آزمایشگاه عملیات حرارتی

بررسی آزمایشات آنیل کامل و نرمال، سخت گردانی در دو محیط آب و روغن، تمپر کردن، کروی کردن، کربوره کردن و جامینی برای فولادهای هایپو یوتکتوئید و یوتکتوئیدی

منابع

۱- کتاب عملیات حرارتی فولادها تالیف دکتر محمدعلی گلعذار

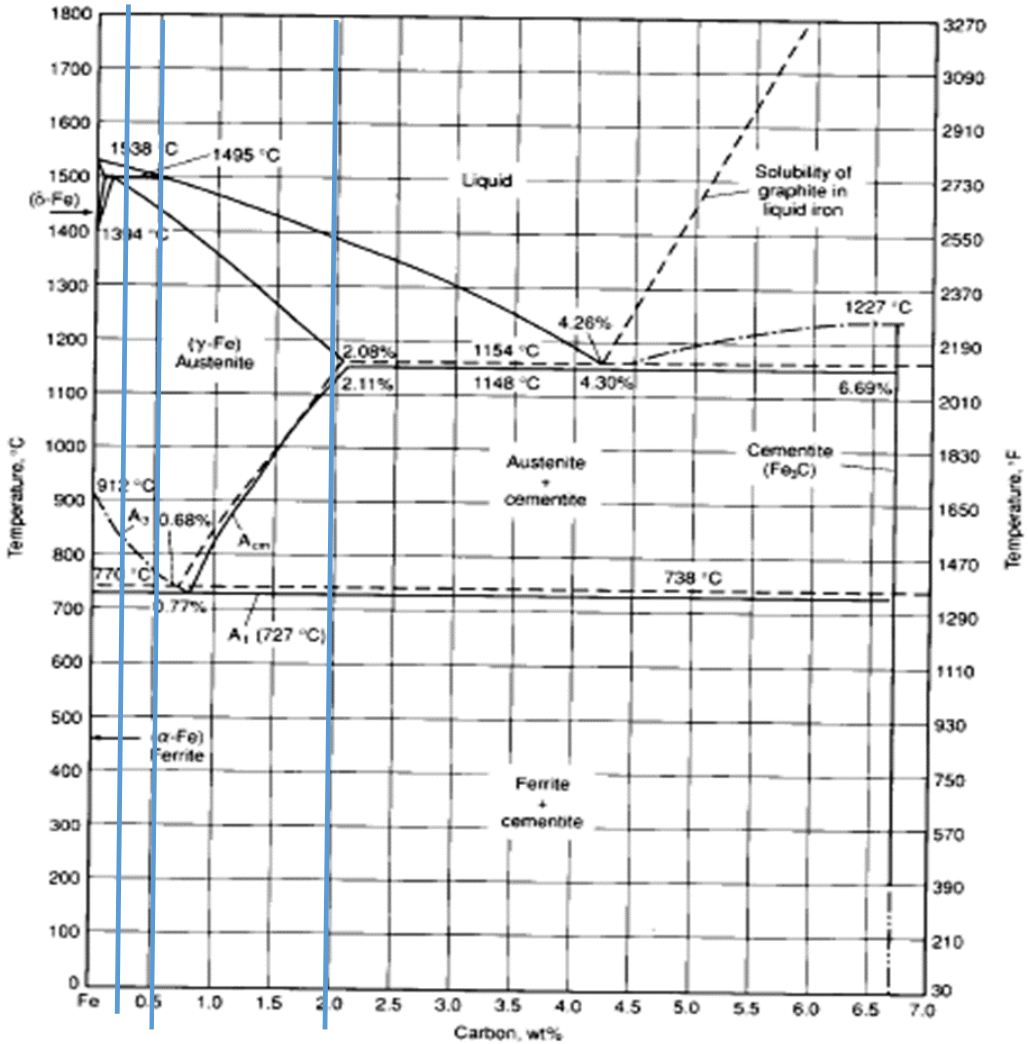
۲- هندبوک استاندارد ASM

۳- جزوه عملیات حرارتی، دانشگاه حکیم سبزه واری

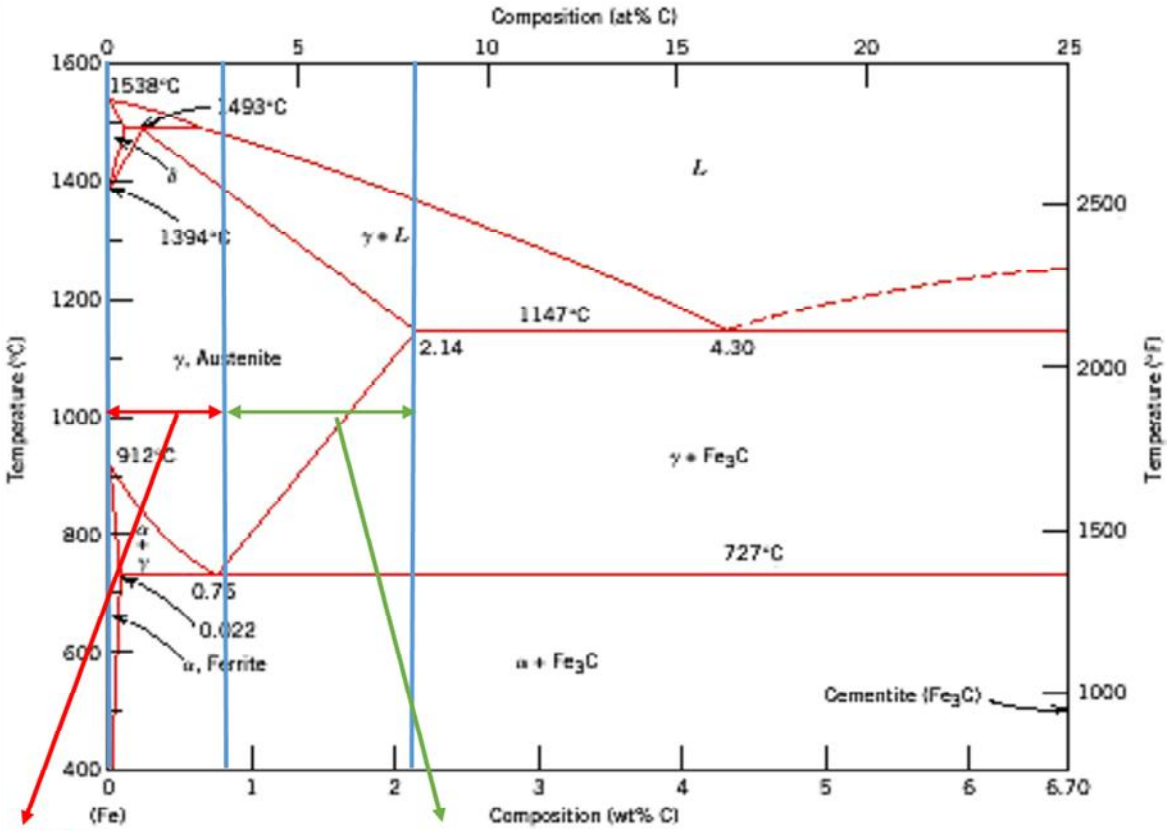
ASM Handbook™

Volume 4
Heat Treating

Prepared under the direction of the
ASM International Handbook Committee



The Fe-C equilibrium diagram up to 6.67 wt% C. Solid lines indicate Fe-Fe_3C diagram; dashed lines indicate iron-graphite diagram.



Hypo-Eutectoid Eutectoid Hyper-Eutectoid

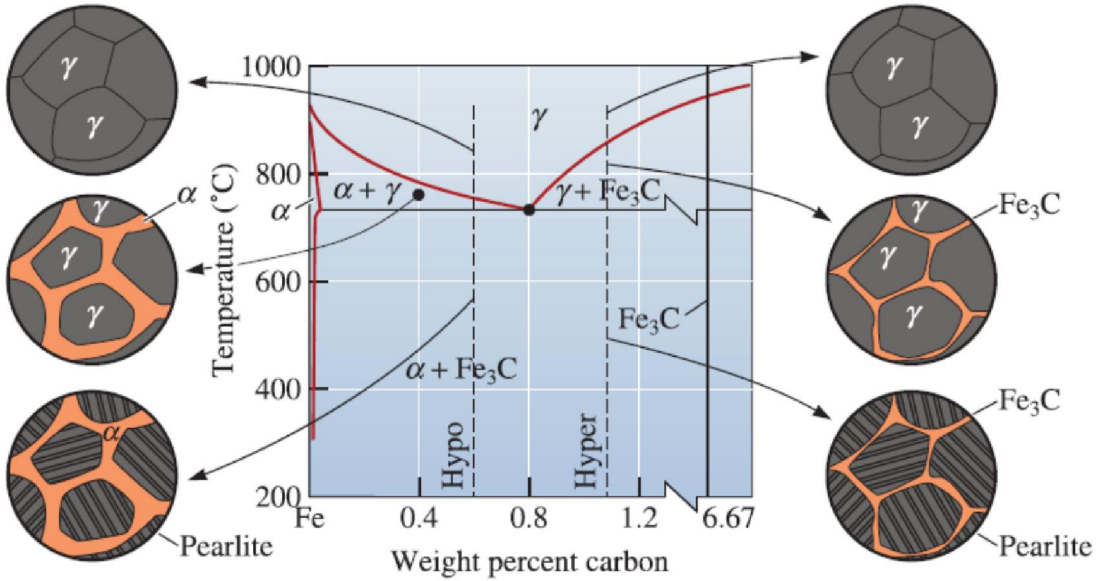
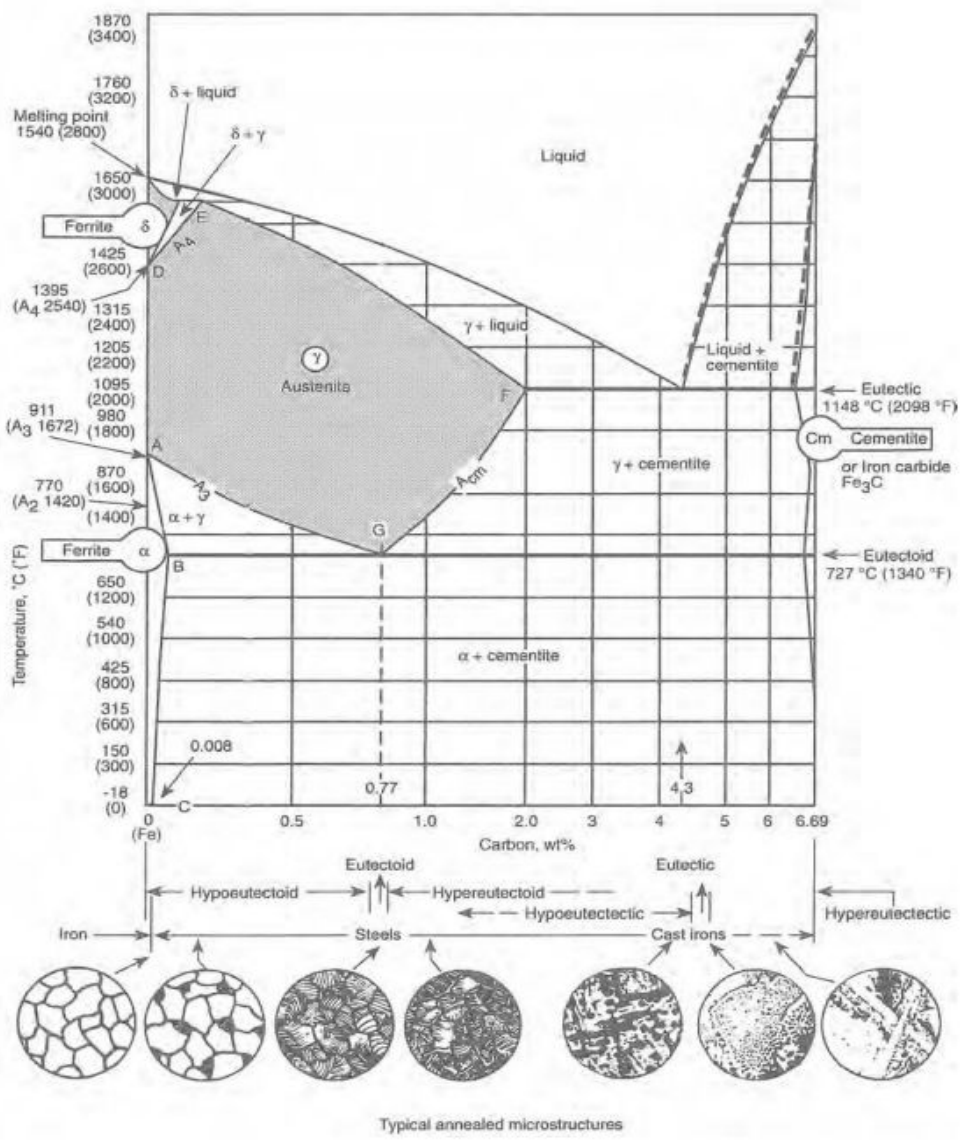


Figure 12-16 The evolution of the microstructure of hypoeutectoid and hypereutectoid steels during cooling, in relationship to the Fe-Fe_3C phase diagram.



Typical annealed microstructures

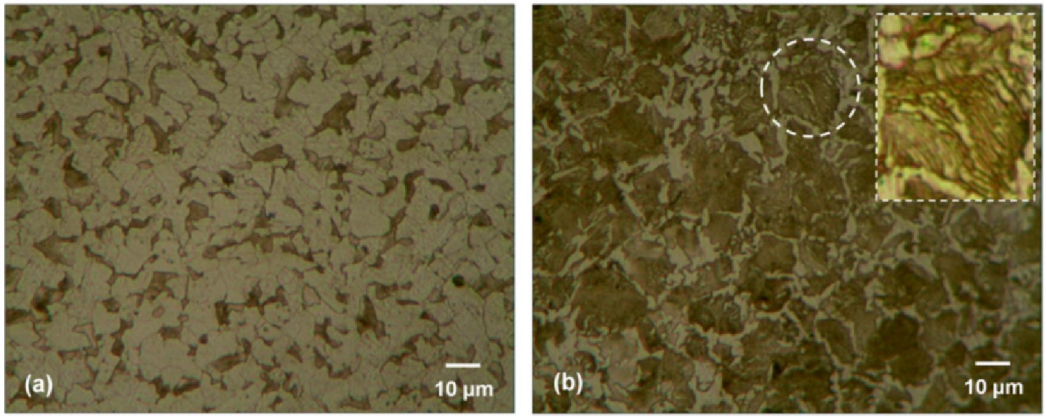
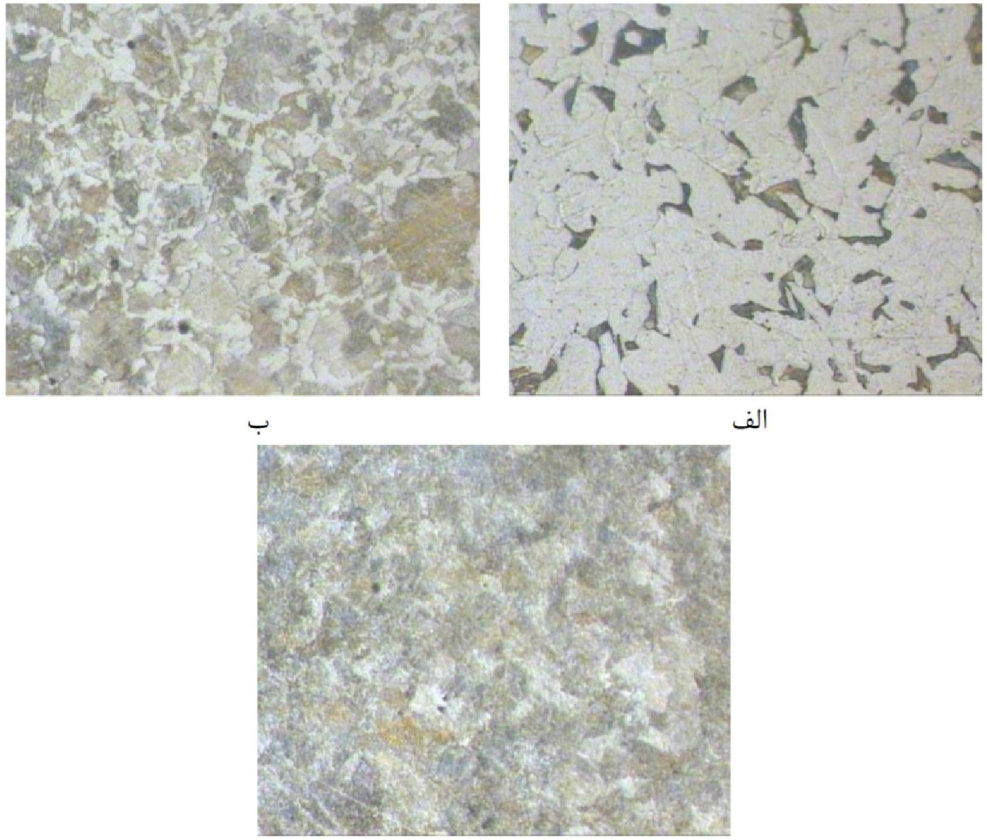


Fig. 3. Metallographic results of AISI 1020 (a) and AISI 1040 (b) carbon steel samples. The samples were etched for 10 s. in fresh Nital solution. (insert) Magnification of the selected region of AISI 1040 steel showing the pearlitic phase.

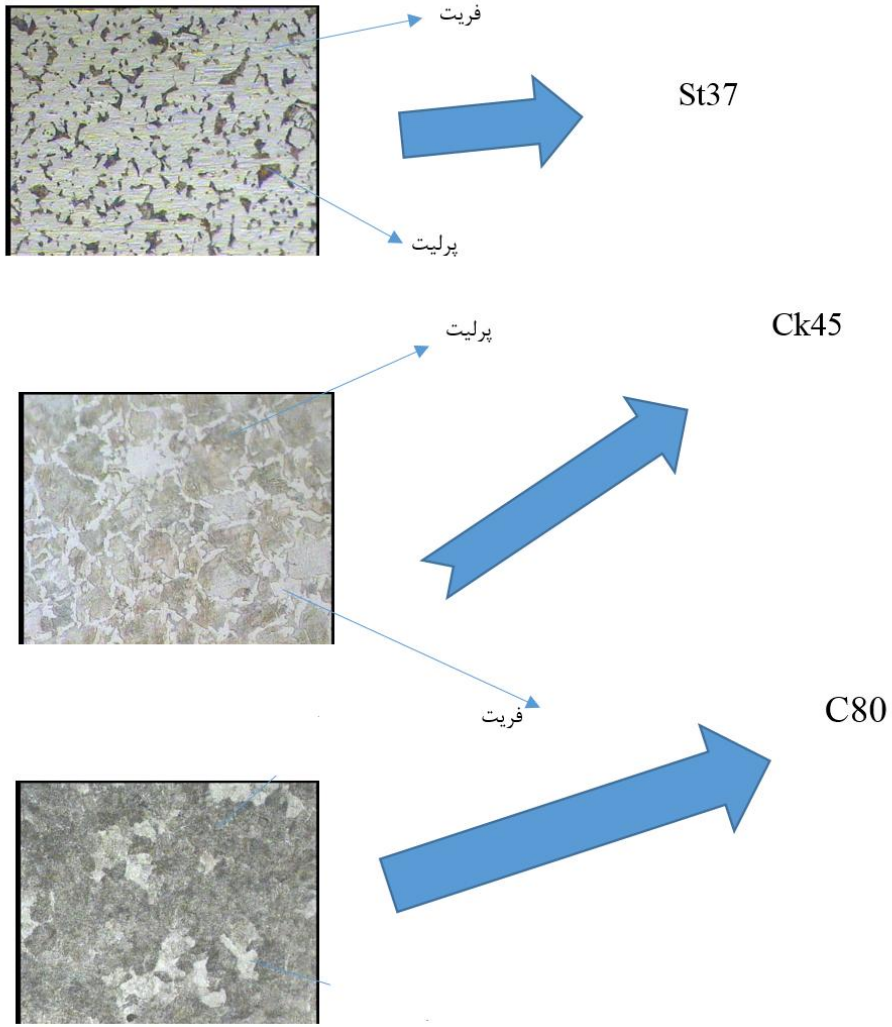
نوع فولاد	درصد کربن	میزان سختی
St37	0.2	75 – 77 HRB
CK45	0.47 – 0.5	21 – 22 HRC
C80	0.75 – 0.84	31 – 33 HRC

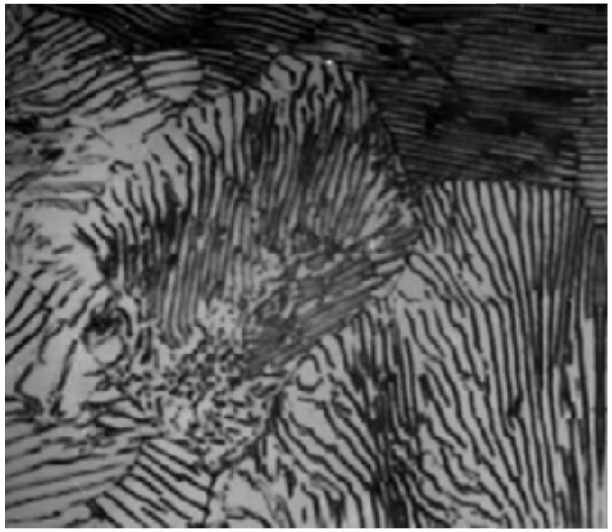


ب الف

ج

شکل ۱: تصویر میکروسکوپ نوری ۳ نوع فولاد (بزرگنمایی 200x): الف St37، ب Ck45 و ج C80


فریت
پرلیت
St37
پرلیت
Ck45
فریت
C80



شکل ۲-۲ میکروساختار پرلیت مربوط به آلیاژ Fe-٪۰/۷۵C که پس از آستنیته شدن در کوره سرد شده است. محلول حکاکی، پیکرال، بزرگنمایی، × ۵۰۰ [۱].

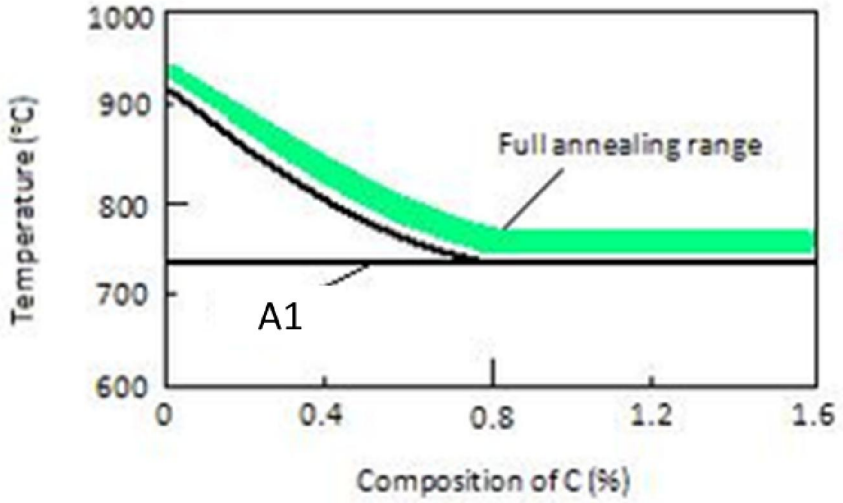
عنوان آزمایش:

عملیات حرارتی آنیل و نرمال برای فولادهای St37، Ck45، C80

۲-۱-۱- آنیل کامل

آنیل کامل به صورت گرم کردن فولاد در محدوده دمایی مشخص (بالا)، نگهداری در این دما و سپس سرد کردن بسیار آهسته (در کوره) انجام می‌شود. ساختار حاصل از این عملیات فریت و سمنتیت می‌باشد. پرلیتی که از این عملیات به دست می‌آید پرلیت درشت می‌باشد. محدوده دمایی آنیل کامل برای فولاد هایپر A1+50 درجه سانتیگراد و محدوده دمایی برای فولاد هیپو A3+50 می‌باشد.

علت آنیل کردن فولاد هایپر در منطقه A3+50 جلوگیری از تشکیل شبکه به هم پیوسته کاربید که منجر به ترد شدن فولاد می‌گردد.



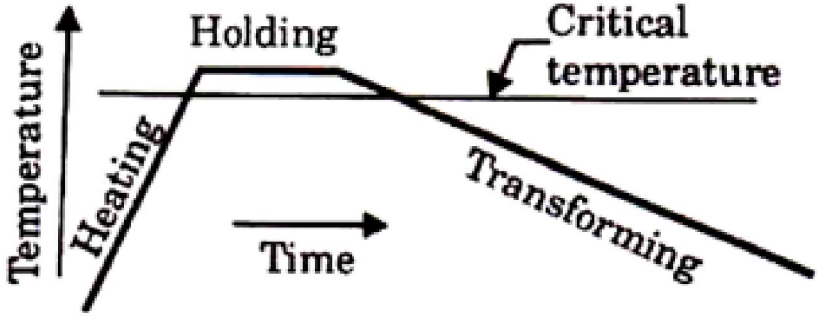
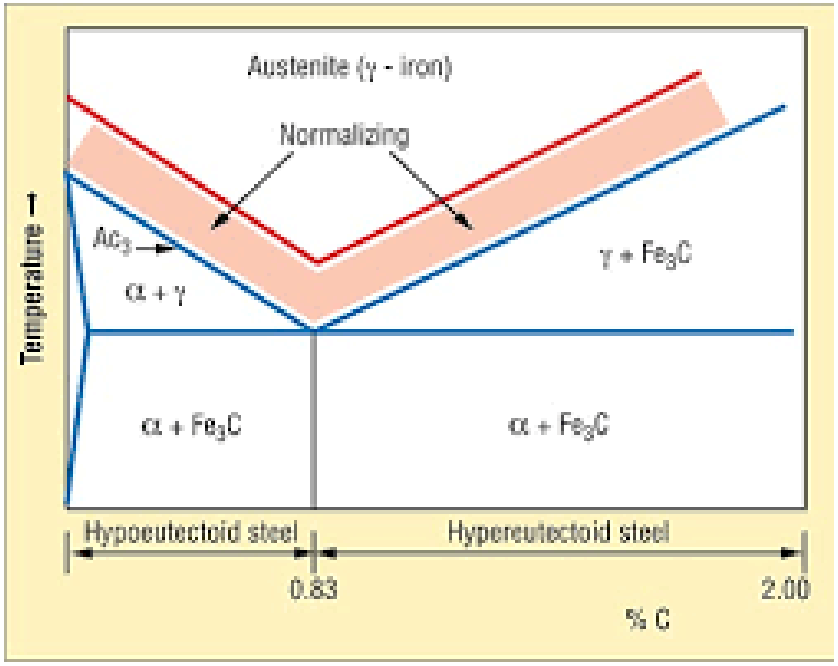


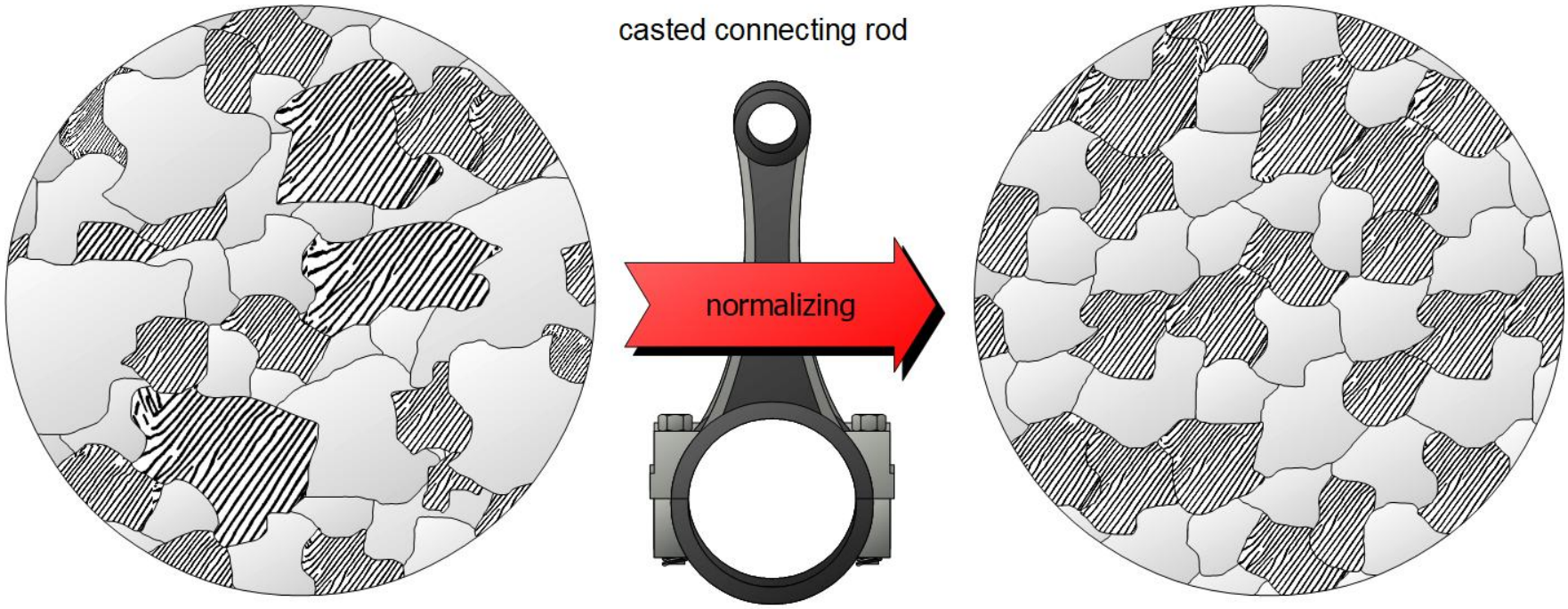
Fig. 5.17. Full annealing.

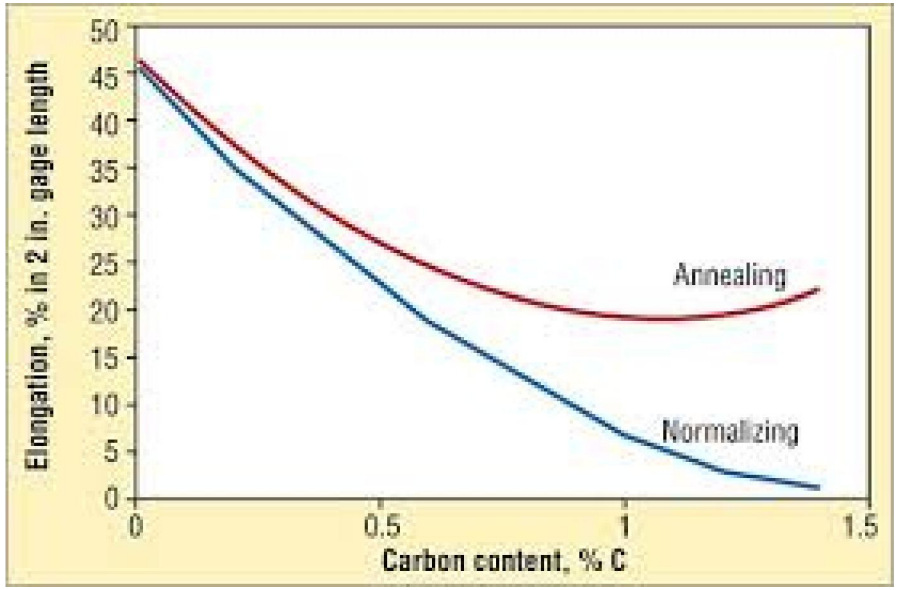
۲-۲- نرماله کردن (Normalizing)

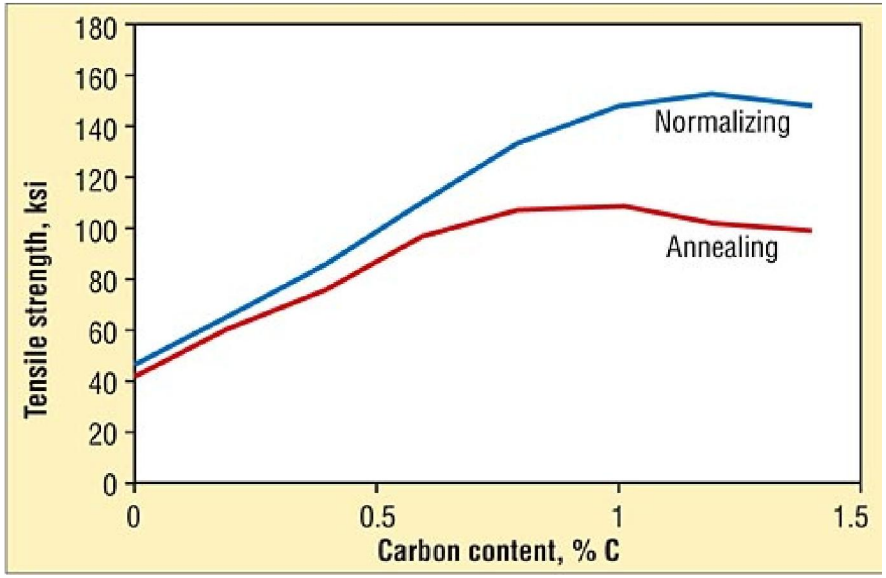
نرماله کردن یکی دیگر از انواع روش‌های عملیات حرارتی است که میکروساختار حاصل همانند آنیل کامل شامل پرلیت، مخلوط پرلیت- فریت و یا مخلوط پرلیت- سمنتیت(وابسته به ترکیب شیمیای فولاد) است. لیکن تفاوت‌های مهمی بین نرماله کردن و آنیل کردن وجود دارد. در نرماله کردن دمای آستنیته کردن برای فولادهای هیپوتکتوئید کمی بالاتر از گستره دمایی مربوط به آنیل کردن است. برخلاف آنیل کامل که فولاد در کوره سرد می‌شود در عملیات نرماله کردن قطعات پس از آستنیته شدن در هوا سرد می‌شوند. تحت چنین شرایطی آهنگ سرد شدن در حدود ۰/۱ تا ۱ درجه سانتیگراد در ثانیه است.

از آنجا که در نرماله کردن فولادهای هیپوتکتوئید گستره دمایی آستنیته کردن بالاتر از گستره دمایی مربوط به آنیل است، ساختار آستنیت و همچنین توزیع عناصر آلیاژی از یکنواختی بیشتری برخوردار خواهد بود.


Austenite (γ - iron)
Normalizing
Temperature
Ac_3
α + γ
γ + Fe_3C
α + Fe_3C
α + Fe_3C
Hypoeutectoid steel
Hypereutectoid steel
0.83
2.00
% C

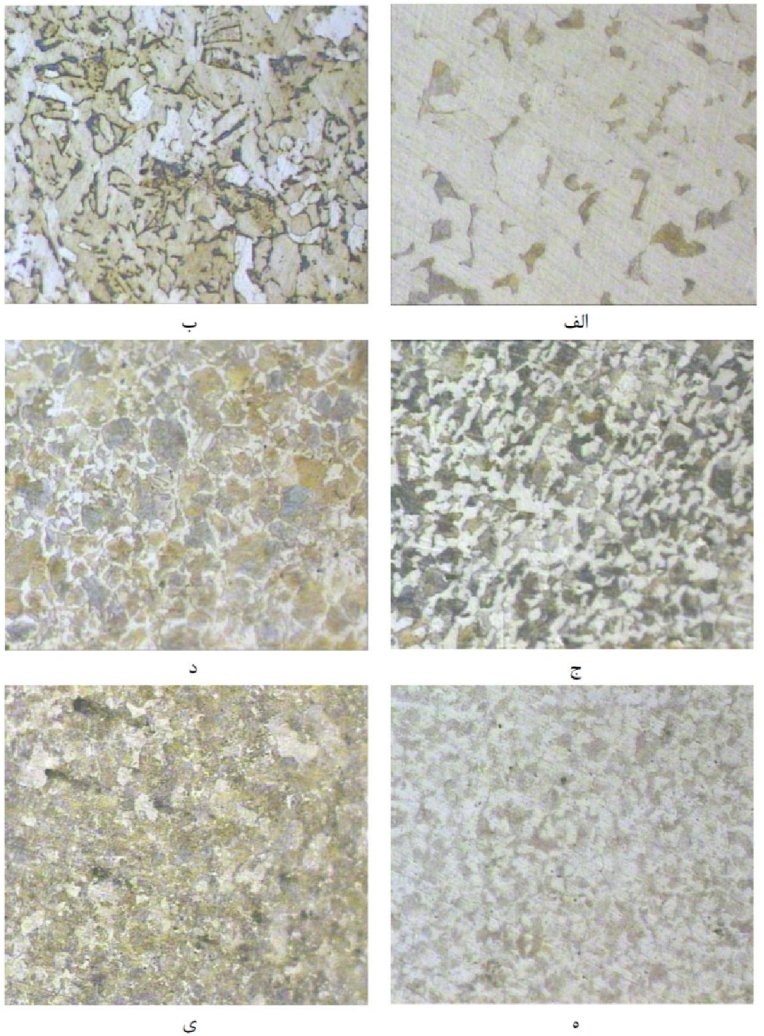

casted connecting rod
normalizing
heterogeneous microstructure
homogenous microstructure


Elongation, % in 2 in. gage length
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
0
0.5
1
1.5
Carbon content, % C
Annealing
Normalizing


Tensile strength, ksi
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
0.5
1
1.5
Carbon content, % C
Normalizing
Annealing

ساختارهای آنیل شده

ساختارهای نرمال شده



ل ۲: تصویر میکروسکوپ نوری ۳ نوع فولاد بعد از عملیات حرارتی آنیل کردن و نرماله کردن (تمامی اشکال با بزرگ

200x می‌باشند): الف: St37 آنیل، ب: St37 نرمال، ج: Ck45 آنیل، د: Ck45 نرمال، ه: C80 آنیل، ی: C80 نرمال

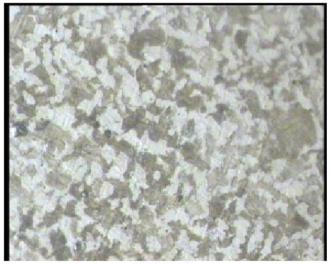
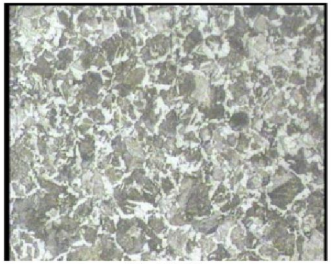
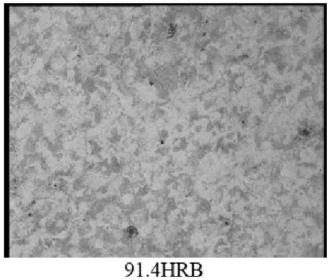
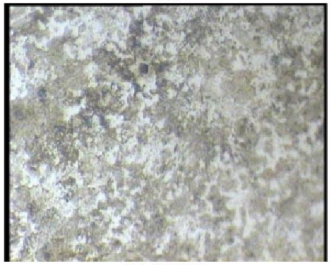
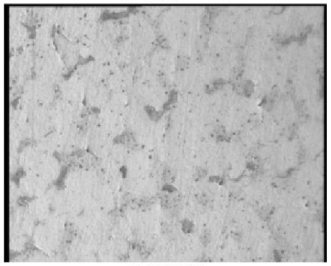
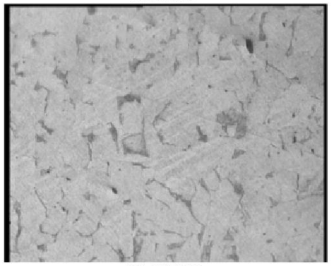
تفاوت

۱ – نوع پرلیت (طول لایه)

۲ – پراکندگی

۳– سختی

۴– مقدار پرلیت

آنیل	نرمال
Ck45  86HRB	Ck45  91.4HRB
C80  91.4HRB	C80  94.9HRB
St37  52.7HRB	SXSt37  63.2HRB

شکل ۹

Table 4.7.1 The variation in the properties of the annealed and normalized components [7]

Annealed	Normalised
• Less hardness, tensile strength and toughness. • Pearlite is coarse and usually gets resolved by the optical microscope. • Internal stresses are least.	• Slightly more hardness, tensile strength and toughness. • Pearlite is fine and usually appears unresolved with optical microscope. • Internal stresses are slightly more.

۴- نتیجه گیری

- سختی فاز پرلیت بدلیل دوفازی بودن (لایه‌های فریت و سمنتیت) نسبت به فاز فریت بیشتر است.
- در عملیات حرارتی آنیل کردن فاز پرلیت درشت (طول لایه‌ها بیشتر است) است نسبت به عملیات حرارتی نرمال کردن.
- در عملیات‌های حرارتی انجام شده نوع فاز تغییر نمی‌کند اما شکل فازها تغییر خواهد کرد.
- اگر زمان عملیات حرارتی زیادتر از حد مشخص (برای هر ۱ اینچ ضخامت حدود یک ساعت زمان نیاز است) طول بکشد اندازه دانه‌ها درشت‌تر می‌شود.
- سختی نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی نرمال کردن حدود ۵-۸ راکول سی بیشتر از سختی نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی آنیل کردن می‌باشد.

عنوان آزمایش:

اثر عملیات حرارتی کوئنچ در دو محیط آب و روغن بر فولادهای St37، Ck45، C80

۱-۱- انواع محیط های کوئنچ

۱-۱-۱- آب

شاید آب قدیمی‌ترین محیط سردکننده برای سخت کردن فولادها بوده و برای قرن‌ها مهم‌ترین محیط سخت‌کننده همچنان باقی مانده است.

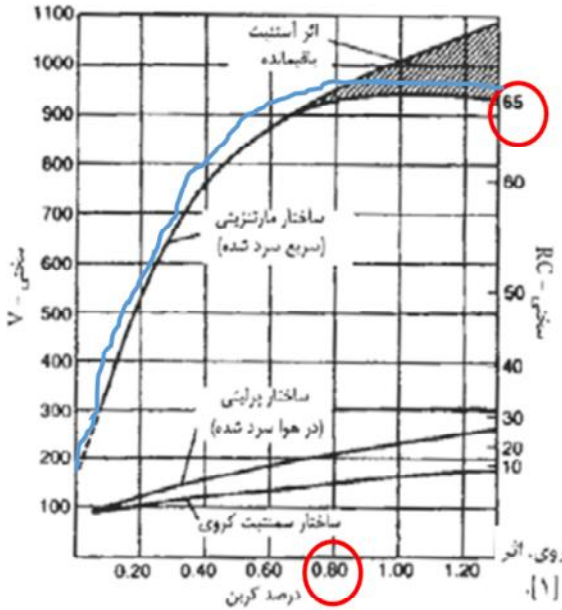
۲-۱-۱- روغن

روغن در مقایسه با آب محیط بسیار ملایم‌تری است.

یکی از مطمئن‌ترین روش‌ها برای افزایش قدرت سردکنندگی روغن‌ها ایجاد تلاطم در مخزن روغن و یا حرکت دادن قطعه در آن است. یکی دیگر از روش‌های افزایش قدرت سردکنندگی روغن، گرم کردن آن تا گستره دمایی ۴۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. این افزایش دما باعث افزایش گرانروی روغن شده و به این ترتیب قدرت سردکنندگی آن را افزایش می‌دهد. معمولا چدن‌ها و فولادهای ساده کربنی را در روغن کوئنچ می‌کنند.

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].

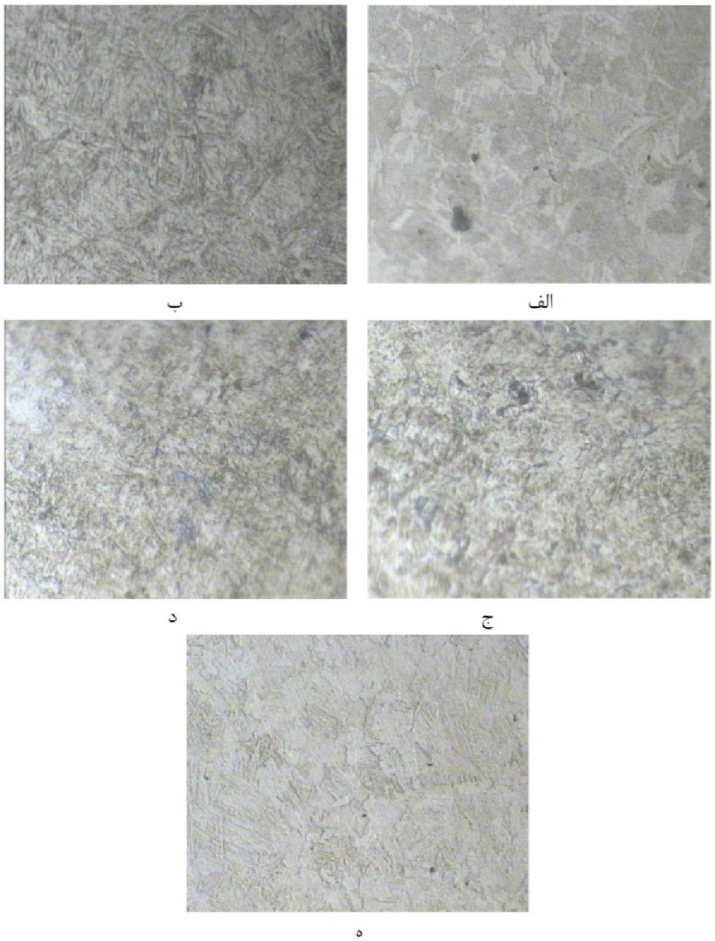
عوامل موثر بر سختی پذیری

- به طور کلی هر عاملی که تشکیل پرلیت را به تعویق بیندازد باعث افزایش سختی پذیری خواهد شد.

- اندازه دانه آستنیت (افزایش)، سختی پذیری (افزایش)، سختی (کاهش)
- درصد کربن (افزایش)، سختی پذیری (افزایش)، سختی (افزایش)
- عناصر آلیاژی به شرط انحلال کامل در آستنیت (افزایش)، سختی پذیری (افزایش)، سختی (افزایش)
- آخالها و ذرات ناخالصی (افزایش)، سختی پذیری (کاهش)
- ناهمگن بودن ساختار آستنیت (افزایش)، سختی پذیری (کاهش)

سردشده در روغن

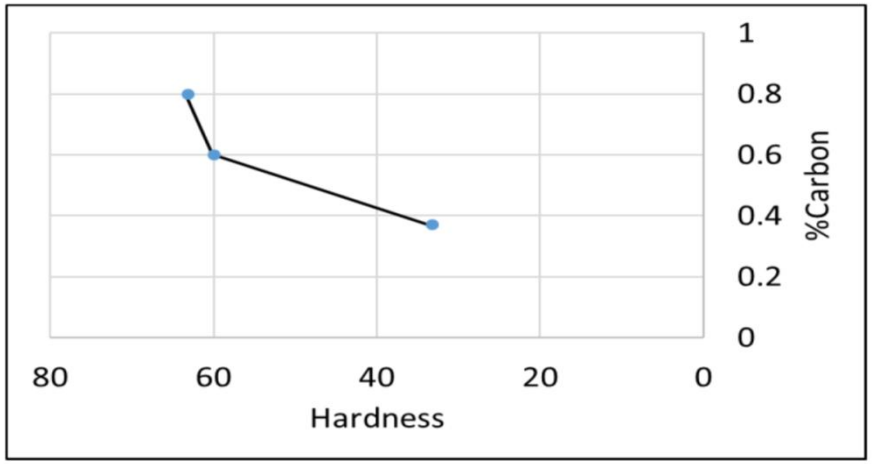
سردشده در آب



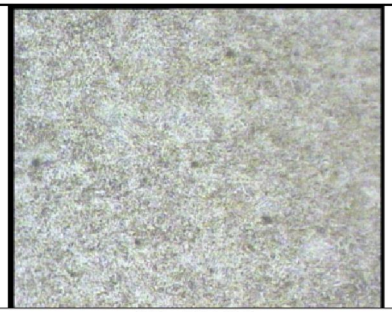
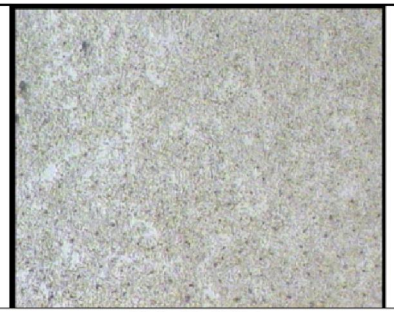
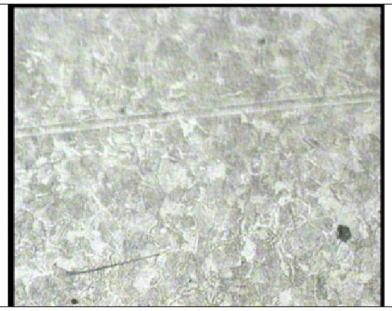
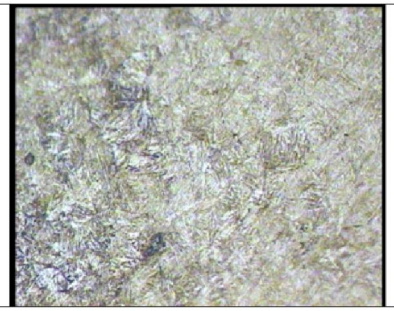
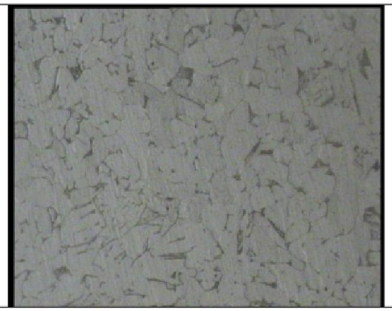
شکل ۱: تصاویر میکروسکوپ نوری ۳ نوع فولاد بعد از عملیات حرارتی کوئنچ در آب و روغن (تمامی اشکال با بزرگنمایی 500x می-
باشند): الف: C60 در روغن ، ب: C60 در آب، ج: C80 در روغن، د:C80 در آب، ، ه: St37 در آب

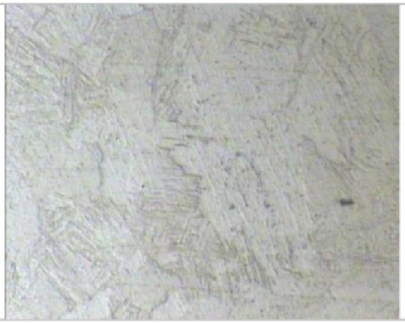
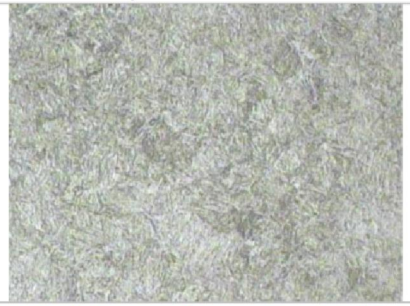
جدول ۱: نتایج آزمون سختی سنجی

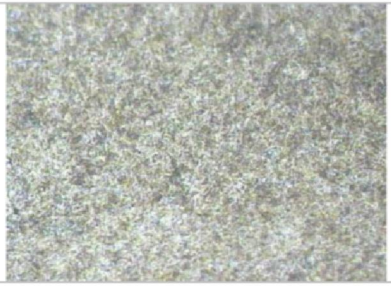
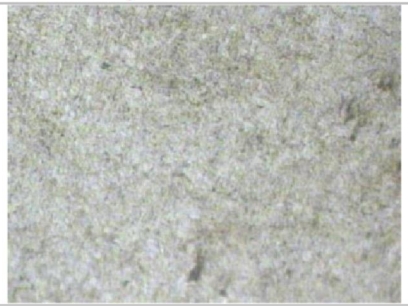
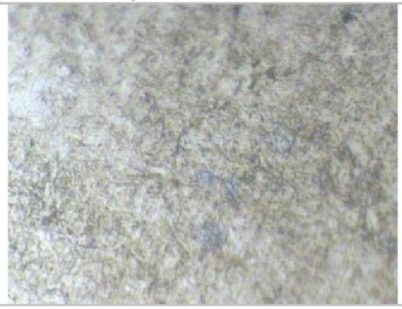
نمونه		سختی(HRC)
کوئنچ در آب	St37	۳۳,۵
	C60	۶۰,۲
	C80	۶۳,۴
کوئنچ در روغن	C60	۵۹,۱
	C80	۵۵,۸



شکل ۲: نمودار سختی بر حسب درصد کربن نمونه‌های کوئنچ شده در روغن

کوئنچ در روغن	کوئنچ در آب
	
C80 -59 HRC	C80 -61.6HRC
	
CK45- 24.5HRC	CK45 -59 HRC
	
St37 -70.4HRB	St37 -30HRC

	
St37- 200x- quench in water- 33.5 HRC	**St37- 500x- quench in water- 33.5 HRC**
	
C60-200x quench in water-60.2HRC	**C60-500x quench in water-60.2HRC**

	
C80-200xquench in oil – 55.8 HRC	**C80-500x quench in oil – 55.8HRC**
	
C80-200x quench in water-63.4HRC	**C80-500x quench in water- 63.4HRC**

۳- نتیجه‌گیری

- ✓ هرچه درصد کربن بیشتر باشد، تشخیص ساختار مارتنزیت راحت‌تر خواهد بود.
- ✓ به دلیل این که قطعه مارتزیتی است، زمان اچ بیشتر می‌شود.
- ✓ شکل مارتنزیت‌ها به درصد کربن وابسته است، که مارتنزیت تشکیل شده در فولادهای کم کربن یا متوسط کربن، به صورت لایه‌ای و در فولادهای پرکربن به صورت بشقابی تشکیل می‌شود.
- ✓ میزان آستنیته باقی مانده، زمانی که در آب کوئنچ میکنیم کمتر خواهد بود.
- ✓ دلیل وجود آستنیته باقی مانده در مارتنزیت بدین علت می‌باشد که با سریع سرد کردن، دانه‌ها از جهات مختلف رشد می‌کنند و در جایی به هم برخورد می‌کنند، سپس در بین دانه‌ها که فضایی برای رشد وجود ندارد باقی می‌مانند و ناپایدار هستند.

عنوان آزمایش:

عملیات حرارتی تمپر کردن فولادهای St37، C60 و C80

۱-۱- تمپر کردن

تمپر یا برگشت دادن عبارت است از گرم کردن مجدد فولاد یا چدن سخت شده تا پایین‌تر از دمای استحاله یوتکتوئید (معمولا کمتر از ۷۰۰ درجه سانتی گراد)، نگهداری در این دما بمدت مشخص و سپس آهسته سرد کردن تا دمای محیط. کوئنچ کردن باعث ایجاد تنش‌های داخلی در قطعات و در نتیجه موجب ایجاد تردی و شکنندگی در آنها می‌شود. به همین علت به جز در مواردی که سختی بسیار بالایی مورد نیاز باشد، از فولادهای کوئنچ شده استفاده نمی‌شود.

با انجام این عملیات روی آلیاژهای سخت شده، خواص مکانیکی آلیاژ تعدیل می‌شود.

۲-۱- انتخاب دما و زمان عملیات تمپر کردن (برگشت):

انتخاب دما و زمان عملیات تمپر کردن به ترکیب شیمیایی فولاد، ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نیاز بستگی دارد. با حذف و یا کاهش تنش‌های داخلی توسط عملیات تمپر، چقرمگی شکست قطعه افزایش (کاهش شکنندگی)، سختی و استحکام قطعه سخت شده تا حدی کاهش می‌یابد.

۱-۱- مراحل عملیات تمپر کردن (برگشت):

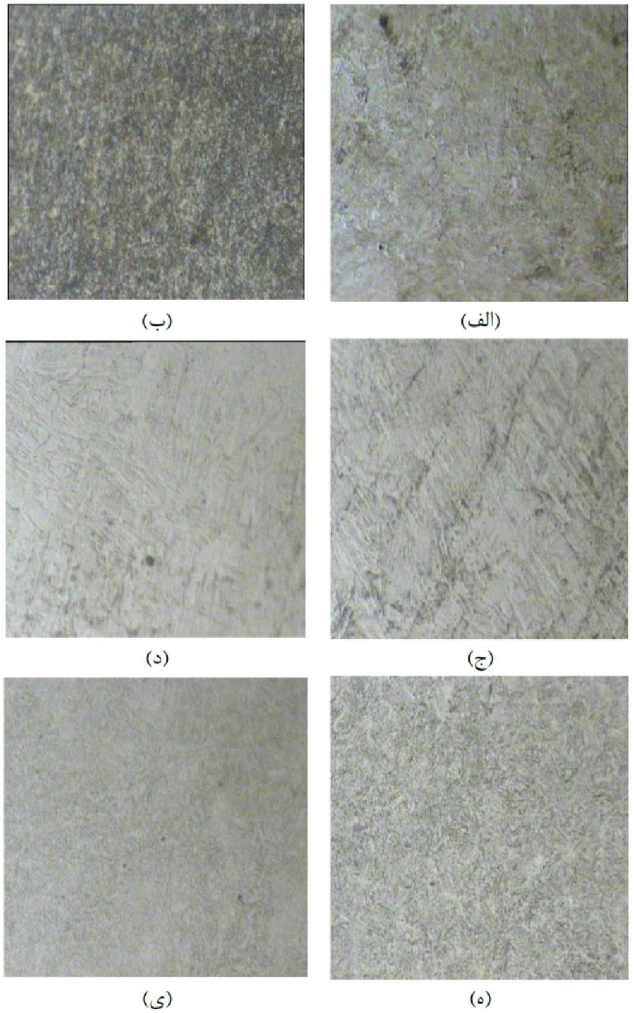
سه مرحله جداگانه در طی فرایند تمپر رخ می‌دهد که عبارتند از:

۱) تشکیل کاربیدهای انتقالی وکاهش درصدکربن در زمینه مارتنزیتی

۲) تبدیل آستنیت باقی مانده به فریت و سمنتیت

۳) جایگزینی کاربیدهای انتقالی و ماتنزیت کم کربن توسط فریت و سمنتیت

افزایش درجه حرارت عملیات حرارتی موجب کاهش سختی نهایی می‌شود. نکته قابل توجه در این زمینه، سختی فولادهای پر کربن است که در دمای پایین تمپر شده؛ سختی این فولادها پس از کوئنچ و تمپر کردن تا حدی بیشتر از سختی ناشی از کوئنچ کردن می‌باشد که این افزایش سختی را به تشکیل کاربیدهای انتقالی بسیار ریز در بین صفحات مارتنزیتی مربوط می‌دانند.



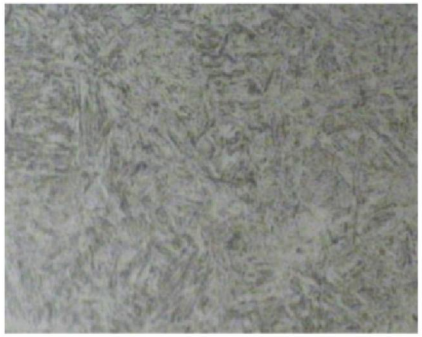
شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ نوری: الف:C80 ۳۰۰ درجه ، ب: C80 ۶۰۰ درجه ، ج: St37 ۳۰۰ درجه د: St37 ۶۰۰ درجه ، ه:

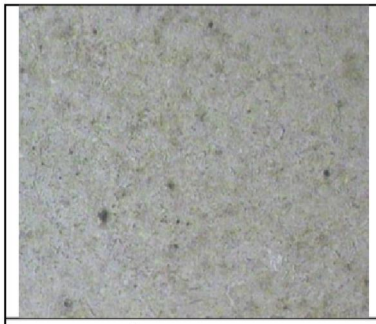
C60 ۳۰۰ درجه و ی: C60 ۶۰۰ درجه (تمامی اشکال با بزرگنمایی 500x می‌باشند)

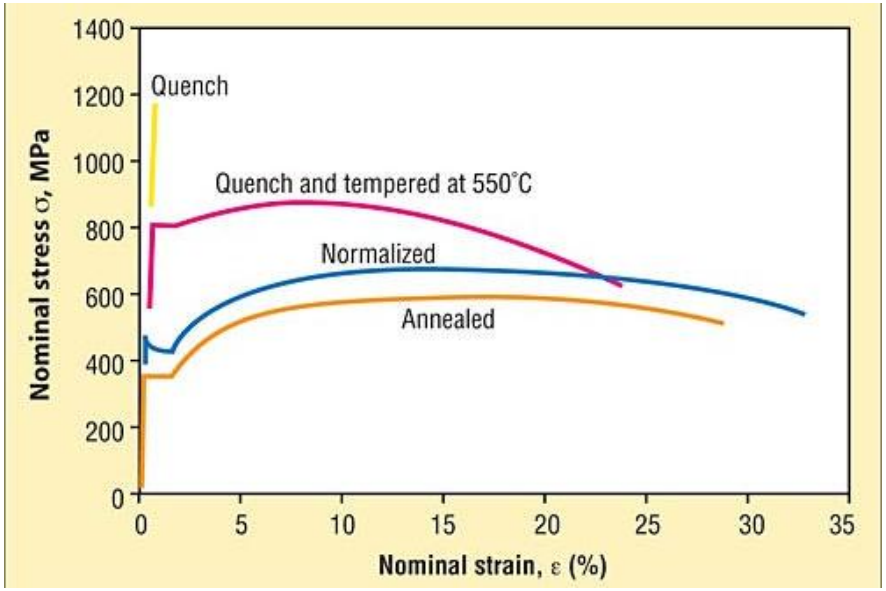
جدول ۱: نتایج آزمون سختی سنجی

نمونه		سختی
تمپر در ۳۰۰°C	St37	۱۹,۸ (HRC)
	C60	۵۰ (HRC)
	C80	۴۸,۹ (HRC)
تمپر در ۶۰۰°C	St37	۸۹ (HRB)
	C60	۲۸,۷ (HRC)
	C80	۲۳ (HRC)

Tempered M-St37-300^-200X-19.8HRC	Tempered M-St37-300^-500X-19.8HRC
Tempered M-St37-600^-200X-89HRB	Tempered M-St37-600^-500X-89HRB

	
Tempered M-c60-300^-200X-28.7HRC	Tempered M- c60-300^-500X-28.7HRC
Tempered M-c60-600^-200X-19.18HRC	Tempered M-c60-600^-500X-19.18HRC

	
Tempered M-C80-300^-200X-48.9HRC	Tempered M-C80-300^-500X-48.9HRC
Tempered M-c80-600^-200X- 23HRC	Tempered M-c80-600^-500X-23HRC


1400
1200
1000
800
600
400
200
0
Nominal stress σ, MPa
Quench
Quench and tempered at 550°C
Normalized
Annealed
0
5
10
15
20
25
30
35
Nominal strain, ε (%)

عنوان آزمایش:

عملیات کروی کردن برای فولادهای St37، Ck45، C80

کروی کردن:

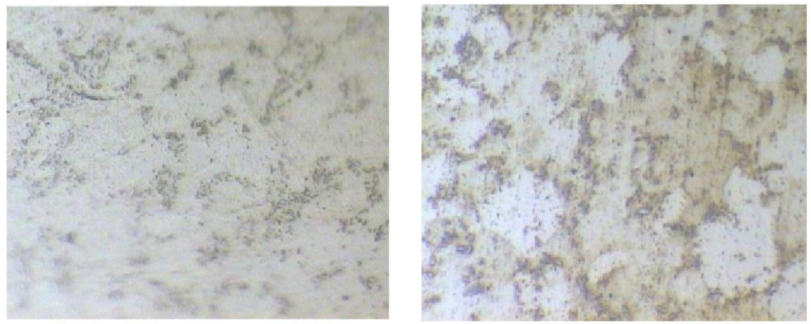
همانطور که بیان شد یک فولاد هیپر یوتکتوئیدی آنیل شده با ساختار میکروسکپی از پرلیت و سمنتیت معمولا دارای خاصیت شکل پذیری ضعیفی است، زیرا سمنتیت فازی ترد و شکننده است . برای مثال ماشین برش نمی‌تواند لایه سمنتیت را برش دهد و سمنتیت باید شکسته می‌شود. این شکست‌های پی در پی صفحات سمنتیت، نیروهای ضربه‌ای به دستگاه برش وارد می‌کند و بدین ترتیب در پایان، یک سطح برش ناصاف به دست می‌آید لذا در این گونه موارد برای بالا بردن شکل پذیری، عملیات حرارتی دیگری انجام می‌شود که کروی کردن نام دارد. با این فرآیند سمنتیت کروی شکل در زمینه یکدست فریتی بدست می‌آید .

طولانی کردن زمان نگهداری در درجه حرارت بالا ساختار پرلیتی و شبکه سمنتیت را از بین می برد. سمنتیت کروی شده تأثیر زیادی بر روی خواص فولاد دارد. ساختار سمنتیت کروی طمانی که حداقل سختی و حداکثر انعطاف پذیری (در فولاد پر کربن حداکثر قابلیت شکل پذیری) مورد نظر باشد مطلوب است.

انعطاف پذیری بسیار خوب فولادهای کم کربن و کربن متوسط با سمنتیت کروی از این نظر اهمیت دارد که این فولادها اغلب توسط کار سرد شکل می‌گیرند . از طرف دیگر زمانی که ساخت قطعات از جنس فولادهای پر کربن نیاز به ماشین کاری دارد، سختی کم ساختار سمنتیت کروی این فولادها اهمیت قابل ملاحظه‌ای دارد .

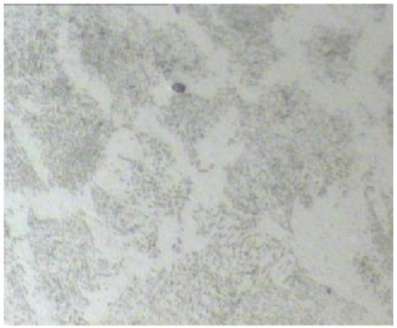
سرعت کروی شدن:

مارتنزیت> بینیت پایینی>بینیت بالایی>پرلیت ریز>پرلیت خشن

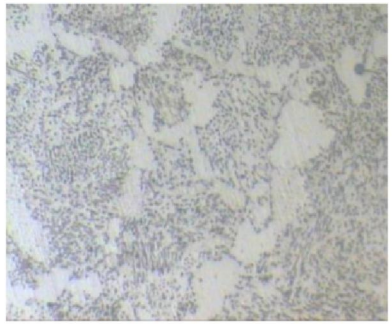


St37- 10 hr-500x – 60HRB

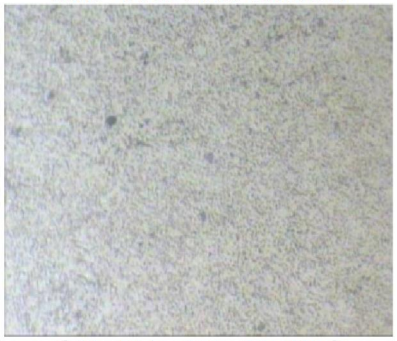
St37- 20 hr-500x-67HRB



Ck45- 10 hr-500x-81.6HRB



Ck45- 20hr-500x-79.2HRB



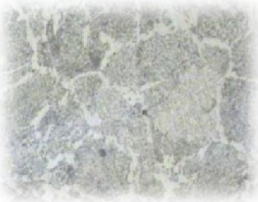
C80- 10 hr-500x-20.3HRC

C80- 20 hr-500x-94.9HRB

شکل ۱: تصاویر میکروسکوپ نوری ۳ نوع فولاد بعد از عملیات حرارتی کروی کردن در دمای ۷۰۰ درجه در دو زمان ۱۰ و ۲۰ ساعت (تمامی اشکال با بزرگنمایی 500x می‌باشند)

جدول ۱: نتایج آزمون سختی سنجی

نمونه		سختی
کروی در ۱۰ ساعت	St37	۶۰(HRB)
	Ck45	۸۱,۶(HRB)
	C80	۲۰,۳ (HRC)
کروی در ۲۰ ساعت	St37	۶۷ (HRB)
	Ck45	۷۹,۲(HRB)
	C80	۹۴,۹(HRB)

St37- 20 hr-200x-67HRB	St37- 10 hr-200x – 60 HRB
	
Ck45- 20hr-200x-79.2HRB	Ck45- 10 hr-200x-81.6HRB
C80- 20 hr-200x-94.9 HRB	C80- 10 hr-200x-20.3HRC

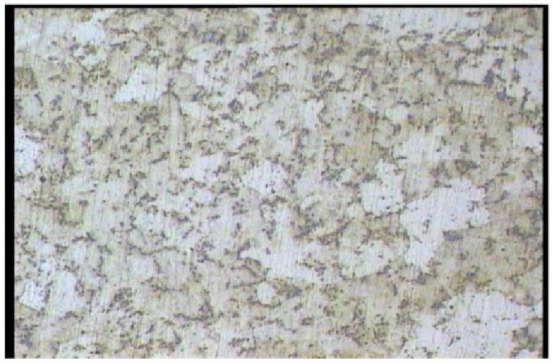
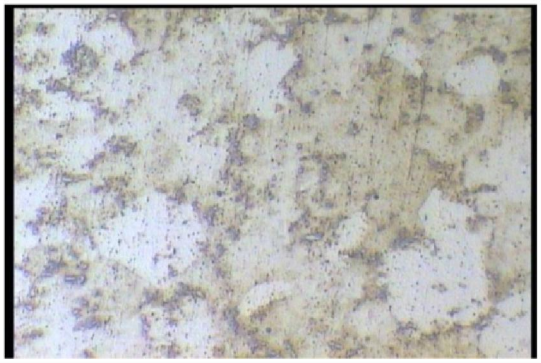
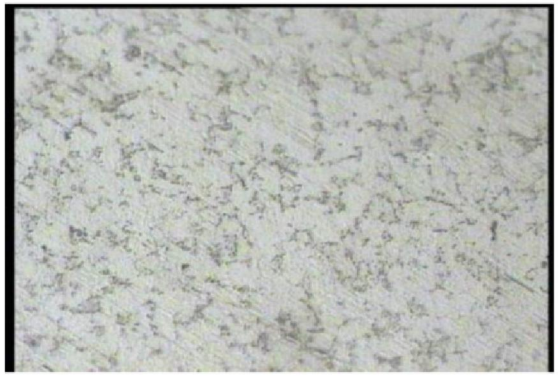
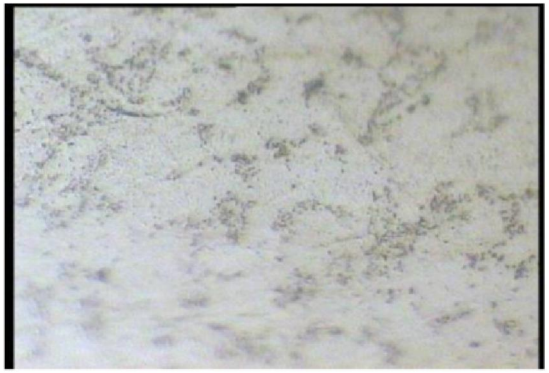
نتیجه گیری:

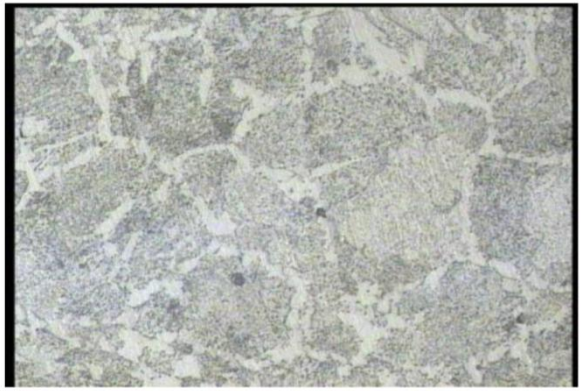
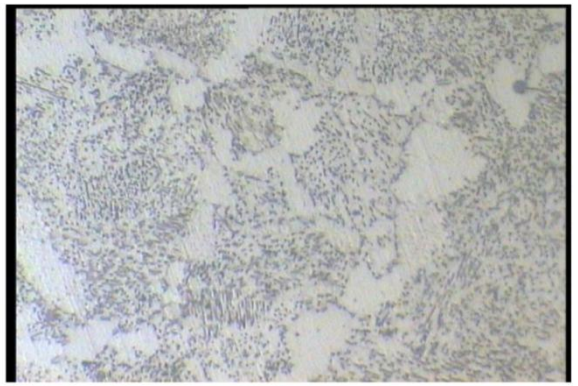
۱ - از آنجایی که عملیات کروی شدن مستلزم تجزیه و انحلال جزیی سمنتیت لایه‌ای و سپس راسب شدن آن بر روی کره های سمنتیت است، نفوذ کربن در فاز فریت نقش مهمی را در این رابطه بازی می کند. بدین صورت که، هر چه آهنگ نفوذ کربن زیادتر شود، کروی شدن نیز سریع تر می شود.

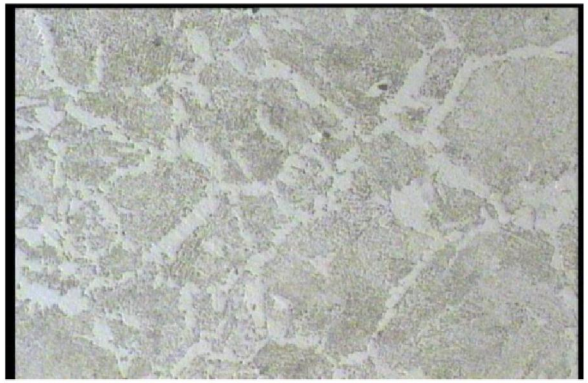
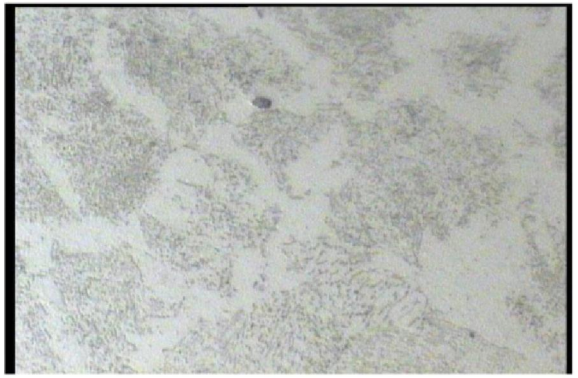
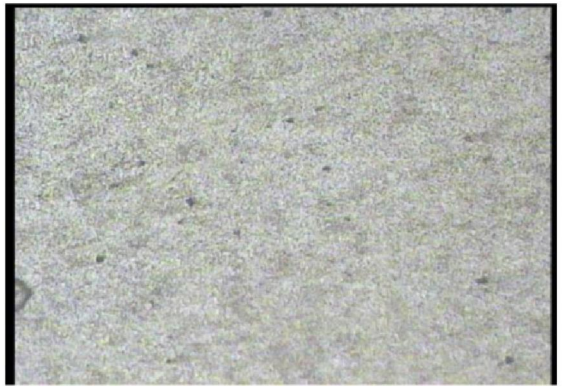
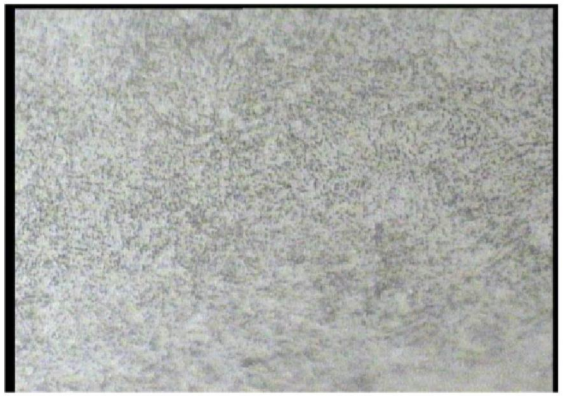
۲ - به طور کلی، عناصر آلیاژی آهنگ نفوذ کربن در فاز فریت را کاهش می دهند و بنابراین عملیات کروی شدن را به تعویق می اندازند.

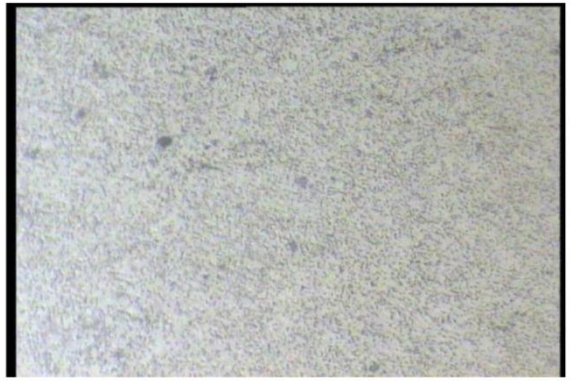
۳ - از آنجایی که رشد کاربید های آلیاژی مستلزم نفوذ عناصر آلیاژی کاربید ساز است و نفوذ این عناصر در مقایسه با کربن بسیار آهسته تر است، بنابراین وجود عناصر آلیاژی کاربید ساز کروی شدن را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می دهد.

۴ - در روش های دوم و سوم، دمای آستنیته کردن باید به همان گستره دمایی کروی کردن محدود شود. هر چه دمای آستنیته کردن پایین‌تر باشد ریزساختار آستنیت حاصل ناهمگن تر و ذرات سمنتیت حل نشده در آن بیشتر است.

	
St37- 20 hr-200x-67HRB	St37- 20 hr-500x-67HRB
	
St37- 10 hr-200x – 60RHB	St37- 10 hr-500x – 60H

	
Ck45- 20hr-200x-79.2HRB	Ck45- 20hr-500x-79.2HRB

	
Ck45- 10 hr-200x-81.6HRB	Ck45- 10 hr-500x-81.6HRB
	
C80- 20 hr-200x-94.9 HRB	C80- 20 hr-500x-94.9HRB

	
C80- 10 hr-200x-20.3HRC	C80- 10 hr-500x-20.3HRC

عنوان آزمایش:

آزمون سختی پذیری به روش جامینی برای فولاد Ck45

۱- مقدمه

سختی پذیری عبارت است توانایی یا قابلیت تشکیل مارتزیت (سخت شدن فولاد) در اثر سریع سرد شدن از ناحیه آستنیت. سختی پذیری توسط ضخامت پوسته‌ی سخت شده، مشخص می‌شود. ضخامت پوسته‌ی سخت شده عبارت است از فاصله‌ی سطح تا محلی در داخل نمونه که دارای ۵۰ ٪ مارتنزیت باشد. ۵۰ ٪ بقیه ساختار را معمولا بینیت در نظر می‌گیرند. بنابراین هرچه سختی پذیری یک فولاد بیشر باشد ضخامت پوسته‌ی سخت شده یا به عبارت دیگر ضخامت پوسته‌ای که در اثر سریع سرد شدن بیشتر از ۵۰ ٪ ساختار آن مارتنزیت شود بیشتر خواهد بود.

پارامتر های موثر در سختی پذیری فولاد ها عبارتند از:

۱) اندازه دانه آستنیت: هرچه فولاد دانه درشت‌تر باشد بعلت کاهش نقاط مستعد به جوانه زنی پرلیت دارای سختی پذیری بالاتری می‌باشد.

۲) رصد کربن فولاد: سختی پذیری یک فولاد شدیدا تحت تاثیر درصد کربن آن تغییر می‌کند. بدین صورت که اگر کربن بصورت محلول در آستنیت باشد، افزایش درصد کربن باعث افزایش سختی پذیری فولاد می‌شود.

۳) عناصر آلیاژی

۴) آخال‌ها: آخال‌ها از رشد دانه‌های آستنیت جلوگیری کرده و محل مناسبی برای جوانه زنی پرلیت می‌باشد. در نتیجه باعث کاهش سختی پذیری فولاد می‌شود.

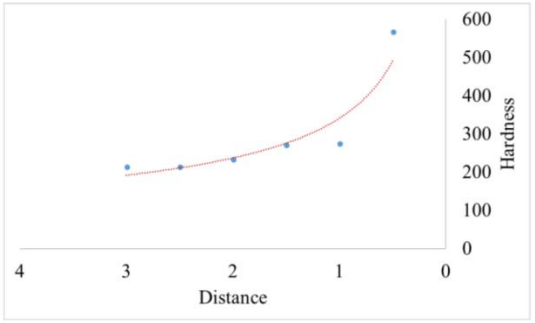
۵) همگن بودن ریزساختار: بطور کلی ناهمگن بودن آستنیت از نظر ترکیب شیمیایی باعث کاهش سختی پذیری فولاد می‌شود.

جدول ۱: سختی نمونه در امتداد محور طولی

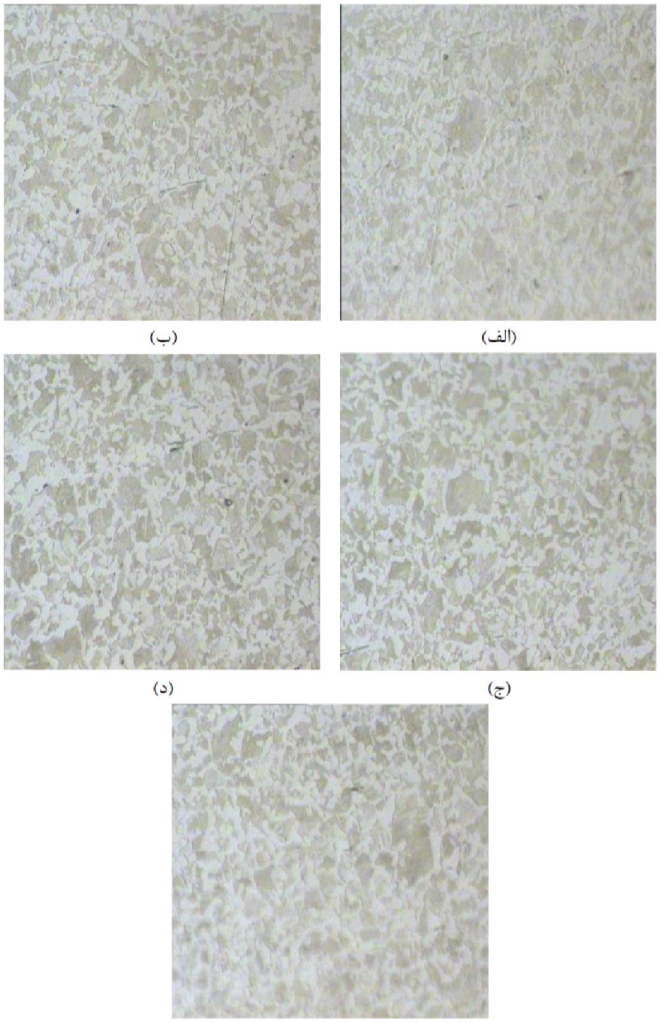
سختی (ویکرز)	فاصلا از کف نمونه (میلیمتر)
۵۶۶	۰٫۵
۲۷۴	۱
۲۷۰	۱٫۵
۲۳۲	۲
۲۱۳	۲٫۵
۲۱۳	۳

۳- نتایج

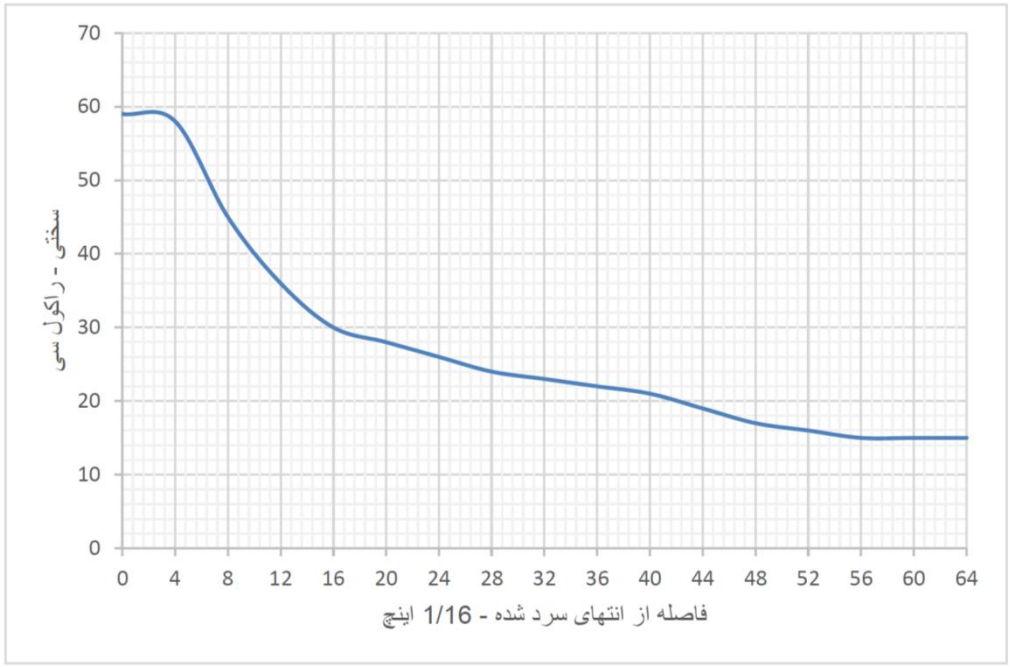
نمودار سختی بر حسب فاصله از کف قطعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲: نمودار سختی بر حسب فاصله از کف نمونه



شکل ۱: تصاویر میکروسکوپ نوری با فاصله الف: ۰،۵ میلیمتر، ب: ۱،۵ میلیمتر، ج: ۲،۴ میلیمتر، د: ۳،۲ میلیمتر، ه: ۴ میلیمتر از کف نمونه (تمامی عکس‌ها با بازرگنمایی 500x می‌باشد)


70
60
50
40
30
20
10
0
سختی - راکول سی
0
4
8
12
16
20
24
28
32
36
40
44
48
52
56
60
64
فاصله از انتهای سرد شده - 1/16 اینچ

فاصله از انتهای سرد شده	سختی
۰.۵	53.5 HRC
۱.۵	25.6 HRC
۲.۴	25.6 HRC
۳.۲	96.6 HRB
۴	93 HRB

عنوان آزمایش:

عملیات کربوره کردن فولاد St37

روش‌های سختی سطحی:

۱– روش های ترموشیمی: (در سطح قطعه)

۲– روش های موضعی: (در سطح)

روش های ترموشیمی منجر به تغییر ترکیب شیمیایی سطحی می گردند (کربوره کردن و نیتروره کردن). در روش های موضعی ترکیب شیمیایی عوض نمی‌شود و تنها متمرکز کردن عملیات بر روی قطعه است. سطح قطعه است که باعث سخت شدن لایه سطحی آن می‌گردد مثل سخت کردن شعله ای یا القایی

کربوره کردن (سمانتاسیون):

وقتی یک فولاد کم کربن (مثلا ٪۰,۱۵) را در مواد کربن دار مثل زغال چوب قرار داده و در دمای بالا (مثلا ۹۲۵ درجه سانتی گراد) نگهداری می‌کنیم. کربن از زغال به سطح قطعه نفوذ کرده و پس از مدتی درصد کربن در سطح به مقدار بالایی (مثلا ٪۱,۲۵) مغز آن می‌رسد بنابراین سطح قطعه پر کربن و مغز آن کم کربن می شود.

سخت کاری چنین قطعه‌ای منجر به تشکیل مارتنزیت پر کربن در سطح با سختی بالا و و جود تافنس و مقاومت به ضربه در مغز قطعه می‌گردد.

در این شرایط، عمق نفوذ کربن بر حسب فاصله از سطح از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{C_c - C_S}{C_0 - C_s} = erf\left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right]$$

که در این رابطه:

Cs = درصد کربن سطح است که توسط پتانسیل کربن محیط مشخص می شود (**wt%**)

C0 = درصد کربن اولیه فولاد قبل از کربن دادن (**wt%**)

Cc = درصد کربن در فاصله **x** از سطح (**wt%**)

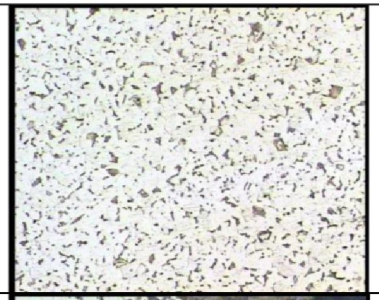
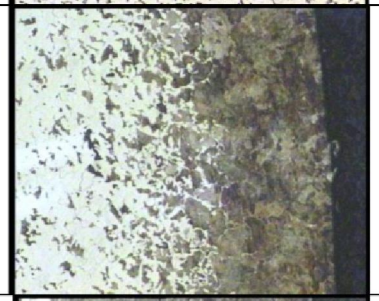
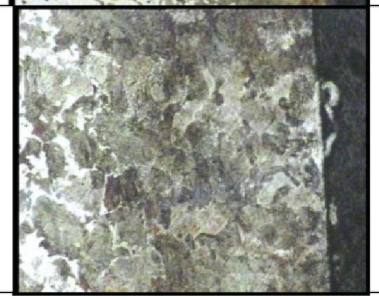
X = فاصله از سطح (**cm**)

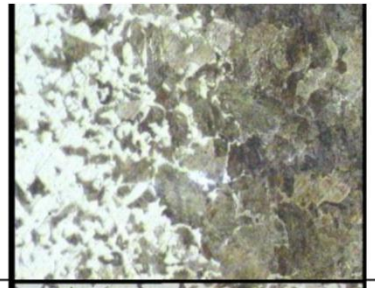
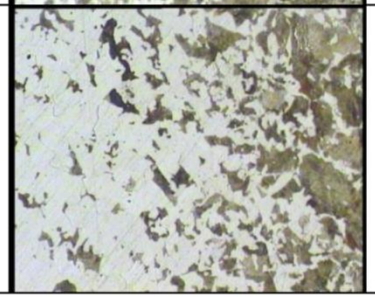
D = ضریب نفوذ کربن در آستنیت ($\frac{cm^2}{\sec}$)

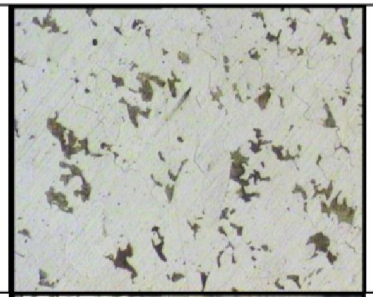
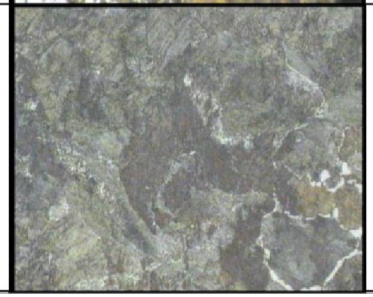
t = زمان کربن دهی (**sec**)

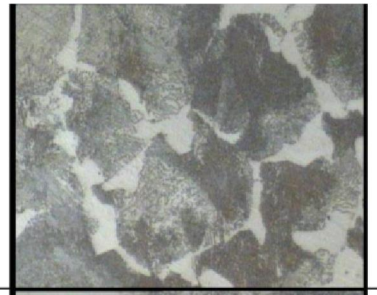
در این فرمول ضریب دیفوزیون مستقل از ترکیب شیمیایی فرض شده است که مقدار متوسط آن از فرمول زیر به دست می آید:

$$D_c^{\gamma} = 0.12 \exp\left[\frac{-32000}{RT}\right] \frac{cm^2}{sec}$$

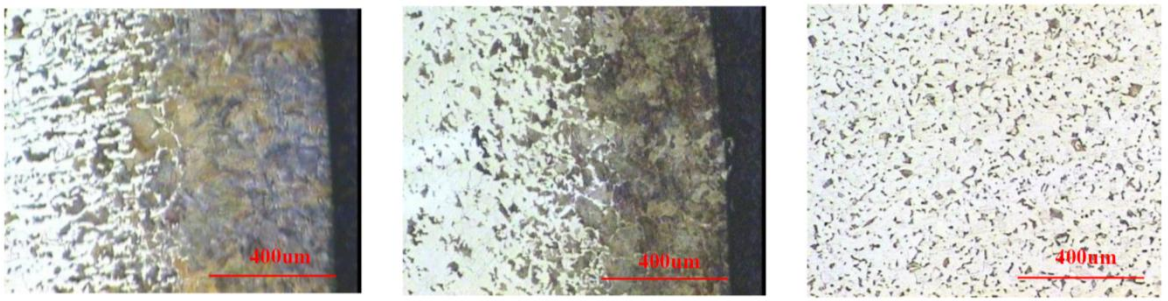
		- 50X-63.2 HRB-قطعه خام
		- 50X-2ساعت سختی مرکز: HRV97.8 سختی سطح: HRV 133.5 میکرو سختی مرکز: 116.1 میکرو سختی سطح: HV 185.6
		- 200X-2ساعت سختی مرکز: HRV97.8 سختی سطح: HRV 133.5 میکرو سختی مرکز: 116.1 میکرو سختی سطح: HV 185.6

		2ساعت-200X - سختی مرکز: HRV97.8 سختی سطح: HRV 133.5 میکرو سختی مرکز: 116.1 میکرو سختی سطح: HV 185.6
		2ساعت-200X - سختی مرکز: HRV97.8 سختی سطح: HRV 133.5 میکرو سختی مرکز: 116.1 میکرو سختی سطح: HV 185.6

		2ساعت-200X - سختی مرکز: HRV97.8 سختی سطح: HRV 133.5 میکرو سختی مرکز: 116.1 میکرو سختی سطح: HV 185.6
		ساعت-50X - 4؟ HRB
		ساعت-200X - 4؟ HRB

		ساعت-500X - 4؟ HRB
		ساعت-500X - 4؟ HRB

نمونه	فاصله از سطح	سختی
2 ساعت	20	289.4
	250	278.3
	500	266.5
	750	114.9
	1000	116.1
4 ساعت	20	559.8
	100	242.5
	500	241.6
	750	252.5
	1000	203.3
	1500	203.3



ج ب الف

شکل ۱- ریزساختار: الف) نمونه خام ب) نمونه اول ج) نمونه دوم