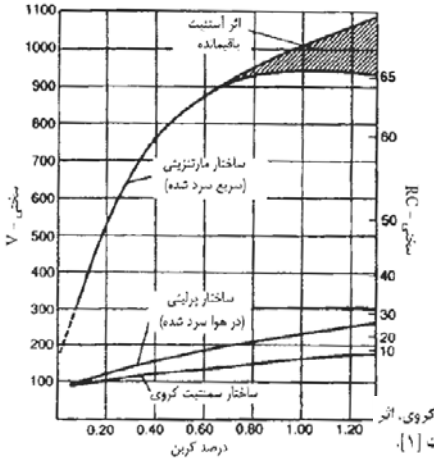
# فصل ۶

## سختی و سختی پذیری

### سختی و درصد کربن

از جمله مهمترین اهداف تشکیل مارتنزیت در فولادها عبارت از سختی زیاد، استحکام بالا و مقاومت در برابر خستگی و سایش است. حداکثر سختی در یک فولاد کربنی ساده مربوط به میکروساختار صددرصد مارتنزیتی می‌شود. شکل ۶-۱ نشان می‌دهد که برای هر درصد کربن، سختی ساختار مارتنزیتی به مراتب بیشتر از سختی ساختارهای فریت - پرلیت و یا سمنتیت کروی - فریت است.




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

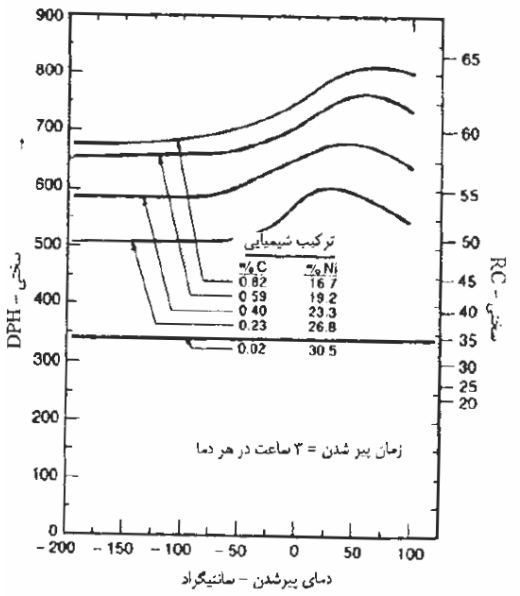
به منظور بهبود خواص مکانیکی، تقریباً در تمامی موارد، فرایند سخت کردن (تشکیل مارتنزیت) همراه با بازپخت[1] است

عملیات حرارتی جهت تشکیل مارتنزیت معمولاً بر روی فولادهایی انجام می‌شود که حداقل ۰/۳ درصد کربن داشته باشند. از آنجایی که سختی مارتنزیت حاصل از سریع سرد کردن فولادهای کربنی ساده با کمتر از ۰/۳ درصد کربن نسبتاً پایین است (شکل ۶-۱)، اصطلاحاً گفته می‌شود که این فولادها آب نمی‌گیرند. در رابطه با شکل ۶-۱ تذکر این نکته ضروری است که در مقیاس راکول سی[2]، سختی کمتر از ۲۰ راکول‌سی فاقد اعتبار است و در این شکل تنها جهت مقایسه آمده است.



در شکل ۶-۱ ناحیهٔ هاشور زده شده اثر آستنیت باقیمانده را بر روی سختی مارتنزیت مشخص می‌کند. از آنجایی که با افزایش درصد کربن دمای $M_f$ کاهش می‌یابد (شکل ۳-۶) میزان آستنیت باقیمانده در دمای اتاق نیز با افزایش درصد کربن افزایش می‌یابد

از جمله پارامترهای دیگر که بر روی سختی مارتنزیت اثر می‌گذارد پدیده پیرشدن[1] با گذشت زمان است. شکل ۶-۳ نشان می‌دهد که پیرشدن مارتنزیت در دمای اتاق باعث افزایش سختی فولادهای Fe-Ni-C می‌شود. نتایج تحقیقات مشابه بر روی فولادهای کربنی ساده نشان می‌دهد که تغییرات مشابهی در سختی مارتنزیت این نوع فولادها نیز مشاهده شده است. بنابراین اگر توجهی به فاصلهٔ زمانی بین سریع سرد شدن قطعه و اندازه‌گیری سختی نشود تغییرات پراکنده‌ای در نتایج حاصل دیده خواهد شد.




**شکل ۶-۳ سختی مارتنزیت در آلیاژ Fe-Ni-C. تمام سختیها در ۱۹۵- درجهٔ سانتیگراد (۳۲۰- درجهٔ فارنهایت) و پس از ۳ ساعت پیرشدن مارتنزیت در دمای نشان داده شده بر روی محور افقی اندازه‌گیری شده‌اند [۱].**

اندازهٔ دانه‌های آستنیت اولیه، پارامتر دیگری است که بر روی سختی مارتنزیت اثر می‌گذارد. از آنجایی که مرز دانه‌های آستنیت می‌تواند به عنوان یکی از موانع مؤثر در برابر پیشرفت و رشد صفحات مارتنزیتی عمل کند، هر چه دانه‌های آستنیت اولیه ریزتر باشد، چگالی صفحات مارتنزیتی در واحد حجم بیشتر بوده و بنابراین سختی مارتنزیت نیز افزایش می‌یابد.

## استحکام مارتنزیت

در فصل سوم، در رابطه با نظریهٔ تشکیل مارتنزیت به این نکته اشاره شد که در اثر سریع سرد شدن فولاد از ناحیهٔ آستنیت، اتمهای کربن در حفره‌های هشت‌وجهی شبکه fcc محبوس شده و از تبدیل آن به شبکهٔ تعادلی bcc در دمای اتاق جلوگیری می‌کند. این موضوع باعث جابه‌جا شدن اتمهای آهن از محلهای استقرار اولیهٔ خود و به وجود آمدن شبکهٔ بلوری bct می‌شود.

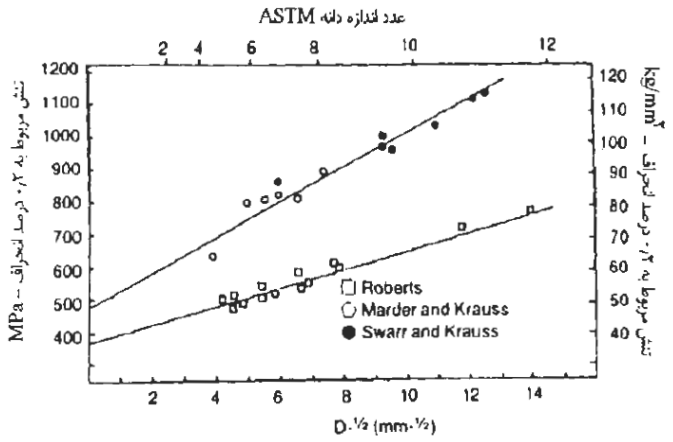
در حقیقت یکی از عوامل عمدهٔ افزایش سختی و استحکام مارتنزیت همین اختلالات شبکهٔ بلوری است که در نتیجهٔ آن حرکت نابه‌جاییها بسیار مشکل می‌شود.

علاوه بر کربن، ساختار فرعی[1] مارتنزیت نیز در افزایش استحکام نقش مهمی را بازی می‌کند. همچنان که در فصل سوم بحث شد، دگرگونی مارتنزیتی از این نظر منحصر به فرد است که انجام آن همراه با به وجود آمدن چگالی بالایی از معایب خطی نظیر نابه‌جاییها و / یا دوقلوهای ریز و ظریف در میکروساختار فولاد است.

بنابراین، استحکام مارتنزیت عمدتاً ناشی از دو پارامتر است: یکی کربن موجود در شبکهٔ بلوری که به صورت محلول جامد فوق اشباع باشد و دیگری ساختار فرعی که در حقیقت همان چگالی بالایی از نابه‌جاییها و دوقلوهاست.



از آنجایی که دمای $M_s$ مربوط به فولادهای کربنی ساده مخصوصاً فولادهای کم کربن نسبتاً بالاست (شکل ۳-۶)، درضمن سریع سرد شدن و قبل از رسیدن به دمای اتاق درصدی از کربن که به صورت محلول در فضاهای هشت‌وجهی محبوس شده است نفوذ کرده و بر روی نابه‌جاییها، فصل مشترک بین لایه‌های مارتنزیتی و فصل مشترک بین بسته‌های مارتنزیتی رسوب می‌کند. این فرایند به بازپخت خودبه‌خود[2] موسوم است و به نظر می‌رسد که اثر کربن محلول بر روی استحکام کششی را باید کاهش دهد.

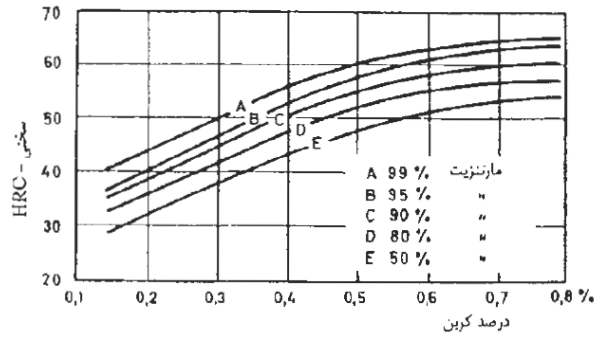



**شکل ۶-۵ اثر اندازه بسته‌های مارتنزیت (D) بر روی افزایش استحکام مارتنزیت لایه‌ای. منحنی بالایی مربوط به فولاد ۰٫۳C-۱۸Cr-۸Ni و منحنی پایینی مربوط به مارتنزیت Fe-Mn است [۱].**



## سختی‌پذیری

در صورتی که آهنگ سرد شدن یک فولاد از ناحیه آستنیت بیشتر از آهنگ سرد شدن بحرانی[1] (حداقل آهنگ سرد شدنی که از تشکیل پرلیت و بینیت جلوگیری شود) باشد، سختی حاصل عمدتاً بستگی به درصد کربن فولاد دارد. اگر آهنگ سرد شدن کمتر از آهنگ سرد شدن بحرانی باشد، درصد مارتنزیت حاصل کاهش یافته و بنابراین سختی فولاد نیز کاهش می‌یابد. 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 آستنیته شدن فولاد به صورت کاربید باقی می‌ماند، در دگرگونی تشکیل مارتنزیت شرکت نداشته و بنابراین اثری بر روی سختی مارتنزیت ندارد. ارتباط بین سختی، درصد کربن و درصد مارتنزیت در شکل ۶-۶ نشان داده شده است.

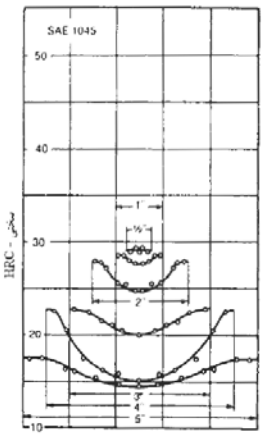



شکل ۶-۶ ارتباط بین سختی، درصد کربن و درصد مارتنزیت [۶].

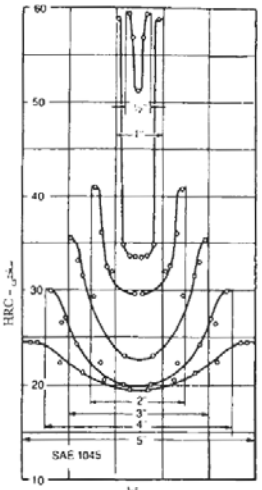


سختی پذیری عبارت از توانایی یا قابلیت تشکیل مارتنزیت (و سخت شدن فولاد) در اثر سریع سرد شدن از ناحیهٔ آستنیت است. سختی پذیری توسط ضخامت پوسته سخت شده مشخص می‌شود. ضخامت پوسته سخت شده عبارت از فاصله سطح تا محلی در داخل نمونه که دارای ۵۰ درصد مارتنزیت باشد است. ۵۰ درصد بقیه ساختار را معمولاً بینیت در نظر می‌گیرند. بنابراین هر چه سختی پذیری یک فولاد بیشتر باشد ضخامت پوسته سخت شده و یا به عبارت دیگر ضخامت پوسته‌ای که در اثر سریع سرد شدن بیشتر از ۵۰ درصد ساختار آن مارتنزیت شود بیشتر خواهد بود.

## توزیع سختی در یک قطعه




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

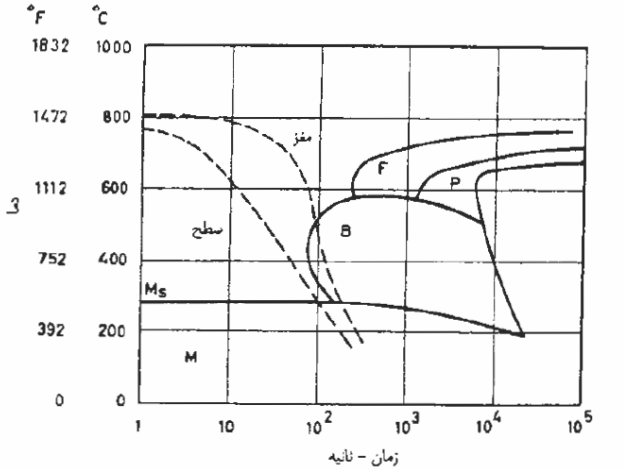



شکل ۶-۷ توزیع سختی در میله‌هایی با قطرهای متفاوت و از جنس فولاد SAE ۱۰۴۵ که در آب سریع سرد شده باشند [۱].

تغییرات سختی از سطح به مرکز برای یک سری میله‌های فولادی به قطرهای مختلف و از جنس فولاد کربنی ساده SAE ۱۰۴۵ ( با ترکیب شیمیایی ۰/۱۷Si٪ و ۰/۰۱۴S٪ و ۰/۰۲۲P٪ و ۰/۶Mn٪ و ۰/۴۸C٪) که به ترتیب در آب و روغن سریع سرد شده باشند نشان داده شده است.

13

سختی از سطح به طرف مرکز کاهش می‌یابد. دلیل اینکه چرا سطح یک فولاد سریع سرد شده سخت‌تر از مرکز آن است را می‌توان به کمک نمودار CCT توضیح داد.




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

14

از مطالعهٔ شکلهای ۶-۷ و ۶-۸ همچنین مشخص است که با افزایش قطر یا ضخامت، سختی تمام نقاط از جمله سطح و مرکز نمونه‌ها کاهش می‌یابد. در حقیقت با افزایش ابعاد قطعه، آهنگ سرد شدن کاهش می‌یابد و در نتیجه در مرکز آن پرلیت و فریت تشکیل شده که منجر به کاهش بیشتر سختی مرکز می‌شود.

پارامترهای دیگری که بر روی توزیع سختی در یک نمونه فولادی اثر دارد و از شکلهای ۶-۷ و ۶-۸ نیز مشخص است، شدت سردکنندگی محیط است. از آنجایی که روغن نسبت به آب، محیط سردکنندهٔ ملایمتری است، آهنگ سرد شدن میله‌های مختلف در روغن به مراتب کمتر از آهنگ سرد شدن میله‌های مشابه در آب است. بنابراین، سختی نقاط مختلف نمونه‌هایی که در روغن سریع سرد می‌شوند، همواره کمتر از سختی نقاط مشابه در نمونه‌های مشابهی است که در آب سریع سرد شده باشند.



از جمله پارامترهای دیگر که بر روی توزیع سختی در قطعات فولادی مؤثر است، عناصر آلیاژی و مقدار کمّی آنها در فولادهاست.

نقش عناصر آلیاژی به تأخیر انداختن نفوذ و در نتیجه افزایش مدت زمان لازم برای تجزیه آستنیت به مخلوط فریت و سمنتیت و بنابراین فراهم کردن امکان تشکیل مارتنزیت در آهنگهای سرد شدن کمتر است. در واقع حضور این عناصر نمودار TTT را به سمت راست جابه‌جا می‌کند.

## پارامترهای موثر بر روی سختی‌پذیری

**۱- اندازهٔ دانه‌های آستنیت**

**۲- درصد کربن**

**۳- عناصر آلیاژی**

**۴- آخال - ناخالصیهای نافلزی**[1]

**۵- ممکن بودن میکروساختار**



## ۱- اندازهٔ دانه‌های آستنیت

اثر اندازه دانه‌ها بر روی سختی پذیری با توجه به جوانه زنی ناهمگن پرلیت از مرز دانه‌های آستنیت توضیح داده می‌شود. در حالی که آهنگ رشد پرلیت مستقل از اندازهٔ دانه‌های آستنیت است، تعداد جوانه‌هایی که در واحد زمان (ثانیه) تشکیل می‌شود مستقیماً با محلهای مناسب برای تشکیل آنها (مرز دانه‌ها) متناسب است. از آنجایی که با ریز شدن دانه‌ها کل سطوح مربوط به مرز دانه‌ها افزایش می‌یابد، در یک فولاد با دانه‌های ریز تشکیل پرلیت به مراتب سریعتر از یک فولاد با دانه‌های درشت است. در نتیجه سختی پذیری فولاد با دانه‌های ریز کمتر از سختی‌پذیری فولاد با دانه‌های درشت خواهد بود. لیکن، استفاده از فولاد با دانه‌های درشت به منظور افزایش سختی‌پذیری عملاً کاربرد صنعتی ندارد، زیرا افزایش سختی پذیری از این روش با تغییرات ناخواسته و زیان آور در خواص فولاد نظیر افزایش تردی و کاهش انعطاف پذیری همراه است. از جمله معایب دیگر که بیشتر در فولادهای دانه درشت به وجود می‌آید عبارت است از: ترکهای ناشیَ از سریع سرد کردن[1] یا ترکهای ناشی از شوکهای حرارتی[2] که در اثر تنشهای حاصل از عملیات حرارتی به وجود می‌آیند.

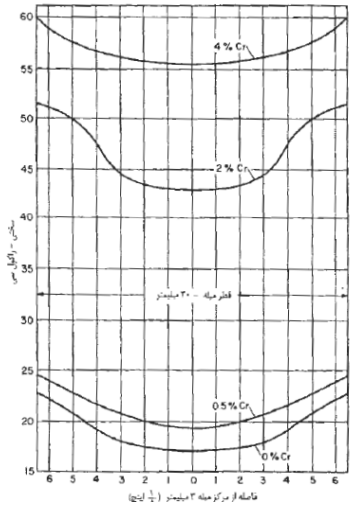
**۲- درصد کربن**

سختی پذیری یک فولاد شدیداً تحت تأثیر درصد کربن آن تغییر می‌کند. بدین صورت که اگر کربن به صورت محلول در آستنیت باشد، افزایش آن باعث افزایش سختی پذیری می‌شود. دلیل این امر را می‌توان در این حقیقت جستجو کرد که با افزایش درصد کربن تشکیل پرلیت و فاز پرویوتکتویید مشکلتر شده و در نتیجه نمودار CCT به سمت راست جابه‌جا می‌شود.



**۳- عناصر آلیاژی**

مشخص شده است که عناصری که میل ترکیبی آنها با کربن بیشتر از تمایل آنها به حل شدن در فریت باشد در صورتی بیشترین اثر را بر روی سختی پذیری دارند که قبل از سریع سرد شدن فولاد، در آستنیت کاملاً حل شده باشند. یک عنصر کاربیدساز که در آستنیت حل نشده باشد به صورت **ذرات کاربید در ساختار ظاهر می‌شود** و مانع از رشد دانه‌های آستنیت شده و در نتیجه سختی‌پذیری را کاهش خواهد داد. کاربیدهای حل نشده، **درصد کربن و عناصر آلیاژی محلول** در آستنیت را نیز کاهش می‌دهند.




شکل ۶-۱۲ توزیع سختی در داخل میله‌های فولادی به قطر ۴۰ میلیمتر ($1\frac{5}{8}$ اینچ). فولادها ۰٫۳۵ درصد کربن داشته و درصد کرم بر روی منحنیهای سختی نشان داده شده است. میله‌ها در روغن سریع سرد شده و عاری از کاربید کرم حل نشده بوده‌اند [۱۶].



## ۴- آخال - ناخالصیهای نافلزی[1]

آخال یا ناخالصیهای نافلزی به صورت ذرات بسیار ریز در میکروساختار فولاد توزیع شده و از رشد دانه‌های آستنیت جلوگیری می‌کنند. علاوه بر آن، این ذرات به عنوان محلهای تشکیل پرلیت عمل می‌کنند و بنابراین جوانه‌زنی پرلیت از آستنیت را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند. به این ترتیب، آخال سختی‌پذیری را کاهش خواهند داد.

**۵- همگن بودن میکروساختار**

در حالی که کاربید آهن به راحتی در فاز آستنیت حل می‌شود، بعضی از کاربیدهای آلیاژی نظیر کاربیدهایی که توسط کرم، مولیبدن و عناصر مشابه دیگر تشکیل می‌شوند نرخ انحلال کمتری دارند.

در
مواردی که فولاد قبل از انحلال کامل کاربیدها و توزیع یکنواخت آنها در آستنیت سریع سرد شود، نواحی مختلف آستنیت از نظر ترکیب شیمیایی همگن نخواهد بود. تحت چنین شرایطی سختی‌پذیری نقاطی که از نظر درصد کربن و عنصر آلیاژی فقیرند کم خواهد بود. از سوی دیگر نواحی پرکربن که از نظر درصد عنصر آلیاژی نیز غنی هستند از سختی‌پذیری خوبی برخوردار خواهند بود. بنابراین، به طور کلی ناهمگن بودن آستنیت از نظر ترکیب شیمیایی باعث کاهش سختی‌پذیری فولاد می‌شود. این عیب را می‌توان با افزایش دما و یا زمان آستنیته کردن و در نتیجه انحلال بیشتر و یکنواخت‌تر کاربیدها در آستنیت برطرف کرد.



**۶-۴-۳ آهنگ سرد شدن و پارامترهای موثر بر آن**

بدون توجه به ابعاد و ترکیب شیمیایی، افزایش آهنگ سرد شدن باعث
افزایش ضخامت لایه سخت شده می‌شود

آهنگ سرد شدن یک فولاد تحت تأثیر دو پارامتر مهم تغییر می‌کند: یکی انتقال حرارت از داخل به سطح نمونهٔ فولادی و دیگری انتقال حرارت از سطح قطعه توسط محیط سردکننده.

از آنجایی که عملاً امکان کنترل خواص حرارتی در فولادها بسیار کم است مهمترین روش، کنترل آهنگ سرد شدن یک قطعه با انتخاب صحیح محیط سردکننده مناسب انجام می‌شود.

## شدت سردکنندگی محیط

تأثیر یک محیط سردکننده را توسط پارامتر انتقال حرارت معادل[۲] که مشخص کننده شدت یا قدرت سردکنندگی محیط است و توسط حرف "H" نشان داده می‌شود معین می‌کنند. مقدار H را می‌توان از معادله زیر به دست آورد:

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

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. در عمل برای مشخص کردن شدت سردکنندگی محیطهای مختلف و همچنین مقایسه و بررسی اثرات آنها، شدت سردکنندگی آب را تحت شرایط مشخص و ثابتی برابر یک فرض کرده و شدت سردکنندگی محیطهای دیگر را نسبت به آن می‌سنجند.

به طور کلی با افزایش مقدار "H" شدت سردکنندگی محیط نیز افزایش می‌یابد.



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

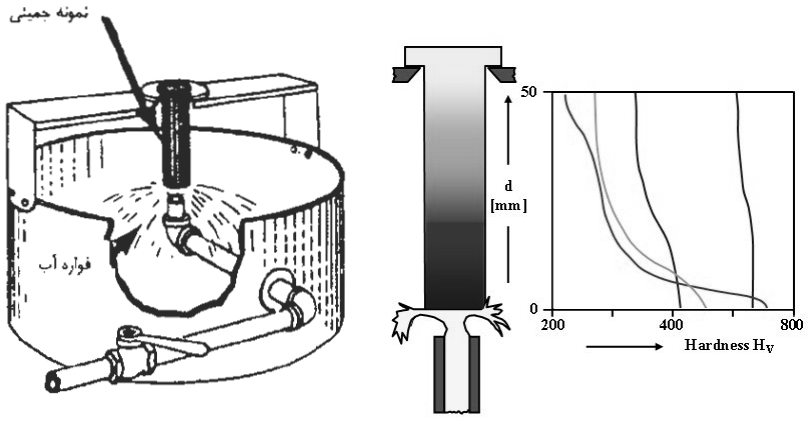
| شرایط محیط | نوع محیط | | | |
|---|---|---|---|---|
| | هوا | روغن | آب | آب نمک |
| هیچگونه حرکت نسبی بین قطعه و محیط وجود نداشته باشد | ۰/۰۲ | ۰/۲۵-۰/۳ | ۰/۹-۱ | ۲ |
| حرکت نسبی آرام بین قطعه و محیط وجود داشته باشد | – | ۰/۳-۰/۳۵ | ۱-۱/۱ | ۲-۲/۲ |
| حرکت نسبی متوسط بین قطعه و محیط وجود داشته باشد | – | 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 |

## آزمایش جامینی[۲] برای تعیین سختی‌پذیری

برای این منظور از یک نمونهٔ استوانه‌ای به قطر ۲۵ میلیمتر (۱ اینچ) و طول ۱۰۰ میلیمتر (۴ اینچ) و مطابق شکل ۶-۲۳ استفاده می‌شود. از آنجایی که ساختار اولیهٔ فولاد اثر قابل توجهی بر روی سختی‌پذیری آن دارد بهتر است نمونه‌ها قبل از آزمایش نرماله شوند.

در این روش نمونه مورد نظر را تا دمای سخت کردن فولاد حرارت داده و به مدت تقریبا ۲۰ دقیقه در ان دما نگه می‌دارند. پس از ان به کمک یک فواره اب با فشار و دبی مشخص، نمونه را از یک انتها توسط آب ۲۵ درجهٔ سانتیگراد سرد می‌کنند. فاصلهٔ فواره از انتهای نمونه در حدود ۱۲٫۵ میلیمتر (۰٫۵ اینچ) است (شکلهای ۶-۲۳ و ۶-۲۴). تحت این شرایط ، آهنگ سرد شدن نقاط مختلف نمونه از انتهای سریع سرد شده (آب پاشیده شده) به سمت دیگر کاهش می‌یابد.

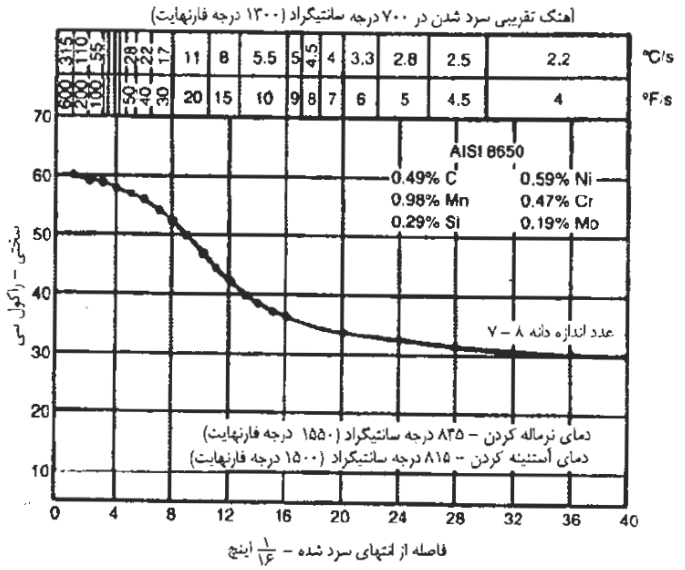





شکل ۶-۲۴ شمایی از نمونهٔ جامینی در دستگاه جامینی در حال سرد شدن

پس از سرد شدن، دو طرف نمونه موازی طول آن به اندازه ۰٫۴ میلیمتر از هر طرف سنگ زده و سختی نمونه در امتداد محور طولی از یک انتها به انتهای دیگر و به فواصل ۱٫۵ میلیمتر ($\frac{۱}{۱۶}$ اینچ) اندازه‌گیری می‌شود. به این ترتیب منحنی تغییرات سختی برحسب فاصله از انتهای سریع سرد شده که به نمودار جامینی موسوم است را رسم می‌کنند.






**شکل ۶–۲۵ روش نشان دادن سختی‌پذیری یک فولاد با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش جامینی. اطلاعات داده شده در این شکل مربوط به فولاد AISI ۸۶۵۰ است [۱].**

30

## کاربرد نتایج حاصل از آزمایش جامینی

یکی از کاربردهای مهم نمودار جامینی عبارت از مقایسهٔ سختی پذیری فولادهای تهیه شده از ذوبهای مختلفی است که برای تولید یک نوع فولاد با مارک مشخص استفاده می‌شوند. بنابراین، ملاحظه می‌شود که آزمایش جامینی می‌تواند به عنوان معیاری برای کنترل کیفی به کار رود.

همچنین از منحنیهای جامینی می‌توان برای پیش‌بینی و تخمین توزیع سختی در قطعات فولادی با ابعاد مختلف هنگامی که در محیطهای متفاوت سریع سرد شوند استفاده کرد.

پایان فصل ششم