فصل ۴

نمودارهای زمان – دما – دگرگونی

نمودار تعادلی آهن - کربن پایه و اساس روشهای مختلف عملیات حرارتی است.

لیکن، این نمودار فقط شرایط تعادل بین آهن و کربن را در دماهای مختلف نشان می‌دهد، در حالی که در اکثر روشهای عملیات حرارتی فولادها، دگرگونیها در شرایط کاملاً ناتعادلی انجام می‌شوند. به بیان دیگر، پارامتر زمان یکی از مهمترین پارامترهای مؤثر است. اثرات زمان بر روی ساختار و خواص نهایی فولادها توسط نمودارهای زمان - دما - دگرگونی که به نمودارهای TTT[1] موسوم‌اند، مشخص می‌شود. به این ترتیب، به کمک نمودارهای یاد شده می‌توان اثرات هر دو پارامتر زمان و دما را بر روی پیشرفت دگرگونی در فولادها به سادگی بررسی کرد.

برحسب اینکه دگرگونی آستنیت به ساختار یا فاز جدید در دمای ثابت (همدما) و یا در اثر سرد شدن پیوسته (در دماهای مختلف) انجام شود، نمودارهای TTT[۱] که استفاده می‌شوند باید به ترتیب از نوع نمودارهای دگرگونی همدما (IT)[۲] و دگرگونی در سرد شدن پیوسته (CT)[۳] باشند. نمودارهای دگرگونی در اثر سرد شدن پیوسته را به CCT[۴] نیز نشان می‌دهند.

---

[۱] Time-Temperature-Transformation Diagrams

[۲] Isothermal Transformation

[۳] Continuous Transformation

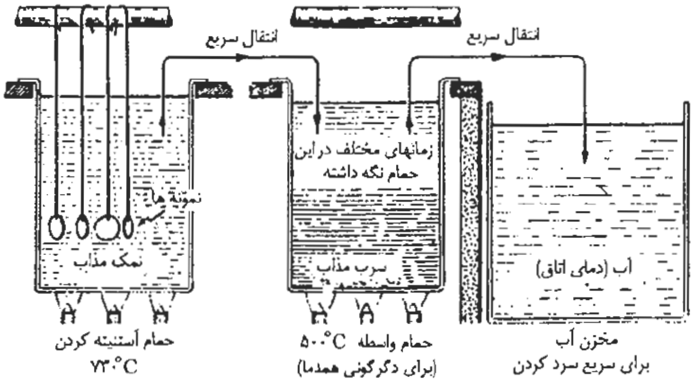
[۴] Continuous Cooling Transformation Diagrams

نمودارهای دگرگونی همدما (IT)

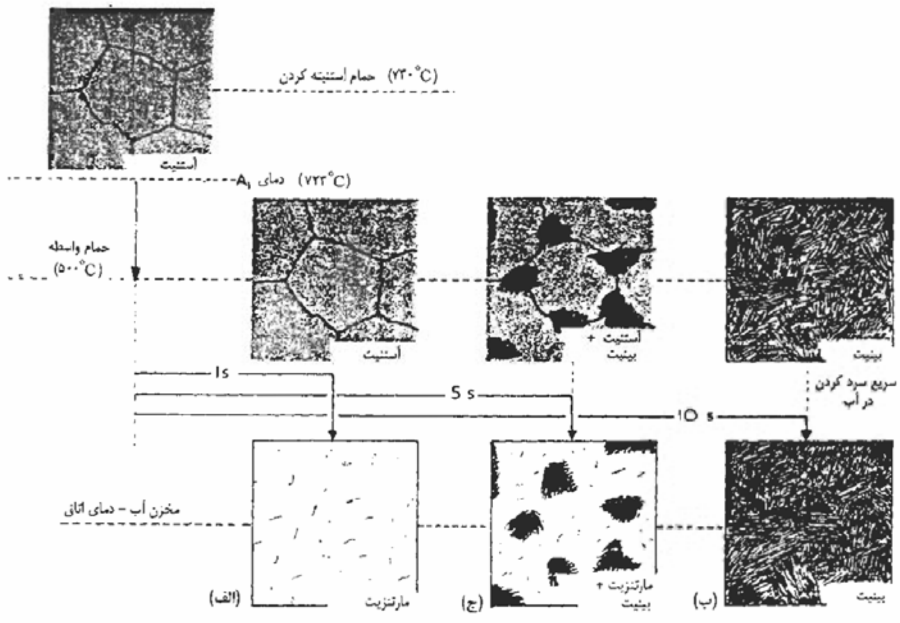
به طور کلی رسم این نمودارها با مطالعهٔ میکروساختار، اندازه‌گیری سختی و یا اندازه‌گیری تغییر طول (روش دیلاتومتری[۱]) یک سری نمونهٔ متالوگرافی استاندارد که پس از آستنیته کردن کامل به مدت زمانهای متفاوت در دماهای مختلف و بالاتر از دمای شروع تشکیل مارتنزیت (M_S)[۲] نگهداری شده و سپس تا دمای اتاق سریع سرد شده باشند امکانپذیر است.

برای رسم کامل یک نمودار IT و برای یک فولاد مشخص، بیشتر از صد نمونه لازم است. روش کار بدین منوال است که نمونه‌های متالوگرافی را در ناحیهٔ تکفازی آستنیت برای مدت زمان کافی (معمولاً یک ساعت) حرارت داده تا اینکه ساختار یکنواخت آستنیتی به دست آید. زمان و دمای آستنیته کردن، اندازهٔ دانه‌های آستنیت و میزان انحلال کاربیدها را در آستنیت مشخص می‌کند. از آنجایی که هر دو پارامتر یاد شده دگرگونی آستنیت را تحت تأثیر قرار می‌دهند، لازم است که دما و زمان آستنیته کردن که برای رسم نمودار مورد استفاده قرار گرفته است، ذکر شود.

وقتی که آستنیته کردن به پایان رسید یک سری از نمونه‌ها به دمایی ثابت بین A_1 و M_s رسانده می‌شوند. نمونه‌ها در دمای ثابت برای مدت زمانهای متفاوت نگهداری شده و سپس تا دمای اتاق سریع سرد می‌شوند.


انتقال سریع
انتقال سریع
زمانهای مختلف در این حمام نگه داشته
نمونهٔ ها
نمک مذاب
سرب مذاب
آب (دمای اتاق)
حمام آستنیته کردن
۷۳۰°C
حمام واسطه ۵۰۰°C
(برای دگرگونی همدما)
مخزن آب
برای سریع سرد کردن

شکل ۴-۱ مراحل مختلف عملیات برای رسم نمودار TTT


(۷۳۰°C) حمام آستنیته کردن
آستنیت
دمای A_1 (۷۲۳°C)
حمام واسطه
(۵۰۰°C)
آستنیت
آستنیت + بینیت
بینیت
1s
5 s
10 s
سریع سرد کردن در آب
مخزن آب - دمای اتاق
(الف)
مارتنزیت
(ج)
مارتنزیت + بینیت
(ب)
بینیت

شکل ۴-۲ چگونگی پیشرفت دگرگونی آستنیت به بینیت در ۵۰۰ درجه سانتیگراد [۳].

اگر زمان نگهداری نمونه در دمای ثابت (۵۰۰ درجه سانتیگراد در شکل ۴-۱) برای انجام دگرگونی نفوذی کافی نباشد قطعه تماماً مارتنزیت می‌شود (شکل ۴-۲(الف))، زیرا در لحظه سریع سرد شدن، قطعه تماماً آستنیتی بوده است. از طرف دیگر در قطعاتی که برای مدت زمان طولانی در همین دما نگه داشته شده‌اند اثری از مارتنزیت مشاهده نمی‌شود (شکل ۴-۲(ب))، زیرا در لحظهٔ سریع سرد شدن آستنیتی در قطعه وجود نداشته است.

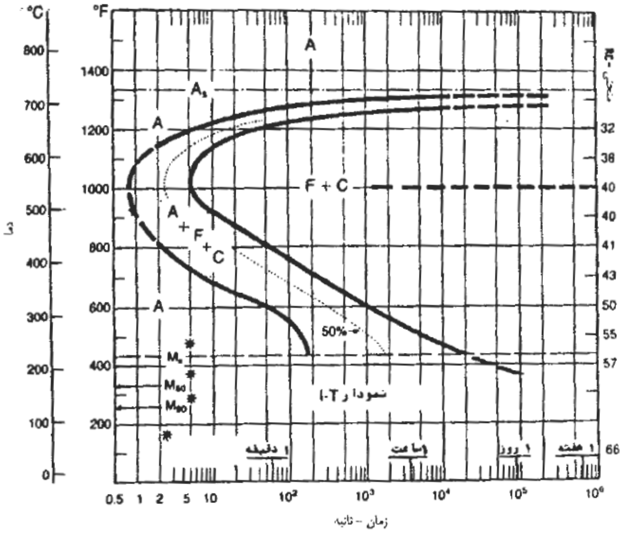
ساختار نهایی نمونه‌ها

بستگی به دمای دگرگونی همدما و زمان نگهداری در آن دما دارد و می‌تواند پرلیت، بینیت، مارتنزیت و یا مخلوطی از آنها باشد.

نمونه‌ای که عمدتاً به مارتنزیت تبدیل شده و کمترین

مقدار (در حدود ۱ درصد) از یکی یا مخلوطی از ساختارهای دیگر را دارا باشد زمان شروع دگرگونی را در یک دمای ثابت مشخص می‌کند. با افزایش زمان نگهداری در دمای ثابت، درصد آستنیت باقیمانده که می‌تواند به مارتنزیت تبدیل شود کاهش می‌یابد. نمونه‌ای که کمترین مقدار مارتنزیت (در حدود ۱ درصد) را داشته باشد زمان پایان دگرگونی در دمای ثابت فوق را معین می‌کند.

به این ترتیب زمانهای لازم برای شروع و پایان دگرگونی همدما در یک دمای ثابت (دو نقطه از نمودار IT) مشخص می‌شود. اگر به همین منوال آزمایش در دماهای ثابت دیگری بین M_s و A_1 (A_2 و A_{cm} به ترتیب برای فولادهای هیپو و هایپریوتکتویید) انجام شود نقاط شروع و پایان دگرگونی برای دماهای مختلف مشخص شده و نمودار IT به دست می‌آید.

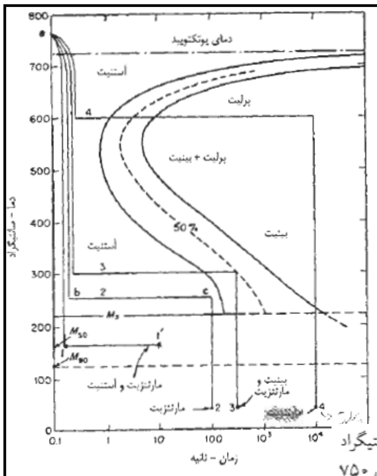


شکل ۴-۳ نمودار دگرگونی همدما برای فولاد ۱۰۸۰ که شامل ۰/۷۹C٪ و ۰/۷۶Mn٪ است. نمونه‌ها در ۹۰۰ درجهٔ سانتیگراد آستنیته شده و دارای عدد اندازهٔ دانه ۶ بوده‌اند [۱].

لیستی از فازها و ساختارهای مختلف در جهت افزایش سختی

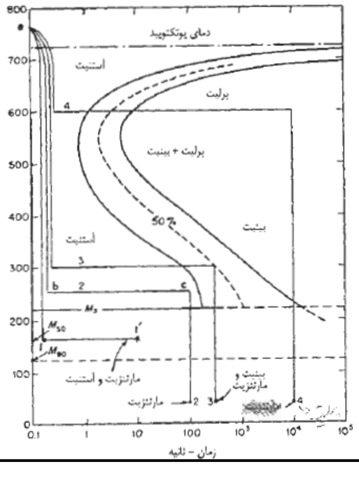
عبارت‌اند از فریت، پرلیت، بینیت و مارتنزیت. بنابراین، سختی نمونه‌ای که به مدت کمی (شکل ۴-۲(الف)) در دمای ثابت بین A_1 و M_s نگهداری شده (و بنابراین کاملاً مارتنزیتی است) بیشترین و نمونه‌ای که به مدت طولانی (شکل ۴-۲(ب)) در دمای ثابت نگهداری شده (و بنابراین اثری از مارتنزیت در آن وجود ندارد) کمترین مقدار است. بنابراین، نقاط شروع و پایان دگرگونی همدما را می‌توان با دنبال کردن منحنی تغییرات سختی برحسب زمان قرار گرفتن در دمای ثابت نیز به دست آورد.

اصول استفاده از نمودارهای دگرگونی همدما

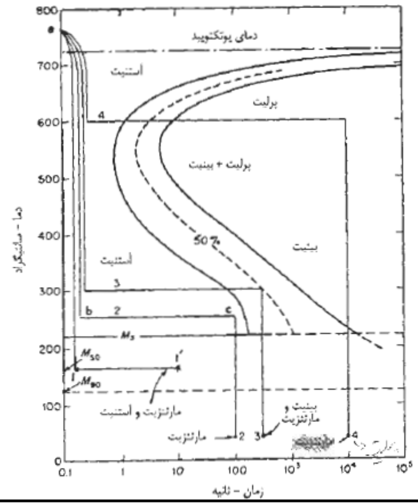


مسیر ۱ : نمونه از دمای ۷۵۰ درجهٔ سانتیگراد در ناحیهٔ آستنیت تا دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد سریع سرد شده و به مدت ۱۰ ثانیه در این دما نگه داشته می‌شود. در بین دماهای ۷۵۰ تا ۱۶۰ درجهٔ سانتیگراد آهنگ سرد شدن آنقدر زیاد است که پرلیت و بینیت فرصت تشکیل شدن را نداشته و بنابراین فولاد تا دمای M_s به صورت آستنیت باقی خواهد ماند. از این دما تا دمای ۱۶۰ درجهٔ سانتیگراد مارتنزیت به صورت همدما از آستنیت به وجود می‌آید. از آنجایی که دمای ۱۶۰ درجهٔ سانتیگراد مشخص کننده دمایی است که فقط ۵۰ درصد آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود و از طرفی تشکیل مارتنزیت مستقل از زمان است، بنابراین ساختار فولاد در نقطه ′۱ مشابه با نقطه ۱ بوده و شامل ۵۰ درصد مارتنزیت و ۵۰ درصد آستنیت باقیمانده است.

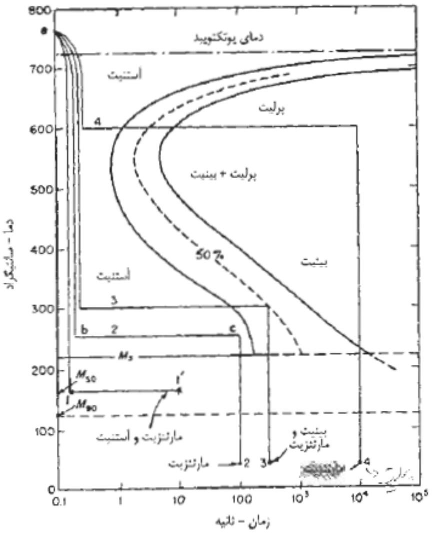
مسیر ۲ : در این حالت نمونه از ناحیهٔ آستنیت تا دمای ۲۵۰ درجهٔ سانتیگراد سریع سرد شده، در این دما به مدت ۱۰۰ ثانیه نگهداری شده و سپس تا دمای اتاق سریع سرد می‌شود. همان‌گونه که از شکل ۴-۲ مشخص است دمای ۲۵۰ درجهٔ سانتیگراد درگسترهٔ دمایی تشکیل بینیت است، ولی زمان ۱۰۰ ثانیه برای تشکیل بینیت کافی نیست و بنابراین در نقطهٔ c ساختار فولاد صددرصد آستنیت ناپایدار است. لذا در سریع سرد کردن مرحلهٔ دوم از ۲۵۰ درجهٔ سانتیگراد تا دمای اتاق قطعه تماماً مارتنزیتی می‌شود.



مسیر ۳ : قطعه تا ۳۰۰ درجهٔ سانتیگراد سریع سرد شده، در این دما به مدت ۵۰۰ ثانیه نگهداری شده و سپس تا دمای اتاق سریع سرد می‌شود. نگه داشتن نمونه به مدت ۵۰۰ ثانیه در دمای ۳۰۰ درجهٔ سانتیگراد باعث خواهد شد که ۵۰ درصد ساختار قطعه به بینیت تبدیل شود و ۵۰ درصد باقیمانده در مرحلهٔ دوم سرد کردن مارتنزیت شود.



مسیر ۴ : در این مسیر قطعه در دمای ثابت ۶۰۰ درجهٔ سانتیگراد کاملاً به پرلیت تبدیل می‌شود. از آنجایی که پرلیت نمی‌تواند مستقیماً به بینیت و یا مارتنزیت تبدیل شود لذا پس از سریع سرد شدن مرحلهٔ دوم و رسیدن به دمای اتاق ساختار همچنان پرلیتی باقی می‌ماند.



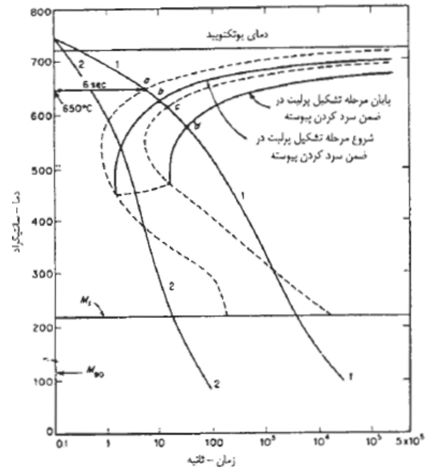
نمودارهای دگرگونی در ضمن سرد کردن پیوسته - (CT)

نمودارهای IT ابزار با ارزشی برای مطالعهٔ وابستگی دگرگونیهای آستنیت به دماست. لیکن، روابط زمان - دما که بر روی نمودارهای فوق مشخص شده تنها در مورد دگرگونیهایی صادق است که در دمای ثابت انجام می‌شود. در حالی که تنها تعداد محدودی از روشهای عملیات

حرارتی بدین نحو انجام می‌شوند، به طوری که می‌توان گفت تقریباً در تمام موارد، فولادها تا ناحیه آستنیت حرارت داده شده و سپس به طور پیوسته تا دمای اتاق سرد می‌شوند. آهنگ سرد شدن تابعی از نوع عملیات حرارتی، اندازه و شکل نمونه‌هاست.

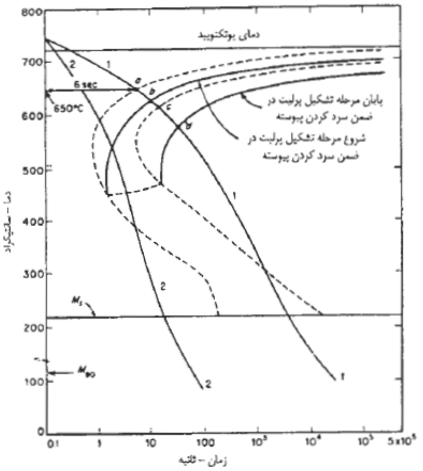
نمودارهایی که به کمک آنها
می‌توان رفتار فولادها را تحت شرایط یاد شده بررسی کرد به نمودارهای دگرگونی در سرد کردن

تفاوت بین نمودارهای IT و CT
نمودار IT (خط منقطع) و نمودار CT (خط ممتد) مربوط به فولاد ۱۰۸۰



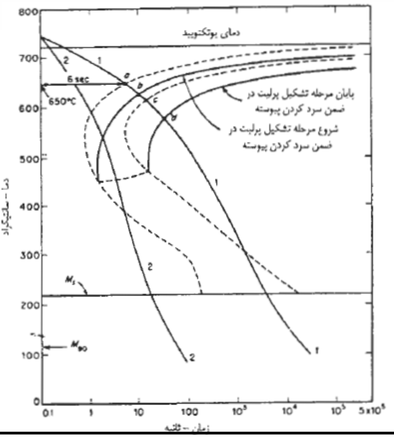
شکل ۴-۵ ارتباط بین نمودار دگرگونی همدما (IT) و نمودار دگرگونی در سرد شدن پیوسته (CT) برای فولاد یوتکتویید [۹].

اگر منحنی سرد شدن شمارهٔ ۱ در نظر گرفته شود، در پایان زمان تقریباً ۶ ثانیه منحنی مزبور خط شروع تشکیل پرلیت مربوط به نمودار IT را قطع می‌کند که محل تقاطع توسط نقطهٔ a مشخص شده است. نقطهٔ a از این نظر اهمیت دارد که زمان لازم برای جوانه‌زنی همدمای پرلیت را در دمای ثابت ۶۵۰ درجهٔ سانتیگراد (دمای نقطه a) مشخص می‌کند.

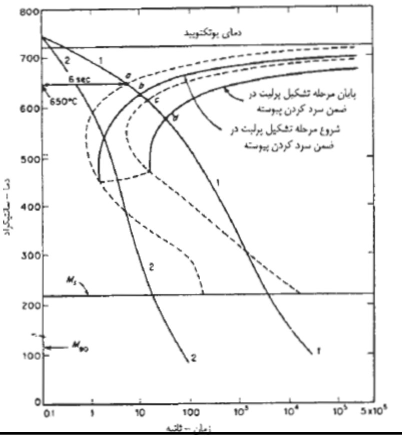


.. از طرف دیگر نمونه‌ای

که در امتداد مسیر شماره ۱ سرد شده باشد در انتهای زمان ۶ ثانیه به دمای ثابت ۶۵۰ درجهٔ سانتیگراد رسیده است. به بیان دیگر نمونهٔ مزبور برای تمام مدت ۶ ثانیه در دمایی بالاتر از ۶۵۰ درجهٔ سانتیگراد بوده است. نظر به اینکه زمان لازم برای شروع تغییر فاز آستنیت به پرلیت در دماهای بالاتر از ۶۵۰ درجهٔ سانتیگراد بیشتر از زمان لازم در ۶۵۰ درجهٔ سانتیگراد است، در نمونه‌هایی که به طور مداوم سرد شده‌اند (مسیر ۱) دگرگونی آستنیت به پرلیت پس از ۶ ثانیه هنوز شروع نشده است.



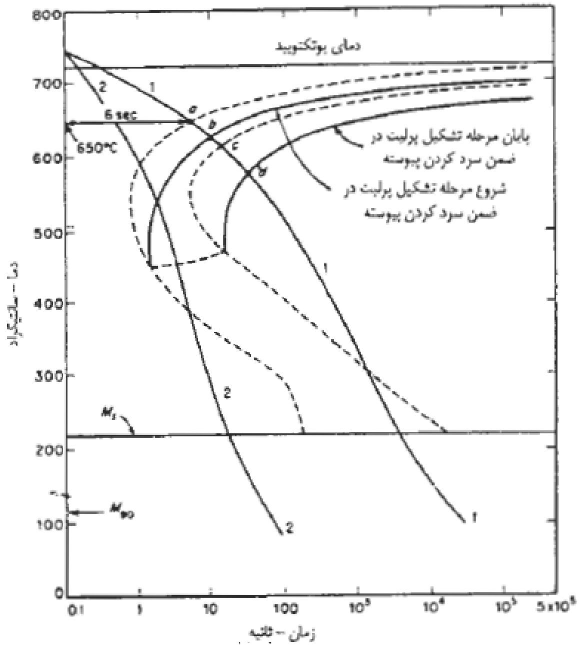
به بیان دیگر، زمان لازم برای شروع دگرگونی آستنیت به پرلیت در نمونه‌هایی که در امتداد مسیر ۱ سرد شده‌اند بیشتر از ۶ ثانیه است. از آنجایی که در سرد کردن مداوم افزایش زمان همراه با افت بیشتر دما است، بنابراین نقطه‌ای که مشخص کننده شروع دگرگونی آستنیت به پرلیت تحت شرایط یاد شده است در سمت راست و پایین نقطه a قرار دارد. موقعیت جدید نقطه a توسط نقطهٔ b مشخص شده است. به همین ترتیب می‌توان نشان داد که نقطهٔ پایان تشکیل پرلیت در سرد کردن پیوسته (نقطه d) به سمت راست و پایین نقطهٔ پایان تشکیل پرلیت در دگرگونی همدما (نقطه c) منتقل می‌شود.



برای یک فولاد داده شده نمودار CT در سمت راست و پایین نمودار IT آن فولاد قرار دارد و این جابه‌جایی تابعی از آهنگ سرد شدن است.

همچنین این موضوع که چرا در سرد کردن پیوسته،

واکنش تشکیل بینیت در این فولاد انجام نمی‌گیرد نیاز به توضیح دارد. تفهیم این موضوع چندان مشکل نبوده و مربوط به این حقیقت می‌شود که خطوط تشکیل پرلیت تا ناحیه تشکیل بینیت و حتی بعد از آن ادامه می‌یابد. بنابراین در آهنگهای سرد کردن آهسته و متوسط (نظیر منحنی ۱) قبل از اینکه خط سرد شدن به ناحیهٔ تشکیل بینیت برسد آستنیت به طور کامل به پرلیت تبدیل می‌شود و بنابراین بینیتی تشکیل نمی‌شود.

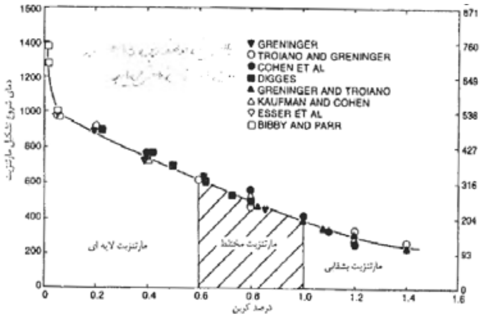


از طرف دیگر در آهنگهای سرد شدن زیاد (نظیر منحنی ۲) نمونه برای مدت زمانی بسیار کمتر از زمان لازم برای تشکیل مقدار قابل ملاحظه‌ای بینیت در گستره دمایی تشکیل بینیت قرار می‌گیرد، در نتیجه مجدداً بینیتی تشکیل نخواهد شد. نکته‌ای که در رابطه با موضوع اخیر باید در نظر گرفته شود این حقیقت است که آهنگ تشکیل بینیت با کاهش دما به شدت کاهش می‌یابد.

میکروساختار حاصل از سرد کردن یک فولاد یوتکتوییدی در امتداد مسیر ۲ باید شامل پرلیت و مارتنزیت باشد. البته مقدار بسیار کمی بینیت هم ممکن است وجود داشته باشد که قابل اغماض است. مشخص است که در نمونه فوق مارتنزیت از آستنیتی به وجود آمده که در دمای بالا به پرلیت تبدیل نشده است.

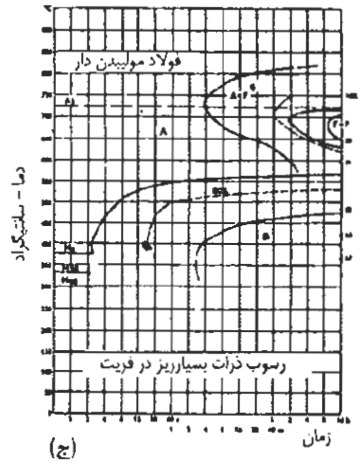
به طور کلی مشخصه‌های دیگری که مخصوص نمودارهای CT بوده و نمودارهای IT از آنها مستثنی هستند عبارت‌اند از:

۱– **کاهش دمای شروع تشکیل مارتنزیت در آهنگهای سرد شدن کم: در صورتی که در ضمن سرد** کردن آهسته و مداوم، فولاد از ناحیه آستنیت، فاز فریت و یا ساختار بینیت تشکیل شود، آستنیت **باقیمانده از کربن غنی شده و در نتیجه دمای تبدیل آن به مارتنزیت کاهش می‌یابد.** اثر درصد کربن آستنیت بر روی دمای شروع تشکیل مارتنزیت در فصل سوم بررسی شده است (شکل ۳–۶).

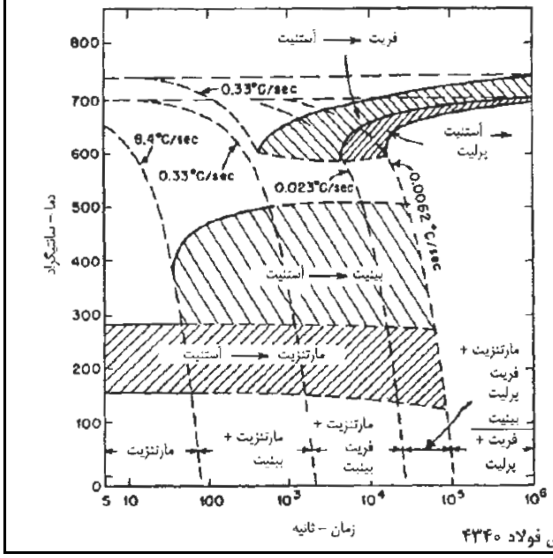


۲– بازپخت[1] مارتنزیت در ضمن سرد شدن در زیر دمای M_s : این پدیده که به بازپخت **خودبه‌خود[2] موسوم است بیشتر در مورد فولادهای کم کربن با دمای M_s بالا معمول است. علت این پدیده عبارت از قرار گرفتن مارتنزیت در یک گستره دمایی وسیع بین M_s و تقریباً ۲۰۰ درجه سانتیگراد است.** در گسترهٔ دمایی یاد شده، کربن قدرت تحرک کافی جهت نفوذ و تشکیل کاربیدهای مربوط به ساختار مارتنزیت بازپخت شده را پیدا می‌کند. پدیده بازپخت فولادها در فصل هشتم بررسی خواهد شد.

۳- غلبهٔ بینیت به عنوان یک محصول دگرگونی آستنیت : بعضی از عناصر آلیاژی به ویژه مولیبدن، همچنین آهنگهای سرد شدن نسبتاً زیاد درگسترهٔ دمایی مربوط به دگرگونی نفوذی (ناحیه تشکیل پرلیت) منجر به ترغیب دگرگونی برشی شده و در نتیجه تشکیل بینیت را در گستره دمایی فوق تسهیل می‌کند. اثر مولیبدن در این رابطه از شکل ۴-۸(ج) مشخص است.



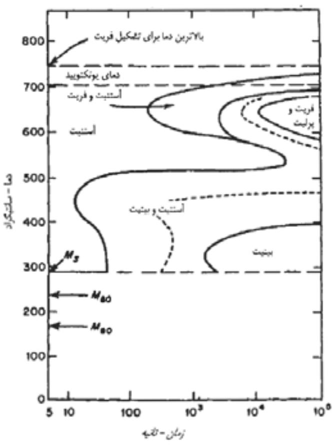
۴- وجود فازها و میکروساختارهای مختلف در جوار یکدیگر: علت آمیختگی میکروساختارهای نهایی، عبور نمونه از نواحی مختلف فازی و ساختاری در ضمن سرد شدن پیوسته است (شکل ۴-۱۰ این مطلب را نشان می‌دهد).



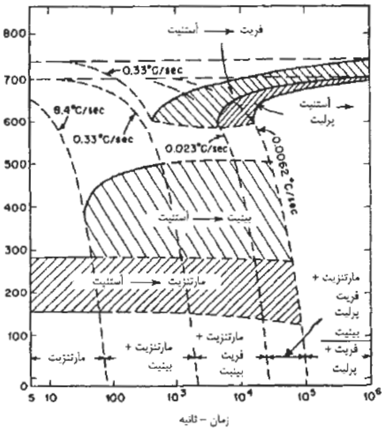
شکل ۴-۱۰ نمودار دگرگونی در سرد شدن پیوسته برای فولاد ۴۳۴۰

۵- **تشکیل فریت غیرمنتظره در فولادهای پرکربن نظیر AISI ۵۲۱۰۰**: علت اینکه در بعضی از فولادهای پرکربن که اساساً باید سمنتیت پرویوتکتوید وجود داشته باشد فریت پرویوتکتوید ظاهر می‌شود، این است که در ضمن **آستنیته کردن احتمالاً** تمامی کاربیدها در آستنیت حل نشده و در نتیجه مقداری از کربن **همچنان به صورت کاربید باقی مانده است.** بنابراین، کربن آستنیت (**مخصوصاً در جوار** کاربیدها) کمتر از مقدار مورد نظر بوده و به مقدار کربن **فولادهای هیپویوتکتوید می‌رسد.** البته این موضوع در دگرگونیهای همدما نیز وجود دارد.

۶- علاوه بر تفاوتهای ذکر شده برای نمودارهای CT و IT، اغلب یک حد فاصله بین بعضی از نواحی مختلف فازی در نمودارهای CT مشاهده می‌شود (شکل ۴-۹). این حد فاصل مشخص کننده گسترهٔ دمایی است که ظاهراً در ضمن سرد شدن پیوسته هیچگونه دگرگونی در آن انجام نمی‌شود. علت به وجود آمدن این ناحیه ممکن است به خاطر تشکیل فریت در دماهای بالا و در نتیجه غنی شدن آستنیت از کربن در ضمن سرد کردن و یا تغییر زمان لازم برای جوانه‌زنی پرلیت و بینیت در ضمن سرد شدن باشد.



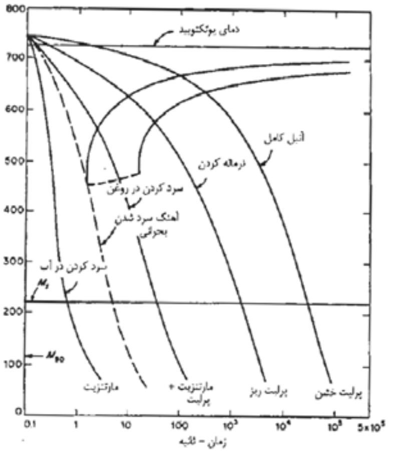
شکل ۴-۹ نمودار دگرگونی همدمای فولاد کم آلیاژ ۴۳۴۰. دمای آستنیته کردن ۸۴۵ درج



شکل ۴-۱۰ نمودار دگرگونی در سرد شدن پیوسته برای فولاد ۴۳۴۰

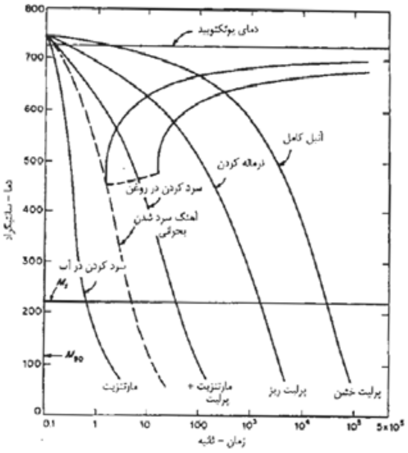
اصول استفادهٔ از نمودارهای دگرگونی غیرهمدما (سرد شدن پیوسته)

نمودار CT مربوط به فولاد کربنی سادهٔ یوتکتوییدی همراه با تعدادی منحنی سرد شدن در شکل ۴-۶ رسم شده است. منحنیهای مزبور که چگونگی تشکیل میکروساختارهای مختلف در ضمن سرد شدن با آهنگهای متفاوت را به طور کیفی نشان می‌دهند، عبارت‌اند از:

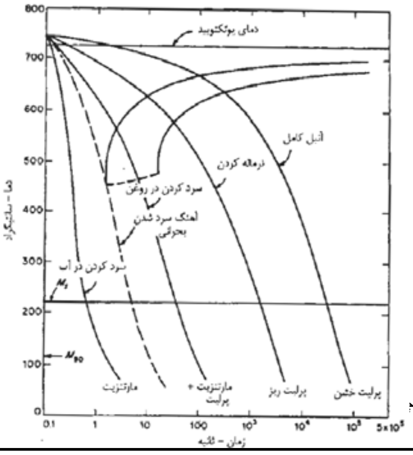


شکل ۴-۶ تغییرات میکروساختار برحسب آهنگ سرد شدن برای فولاد یوتکتوییدی

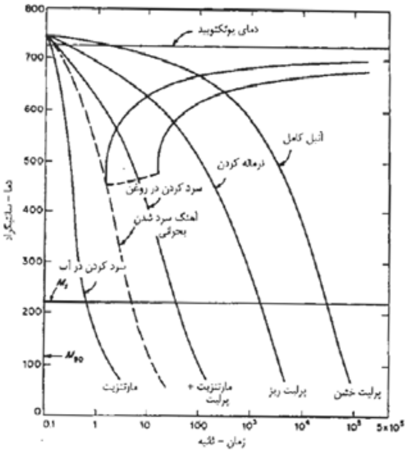
۱- آنیل کامل[1] : این منحنی نمایندهٔ آهنگ سرد شدن بسیار آهسته بوده و معمولاً موقعی که قطعه پس از آستنیته شدن تا دمای اتاق درکوره سرد شود، چنین حالتی را خواهیم داشت. مدت زمان لازم برای رسیدن قطعه از ناحیهٔ آستنیت به دمای اتاق در حدود یک روز است. در این حالت دگرگونی آستنیت به پرلیت در دمایی در حدود دمای تعادلی یوتکتویید انجام گرفته و محصول دگرگونی، پرلیت خشن است.



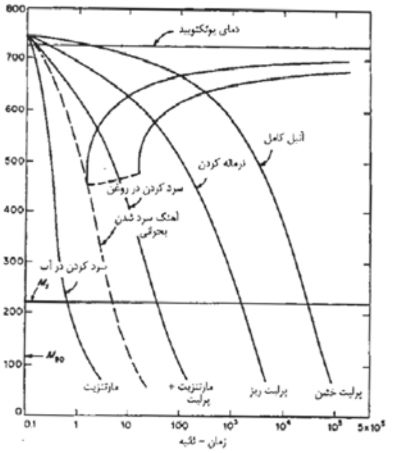
۲- نرماله کردن[۲]: این منحنی مشخص کنندهٔ عملیات حرارتی است که در آن نمونه‌ها با آهنگی بیشتر از حالت آنیل و نسبتاً متوسط سرد می‌شوند. برای این منظور، نمونه‌ها پس از آستنیته شدن **از کوره خارج شده و تا دمای اتاق در هوای آرام سرد می‌شوند. در این** حالت دگرگونی در گسترهٔ دمایی ۶۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد انجام گرفته و در مدتی در حدود چند دقیقه خاتمه می‌یابد. ساختار حاصل در این حالت نیز پرلیت بوده ولی در مقایسه با حالت قبل بسیار ریزتر و ظریفتر است.



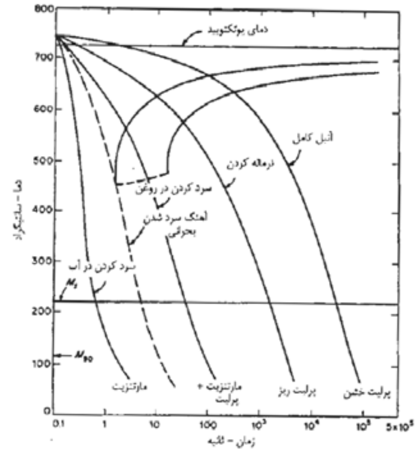
۳- سرد کردن در روغن[۳]: این منحنی که مشخص کننده آهنگ سرد شدن بیشتر از نرماله کردن است، هنگامی به دست می‌آید که نمونه فولادی از دمای آستنیت مستقیماً به حمام روغن انداخته شود. ساختار نهایی در این حالت مخلوطی از پرلیت و مارتنزیت است.



۴- سرد کردن در آب[۴] : منحنی سردشدنی که در انتهای سمت چپ قرار دارد، مربوط به حالتی است که پس از سرد شدن، ساختار قطعه کاملاً مارتنزیتی باشد. این امر مشابه با حالتی است که قطعه از دمای آستنیت مستقیماً به داخل آب انداخته شود.

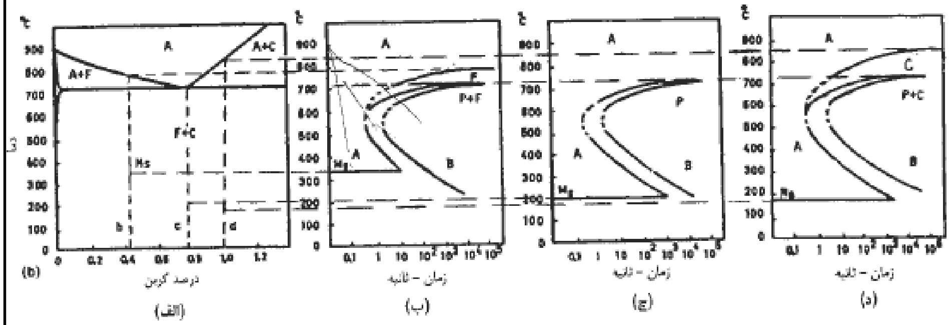


۵- آهنگ سرد شدن بحرانی[۵] : این منحنی به صورت خط چین مشخص شده و بر دماغهٔ نمودار CT مماس است. در هر آهنگ سردشدنی بیشتر از آهنگ سرد شدن بحرانی (سمت چپ منحنی خط چین) فولاد کاملاً مارتنزیت می‌شود، در حالی که اگر آهنگ سرد شدن کمتر از آهنگ سرد شدن بحرانی باشد (سمت راست منحنی خط چین) بجز مارتنزیت مقداری پرلیت (و یا بینیت) نیز در ساختار نهایی وجود خواهد داشت.



نمودارهای TTT برای فولادهای کربنی سادهٔ غیریوتکتوییدی

ساده‌ترین نمودارهای TTT مربوط به فولادهای کربنی سادهٔ یوتکتوییدی است. با تغییر درصد کربن موقعیت خطوط همراه با نقاط شروع و پایان دگرگونیها تغییر کرده و فازهای جدید در نمودار ظاهر می‌شود. شکل ۴-۷ شمایی از نمودارهای IT برای فولادهای کربنی سادهٔ یوتکتوییدی، هیپویوتکتوییدی و هایپریوتکتوییدی را نشان می‌دهد.

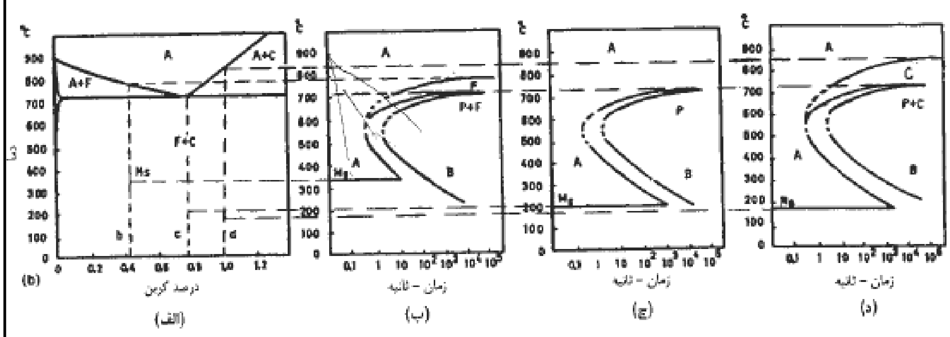


شکل ۴-۷ ارتباط بین نمودار تعادلی آهن - کربن (الف) و نمودارهای دگرگونی همدما برای فولادهای کربنی ساده هیپویوتکتویید (ب)، یوتکتویید (ج) و هایپریوتکتویید (د). [رسم مجدد با استفاده از مراجع ۱ و ۹]

نمودارهای IT

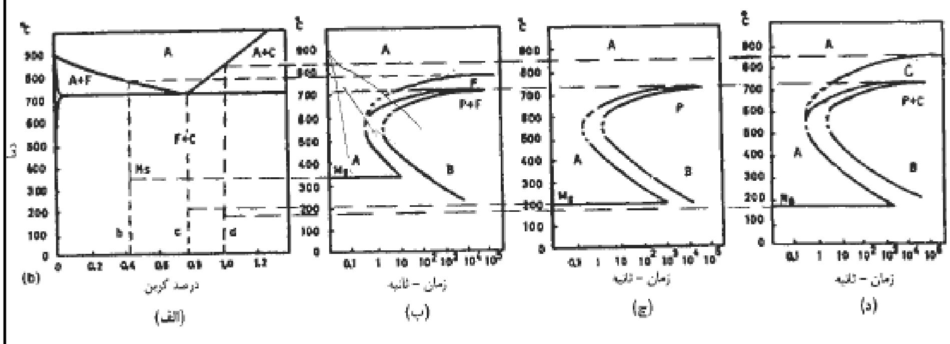
برای فولادهای هیپویوتکتویید و هایپریوتکتویید دارای یک منحنی اضافی در سمت بالاست که به ترتیب نشان دهندهٔ شروع تشکیل فریت پرویوتکتویید و سمنتیت پرویوتکتویید است.

با افزایش دمای دگرگونی، منحنی مربوط به فولادهای هیپویوتکتویید به سمت خط A_3 و برای فولادهای هایپریوتکتویید به سمت خط A_{cm} میل می‌کند. با کاهش درصد کربن فولادهای هیپویوتکتویید دمای A_3 افزایش یافته و بنابراین ناحیهٔ مربوط به فاز فریت پرویوتکتویید وسیعتر می‌شود. به همین ترتیب در فولادهای هایپریوتکتویید با افزایش درصد کربن دمای A_{cm} نیز افزایش یافته و در نتیجه ناحیهٔ مربوط به فاز سمنتیت پرویوتکتویید وسیعتر می‌شود.



(الف) (ب) (ج) (د)

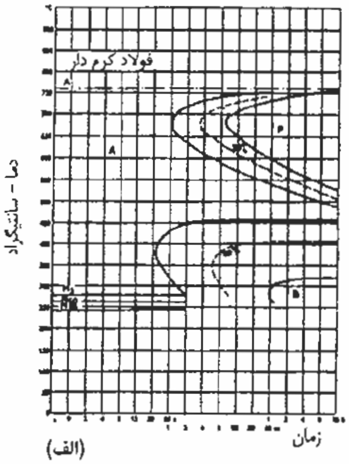
یکی دیگر از تفاوتهای عمده بین نمودارهای IT مربوط به فولادهای کربنی ساده با درصدهای مختلف کربن، عبارت از دماهای M_s و M_f آنهاست (شکل ۴-۷). بدین صورت که هر چه درصد کربن فولاد کمتر باشد دماهای شروع و پایان تشکیل مارتنزیت بالاتر است.



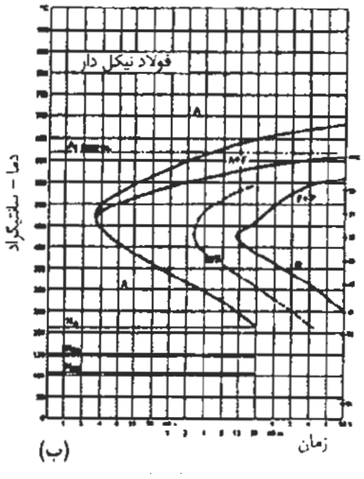
(الف) (ب) (ج) (د)

نمودارهای TTT مربوط به فولادهای آلیاژی

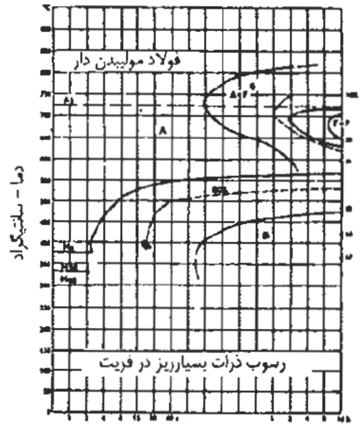
اضافه شدن عناصر آلیاژی مختلف به فولادها اثرات کاملاً متفاوتی بر روی نمودارهای دگرگونی آنها دارد. به عنوان مثال اضافه شدن بیشتر از تقریباً ۳ درصد کرم به فولاد باعث می‌شود که نواحی تشکیل پرلیت و بینیت کاملاً از یکدیگر جدا شوند (شکل ۴-۸(الف)).



در حالی که نیکل
شکل کلی نمودار دگرگونی فولاد را تغییر نداده و تنها آن را به سمت راست جابه‌جا می‌کند (شکل ۴-۸(ب)).



اثر مولیبدن بدین صورت است که دماغهٔ مربوط به تشکیل پرلیت را به مراتب بیشتر از دماغه مربوط به تشکیل بینیت به سمت راست جابه‌جا می‌کند (شکل ۴-۸(ج))



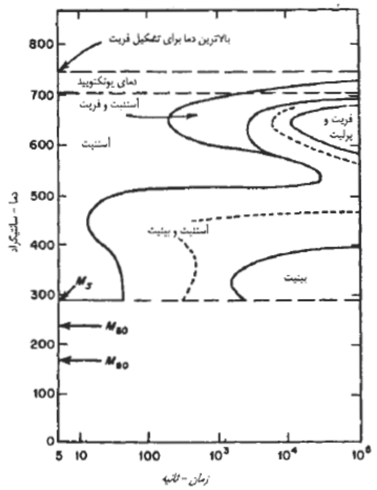
(ج)

عناصری نظیر سیلیسیم، منگنز و تنگستن تا ۲ درصد اثر بسیار کمی بر روی به تأخیر انداختن دگرگونیهای نفوذی دارند. اثرات چند عنصر آلیاژی با یکدیگر بر روی نمودارهای دگرگونی به مراتب بیشتر از اثرات هر کدام از عناصر به تنهایی است. این مطلب حتی در مواردی که مجموعهٔ درصدهای عناصر از درصد یکی از آنها (هنگامی که به تنهایی اضافه شود) کمتر باشد نیز صادق است.

به طور کلی می‌توان گفت در صورتی که عنصر آلیاژی اضافه شده به صورت محلول جامد باشد، نمودار TTT را به سمت راست منتقل می‌کند. به بیان دیگر دگرگونیهای نفوذی را به تأخیر می‌اندازد. در این رابطه عنصر کبالت مستثنی است.

برحسب اینکه عنصر آلیاژی اضافه شده پایدارکنندهٔ فریت و یا پایدارکننده آستنیت باشد، دمای تعادلی تشکیل پرلیت را به ترتیب افزایش و یا کاهش می‌دهد.

نمودار IT مربوط به فولاد کم آلیاژ ۴۳۴۰ با ترکیب شیمیایی
۰/۴۲C٪ ، ۰/۷۸Mn٪ ، ۰/۷۹Ni٪ ، ۰/۸Cr٪ و ۰/۳۳Mo٪ و عدد اندازهٔ دانه ۷-۸



شکل ۴-۹ نمودار دگرگونی همدمای فولاد کم آلیاژ ۴۳۴۰. دمای استنیته کردن ۸۴۵ درجه

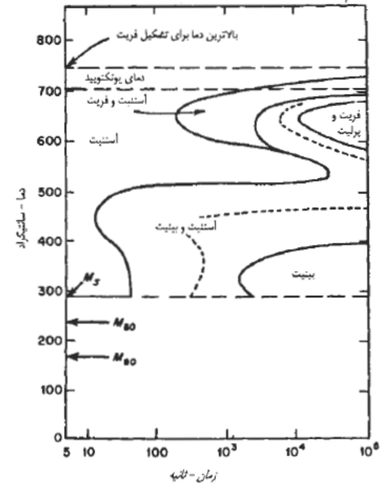
وجود دو دماغه

یکی مربوط به دگرگونی پرلیتی

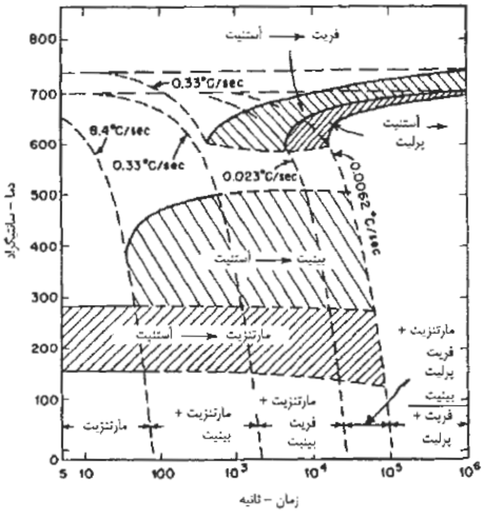
دیگری مربوط به دگرگونی بینیتی

در حوالی دماغه

بالایی و در حدود ۶۵۰ درجه سانتیگراد، حداقل زمان لازم برای تشکیل مقدار قابل ملاحظه‌ای فریت پرویوتکتویید در حدود ۲۰۰ ثانیه است در حالی که در زیر این دماغه و در حدود ۵۵۰ درجهٔ سانتیگراد، حداقل زمان لازم برای تشکیل پرلیت در حدود ۱۸۰۰ ثانیه (یا ۳۰ دقیقه) است. به همین ترتیب حداقل زمان برای تشکیل مقدار قابل ملاحظه‌ای بینیت در حوالی دمای ۴۵۰ درجهٔ سانتیگراد برابر ۱۰ ثانیه است.



نمودار CT مربوط به همان فولاد ۴۳۴۰ در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. هر آهنگ سردشدنی که این فولاد را از دمای آستنیت در مدتی کمتر از ۹۰ ثانیه به دمای اتاق برساند، ساختار نهایی کاملاً مارتنزیتی به وجود می‌آورد.

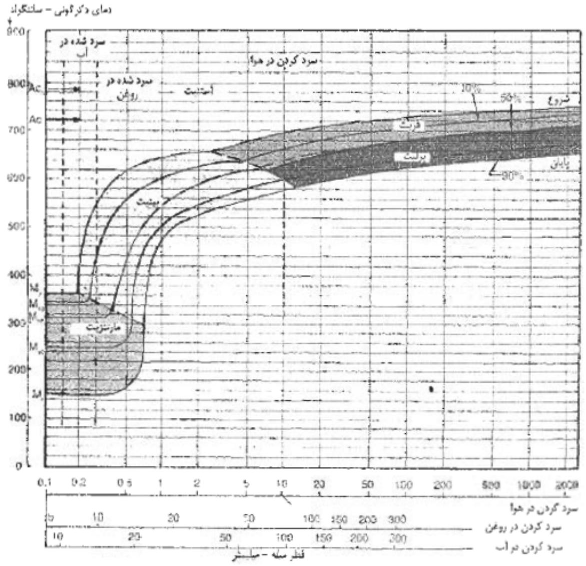


شکل ۴-۱۰ نمودار دگرگونی در سرد شدن پیوسته برای فولاد ۴۳۴۰

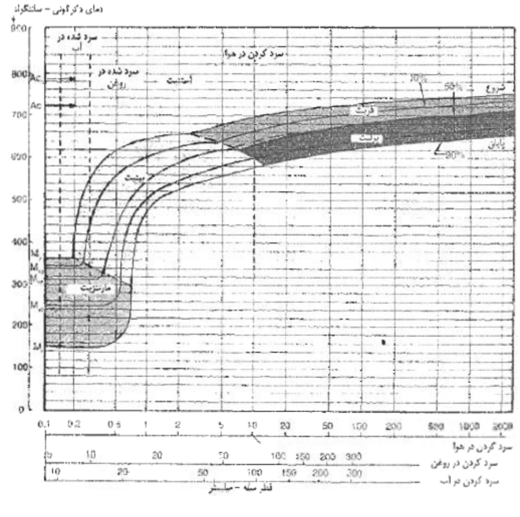
نشان می‌دهد که با اضافه کردن عناصر آلیاژی می‌توان در سردکردن پیوسته نیز ساختاری شامل بینیت کامل گرفت.

نمودارهای دگرگونی در سرد شدن پیوسته و قطر میله

اخیراً مجموعه‌ای از نمودارهای CCT توسط کمپانی فولاد بریتانیا[1] منتشر شده که منحنیهای دگرگونی در سرد شدن پیوسته را به جای زمان برحسب قطر میله نشان می‌دهد. این نمودارها برای بسیاری از فولادهای مهندسی و محیطهای سردکنندهٔ مختلف نظیر آب، روغن و هوا رسم شده‌اند. اهمیت این نمودارها از اینجا ناشی می‌شود که به کمک آنها می‌توان ساختار مرکز میله‌ای با قطر مشخص که پس از آستنیته شدن در یکی از محیطهای بالا سرد شده باشد را به سادگی تخمین زد.



شکل ۴-۱۱ نمودار CT برای فولاد کربنی ساده شامل ٪۰/۷Mn، ٪۰/۲Si و ٪۰/۳۸C دگرگونی و ساختار میکروسکوپی برحسب قطر میله رسم شده‌اند [۱].

همچنان که در این نمودار نشان داده شده است، اگر میله‌ای به قطر ۱۰ میلیمتر از این فولاد پس از آستنیته شدن در آب، روغن و یا هوا سرد شود، ساختار مرکز میله به ترتیب مارتنزیت، بینیت و مارتنزیت و مخلوطی از فریت، پرلیت و مقدار کمی بینیت خواهد بود.