

بسمه تعالی

دانشگاه شهید بهشتی
دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی



فصل ششم: سختی و سختی پذیری

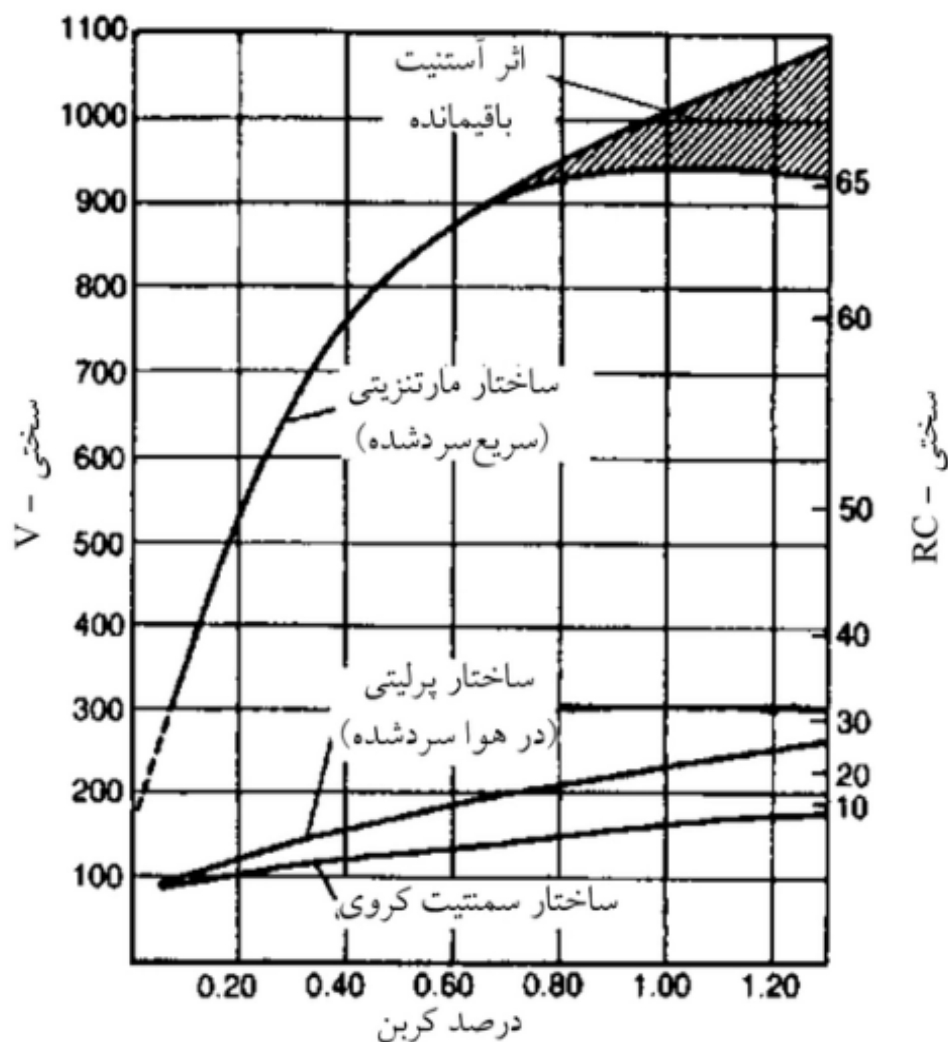
برگرفته از کتاب مبانی و کاربردهای عملیات حرارتی فولادها و چدن ها
(نوشته دکتر محمد علی گل‌عذار)

دکتر محمود سمیع زاده

m_sameezadeh@sbu.ac.ir

فصل ششم - سختی و سختی پذیری

ریزساختار مارتنزیتی، سخت ترین ریزساختاری است که می تواند در یک فولاد ساده کربنی به وجود آید. تشکیل ریزساختار مارتنزیتی در صورتی امکان پذیر است که از دگرگونی آستنیت به مخلوط فریت و سمیتیت در دماهای بالا جلوگیری شود.



* سختی و درصد کربن

از جمله مهم ترین اهداف تشکیل مارتنزیت در فولادها، سختی زیاد، استحکام بالا و مقاومت در برابر خستگی و سایش است.

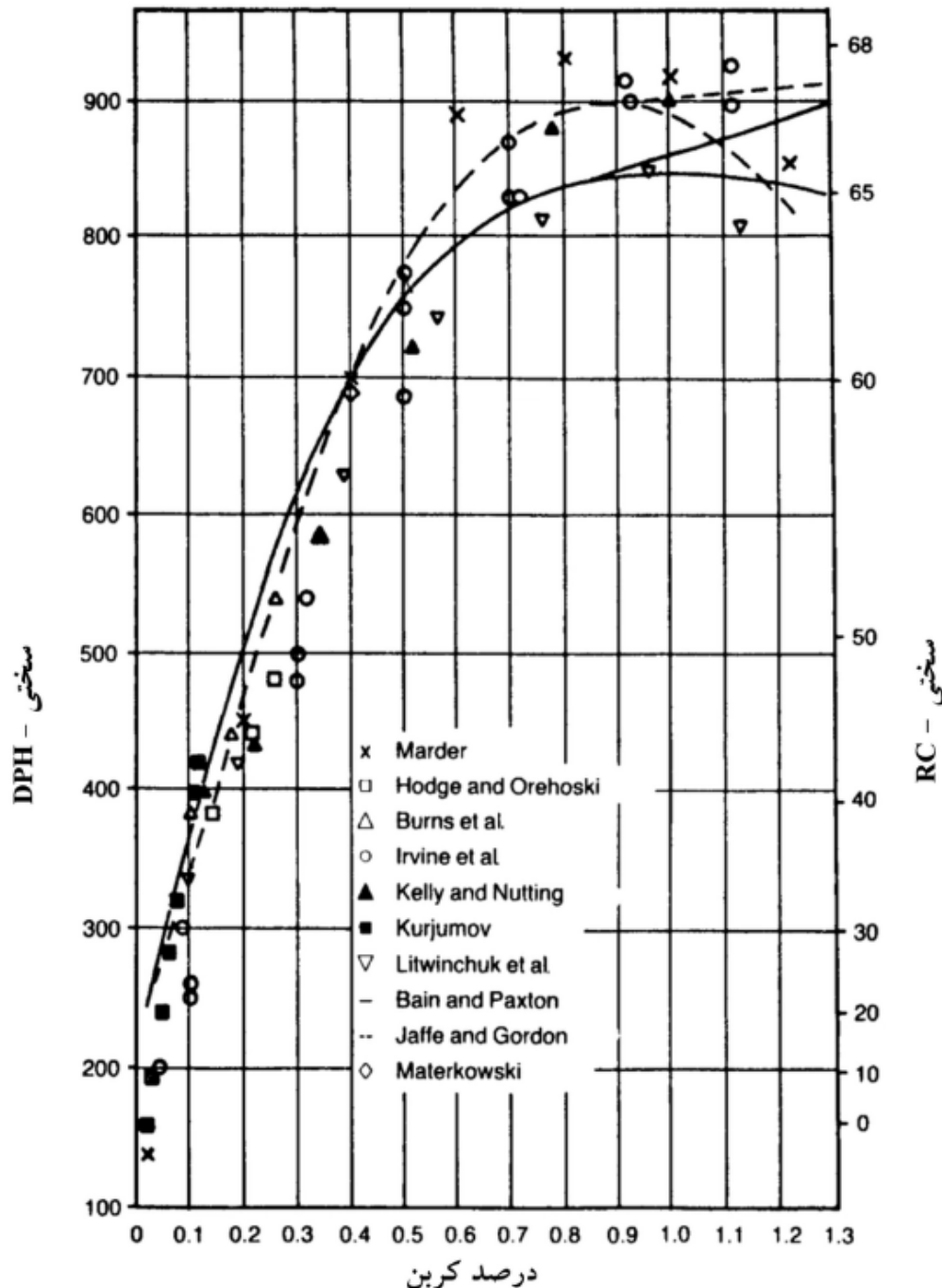
به منظور بهبود خواص مکانیکی، فرآیند سخت کردن (تشکیل مارتنزیت) همراه با **بازگشت (Temper)** می باشد. بطور کلی عملیات حرارتی برای تشکیل مارتنزیت، روی فولادهایی انجام می شود که حداقل ۰/۳ درصد کربن داشته باشند.

شکل ۶-۱ اثر کربن روی سختی فولاد با ساختارهای مارتنزیتی، پرلیتی و سمیتیت کروی. اثر آستنیت باقیمانده روی سختی مارتنزیت توسط ناحیه هاشورزده مشخص شده است [۱].

منطقه هاشور خورده در شکل ۶-۱، اثر **آستنیت** باقیمانده را روی سختی فولاد سریع سرد شده مشخص می‌کند. از آنجایی که با افزایش درصد کربن، دمای M_f کاهش می‌یابد، مقدار آستنیت باقی‌مانده در دمای اتاق نیز افزایش خواهد یافت. به‌منظور کاهش آستنیت باقی‌مانده و در نتیجه افزایش سختی، نمونه‌های فولادی را می‌توان به‌جای سرد کردن در آب، در محیط‌هایی مثل نیتروژن مایع (۱۹۶- درجه سانتیگراد) و یا هلیوم مایع (۲۶۹- درجه سانتیگراد) سریع سرد کرد.

سریع سرد شدن فولاد تا زیر دمای اتاق، بطور کلی در مورد فولادهایی اثر دارد که بیش‌تر از ۰/۴ درصد کربن داشته باشند. این موضوع بدلیل مقدار زیاد و آستنیت باقی‌مانده است که در دمای اتاق در این فولادها وجود دارد.

خط پیوسته تا دمای اتاق سرد شده، خط منقطع در نیتروژن مایع و ضربدر در هلیوم مایع سرد شده است.



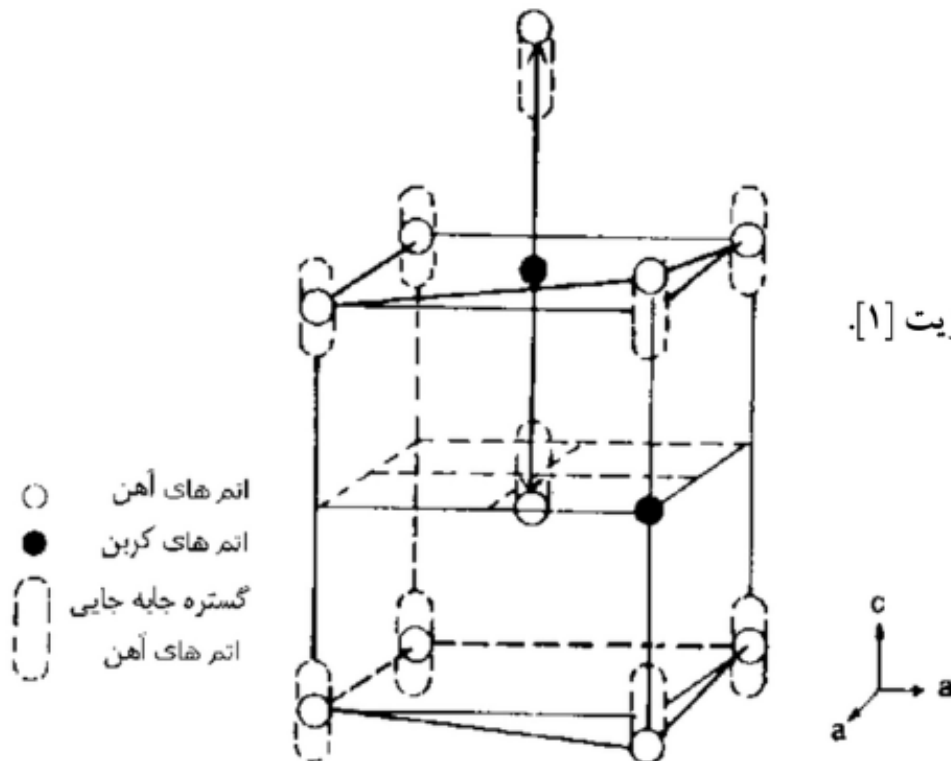
اندازه دانه‌های آستنیت اولیه عامل دیگری است که روی سختی مارتنزیت اثر می‌گذارد.

از آن جایی که مرزدانه‌های آستنیت می‌تواند به‌عنوان یکی از موانع موثر در برابر پیشرفت و رشد صفحه‌های مارتنزیتی عمل کند، هرچه دانه‌های آستنیت اولیه ریزتر باشند، چگالی صفحه‌های مارتنزیتی در واحد حجم بیش‌تر است و سختی مارتنزیت نیز افزایش می‌یابد.

استحکام مارتنزیت

در فصل سوم، در رابطه با نظریه تشکیل مارتنزیت به این نکته اشاره شد که در اثر سریع سرد شدن فولاد از ناحیه آستنیت، اتم‌های کربن در فضاهای هشت‌وجهی شبکه fcc محبوس می‌شوند و از تبدیل آن به شبکه تعادلی bcc در دمای اتاق جلوگیری می‌کنند. این موضوع باعث جابه‌جا شدن اتم‌های آهن از محل‌های استقرار اولیه خود و به وجود آمدن شبکه بلوری bct می‌شود. شکل ۴-۶، جابه‌جایی اتم‌های آهن را در اثر قرار گرفتن اتم‌های کربن در شبکه bct مارتنزیت نشان می‌دهد. در حقیقت، یکی از عوامل عمده افزایش سختی و استحکام مارتنزیت، همین ایجاد اختلال در شبکه بلوری است که در نتیجه حرکت نابجایی‌ها بسیار مشکل می‌شود.

شکل ۴-۶ جابه‌جایی اتم‌های آهن در اثر محبوس شدن اتم‌های کربن در شبکه مارتنزیت [۱].



افزون بر کربن، ساختار فرعی^۱ مارتنزیت نیز در افزایش استحکام نقش مهمی دارد. هم‌چنان که در فصل سوم بحث شد، دگرگونی مارتنزیتی از این نظر منحصربه‌فرد است که انجام آن همراه با به وجود آمدن چگالی بالایی از معایب خطی مانند نابجایی‌ها و یا دوقلوهای ریز و ظریف در ریزساختار فولاد می‌باشد. سهم ساختار فرعی یادشده در افزایش استحکام مارتنزیت، تا حدودی ثابت و مستقل از درصد کربن فولاد است. به جز در مقادیر کم کربن، اثر ساختار فرعی بسیار کمتر از اثر کربنی می‌باشد که به صورت محلول در شبکه بلوری مارتنزیت وجود دارد. بنابراین، استحکام مارتنزیت به طور کلی ناشی از دو عامل است: یکی کربن موجود در شبکه بلوری که به صورت محلول جامد فوق اشباع باشد و دیگری ساختار فرعی که در حقیقت، همان چگالی بالایی از نابجایی‌ها و دوقلوهاست. نتایج به دست‌آمده از ارزیابی‌های انجام‌شده روی فولادهای Fe-Ni-C (با دمای M_s زیر صفر درجه سانتی‌گراد) نشان داده‌اند که در این فولادها استحکام تسلیم مارتنزیت با ۰/۲ درصد انحراف $(\sigma_{0.2})$ ^۱ را می‌توان با تقریب خوبی از معادله زیر به دست آورد:

$$\sigma_{0.2} \text{ (MPa)} = 461 + 1/31 \times 10^3 (\text{wt\% C})^{\frac{1}{2}} \quad (1-6)$$

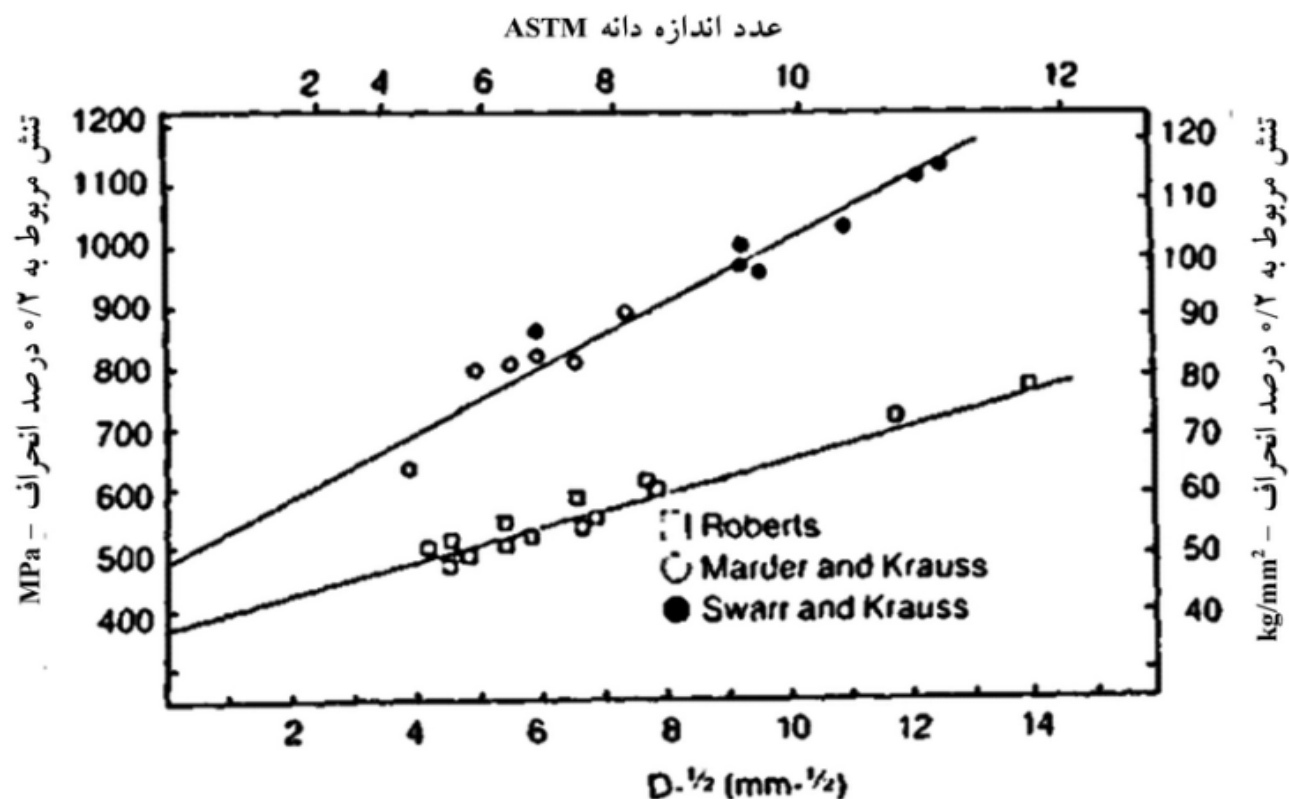
در این معادله، جمله دوم، اثر درصد کربن محلول را روی استحکام مارتنزیت نشان می‌دهد و مشخص می‌کند که استحکام مارتنزیت با ریشه دوم درصد وزنی کربن محلول، ارتباط مستقیم دارد. به بیان دیگر، با افزایش درصد کربن، استحکام مارتنزیت، نخست سریع و سپس به تدریج و آهسته افزایش می‌یابد

از آنجایی که دمای M_s مربوط به فولادهای ساده کربنی، به ویژه فولادهای کم کربن، به نسبت بالاست (شکل ۳-۶)، در ضمن سریع سرد شدن و پیش از رسیدن به دمای اتاق، درصدی از کربن که به صورت محلول در فضاهای هشت وجهی محبوس شده است، نفوذ می کند و روی نابجایی ها، فصل مشترک بین لایه های مارتنزیتی و فصل مشترک بین بسته های مارتنزیتی رسوب خواهد کرد. این فرایند به بازگشت خودبه خود^۲ موسوم است و به نظر می رسد که باید اثر کربن محلول را روی استحکام تسلیم کاهش دهد. ارزیابی ها نشان داده اند که با وجود اثرهای ناشی از رسوب اتم های کربن در عملیات بازگشت خودبه خود، استحکام تسلیم مارتنزیت در این فولادها نیز تابع ریشه دوم درصد وزنی کربن به صورت زیر است:

$$\sigma_{0.2}(\text{MPa}) = 413 + 1.72 \times 10^3 (\text{wt\% C})^{\frac{1}{2}} \quad (2-6)$$

اثر اندازه دانه‌های آستنیت روی استحکام مارتنزیت به این صورت است که با کاهش اندازه دانه‌ها، استحکام مارتنزیت بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

در فولادهای کم کربن و کربن متوسط، لایه های مارتنزیتی به صورت بسته هایی آرایش می یابند که اندازه آنها بطور مستقیم به اندازه دانه های آستنیت اولیه بستگی دارد.

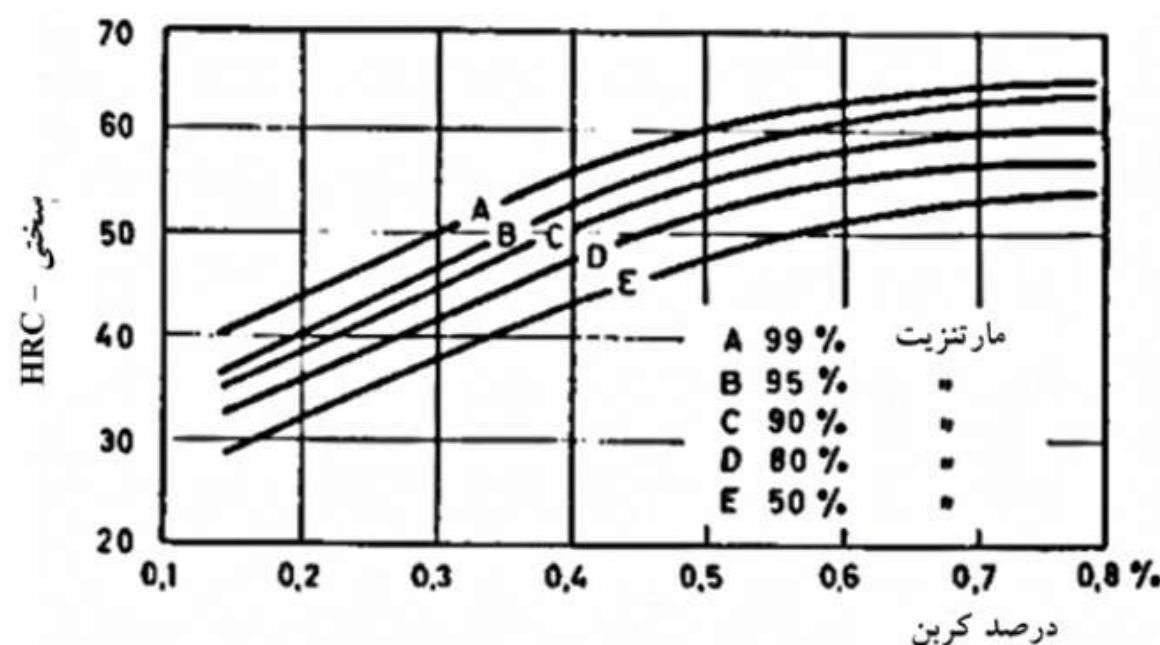


شکل ۵-۶ اثر اندازه بسته‌های مارتنزیت (D) روی افزایش استحکام مارتنزیت لایه‌ای. منحنی بالایی مربوط به فولاد Fe-۰.۲C و منحنی پایینی مربوط به فولاد Fe-Mn است [۱].

سختی پذیری

در صورتی که نرخ سرد شدن یک فولاد از ناحیه آستنیت، بیشتر از نرخ سرد شدن بحرانی^۱ (کمترین نرخ سرد شدنی که از تشکیل پرلیت و بینیت جلوگیری شود) باشد، سختی حاصل به طور کلی بستگی به درصد کربن فولاد دارد. اگر نرخ سرد شدن، کمتر از نرخ سرد شدن بحرانی باشد، درصد مارتنزیت حاصل کاهش می یابد و بنابراین، سختی فولاد نیز کاهش خواهد یافت. در اینجا منظور از کربن فولاد، مقدار کربنی است که در آستنیت به صورت محلول جامد باشد. به بیان دیگر، آن مقدار کربنی که پس از آستنیت شدن فولاد به صورت کاربید باقی می ماند، در دگرگونی تشکیل مارتنزیت شرکت نمی کند و بنابراین، اثری روی سختی مارتنزیت نخواهد داشت. ارتباط بین سختی، درصد کربن و درصد مارتنزیت در شکل ۶-۶ نشان داده شده است.

۱-Critical Cooling Rate (CCR)



شکل ۶-۶ ارتباط بین سختی، درصد کربن و درصد مارتنزیت [۶].

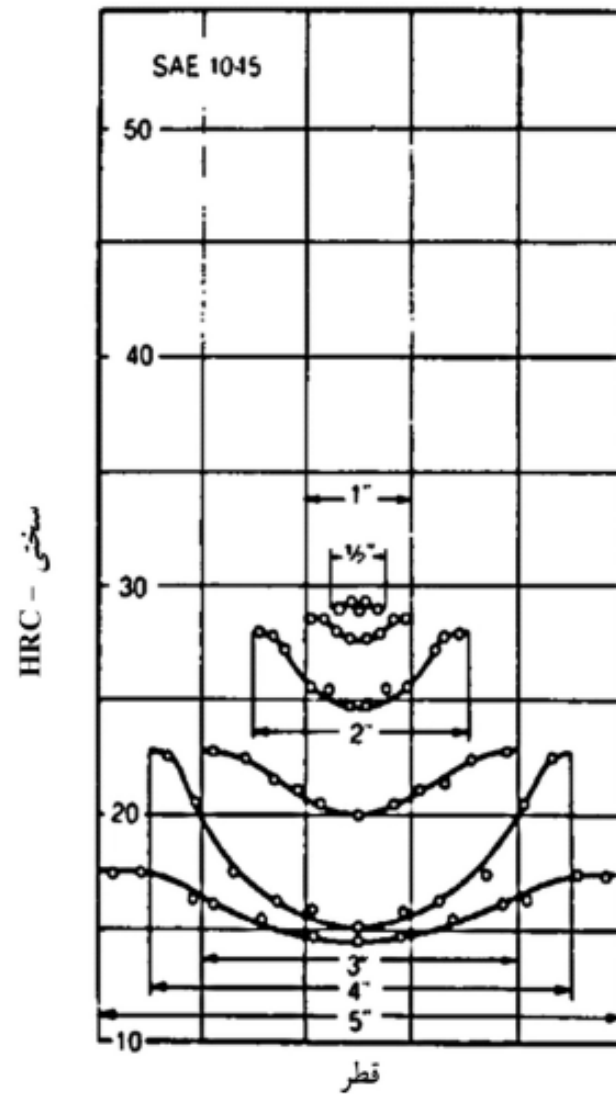
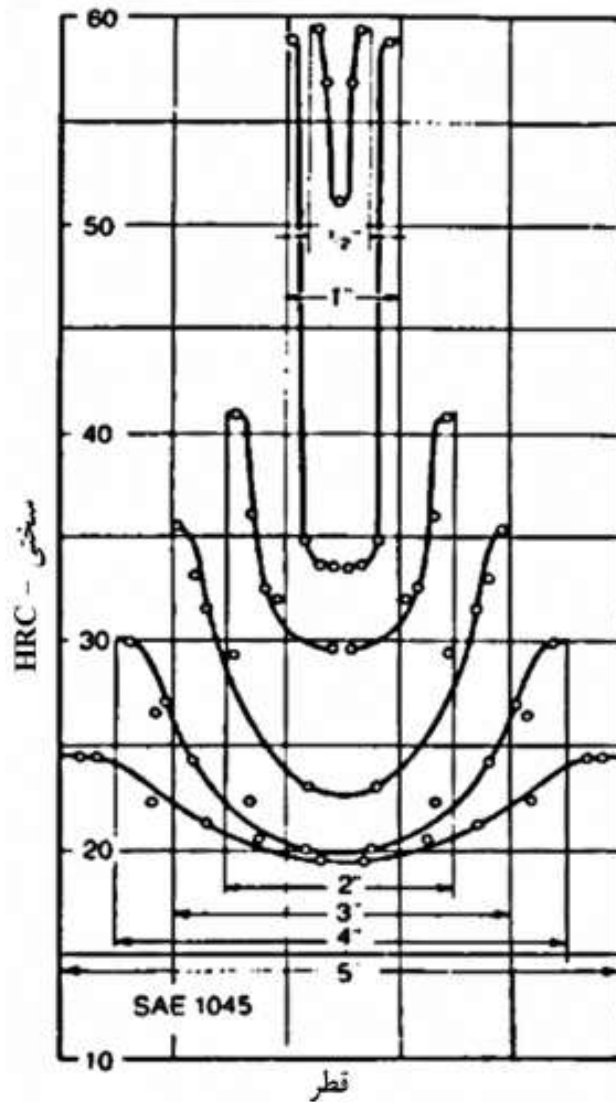
سختی پذیری، توانایی یا قابلیت تشکیل مارتنزیت (و سخت شدن فولاد) در اثر سریع سرد شدن از ناحیه آستنیت است. سختی پذیری توسط ضخامت پوسته سخت شده مشخص می شود. ضخامت پوسته سخت شده، فاصله سطح تا محلی داخل نمونه است که دارای ۵۰ درصد مارتنزیت باشد. به طور کلی، ۵۰ درصد بقیه ساختار را بینیت در نظر می گیرند. بنابراین هر چه سختی پذیری یک فولاد بیشتر باشد، ضخامت پوسته سخت شده و یا به عبارت دیگر، ضخامت پوسته ای که در اثر سریع سرد شدن، بیشتر از ۵۰ درصد ساختار آن مارتنزیت شود، بیشتر خواهد بود. گفتنی است که ضخامت لایه یا پوسته سخت شده تابع دو سری عامل می باشد:

الف) عوامل ذاتی مانند درصد کربن، درصد عناصر آلیاژی و اندازه دانه

ب) عوامل غیرذاتی مانند محیط سردکننده و ابعاد قطعه.

سختی پذیری توسط عوامل ذاتی تعریف می شود. این موضوع در ادامه، بیشتر بحث خواهد شد.

توزیع سختی در یک قطعه



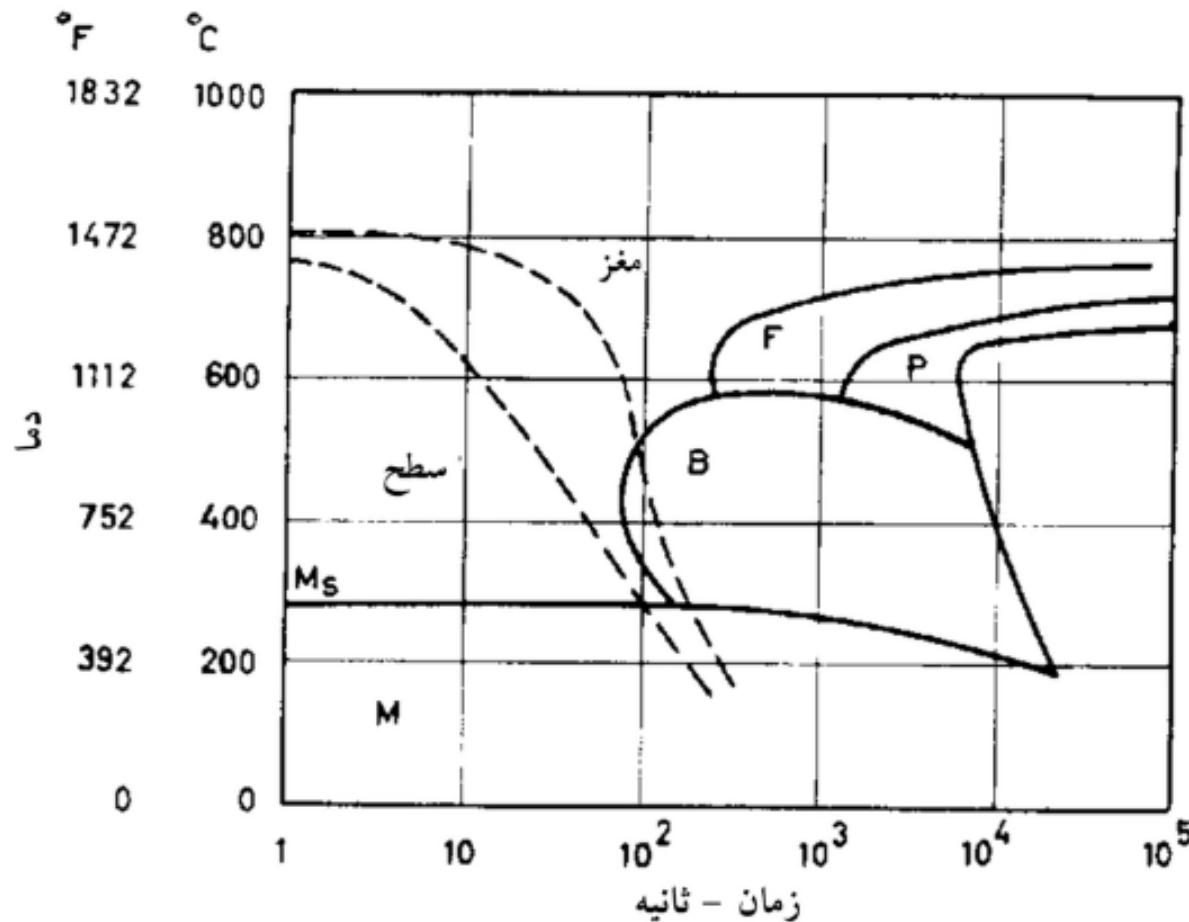
بدون توجه به محیط سرد کننده، بیشترین سختی در هر نمونه مربوط به سطح آن است. در واقع سختی از سطح بطرف مرکز کاهش می‌یابد.

دلیل اینکه چرا سختی سطح بیشتر می‌شود، به کمک دیاگرامهای CCT قابل توجیه است.

شکل ۶-۸ توزیع سختی در میله‌هایی با قطرهای متفاوت از جنس فولاد SAE ۱۰۴۵ که در روغن سریع سرد شده باشند [۱].

شکل ۶-۷ توزیع سختی در میله‌هایی با قطرهای متفاوت از جنس فولاد SAE ۱۰۴۵ که در آب سریع سرد شده باشند [۱].

از آنجایی که نرخ سرد شدن سطح بطور چشمگیری بیش تر از نرخ سرد شدن مرکز است، منحنی سرد شدن سطح نمونه از سمت چپ منحنی سرد شدن بحرانی می‌گذرد و در نتیجه در سطح فقط مارتنزیت تشکیل می‌شود. از طرفی، در مرکز نمونه افزون بر مارتنزیت، مقداری بینیت نیز تشکیل می‌شود که در نتیجه، سختی کاهش می‌یابد.



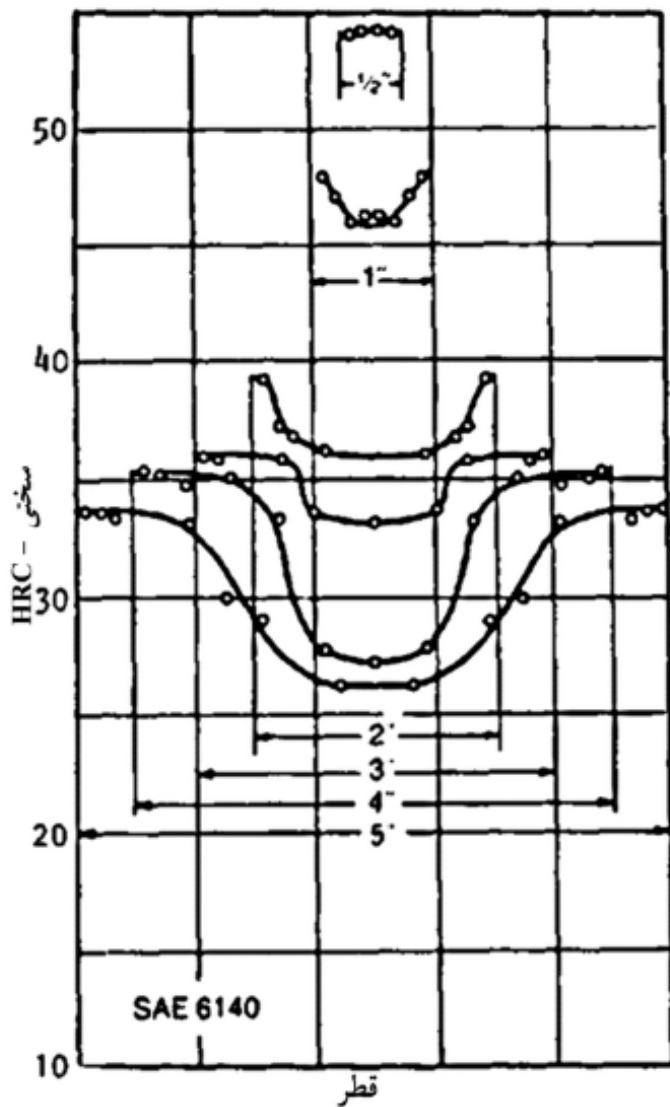
شکل ۶-۹ شمایی از منحنی‌های سرد شدن برای سطح و مغز نمونه‌ای به قطر ۹۵ میلی‌متر که پس از آستنیت شدن، در روغن سریع سرد شده باشد. سطح، به طور کامل مارتنزیت شده است، در حالی که مغز نمونه دارای مارتنزیت و مقداری بینیت بالایی است [۶].

□ با افزایش قطر یا ضخامت، سختی تمام نقاط از جمله سطح و مرکز نمونه کاهش می‌یابد. با افزایش ابعاد قطعه، نرخ سرد شدن در تمام نقاط کاهش می‌یابد. در نتیجه در مرکز قطعه پرلایت و فریت تشکیل می‌گردد و از آن جایی که با افزایش ابعاد، منحنی سرد شدن سطح به سمت راست منتقل می‌شود، علاوه بر سختی مرکز، سختی سطح نیز کاهش می‌یابد.

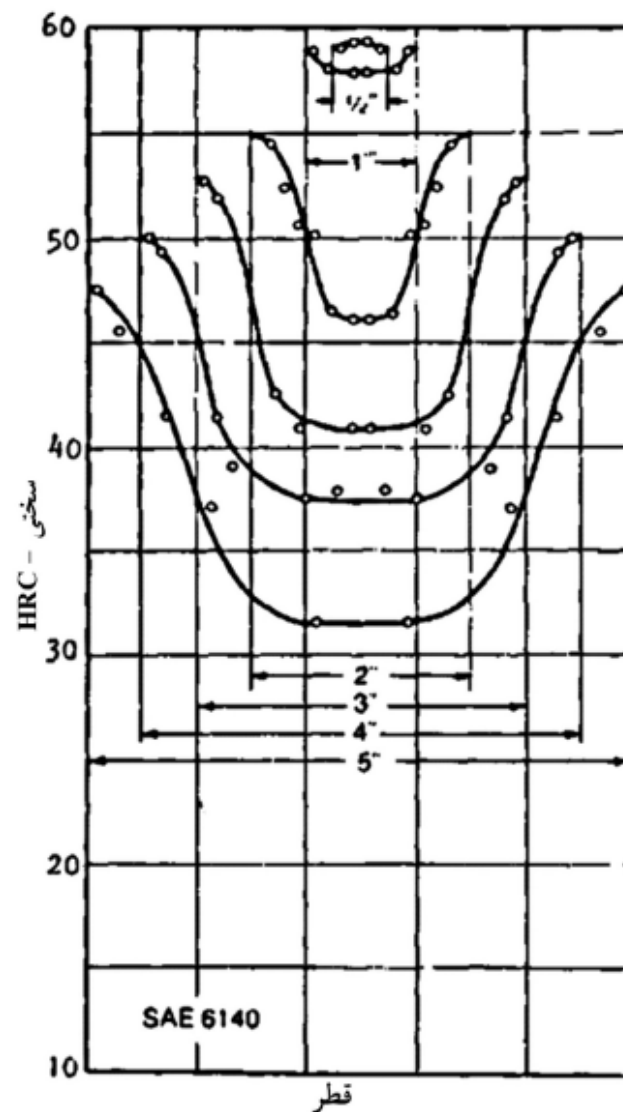
□ عامل دیگری که روی توزیع سختی در نمونه فولادی اثر دارد، شدت سرد کنندگی محیط است. از آن جایی که روغن نسبت به آب، محیط سرد کننده ملایم‌تری است، نرخ سرد شدن میله‌های مختلف در روغن بسیار کم‌تر از آب می‌باشد.

□ از جمله عوامل دیگری که روی توزیع سختی اثرگذار می‌باشد، نوع عنصر آلیاژی و مقدار کمی آن در فولاد است. بطور کلی عناصر آلیاژی بجز کبالت اگر بصورت محلول در آستنیت باشند، سختی نقاط مختلف نمونه سریع سرد شده را افزایش می‌دهند.

□ در رابطه با کبالت، این عنصر انرژی فصل مشترک بین فریت-سمنتیت را کاهش می‌دهد و در نتیجه، نیرو محرکه (Driving force) لازم برای تشکیل پرلایت از آستنیت را کاهش خواهد داد.



شکل ۶-۱۱ توزیع سختی در میله‌های فولادی SAE ۶۱۴۰ با قطرهای مختلف که در روغن سریع سرد شده باشند [۱].



شکل ۶-۱۰ توزیع سختی در میله‌های فولادی SAE ۶۱۴۰ با قطرهای مختلف که در آب سریع سرد شده باشند [۱].

مقایسه با شکل‌های قبلی مربوط به فولاد ۱۰۴۵، نشان می‌دهد که سختی نقاط مختلف فولاد آلیاژی ۶۱۴۰ همواره بیشتر از سختی نقاط مشابه فولاد ساده کربنی مذکور است.

نقش عناصر آلیاژی، کاهش نفوذ و در نتیجه افزایش مدت زمان لازم برای تجزیه آستنیت به مخلوط فریت و سمنتیت و بنابراین فراهم کردن امکان تشکیل مارتنزیت در نرخ‌های سرد شدن کم‌تر است.

درواقع وجود این عناصر، نمودار TTT را به سمت راست جابه‌جا می‌کند.

SAE ۶۱۴۰

%۰/۹۴Cr %۰/۱۷V %۰/۷۳Mn %۰/۰۲۷P %۰/۰۲۳S %۰/۰۴۲C

عوامل موثر بر سختی پذیری

در صورتی سختی پذیری یک فولاد زیاد است که حتی در نرخ‌های سرد شدن نسبتاً آهسته نیز دگرگونی نفوذی **تشکیل پرلیت انجام نشود** و آستنیت به مارتنزیت تبدیل شود. هر عاملی که خطوط تشکیل پرلیت در نمودار CCT را به سمت راست منتقل کند، امکان تشکیل مارتنزیت در نرخ‌های سرد شدن کم‌تر را فراهم می‌کند. بنابراین **انتقال دماغه نمودار CCT به سمت راست همراه با افزایش سختی پذیری است.**

عوامل افزایش سختی پذیری فولاد عبارت‌اند از:

۱- اندازه دانه‌های آستنیت

در حالی که نرخ رشد پرلیت مستقل از **اندازه دانه‌های آستنیت** است، تعداد **جوانه‌هایی** که در واحد زمان تشکیل می‌شوند، بطور مستقیم با محل‌های مناسب برای تشکیل آن‌ها (مرزدانه‌ها) متناسب است. **در یک فولاد با دانه‌های ریز (افزایش سطح مربوط به مرزدانه‌ها)، تشکیل پرلیت، بسیار سریع‌تر است.** به عبارت دیگر زمان لازم برای تشکیل پرلیت در فولادهای ریزدانه، کمتر از درشت دانه است. در نتیجه سختی پذیری فولاد با دانه‌های درشت بیش‌تر است. **اما استفاده از فولاد با دانه‌های درشت معایبی دارد،** از جمله: افزایش تردی و کاهش انعطاف پذیری، ترک‌های ناشی از سریع سرد شدن یا ترک‌های ناشی از شوک حرارتی حین عملیات حرارتی.

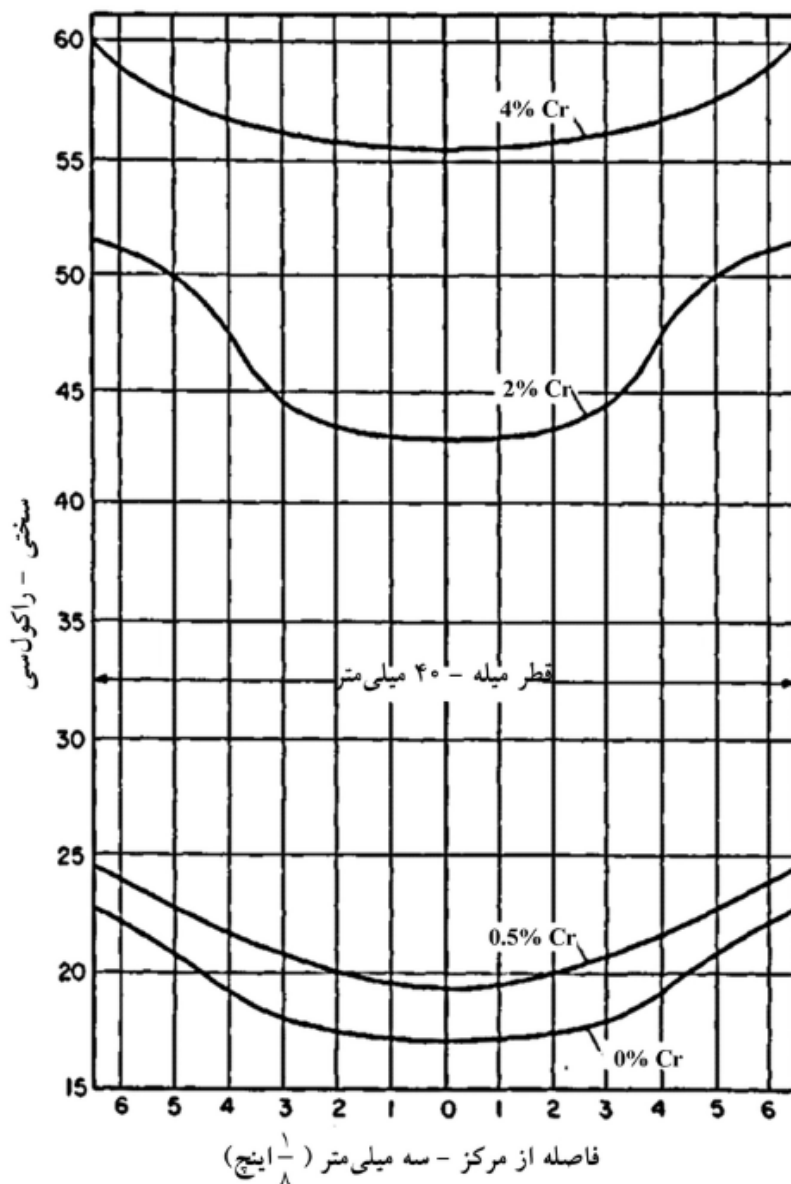
۲- درصد کربن

اگر کربن بصورت **محلول جامد** در آستنیت باشد، افزایش آن باعث افزایش سختی پذیری می شود. با افزایش درصد کربن، تشکیل پرلیت و فاز پرویوتکتوئید مشکل تر می شود و در نتیجه نمودار CCT به سمت راست جابه جا می شود. از آنجایی که با افزایش درصد کربن، باید درصد کربن بیشتری نفوذ کند یا جابجا شود تا اینکه پرلیت/فریت بوجود آید، نیاز به زمان بیشتری است.

این موضوع، نه تنها برای فولادهای

هیپویوتکتوئید، بلکه برای فولادهای هایپریوتکتوئید که پیش از سریع سرد شدن، به طور کامل آستنیت شده باشند نیز صادق است. در بخش های بعدی خواهیم دید که به منظور سخت کردن، فولادهای هایپریوتکتوئید را در عمل، در ناحیه دو فازی آستنیت - سمیتیت آستنیت می کنند. در این حالت، درصد کمی از کربن در آستنیت حل نمی شود و به صورت سمیتیت پایدار باقی می ماند. در ضمن سرد شدن، ذره های سمیتیت حل نشده باعث افزایش جوانه زنی پرلیت و در نتیجه، کاهش سختی پذیری می شوند.

۳- عناصر آلیاژی



شکل ۶-۱۲ توزیع سختی در میله‌های فولادی به قطر ۴۰ میلی‌متر ($\frac{1}{8}$ اینچ). درصد کربن فولادها، ۰/۳۵ است و درصد کروم روی منحنی‌های سختی نشان داده شده است. میله‌ها در روغن سریع سرد شده و عاری از کاربید کروم حل‌نشده بوده‌اند [۱۶].

همانطور که گفته شد، **عناصر آلیاژی به جز کبالت**، تا حدی که در آستنیت بطور کامل حل شده باشند، سختی‌پذیری را افزایش می‌دهند.

شکل ۶-۱۲ نشان می‌دهد که با **افزایش درصد کروم محلول در آستنیت**، سختی‌پذیری افزایش می‌یابد.

یک عنصر **کاربیدساز** که در آستنیت حل نشده باشد، بصورت ذره‌های کاربید در ساختار ظاهر می‌شود و مانع از رشد دانه‌های آستنیت می‌گردد و سختی‌پذیری فولاد را کاهش می‌دهد.

کاربیدهای حل نشده، درصد کربن و عناصر آلیاژی محلول در آستنیت را نیز کاهش می‌دهند. برخی مواقع، سریع سرد شدن فولاد از دمای بالاتر باعث افزایش عمق سختی فولاد می‌شود. درحقیقت افزایش دمای آستنیت‌کردن باعث **انحلال کاربیدها و همچنین افزایش اندازه دانه‌های آستنیت** خواهد شد.

۴- آخال‌ها (ناخالصی‌های نافلزی)

آخال‌ها (Inclusions) بصورت ذره‌های بسیار ریز در ریزساختار فولاد توزیع می‌شوند و از رشد دانه‌های آستنیت جلوگیری خواهند کرد. این ذره‌ها به‌عنوان محل‌های تشکیل پرلیت عمل می‌کنند. به این ترتیب، آخال‌ها سختی‌پذیری را کاهش خواهند داد. موارد زیادی پیش می‌آید که دانه‌های یک فولاد در اثر آستنیت‌شدن در دمای بالا بزرگ‌تر می‌شوند، اما سختی‌پذیری آن چندان بهبود نمی‌یابد. این پدیده می‌تواند ناشی از وجود آخال‌های زیادی باشد که در ریزساختار فولاد همچنان باقی می‌مانند و باعث سهولت جوانه زنی و تشکیل پرلیت می‌شوند.

۵- همگن بودن ریزساختار

بعضی از کاربردهای آلیاژی مانند کاربردهای کروم و مولیبدن نرخ انحلال کم‌تری در آستنیت دارند، بنابراین برای انحلال کامل این کاربردها گاهی نیاز است که فولاد در دمایی بالاتر و یا برای زمانی طولانی‌تر آستنیت‌شود. در مواردی که فولاد پیش از انحلال کامل کاربردها و توزیع یکنواخت آن‌ها در آستنیت، سریع سرد گردد، نواحی مختلف آستنیت از نظر ترکیب شیمیایی همگن نخواهند بود و سختی‌پذیری نقاطی که از نظر درصد کربن و عناصر آلیاژی فقیرند، کم خواهد بود. همچنین نواحی پرکربن که از نظر درصد عنصر آلیاژی نیز غنی هستند، از سختی‌پذیری خوبی برخوردار خواهند بود. به‌طور کلی ناهمگن بودن آستنیت از نظر ترکیب شیمیایی باعث کاهش سختی‌پذیری فولاد می‌شود. این عیب را می‌توان با افزایش دما و یا زمان آستنیت‌کردن و در نتیجه انحلال بیشتر و یکنواخت‌تر کاربردها، برطرف کرد.

نرخ سرد شدن و عوامل اثرگذار

□ نرخ سرد شدن یک فولاد تحت اثر دو عامل مهم تغییر می کند:

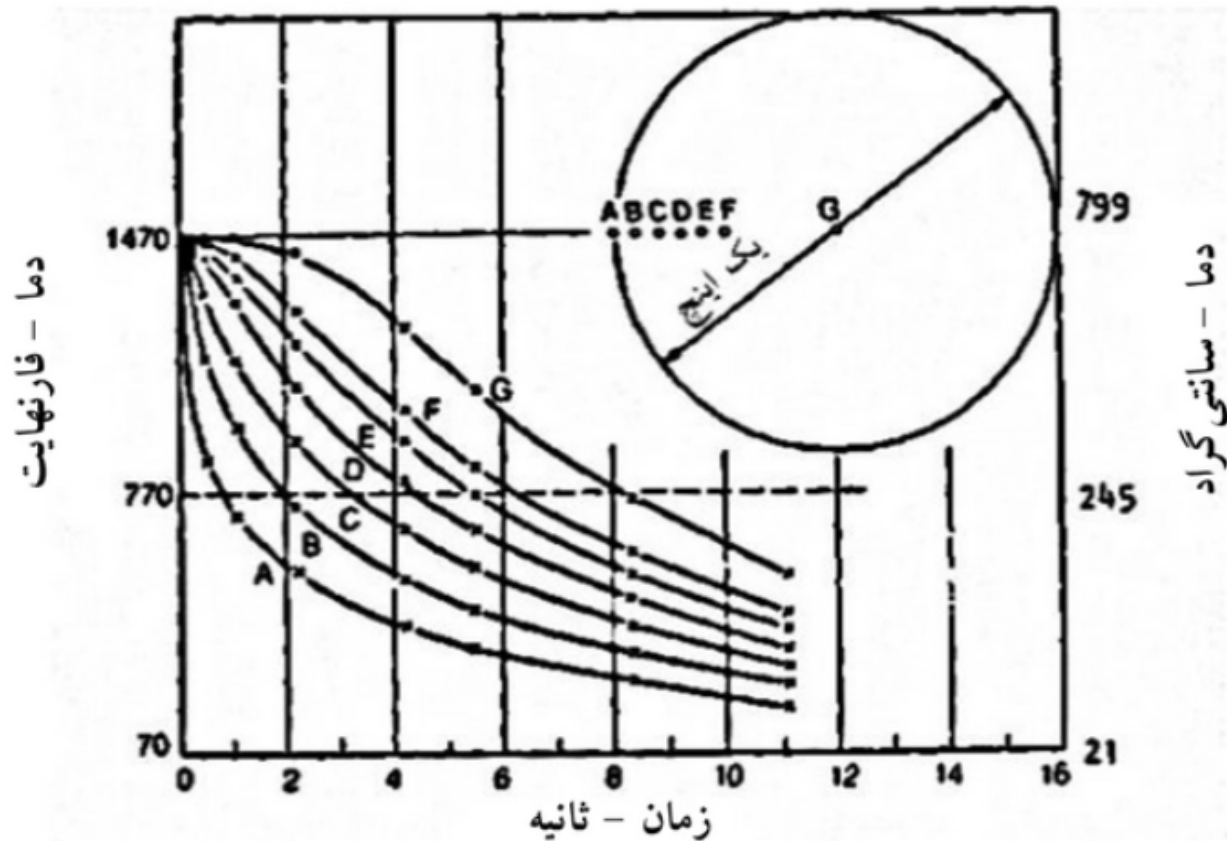
1. انتقال حرارت از داخل به سطح نمونه فولادی
2. انتقال حرارت از سطح قطعه توسط محیط سرد کننده

□ توانایی انتقال حرارت یک فولاد، توسط پارامتر نفوذ حرارتی (Thermal diffusivity) یا نسبت هدایت حرارتی به گرمای ویژه حجمی آن مشخص می شود.

□ برای یک محیط سرد کننده سریع، نفوذ حرارتی، مشخص کننده توزیع دما در ناحیه سریع سرد شونده در هر لحظه است.

نرخ‌های سرد شدن آهسته‌تر در نقاط دور از سطح و نزدیک مرکز، زمان بیش‌تری را برای انجام دگرگونی نفوذی فراهم می‌کنند (سبب سختی کمتر مرکز میله نسبت به سطح). این پدیده به‌ویژه در میله‌های با قطر زیاد، بارزتر است.

انتقال حرارت در فصل مشترک قطعه فولادی با محیط سرد کننده آن، بستگی به شدت تشعشع حرارت از سطح فولاد و جریان‌های جابجایی (Convection) در محیط سرد کننده دارد. این امر باعث دور کردن گرما از فصل مشترک فلز-محیط می‌شود.



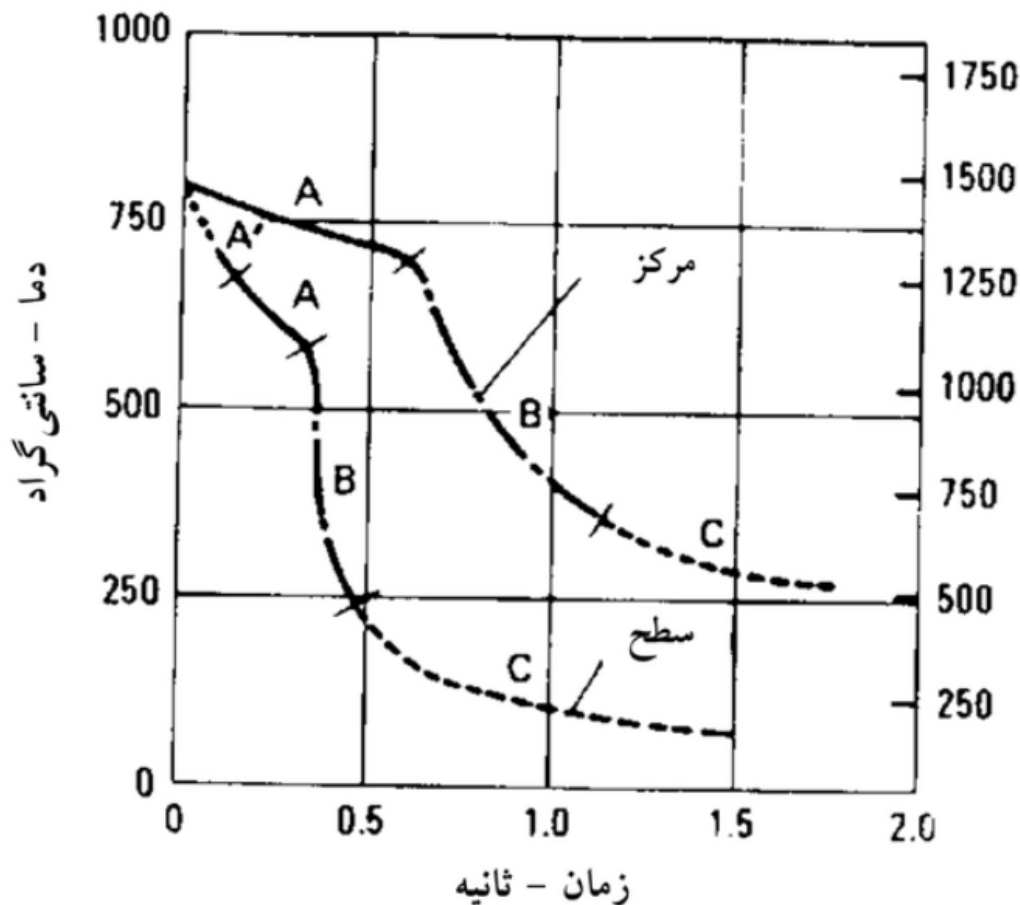
شکل ۶-۱۴ منحنی‌های سرد شدن نقاط مختلف یک میله به قطر ۲۵/۴ میلی‌متر (یک اینچ)، وقتی که در محیطی با شدت سردکنندگی $H=4$ سریع سرد شده باشد [۱].

چهار مرحله سرد شدن جامد داغ در مایع سرد (شکل ۶-۱۵)

Initial liquid contact stage

مرحله A': نخستین مرحله تماس با مایع

این مرحله شامل تشکیل حباب‌های بخار روی سطح نمونه است که سپس منجر به تشکیل لایه بخار (مرحله A) می‌شود. این مرحله فقط حدود ۰/۱ ثانیه طول می‌کشد. اهمیت این مرحله کم است و در صورتی که مایع سرد کننده دارای گرانروی بالایی باشد، دارای گاز باشد و یا در دمایی نزدیک دمای جوش استفاده شود، این مرحله از بین می‌رود.



شکل ۶-۱۵ منحنی‌های سرد شدن سطح و مرکز، نشان‌دهنده مراحل مختلف انتقال حرارت از یک جامد داغ به یک مایع سرد [۱۱].

مرحله A: مرحله سرد شدن توسط لایه بخار

Vapor blanket cooling stage

این مرحله، شامل تشکیل یک لایه بخار پایدار در اطراف قطعه و در نتیجه، جدا کردن آن از محیط سرد اطراف است. این مرحله را هنگامی خواهیم داشت که گرمای حاصل از سطح نمونه از مقدار گرمای لازم برای به صورت بخار درآوردن مایع در واحد سطح قطعه بیشتر باشد.

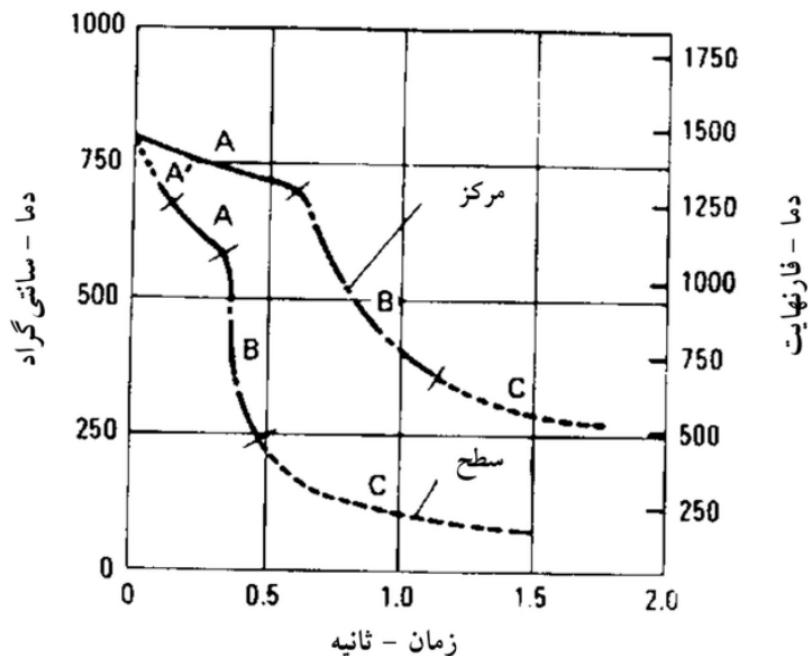
این مرحله یکی از **مراحل آهسته سرد شدن** است. این مرحله در برخی محلول‌ها و محیط‌ها دیده نمی‌شود و نمودارهای سرد شدن در این محیط‌ها از مرحله B شروع می‌شوند. در صورت استفاده از موادی مانند موارد زیر، در مرحله A لایه‌ای از مواد موجود در محیط روی سطح قطعه رسوب می‌کند و باعث طولانی شدن مراحل A و C می‌شود:

(۱) محلول‌های اشباع باریم هیدروکسید، کلسیم هیدروکسید و یا مواد مشابه دیگر که به مقدار

کم در آب محلول‌اند.

(۲) محلول‌هایی که شامل ذره‌های جامد بسیار ریز و معلق باشند.

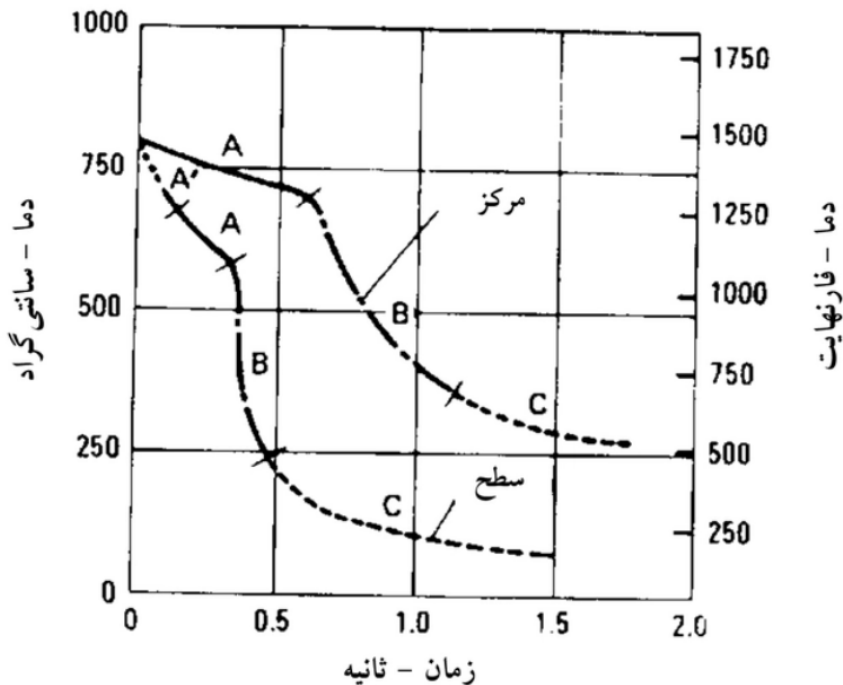
(۳) محلول‌های کلوییدی که در آب استفاده می‌شوند.



این مرحله، بیشترین نرخ انتقال حرارت را در بین مراحل مختلف دارد و هنگامی شروع می شود که دمای سطح فلز آن قدر کاهش یابد که سبب ناپایداری لایه بخار شود و در نتیجه، لایه بخار به قطره های مایع تبدیل گردد. این قطره ها پس از تماس دوباره با فلز، بلافاصله بخار می شوند و در اثر جذب گرمای نهان از قطعه، باعث سرد شدن سریع آن خواهند شد. مدت زمان و نرخ سرد شدن در این مرحله توسط عوامل مختلفی مانند دمای جوش مایع و اندازه و شکل حباب های بخار کنترل می شوند.

Liquid cooling stage

مرحله C: مرحله سرد شدن توسط مایع



نرخ سرد شدن در این مرحله از مراحل A و B کم تر است. این مرحله هنگامی شروع می شود که دمای سطح فلز تا زیر دمای نقطه جوش مایع سرد کننده کاهش یابد. دفع حرارت از این لحظه به بعد توسط هدایت و جابجایی انجام می شود. از جمله عوامل اثرگذار روی نرخ سرد شدن در این مرحله، **گرانروی مایع** و **اختلاف دما بین دمای محیط و دمای جوش آن** است.

شدت سرد کنندگی^۱ محیط

اثر یک محیط سرد کننده توسط پارامتر انتقال حرارت معادل^۲، که مشخص کننده شدت یا قدرت سرد کنندگی محیط است، توسط حرف H نشان داده می‌شود.

$$H = \frac{F}{K}$$

که در این معادله، F، پارامتر انتقال حرارت^۳ با واحد Btu/in.sec.°F و K، هدایت حرارتی^۴ فولاد با واحد Btu/in.sec.°F است.

بطور کلی با افزایش مقدار H، شدت سرد کنندگی محیط نیز افزایش می‌یابد. بیش‌ترین شدت سرد کنندگی ممکن مربوط به $H=\infty$ می‌شود. محیطی دارای **شدت سرد کنندگی بینهایت است** که به محض قرار گرفتن نمونه در آن، دمای سطح به دمای محیط سردکننده می‌رسد و در تمام مدت سرد شدن نیز در آن دما باقی می‌ماند. به چنین محیطی، **محیط ایده‌آل** گفته می‌شود.

۱-Severity of quench

۲-Heat transfer equivalent

۳-Heat transfer factor

۴-Thermal conductivity

جدول ۶-۱ شدت سردکنندگی (H) برای محیط‌های مختلف* [۱].

نرخ سرد شدن از دمای ۷۱۷ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد (۱۰۲۲ تا ۶۵ درجه فارنهایت) نسبت به آب ۱۸ درجه سانتی‌گراد (۶۵ درجه فارنهایت)			نرخ سرد شدن از دمای ۷۱۷ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد (۱۰۲۲ تا ۶۵ درجه فارنهایت) نسبت به آب ۱۸ درجه سانتی‌گراد (۶۵ درجه فارنهایت)		
نوع محیط	نسبت	نرخ سرد شدن از دمای ۷۱۷ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد (۱۰۲۲ تا ۶۵ درجه فارنهایت) نسبت به آب ۱۸ درجه سانتی‌گراد (۶۵ درجه فارنهایت)	نوع محیط	نسبت	نرخ سرد شدن از دمای ۷۱۷ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد (۱۰۲۲ تا ۶۵ درجه فارنهایت) نسبت به آب ۱۸ درجه سانتی‌گراد (۶۵ درجه فارنهایت)
محلول آبی ۱۰ درصد LiCl	۲/۰۷	روغن ۲۰۲۰۴	۰/۲		
محلول آبی ۱۰ درصد NaOH	۲/۰۶	آب در ۱۲۲ درجه فارنهایت	۰/۱۷	50 °C	
محلول آبی ۱۰ درصد NaCl	۱/۹۶	روغن ۲۵۴۴۱	۰/۱۶		
محلول آبی ۱۰ درصد Na ₂ SO ₄	۱/۳۸	روغن ۱۴۵۳۰	۰/۱۴		
محلول آبی ۱۰ درصد H ₂ SO ₄	۱/۲۲	آب دارای ۱۰ درصد روغن	۰/۱۱		
آب در ۲۲ درجه فارنهایت	۱/۰۶	صفحه‌های مسی	۰/۱۰		
آب در ۶۵ درجه فارنهایت	۱/۰۰	آب صابون	۰/۰۷۷		
محلول آبی ۱۰ درصد H ₃ PO ₄	۰/۹۹	صفحه‌های آهنی	۰/۰۶۱		
جیوه	۰/۷۸	تتراکلرید کربن	۰/۰۵۵		
Cd, Sn در ۳۶۵ درجه فارنهایت	۰/۷۷	هیدروژن	۰/۰۵۰		
آب در ۷۷ درجه فارنهایت	۰/۷۲	آب در ۱۶۶ درجه فارنهایت	۰/۰۴۷	74.4 °C	
روغن نباتی	۰/۳	آب در ۲۱۲ درجه فارنهایت	۰/۰۴۴	100 °C	
روغن P ₂ O	۰/۳۳	هوای مایع	۰/۰۳۹		
روغن ۱۲۴۵۵	۰/۲۲	هوا	۰/۰۲۸		
گلیسرین	۰/۲	خلأ	۰/۰۱۱		

* شدت‌های سردکنندگی (H) در این جدول به کمک سریع سرد کردن یک گلوله از جنس نیکل - کروم (Nichrome) به قطر چهار میلی‌متر به دست آمده‌اند. این گلوله هنگامی که از ۸۶۰ درجه سانتی‌گراد (۱۵۸۰ درجه فارنهایت) در آب ۱۸ درجه سانتی‌گراد (۶۵ درجه فارنهایت) سرد شود، در بازه دمایی ۷۱۷ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد (۱۰۲۲ تا ۶۵ درجه فارنهایت) با نرخ معادل ۱۸۱۰ درجه سانتی‌گراد (۳۲۶۰ درجه فارنهایت) بر ثانیه سرد می‌شود. این نرخ سرد شدن را به عنوان واحد (۱/۰۰) اختیار می‌کنند و شدت سردکنندگی محیط‌های دیگر را نسبت به آن می‌سنجند.

جدول ۶-۲ اثر تلاطم روی شدت سردکنندگی (H) برای چند محیط مختلف [۱].

شرایط محیط				نوع محیط
				آب نمک
				آب
				روغن
				هوا
هیچ نوع حرکت نسبی بین قطعه و محیط وجود نداشته باشد.				۰/۰۲
				۰/۲۵-۰/۳
				۰/۹-۱
				۲
حرکت نسبی آرام بین قطعه و محیط وجود داشته باشد.				-
				۰/۳-۰/۳۵
				۱-۱/۱
				۲-۲/۲
حرکت نسبی متوسط بین قطعه و محیط وجود داشته باشد.				-
				۰/۳۵-۰/۴
				۱/۲-۱/۳
				-
تلاطم خوب در محیط				-
				۰/۴-۰/۵
				۱/۴-۱/۵
				-
تلاطم زیاد				۰/۰۵
				۰/۵-۰/۸
				۱/۶-۲
				-
تلاطم بسیار زیاد				-
				۰/۸-۱/۱
				۴
				۵

کمیت سختی پذیری

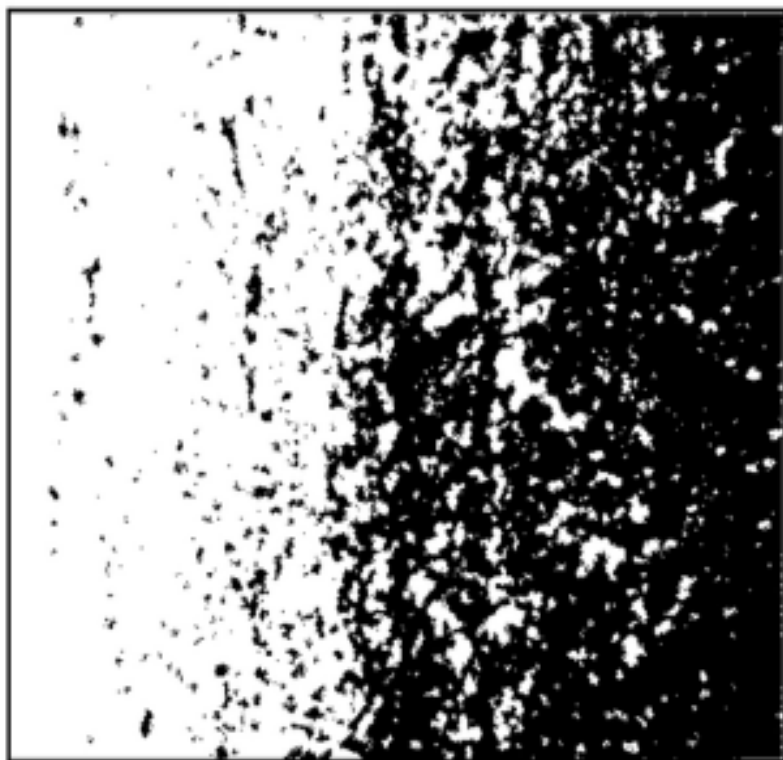
سازوکار مطالعه سختی پذیری براساس دو عامل، یکی قطر یا اندازه بحرانی (Critical size/diameter) و دیگری قطر یا اندازه ایده آل (Ideal size/diameter) استوار است.

قطر بحرانی (قطر واقعی)، بزرگ ترین قطر میله ای می باشد که هرگاه در **محیط موردنظر** (محیط واقعی) سرد شود، مرکز آن سخت شود.

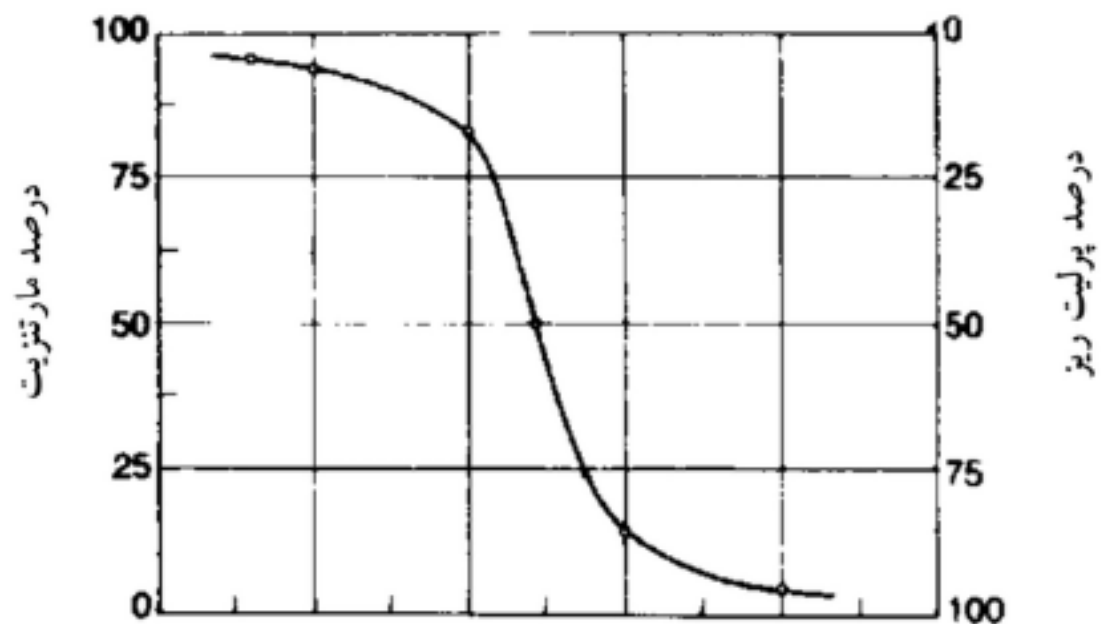
قطر ایده آل، بزرگ ترین قطر میله ای است که در صورت سرد شدن در یک **محیط ایده آل**، مرکز آن سخت شود.

عدد سختی انتخاب شده برای تمیز دادن مرکز سخت شده از سخت نشده، **سختی ریزساختاری است که حداقل دارای ۵۰ درصد مارتنزیت** باشد. دلایل انتخاب ۵۰ درصد مارتنزیت به عنوان معیار برای مشخص کردن ضخامت پوسته سخت شده و قطر بحرانی و ایده آل عبارتند از:

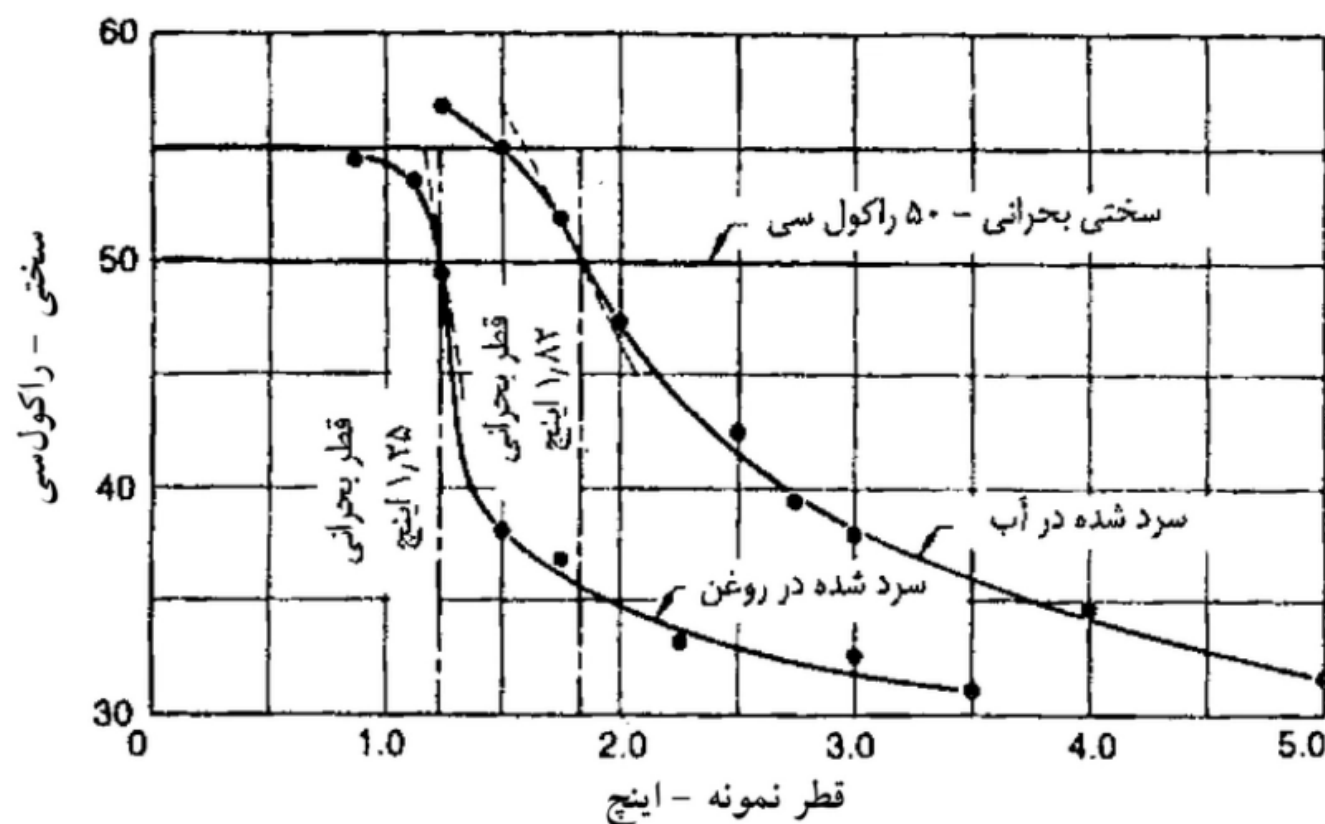
1. اختلاف بین ریزساختار سطح سخت شده یک میله و مرکز سخت نشده آن پس از پولیش و حکاکی، به بهترین صورت و بیش ترین وضوح در اطراف ناحیه ۵۰ درصد مارتنزیت-۵۰ درصد پرلیت دیده می شود.
2. بررسی سطح مقطع یک قطعه سریع سرد شده نشان می دهد که ناحیه ۵۰ درصد مارتنزیت، فصل مشترک مشخص و معینی را بین سطح شکست **بین دانه ای (Intergranular مرزدانه ای)** و سطح شکست **میان دانه ای (Transgranular درون دانه ای)**، بوجود می آورد.
3. کاهش سختی از مرکز به سطح در ناحیه ۵۰ درصد مارتنزیت-۵۰ درصد پرلیت، بسیار شدید است.



شکل ۶-۱۶ انتقال از ساختار مارتنزیتی در ناحیه سخت شده به ساختار پرلیتی در ناحیه سخت نشده مربوط به یک فولاد سریع سرد شده [۱].

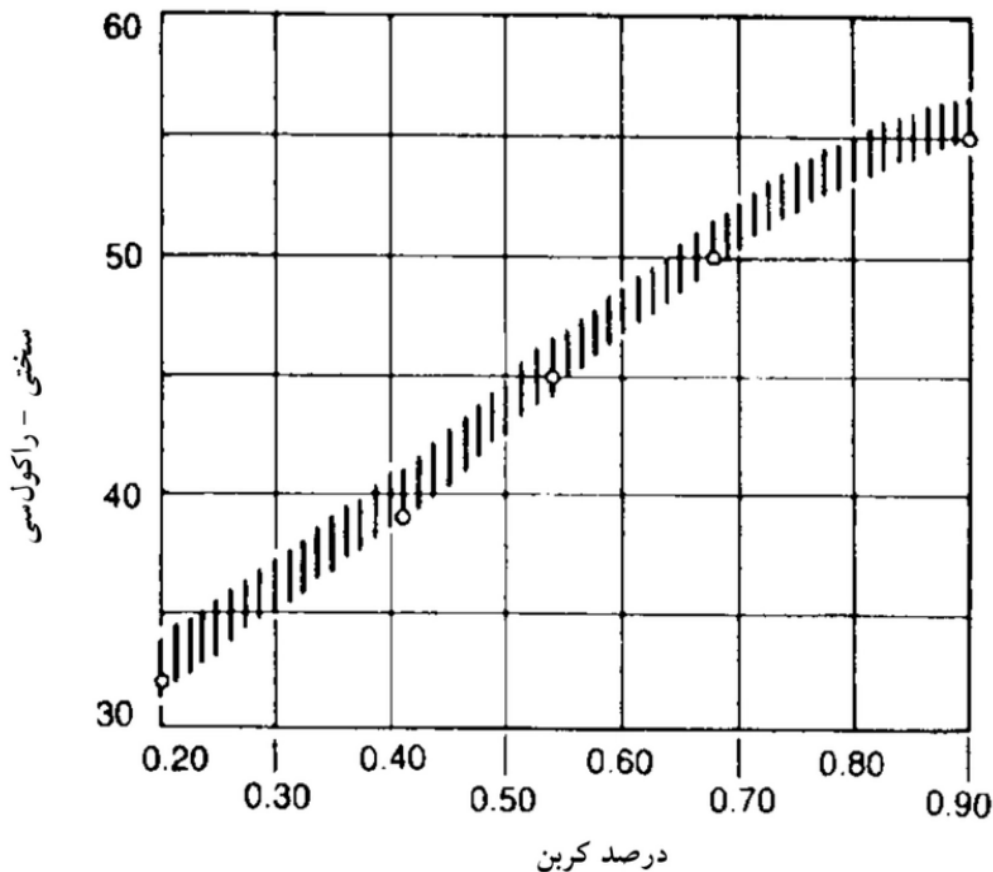


کاهش سختی از سطح به مرکز در ناحیه 50° درصد مارتنزیت - 50° درصد پرلیت، بسیار شدید است. شکل ۶-۱۷، تغییرهای سختی مرکز بر حسب قطر میله‌هایی از جنس فولاد کروم - نیکل $SAE 3140$ که در آب و روغن سریع سرد شده باشند را نشان می‌دهد. برای هر دو محیط دیده می‌شود که در حوالی سختی $HRC 50$ با افزایش قطر میله، سختی مرکز به شدت افت می‌کند. این پدیده، مشخص‌کننده 50° درصد مارتنزیت در ساختار و در نتیجه، اندازه قطر بحرانی است.



شکل ۶-۱۷ سختی در مرکز میله‌هایی از فولاد $SAE 3140$ با قطرهای مختلف، وقتی که در آب و روغن سریع سرد شوند [۱].

از آنجایی که بطور کلی تشخیص ۵۰ درصد مارتنزیت از منحنی تغییرهای سختی برحسب قطر میله کار دشواری است، همواره از **منحنی تغییرات سختی ۵۰ درصد مارتنزیت برحسب درصد کربن** کمک گرفته می‌شود. انتظار می‌رود که **سختی ۵۰ درصد مارتنزیت برای فولادهای آلیاژی کمی بیش‌تر** از فولادهای ساده کربنی باشد. (احتمالا در فولاد آلیاژی کنار ۵۰ درصد مارتنزیت می‌تواند مقدار زیادی بینیت با سختی نسبتا بالا باشد اما در فولاد کربنی، کنار ۵۰ درصد مارتنزیت عمدتا فریت و پرلیت است.)



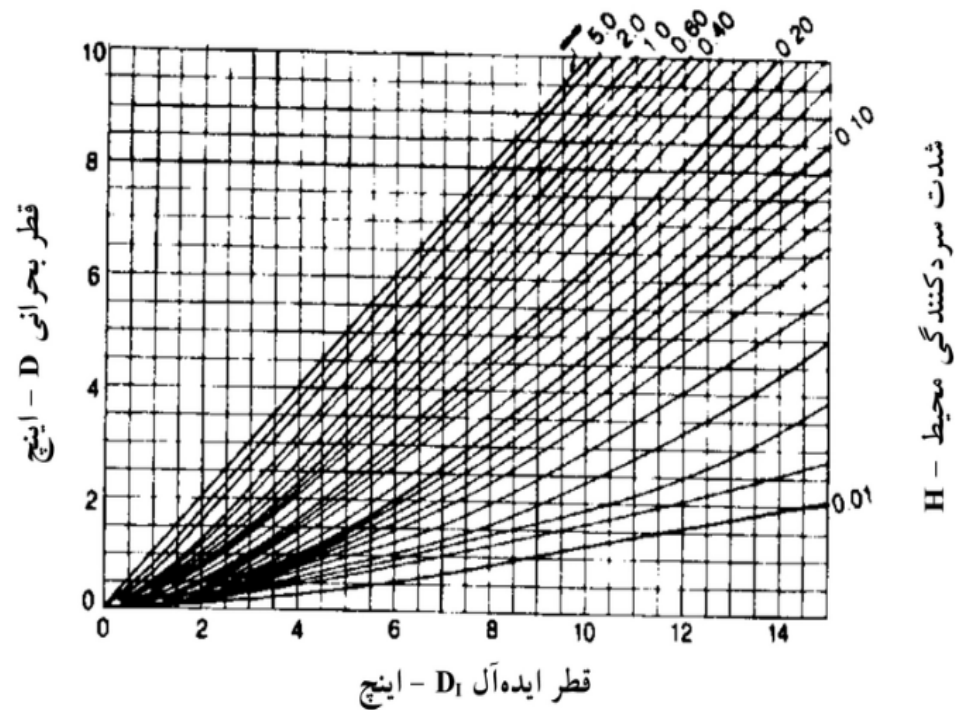
شکل ۶-۱۸ اثر کربن روی سختی ساختار حاصل از سریع سرد شدن
که شامل ۵۰ درصد مارتنزیت باشد [۱].

بنابراین قطر و اندازه بحرانی یک فولاد با یک ترکیب شیمیایی داده شده، بطور مستقیم توسط محیط سریع سرد کننده مشخص می‌شود و با تغییر محیط، قطر یا اندازه بحرانی نیز تغییر می‌کند.

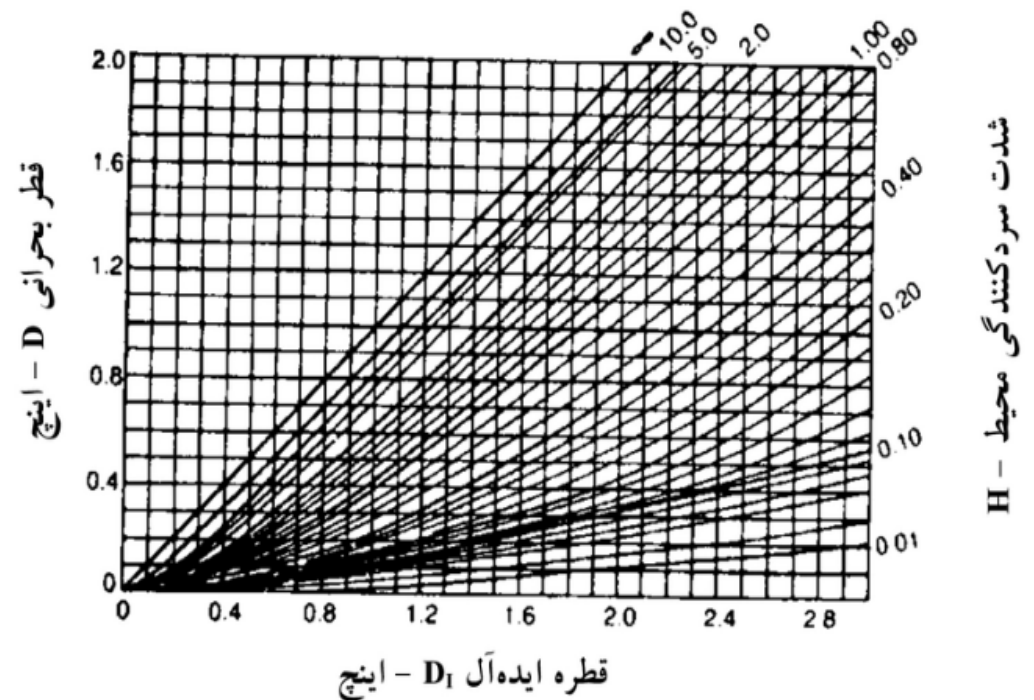
هرچه شدت سرد کنندگی محیط بیش‌تر باشد، قطر بحرانی نیز بیش‌تر خواهد بود.

از طرف دیگر چون قطر یا اندازه ایده آل توسط محیطی با شدت سرد کنندگی بی نهایت تعیین می‌شود، تابع محیط سرد کننده نخواهد بود و بنابراین می‌تواند به عنوان معیار واقعی برای مشخص کردن سختی پذیری یک فولاد با ترکیب شیمیایی داده شده قرار گیرد.

از قطر ایده آل می توان به منظور تعیین قطر بحرانی فولادها، هنگامی که در محیط های مختلف با شدت های سرد کنندگی متفاوت سرد می شوند، استفاده کرد. با توجه به شکل های ۶-۱۹ و ۶-۲۰ مشخص است که برای یک محیط سرد کننده ایده آل، قطرهای بحرانی و ایده آل باهم برابر هستند. از سوی دیگر، برای یک قطر ایده آل ثابت، با کاهش شدت سرد کنندگی محیط، قطر بحرانی نیز کاهش می یابد.



شکل ۶-۱۹ رابطه بین قطر بحرانی (D)، قطر ایده آل (D_i) و شدت سرد کنندگی محیط (H) [۱].



شکل ۶-۲۰ مشابه شکل ۶-۱۹، ولی در مقیاس بزرگ تر [۱].

محاسبه قطر ایده آل و مطالعه سختی پذیری

به کمک قطر ایده آل می توان فولاد مناسب را برای کاربرد مشخص انتخاب کرد و بنابراین از مصرف فولادهای گران قیمت جلوگیری نمود. قطر ایده آل را می توان با استفاده از ترکیب شیمیایی و یا به کمک آزمون های استاندارد روی نمونه های فولادی و نتایج بدست آمده از آنها بدست آورد.

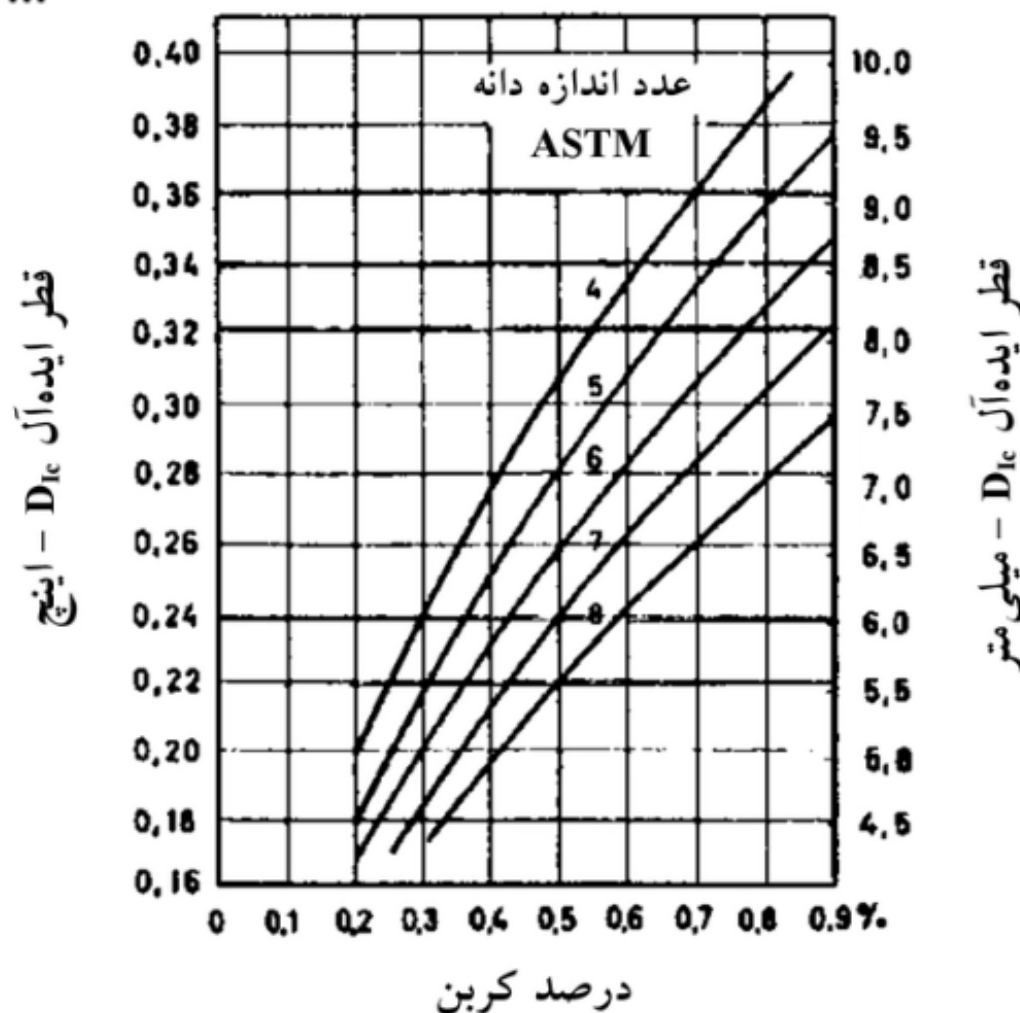
محاسبه قطر ایده آل با استفاده از ترکیب شیمیایی

قطر ایده آل برای فولادهای کم آلیاژ و آلیاژ متوسط را می توان به کمک درصد عناصر آلیاژی محلول در آستنیت و عدد اندازه دانه به دست آورد. برای این منظور، از نمودارهای موجود که اثر عوامل یادشده را روی قطر ایده آل مشخص می کنند، استفاده می شود.

برای تعیین قطر ایده آل یک فولاد، نخست به شکل ۶-۲۱ مراجعه می شود و با توجه به درصد کربن و عدد اندازه دانه فولاد، مقدار D_{Ic} محاسبه می شود. سپس با مراجعه به شکل ۶-۲۲ اثر هر یک از عناصر آلیاژی به صورت یک عدد (F) مشخص می شود.

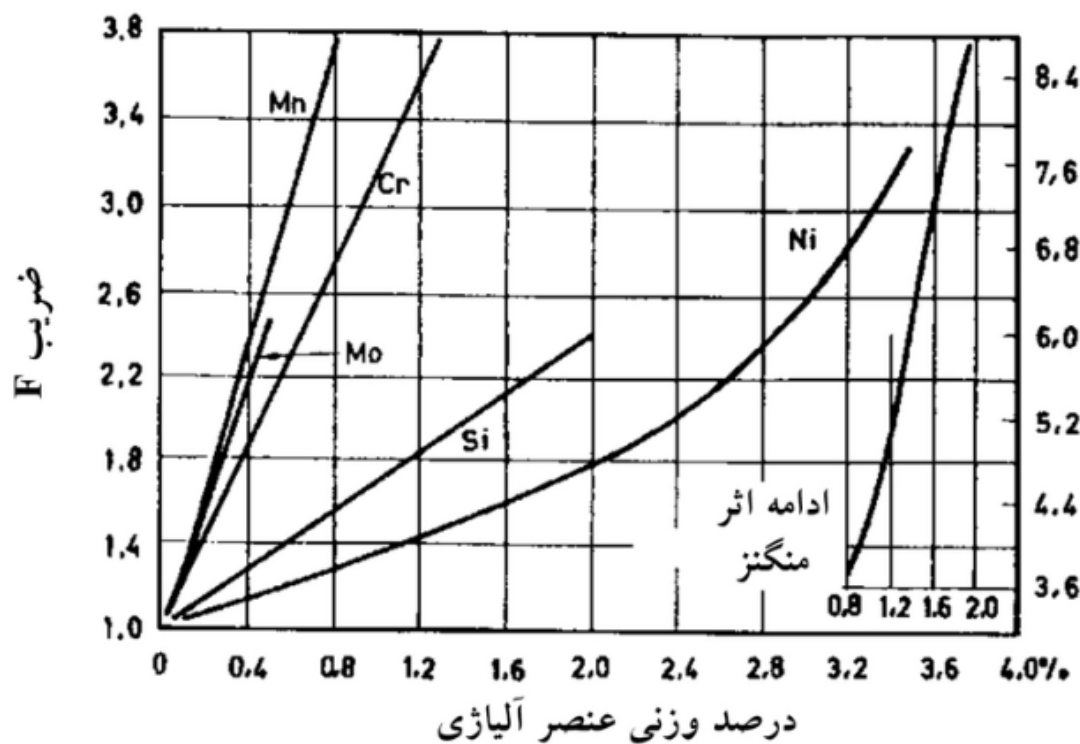
سپس با استفاده از معادله زیر قطر ایده آل فولاد محاسبه می شود. مقدار D_I را بطور معمول برحسب اینچ نشان می دهند.

$$D_I = D_{Ic} \times F_1 \times F_2 \times F_3 \times \dots$$



شکل ۶-۲۱ قطر ایده آل (D_{Ic}) بر حسب درصد کربن و عدد اندازه دانه آستنیت برای فولادهای ساده کربنی [۶].

در رابطه با فولادهایی که بیشتر از ۰/۸ درصد کربن داشته باشند، از شکل ۶-۲۱ در صورتی می‌توان استفاده کرد که در دمای آستنیت شدن، تمامی کربن به صورت محلول در آستنیت باشد، ولی به طور معمول چنین نیست و با توجه به این که این نوع فولادها را در دمایی بین A_1 و A_{cm} حرارت می‌دهند و سپس سریع سرد می‌کنند، در دمای آستنیت شدن، مقداری از کربن به صورت کاربید در ساختار باقی می‌ماند. انحلال تمامی کاربیدها به صورت محلول در آستنیت، منجر به تشکیل مقدار زیادی آستنیت باقیمانده در ساختار و در نتیجه، کاهش سختی می‌شود.



در این حالت امکان رشد سریع دانه‌ها وجود دارد، بنابراین در این بازه دمایی انتظار می‌رود که با افزایش درصد کربن بیش از ۰/۸، سختی‌پذیری کاهش یابد. به این دلیل که کربن اضافی با عناصر آلیاژی که سختی‌پذیری را افزایش می‌دهند ترکیب می‌شود و تشکیل کاربید می‌دهد. افزون بر این کاربیدهای تشکیل شده به عنوان جوانه‌زا برای تشکیل پرلیت عمل می‌کنند.

شکل ۶-۲۲ اثر عناصر آلیاژی مختلف روی سختی‌پذیری [۶].

مثال ۶-۱

قطر ایده‌آل را برای فولاد SIS ۲۲۲۵ با عدد اندازه دانه و ترکیب شیمیایی (wt%) زیر محاسبه کنید.

C	Si	Mn	Cr	Mo	عدد اندازه دانه
۰/۲۵	۰/۳	۰/۷	۱/۱	۰/۲	۷

حل:

با مراجعه به شکل ۶-۲۱ و با توجه به درصد کربن (۰/۲۵) و عدد اندازه دانه (۷)، مقدار D_{Ic} به دست می‌آید. با مراجعه به شکل ۶-۲۲ و با توجه به درصد عناصر آلیاژی، ضریب تصحیح برای هر عنصر آلیاژی نیز مشخص می‌شود (جدول زیر).

D_{Ic}	$F_1(Si)$	$F_2(Mn)$	$F_3(Cr)$	$F_4(Mo)$
۰/۱۷in	۱/۲	۳/۳	۳/۴	۱/۶

سپس مقدار D_I را با توجه به معادله ۶-۴ می‌توان به دست آورد:

$$D_I = 0.17 \times 1/2 \times 3/3 \times 3/4 \times 1/6 = 3/7 \text{ in}$$

مثال ۶-۲

فولاد (BS ۸۱۶M۴۰) SIS ۲۵۴۱ با عدد اندازه دانه و ترکیب شیمیایی (wt%) داده شده در جدول زیر را در نظر بگیرید و قطر ایده آل آن را محاسبه کنید.

عدد اندازه دانه	Ni	Mo	Cr	Mn	Si	C
۶	۱/۴	۰/۲	۱/۴	۰/۷	۰/۳	۰/۳۵

حل:

با توجه به شکل های ۶-۲۱ و ۶-۲۲:

D_{Ic}	$F_{\gamma}(Si)$	$F_{\gamma}(Mn)$	$F_{\gamma}(Cr)$	$F_{\gamma}(Mo)$	$F_{\delta}(Ni)$
۰/۲۲	۱/۲	۳/۳	۴	۱/۶	۱/۵

و بنابراین قطر ایده آل برابر است با:

$$D_I = 0.22 \times 1/2 \times 3/3 \times 4 \times 1/6 \times 1/5 = 8/4 \text{ in}$$

مثال ۳-۶

اگر فولاد SIS ۲۲۲۵ مربوط به مثال ۱ در روغن با تلاطم متوسط سرد شود، قطر بحرانی آن چه مقدار است؟

حل:

از حل مثال ۱، $D_I = 3/7 \text{ in}$ به دست آمد. با توجه به جدول ۶-۲، شدت سردکنندگی روغن با تلاطم متوسط برابر با $H = 0/4$ است. با مراجعه به شکل ۶-۱۹، مقدار قطر بحرانی برابر با دو اینچ به دست می آید.

مثال ۴-۶

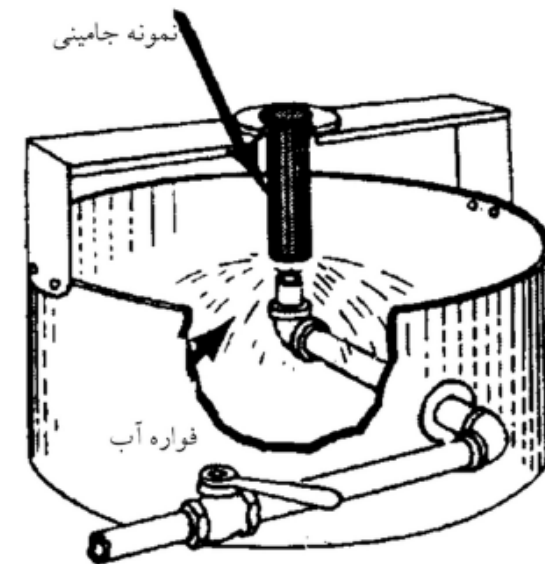
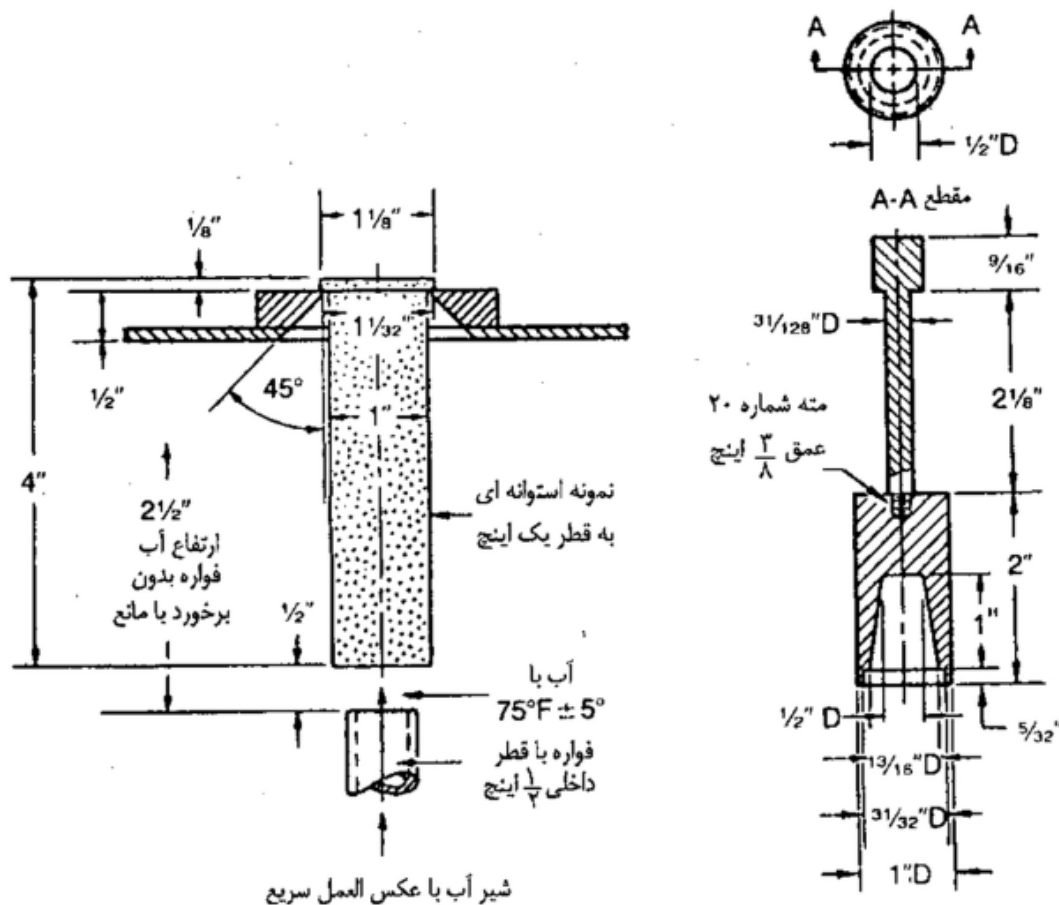
محیط سردکننده‌ای را پیشنهاد کنید که هرگاه فولاد SIS ۲۵۴۱ مربوط به مثال ۲ در آن سرد شود، قطر بحرانی حاصل برابر با پنج اینچ شود.

حل:

با مراجعه به شکل ۶-۱۹ و با توجه به مقادیر قطر بحرانی و قطر ایده‌آل مشخص می‌شود که شدت سردکنندگی محیط باید $0/2$ باشد. با مراجعه به جدول ۶-۱ معلوم می‌شود، محیطی که دارای این شدت سردکنندگی باشد، گلیسرین و یا روغن ۲۰۲۰۴ است.

آزمون جامینی برای تعیین سختی پذیری

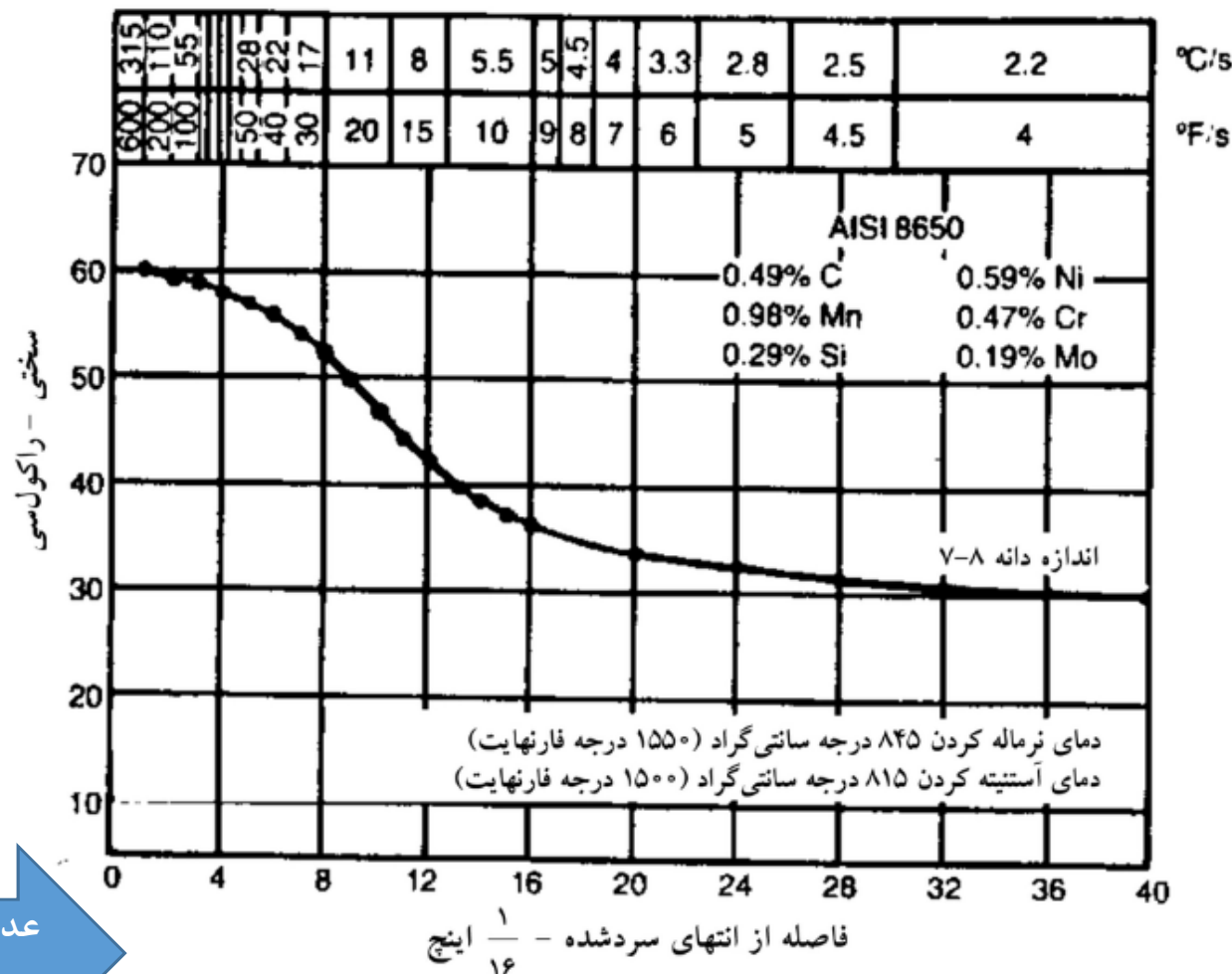
آزمون گراسمن بدلیل هزینه بر و زمان بر بودن، امروزه کاربرد صنعتی چندانی ندارد. در آزمون جامینی از یک نمونه استوانه‌ای به قطر ۲۵ میلی‌متر (1 in) و طول ۱۰۰ میلی‌متر (4 in) استفاده می‌شود. از آن جایی که ساختار اولیه فولاد، اثر قابل توجهی روی سختی‌پذیری آن دارد، بهتر است نمونه‌ها پیش از آزمون، نرماله شوند. نمونه مورد نظر را تا دمای سخت کردن فولاد حرارت می‌دهند و حدود ۲۰ دقیقه در آن دما نگه می‌دارند. پس از آن به کمک یک فواره آب با فشار و دبی مشخص، نمونه را از یک انتها توسط آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد سرد می‌کنند. فاصله فواره از انتهای نمونه، حدود ۱۲/۵ میلی‌متر است.



شکل ۶-۲۴ شمایی از نمونه جامینی در حال سرد شدن در دستگاه جامینی [۲۲].

در این شرایط، نرخ سرد شدن نقاط مختلف نمونه از انتهای سریع سرد شده به سمت دیگر کاهش می‌یابد. پس از سرد شدن، دو طرف نمونه و موازی طول آن، حدود ۰/۴ میلی‌متر از هر طرف سنگ زده می‌شود. سختی نمونه در امتداد محور طولی از یک انتها به انتهای دیگر و به فاصله ۱/۵ میلی‌متر از یکدیگر اندازه‌گیری می‌گردد. منحنی تغییرات سختی برحسب فاصله از انتهای سریع سرد شده (نمودار جامینی) رسم می‌شود.

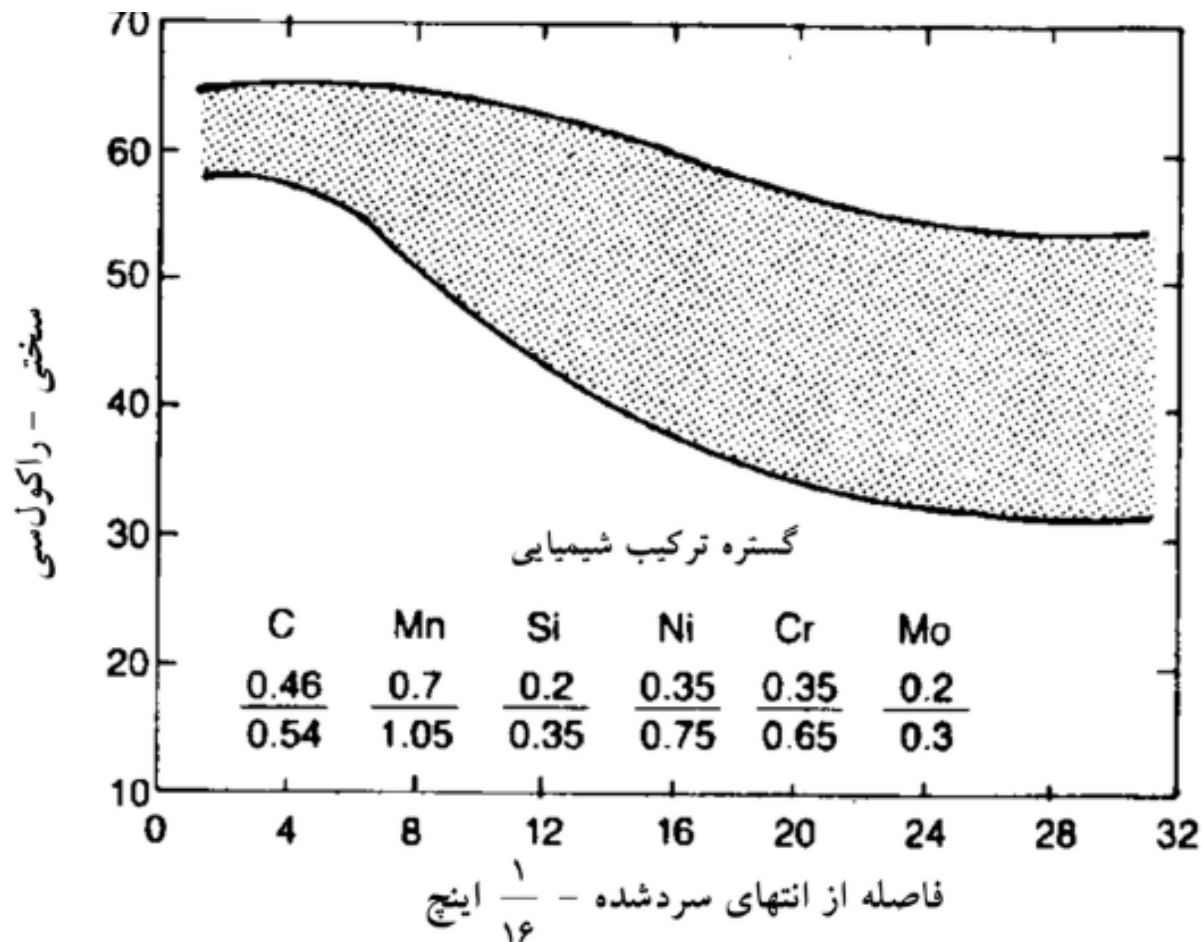
نرخ تقریبی سرد شدن در ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد (۱۳۰۰ درجه فارنهایت)



عدد روی محور در یک شانزدهم اینچ ضرب می‌شود.

شکل ۶-۲۵ روش نشان دادن سختی‌پذیری یک فولاد با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمون جامینی. داده‌های ارائه شده در این شکل، مربوط به فولاد AISI ۸۶۵۰ هستند [۱].

با توجه به این که درصد مجاز عناصر آلیاژی برای هر فولاد با یک کلاس استاندارد مشخص، بین یک مقدار کمینه و یک مقدار بیشینه می‌تواند تغییر کند، تغییرهای سختی بر حسب فاصله از انتهای سریع سرد شده برای هر نوع مشخصی از فولاد، به جای یک خط به صورت یک نوار است (شکل ۶-۲۶). انتهای بالایی این نوار، مربوط به بیشینه درصد عناصر آلیاژی و انتهای پایینی آن، مربوط به کمینه درصد عناصر آلیاژی می‌شود.



شکل ۶-۲۶ بازه سختی‌پذیری برای فولاد H ۸۷۵۰ [۱].

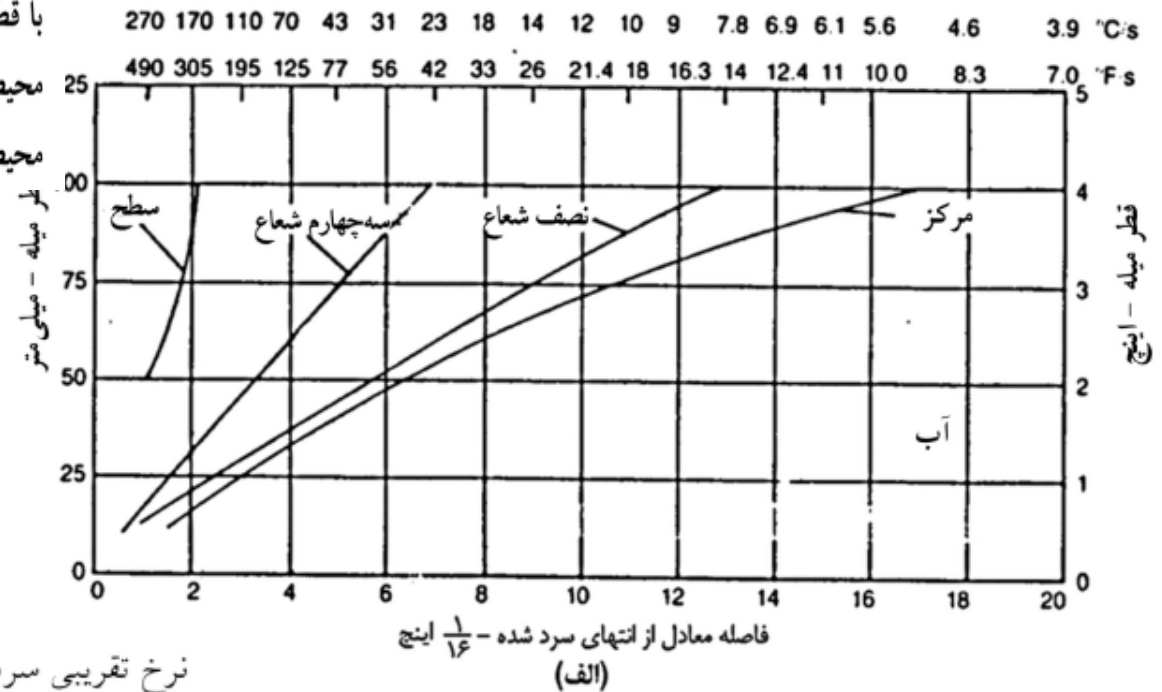
کاربرد نتایج حاصل از آزمون جамینی

یکی از کاربردهای مهم نمودار جامینی، مقایسه سختی‌پذیری فولادهای تهیه‌شده از ذوب‌های مختلفی است که برای تولید یک نوع فولاد با مارک مشخص استفاده می‌شوند. بنابراین دیده می‌شود که آزمون جامینی می‌تواند به‌عنوان معیاری برای کنترل کیفی به کار رود. همچنین از منحنی‌های جامینی می‌توان برای پیش‌بینی و تخمین توزیع سختی در قطعه‌های فولادی با ابعاد مختلف، هنگامی که در محیط‌های متفاوت سریع سرد شوند، استفاده کرد. برای این منظور از نمودارهایی مانند شکل ۶-۲۷ استفاده می‌شود. این نمودارها برای محیط‌های سردکننده مختلف رسم می‌گردند و در کتاب‌های مرجع وجود دارند. از جمله ویژگی‌های نمونه جامینی آن است که هر نقطه آن دارای نرخ سرد شدن تا حدودی ثابت می‌باشد که فقط بستگی به فاصله آن نقطه از انتهای سریع‌سردشده دارد. از طرفی، هر نقطه داخل یک نمونه فولادی که در یک محیط مشخص، سرد شده باشد، از نظر نرخ سرد شدن و در نتیجه، سختی، معادل با یک نقطه روی نمونه جامینی از همان جنس است.

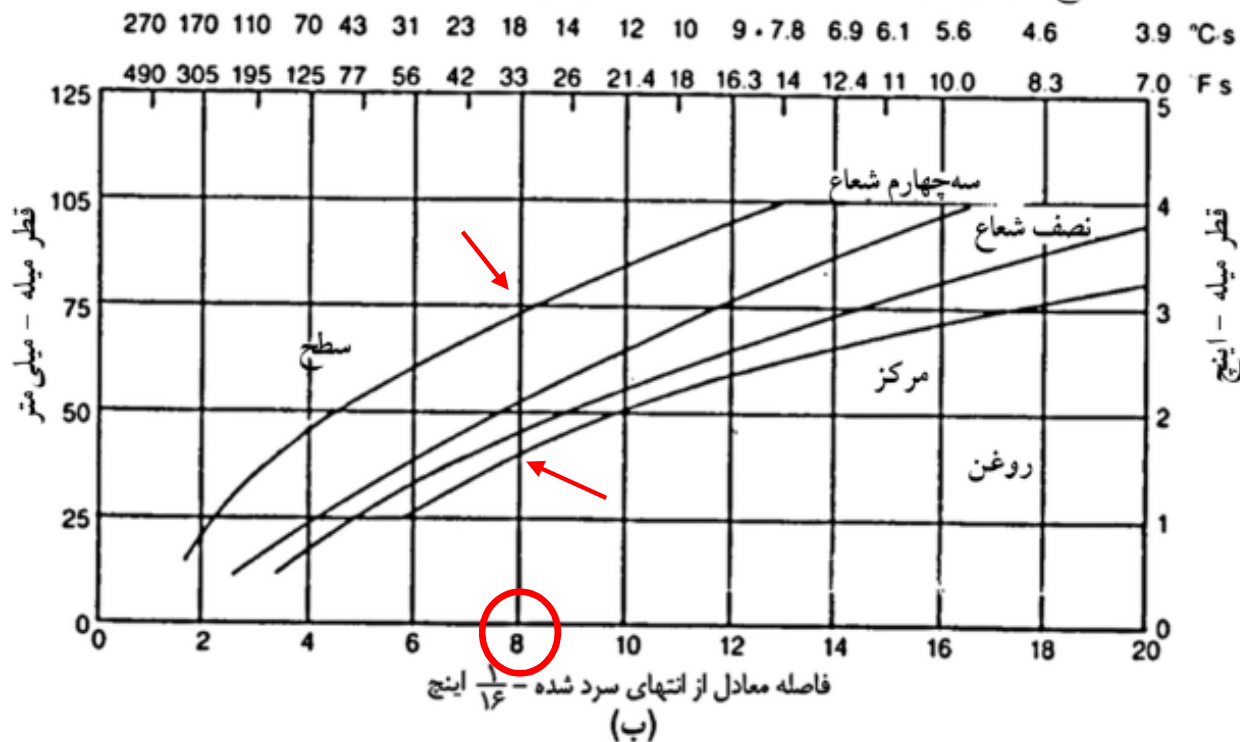
از جمله ویژگی‌های نمونه جامینی آن است که هر نقطه آن دارای نرخ سرد شدن تاحدودی ثابت می‌باشد که فقط بستگی به فاصله آن از انتهای سریع سرد شده دارد. از طرفی، هر نقطه داخل یک نمونه فولادی که در یک محیط مشخص سرد شده باشد، از نظر نرخ سرد شدن و در نتیجه سختی، معادل با یک نقطه روی نمونه جامینی از همان جنس است.

برای نمونه، شکل ۶-۲۷-ب نشان می‌دهد که نرخ سرد شدن نقطه‌ای به فاصله ۱۲/۵ میلی‌متر (۵/۰ اینچ) از انتهای سریع‌سرد شده نمونه جامینی، برابر با نرخ سرد شدن مرکز میله‌ای به قطر ۴۰ میلی‌متر (۱/۶ اینچ) است و با نرخ سرد شدن نقطه‌ای با فاصله نصف شعاع از سطح میله‌ای به قطر ۴۵ میلی‌متر (۱/۸ اینچ) برابر می‌شود و معادل است با نرخ سرد شدن سطح میله‌ای به قطر ۷۵ میلی‌متر (سه اینچ) از همان جنس که در روغن سرد شده باشد. از آنجایی که در ترکیب شیمیایی ثابت، سختی فقط تابع نرخ سرد شدن است، بنابراین، سختی‌های نقاط یاد شده با یکدیگر برابرند.

نرخ تقریبی سرد شدن در ۷۰۰ درجه سانتی گراد (۱۳۰۰ درجه فارنهایت)



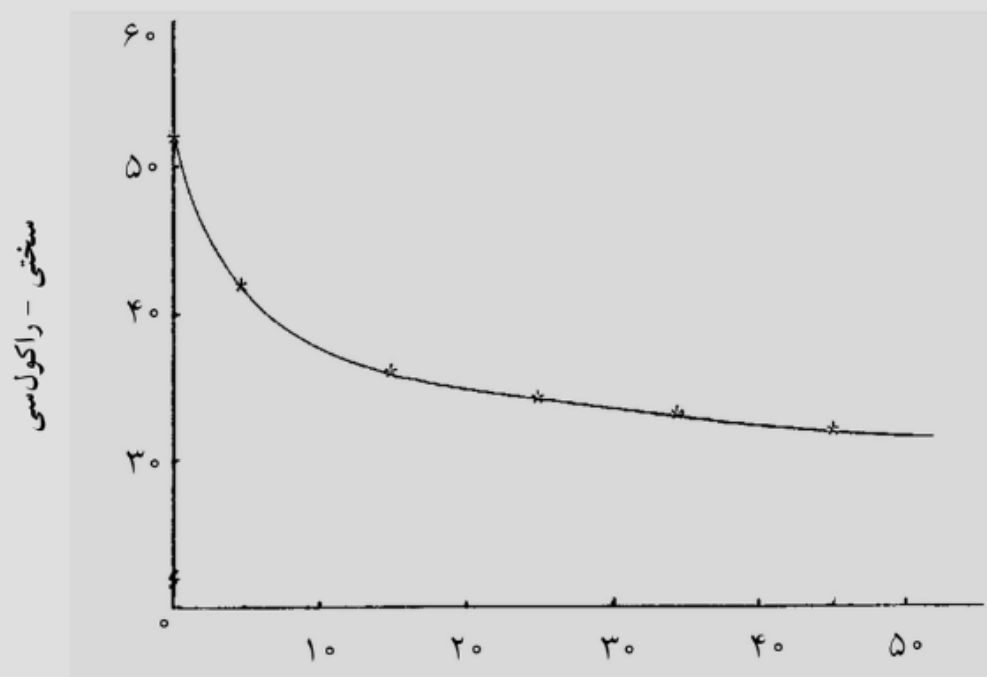
نرخ تقریبی سرد شدن در ۷۰۰ درجه سانتی گراد (۱۳۰۰ درجه فارنهایت)



عدد روی محور در یک
شانزدهم اینچ ضرب می
شود.

جدول ۴-۶ موقعیت نقطه‌ها در نمونه سریع سرد شده در مقایسه با نمونه جامینی و سختی آنها.

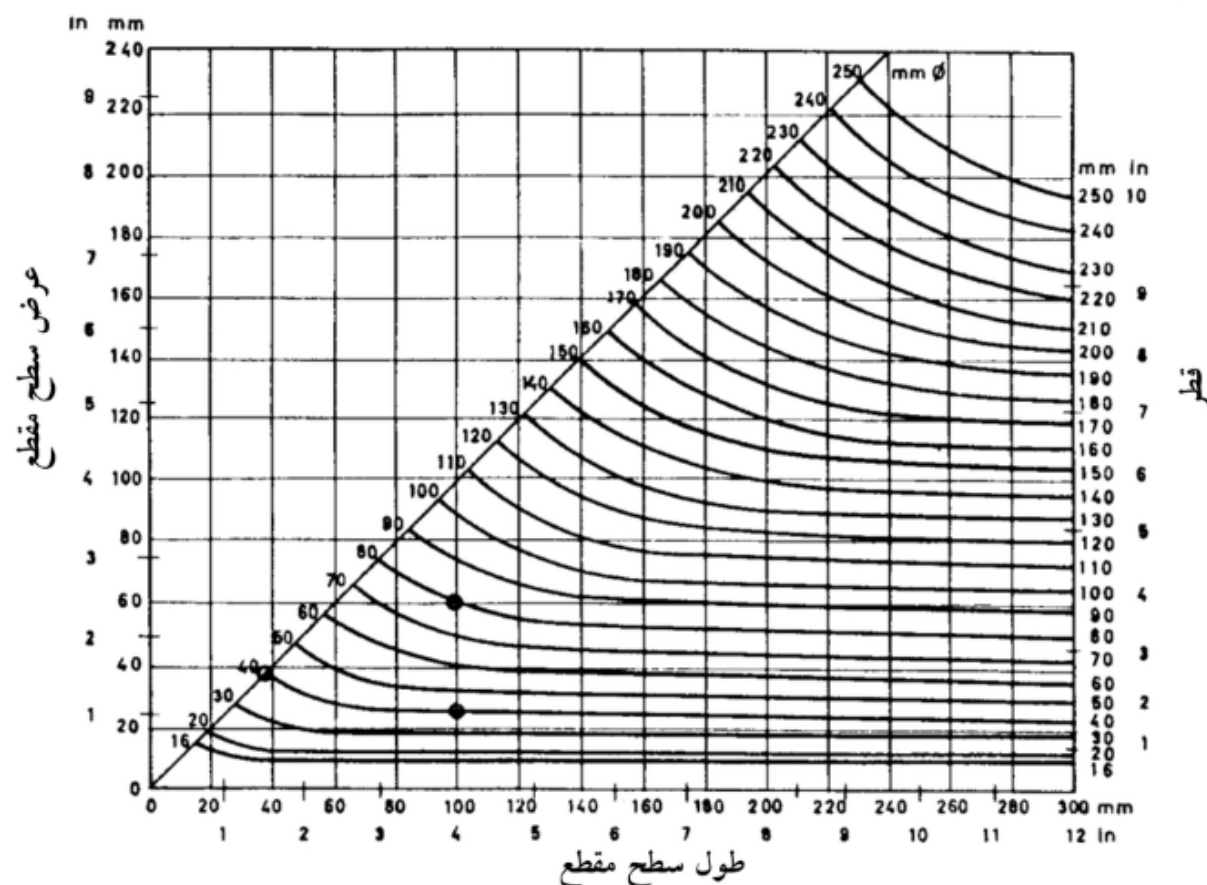
سختی	فاصله از سطح نمونه سریع سرد شده	فاصله معادل از انتهای سرد شده نمونه جامینی	ر/ R
(HRC)	(mm)	($\frac{x}{16}$ in)	
۵۲	۱۲	۸	۱
۴۲	۱۷	۱۲	۰/۹
۳۶	۲۵	۱۶	۰/۷
۳۴	۳۰	۲۰	۰/۵
۳۳	۳۳	۲۲	۰/۳
۳۲	۴۰	۲۶	۰/۱



فاصله از سطح نمونه سریع سرد شده - میلی متر

شکل ۴-۶ تغییرهای سختی از سطح به مرکز میله استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی متر از فولاد AISI ۸۶۵۰، وقتی که از ۸۱۵ درجه سانتی گراد در روغن با تلاطم زیاد سرد شود [نویسنده].

داده‌های جمع‌آوری شده از شکل‌های ۶-۲۹ تا ۶-۳۵ فقط مربوط به نمونه‌های استوانه‌ای شکل هستند. در مواردی که نمونه‌هایی با مقطع مربع یا مربع مستطیل داشته باشیم، نخست با توجه به ابعاد سطح مقطع قطعه، مقطع استوانه‌ای معادل با آن را به دست می‌آوریم و سپس مشابه با مثال قبل عمل می‌کنیم. برای این منظور از نمودارهایی مانند شکل ۶-۳۷ استفاده می‌شود.



شکل ۶-۳۷ ارتباط بین ابعاد مقطع مربع و مربع مستطیل و مقطع دایره‌ای معادل [۶].