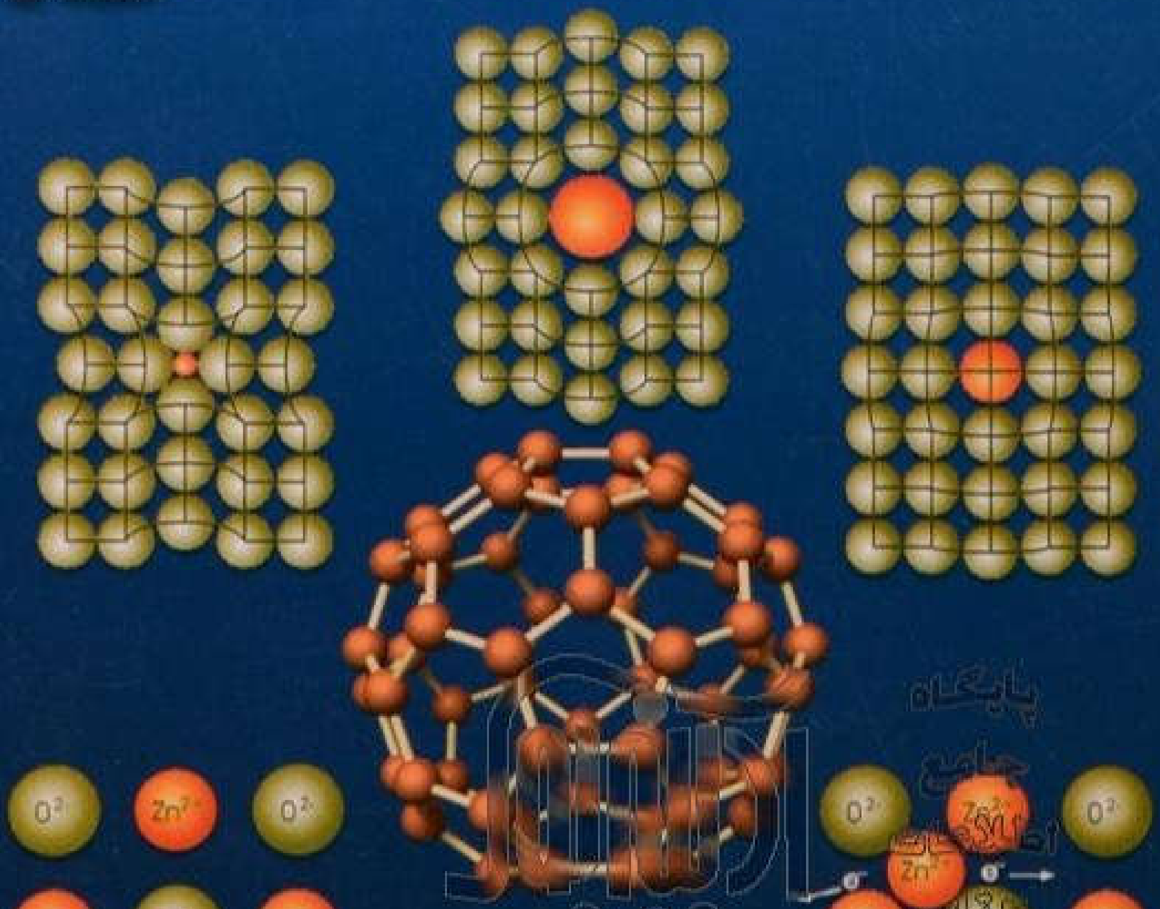
دانشگاه صنعتی اصفهان
مرکز نشر

اصول علم مواد

(ساختار، خواص و مهندسی مواد)

تألیف: حسین تویسرکانی

(ویرایش سوم)



پایگاه جامع اطلاعات کتاب
www.adinehbook.com

شابک: ۳-۴۵-۸۴۷۶-۹۶۴-۹۷۸

چاپ هجدهم

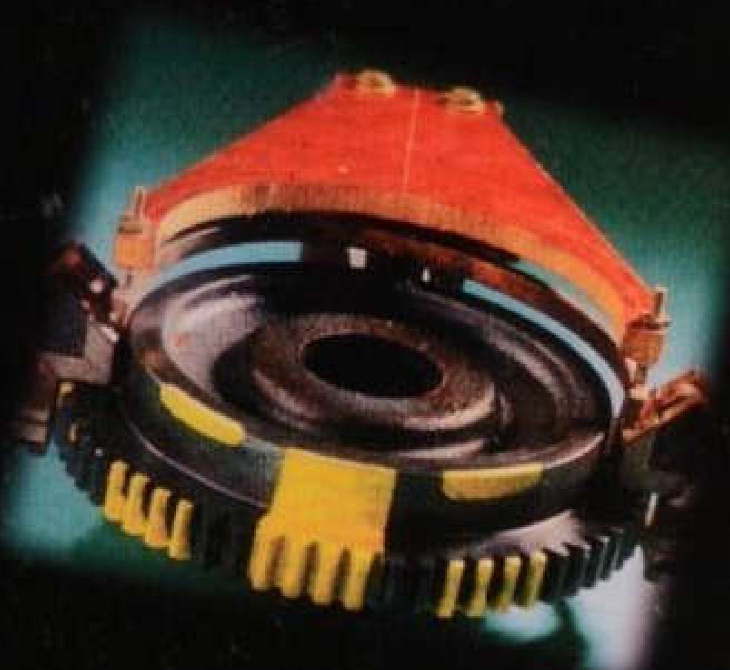
دانشگاه صنعتی اصفهان
مرکز نشر

اصول و کاربرد

عملیات حرارتی فولادها (ویرایش دوم)

پدیدآورنده: محمدعلی گلعذار

پایگاه جامع اطلاعات کتاب
www.adinehbook.com



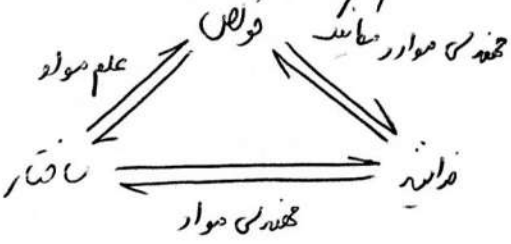
۲

چاپ شانزدهم

شابک: ۶-۷۳-۶۰۲۹-۹۶۴-۹۷۸

مقدمه‌ای بر عملیات حرارتی فولادها

- دسته‌بندی مواد جامد
  - فلز
    - خالص
    - آلیاژ
      - آهنی
        - فولادی Fe-C (کمتر از 2% کربن - معمولاً زیر 1%)
        - چدنی Fe-C (بیشتر از 2% کربن - کربن بیش از اشباع)
      - غیرآهنی
        - پایه Al آلومینیم
        - پایه Cu نظیر برنج ($\overset{\text{مس}}{Cu}$-$\overset{\text{روی}}{Zn}$)، برنز (مفرغ = $\underset{Cu}{\text{مس}}$-$\underset{Sn}{\text{قلع}}$)
        - پایه Co کبالت
        - پایه Ni نیکل
        - پایه Ti تیتانیم
        - پایه Mg منیزیم
        - پایه Zn روی
        - کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMC, Metal Matrix Composite)
  - غیرفلز
    - مواد ساختمانی و معدنی‌ها
    - مواد مهندسی
      - کامپوزیت‌ها
      - پلیمرها
        - الاستومرها
        - پلاستومرها
      - سرامیک‌ها
        - نسوز
        - شیشه
        - پیزوالکتریک
        - نیمه‌هادی
        - کاشی‌ها



* انواع پیوندهای اتمی در جامدات: یونی - کووالانسی - واندروالسی - فلزی - هیدروژنی

* ساختار اتمی جامدات
- با نظم: ساختار بلوری یا کریستالی ← اتم ها کاملاً دارای نظم و ترتیب خاص هستند یعنی در ترتیب که در هنگام انجماد با نظم و ترتیب خاص قرار می گیرند. فلزات و بسیاری از سرامیک ها در حالت انجماد دارای ساختار کریستالی (بلورین) هستند.
- بی نظم: ساختار آمورف یا بی شکل

↓

در مواد بی شکل (آمورف) قرارگرفتن اتم ها در هنگام انجماد تقریباً بدون نظم و ترتیب است. این نوع ساختار در موادی مانند شیشه، بسیاری از پلاستیک ها، الاستومرها (لاستیک ها) وجود دارد و به نام ساختار شیشه ای معروف است.

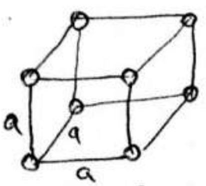
* در مواد جامد کریستالی اتم ها هنگام انجماد با نظم و ترتیب و شکل هندسی خاص قرار می گیرند به طوری که یک شبکه فضایی را به وجود می آورند که به صورت متناوب در تمام جهات تا سطح خارجی کریستال تکرار می شود. کوچکترین واحد از این شبکه فضایی را شبکه واحد یا سلول واحد (Unit cell) می نامند.

* سلول واحد که چگونگی قرارگرفتن اتم ها یا یون ها را نسبت به یکدیگر نشان می دهد می تواند از یک یا چند اتم تشکیل شده باشد سپس با تکرار متناوب سلول های واحد در یک شبکه فضایی با مختصات معینی به صورت متراکم در کنار یکدیگر یک کریستال (crystall) یا دانه (grain) به وجود می آید.

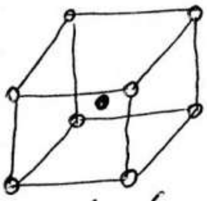
* در علم کریستال شناسی یا کریستالوگرافی، ۱۴ نوع شبکه فضایی واحد با تقارن زیاد برای بلورها (کریستال ها) تشخیص داده شده است که می توان آنها را به هفت سیستم تقسیم بندی کرد.

۷ سیستم - ۱۴ نوع شبکه

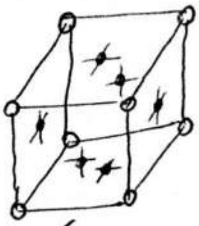
|1|
مکعب



مکعب ساده

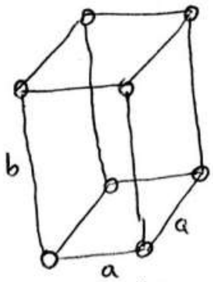


مکعب مرکزدار BCC
Body center Cubic

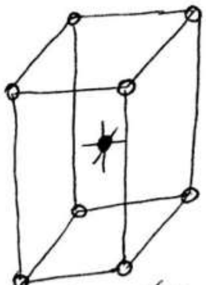


مکعب با وجوه مرکزدار FCC
Face Center Cubic

|2|
تتراگونال

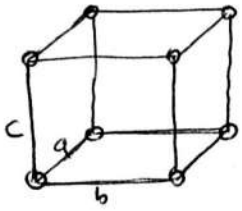


تتراگونال ساده

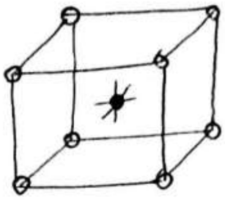


تتراگونال مرکزدار

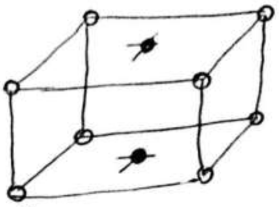
|3|
مکعب مستطیل



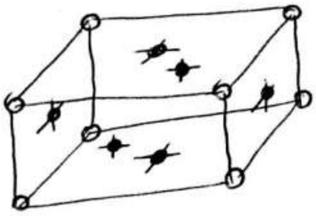
اورتورومبیک ساده



اورتورومبیک مرکزدار

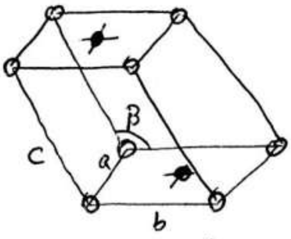


اورتورومبیک با دو وجه مرکزدار

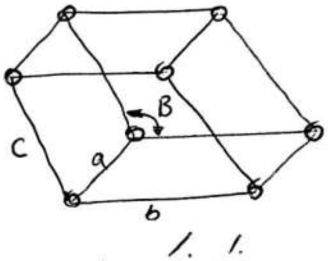


اورتورومبیک با وجوه مرکزدار

|4|
مونوکلینیک

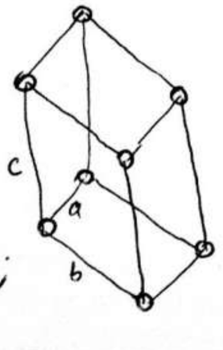


مونوکلینیک با قاعده مرکزدار



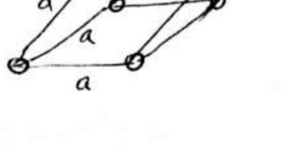
مونوکلینیک ساده

زوایای غیر ۹۰



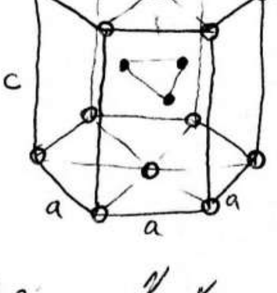
تری‌کلینیک

|5|



رومبوهدرال

|6|



با و بدون
اتم‌های میانی

هگزاگونال یا منشور شش وجهی
HCP
Hexagonal Closest Packed

|7|

آلومینیوم Al ← FCC

آرسنیک As ← رومبوهدرال

آنتیموان Sb ← 〃

اورانیوم U ← اورتورومبیک

آهن α ← BCC

آهن γ ← FCC

آهن δ ← BCC

باریم Ba ← BCC

بور B ← اورتورومبیک

بریلیم Be ← HCP

بیسموت Bi ← رومبوهدرال

پالادیم Pd ← FCC

پتاسیم K ← BCC

پلاتین Pt ← FCC

تانتالیم Ta ← BCC

تنگستن W ← BCC

تیتانیوم Ti ← HCP

روی Zn ← HCP

زیرکونیوم Zr ← HCP

ژرمانیوم Ge ← مکعب الماسی

سدیم Na ← BCC

سرب Pb ← FCC

سیلیسیم Si ← مکعب الماسی

طلا Au ← FCC

فسفر P ← اورتورومبیک

کادمیم Cd ← HCP (تغییر در درجه حرارت‌ها مختلف)

کبالت Co ← HCP (تغییر در درجه حرارت مختلف)

قلع خاکستری ۱۸°C Sn ← مکعب الماسی

قلع سفید 20°C Sn ← تتراگونال

کربن (گرافیت) C ← هگزاگونال

کربن (الماس) C ← مکعب الماسی

کروم Cr ← BCC

گوگرد S ← اورتورومبیک

لیتیوم Li ← BCC

مس Cu ← FCC

مولیبدن Mo ← BCC

منگنز Mn ← مکعبی

منیزیم Mg ← HCP

نیکل Ni ← FCC

نقره Ag ← FCC

نایوبیوم Nb ← BCC

وانادیم V ← BCC

عیوب شبکه کریستالی
Crystallographic defects

- [1] عیوب نقطه‌ای (عیوب بی بعد) Point Defects
  - [1] عیوب جای خالی — Vacancy Defect
  - [2] عیوب شاتکی — Schottky Defect
  - [3] عیوب بین نشینی — Interstitial Defect
  - [4] عیوب جانشینی — Substitutional Defect
  - [5] عیوب فرانکل — Frenkel Defect
- [2] عیوب خطی (عیوب تک بعدی) Line Defects (Dislocations)
  - [1] نابجایی لبه‌ای یا خطی — Edge Dislocations
  - [2] نابجایی پیچی — Screw "
  - [3] نابجایی مرکب — Mixed "
- [3] عیوب صفحه‌ای (عیوب دوبعدی) Planer or Area Defects
  - [1] عیوب لایه‌ای — stacking Fault
  - [2] مرزدانه‌ها — Grain Boundaries
  - [3] دوقلویی ها — twins "
- [4] عیوب فضایی (عیوب سه بعدی) Bulk or Volume Defects ← شامل ترک، منافذ، فاز ثانویه، رسوب و...

---

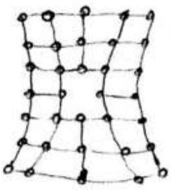
* از نظر کریستالوگرافی، کریستالی که دارای ساختار شبکه ای کاملاً منظم از تکرار سلول واحد باشد کریستال ایده‌آل نامیده می شود. اما چنین کریستالی در طبیعت به ندرت یافت می شود.

* عیوب در اغلب حالات در اثر عوامل خارجی نظیر رشد غلط کریستال ها، انجماد سریع و یا تغییر شکل پلاستیکی به وجود می آیند

* خواصی که به شدت تحت تأثیر عیوب شبکه ای قرار دارند شامل:

1- پیوستگی و استحکام فلزات
2- هدایت الکتریکی نیمه‌هادی ها
3- پسماند مغناطیسی در مغناطیس های دائمی
4- هدایت الکتریکی سوپرهادی ها
5- استحکام در مقابل دما و فشارهای بالا
6- قابلیت هدایت حرارتی مواد دی‌الکتریک کریستالی در دماهای پایین

توجه
[1] → in thermo-dynamic equilibrium
[2,3,4] → in thermo-dynamic non-equilibrium

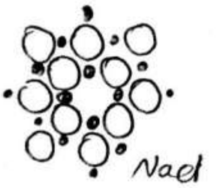


عیوب جای خالی ← وجود محل های خالی اتم ها در شبکه کریستالی

Vacancy Defect

نحوه ی ایجاد: ۱- انجماد (سرد کردن با سرعت زیاد از مذاب)

- تغییر شکل
- اشعه دادن با اشعه ای که دارای انرژی زیاد است
- در حرارت های بالا (ارتعاشات زیاد اتم ها)



عیوب شاتکی ← در کریستال های با پیوندهای یونی یافت می شود.

Schottky Defects

محل خالی آنیونی یا کاتیونی در کریستال های با پیوند یونی

هرگاه یک یا چند بار الکتریکی مفقود شده یا زیادی موجود باشد در این حالت یک محل خالی آنیونی یا به طور متقابل کاتیونی

عیوب بین نشینی ← قرار گرفتن یک اتم در فضای موجود بین اتم های شبکه

Interstitial Defect

شرط اصلی: به اندازه کافی کوچکتر بودن شعاع اتمی اتم ثالث نسبت به اتم های اصلی شبکه

نظیر قرار گرفتن اتم های کربن در FCC آهن

این عیب باعث کجی یا تغییر شکل موضعی در ساختار شبکه کریستالی می شود

نظیر اتم های کوچک H ، C ، N ، B (بور) ، P ، ...

عیوب جانشینی ← قرار گیری اتم های ناخالصی در محل های خالی جای اتم های شبکه یا در فضای موجود بین اتم های شبکه

Substitutional Defect

(شعاع اتم جانشین تقریباً اندازه شعاع اتم های اصلی)

(بزرگتر یا کوچکتر از شعاع اتم اصلی)

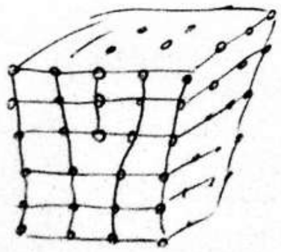
عیب فرانکل ← عیب جابجایی / وجود یک محل خالی همراه با یک عیب بین نشینی در یک شبکه کریستالی

Frenkel Defect

نابجایی لبه ای یا خطی ← * عیوبی که در امتداد یک خط در شبکه دیده می شوند.

* از حیث هندسی انتهای یک نیم صفحه اضافی که در بین دو صفحه اتمی از یک شبکه قرار گرفته

یا عدم وجود یک قسمت از یک صفحه اتمی در شبکه کریستالی

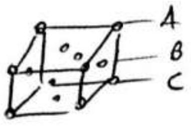


نابجایی پیچی ← دو قسمت از یک شبکه کریستالی در جهت مخالف هم روی یکدیگر لغزیده است.

نابجایی مختلط ← به هم پیوستن نابجایی های لبه ای و پیچی به یکدیگر

عیوب لایه ای ← قرار گرفتن بدون نظم در ترتیب صفحات اتمی بر روی یکدیگر به طوری که در قسمتی از کریستال یکی از لایه ها وجود ندارد.

مثلاً در FCC



ABCABCABC ... منظم

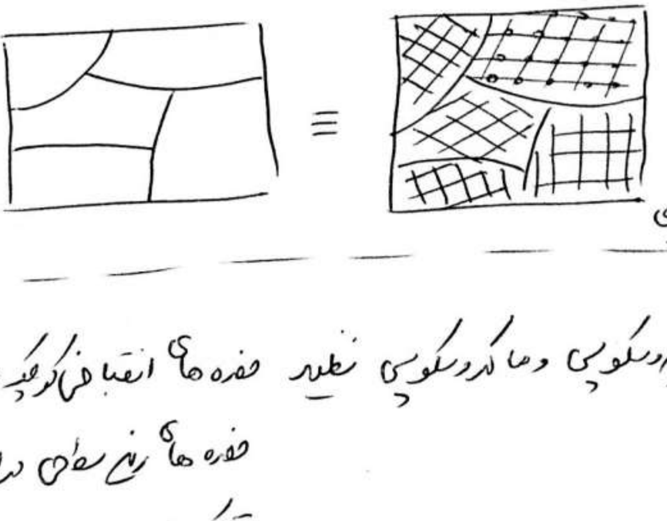
ABC BC ABC ... نامنظم (A ندارد)

مرز دانه ها ← تمام مواد شامل تعداد زیادی بلورند یا چند کریستال اند در جهت گیری آرایش اتمی یا شبکه کریستالی

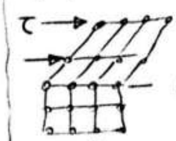
Polycrystal

در دانه های که کنار یکدیگر قرار گرفته اند متفاوت است. هر یک از دانه ها با مرزهایی از دانه های مجاورش جدا شود شکل مرز دانه ها را نمایان می سازد

– نوع شبکه هر دانه یکسان است ولی جهت گیری شبکه ها متفاوت است.



دوقلویی ها ← تغییر جهت کریستال نسبت به



احتمال تشکیل دوقلوی HCP > BCC > FCC

عیوب فضایی ← فضاهای خالی میکروسکوپی و ماکروسکوپی نظیر حفره های انقباضی که حفره داخلی

حفره هایی که راه به سطح ندارند خروج گازها

ترک های مویی

نکته ۱ – مرز دانه ها در کریستالیزاسیون یا هنگام انجماد به وجود می آیند.

نکته ۲ – نابجایی ها در موقع تغییر شکل پلاستیکی به وجود می آیند.

نکته ۳ – عیوب ساده جای خالی می توانند در حالت تعادل ولی کمی به وجود آیند.

نکته ۴ – بقیه عیوب شبکه ای از لحاظ ترمودینامیکی در حالت تعادل نیستند و تحت تأثیر عوامل خارجی تشکیل می شوند

اصول عملیات حرارتی

Processing → Microstructure → properties → Performance

عملیات (حرارتی) | ریز ساختار | خواص | عملکرد (کارایی)

تعریف عملیات حرارتی: به مجموعه ای از سیکل های گرم کردن و سرد کردن قطعه به منظور ایجاد ساختار مورد نظر عملیات حرارتی می گویند. محدوده ی گرم کردن زیر دمای ذوب است.

Metal alloys

- Ferrous, آهنی
  - steels, فولادها — $< 1.4\ \%C$
  - Cast irons, چدن‌ها — $3-4.5\ \%C$
- Nonferrous, غیرآهنی
  - نظیر Ti, Mg, Al, Cu, ...

آلیاژهای آهن - کربن:

آهن $C < 0.1\%$

فولاد $0.1\% < C < 1.5(2\%)$ معمولاً زیر 1% کربن

چدن $2\% < C < 4.5(6\%)$

* کاربرد وسیع فولادها ناشی از خواص کاملاً متنوع آنهاست که به کمک تغییر درصد کربن، تغییر درصد عناصر آلیاژی و تغییر نوع عملیات حرارتی امکان پذیر است.

* تمام روش های عملیات حرارتی فولادها بر اساس نمودار تعادلی آهن - کربن انجام می شود که به صورت تجربی رسم شده است.

دیاگرام آهن - کربن

① خط ممتد (تعادلی) (آهن و سمانتیت Fe_3C) → مناسب برای فولادها

② خط چین (غیرتعادلی) (آهن گرافیت) یا کربن آزاد → مناسب برای چدن ها

توجه! گرافیت حالتی از کربن است که بسیار پایدارتر از سمانتیت می باشد در صورتی که به سمانتیت فرصت داده شود تا به گرافیت تجزیه می شود. اما از آنجا که در فولادها گرافیت زایی به کندی انجام می شود به همین دلیل نمودار آهن - سمانتیت جهت مطالعه و بررسی عملیات حرارتی فولادها مناسب تر است. در چدن ها وجود مقادیر کربن و Si نسبتاً بالاتر تجزیه سمانتیت و تشکیل گرافیت

را تقویت می‌کند. لذا ساختار چدن‌ها بیشتر بر اساس نمودار آهن - گرافیت استوار است.

توجه ۲ - نمودار آهن - کربن در فشار یک اتمسفر صادق است.

* دیاگرام آهن - کربن تعادلی و غیرتعادلی نمایش داده شود *

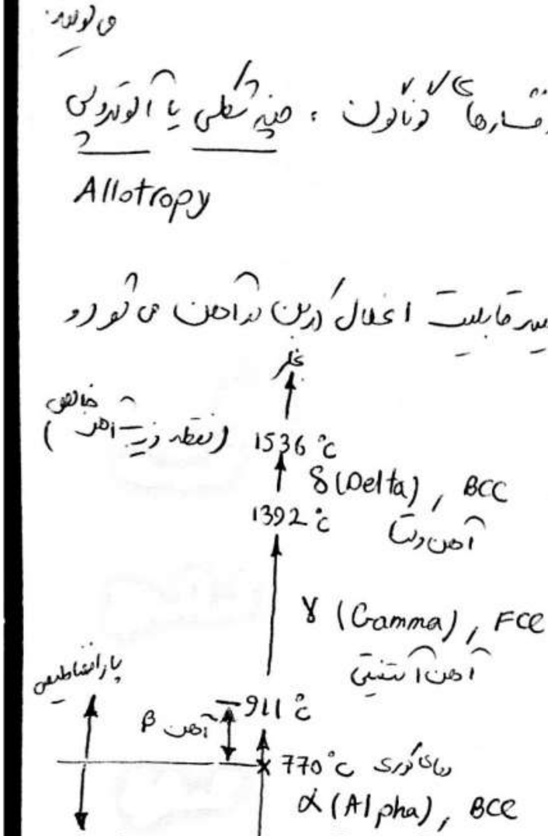
— تغییر و تبدیل فاز در جامدات

* به پدیده‌ی ظاهر شدن یک فلز به صورت شبکه‌های کریستالی گوناگون در دماها و فشارهای گوناگون : چندشکلی یا آلوتروپی Allotropy می‌گویند

این تغییرات با حرارت دادن و سرد کردن قابل بازگشت است.

* آهن یکی از عناصری است که پدیده آلوتروپی دارد و همین موضوع منجر به تغییر قابلیت انحلال کربن در آهن می‌شود و عملیات حرارتی گوناگون در ترکیبات گوناگونی از آهن - کربن به وجود می‌آورد.

* آهن بالای دمای کوری (770 °c) : پارامغناطیس
آهن پایین دمای کوری (770 °c) : فرومغناطیس (خاصیت آهن‌ربایی)


مذاب
(نقطه ذوب آهن خالص)
1536 °c
δ (Delta), BCC
آهن دلتا
ابعاد بزرگتر از α
1392 °c
γ (Gamma), FCC
آهن آستنیتی
پارامغناطیس
911 °c
آهن β
770 °c
دمای کوری
α (Alpha), BCC
آهن فریتی
فرومغناطیس
-273 °c

تفسیر دیاگرام آهن - کاربید آهن Fe_3C

توجه - در فولادهای پرکربن با حرارت دادن از مقدار سمانتیت Fe_3C کاسته شده و به گرافیت افزوده می‌شود ولی در فولادهای کم‌کربن تمایل به تشکیل کربن آزاد (گرافیت) بسیار کم است.

توجه - حلالیت کربن در آهن به شکل شبکه کریستالی و درجه حرارت بستگی دارد.

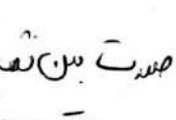
حلالیت کربن در آهن

$\gamma(FCC) > \alpha(BCC)$

911 - 1392 °c   -273 - 911 °c

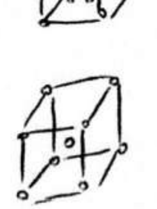
توجه - اتم کربن به صورت بین‌نشینی در کریستال مکعبی فلزی قرار می‌گیرد به این صورت که در آهن

γ (FCC)



قرارگیری اتم کربن در وسط مکعب و وسط اضلاع مکعب

α (BCC)

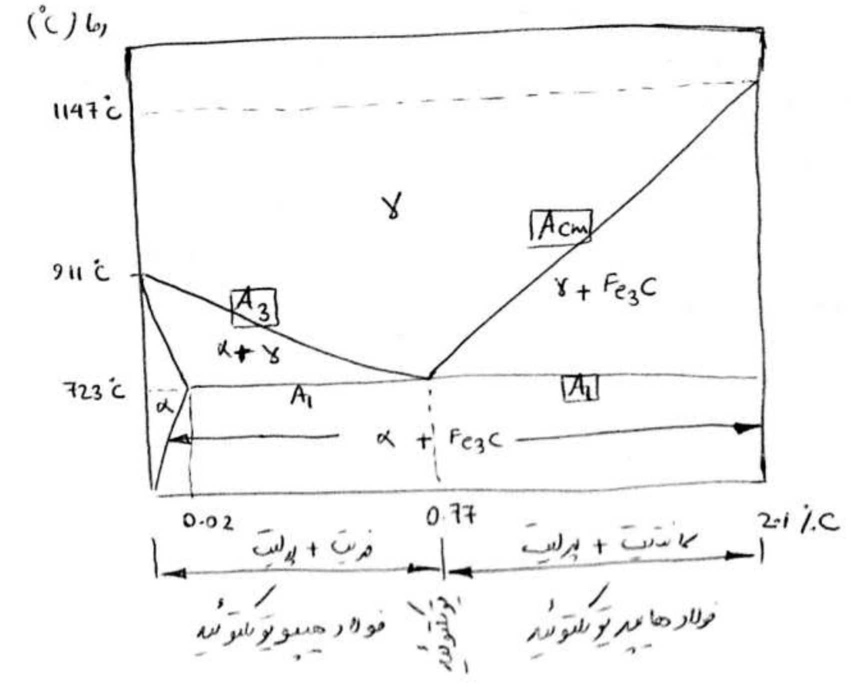


قرارگیری اتم کربن در وسط وجوه مکعب

Fe_3C

توجه - سمانتیت هنگامی به وجود می‌آید که کربن فولاد بیشتر از حلالیت کربن در فریت و یا آستنیت باشد.

دیاگرام آهن - کربن در محدوده‌ی فولادها


دما (℃)
1147℃
911℃
723℃
γ
Acm
γ + Fe3C
A3
α + γ
A1
A1
α
α + Fe3C
0.02
0.77
2.1 %C
فریت + پرلیت
سمانتیت + پرلیت
فولاد هیپویوتکتوئید
یوتکتوئید
فولادهای هایپریوتکتوئید

γ : آستنیت

α : فریت

Fe_3C : سمانتیت یا کاربید آهن

$\alpha + Fe_3C$: پرلیت

$\gamma + Fe_3C$: لدبوریت

آستنیت : محلول جامد بین نشینی کربن در آهن با شبکه بلوری FCC
حداکثر حلالیت کربن در آستنیت در ℃ 1147 است که به 2.1٪ می‌رسد.

فریت : محلول جامد بین نشینی کربن در آهن با شبکه بلوری BCC
حد حلالیت کربن در فریت در ℃ 727 است که 0.02٪ می‌رسد.

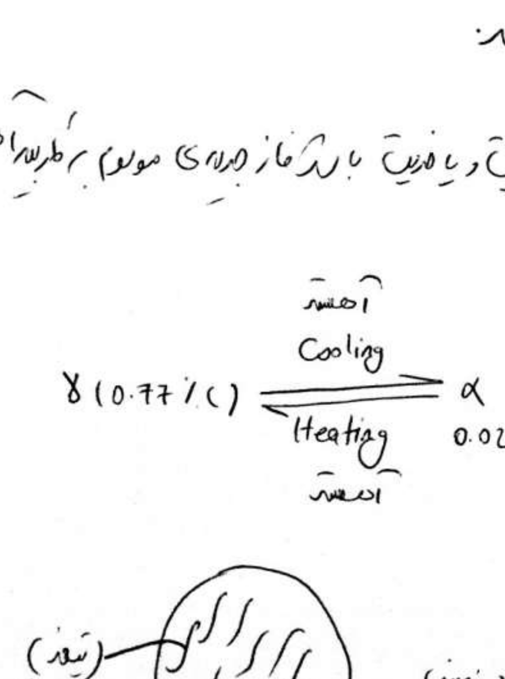
سمانتیت : در صورتی که درصد کربن در فولادها بیشتر از حلالیت آن در آستنیت و یا فریت باشد فاز جدیدی موسوم به کاربید آهن یا سمانتیت به وجود می‌آید.

پرلیت : پرلیت لایه‌های یکی در میان فریت و سمانتیت است.

$$\gamma\,(0.77\%C) \underset{\underset{\text{آهسته}}{\text{Heating}}}{\overset{\overset{\text{آهسته}}{\text{Cooling}}}{\rightleftharpoons}} \underset{0.02\%C}{\alpha} + \underset{6.67\%C}{Fe_3C}$$

جوانه‌زنی سمانتیت در مناطق غنی از کربن

جوانه‌زنی فریت در مناطق فقیر از کربن


(تیغه)
Fe3C
(زمینه)
فریت

* دماهای بحرانی

$\gamma - Fe_3C$ $\gamma - \alpha$ $Fe_3C - \alpha$

A_1 : مرز ناحیه دوفازی فریت - سمانتیت و یکی از نواحی دوفازی فریت - آستنیت و یا سمانتیت - آستنیت

γ $\gamma - \alpha$

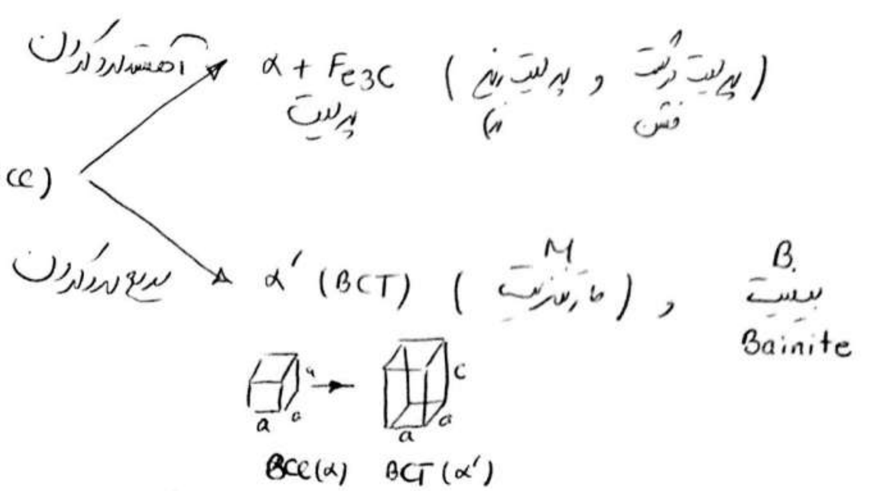
A_3 : فصل مشترک ناحیه دوفازی فریت - آستنیت و ناحیه تک فازی آستنیت

γ $\gamma - Fe_3C$

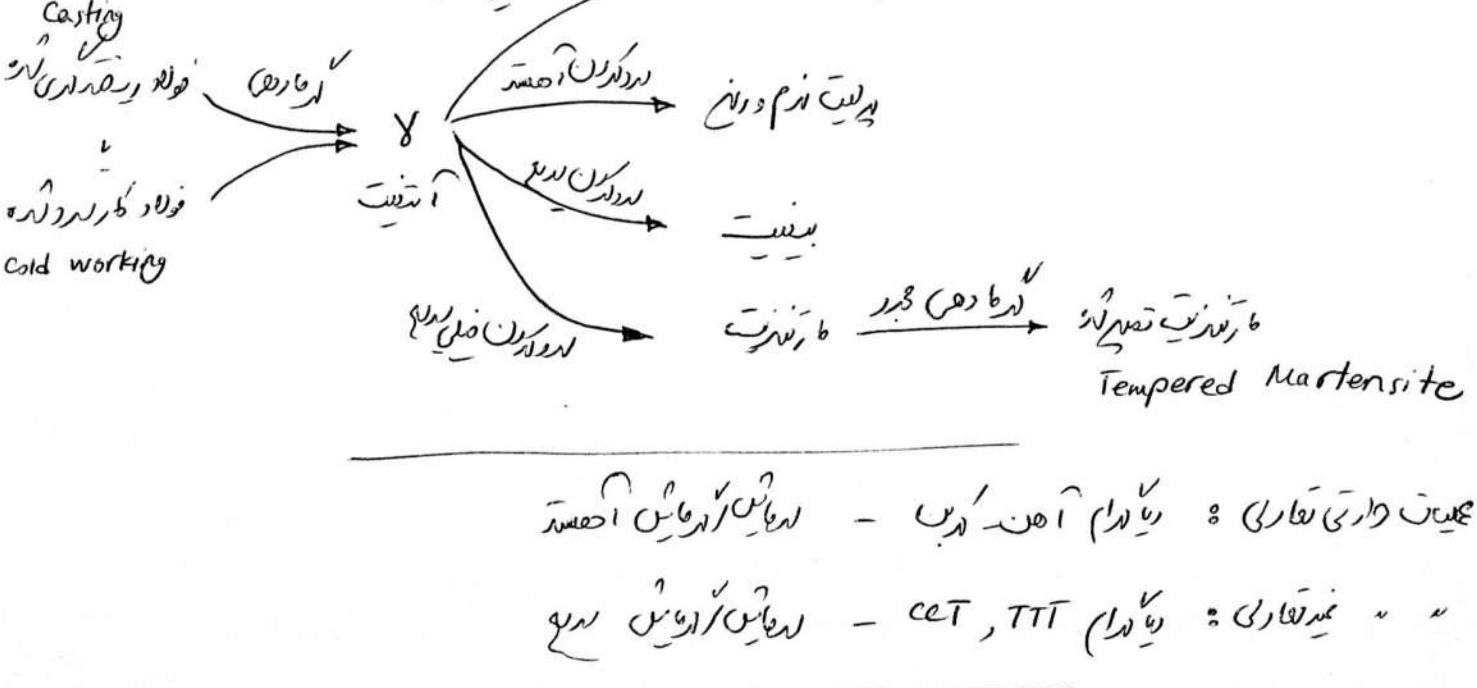
A_{cm} : فصل مشترک بین ناحیه دوفازی سمانتیت - آستنیت و ناحیه تکفازی آستنیت.

توجه - دماهای یادشده تبدیل یک فاز به فاز دیگر را در شرایط تعادلی یعنی تحت گرمایش - سرمایش بسیار آهسته مشخص می کنند

تغییر حالت آستنیت



γ (FCC)
آهسته سرد کردن
α + Fe3C
پرلیت
(پرلیت درشت و پرلیت ریز)
خشن
نرم
سریع سرد کردن
α′ (BCT)
(مارتنزیت)
M
و
بینیت
B.
Bainite
a
c
BCC(α)
BCT(α′)



Casting
فولاد ریختگری شده
یا
فولاد کار سرد شده
Cold working
گرمادهی
γ
آستنیت
سرد کردن خیلی آهسته
پرلیت خشن و درشت
سرد کردن آهسته
پرلیت نرم و ریز
سرد کردن سریع
بینیت
سرد کردن خیلی سریع
مارتنزیت
گرمادهی مجدد
مارتنزیت تمپر شده
Tempered Martensite

عملیات حرارتی تعادلی : دیاگرام آهن - کربن - سرمایش گرمایش آهسته

" " غیرتعادلی : دیاگرام TTT , CCT - سرمایش گرمایش سریع

نکته - ترکیب شیمیایی، ساختار اولیه، دما آنیل و زمان نگهداری از عوامل کنترل کننده ساختار میکروسکوپی و در نهایت خواص مکانیکی هستند

انواع عملیات حرارتی تعادلی : (Equilibrium Heat Treatment)

1- همگن کردن Homogenizing

2- آنیل کردن Annealing
- آنیل کامل Full Ann
- آنیل همدما Isothermal Ann
- آنیل جزئی Partial Ann

3- نرماله یا نرمالیزه کردن Normaliting

4- کروی کردن Spherodizing

5- تنش گیری stress relieving

اهداف عملیات حرارتی تعادلی : - افزایش انعطاف پذیری

- ایجاد یکنواختی در ساختار میکروسکوپی
- بهبود قابلیت ماشین کاری
- کاهش تنش‌های داخلی و تنش‌های بجامانده از عملیات قبلی تولید
- افزایش استحکام
- افزایش خواص مکانیکی مختلف

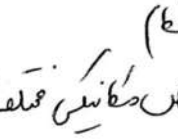
1- همگن کردن

همگن سازی ساختار دانه‌بندی و ترکیب شیمیایی (یکنواخت سازی) قطعات ریختگی

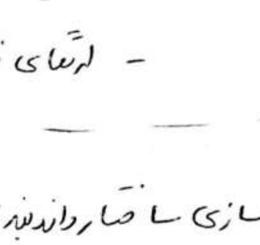
پس زدن ناخالصی

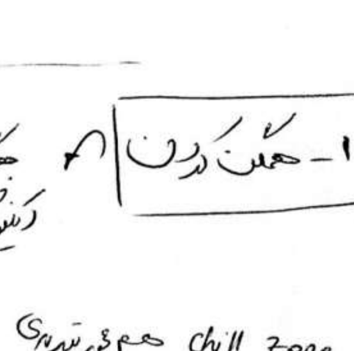
پس زدن اتم‌های عنصر به سمت داخل مذاب

در نتیجه خلوص از دیواره به سمت داخل



مذاب - با خلوص پایین‌تر

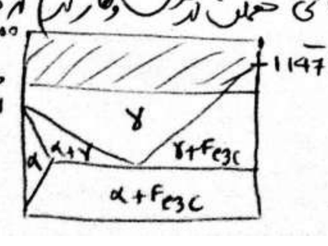



هم محور تبریدی Chill zone
Equiaxe zone هم محور مرکزی
Columnar Zone هم محور ستونی

همگن کردن |
1000-1200 °C
نگهداری طولانی مدت در این دما
سرد کردن آهسته تا دمای محیط

- تفاوت در اندازه دانه‌ها
- یکسان بودن شکل دانه‌ها

توجه - گستره دمای همگن کردن و کارگرم بر هم منطبق است.


1200
1000
911
1147 °C
γ
α
α+γ
γ+Fe3C
α+Fe3C

در همگن کردن قطعات مورد نظر را در دمای نسبتاً بالا برای مدت طولانی حرارت داده و سپس به آهستگی تا دمای اتاق سرد می‌کنند این عملیات به همگن کردن یا یکنواخت سازی و یا آنیل نفوذی معلوم است. از آنجایی که دمای انتخاب شده نسبتاً بالاست نفوذ سریع بوده و پس از پایان عملیات ناهمگنی‌های میکروساختار و ترکیب شیمیایی از بین می‌روند

---

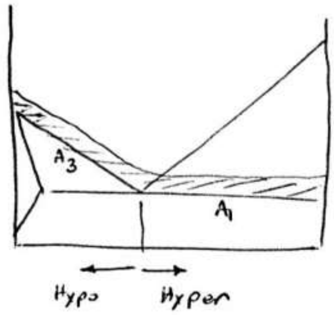
2 - 1 آنیل کردن ← به هر نوع عملیات حرارتی که منجر به تشکیل ساختاری به جز مارتنزیت و با سختی کم و انعطاف پذیری زیاد باشد اطلاق می‌گردد

هدف: افزایش شکل پذیری ، قابلیت ماشین کاری ، کاهش تنش‌های داخلی

آنیل کامل ← حرارت دادن فولاد در گستره دمای مشخص و سپس سرد کردن آهسته آن در کوره خاموش

محدوده دمایی: فولادهای هیپویوتکتوئید $A_3 + (30-50)°C$

" هایپر " $A_1 + (30-50)°C$



نحوه سرد کردن: داخل کوره خاموش

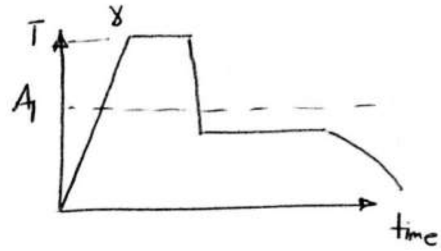
زمان نگهداری: ۲ دقیقه به ازای هر میلی‌متر

ساختار ایجاد شده
- فولادهای هیپویوتکتوئید: پرلیت درشت + فریت
- " هایپر ": پرلیت درشت + سمانتیت کروی نیم کروی
- فولاد یوتکتوئید: پرلیت درشت

آنیل همدما ← محدوده دمایی : مشابه آنیل کامل $A_3/A_1 + (30-50)\,^{\circ}C$

نحوه سردکردن : سردکردن سریع تا زیر خط A_1 و نگهداشتن برای مدت زمان کافی جهت دگرگونی

سپس سردکردن با هر آهنگ سردکردن دلخواه (معمولاً در کوره خاموش)



ساختار میکروسکوپی : مشابه آنیل کامل

توجه - آنیل کامل برای فولادهای ساده کربنی

آنیل ایزوترمال (همدما) برای فولادهای ساده کربنی و آلیاژی

سختی در آنیل همدما کمی بیشتر از آنیل کامل

آنیل جزئی ← فقط روی قطعات کارسردشده انجام می‌شود و هدف افزایش شکل‌پذیری و کاهش استحکام است.

محدوده دمایی : $550-700\,^{\circ}C$ برای مدت زمان مشخص

یا

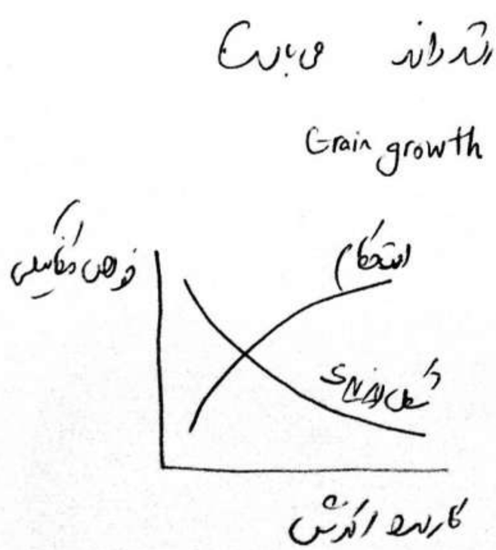
$1000-1200\,^{\circ}C$ برای مدت زمان کوتاه

توجه ← $1000-1200\,^{\circ}C$ محدوده کارگرم است. $T_{HW} = (0.5-0.6)\ T_M$
Hot working

- آنیل جزئی جهت کاهش و حذف عیوب کریستالی سه‌بعدی، دوبعدی، یک‌بعدی، نقطه‌ای

- شامل سه مرحله بازیابی / تبلور مجدد / رشد دانه می‌باشد

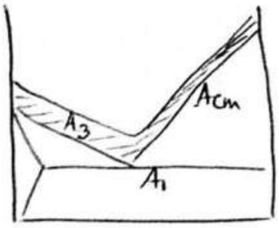
Grain growth Recrystalization Recovery



3- نرماله کردن

هدف : برطرف کردن اثرات کار مکانیکی ، بهبود خواص مکانیکی ، کاهش تنش های داخلی (ریز کردن دانه ها)

محدوده دمای :
هیپویوتکتوئید $A_3 + (50-100)$ °C
هایپر 〃 $A_{cm} + (50$ °C$)$



نحوه سرد کردن : هوای آزاد

ساختار میکروسکوپی |
Hypo : پرلیت ریز + فریت
Hyper : پرلیت ریز + سمانتیت

توجه - در قطعات پیچیده و حجیم که سرعت سرد شدن متفاوت است استفاده از فرایند نرماله چندان منطقی نیست.
زیرا سرعت سرد شدن در ساختارهای تاثیر گذار است.

توجه - در قطعات کوچک و آلیاژی (سختی پذیری بیشتر) ممکن است با عملیات نرماله به ساختار مارتنزیت و بینیت برسیم

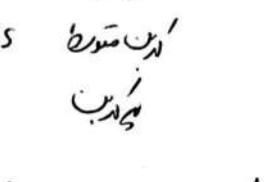
- - - - - - - - - - - -

4- کروی کردن

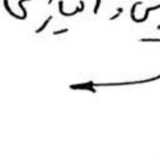
هدف : کاهش سختی و افزایش قابلیت ماشین کاری

برای فولادهای ساده کربنی و آلیاژی

$0.1 < \%C < 0.25$	کم کربن
$0.25 < \%C < 0.55$	کربن متوسط
$0.55 < \%C < 2$	پرکربن



محدوده دمای : $A_1 \pm 50$ °C

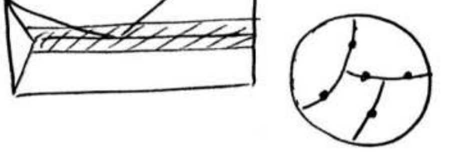


ساختار : کاربید کروی در زمینه فریت
(نرم ترین ساختار)

نحوه سرد کردن : در هوا تا دمای محیط یا در کوره تا دمای محیط

سرعت کروی کردن $1 > 3 > 2$

نوع سیکل کروی کردن :



1- فولادهای پرلیتی : گرم و سرد کردن متناوب حول A_1

2- 〃 مارتنزیتی : گرم کردن تا زیر دمای A_1 و نگه داشتن طولانی

3- 〃 بینیتی : گرم و سرد کردن متناوب در محدوده $A_1 \pm 50$ °C و نگهداری زیر A_1 برای مدت طولانی

5 - تنش‌گیری ← هدف: حذف تنش های داخلی قطعات

محدوده دمایی: 550 - 650 °C

زمان نگهداری: وابسته به ابعاد قطعه و دمای تنش‌گیری   Tf   tf

نحوه سرد کردن: خیلی آهسته تا دمای محیط

منابع ایجاد تنش داخلی: ۱- غیریکنواخت سرد کردن: ناشی از اختلاف سرد شدن و ایجاد تنش در اثر حرارت و استحاله

حرارت ← انقباض و انبساط

استحاله ← اختلاف ساختاری در بخش

۲- ماشین کاری

۳- کار سرد

← افزایش عیوب کریستالی

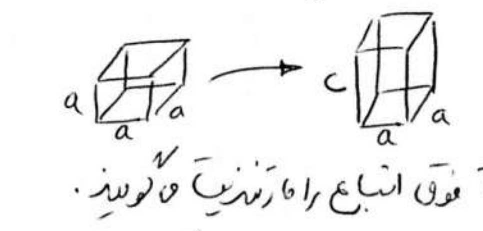
۴- جوشکاری ← تنش های جوشکاری ناشی از حرارت و استحاله

توجه - قطعات حجیم و پیچیده به علت سرد شدن متفاوتی در مناطق مختلف دارند لذا منجر به غیریکنواخت سرد کردن و در نتیجه ایجاد تنش داخلی در آنها می‌شود.

مارتنزیت

استحاله غیرنفوذی (تابع زمان نمی‌باشد) یک استحاله‌ای برشی است که شامل حرکت دسته جمعی اتم‌ها با حرکت نظامی گونه است.

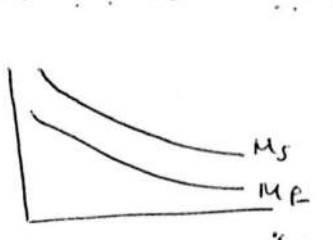
در اثر سریع سرد کردن اتم‌های کربن فرصت خروج از شبکه FCC آستنیت را نداشته و در داخل شبکه بر روی یال‌ها به دام می‌افتند و به جای BCC، BCT حاصل می‌شود.
→ Body Center Tetragonal



در حقیقت فریت فوق اشباع را مارتنزیت می‌گویند.

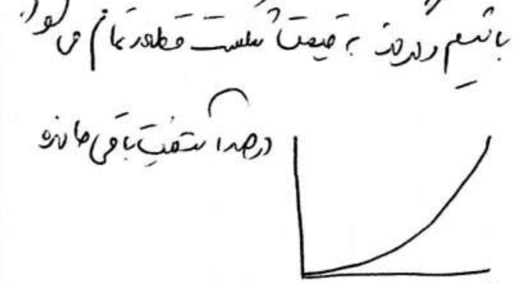
وجود اتم‌های اضافی موجب تنش زیادی به شبکه شده و تغییر ابعاد شبکه را ایجاد می‌کند.

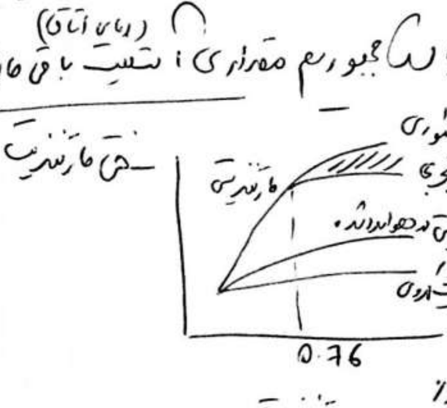
%C ↑ : Ms, Mf ↓ ، سختی مارتنزیت ↑



Ms : دمای شروع استحاله مارتنزیت
Mf : دمای پایان " "

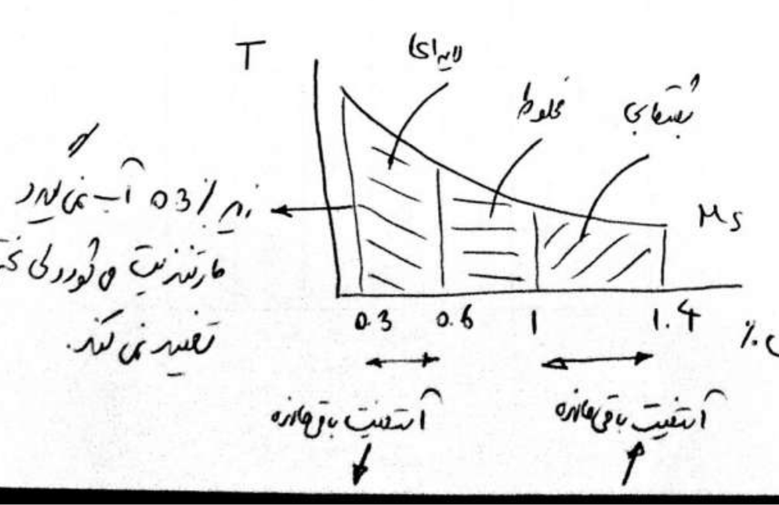
توجه - برای گرفتن مارتنزیت ۱۰۰٪ باید دما را خیلی پایین بیاوریم (زیر دمای اتاق) ولی تنش ایجاد شده سبب شکست قطعه می‌شود لذا فقط سرد کردن تا دمای (دمای اتاق) مجبوریم مقداری آستنیت باقی‌مانده داشته باشیم وگرنه به قیمت شکست قطعه تمام می‌شود.





%C ↑ : ضخامت صفحات مارتنزیت ↑

انواع مارتنزیت
- تیغه‌ای یا بشقابی (کم کربن) مارتنزیت
- سوزنی یا عدسی (پرکربن)



Ps
P (نفوذی)
Bs ≈ Pf
B (نفوذی + برشی)
Bf ≈ Ms
M (برشی)
Mf

بینیت ← بینیت خاصیتی دوگانه دارد از جایی شبیه پرلیت و از جایی دیگر شبیه مارتنزیت است.

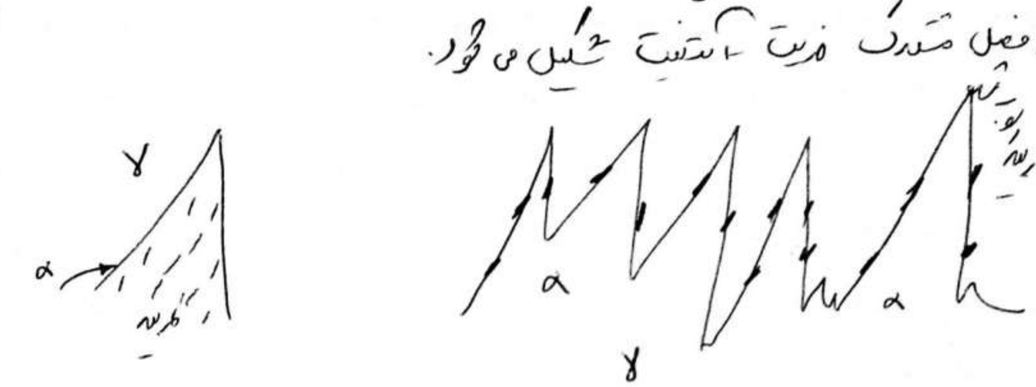
بینیت بالایی یا پرشکل : (نزدیک دمای P_F) - شبیه مارتنزیت کم کربن

بینیت پایینی یا سوزنی شکل : (نزدیک دمای M_S) - شبیه مارتنزیت پرکربن

بینیت مخلوطی از دو فاز فریت و سمانتیت است و یک فاز نیست.

Fe_3C α

سمانتیت در فصل مشترک فریت - آستنیت تشکیل می‌شود.


γ
α
کاربید
α
α
γ
کاربید

---

* انواع دیاگرام TTT

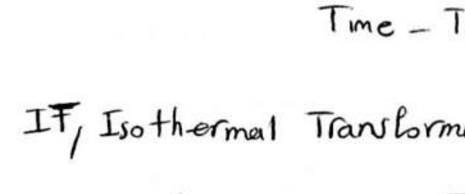
Time - Temperature - Transformation /

← ایزوترمال یا همدما (IT)

سرد کردن پیوسته (CCT)

IT, Isothermal Transformation

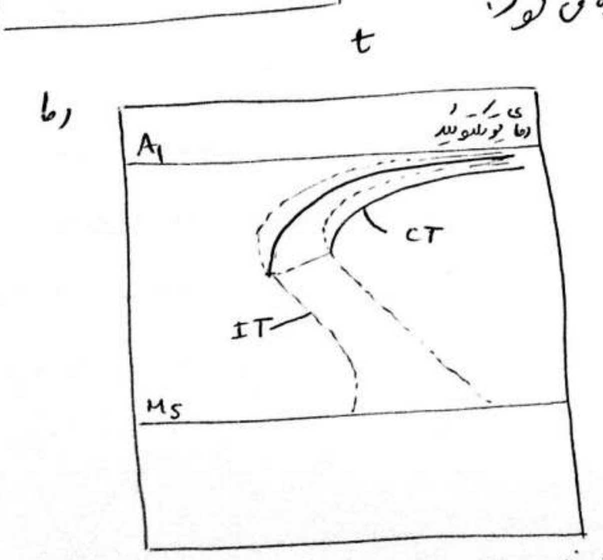
CCT, Continous Cooling Transformation


T
A1
Ps
P+γ
Pf
P
γ
Bs
B+γ
Bf
B
Ms
M+γ
Mf
P
B
M
t

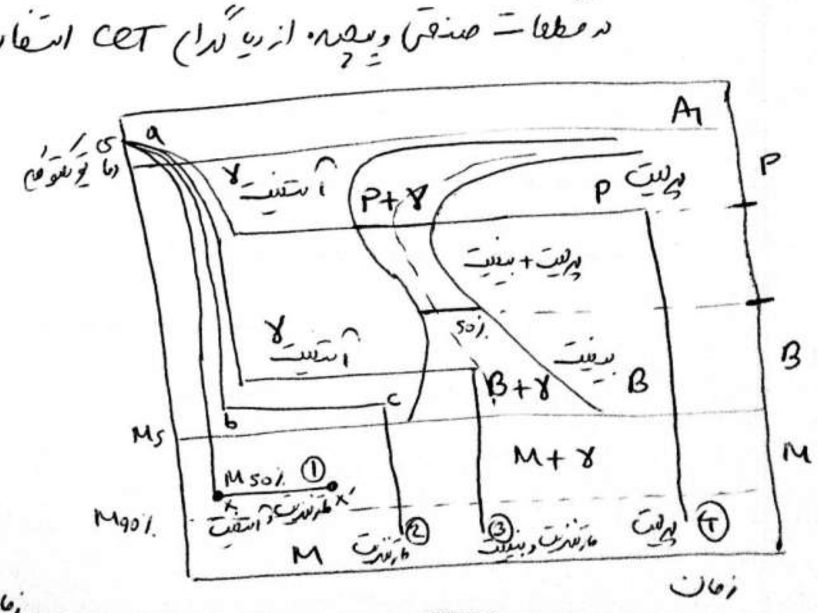
توجه ۱ دیاگرام CCT در سمت راست - پایین دیاگرام IT قرار دارد.

توجه ۲ در قطعات کوچک از دیاگرام IT استفاده می‌شود.

در قطعات صنعتی و پیچیده از دیاگرام CCT استفاده می‌شود.


دما
دمای یوتکتوئید
A1
CT
IT
Ms
زمان

IT, CT برای فولاد یوتکتوئید


A1
دمای یوتکتوئید
a
آستنیت γ
P+γ
پرلیت P
P
پرلیت + بینیت
50%
آستنیت γ
بینیت B
B+γ
B
c
b
Ms
M+γ
M
M 50% ①
x
x'
M90%
مارتنزیت و آستنیت
M
مارتنزیت ②
مارتنزیت و بینیت ③
پرلیت ④
زمان

IT

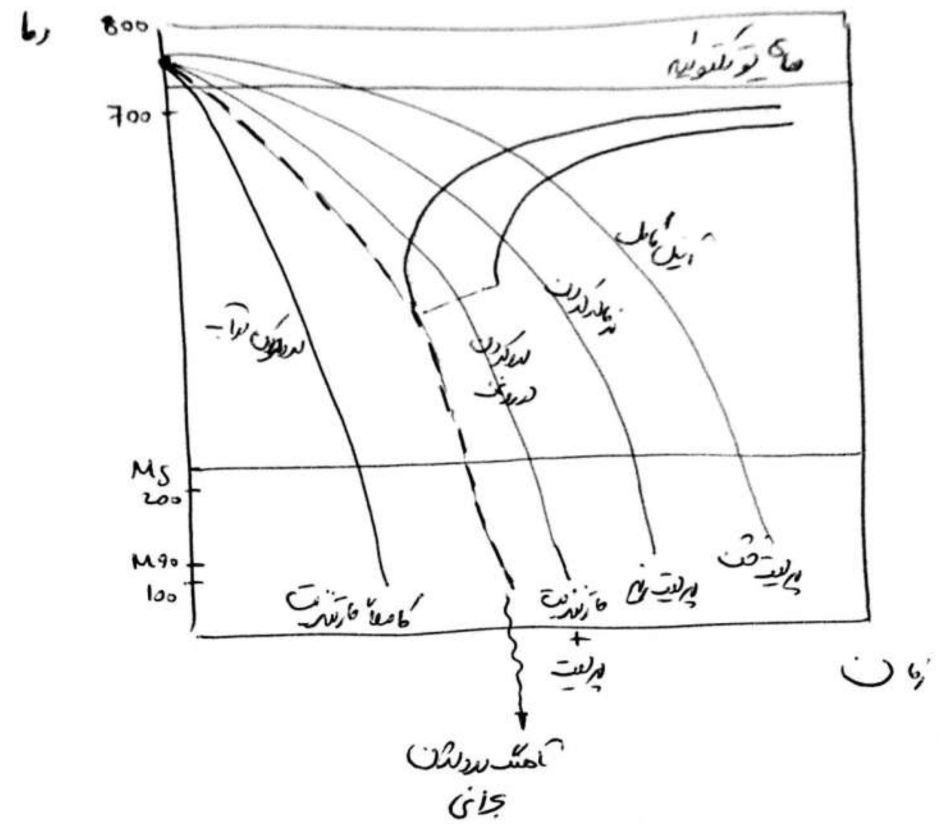
* شکل دیاگرام IT و مسیرهای 1، 2، 3 و 4 نمایش داده شود *

مسیر (1) : سرد شدن سریع تا پایین‌تر از Ms و نگهداشتن برای مدت خاص از آنجا که شکل‌گیری مارتنزیت تابعی از زمان نیست نقطه x و x' فرقی با هم ندارند و هر دو 50% آستنیت باقی‌مانده و 50% مارتنزیت دارند

مسیر (2) : نقطه (C) : آستنیت ناپایدار 100% $\xrightarrow{\text{بعد C}}$ مارتنزیت کامل

مسیر (3) : نگهداشتن نزدیک منحنی شروع که 50% ساختار فقط به بینیت تبدیل شود
50% باقی‌مانده در مرحله دوم سرد کردن مارتنزیت می‌شود.

مسیر (4) : نگهداشتن در دما منجر به تبدیل کامل به پرلیت می‌شود. پرلیت نمی‌تواند به بینیت و مارتنزیت تبدیل شود لذا پس از سریع سرد شدن در پایان به دمای اتاق ساختار همچنان پرلیتی باقی می‌ماند.



تغییرات شکل و ساختار برحسب آهنگ سرد شدن برای فولاد یوتکتوئیدی

بر اساس CT

* شکل نشان داده شود *