دانشگاه صنعتی شاهرود

جلسه هفتم رشد کریستال از فازمذاب

مهم ترین روش های رشد کریستال از مذاب را می توان به صورت زیر دسته بندی کرد:

- انجماد تعادلی و غیرتعادلی(که در اینجا مثالی از آهن زده می شود)
- روش بریجمن
- روش چوکرالسکی
- روش ذوب منطقه ای

تبلور ابتدایی

- ساختاری که در حین انجماد تشکیل می شود ، بر روی خواص مکانیکی تأثیر بسزایی دارد. معمولاً تبلور اولیه در دو مرحله انجام می گیرد ، ابتدا مرحلهٔ جوانه زنی و سپس مرحلهٔ رشد بلور

جوانه زنی

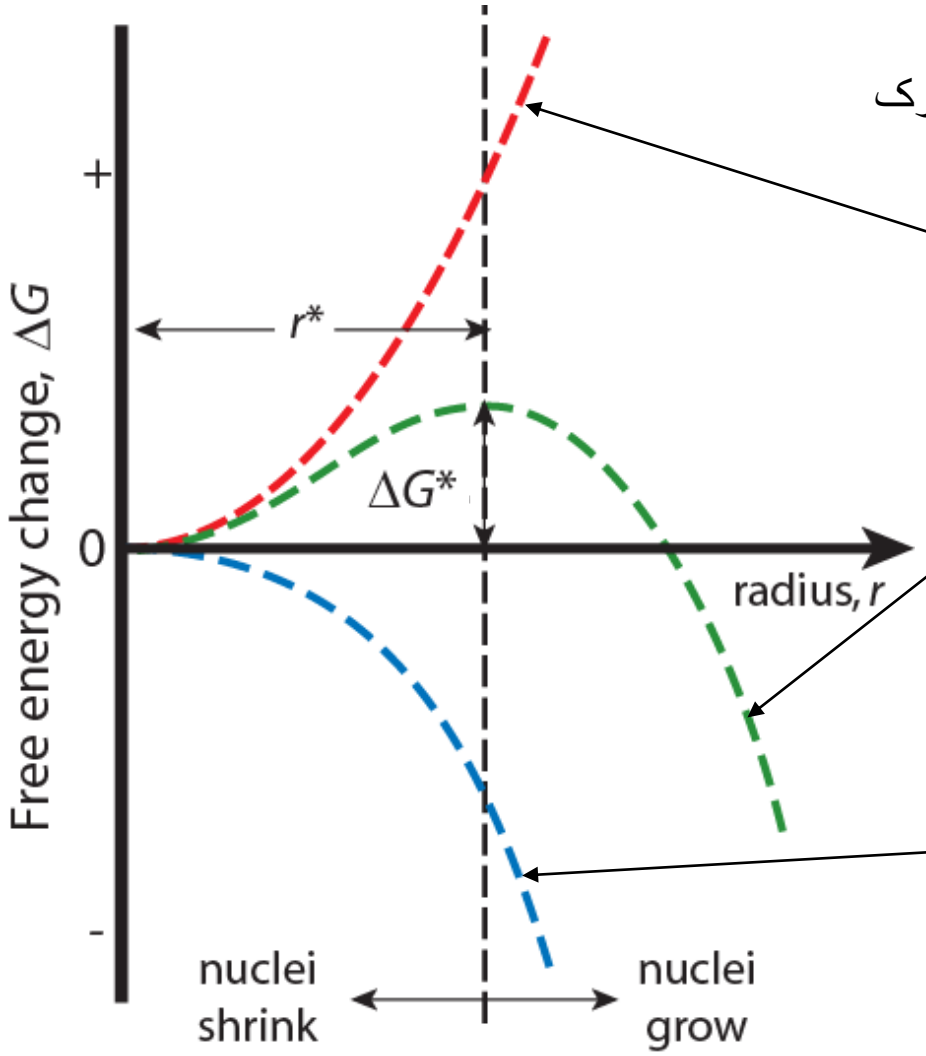
- وقتی دمای فلز مایع به اندازهٔ کافی به زیر نقطهٔ انجماد کاهش یافت ، در نقاط مختلف مایع خود به خود تجمع های پایداری از اتم ها یا هسته های اولیه تشکیل می شود . حال هسته هایی که جامد شده اند به عنوان مراکزی برای تبلور بیشتر مایع عمل می کنند .

- با کاهش بیشتر دما اتم های بیشتری به حالت جامد در می آیند که ممکن است مستقلاً تشکیل هسته دهند یا اینکه به هسته های دیگر بپیوندند.

- هر هسته با جذب اتم های بیشتری از مایع به شبکهٔ بلوری خود رشد می کند .

- تشکیل هسته همگن
- تشکیل هسته درحجم کل مایع
- نیاز به فوق تبریدی ۱۰۰درجه سانتی گراد دارد.
- تشکیل هسته غیر همگن
- بسیار ساده تر و راحت تر هست چون هسته از قبل وجود دارد و می تواند دیواره قالب یا ناخالصی های فاز مایع باشد.
- انجماد در فوق تبرید هایی حدود ۰,۱ درجه تا ۱۰ درجه سانتی گراد ایجاد می شود.

شرایط رشد هسته



انرژی آزاد سطحی

انرژی می گیرد انرژی برای ساختن فصل مشترک

$$\Delta G_S = 4\pi r^2 \gamma$$

γ = کشش سطحی

ΔG_T = انرژی آزاد کلی

$$= \Delta G_S + \Delta G_V$$

- انرژی حجمی (آزاد شدن انرژی)

$$\Delta G_V = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_\upsilon$$

$$\Delta G_\upsilon = \frac{\text{volume free energy}}{\text{unit volume}}$$

r^* = شعاع بحرانی : انقباض $r^* >$ شعاع هسته ; رشد شعاع هسته $> r^*$

$$r^* = \frac{-2\gamma T_m}{\Delta H_S \Delta T}$$

r^* = شعاع بحرانی

γ = انرژی آزاد سطح

T_m = دمای ذوب

ΔH_S = گرمای نهان انجماد

$\Delta T = T_m - T$ = فوق تبرید

r^* کاهش می یابد ΔT افزایش می یابد

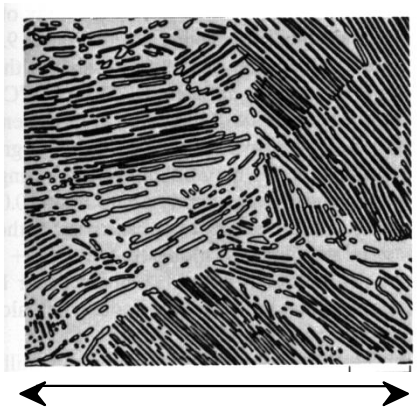
برای ΔT مرسوم r^* حدود 100Å هست

انجماد تعادلی -دیاگرام تعادلی فازی آهن - کربن (Fe-C)

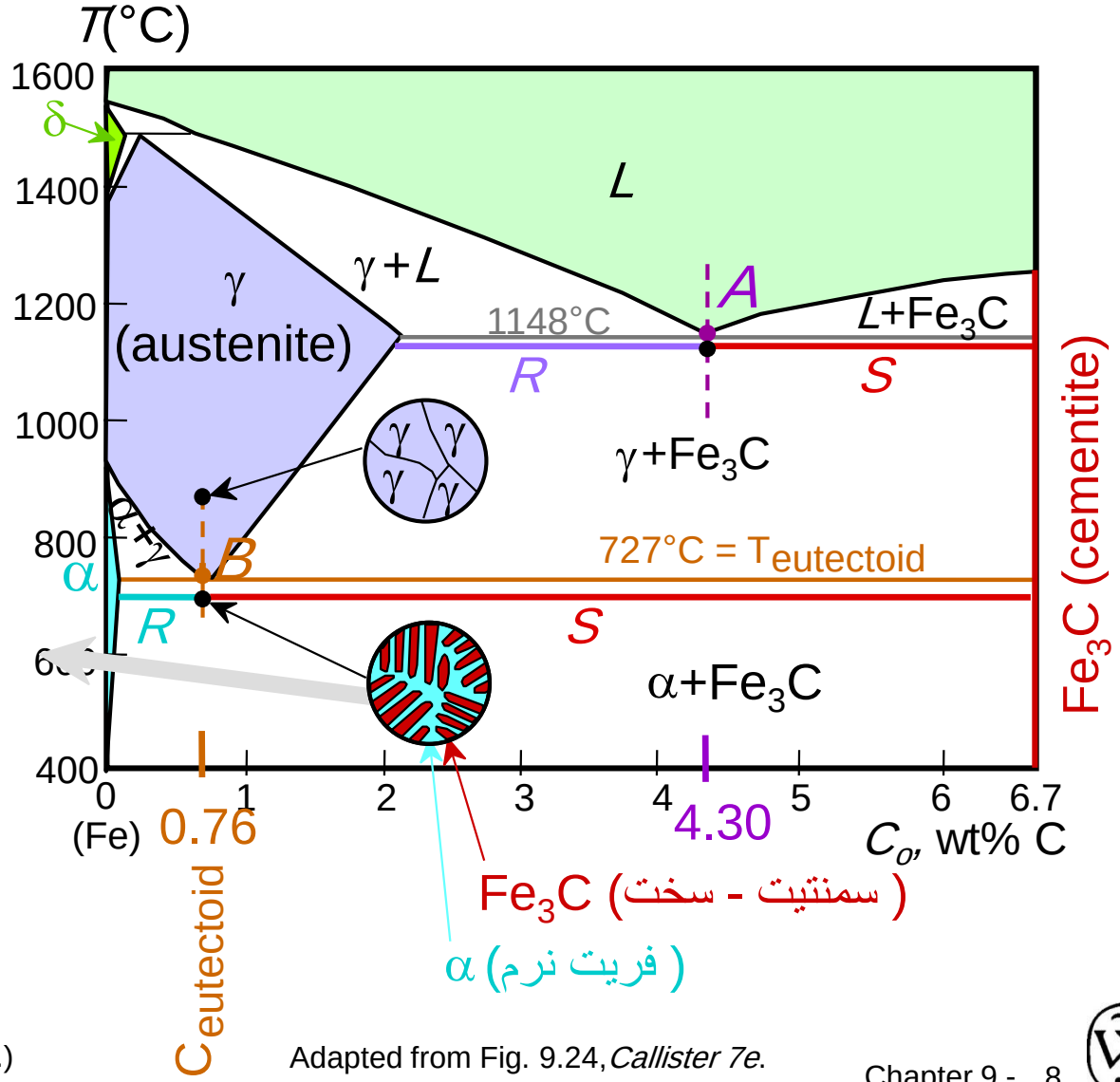
۲ نقطه مهم

- یوتکتیک (A): $L \Rightarrow \gamma + Fe_3C$

-یوتکتویید (B): $\gamma \Rightarrow \alpha + Fe_3C$



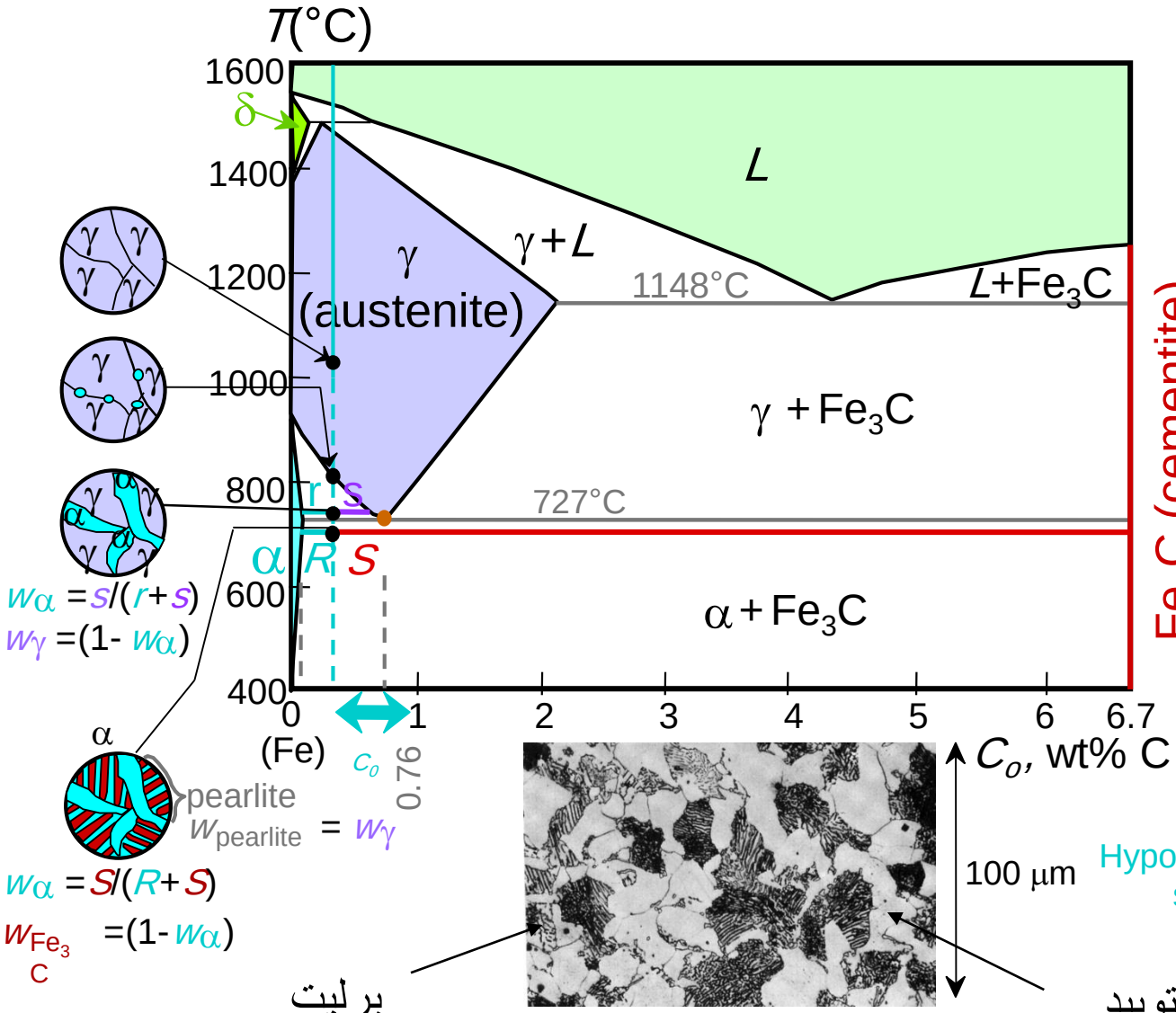
نتیجه پرلیت تسکیل لایه های فازی آلفا و سمنتیت



(Adapted from Fig. 9.27, *Callister 7e.*)

Adapted from Fig. 9.24, *Callister 7e.*

فولاد هیپو یوتکتویید



Hypoeutectoid steel

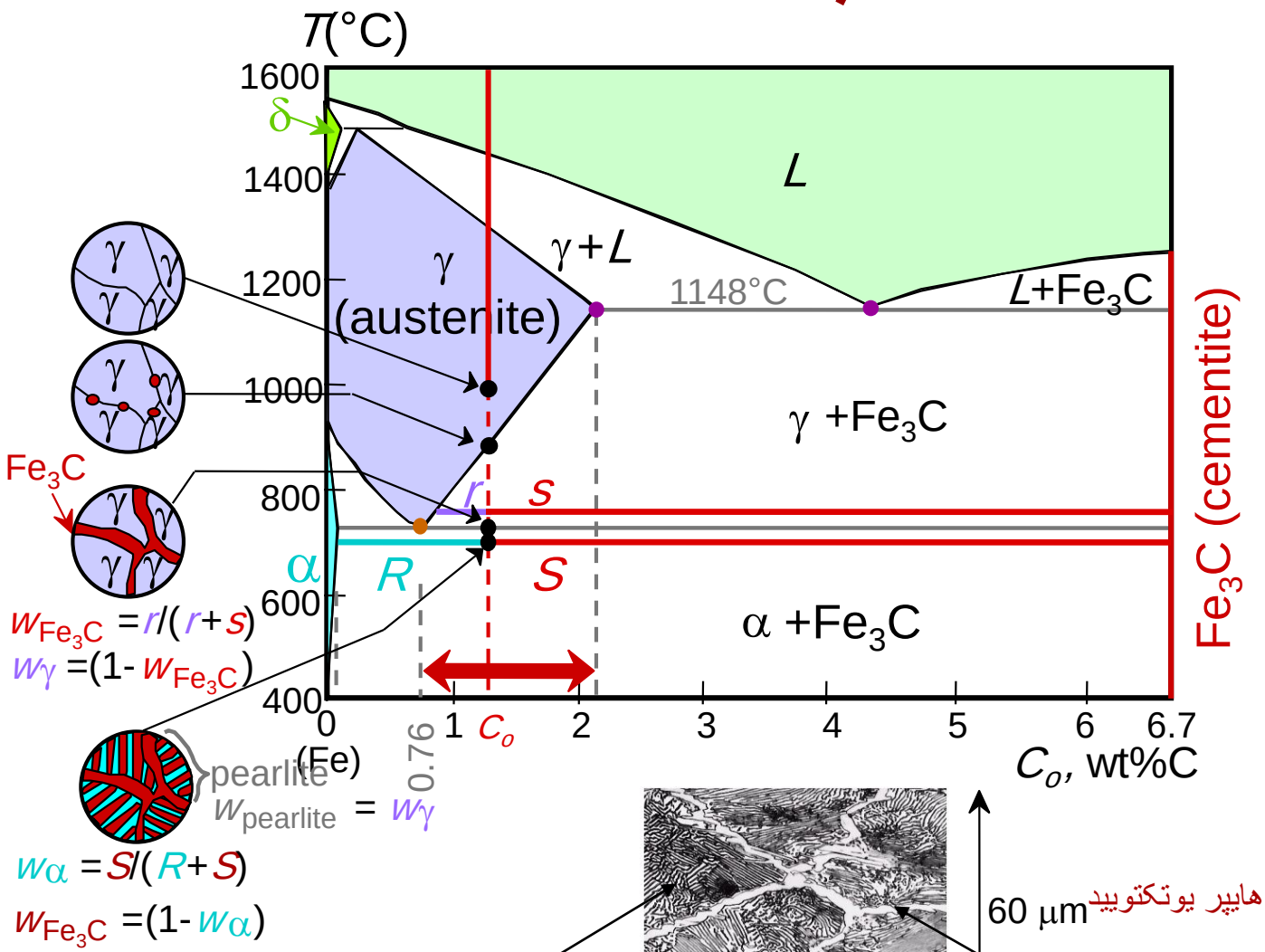
پرلیت

فریت پرویوتکتویید

Adapted from Figs. 9.24 and 9.29, *Callister 7e*. (Fig. 9.24 adapted from *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd ed., Vol. 1, T.B. Massalski (Ed.-in-Chief), ASM International, Materials Park, OH, 1990.)

Adapted from Fig. 9.30, *Callister 7e*.

فولاد هایپر یوتکتوییدی



Adapted from Figs. 9.24 and 9.32, *Callister 7e*. (Fig. 9.24 adapted from *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd ed., Vol. 1, T.B. Massalski (Ed.-in-Chief), ASM International, Materials Park, OH, 1990.)

60 μm فولاد هایپر یوتکتوییدی

پرلیت

پرویوتکتوییدی Fe_3C

Adapted from Fig. 9.33, *Callister 7e*.

مثال: تعادل فازی

برای ترکیب ۹۹,۶ درصد آهن و ۰,۴ درصد کربن در دمای زیر نقطه یوتکتیک تعیین کنید:

- ترکیب Fe_3C و فریت(α) را تعیین کنید
- مقدار کاربید (سمنتیت) در فرم هر ۱۰۰ گرم فولاد
- مقدار پرلیت و فریت پرویوتکتیک

راه حل: ترکیب سمنتیت وفریت؟

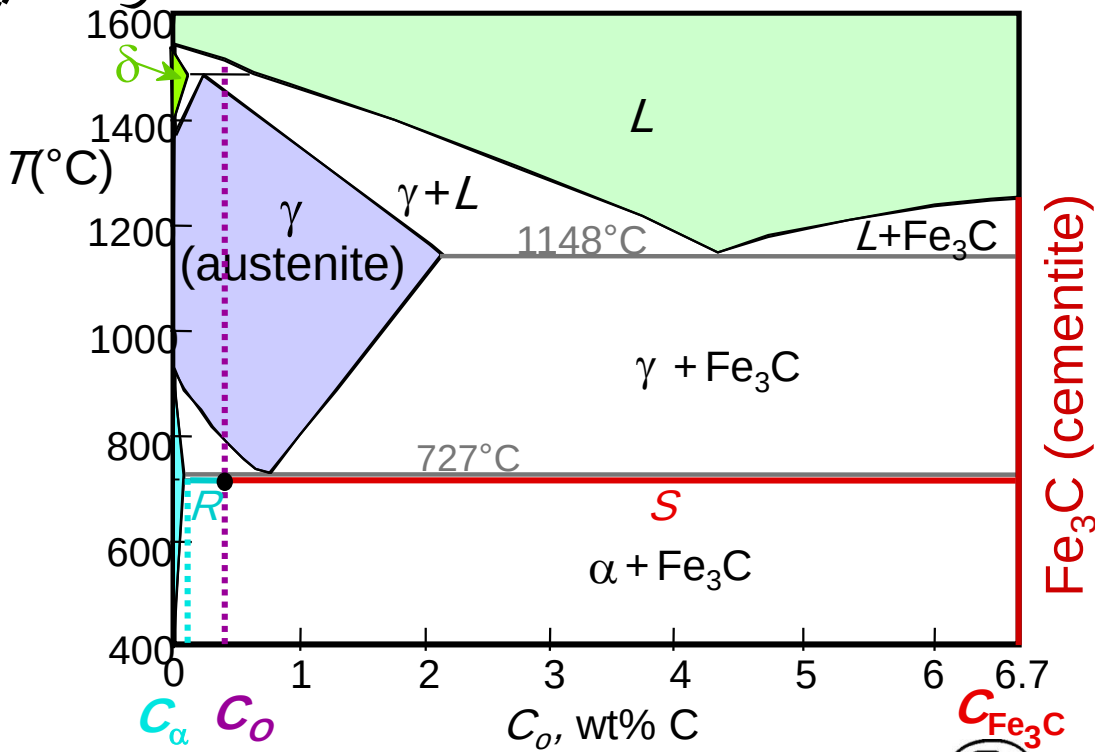
C_O = 0.40 wt% C
C_α = 0.022 wt% C
C_{Fe_3C} = 6.70 wt% C

مقدار سمنتیت و فریت؟

$$\frac{Fe_3C}{Fe_3C+\alpha} = \frac{C_o - C_\alpha}{C_{Fe_3C} - C_\alpha} x100$$

$$= \frac{0.4-0.022}{6.7-0.022} x\,100 = 5.7g$$

$Fe_3C = 5.7$ g
$\alpha = 94.3$ g



- مقدار پرلیت و فریت پرویوتیک؟

توجه: مقدار پرلیت= مقدار γ در زیر نقطه T_E

C_o = 0.40 wt% C

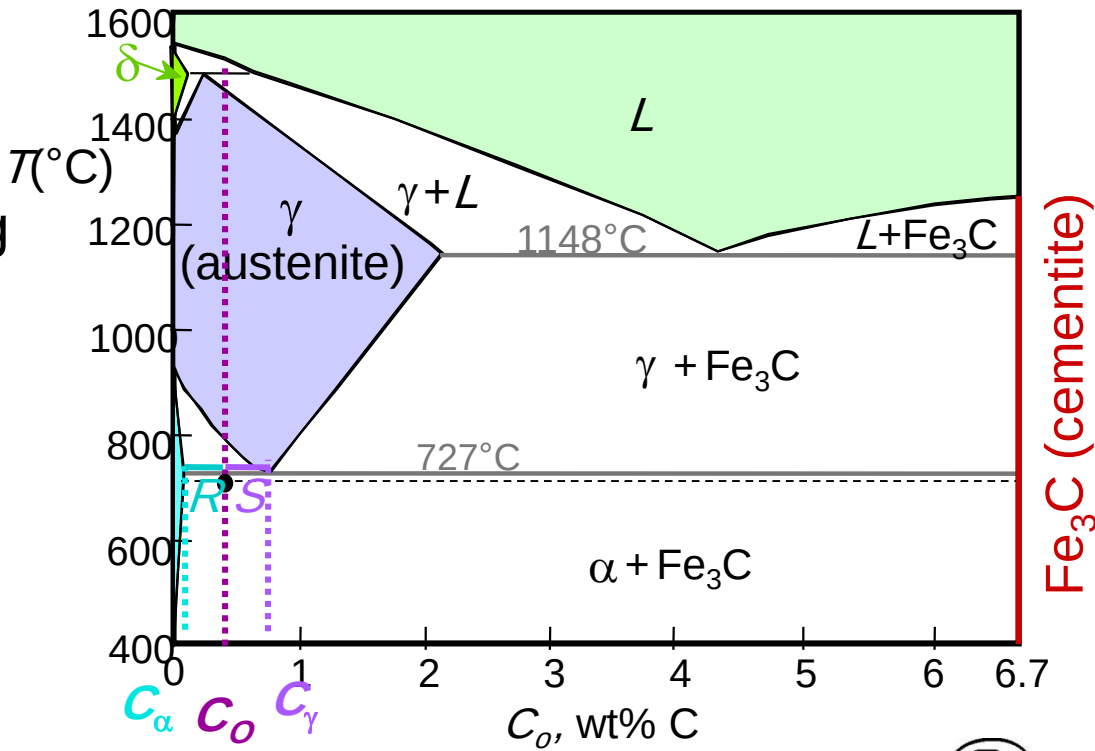
C_α = 0.022 wt% C

$C_{pearlite} = C_\gamma$ = 0.76 wt% C

$$\frac{\gamma}{\gamma+\alpha} = \frac{C_o - C_\alpha}{C_\gamma - C_\alpha} \times 100 = 51.2 \text{ g}$$

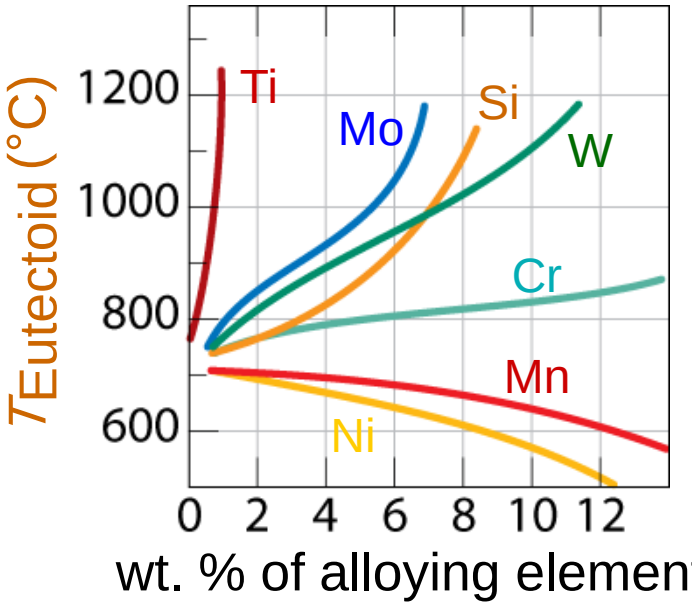
pearlite = 51.2 g

proeutectoid α = 48.8 g



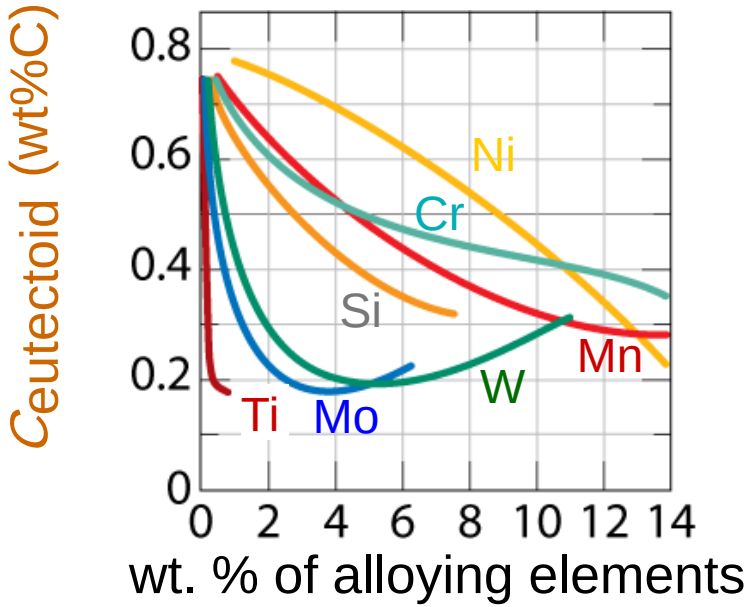
آلیاژسازی فولاد با عناصر دیگر

•تغییرات دمای یوتکتویید



Adapted from Fig. 9.34, *Callister 7e*. (Fig. 9.34 from Edgar C. Bain, *Functions of the Alloying Elements in Steel*, American Society for Metals, 1939, p. 127.)

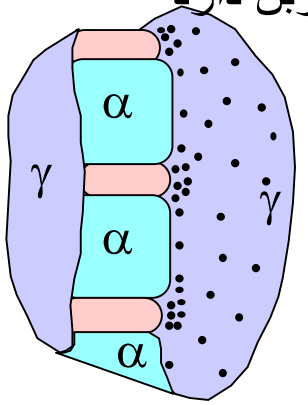
تغییرات ترکیب یوتکتویید



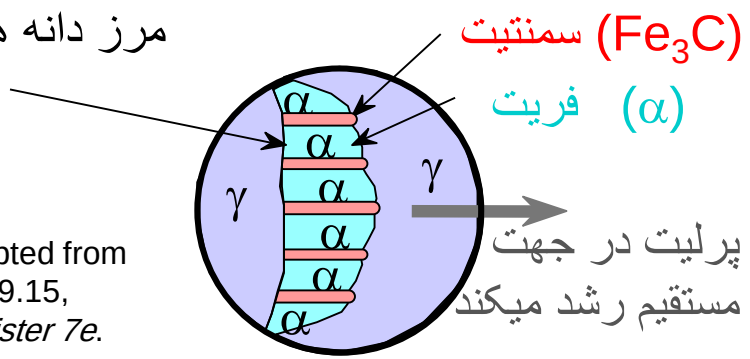
Adapted from Fig. 9.35, *Callister 7e*. (Fig. 9.35 from Edgar C. Bain, *Functions of the Alloying Elements in Steel*, American Society for Metals, 1939, p. 127.)

نرخ انتقال یوتکتوئید در رشدغیرتعادلی

نیاز به جریان نفوذ کربن دارد



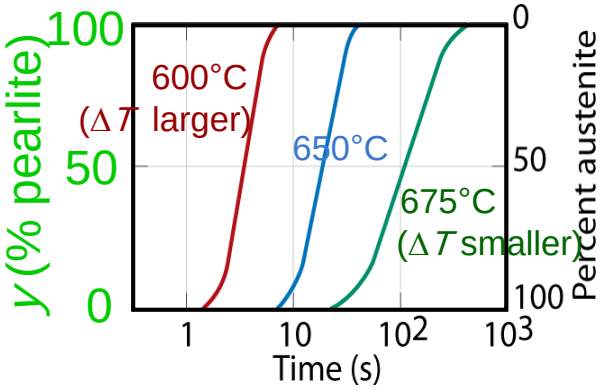
•رشد پرلیت از آستنیت:



Adapted from Fig. 9.15, *Callister 7e*.

•نرخ تبلور مجدد یا تعداد هسته ها با افزایش ΔT افزایش می یابد

با کاهش دما منحنی به سمت چپ و با افزایش دما منحنی به راست جابه جا میشودو به بیان دیگر با کاهش دما ،زمان لازم برای شروع و تشکیل پرلیت کاهش و با افزایش دما، این زمان ها افزایش می یابد.



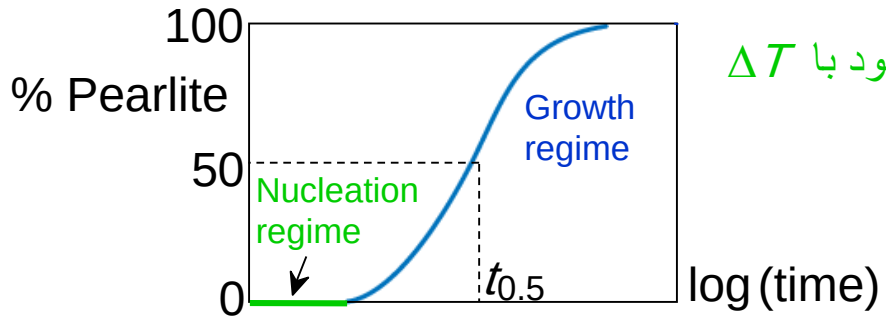
Adapted from Fig. 10.12, *Callister 7e*.

تشکیل در دماهای بالاتر → پرلیت بزرگ

تشکیل در دماهای پایین → پرلیت ریز

تشکیل هسته ورشد

•نرخ واکنش یک نتیجه از تشکیل هسته و رشد کریستال هست .

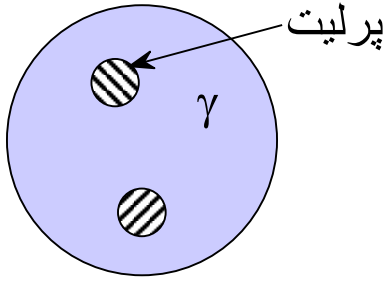


نرخ هسته زایی زیاد می شود با ΔT

نرخ رشد زیاد می شود با T

Adapted from
Fig. 10.10, *Callister 7e*.

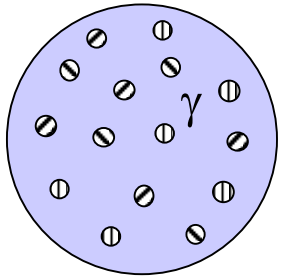
- Examples:



T کمی زیر T_E

نرخ هسته زایی کم

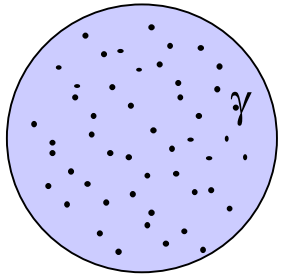
نرخ رشد زیاد



T نسبتا زیر T_E

نرخ تشکیل هسته متوسط

نرخ رشد متوسط



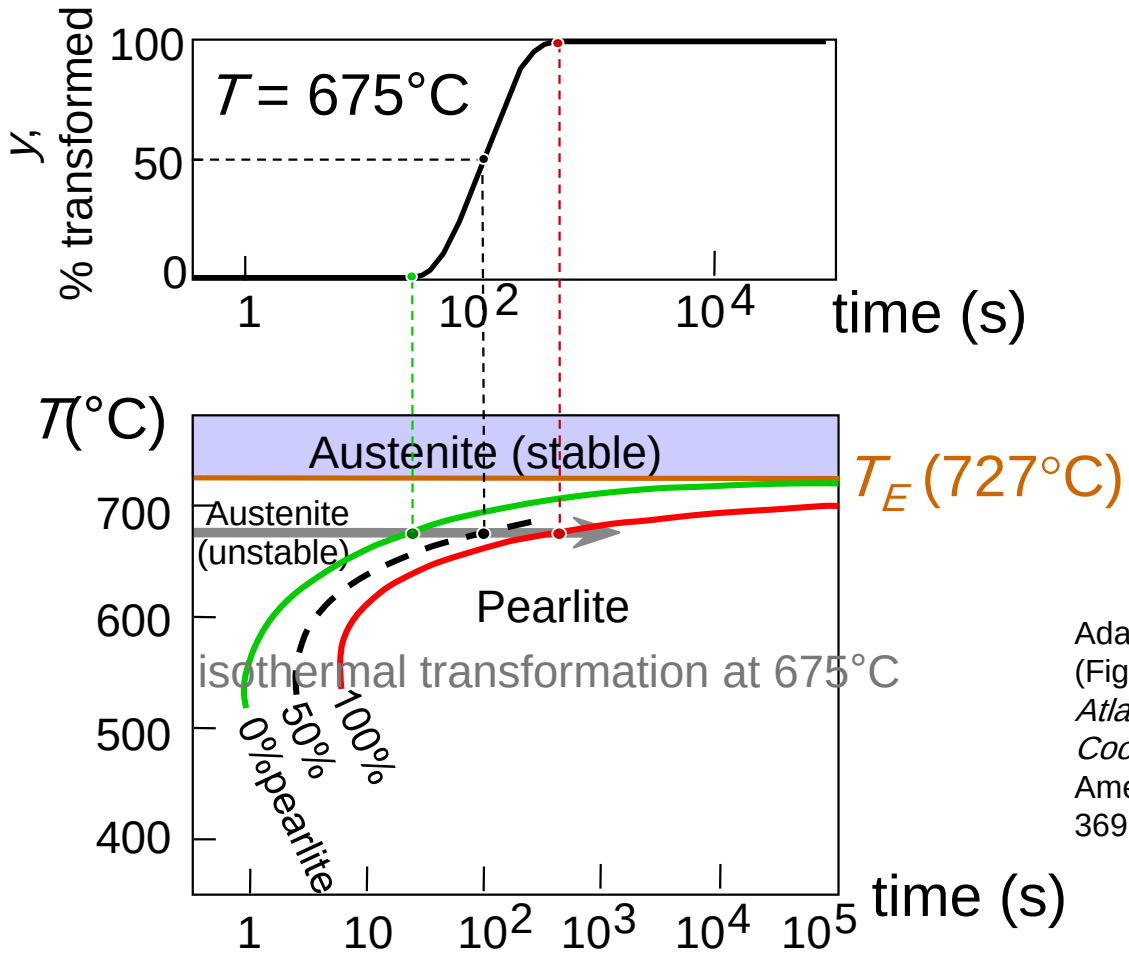
T خیلی زیر T_E

نرخ تشکیل هسته زیاد

نرخ رشد کم

دیاگرام های همدما انتقال فاز

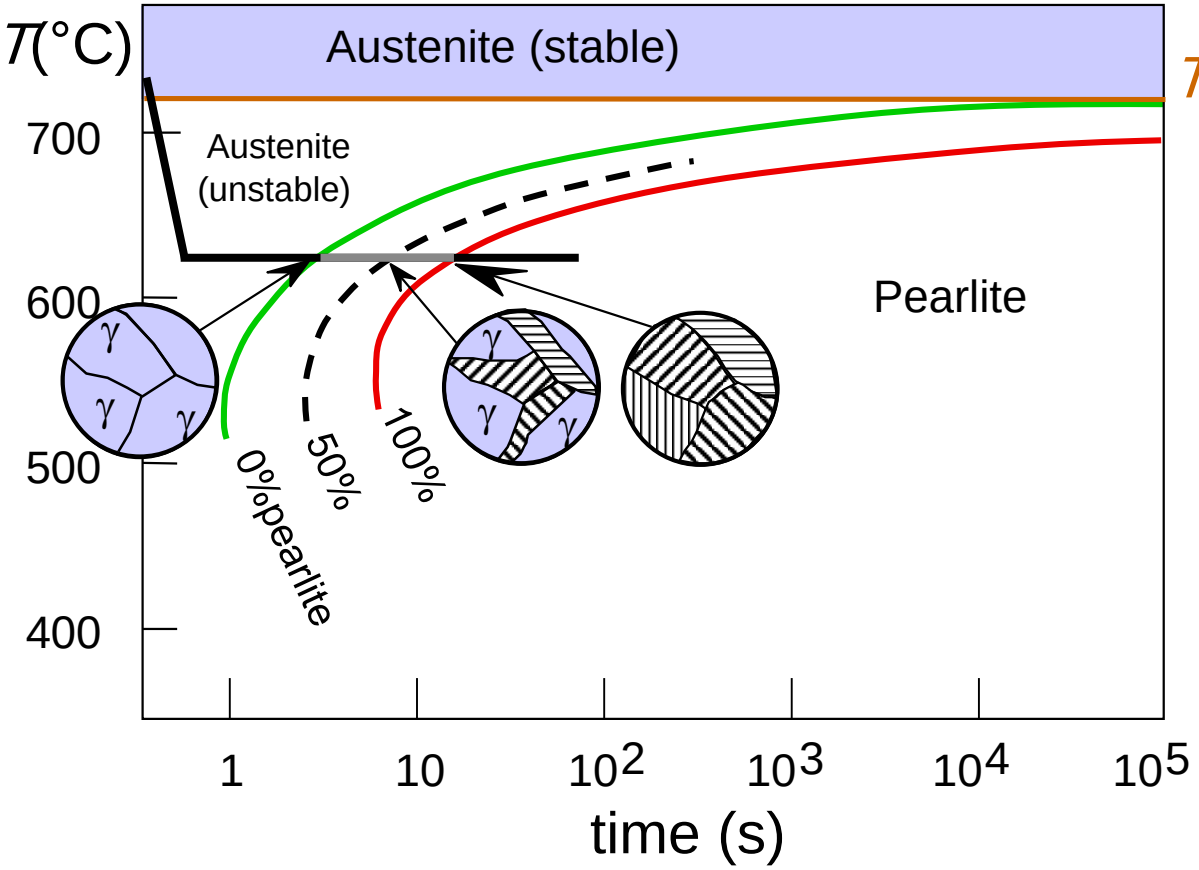
- سیستمFe-C در C_o = 0.76 wt% C
- انتقال در T = 675°C.



Adapted from Fig. 10.13, *Callister 7e*. (Fig. 10.13 adapted from H. Boyer (Ed.) *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 369.)

اثر خنک کنندگی در سیستم های آهن -کربن

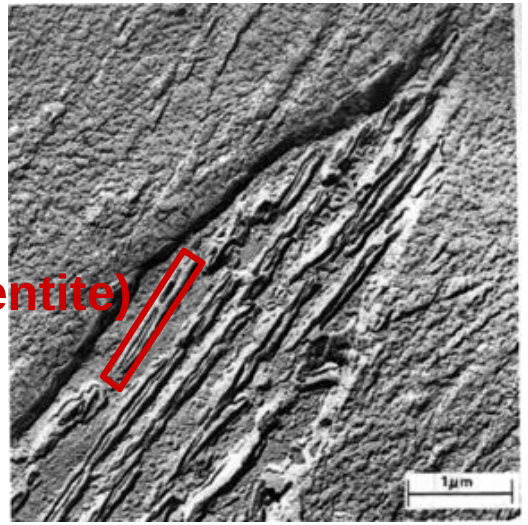
- ترکیب یوتکتوییید در C_o = 0.76 wt% C
- به سرعت تا 625°C خنک می شود و بعد در این دما نگه داشته می شود



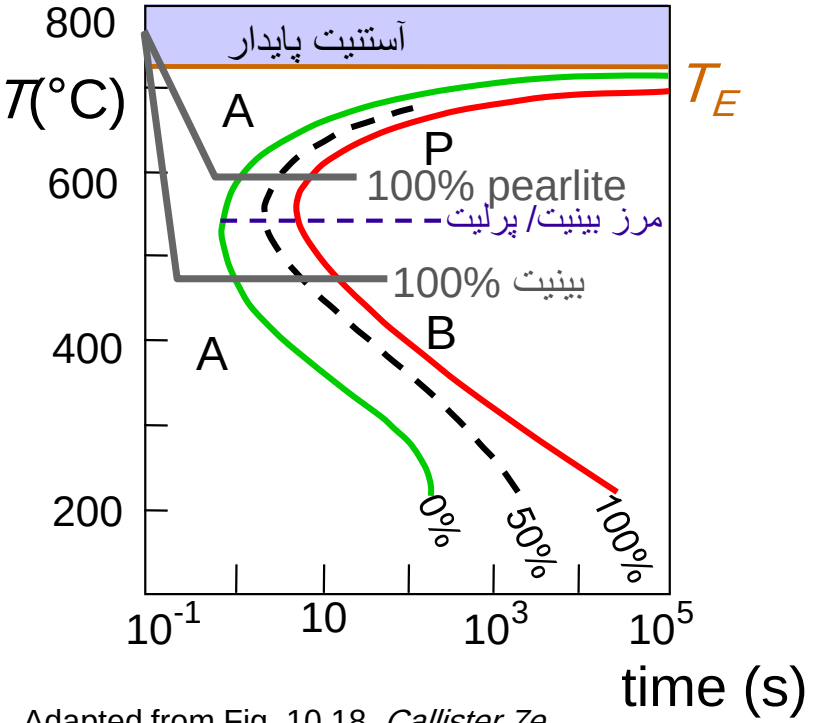
Adapted from Fig. 10.14, *Callister 7e*. (Fig. 10.14 adapted from H. Boyer (Ed.) *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1997, p. 28.)

محصولات انتقال بدون تعادل Fe-C :

- بینیت:
  - باریکه های α با میله های Fe_3C

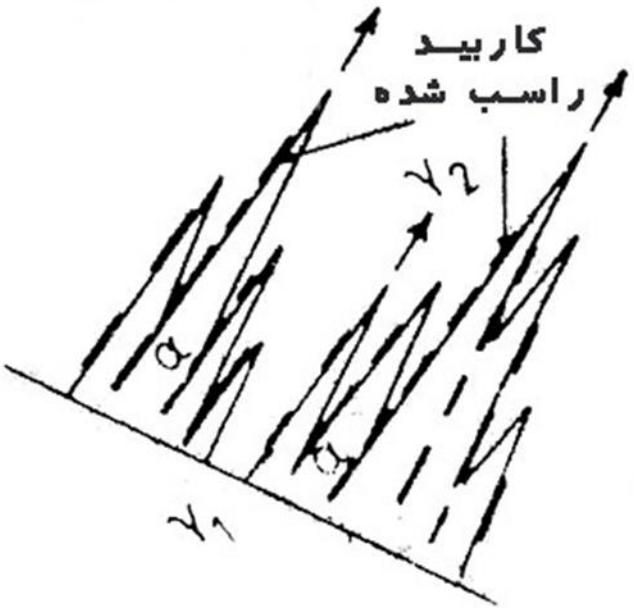


(Adapted from Fig. 10.17, *Callister, 7e*. (Fig. 10.17 from *Metals Handbook*, 8th ed., Vol. 8, *Metallography, Structures, and Phase Diagrams*, American Society for Metals, Materials Park, OH, 1973.)

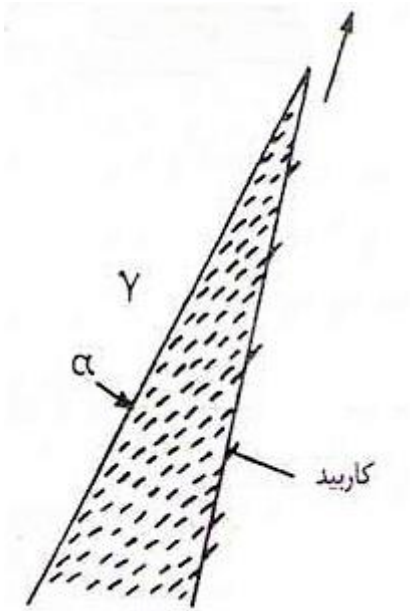


Adapted from Fig. 10.18, *Callister 7e*.
(Fig. 10.18 adapted from H. Boyer (Ed.) *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1997, p. 28.)

بینیت بالایی



بینیت پایینی

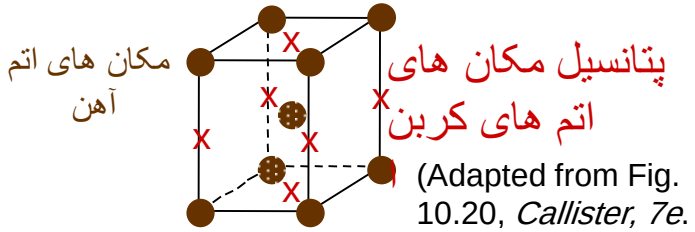


مارتنزیت در سیتم آهن- کربن

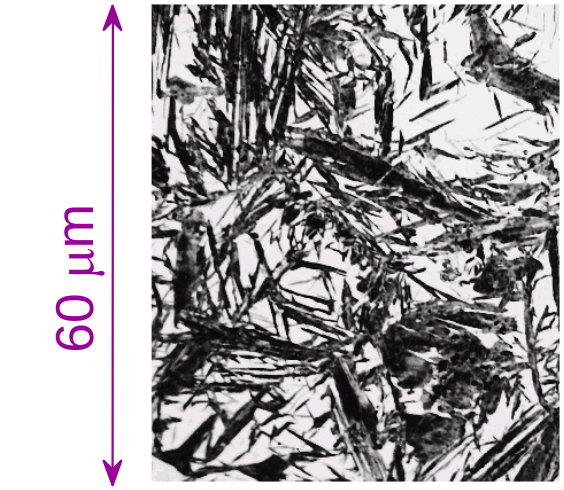
• مارتنزیت:

-- آستنیت (FCC) به مارتنزیت (BCT)

(involves single atom jumps)



(Adapted from Fig. 10.20, *Callister, 7e*.

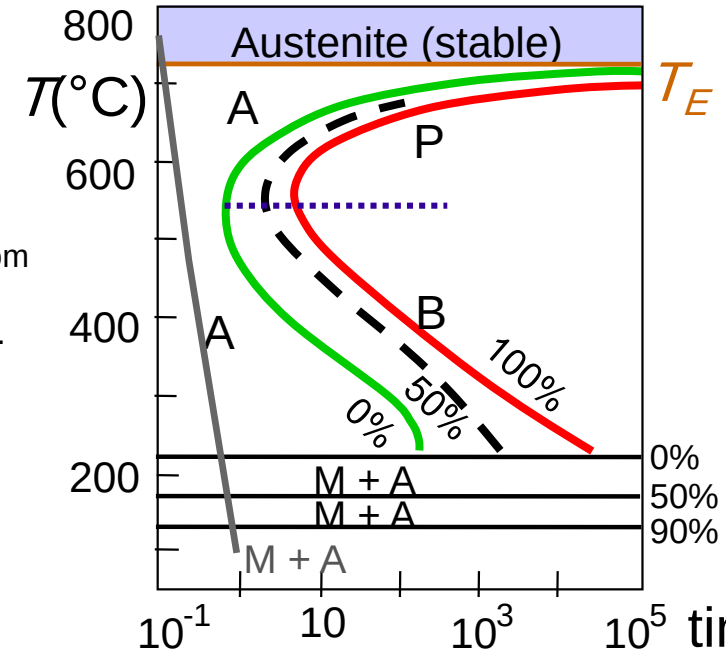


سوزن های مارتنزیتی

آستنیت

(Adapted from Fig. 10.21, *Callister, 7e*. (Fig. 10.21 courtesy United States Steel Corporation.)

دیاگرام انتقال هم دما



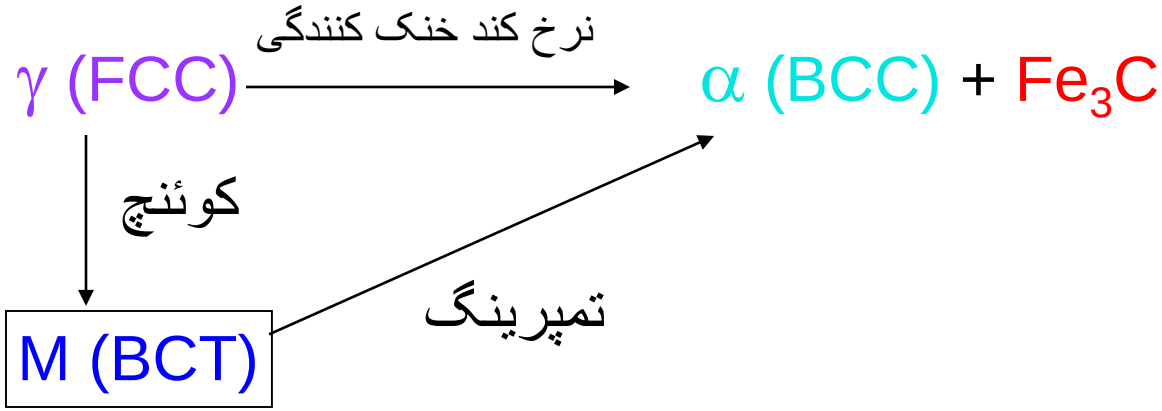
Adapted from Fig. 10.22, *Callister 7e*.

•انتقال آستنیت به مارتنزیت

-سریع هست

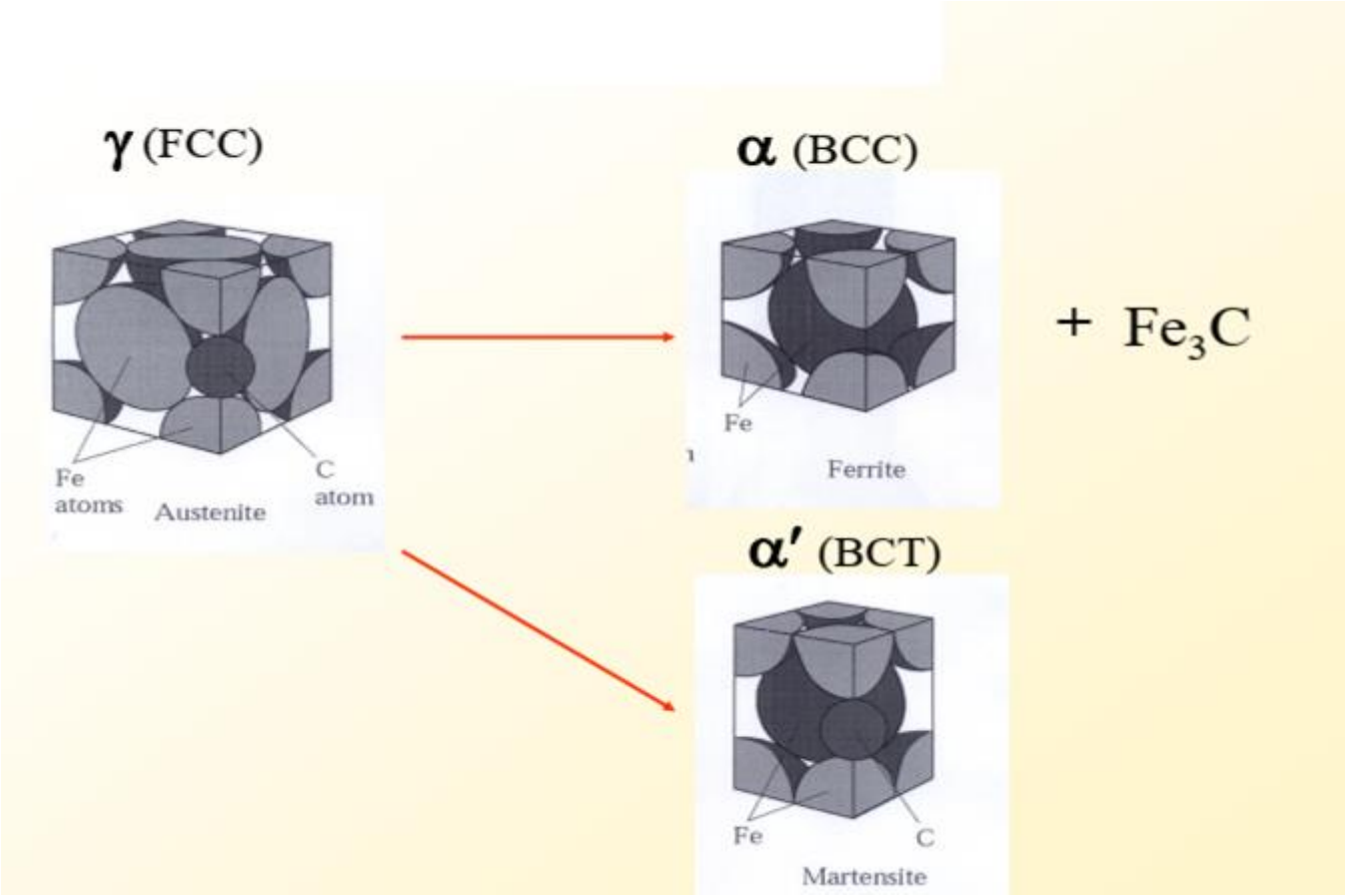
-درصد انتقال تنها به دما بستگی دارد.

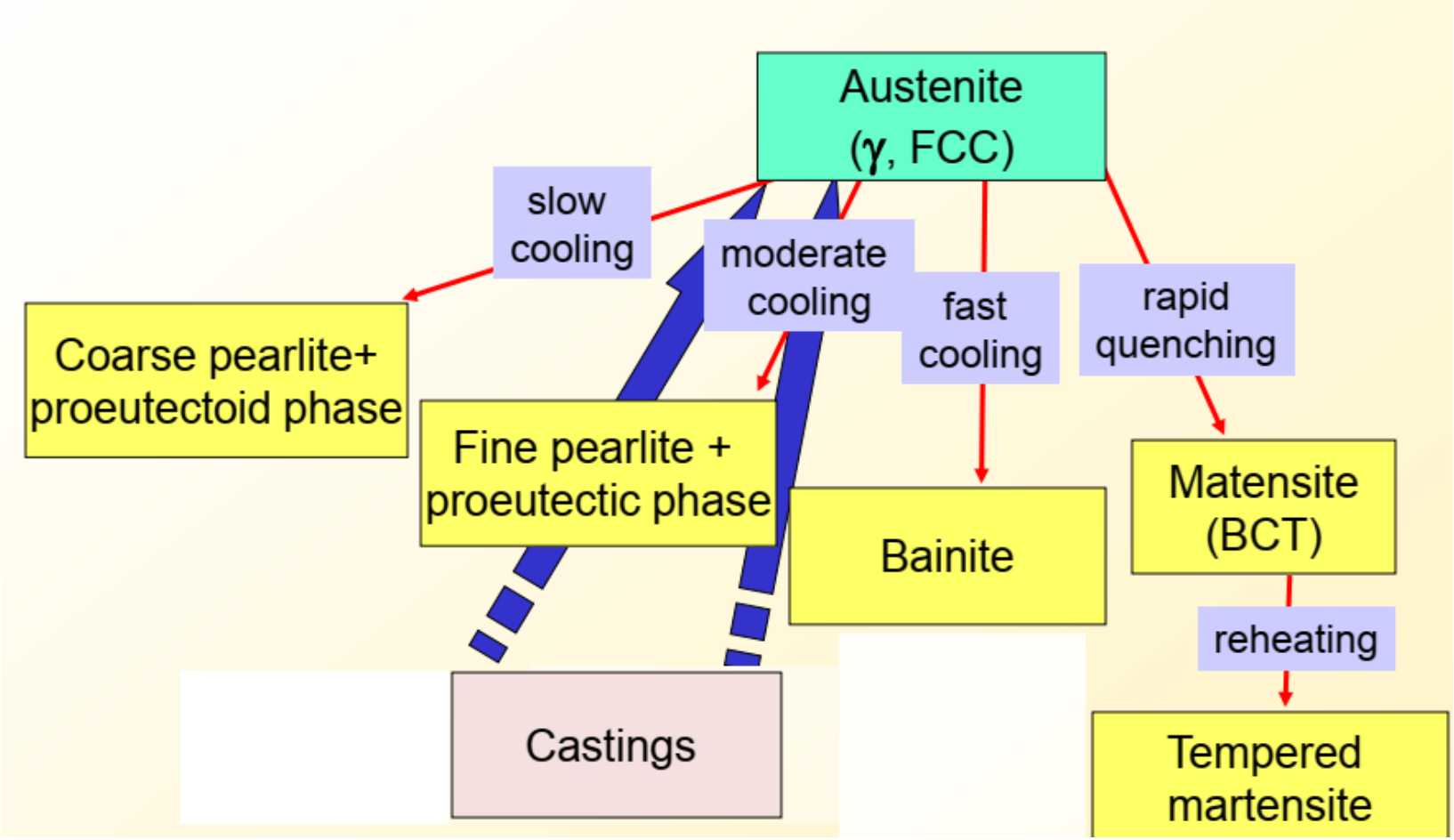
تشکیل مارتنزیت



مارتنزیت تتراگونال مرکزدار هست (BCT)

BCT → صفحات لغزش کم → سخت و ترد


γ (FCC)
Fe atoms
Austenite
C atom
α (BCC)
Fe
Ferrite
+ Fe_3C
α′ (BCT)
Fe
C
Martensite


Austenite
(γ, FCC)
slow
cooling
moderate
cooling
fast
cooling
rapid
quenching
Coarse pearlite+
proeutectoid phase
Fine pearlite +
proeutectic phase
Bainite
Matensite
(BCT)
reheating
Castings
Tempered
martensite

مساله

یک دیاگرام انتقال همدما برای دیاگرام آهن – کربن با درصد کربن ۰,۴۵ درصدوزنی منحنی دما زمانش به صورت زیر هست:

- ۴۲ درصد فریت پرویوتکتیک و ۵۸ درصد پرلیت بزرگ
- ۵۰درصد پرلیت ریز و ۵۰درصد بینیت
- ۱۰۰ درصد مارتنزیت
- ۵۰درصد مارتنزیت و ۵۰ درصد آستنیت

این انتقال ها در منحنی TTT نشان دهید؟

مثال هایی برای مساله C_o = 0.45 wt%

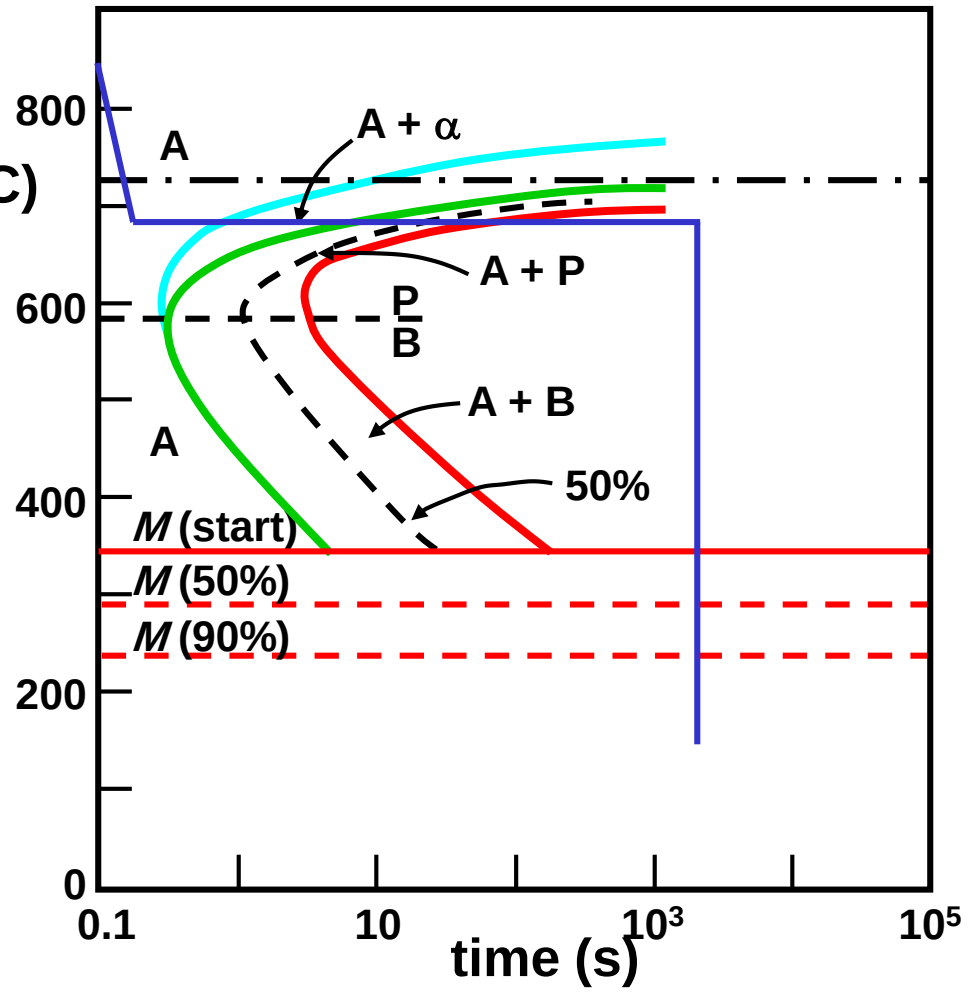
a) ۴۲ درصد فریت پرویوتکتیک و ۵۸ درصد پرلیت بزرگ

اول فریت می سازد

سپس پرلیت

پرلیت بزرگ در دماهای بالا

ایجاد می شود



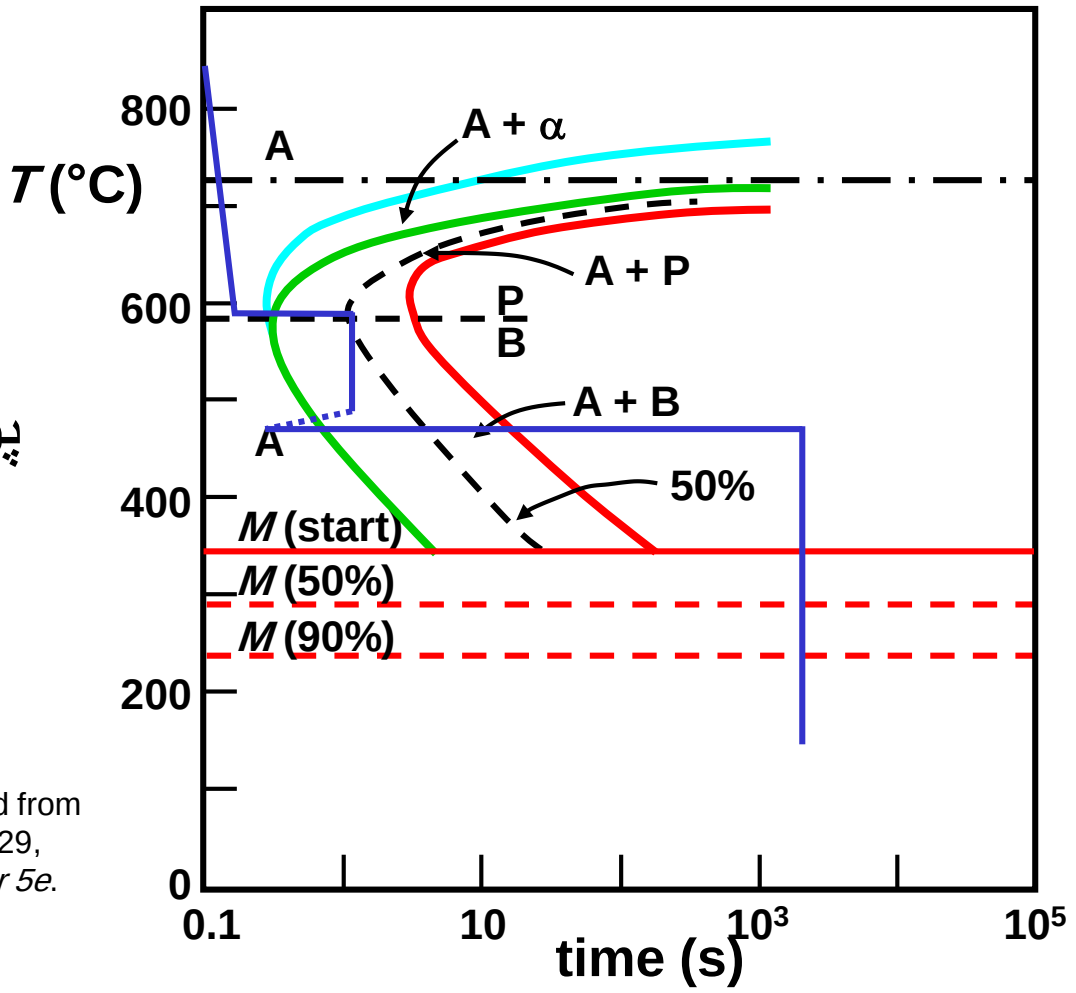
Adapted from Fig. 10.29, *Callister 5e*.

مثال هایی برای مساله C_o = 0.45 wt%

b) ۵۰ درصد پرلیت ریز و ۵۰درصد بینیت

اول پرلیت می سازد
و بعد بینیت

پرلیت ریز در دماهای
پایین ایجاد می شود

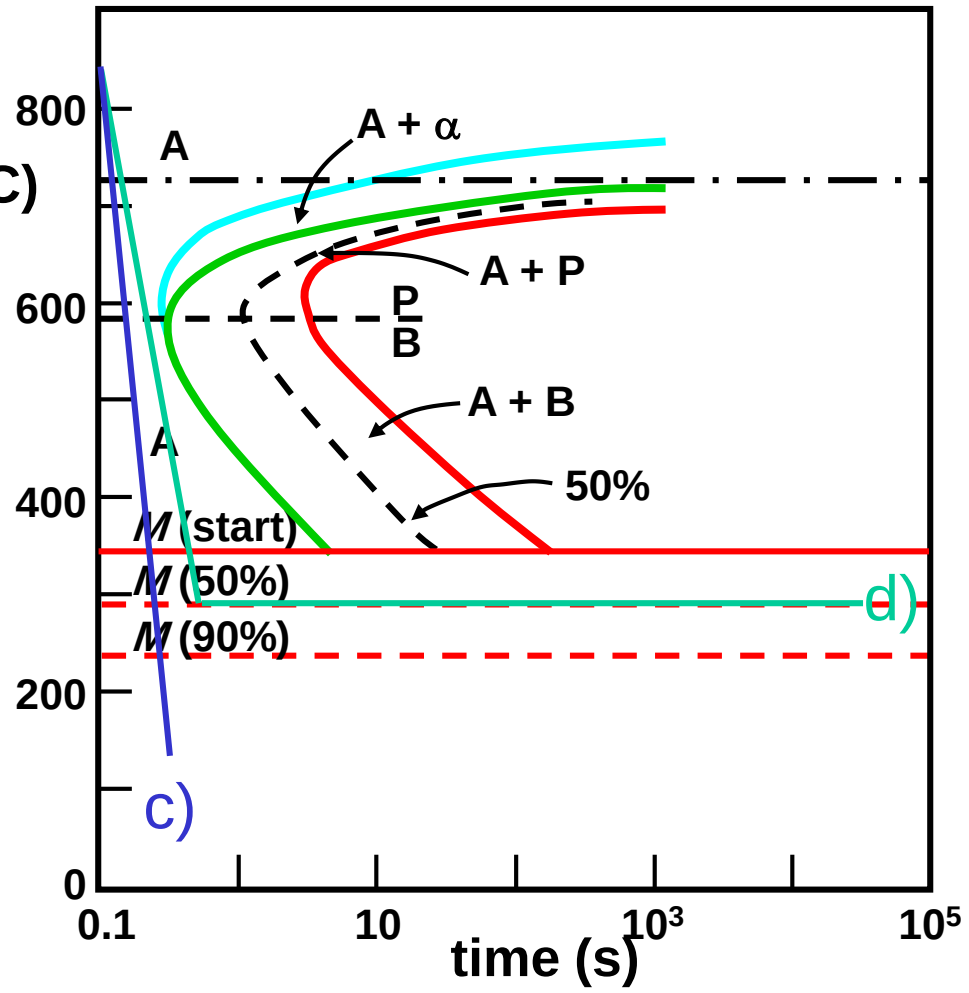


Adapted from
Fig. 10.29,
Callister 5e.

مثال هایی برای مساله C_o = 0.45 wt%

c) ۱۰۰ درصد مارتنزیت – کوئنچ= خنک کنندگی سریع

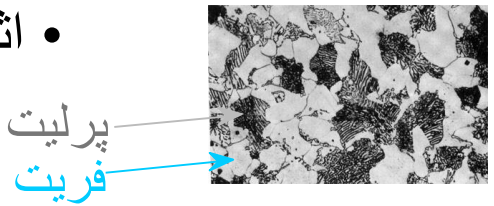
d) ۵۰ درصد مارتنزیت و ۵۰ درصد آستنیت



Adapted from Fig. 10.29, *Callister 5e*.

خواص مکانیکی: سیستم آهن- کربن

- اثر درصد کربن



$C_o < 0.76$ wt% C

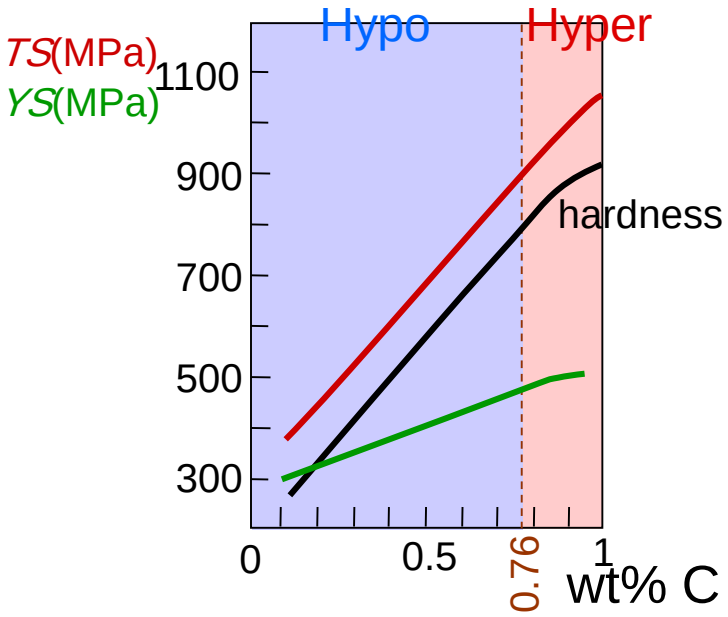
Hypoeutectoid

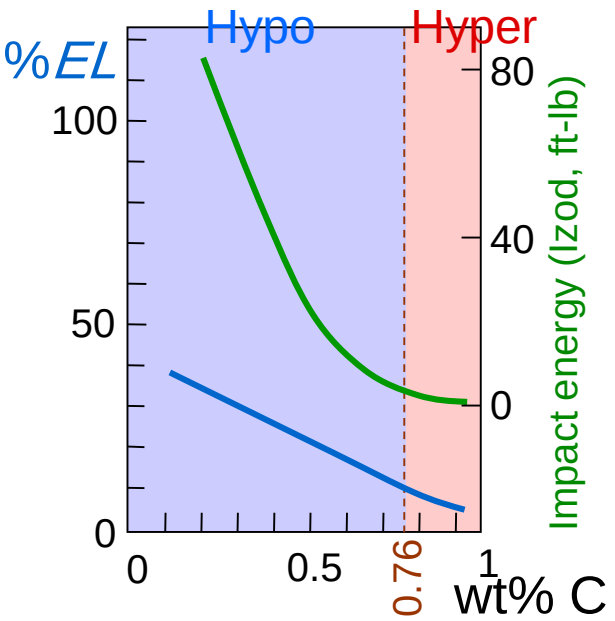
Adapted from Fig. 9.30, *Callister 7e*. (Fig. 9.30 courtesy Republic Steel Corporation.)

$C_o > 0.76$ wt% C

Hypereutectoid

Adapted from Fig. 9.33, *Callister 7e*. (Fig. 9.33 copyright 1971 by United States Steel Corporation.)



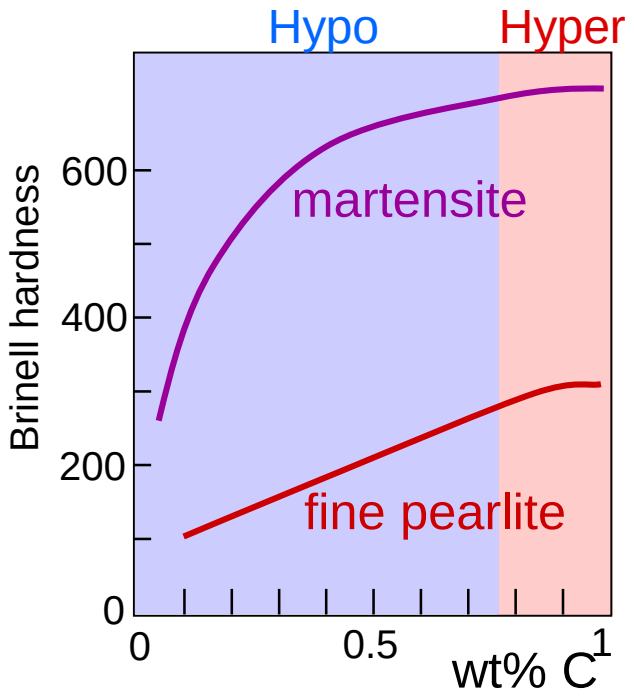


Adapted from Fig. 10.29, *Callister 7e*. (Fig. 10.29 based on data from *Metals Handbook: Heat Treating*, Vol. 4, 9th ed., V. Masseria (Managing Ed.), American Society for Metals, 1981, p. 9.)

- با افزایش درصد وزنی کربن استحکام کششی و تنش تسلیم افزایش می یابد ولی درصد ازدیاد طول کاهش می یابد

خواص مکانیکی: سیستم آهن- کربن

پرلیت ریز در مقابل مارتنزیت

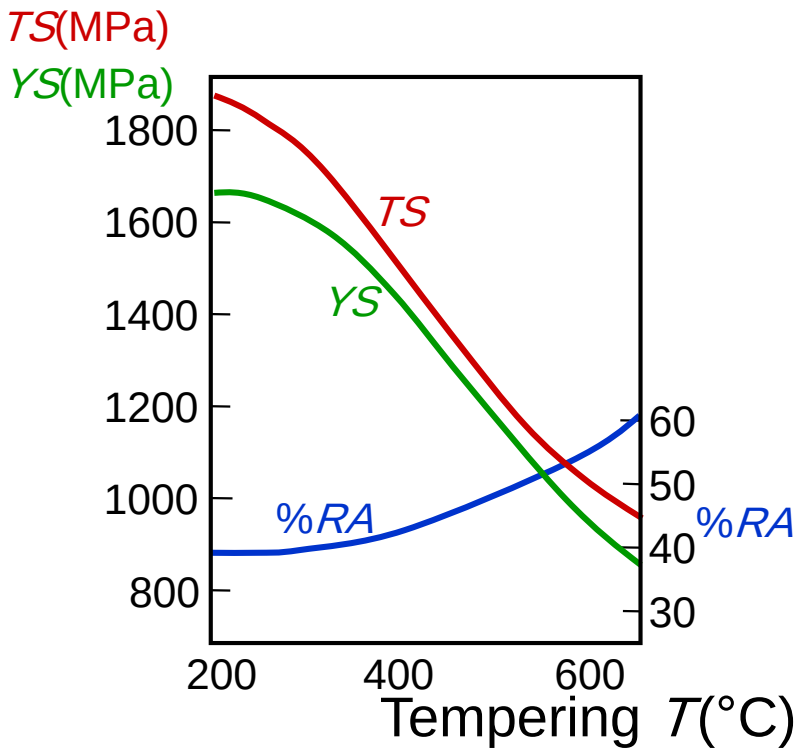


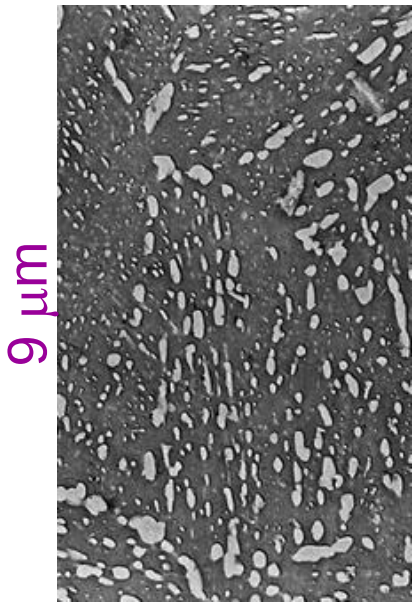
Adapted from Fig. 10.32, *Callister 7e*. (Fig. 10.32 adapted from Edgar C. Bain, *Functions of the Alloying Elements in Steel*, American Society for Metals, 1939, p. 36; and R.A. Grange, C.R. Hribal, and L.F. Porter, *Metall. Trans. A*, Vol. 8A, p. 1776.)

مارتنزیت >> پرلیت ریز **سختی**.

تمپرینگ مارتنزیت

- سختی مارتنزیت کاهش می دهد
- تنش های داخلی که به وسیله کوئنچ کردن ایجاد می شود را کاهش می دهد





Tempering یا برگشت دادن عبارت است از گرم کردن مجدد فولاد تا پایین تر از دمای استحاله یوتکتوئید (معمولا کمتر از ۷۰۰ درجه سانتی گراد)، نگهداری در این دما به مدت مشخص و سپس آهسته سرد کردن تا دمای محیط.

استحکام کششی و تنش تسلیم کاهش می یابد ولی ازدیاد طول افزایش می یابد