


## شناخت فلزات صنعتی

فصل چهارم:  
**عملیات حرارتی فولادها**  
 سختی پذیری  
 تمپرینگ  
 تنش های پسماند  
 مار تمپرینگ

1 Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1



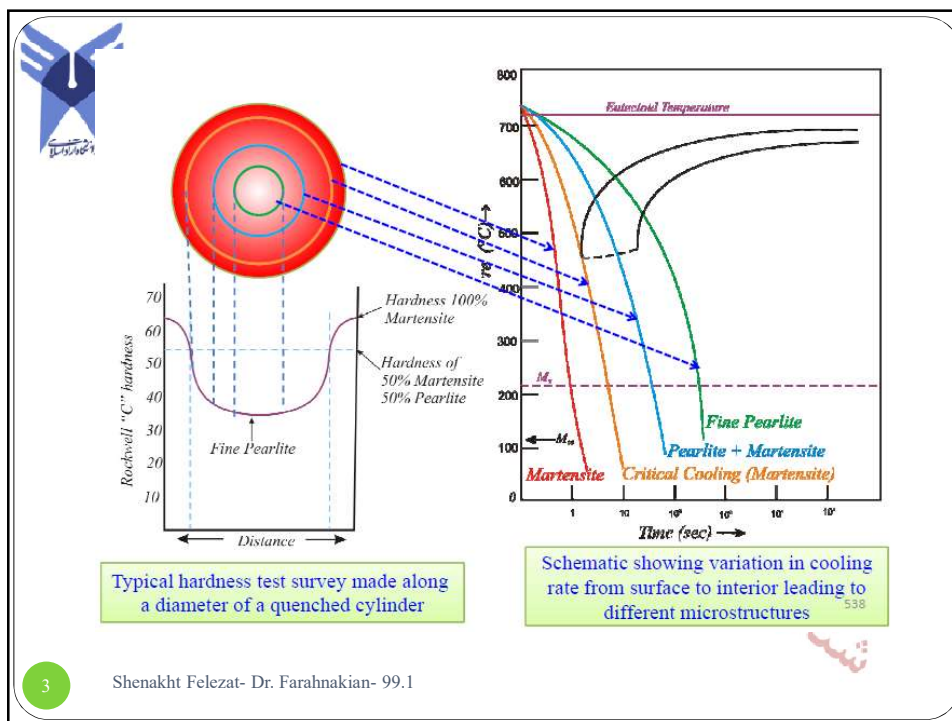
## آهنگ سرد شدن در سختی پذیری (Cooling rate in Hardenability)

سخت کردن یک فولاد تحت تأثیر دو پارامتر مهم تغییر می کند:

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

- آهنگ های سرد شدن آهسته تر در نقاط دور از سطح و نزدیک مرکز، زمان بیشتری را برای انجام دگرگونی نفوذی فراهم می کند.
- در حقیقت، همین شرایط است که منجر به سختی کم مراکز میله هایی می شود؛ این پدیده، مخصوصاً در میله هایی با قطرهای زیاد مشهودتر است.

2 Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1



## انتقال حرارت در حین آبدادن فولاد

انتقال حرارت در فصل مشترک قطعه فولادی با محیط سرد کننده آن مسئله نسبتاً پیچیده‌ای است و دارای سه مرحله می باشد:

**مرحله ۱: مرحله سرد شدن توسط لایه بخار**

- این مرحله شامل تشکیل یک لایه بخار پایدار در اطراف قطعه و در نتیجه جدا کردن آن از محیط سرد اطراف است.
- لایه بخار نیز به عنوان یک عایق عمل می کند، این مرحله یکی از مراحل سرد شدن آهسته است.
- این مرحله در محلول های غیرفرار نظیر پتاسیم کلرید، لیتیم کلرید، سدیم هیدروکسید و اسیدسولفوریک (در غلظت‌های حدود ۵ درصد) دیده نمی شود. نمودارهای سرد شدن در محیط های فوق بلافاصله از مرحله دوم شروع می شود.

4 Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1



## مرحله ۲: مرحله سرد شدن توسط انتقال بخار

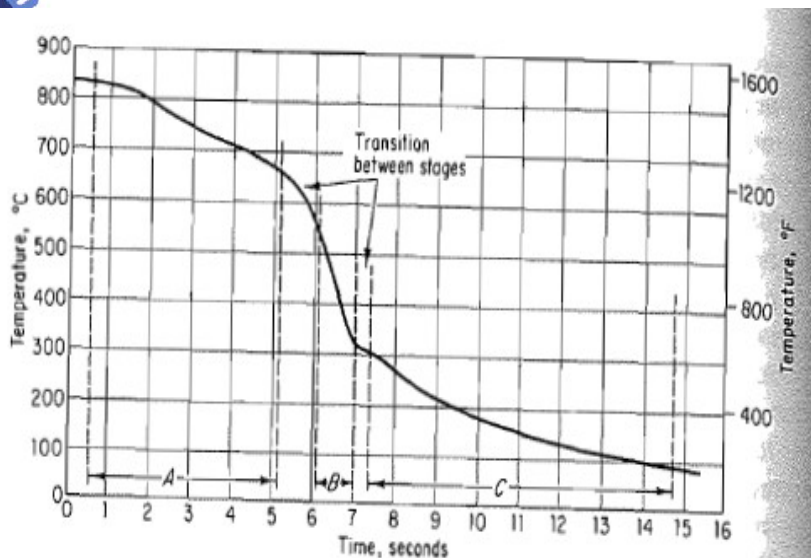
- این مرحله بیشترین آهنگ انتقال حرارت را در بین مراحل مختلف دارد.
- و هنگامی شروع می شود که دمای سطح فلز آنقدر کاهش یابد که سبب ناپایداری لایه بخار شده و در نتیجه آن را به قطرات مایع تبدیل کند.
- این قطرات پس از تماس مجدد با فلز بلافاصله بخار شده و در اثر جذب گرمای نهان از قطعه، باعث سرد شدن سریع آن می شوند.

## مرحله ۳: مرحله سرد شدن توسط مایع

- آهنگ سرد شدن در این مرحله از مراحل ۱ و ۲ کمتر است. مرحله ۳ هنگامی شروع می شود که دمای سطح فلز تا زیر دمای نقطه جوش مایع سرد کننده کاهش یابد.
- در زیر این دما، جوشیدن مایع متوقف شده و بنابراین اطراف قطعه را مایع اشغال می کند.
- از این رو، دفع حرارت از این لحظه به بعد توسط هدایت و همرفت انجام می شود.

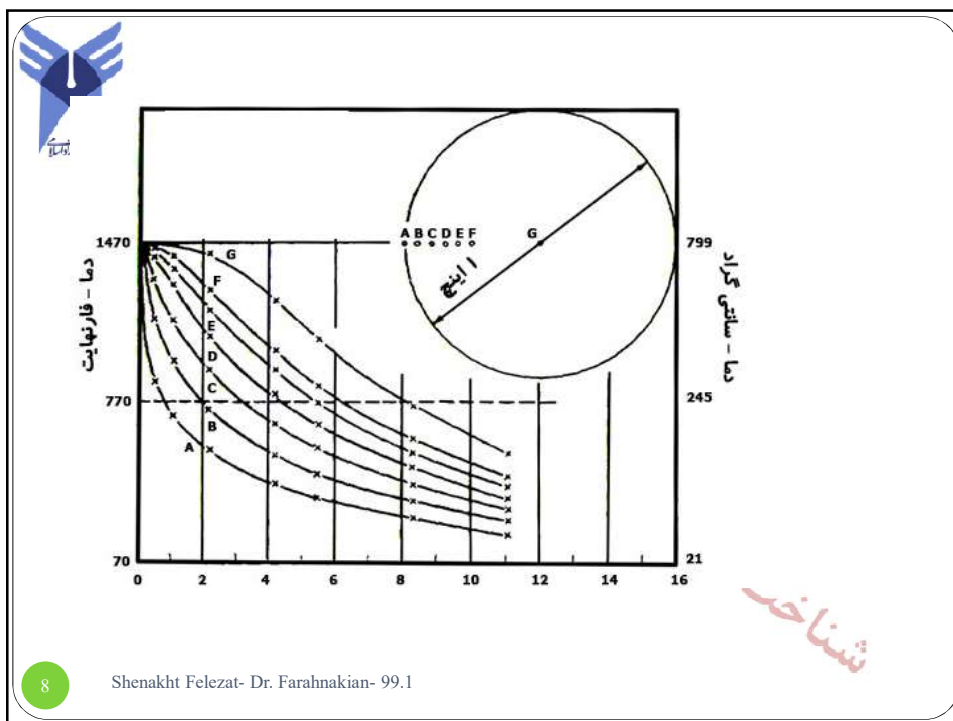
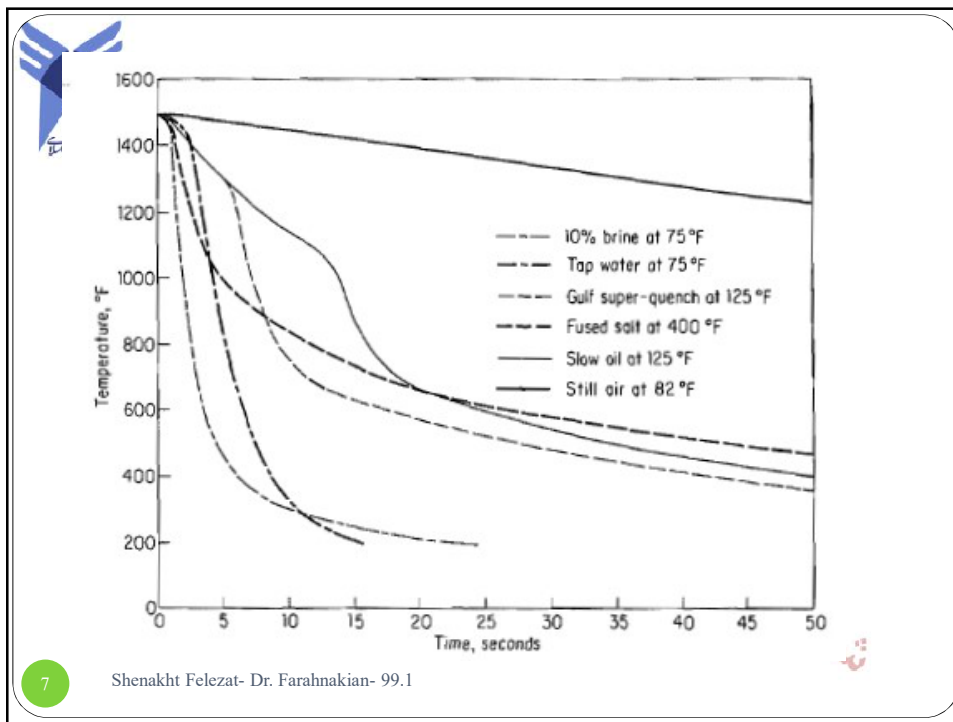
5

Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1



6

Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1





## شدت سردکنندگی محیط در سختی پذیری

- شدت سردکنندگی را توسط پارامتر انتقال حرارت معادل که مشخص کننده شدت یا قدرت سردکنندگی محیط است و توسط حرف H نشان داده می شود معین می کنند.
- در عمل برای مشخص کردن شدت سردکنندگی محیط های مختلف و همچنین مقایسه و بررسی اثرات آن ها، شدت سردکنندگی آب را تحت شرایط مشخص و ثابتی برابر یک فرض کرده و شدت سردکنندگی محیط های دیگر را نسبت به آن می سنجند.

Process	Variable	H Value
Air	No agitation	0.02
Oil quench	No agitation	0.2
	Slight agitation	0.35
	Good agitation	0.5
"	Vigorous agitation	0.7
	No agitation	1.0
Water quench	Vigorous agitation	1.5
Brine quench (saturated Salt water)	No agitation	2.0
	Vigorous agitation	5.0
Ideal quench		$\infty$

9


Shenakht Felezat- Dr.



نوع محیط			شرایط محیط
آب نمک	آب	روغن	هوا
۲	۰/۹-۱	۰/۲۵-۰/۳	۰/۰۲
۲-۲/۲	۱-۱/۱	۰/۳-۰/۳۵	-
-	۱/۲-۱/۳	۰/۳۵-۰/۴	-
-	۱/۴-۱/۵	۰/۴-۰/۵	-
-	۱/۶-۲	۰/۵-۰/۸	۰/۰۵
۵	۴	۰/۸-۱/۱	-

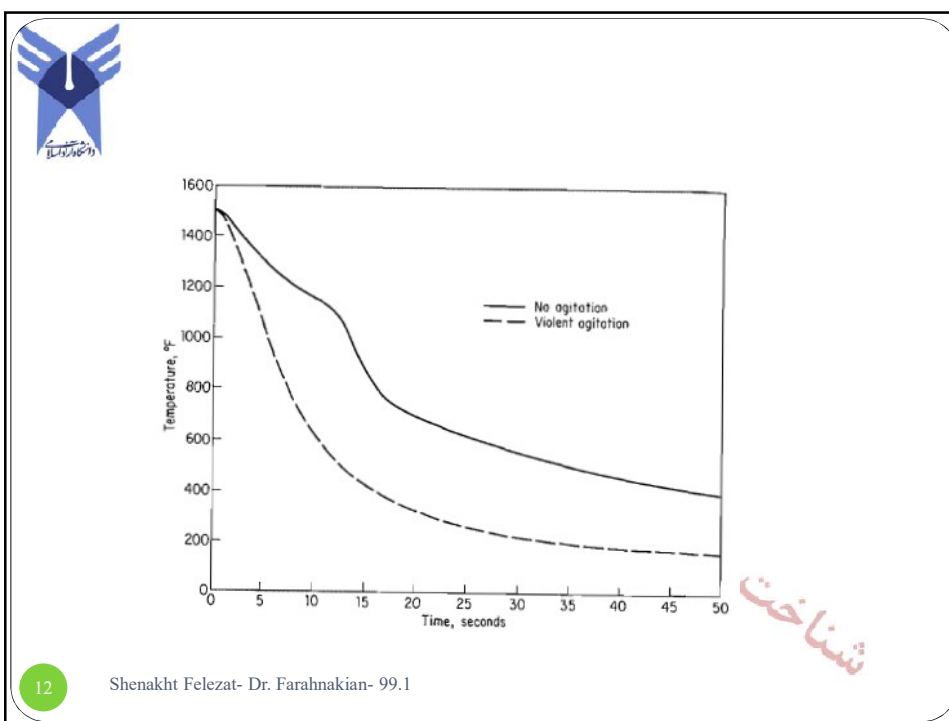
10

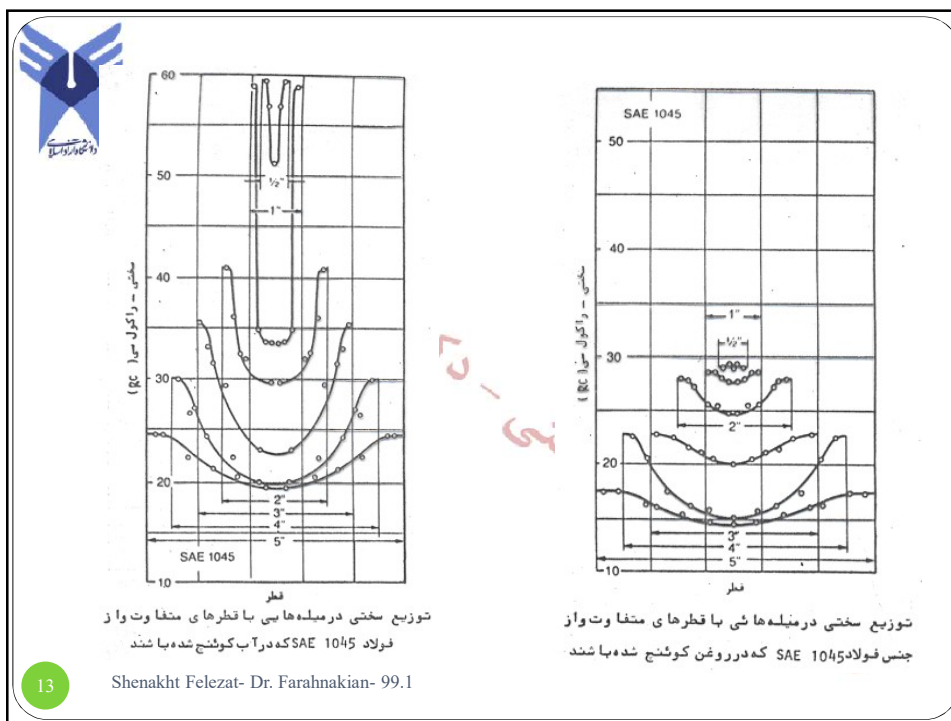
Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1



- به عنوان مثال، ایجاد تلاطم در محیط سرد کننده و یا حرکت دادن نمونه در آن باعث کاهش پایداری لایه بخار در مرحله ۱ و تشکیل حباب های کوچک تر و مجزا از یکدیگر در مرحله ۲ خواهد شد.
- اثر تلاطم محیط در مرحله ۳ بدین صورت است که لایه های جامد و ژلاتینی که بر روی سطح قطعه و یا در فصل مشترک لایه بخار و محیط تشکیل شده است را به طور مکانیکی از بین برده و در نتیجه آهنگ سرد شدن در این مرحله نیز افزایش می یابد.
- به علاوه، ایجاد تلاطم در محیط باعث می شود که مایع سرد، سریع جانشین مایع گرم شده و در تماس مستقیم با قطعه قرار گیرد.

11 Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1





13

## سختی پذیری

- قابلیت تشکیل مارتنزیت و سخت شدن فولاد را در اثر سرد کردن فاز آستنیت، سختی پذیری گویند. یعنی برای داشتن مارتنزیت هرچه سرعت سرد کردن آستنیت کمتر باشد، سختی پذیری فولاد بیشتر است. به عبارت دیگر هرچه دماغه مارتنزیتی شدن در نمودار تبدیل هم‌دما به سمت راست برود، امکان مارتنزینی شدن بر اثر آهسته سرد کردن بیشتر می شود.
- عوامل زیر سختی پذیری را افزایش می دهد:
- ۱- اندازه بزرگ‌تر دانه های آستنیت: چون کربن فرصت کمتری برای نفوذ خواهد داشت و تبدیل مارتنزیتی راحت تر انجام می گیرد.
- ۲- درصد کربن بیشتر.
- ۳- عناصر آلیاژی مانند کرم و نیکل.
- ۴- ناخالصی های غیرفلزی باعث کاهش سختی پذیری فولاد می شوند.

شناسنامه

Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1

14



## سختی پذیری (Hardenability)

- سختی پذیری توسط ضخامت پوسته سخت شده مشخص می شود و ضخامت پوسته سخت شده عبارت از فاصله سطح نمونه تا محلی در داخل آن است که مقدار مارتنزیت تا حدود ۵۰ درصد کاهش یافته باشد.
- مکانیزم مطالعه سختی پذیری بر اساس دو پارامتر، یکی قطر یا اندازه بحرانی و دیگری قطر یا اندازه ایده آل استوار است.
- قطر بحرانی بزرگترین قطر میله ای است که هرگاه در محیط مورد نظر سرد شود، مرکز آن سخت شود.
- به همین ترتیب قطر ایده آل بزرگترین قطر میله ای است که در صورت سرد شدن در یک محیط ایده آل مرکز آن سخت شود.

15

Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1



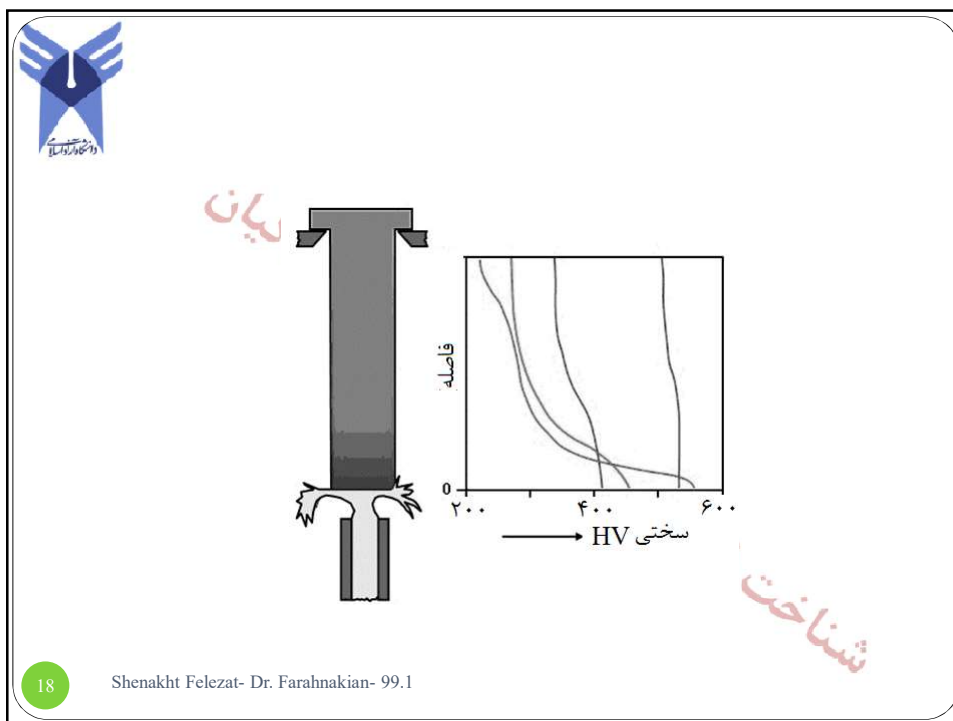
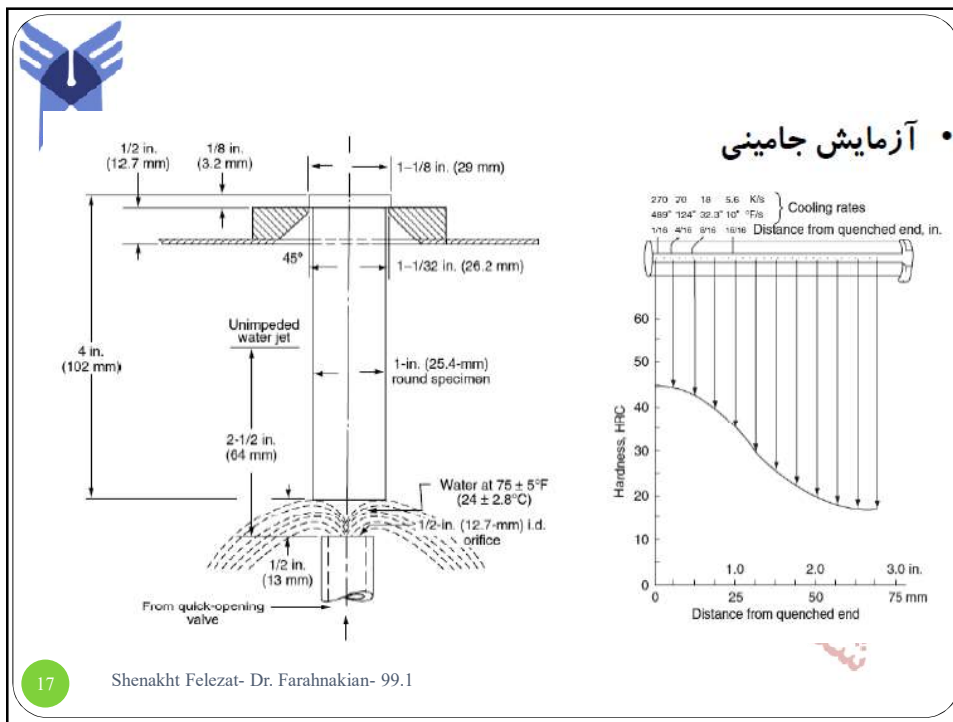
## آزمایش جامینی برای تعیین سختی پذیری

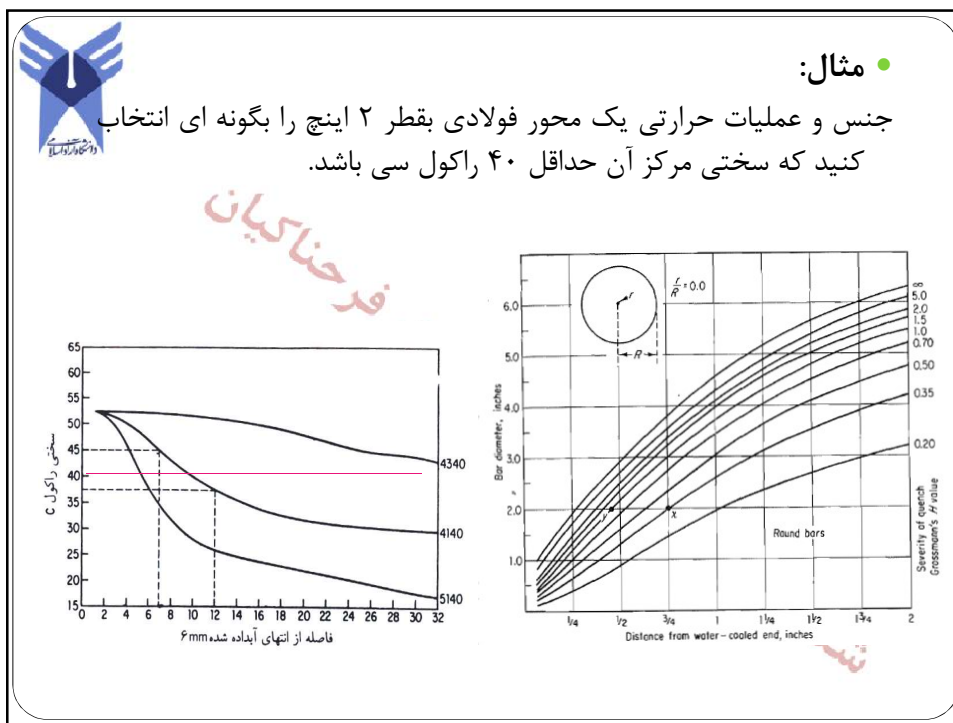
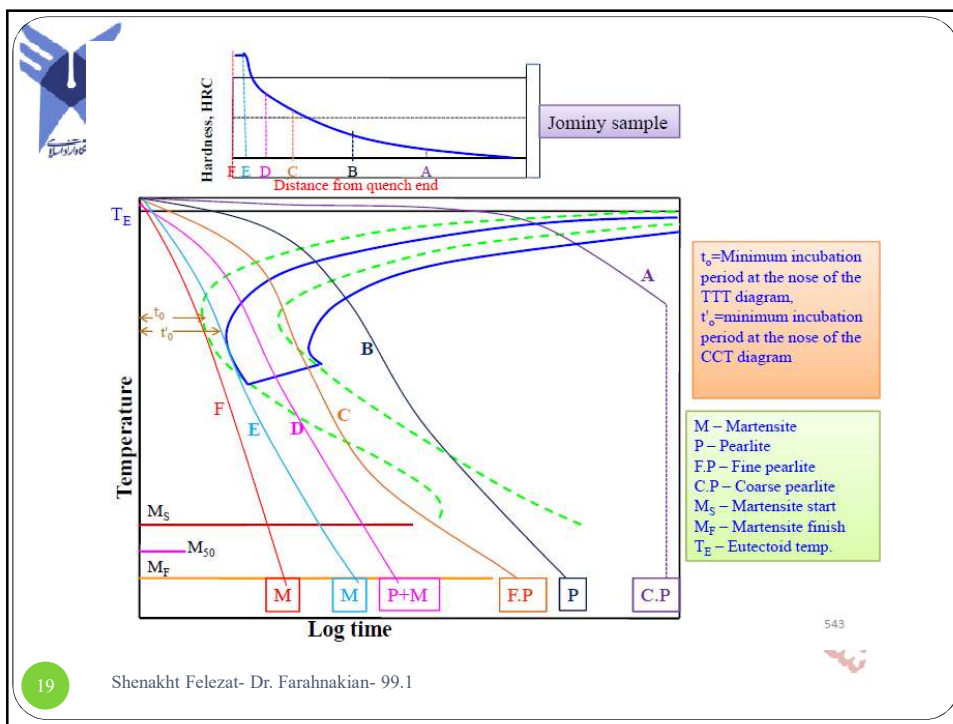
- برای این منظور از یک نمونه استوانه ای به قطر ۲۵ میلی متر (۱ اینچ) و طول ۱۰۰ میلی متر (۴ اینچ) استفاده می شود.
- در این روش نمونه مورد نظر را تا دمای سخت کردن فولاد حرارت داده و به مدت تقریباً ۲۰ دقیقه در آن دما نگه می دارند. پس از آن به کمک یک فواره آب با فشار و دبی مشخص، نمونه را از یک انتها توسط آب ۲۵ درجه سانتی گراد سرد می کنند.
- فاصله فواره از انتهای نمونه در حدود ۱۲/۵ میلیمتر است.
- تحت این شرایط، آهنگ سرد شدن نقاط مختلف نمونه از انتهای سریع سرد شده (آب پاشیده شده) به سمت دیگر کاهش می یابد.
- پس از سرد شدن، دو طرف نمونه موازی طول آن به اندازه ۰/۴ میلی متر از هر طرف سنگ زده و سختی نمونه در امتداد محور طولی اندازه گیری می شود.
- به این ترتیب منحنی تغییرات سختی برحسب فاصله از انتهای سریع سرد شده که به نمودار جامینی موسوم است را رسم می کنند.

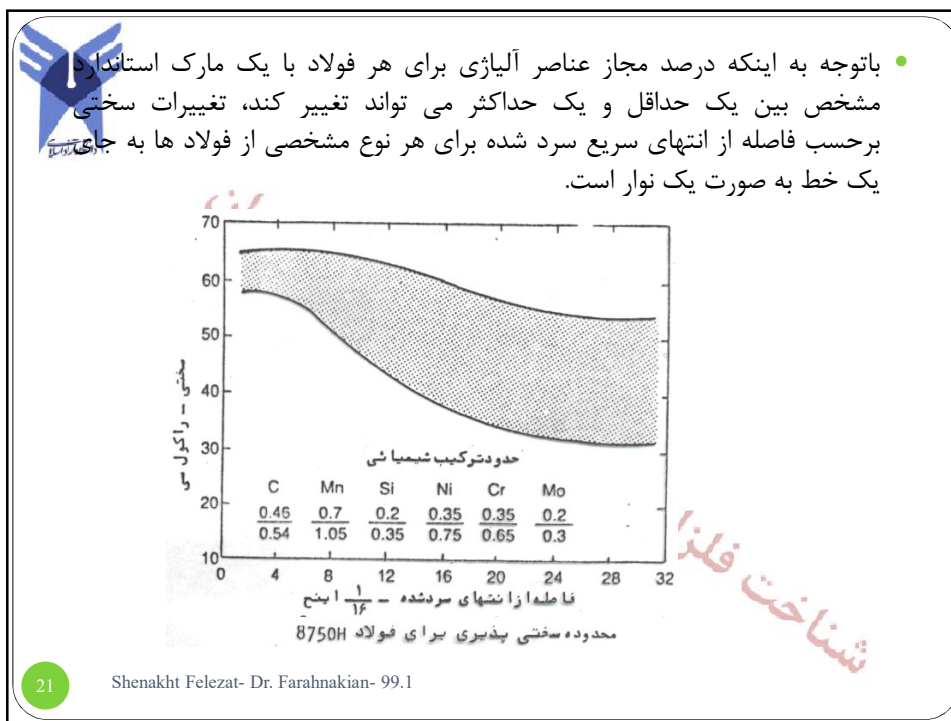
16

Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1









## عملیات تمپر کردن (برگشت یا بازپخت مارتنزیت)

- کوئنچ کردن باعث ایجاد تنش های داخلی در قطعات شده که موجب ایجاد تردی و شکنندگی در آن می شود.
- به همین علت به جز در مواردی که سختی بسیار بالایی مورد نیاز باشد، از فولادهای کوئنچ شده استفاده نمی شود. در این مرحله، می بایست فولاد قبل از استفاده تمپر شود.
- **انتخاب دما و زمان عملیات تمپر کردن بستگی به ترکیب شیمیایی فولاد، ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نیاز دارد.**
- با حذف و یا کاهش تنش های داخلی توسط عملیات تمپر، چقرمگی شکست قطعه افزایش (کاهش شکنندگی) و سختی و استحکام قطعه سخت شده تا حدی کاهش می یابد.

22 Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1



## تغییرات ریزساختار طی عملیات تمپر کردن (برگشت)

- زمانی که یک فولاد کوئنچ می شود ریزساختار شامل **مارتنزیت** ناپایدار است. دلایل این ناپایداری عبارتست از :
  - ۱- وجود کربن به صورت فوق اشباع در شبکه کریستالی bcc مارتنزیت
  - ۲- انرژی تنشی ناشی از وجود نابجایی ها و دوقلوبی های بسیار زیاد
  - ۳- وجود آستنیت باقیمانده
- در طی عملیات **تمپر کردن**، هر یک از این پارامترها خود نیروی محرکه ای برای تغییر ریزساختار می شوند.
- مثلاً؛ کربن فوق اشباع موجب تشکیل **کاربید** شده، انرژی تنشی نیروی محرکه جهت بازبایی **ریزساختار** بوده و آستنیت باقی مانده برای تشکیل مخلوط فریت و سمنتیت در طی فرایند نیروی محرکه می باشد.

23

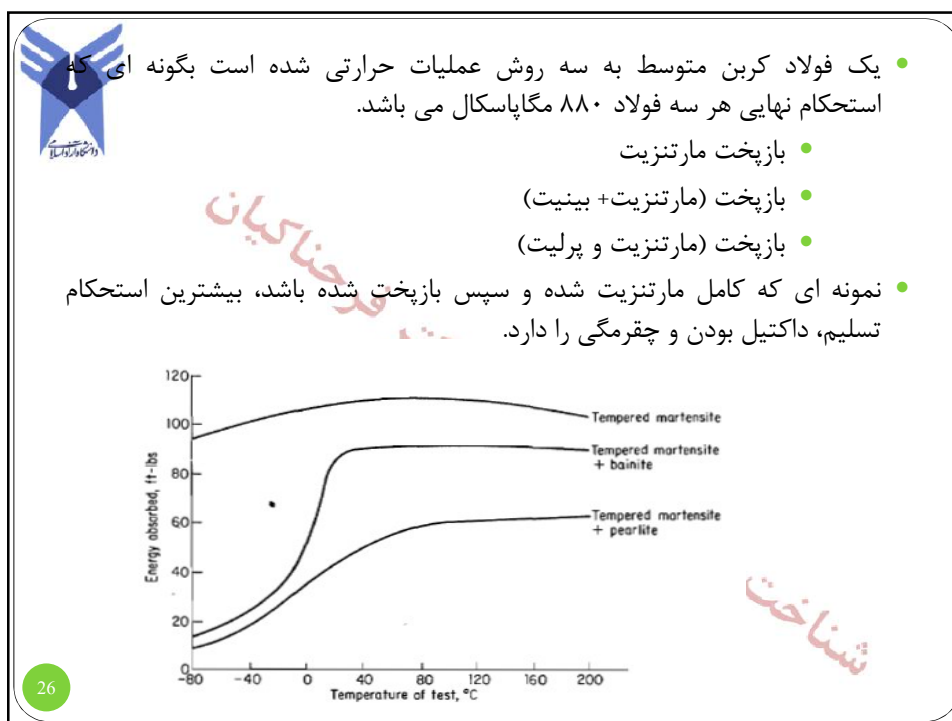
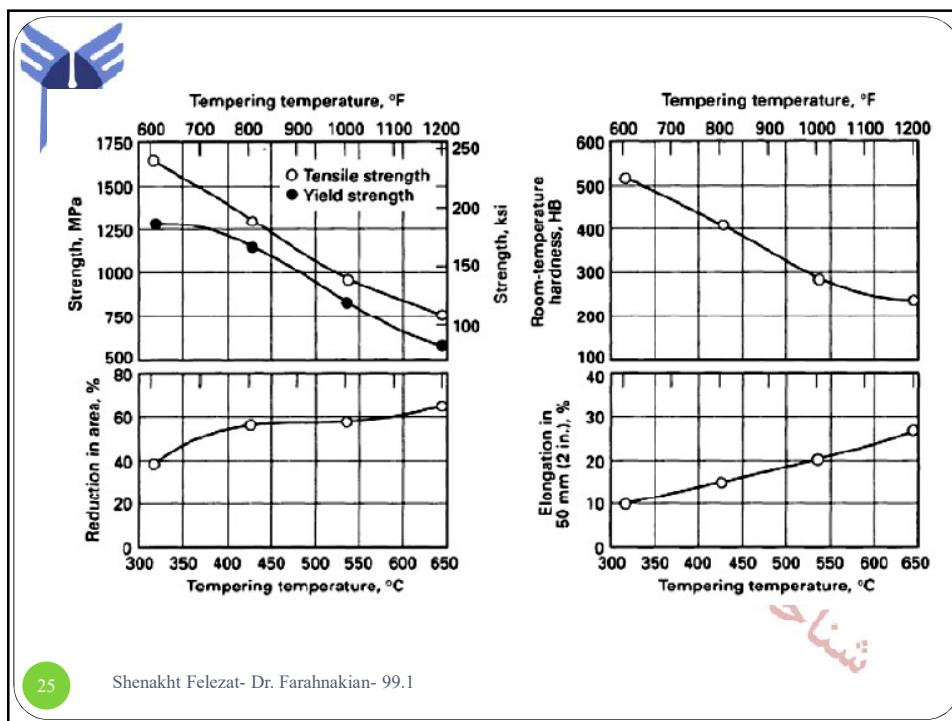
Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1




۲۰-۲۰۰	۲۰۰-۴۰۰	۴۰۰-۶۰۰	۶۰۰-۷۲۰
تشکیل کاربیدهای انتقالی کاربرد اسپینل $\epsilon$ و کاهش درصد کربن در زمینه مارتنزیتی	تبدیل کاربرد اسپینل به ذرات ریز سمنتیت	رشد ذرات بسیار ریز سمنتیت در زمینه فریت	سمنتیت کروی
کاهش تنش های پسماند	تبدیل آستنیت باقی مانده به بیتیت	کاهش سختی و استحکام و افزایش سریع چقرمگی و داکتیل بودن	سختی بسیار پایین و داکتیل بودن زیاد
تغییری در سختی، استحکام و چقرمگی ایجاد نمی شود	تبدیل مارتنزیت کم کربن به فریت	کاهش سختی و استحکام و افزایش داکتیل بودن و افزایش کم چقرمگی	
۶۰-۶۴ راکول سی	۴۰-۶۰ راکول سی	۲۰-۴۰ راکول سی	۵-۱۰ راکول سی

24

Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1





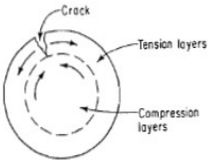
## تنش های پسماند حین عملیات حرارتی

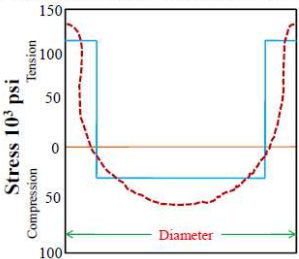
□ Thermal stresses may be calculated from the following formula:

$$S = \alpha \cdot E \cdot \Delta T$$

Where S = Thermal stress, psi  
 $\alpha$  = Coefficient of linear expansion in./.(in.)(°F)  
 E = Modulus of elasticity, psi  
 $\Delta T$  = Difference in temperature, °F

*The stress distribution is plotted schematically in below figure.*




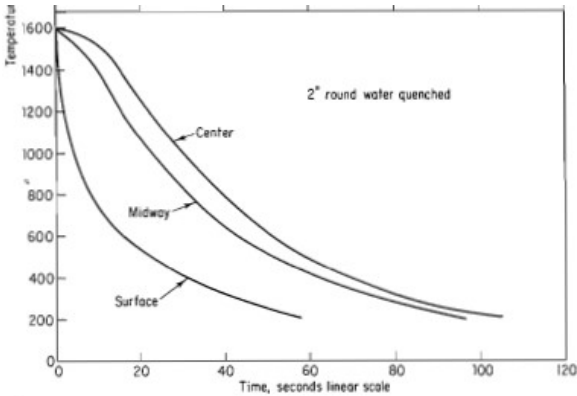


The area in tension must balance the area in compression in order for the stresses to be in equilibrium across the cross section

576

27
Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1



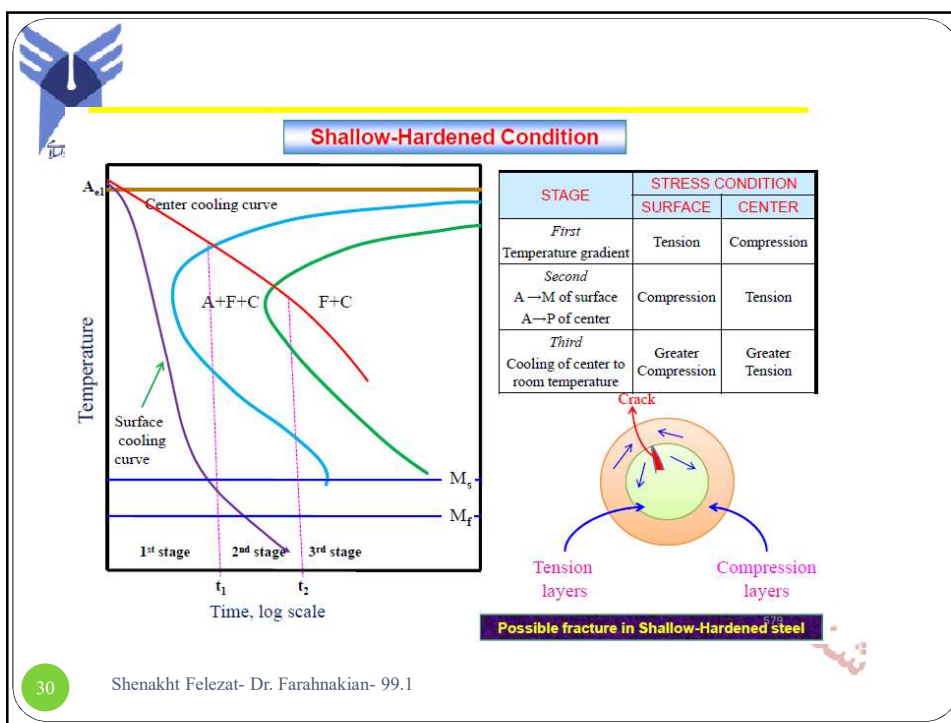
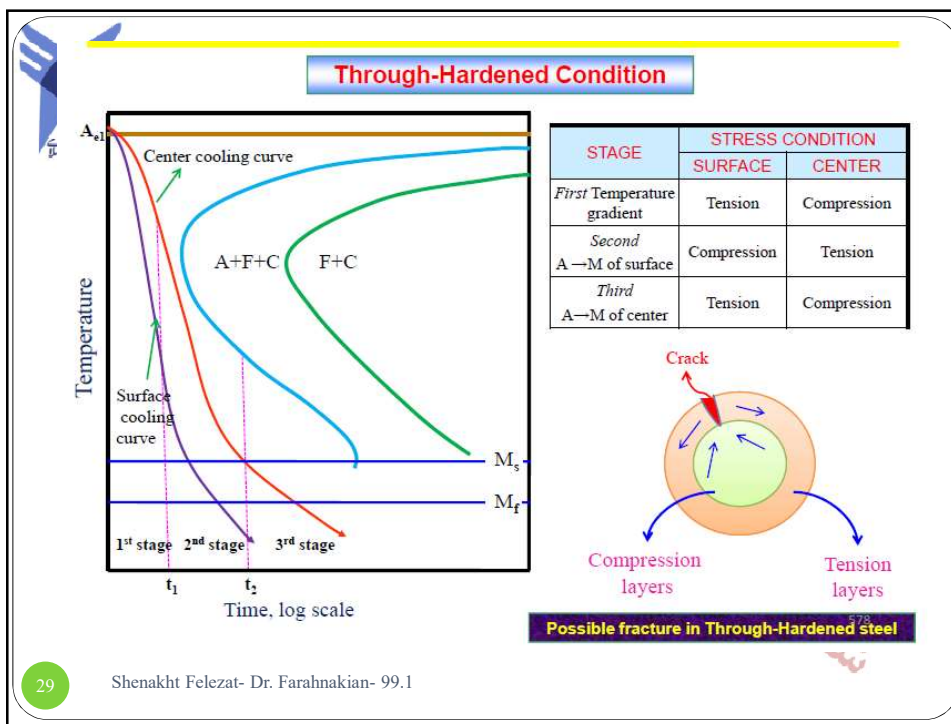


2" round water quenched

Assuming an average value for the coefficient of expansion for steel as  $6.5 \times 10^{-6}$  in./.(in.)(°F) and  $E = 30 \times 10^6$  psi, insertion of these values in the above equation with  $\Delta T = 800$  (1500 to 700°F) gives

$$s = 6.5 \times 10^{-6} \times 30 \times 10^6 \times 800 = 156,000 \text{ psi}$$

28
Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1





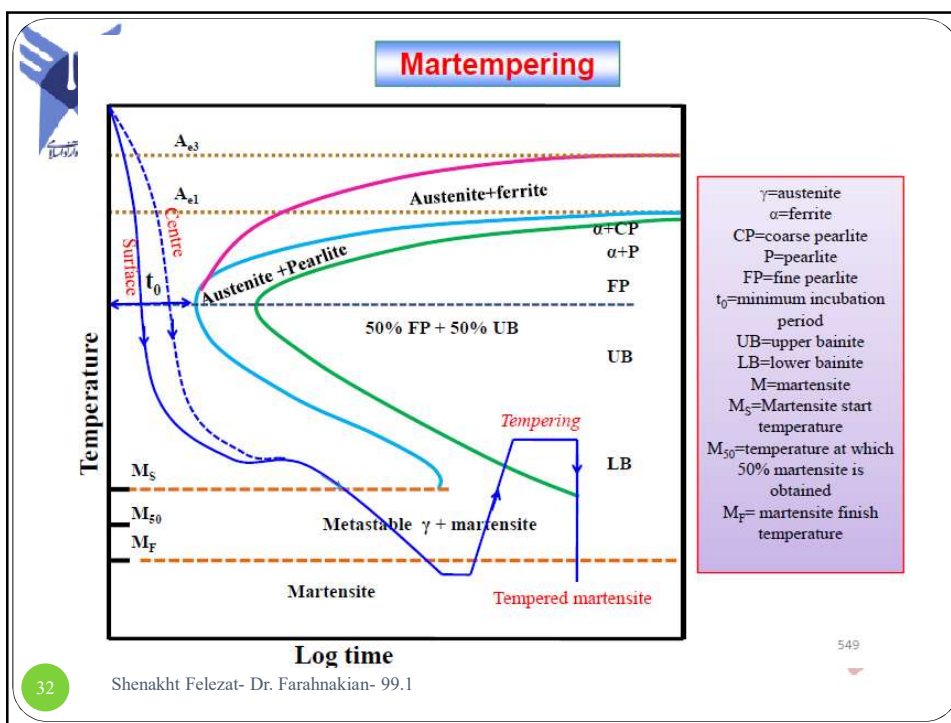
## مار تمپرینگ (Martempering)

- عملیات حرارتی یا سریع سرد کردن ناپیوسته که آن را مارکوئنچینگ نیز می نامند شامل مراحل زیر است:

- آستنیته کردن فولاد
- سریع سرد کردن فولاد در روغن داغ و یا نمک مذاب تا دمایی درست بالاتر (و یا درست پایین تر) از دمای شروع تشکیل مارتنزیت ( $M_s$ ). سریع سرد کردن در این مرحله باید به نحوی انجام گیرد که از تجزیه آستنیته در دماهای بالا جلوگیری شود.
- نگه داشتن در محیط یاد شده تا اینکه دمای قطعه در تمام قسمت های آن یکنواخت شود. زمان نگهداری در این دما بستگی به موقعیت نمودار TTT و ضخامت قطعه دارد. این زمان معمولا بین ۲ تا ۴ دقیقه برای هر میلیمتر ضخامت است.
- سرد کردن با آهنگی متوسط (معمولا در هوا) به نحوی که سطح و مرکز تقریبا همزمان سرد شده و به مارتنزیت تبدیل شوند.
- بازپخت دادن قطعه به منظور افزایش چقرمگی

31

Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1



32

Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1






- همانگونه که در شکل ها مشخص است در مرحله اول سرد شدن سطح و مرکز نمونه با دو آهنگ متفاوت سرد می شوند، در حالی که در ضمن دگرگونی آستنیت به مارتنزیت تمام قسمت های قطعه تقریبا به طور همزمان سرد شده و بنابراین دگرگونی در سطح و مرکز همزمان انجام می شوند. از این رو احتمال ترک برداشتن، اعوجاج و ایجاد تنش در قطعه به حداقل ممکن می رسد.
- جدول زیر خواص مکانیکی فولاد ۱۰۹۵ (۰.۹۵ درصد کربن) را پس از مارتمپر شدن همانگونه که ملاحظه می شود برای یک سختی یکسان مقاومت به ضربه فولاد مارتمپر و بازپخت شده به مراتب بیشتر از فولاد سریع سرد شده و بازپخت شده است.

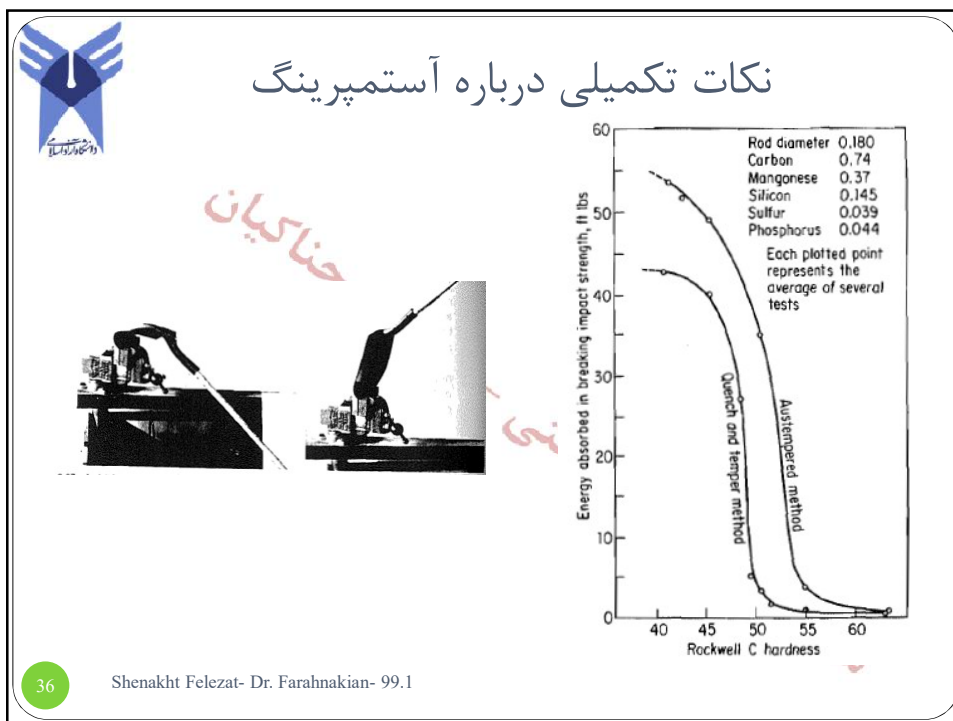
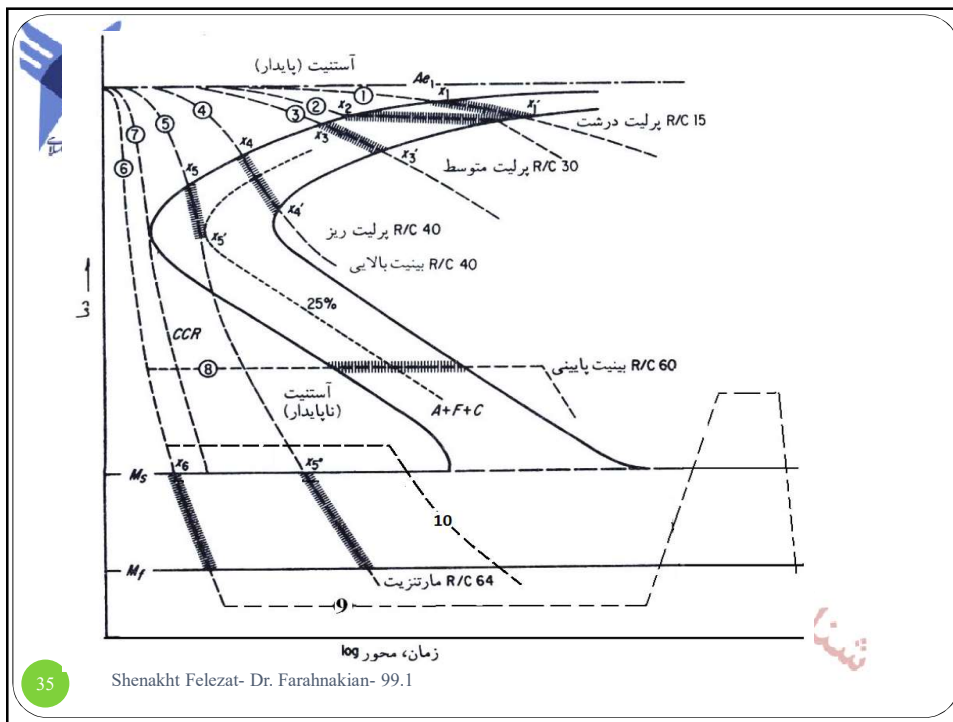
نوع عملیات حرارتی	سختی HRC	مقاومت به ضربه fb-lb
سرد کردن در آب و بازپخت	۵۲	۱۲
مارتمپر و بازپخت	۵۲	۲۸


33 Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1



- یکی از جنبه های مهم مارتمپرینگ این است که به جز مارتنزیت ساختار و با فاز دیگری به وجود نمی آید (البته در مقایسه با سرد کردن سریع و مسقیم در این حالت معمولا درصد آستنیت باقی مانده بیشتر است).
- بنابراین، فولادهایی برای مارتمپرینگ مناسب اند که نه تنها نسبت به محصولات حاصل از دگرگونی آستنیت در دمای بالا (مانند فریت و پرلیت) بلکه نسبت به تشکیل بینیت که ممکن است در دماهای بلافاصله قبل از MS تشکیل شود نیز دارای سختی پذیری خوبی باشند.
- نکته دیگری که در این رابطه باید در نظر داشت این است که شدت سرد کنندگی روغن داغ و نمک های مذاب کمتر از شدت سرد کنندگی آب و یا روغن سرد است، بنابراین فولادهایی را می توان مارتمپر کرد که سختی پذیری آن ها آنقدر زیاد باشد که گاهش آهنگ سرد کنندگی محیط را جبران کند.
- از این رو این نوع عملیات حرارتی عمدتا به فولادهایی که در هوا و یا روغن سخت می شوند محدود می شود.

34 Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1






جدول ۳-۹ خواص مکانیکی فولاد ۱۰۹۵ که به روش مارتمپرینگ و سریع سرد کردن یک مرحله‌ای (مستقیم) سخت شده باشند [۱۳].

نوع عملیات حرارتی	سختی HRC	مقاومت به ضربه fb-lb	ازدیاد طول درصد
سرد کردن در آب و بازیخت	۵۳	۱۲	۰
مارتمپر و بازیخت	۵۳	۲۸	۰
آستمپر شده	۵۲	۴۵	۱۱

- هدف از بکارگیری آستمپرینگ بجای آبدادن و تمپرینگ:
- افزایش چقرمگی و انعطاف پذیری برای یک سختی مشخص
- حذف و کاهش تنش‌های پسماند و احتمال ترک برداشتن

37 Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1



- در فولاد های کربنی ساده که سختی پذیری پایینی دارند، زمان لازم برای شروع تبدیل در حوالی دماغه منحنی IT نسبتا کم است و فقط مقاطع نازک تا ۵ میلیمتر را می توان آستمپرینگ انجام داد.
- درحالیکه اگر قطعه ضخیم باشد، بایستی فولاد آلیاژی (سختی پذیری خوب) داشته باشد.
- در این حالت چون برای فولاد های آلیاژی دماغه بسمت راست کشیده شده است، زمان لازم برای تبدیل آستنیت به بینیت زیاد شده و در عمل آستمپرینگ فولادهای آلیاژی گرانبه‌تر و غیر اقتصادی می شود.

38 Shenakht Felezat- Dr. Farahnakian- 99.1