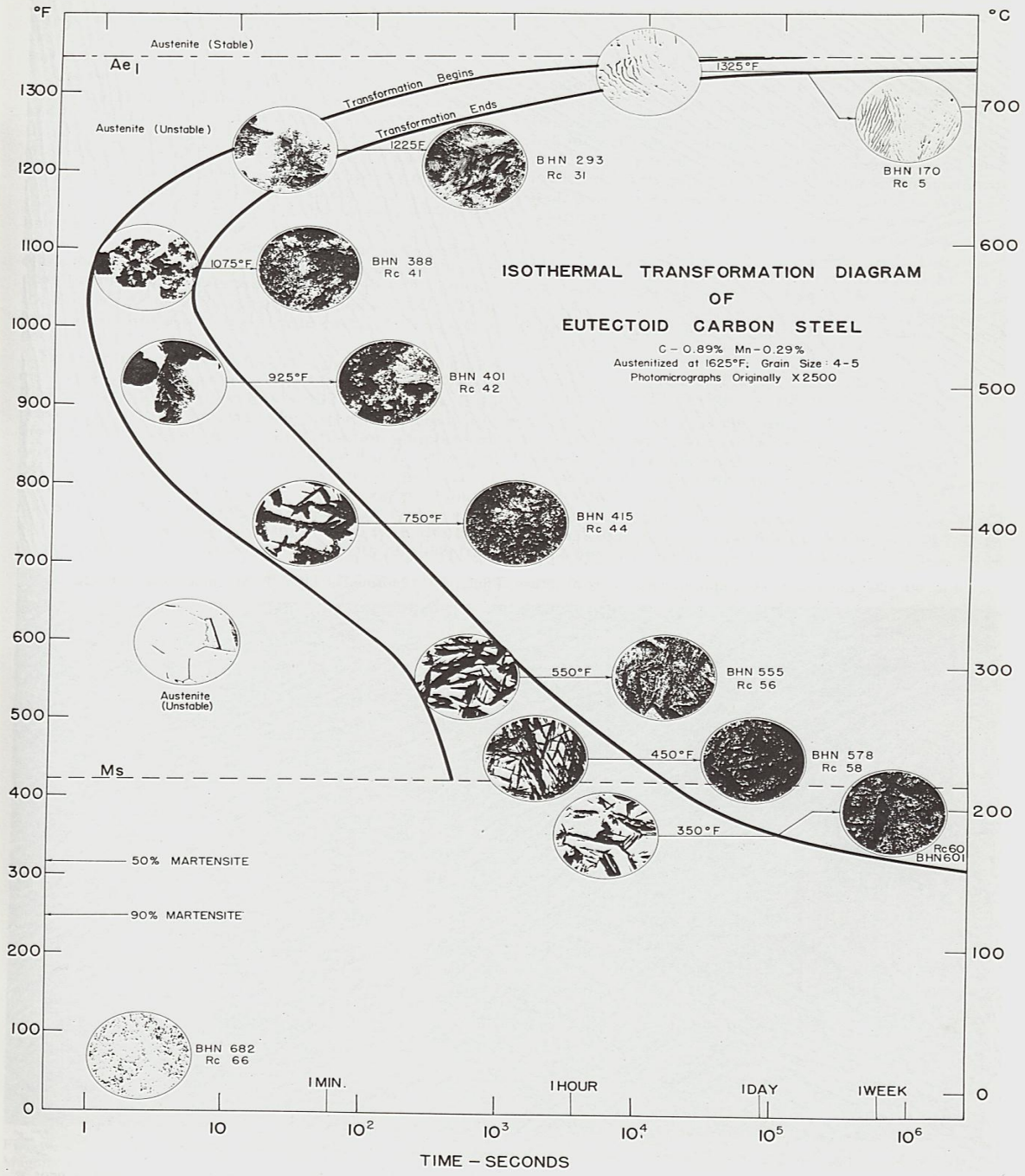
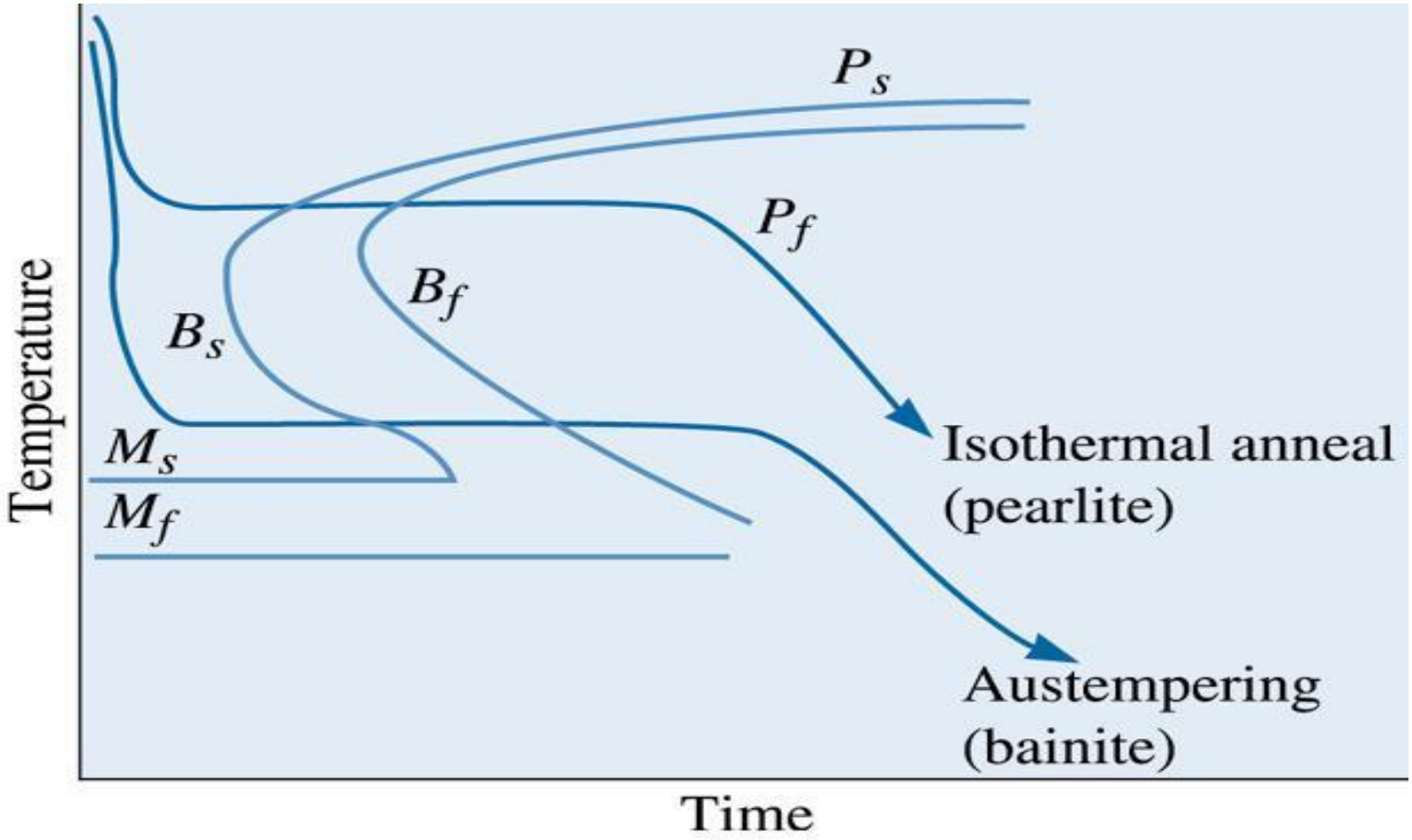


FIG. 40—19. Isothermal transformation diagram for a plain carbon eutectoid steel.

Isothermal Heat Treatments

- Austempering - The isothermal heat treatment by which austenite transforms to bainite.
- Isothermal annealing - Heat treatment of a steel by austenitizing, cooling rapidly to a temperature between the A_1 and the nose of the TTT curve, and holding until the austenite transforms to pearlite.



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

The austempering and isothermal anneal heat treatments in a 1080 steel.

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under licens

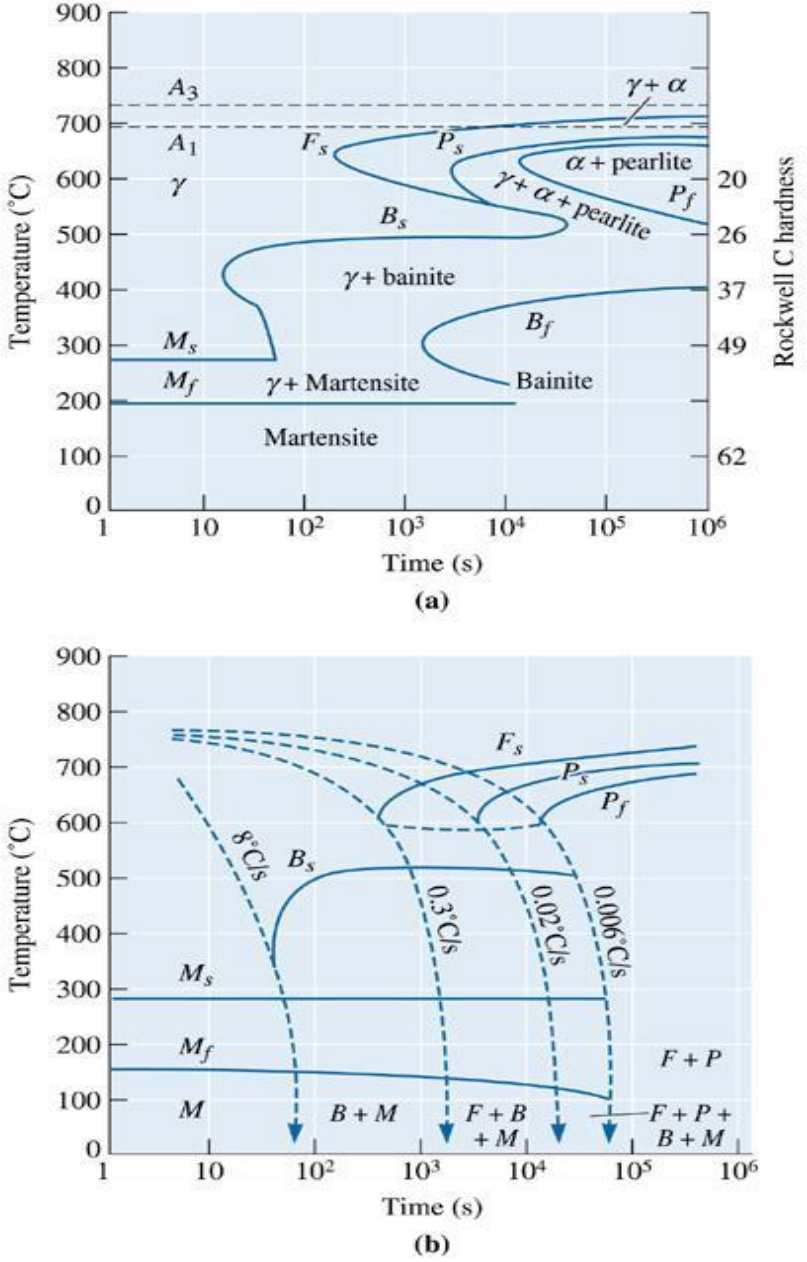
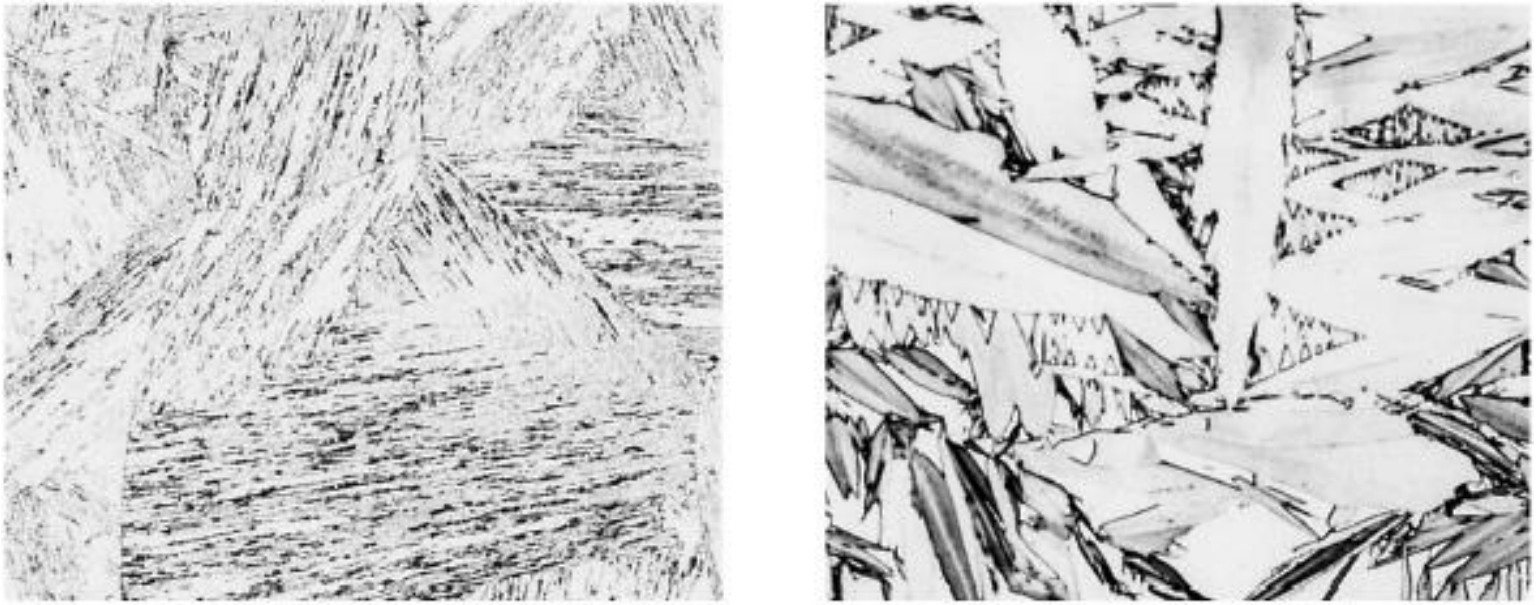


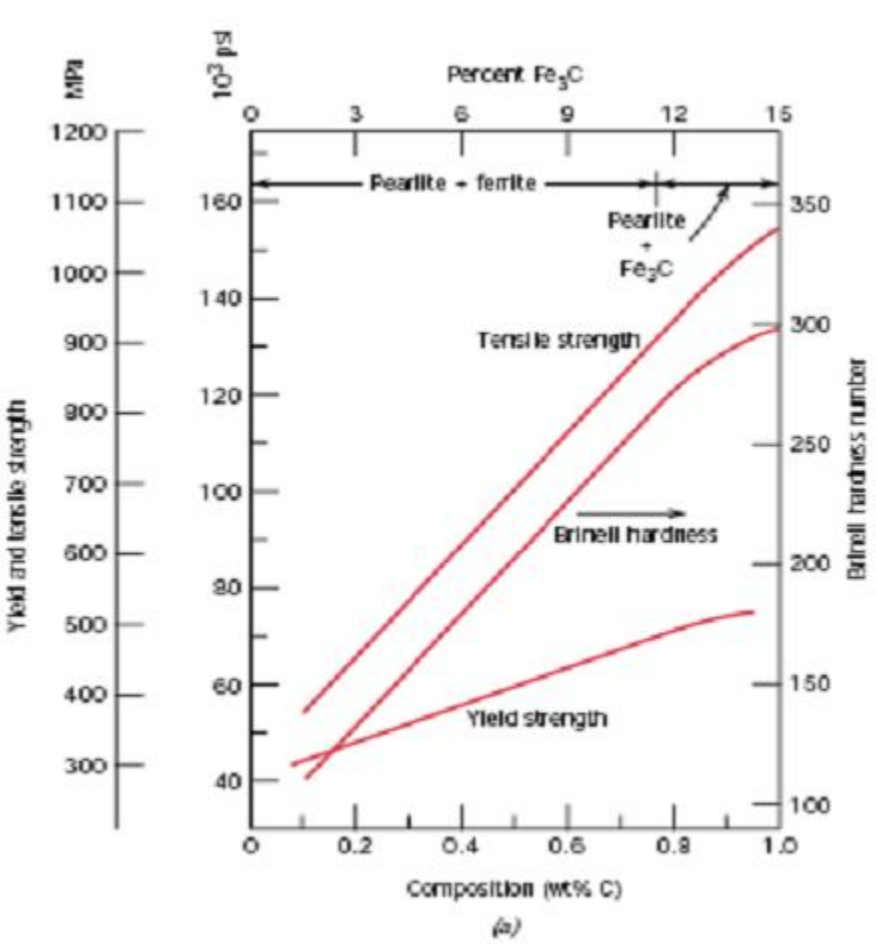
Figure 12.18 (a) TTT and (b) CCT curves for a 4340 steel.

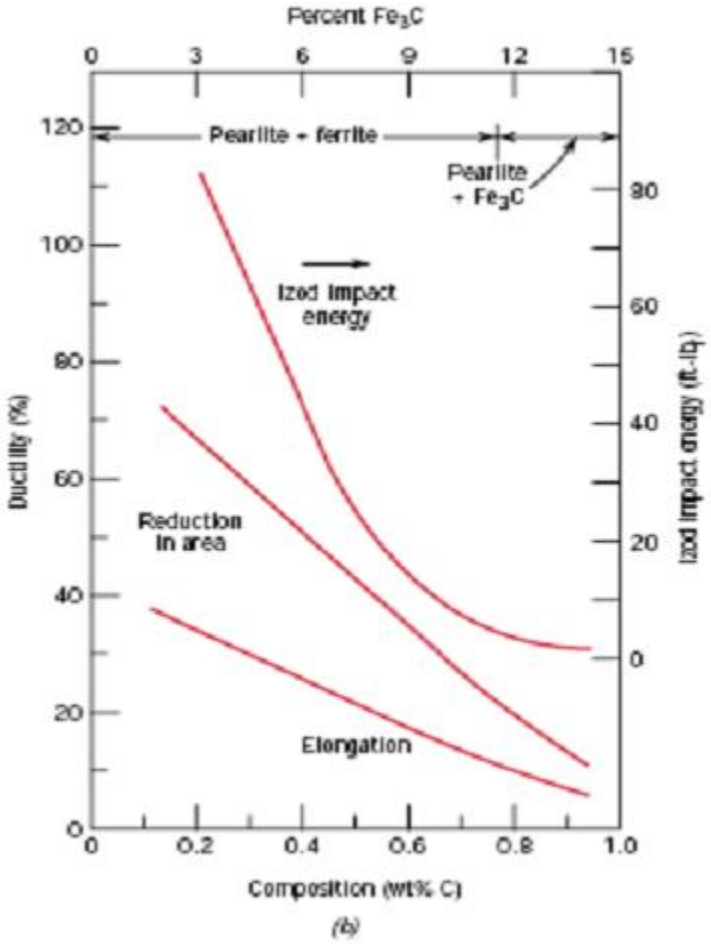


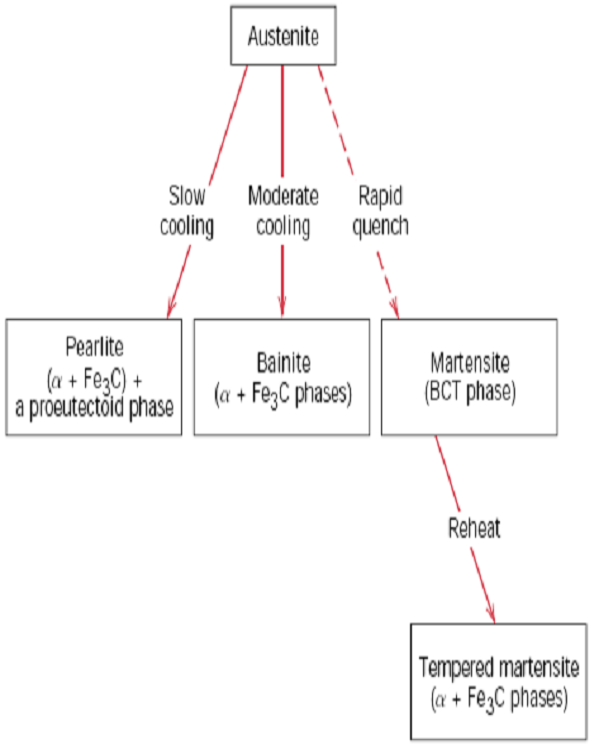
(a) Lath martensite in low-carbon steel (× 80). (b) Plate martensite in high-carbon steel (× 400).

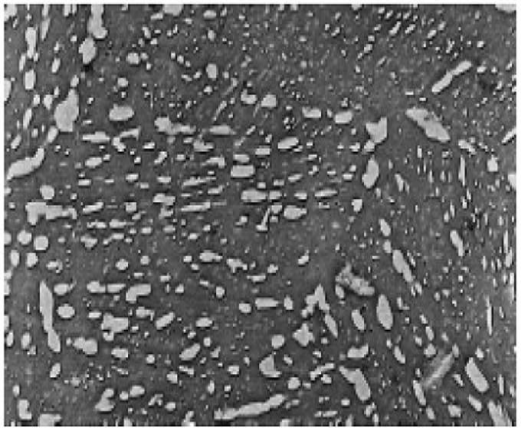
۷-۶- خواص مکانیکی آلیاژهای آهن - کربن

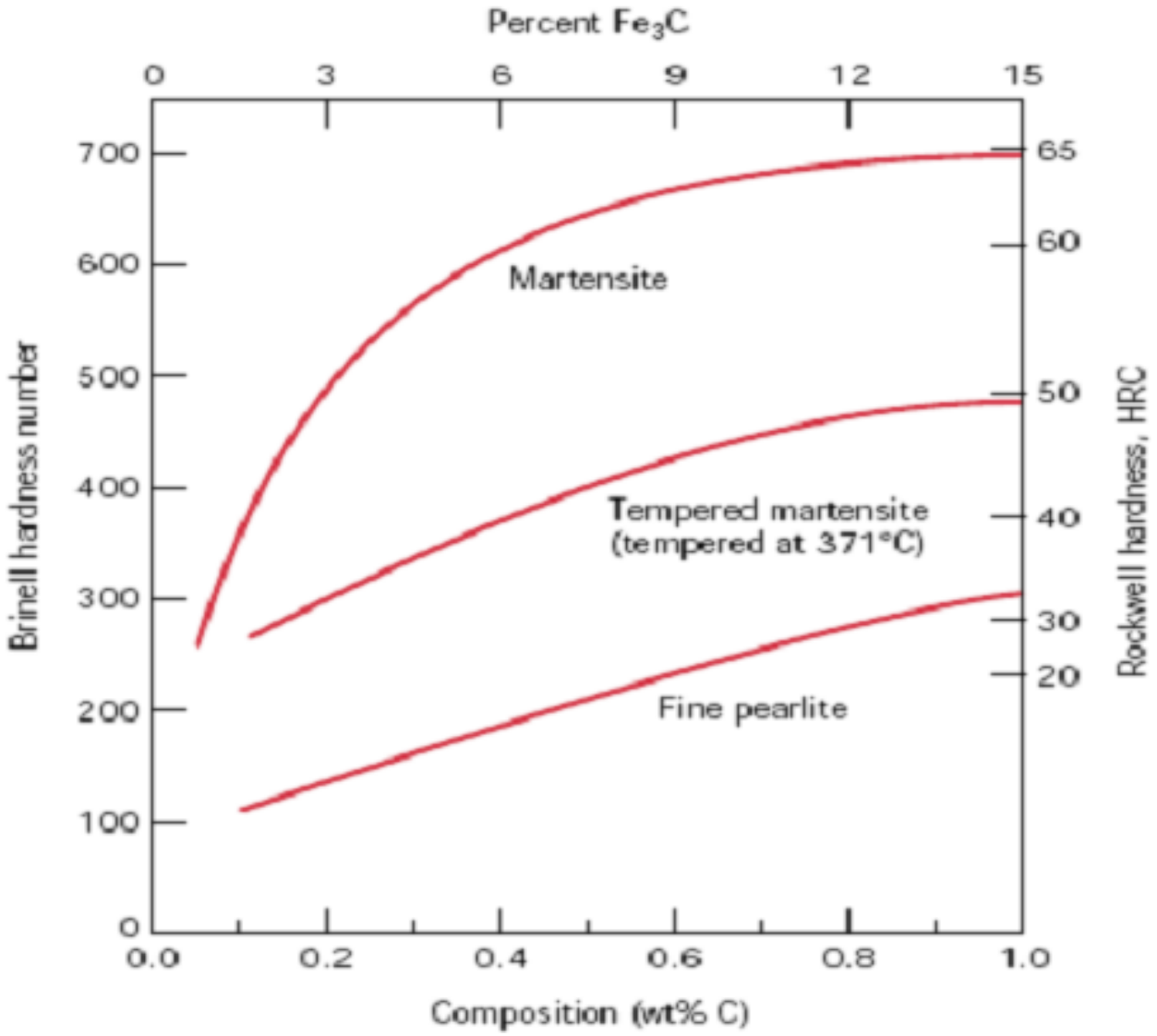
- خواص مکانیکی فازهای پرلیت سماتیت کروی، بینایت، مارتنزیت تمپر شده (برگشت داده شده) در شکلهای ۷-۴۳ الی ۷-۴۹ نشان داده شده است.

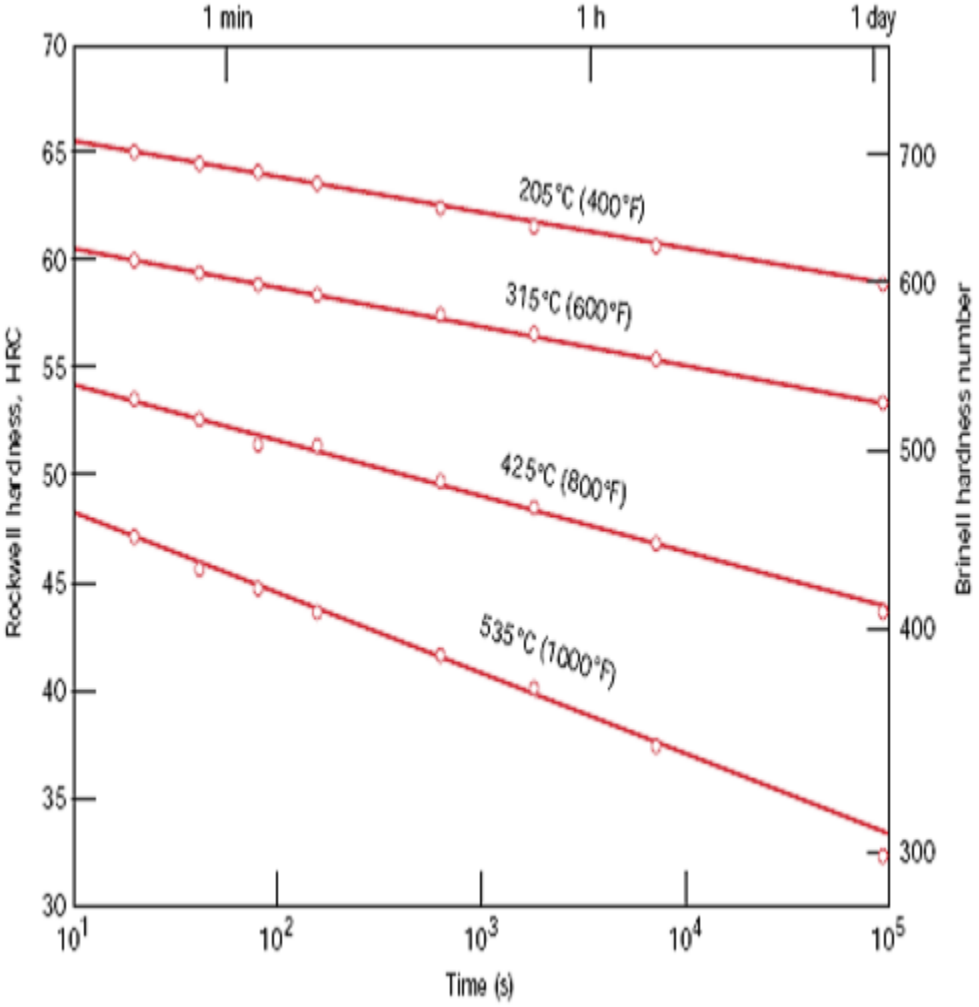


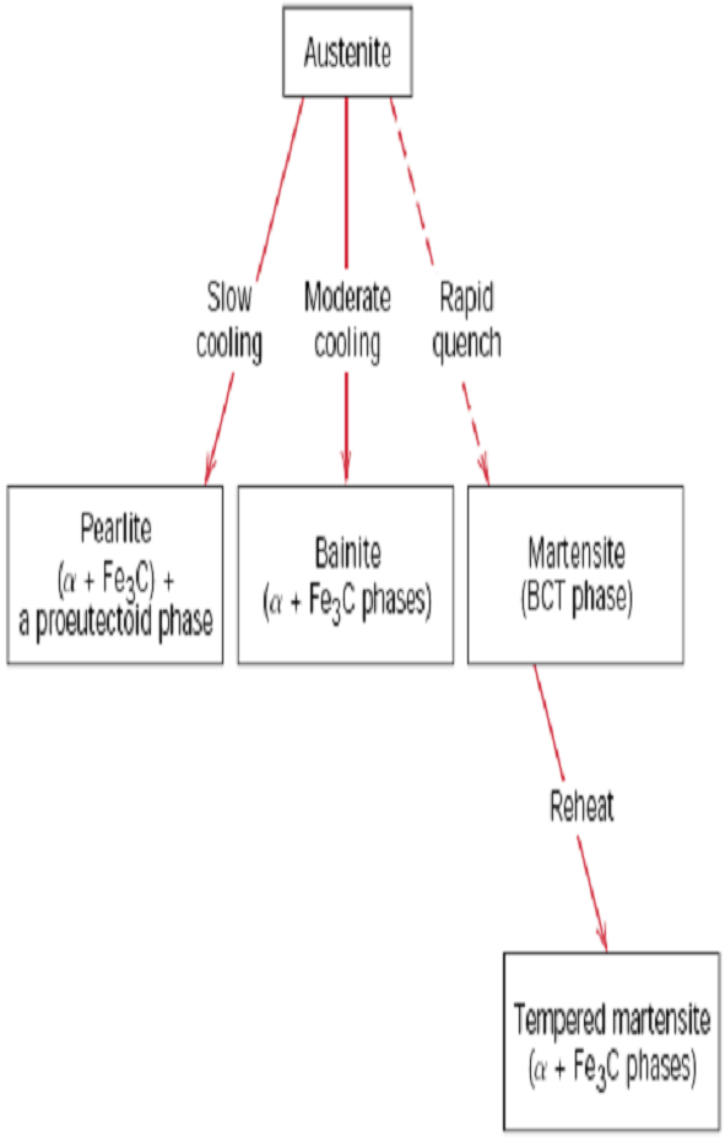


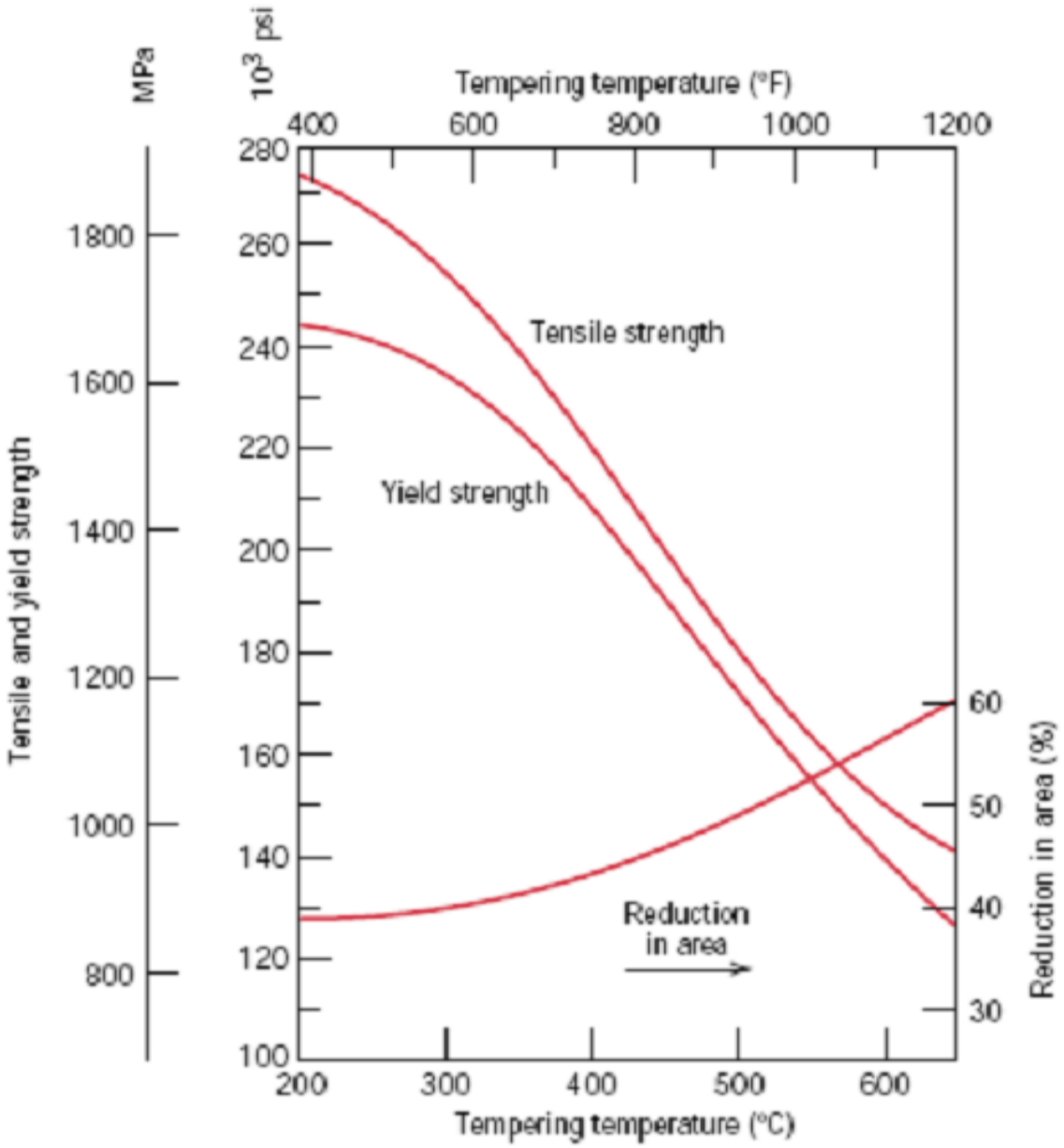

Austenite
Slow cooling
Moderate cooling
Rapid quench
Pearlite
(α + Fe3C) +
a proeutectoid phase
Bainite
(α + Fe3C phases)
Martensite
(BCT phase)
Reheat
Tempered martensite
(α + Fe3C phases)




Percent Fe3C
0
3
6
9
12
15
700
600
500
400
300
200
100
0
Brinell hardness number
65
60
50
40
30
20
Rockwell hardness, HRC
Martensite
Tempered martensite
(tempered at 371°C)
Fine pearlite
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
Composition (wt% C)


1 min
1 h
1 day
205°C (400°F)
315°C (600°F)
425°C (800°F)
535°C (1000°F)
Rockwell hardness, HRC
Brinell hardness number
Time (s)


Austenite
Slow cooling
Moderate cooling
Rapid quench
Pearlite
(α + Fe3C) +
a proeutectoid phase
Bainite
(α + Fe3C phases)
Martensite
(BCT phase)
Reheat
Tempered martensite
(α + Fe3C phases)


MPa
10^3 psi
Tempering temperature (°F)
400
600
800
1000
1200
280
260
240
220
200
180
160
140
120
100
1800
1600
1400
1200
1000
800
Tensile strength
Yield strength
Reduction in area
60
50
40
30
Tensile and yield strength
Reduction in area (%)
200
300
400
500
600
Tempering temperature (°C)

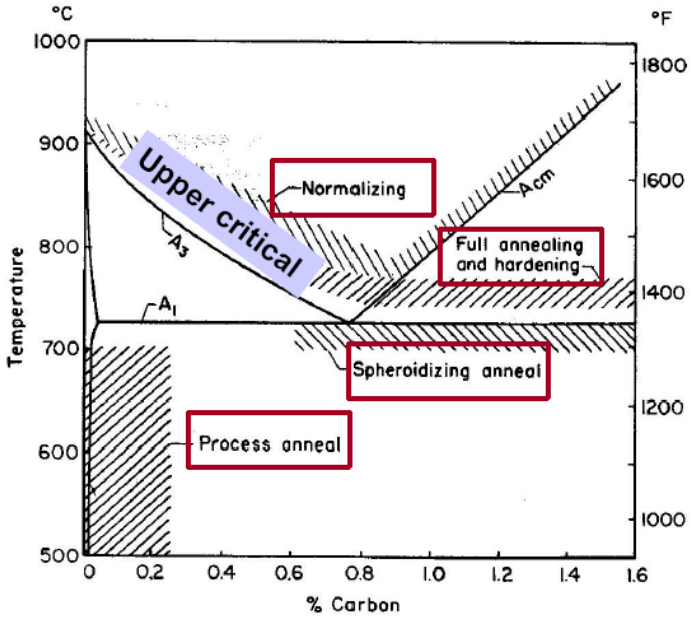
۷-۷- عملیات حرارتی فلزات

- پروسه عملیات حرارتی یکی از روشهای صنعتی است که طی آن فلزات تحت سیکل گرم کردن یا سرد کردن قرار می گیرند تا ریز ساختار و خواص مکانیکی مورد نظر در آنها بوجود آید. ما در این قسمت به بررسی پروسه آنیلینگ و رسوب سختی می پردازیم.

۷-۷-۱- آنیلینگ Annealing processes

- این عملیات عبارت است از گرم کردن قطعه در درجه حرارت بالا و بمدت زمان لازم و سپس سرد کردن آرام قطعه. هدف از اين عمليات حرارتي آزاد كردن تنش هاي پسماند، نرمی (داکتیلیته) و تافس و بالاخره دست یابی به ریز ساختار مطلوب است. این پروسه شامل سه مرحله اساسی است. اولاً گرم کردن تا دمای مورد نظر ثانیاً نگهداشتن در آن دما (Holding/Soaking) و ثالثاً سرد کردن تا دمای اتاق.

Process annealing



- هدف از این پروسه حذف اثرات پدیده کار سختی (Cold work) است تا داکتیلیته افزایش یابد. معمولاً بازیابی و تبلور مجدد در این پروسه انجام می شود اما از رشد دانه جلوگیری می گردد. این پروسه در دمایی بالاتر از دمای تبلور مجدد صورت می گیرد.

Stress relief

- تنش زدایی

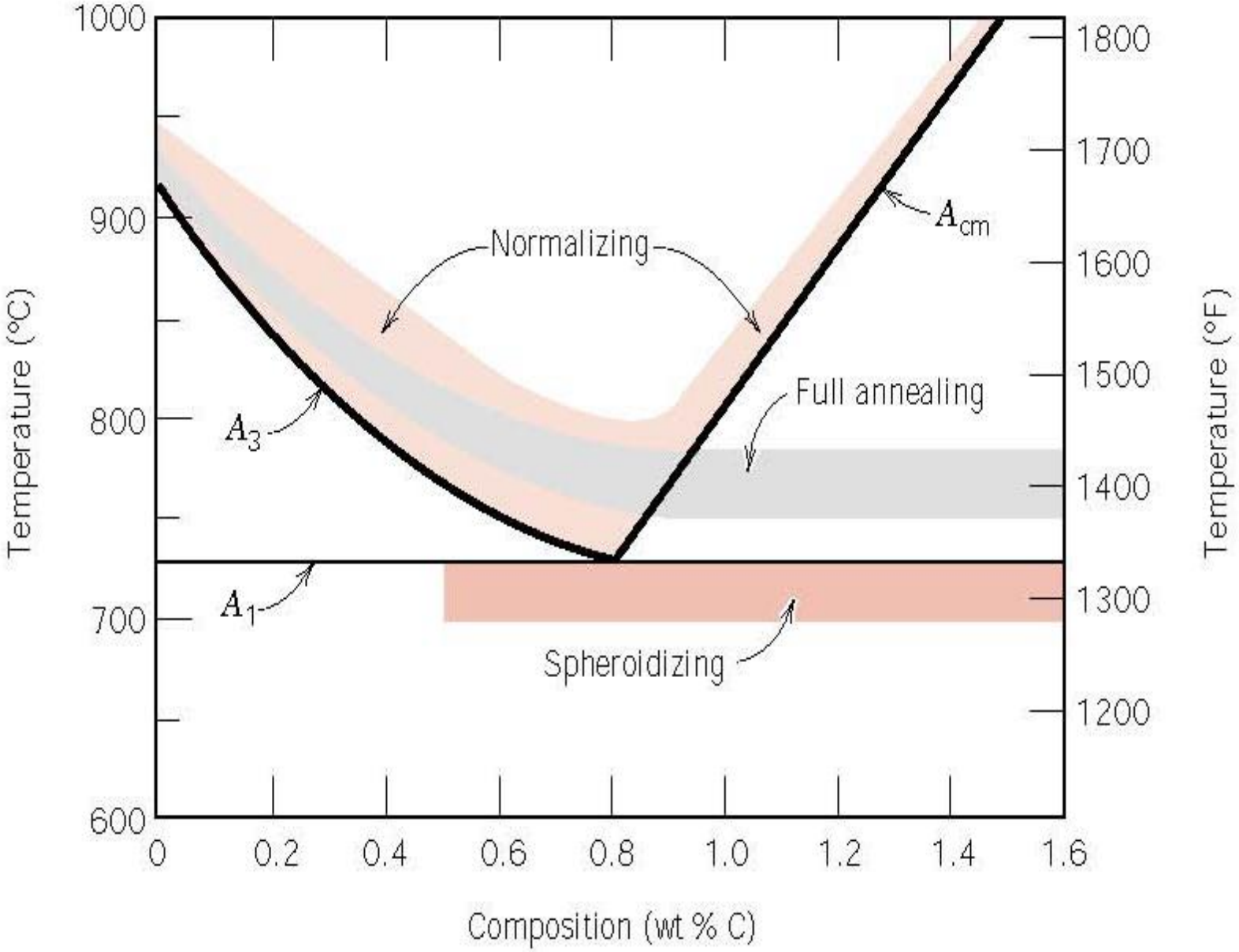
- می دانیم که بنا به دلایل ذیل، تنش های داخلی (پس ماند) در قطعه باقی می ماند:
  - بعلت تغییر فرم پلاستیک، ماشین کاری و سنباده زنی (grinding)
  - سرد کردن غیر یکنواخت قطعه در هنگام ریخته گری یا جوشکاری
  - وجود تغییر فاز یا استحاله فازی به هنگام عملیات حرارتی

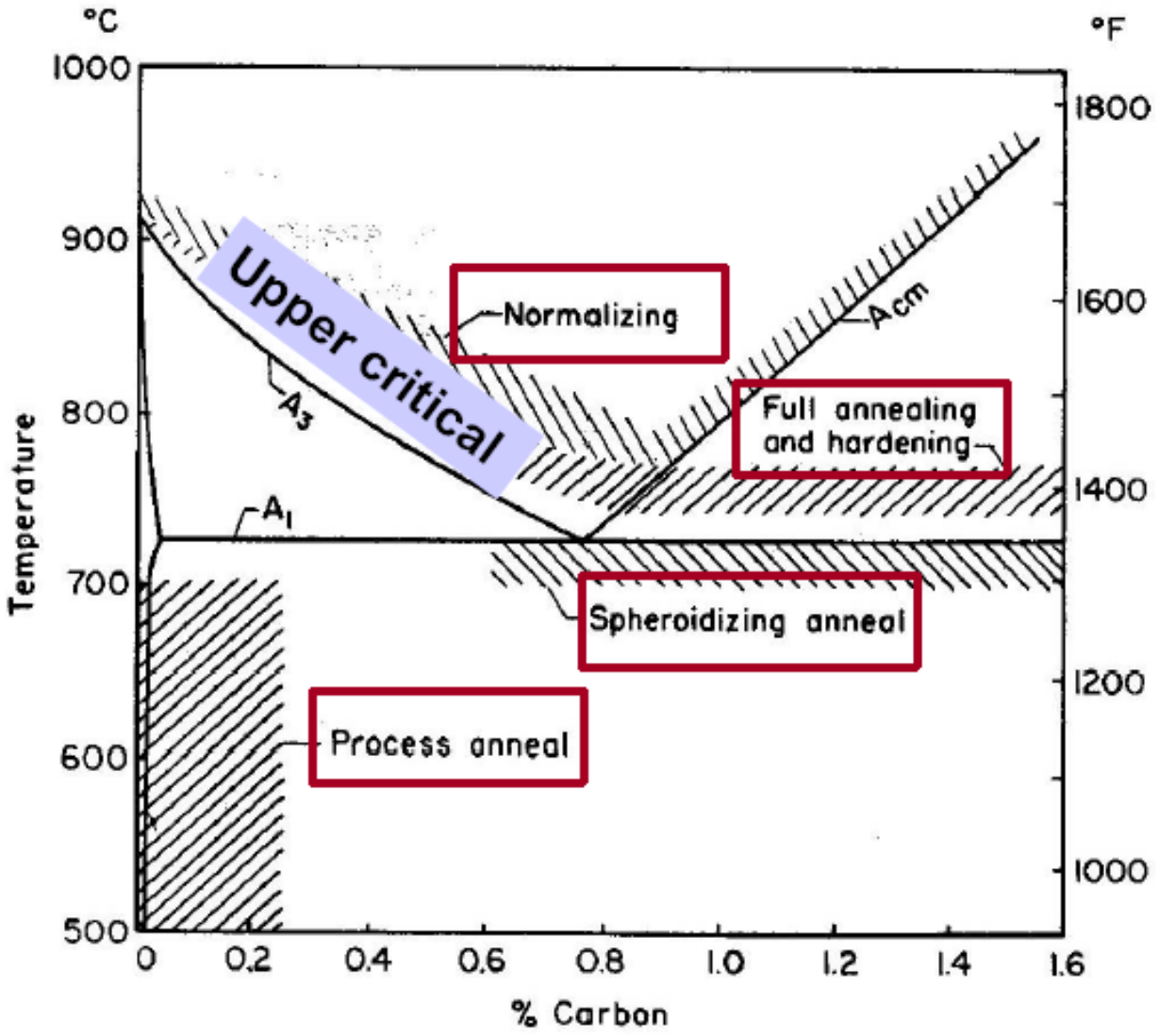
- اگر اين تنشها از قطعه خارج (حذف) نشوند، تغيير فرم و اعوجاج (Distortion) و پيچيدگي (Warpage) در قطعه بوجود مي آيد. با عمليات حرارتي تنش زدايي مي توان از تشكيل اين ضايعات جلوگيري كرد.

- روش کار به این صورت است که معمولاً قطعه را تا دمای مورد نظر گرم می کنند سپس بمدت طولانی آنرا در آن دما نگه می دارند و بالاخره قطعه را در هوا سرد می کنند.

- **۷-۷-۲- آنیلینگ آلیاژهای آهنی Annealing of ferrous alloys**

- قبل از بحث این قسمت بایستی به یک مقدمه کوتاه اشاره کنیم شکل ۷-۵۰ قسمت یوتکتوئید دیاگرام آهن – کربن را نشان می دهد. خط افقی یوتکتوئید را A_1 می نامند و به آن درجه حرارت بحرانی پائینی (Lower Critical Temperature) می گویند و در شرایط تعادلی و در زیر خط A_1 آستنیت به فریت و سمانتیت تجزیه می شود. خط A_3 یا Acm را درجه حرارت بحرانی بالایی (Upper Critical Temperature) می نامند و در بالای این خط ها فقط فاز آستنیت وجود دارد. حال به توضیح پروسه های ذیل می پردازیم:


1000
900
800
700
600
1800
1700
1600
1500
1400
1300
1200
Temperature (°C)
Temperature (°F)
Normalizing
A_{cm}
A_3
Full annealing
A_1
Spheroidizing
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
Composition (wt % C)


°C
°F
1000
900
800
700
600
500
1800
1600
1400
1200
1000
Temperature
Upper critical
Normalizing
A_{cm}
A_3
Full annealing and hardening
A_1
Spheroidizing anneal
Process anneal
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
% Carbon

- **نرمالیزه کردن Normalizing**

- فولادهای تغییر فرم پلاستیک یافته (حاصل از فورد) حاوی دانه های درشت و نامنظم پرلیت هستند. پروسه نرمالیزه کردن یک پروسه آنیلینگ است که طی آن قطعه تا دمای $55 - 85^{\circ}C$ بالای خط A_3(Acm) حرارت داده می شود. سپس بمدت کافی در آن دما نگه داشته می شود تا آلیاژ به فاز آستنیت تبدیل شود (این پروسه را آستنیته کردن یا Austenizing می نامند). سپس قطعه را در هوا سرد می کنند تا ساختار پرلیتی دانه ریز و یکنواخت بدست آید.

- **آنیلینگ کامل Full annealing**

- این پروسه $15 - ۴۰^{\circ}C$ بالای خط A_3 یا A_1 صورت می گیرد. در ابتدا قطعه را گرم کرده و سپس در کوره سرد می کنند. (کوره را خاموش می کنند تا دمای آن به دمای اتاق برسد) ساختار حاصله پرلیت درشت (Coarse Pearlite) است که نسبتاً نرم و داکتیل است.

کروی کردن سمانتیت Spheroidizing

فولادهای کربن متوسط و پر کربن تحت این پروسه قرار می گیرند. این فولادها (سمانتیت کروی) داکتیلیته خوبی دارند و براحتی ماشین کاری می شوند. در این پروسه فولاد زیر خط A_1 بمدت 25- 15ساعت حرارت داده می شود تا اینکه سمانتیت بصورت کروی درآید.

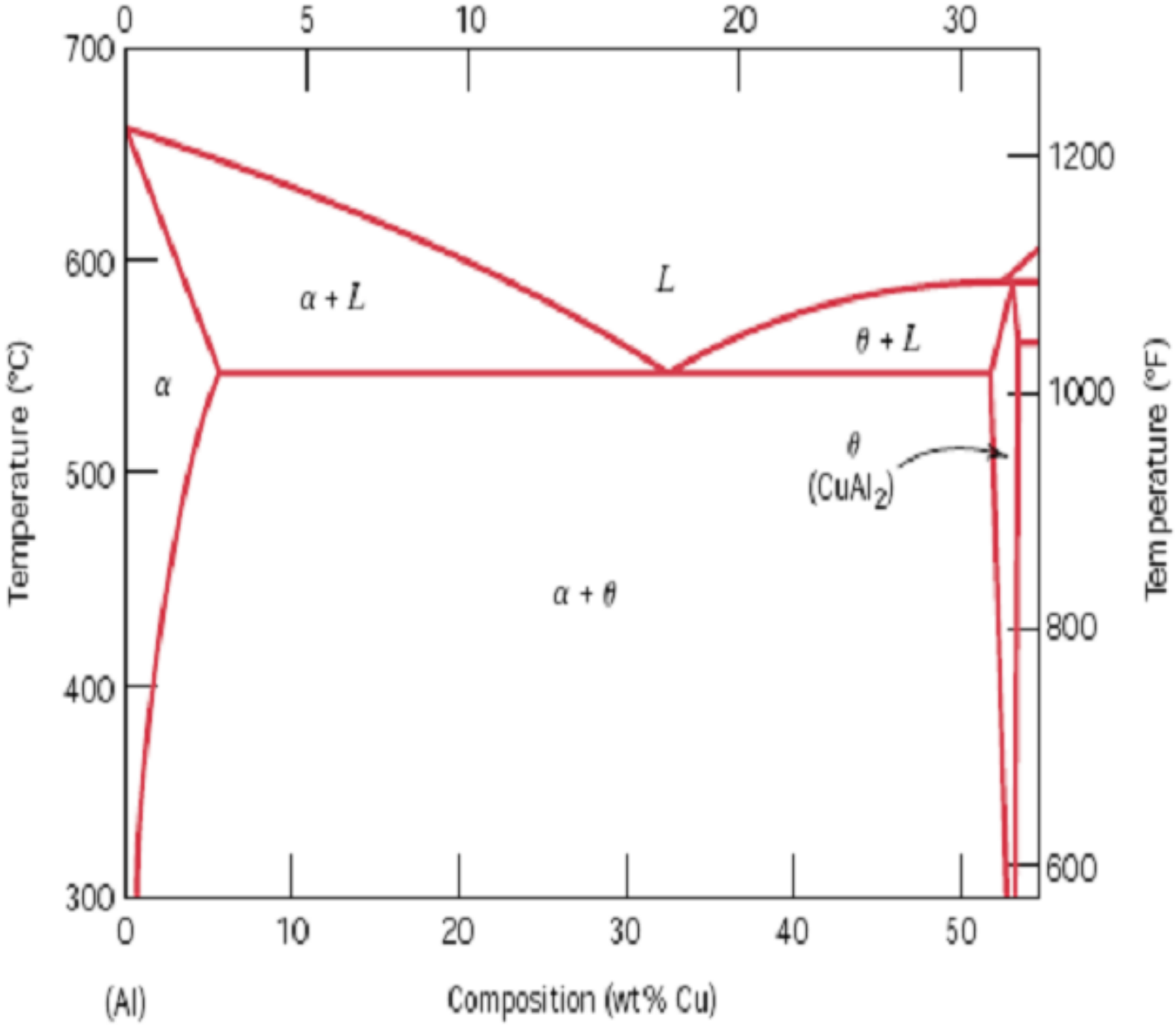
۷-۷-۳- رسوب سختی(پیر سختی)Precipitation(Age) hardening

- استحکام و سختی بعضی از آلیاژها را می توان با تشکیل و توزیع ذرات بسیار ریز (uniformly dispersed particles) یا ذرات فاز دوم (Second phase) در درون فاز اصلی افزایش داد. این پروسه را رسوب سختی یا پیر سختی (hardening Age)می نامند.

- برای اینکه آلیاژی تحت پروسه رسوب سختی قرار بگیرد باید دو شرط اصلی داشته باشد.

- اولاً باید قسمتی از دیاگرام حاوی منطقه تک فاز (محلول جامد) باشد.

- ثانیاً با کاهش درجه حرارت حد حلالیت نیز کاهش پیدا کند، برای مثال شکل ۵۱-۷ را در نظر بگیرید. عملیات رسوب سختی با دو مکانیزم (یا دو روش و یا دو مرحله) ذیل انجام می شود:


0
5
10
20
30
700
600
500
400
300
1200
1000
800
600
α + L
L
θ + L
α
θ
(CuAl2)
α + θ
Temperature (°C)
Temperature (°F)
0
10
20
30
40
50
(Al)
Composition (wt% Cu)

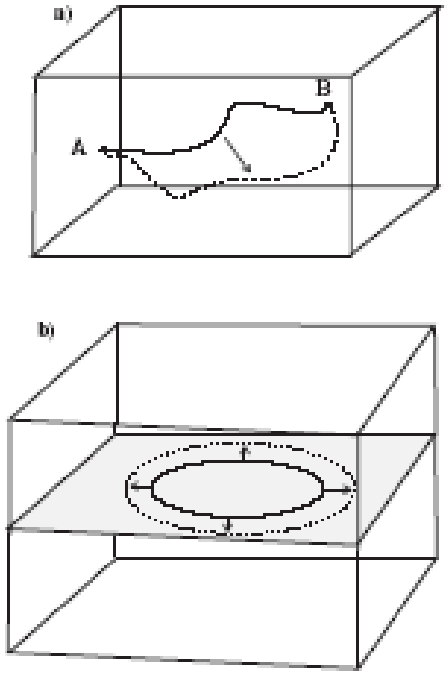


Figure 8.5 (a) A dislocation line pinned at *A* and *B* in a solid and stretched via stress; (b) a dislocation loop that is stretched via stress.

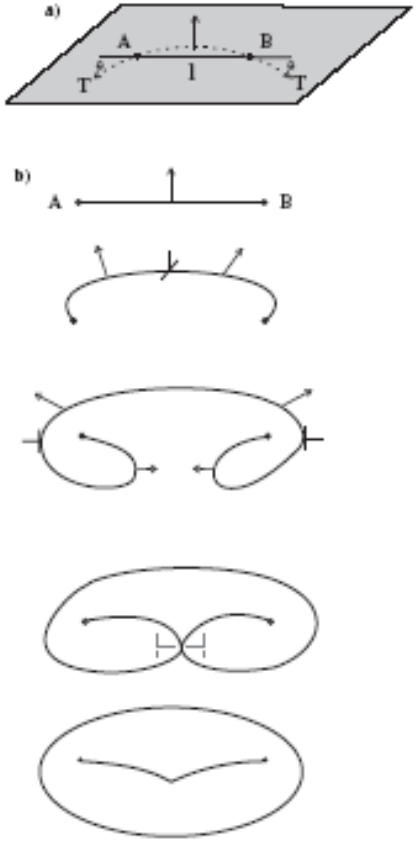


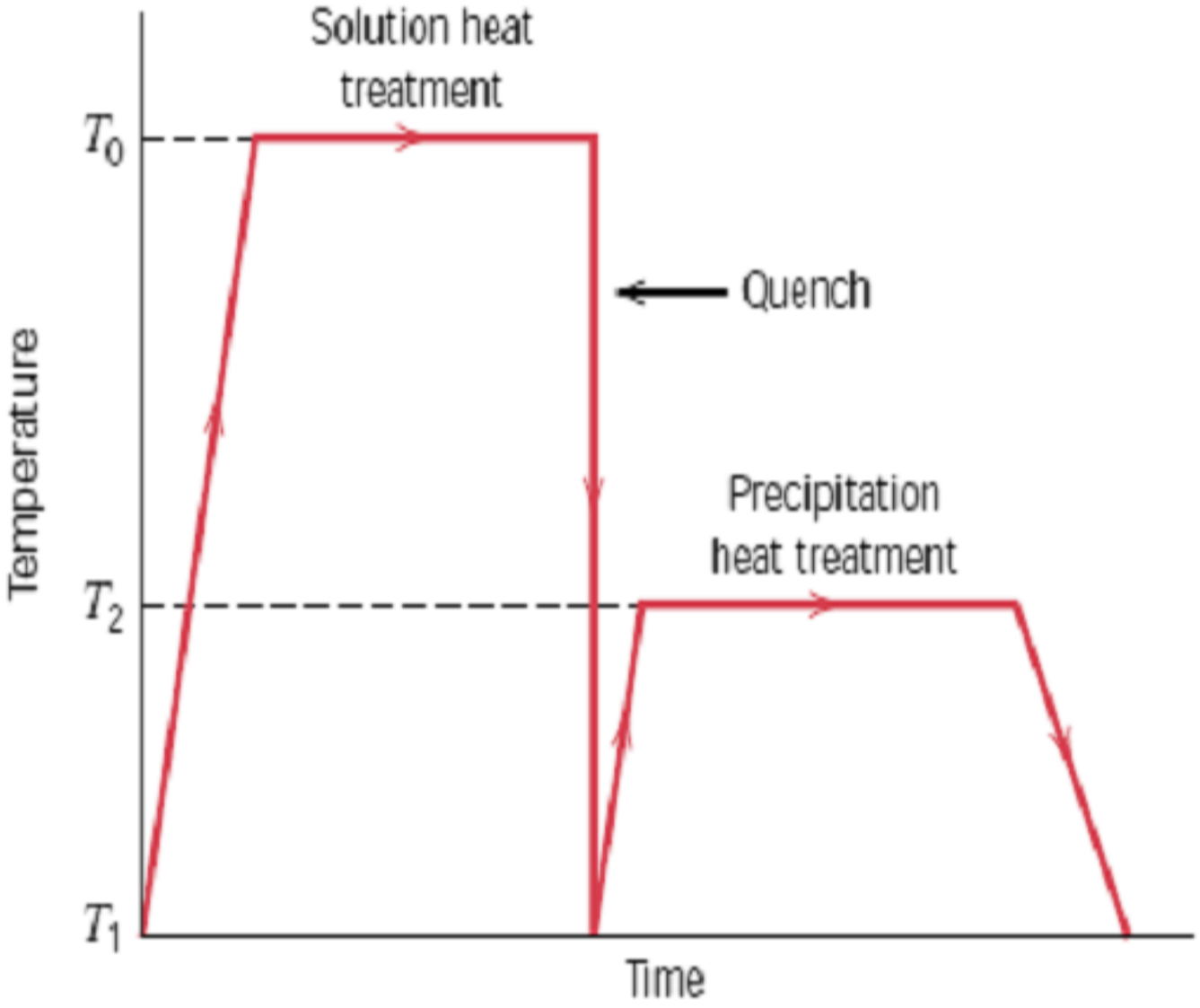
Figure 8.6 (a) A dislocation on a plane, pinned at *A* and *B* and stressed; (b) the evolution of the stressed dislocation yielding a new dislocation.

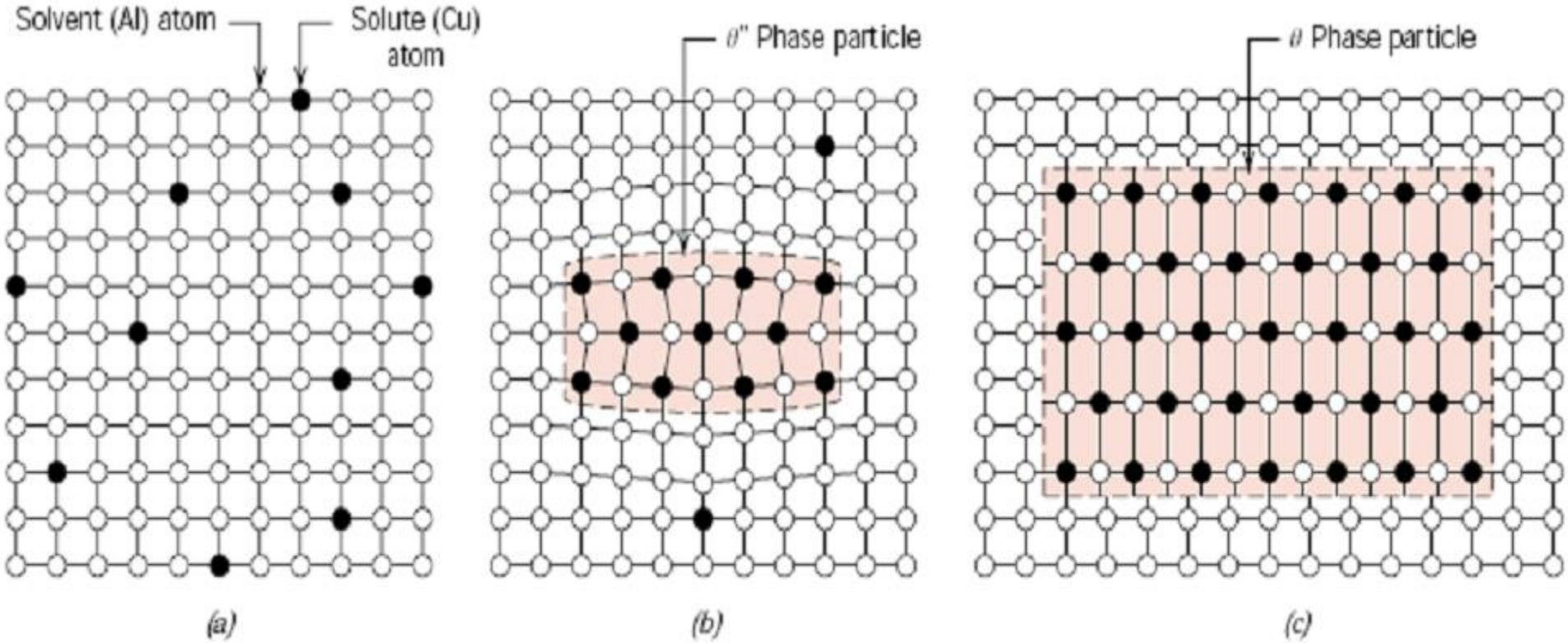
- **۱- عملیات حرارتی محلولی** **Solution heat treatment**

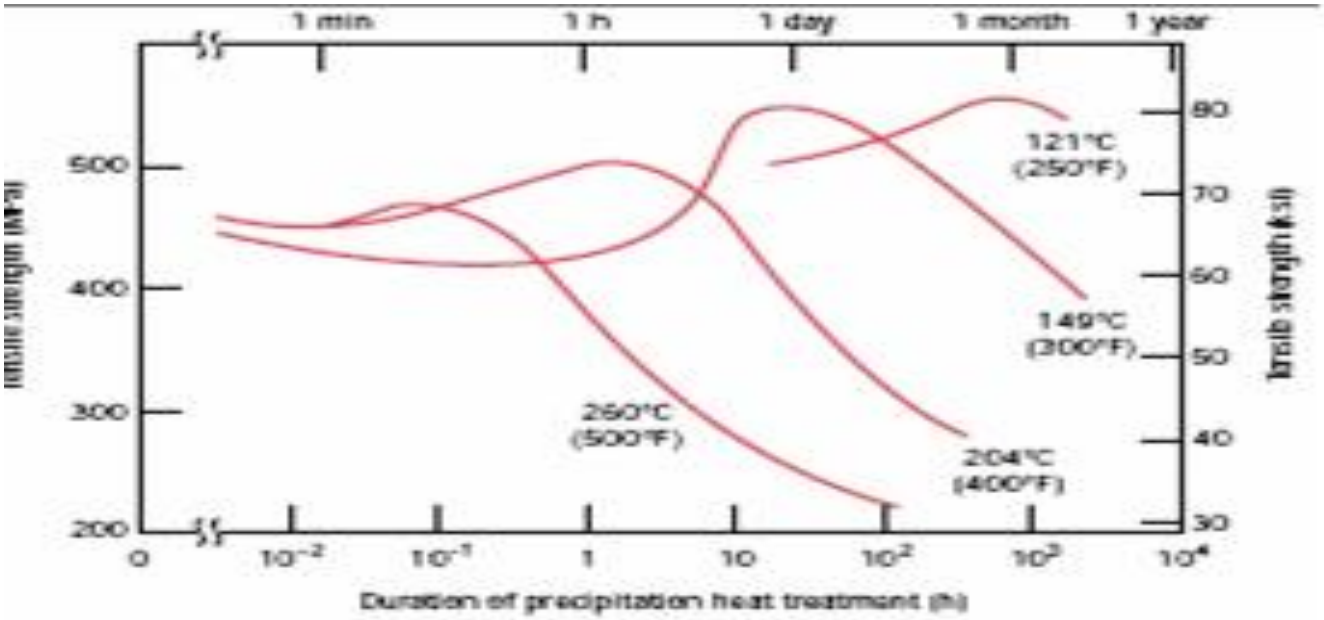
- در این مرحله تمام اتم های محلول (عنصر آلیاژی یا اتم ناخالص) در زمینه حل می شوند تا اینکه محلول جامد تک فاز بوجود آید. مثلاً گرم کردن آلیاژی با ترکیب شیمیایی C_0 تا دمای T_0 و نگهداشتن بمدت کافی در این دما باعث می شود تا اینکه تمام ذرات β فاز در فاز زمینه α حل شوند. سپس آلیاژ بسرعت تا دمای اتاق سرد می شود یا شوکه می شود (quenching) تا اینکه فرصت و زمان کافی برای رسوب ذرات β نباشد. در این حالت فقط محلول جامد تک فاز فوق اشباع α دردمای اتاق وجود دارد.

- **۲- عملیات حرارتی رسوبی**

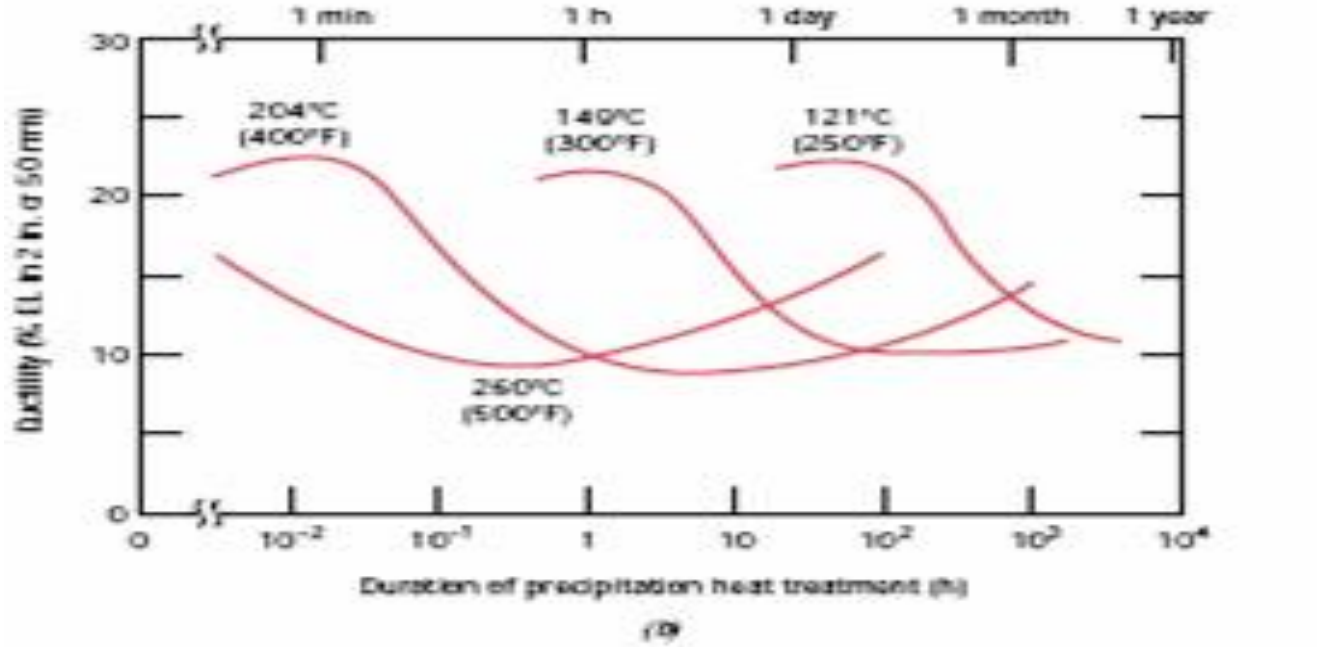
- تأثیر زمان پیر شدن و مکانیزم سخت شدن در شکلهای ۵۳-۷ و ۵۴-۷ نشان داده شده است.


Solution heat
treatment
T_0
Quench
Temperature
Precipitation
heat treatment
T_2
T_1
Time


Solvent (Al) atom
Solute (Cu) atom
θ" Phase particle
θ Phase particle
(a)
(b)
(c)


1 min
1 h
1 day
1 month
1 year
500
400
300
200
0
10^{-2}
10^{-1}
1
10
10^{2}
10^{3}
10^{4}
80
70
60
50
40
30
121°C (250°F)
149°C (300°F)
204°C (400°F)
260°C (500°F)
ksi
Duration of precipitation heat treatment (h)

(a)


1 min
1 h
1 day
1 month
1 year
30
20
10
0
0
10^{-2}
10^{-1}
1
10
10^{2}
10^{3}
10^{4}
204°C (400°F)
149°C (300°F)
121°C (250°F)
260°C (500°F)
Duration of precipitation heat treatment (h)

(b)