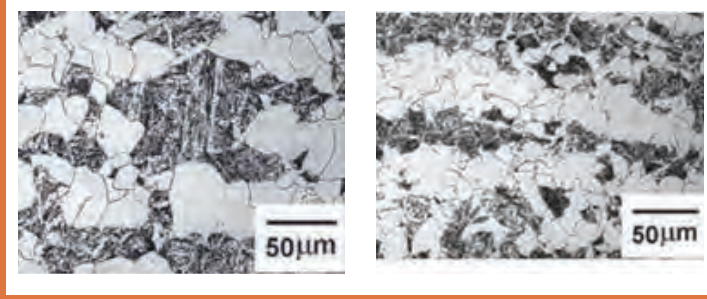
# پودمان چهارم

## عملیات حرارتی آنیل و نرماله



## واحد یادگیری ۱: عملیات حرارتی آنیل

عملیـات حـرارت آنیـل عمومـاً برای کاهش سـختی فلـزات و آلیاژها انجـام می‌گیرد و در نتیجـهٔ آن خواصی ماننـد قابلیـت ماشـین‌کاری، خـواص الکتریکـی، قابلیـت کار سـرد و پایـداری ابعادی و سـاختار آلیـاژ تغییر قابـل توجهـی می‌کنـد. عملیـات آنیـل باعـث حـذف تنش‌هـای داخلـی شـده و سـاختمان داخلـی قطعه را تغییـر می‌دهـد. همچنیـن ایـن امـر باعث بهبـود قابلیـت ماشـین‌کاری قطعـات می‌گردد.

## استاندارد عملکرد کار

انجـام عملیـات حرارتـی آنیـل بـر روی انـواع فولادهـا و چدن‌هـا براسـاس اسـتانداردها و دسـتورالعمل‌های مربوطه

## پیش‌نیاز

آشنایی با انواع فولادها و چدن‌ها، دیاگرام آهن ـ کربن، متالوگرافی

## آنیل

پرسش

برای افزایش قابلیت ماشین‌کاری قطعات چه راهکاری پیشنهاد می‌کنید؟

| نوع محصولات | شکل | اهداف عملیات آنیل |
|---|---|---|
| ورق‌های فولادی | | افزایش قابلیت شکل‌پذیری برای مراحل بعدی کار سرد |
| قطعات جوشکاری شده | | کاهش تنش‌های داخلی و جلوگیری از انهدام و ترک خوردن منطقه جوش |
| پروانه پمپ آب (چدنی) | | افزایش قابلیت ماشین‌کاری و تراشکاری |
| زانویی(چدن مالیبل) | | گرافیت‌زایی و تبدیل چدن سفید به چدن مالیبل |
| مفتول فولادی | | قابلیت انعطاف و شکل‌پذیری |

هنگامی که اپراتور دستگاه تراش یا دریل از نوع براده‌برداری راضی نیست و اعلام می‌کند که براده برداری بسیار مشکل و سایش ابزار بسیار بالا است یکی از راه حل ها، انجام عملیات حرارتی آنیل روی قطعات است. با انجام این فرایند قطعات نرم شده و براده‌برداری بسیار آسان می‌شود و یا هنگامی که می‌خواهیم قطعات فولادی را تحت شکل‌دهی نورد و خم قرار دهیم جهت بهبود شرایط شکل‌دهی نیازمند فرایند آنیل هستیم. در واقع به هر گونه عملیات حرارتی که باعث تشکیل ساختارهای تعادلی با سختی کم و انعطاف‌پذیری زیاد شود آنیل گفته می‌شود.

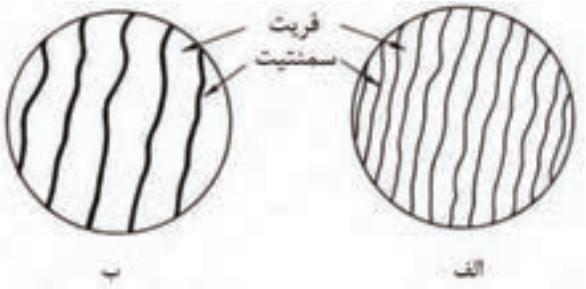
### آنیل فولادها

عبارت است از حرارت دادن فولاد در یک درجه حرارت مناسب و سپس سردکردن کنترل شده که معمولاً آهسته و در کوره انجام می‌شود. هدف از انجام این پروسه در فولادها کاهش سختی، بهبود قابلیت ماشین‌کاری، حذف تنش‌های داخلی، سهولت کار سرد، بهبود چقرمگی، افزایش پایداری ابعادی، بازگشت فولاد به حالت قبل از کار سرد و تغییر خواص الکتریکی و مغناطیسی فولاد است. عملیات آنیل فولادها به یک سری فرایندهای مشخص و دقیق براساس دمای عملیات، روش سردکردن، ساختار و خواص نهایی به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود.

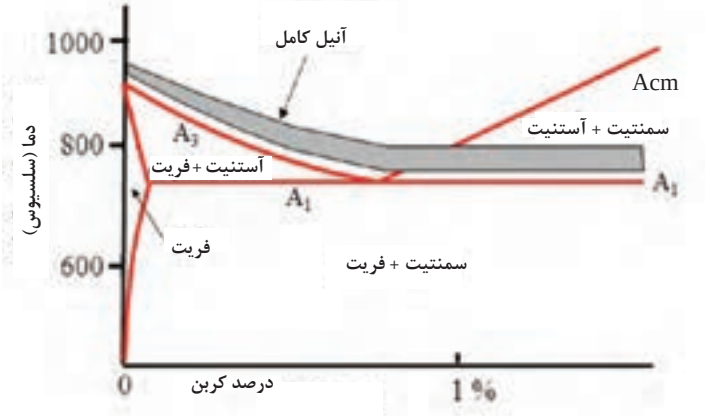
که هر کدام از فرایندها توضیح داده خواهد شد.

- آنیل کامل
- آنیل هم دما (ایزوترم)
- آنیل تنش‌زدایی
- آنیل کروی‌سازی

**آنیل کامل:** چطور می‌توان با عملیات حرارتی، ریز ساختار شکل الف (پرلیت ریز) را به ریز ساختار شکل ب (پرلیت خشن) تغییر داد.



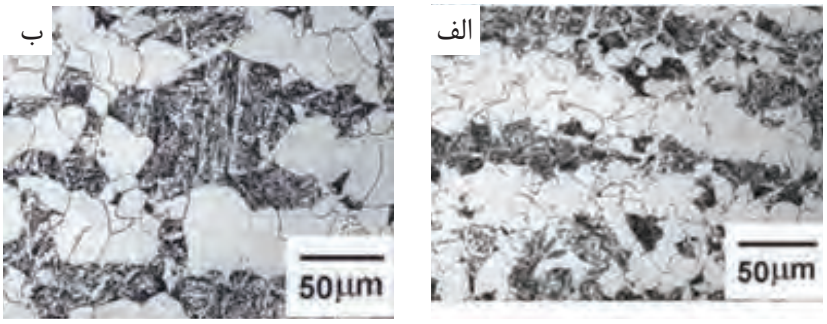

آنیل کامل عبارت است از حرارت دادن فولاد در دامنهٔ حرارتی آستنیت، نگهداری به مدت زمان لازم (یک ساعت به ازای هر اینچ ضخامت) در این دما و سپس سرد کردن آهسته که معمولاً در کوره انجام می‌شود تا آستنیت به‌طور کامل تجزیه شود. دامنهٔ حرارتی آستنیته‌کردن برای آنیل کامل، تابع درصد کربن است به این صورت که برای فولادهای هیپو یوتکتوئید، حدود $50^{\circ}C$ بالای خط $A_3$ و برای فولادهای هایپر یوتکتوئید حدود $50^{\circ}C$ بالای خط $A_1$ است. در شکل (۱) محدودهٔ دمایی آنیل کامل برای فولادها نشان داده شده است. در نظر داشته باشید که یک منطقه محدودهٔ از دیاگرام آهن ـ کربن آورده شده است که در این شکل درصد کربن حدود ۲ درصد و دما تا دمای ۱۰۰۰ درجهٔ سلسیوس است که منطقه خاکستری رنگ مربوط به منطقهٔ آنیل کامل است.




**شکل ۱ـ محدودهٔ دمایی آنیل کامل در فولادها (منطقهٔ خاکستری رنگ)**

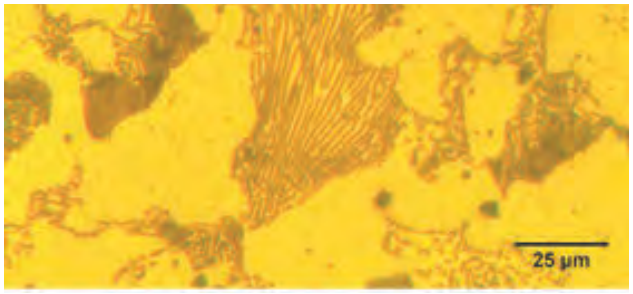
ولی با توجه به اینکه عناصر آلیاژی روی دمای آنیل کامل تأثیر می‌گذارند بهتر است برای انتخاب دمای آنیل از جدول‌های سازندهٔ فولاد با ترکیب شیمیایی معیّن استفاده شود. هدف از انجام این فرایند بهبود قابلیت ماشین‌کاری و مقاومت به ضربهٔ فولاد با ایجاد یک زمینه یکنواخت فریتی به همراه پرلیت ضخیم است. در واقع در فرایند آنیل کامل پرلیت ریز به پرلیت خشن یا درشت تغییر پیدا می‌کند و میزان فریت افزایش می‌یابد. در شکل (۲) تصاویری از ریزساختار فولاد کربن متوسط (۱۰۴۰) قبل و بعد از عملیات آنیل کامل نشان داده شده است.

آنیـل کامـل عمومـاً بـر روی قطعـات بـا ابعاد بـزرگ و آهنگری شـده صـورت می‌گیرد. بـا انجام ایـن فرایند بـه حداکثـر نرمـی و همچنین کاهش سـختی و اسـتحکام می‌رسـیم.




**شکل ۲ــ تصویر (الف) ریزساختار فولاد کربن متوسط(۱۰۴۰) قبل از آنیل کردن، (ب) بعد از آنیل کردن**

شـکل (۳) تصویـری از ریزسـاختار فـولاد Ck۴۵ کـه تحـت عملیـات حرارتـی آنیل کامـل قرار گرفته اسـت را نشـان می‌دهد. همان‌طـور که مشـاهده می‌شـود بـا توجه به اینکه سـرعت سـرد شـدن نمونه بسیار آهسـته بـوده، پرلیـت درشـت و خشـن به‌دسـت آمده اسـت.




**شکل ۳ــ تصویری از ریزساختار فولاد تحت عملیات حرارتی آنیل کامل**

فعالیت کارگاهی ۱

## آنیل کامل

**وسایل مورد نیاز:**

۱ کورهٔ عملیات حرارتی آزمایشگاهی ۲ انبر ۳ دستگاه سختی‌سنجی ۴ نمونه‌های مورد آزمایش

**نمونه مورد آزمایش:** قطعات فولاد کربن متوسط (CK۴۵)

**مراحل انجام آزمایش:**

ابتـدا هنرجویـان در گروه‌های پنج نفری تقسـیم شـده، هر گـروه یک نمونه از فولاد کربن متوسـط (CK۴۵) بـه قطـر و ارتفـاع ۱cm را آمـاده نماییـد. دو سـطح نمونه‌هـا را سـنباده زده و یـک طـرف آنهـا را بـا سـنبه شـماره‌گذاری نماییـد. یـک نمونـه را بـه عنـوان شـاهد نگه داشـته و آزمایـش را به‌صـورت زیر ادامـه دهید.

۱ سـختی نمونـه شـاهد را بـا اسـتفاده از سـختی سـنج برینـل انـدازه گرفتـه و یادداشـت کنیـد و ریـز سـاختار آن را در جـدول صفحـهٔ بعـد رسـم کنیـد.

- **نکات ایمنی:** قبل از روشن‌کردن کوره اتصالات کوره را کنترل کنید.
- هنگام روشن‌کردن کوره از دستورالعمل‌های سازنده استفاده کنید.
- از سلامت نشانگر دیجیتالی دما اطمینان حاصل کنید.
- حتمـاً از محافـظ صـورت، کلاه و عینـک ایمنـی، دسـتکش مخصـوص و در مواقعـی کـه با فلـز داغ کار می‌کنیـد از لبـاس ضـد آتـش اسـتفاده کنید.

۲ کوره را روشن کرده و در دمای ۸۵۰ درجهٔ سلسیوس تنظیم کنید.
۳ پس از رسیدن کوره به دمای مورد نظر نمونه‌ها را در داخل کوره قرار داده و یک ساعت در این دما حرارت دهید.
۴ کوره را خاموش کنید و اجازه دهید نمونه‌ها داخل کوره به آرامی سرد شوند.
۵ سختی نمونه‌های سرد شده را با استفاده از سختی سنج اندازه گرفته و یادداشت کنید و ریز ساختار آن را در جدول رسم کرده و به همراه گزارش کار به هنرآموز خود تحویل دهید.

| نمونه | شاهد | نمونه سرد شده در کوره |
|---|---|---|
| سختی | | |
| شکل ریز ساختار | | |

پرسش

۱ چه تفاوتی بین سختی نمونه شاهد و نمونه عملیات حرارتی شده وجود دارد؟
۲ چه تغییری در ریز ساختار حاصل از نمونه‌های عملیات حرارتی شده با نمونهٔ شاهد مشاهده می‌کنید.

**آنیل هم‌دما (Isothermal):** در این فرایند، ابتدا آستنیته‌کردن فولاد در همان دامنهٔ حرارتی مربوط به آنیل کامل انجام می‌شود. سپس فولاد را سریعاً به زیر خط $A_1$ می‌رسانند تا تجزیهٔ کامل آستنیت اتفاق بیفتد و به مدت زمان لازم (یک ساعت به ازای هر اینچ ضخامت) در این دما نگهداری می‌کنند و سپس فولاد را با سرعت دلخواه سرد می‌کنند. زمان لازم برای آنیل هم‌دما در مقایسه با آنیل کامل به مراتب کمتر است ولی سختی نهایی بیشتر می‌باشد. از طرفی پرلیت حاصل ریزتر می‌باشد. از جمله اهداف کاربرد آنیل هم‌دما در رابطه با فولادهای آلیاژی برای به‌دست آوردن ساختار پرلیتی است.

فعالیت کارگاهی ۲

**آشنایی با آنیل هم دما**

**وسایل مورد نیاز:**

۱ کوره عملیات حرارتی آزمایشگاهی (۲ عدد) ۲ انبر ۳ سختی‌سنج ۴ نمونه‌های مورد آزمایش

**نمونه مورد آزمایش:** قطعات فولاد کربن متوسط (CK۴۵)

**مراحل انجام آزمایش:**

ابتدا هنرجویان در گروه‌های پنج نفری تقسیم شده و هر گروه یک نمونه از فولاد کربن متوسط (CK۴۵) به قطر و ارتفاع ۱cm را آماده کنید. دو سطح نمونه‌ها را سنباده زده و یک طرف آنها را با سنبه شماره‌گذاری کنید. یک

نمونه را به عنوان شاهد نگه داشته و آزمایش را به‌صورت زیر ادامه دهید.

۱ سختی نمونه شاهد را با استفاده از دستگاه سختی‌سنج برینل اندازه گرفته و یادداشت کنید و ریز ساختار آن را در جدول رسم کنید.

- **نکات ایمنی:** قبل از روشن‌کردن کوره اتصالات کوره را کنترل کنید.
- هنگام روشن‌کردن کوره از دستورالعمل‌های سازنده استفاده کنید.
- از سلامت نشانگر دیجیتالی دما اطمینان حاصل کنید.
- حتماً از محافظ صورت، کلاه و عینک ایمنی، دستکش مخصوص و در مواقعی که با فلز داغ کار می‌کنید از لباس ضد آتش استفاده کنید.

۲ دو کوره را روشن کرده یکی را به دمای ۸۵۰ درجهٔ سلسیوس و دیگری را به دمای ۷۱۰ درجهٔ سلسیوس تنظیم کنید.

۳ پس از رسیدن کوره به دمای ۸۵۰ درجهٔ سلسیوس نمونه‌ها را در داخل کوره قرار داده و یک ساعت در این دما حرارت دهید.

۴ سپس کوره را باز کرده و نمونه‌ها را با سرعت به کوره با دمای ۷۱۰ درجهٔ سلسیوس منتقل کنید و به مدت زمان دو ساعت در این دما نگهداری کرده و سپس نمونه‌ها را در هوا سرد کنید.

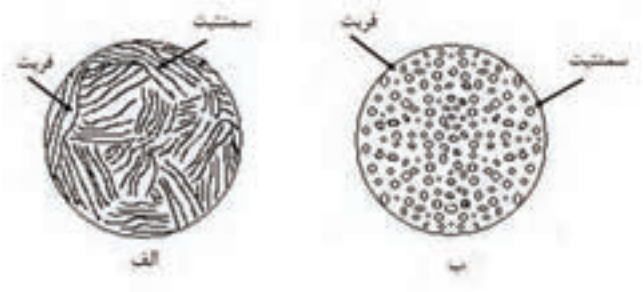
۵ سختی نمونه‌های سرد شده را با استفاده از سختی سنج برینل اندازه گرفته و یادداشت کنید و ریز ساختار آن را در جدول رسم کرده به همراه گزارش کار تحویل هنرآموز خود دهید.

| نمونه | شاهد | نمونه سرد شده در هوا |
|---|---|---|
| سختی | | |
| شکل ریز ساختار | | |

بحث گروهی

- چه تفاوتی بین سختی یک نمونه قبل و بعد از عملیات حرارتی شده وجود دارد؟
- چه تغییری در ریز ساختار و سختی حاصل از آنیل کامل و آنیل هم‌دما مشاهده می‌نمایید.
- پس از بحث و گفتگو پاسخ تحلیلی خود را به همراه گزارش کار به هنرآموز خود تحویل دهید.

**آنیل کروی‌کردن:** به شکل زیر نگاه کنید با چه روشی می‌توان ریز ساختار شکل الف را به شکل ب تبدیل کرد؟

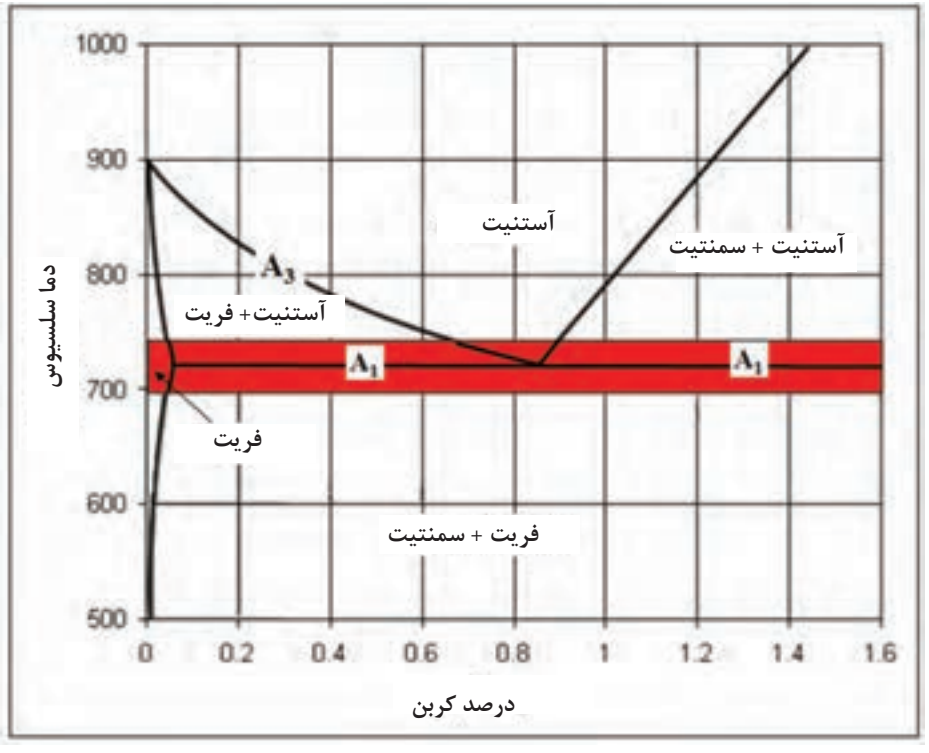


روش‌های متفاوتی برای فرایند کروی‌کردن به‌کار برده شده است که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از:

**الف)** حرارت دادن فولاد تا زیر دمای $A_1$، نگه داشتن به مدت زمان کافی (۲۴ـ۵ ساعت) جهت کروی شدن و سپس آهسته سرد کردن در هوا تا درجه حرارت محیط. (شکل ۴)

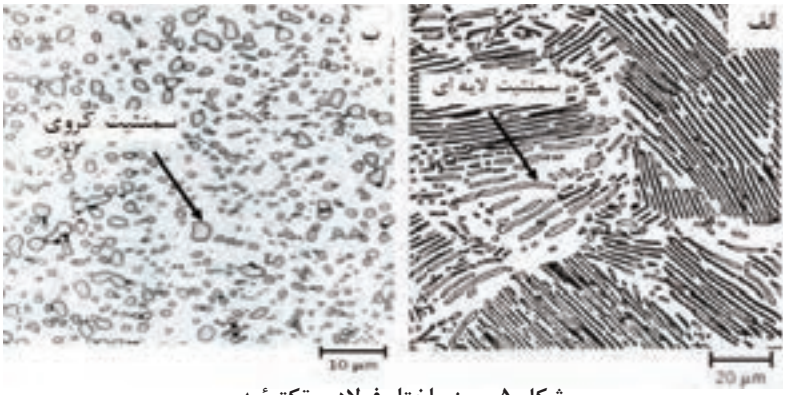
**ب)** حرارت دادن فولاد تا ناحیه دو فازی بین $A_1$ـ$A_3$ برای فولادهای هیپو یوتکتوئید و یا بین $A_1$ ـ $A_{cm}$ برای فولادهای هایپریوتکتوئید به‌منظور آستنیته‌کردن جزئی، سرد کردن آهسته تا زیر دمای $A_1$، نگه داشتن برای مدت زمان کافی جهت کروی شدن و سپس آهسته سرد کردن در هوا تا درجه حرارت محیط.

انعطاف‌پذیرترین و نرم‌ترین شرایط در هر فولاد، میکرو ساختاری شامل سمنتیت کروی توزیع شده به‌طور یکنواخت در زمینه فریتی است. در حقیقت هدف از فرایند کروی‌کردن، دستیابی به ساختاری تشکیل شده از سمنتیت کروی در زمینه فریتی است. به‌طور کلی با انجام فرایند آنیل کروی‌کردن، فولاد دارای بیشترین انعطاف و شکل‌پذیری و کمترین سختی و استحکام خواهد بود. جهت کروی شدن کامل ساختار نیاز به زمان‌های زیادی می‌باشد. هر چه ساختار غیر تعادلی‌تر باشد عملاً فرایند کروی‌کردن راحت‌تر خواهد بود. هدف از انجام این عملیات، بهبود قابلیت ماشین‌کاری و شکل‌پذیری سرد در فولادها می‌باشد.




**شکل ۴ـ محدودهٔ عملیات حرارتی آنیل کروی‌کردن**

شکل (۵) تصاویر ریزساختار فولاد یوتکتوئیدی را قبل و بعد از آنیل کروی‌کردن نشان می‌دهد که سمنتیت لایه‌ای به سمنتیت کروی تغییر کرده است.




**شکل ۵ـ ریزساختار فولاد یوتکتوئیدی**
**الف) قبل از آنیل کروی، ب) بعد از آنیل کروی سازی در دمای ۷۰۰°C به مدت زمان ۲۱ ساعت**

فعالیت کارگاهی ۳

## آنیل کروی سازی

**وسایل مورد نیاز:**

۱ کورهٔ عملیات حرارتی آزمایشگاهی ۲ انبر ۳ دستگاه سختی‌سنجی ۴ نمونه‌های مورد آزمایش

**نمونه مورد آزمایش:** قطعات فولاد کربن متوسط (CK۴۵)

**مراحل انجام آزمایش**

پس از تشکیل گروه‌های ۵ نفری، هر گروه یک نمونه از فولاد کربن متوسط (CK۴۵) به قطر و ارتفاع ۱cm را آماده کنید. سپس برای سرعت در عملیات کروی‌سازی دو نمونه فولاد کربن متوسط را مطابق سیکل عملیات سخت‌کاری در دمای ۸۵۰ درجهٔ سلسیوس در آب سریع سرد کنید. یکی از نمونه‌های سخت‌کاری شده را به‌عنوان شاهد نگه داشته و بقیهٔ آزمایش را به‌صورت زیر انجام دهید:

۱ سختی نمونهٔ شاهد و نمونهٔ سریع سرد شده در آب را توسط سختی‌سنج راکول اندازه گرفته و در جدول صفحه بعد یادداشت کرده و ریز ساختار آنها را در جدول رسم کنید.

- **نکات ایمنی:** قبل از روشن‌کردن کوره اتصالات کوره را کنترل کنید.
- هنگام روشن‌کردن کوره از دستورالعمل‌های سازنده استفاده کنید.
- از سلامت نشانگر دیجیتالی دما اطمینان حاصل کنید.
- حتماً از محافظ صورت، کلاه و عینک ایمنی، دستکش مخصوص و در مواقعی که با فلز داغ کار می‌کنید از لباس ضد آتش استفاده کنید.

۲ کوره را روشن کرده و به دمای ۷۰۰ درجهٔ سلسیوس تنظیم کنید.

۳ پس از رسیدن دمای کوره به دمای مورد نظر نمونه‌ها را در کوره قرار دهید.

۴ نمونه‌ها را به مدت زمان ۱۱ ساعت در کوره نگهداری کنید.

۵ پس از نگهداری در مدت زمان ذکر شده نمونه‌ها را با انبر از کوره خارج کرده و در هوا سرد کنید.

۶ سختی نمونه‌های سرد شده را با استفاده از سختی‌سنج اندازه گرفته و یادداشت کنید و ریز ساختار آن را در جدول رسم کرده و به همراه پاسخ تحلیلی برای پرسش‌ها در گزارش کار تحویل هنرآموز دهید.

| نمونه | شاهد | نمونه سرد شده در آب | نمونه آنیل شده |
|---|---|---|---|
| سختی | | | |
| ریز ساختار | | | |

بحث گروهی

- چه تفاوتی بین سختی نمونه شاهد سریع سرد شده در آب و نمونهٔ آنیل شده وجود دارد؟
- چه تغییری در ریز ساختار حاصل از نمونه‌های عملیات حرارتی شده با نمونهٔ شاهد مشاهده می‌کنید.
- پس از بحث و گفتگو پاسخ تحلیلی خود را به همراه گزارش کار به هنرآموز تحویل دهید.

**آنیل تنش‌زدایی:** برخی از عملیات حرارتی و یا مکانیکی در قطعات، باعث ایجاد تنش‌های داخلی می‌شود که‌این تنش‌ها مخرب بوده و بر عملکرد قطعات تأثیر نامطلوب می‌گذارد. تنش‌های داخلی حاصل، ممکن است منجر به تاب برداشتن، ترک خوردن و یا انهدام قطعات در تنش‌هایی به مراتب کمتر از سطح تنش طراحی شده برای آنها شود.

در واقع هدف از انجام تنش زدایی حذف یا کاهش تنش‌های باقیمانده از عملیات قبلی است. در این روش قطعات مورد نظر زیر دمای بحرانی $A_1$ حرارت داده می‌شوند و سپس به مدت زمان لازم (به ازای هر اینچ یک ساعت) در این دما نگهداری می‌شوند و سپس با سرعت خیلی آهسته تا دمای محیط سرد می‌شوند. زمان حرارت دادن بستگی به ابعاد قطعه و درجه حرارت تنش گیری دارد که معمولاً با افزایش دمای تنش‌گیری مدت زمان لازم جهت عملیات کاهش می‌یابد.

## آنیل چدن

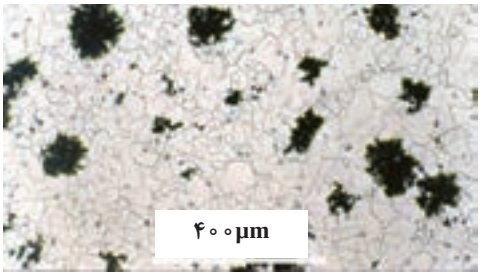
از آنجا که قطعات چدنی عمدتاً به روش ریخته‌گری تولید می‌شوند پس از انجماد نیاز به فرایندهایی نظیر تمیزکاری سطح، عملیات حرارتی و ماشین‌کاری دارند در مورد چدن‌ها بررسی‌ها نشان داده‌اند که هرچه ساختار زمینه از فریت به سمت پرلیت می‌رود عمر ابزار کاهش و توان مصرفی برای ماشین‌کاری افزایش می‌یابد به نحوی که زمینهٔ فریتی بالاترین و زمینه پرلیتی ظریف یا دارای کاربید آزاد کمترین قابلیت ماشین‌کاری را دارد. قابلیت ماشین‌کاری به سختی و استحکام بسیار وابسته است به طوری که هر چه سختی و استحکام بالاتر باشد توانایی ماشین‌کاری پایین‌تر است. آنیل‌کردن چدن‌ها عبارت است از حرارت دادن قطعه در دمایی بالاتر از دمای بحرانی $A_1$ و سپس سردکردن آهسته که معمولاً در کوره انجام می‌گیرد. در چدن‌ها فرایند آنیل برای از بین بردن تنش داخلی و به‌دست آوردن خواص ماشین‌کاری استفاده می‌گردد. روش‌های مختلفی برای آنیل کردن چدن‌ها وجود دارد.

### آنیل‌کردن در درجه حرارت بالا

**(آنیل کامل ـ گرافیت‌زایی):** در این فرایند قطعات را در درجه حرارتی بین ۹۰۰ تا ۹۵۰ درجهٔ سلسیوس حرارت داده و سپس به مدت زمان لازم (۱ تا ۳ ساعت به علاوهٔ یک ساعت برای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت) در کوره در آن دما نگه داشته و سپس قطعات به آهستگی

(در کوره) تا دمای محیط سرد می‌شود. هدف از انجام این عملیات تهیهٔ چدن چکش خوار از چدن سفید است. این نوع از چدن به وسیله عملیات حرارتی چدن سفید به‌دست می‌آید.

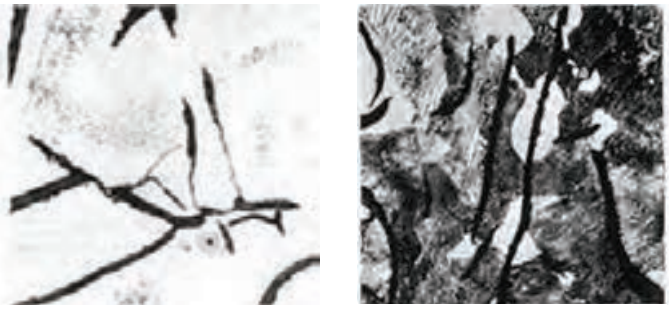
چدن سفید سخت و شکننده است و تنها چدنی است که گرافیت آزاد ندارد. با اعمال عملیات حرارتی سمنتیت تجزیه شده و کربن به شکل گرافیت برفکی در ساختار چدن به وجود می‌آید. گرافیت در چدن مالیبل با عناوین گرافیت برفکی، تمپر شده، کُره از هم پاشیده و یا شبه کروی یاد می‌شود. زمینه چدن مالیبل می‌تواند فریتی یا پرلیتی باشد. در شکل (۶) تصویری از ریزساختار چدن مالیبل یا چدن با گرافیت تمپر شده در زمینه فریتی مشاهده می‌شود.




**شکل ۶ـ ریزساختار چدن مالیبل**

**آنیل کردن در درجه حرارت متوسط (آنیل کامل):** در این روش قطعات چدنی را تا درجه حرارت ۸۲۰ـ۹۰۰ درجهٔ سلسیوس حرارت می‌دهند و به ازای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت مقطع یک ساعت در این دما نگهداری می‌کنند و سپس به آهستگی سرد می‌کنند. این عملیات برای فریتی کردن کامل زمینه در چدن‌های غیر آلیاژی استفاده می‌شود.

**آنیل در درجه حرارت پایین (فریتی کردن):** در این روش قطعات چدنی را تا درجه حرارت ۷۳۰ تا ۷۹۰ درجهٔ سلسیوس حرارت می‌دهند و سپس به ازای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت مقطع ۴۵دقیقه در این دما نگهداری کرده و سپس به آرامی سرد می‌کنند. در این روش زمینهٔ پرلیتی در اثر نفوذ تدریجی، به مجموعه‌ای از فریت و گرافیت تبدیل می‌شود. شکل۷ نمونه‌ای از چدن خاکستری غیر آلیاژی را قبل و بعد از عملیات آنیل فریتی نشان می‌دهد.



الف ب

**شکل ۷ـ ریز ساختار چدن**

در شکل ۷ تبدیل ریز ساختار چدن خاکستری غیر آلیاژی با زمینه پرلیتی به زمینه فریتی را قبل و بعد از عملیات آنیل نشان می‌دهد. الف) قبل از عملیات حرارتی با زمینه پرلیتی، ب) بعد از عملیات حرارتی در دمای ۷۶۰ درجهٔ سلسیوس به مدت زمان یک ساعت

فعالیت کارگاهی ۴

## آنیل فریتی

**وسایل مورد نیاز:**

۱ کورهٔ عملیات حرارتی آزمایشگاهی ۲ انبر ۳ دستگاه سختی‌سنجی ۴ نمونه‌های مورد آزمایش

نمونهٔ مورد آزمایش: چدن خاکستری با زمینه پرلیتی

**مراحل انجام آزمایش:**

ابتدا هنرجویان در گروه‌های پنج نفری تقسیم شده سپس توسط هر گروه یک نمونه از چدن خاکستری با زمینهٔ پرلیتی و ضخامت ۲۵ میلی‌متر آماده شود. دو سطح نمونه‌ها را سنباده‌زده و یک طرف آنها را با سنبه شماره‌گذاری کنید. یک نمونه را به عنوان شاهد نگه داشته و آزمایش را به‌صورت زیر ادامه دهید.

۱ سختی نمونه شاهد را توسط سختی سنج برینل اندازه گرفته و در جدول زیر یادداشت کرده و ریز ساختار آنها را در جدول رسم کنید.

- **نکات ایمنی:** قبل از روشن‌کردن کوره اتصالات کوره را کنترل کنید.
- هنگام روشن‌کردن کوره از دستورالعمل‌های سازندهٔ کوره استفاده کنید.
- از سلامت نشانگر دیجیتالی دما اطمینان حاصل کنید.
- حتماً از محافظ صورت، کلاه و عینک ایمنی، دستکش مخصوص و در مواقعی که با فلز داغ کار می‌کنید از لباس ضد آتش استفاده کنید.

۲ کوره را روشن کرده و روی دمای ۷۸۰ درجهٔ سلسیوس تنظیم کنید.

۳ پس از رسیدن دمای کوره به دمای مورد نظر نمونه‌ها را در کوره قرار دهید.

۴ نمونه‌ها را به مدت زمان ۹۰ دقیقه در کوره در این دما نگهداری کنید.

۵ پس از نگهداری در مدت زمان ذکر شده کوره را خاموش کنید تا نمونه‌ها به آرامی در کوره سرد شوند.

۶ سختی نمونه‌های سرد شده را با استفاده از سختی سنج برینل اندازه گرفته و یادداشت کنید و ریز ساختار آن را در جدولی رسم کرده و به همراه پاسخ سؤالات در گزارش کار تحویل هنرآموز محترم دهید.

| نمونه | شاهد | آنیل شده |
|---|---|---|
| سختی | | |
| شکل ریز ساختار | | |

بحث گروهی

- چه تفاوتی بین سختی نمونهٔ شاهد و نمونهٔ آنیل شده وجود دارد؟
- چه تغییری در ریز ساختار حاصل از نمونهٔ عملیات حرارتی شده با نمونه شاهد مشاهده می‌کنید.
- پس از بحث و گفتگو پاسخ تحلیلی خود را به همراه گزارش کار به هنرآموز خود تحویل دهید.

## واحد یادگیری ۲: عملیات حرارتی نرماله

نرماله‌کردن یکی دیگر از انواع روش‌های عملیات حرارتی است که ریز ساختار حاصل از آن همانند فرایند عملیات حرارتی آنیل است. یکی از اهداف مهم نرماله‌کردن ریز کردن دانه‌های درشتی است که اغلب هنگام کار گرم در درجه حرارت بالا و یا هنگام ریخته‌گری و انجماد به‌وجود آمده است.

## استاندارد عملکرد کار

انجام عملیات حرارتی نرماله بر روی انواع فولادها و چدن‌ها براساس استانداردها و دستورالعمل‌های مربوطه.

## پیش‌نیاز

آشنایی با انواع فولادها و چدن‌ها، دیاگرام آهن ـ کربن، متالوگرافی

## نرماله

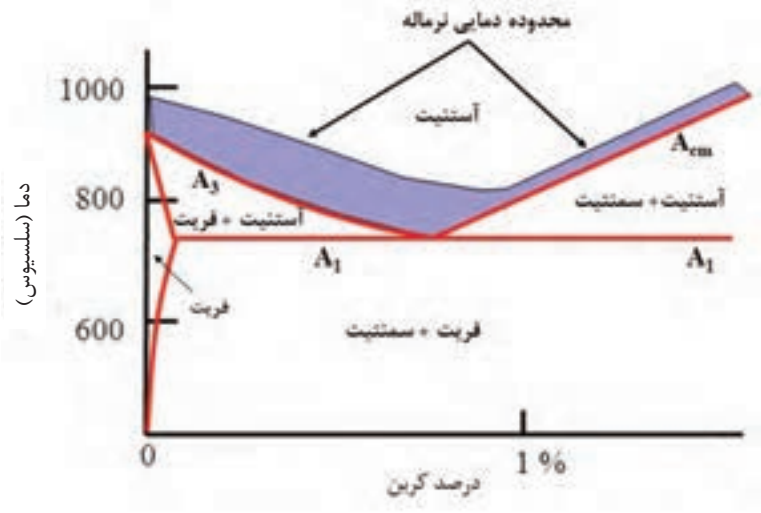
نرماله‌کـردن یکـی دیگـر از انـواع روش‌هـای عملیات حرارتی اسـت که بـا این فرایند می‌تـوان تمـام تغییراتی که در نتیجـه عملیـات قبلی بر روی فولاد در سـاختار دانـه‌ای و در خواص معین ظاهر گشـته را برطرف کرد. همچنین این عملیـات بـرای انجـام عملیات حرارتی بعدی اسـت. به منظور اهـداف زیـر در فولادها فرایند نرماله انجـام می‌گیرد.

۱ تولید فولادی با استحکام و سختی بالاتر نسبت به فرایند آنیل؛
۲ بهبود قابلیت ماشین‌کاری؛
۳ ریز کردن دانه‌ها؛
۴ بهبود میزان انعطاف‌پذیری؛
۵ یکنواخت‌کردن ریز ساختار؛
۶ عملیات حرارتی اولیه برای ایجاد ساختار دانه ریز برای عملیات سخت‌کاری.

### مراحل عملیات حرارتی نرماله

برای انجام عملیات حرارتی نرماله مراحل زیر طی می‌شود:
۱ مشخص‌کردن درصد کربن فولاد و محاسبهٔ دمای آستنیته کردن فولاد براساس نمودار یا جدول‌های استاندارد؛
۲ محاسبهٔ زمان نگهداری قطعه در کوره؛
۳ سرد کردن در هوا؛

مراحـل آسـتنیته‌کردن در فراینـد نرمالـه بـرای فولادهای هیپویوتکتوئیـد در منطقه دمایـی حـدود $100^{\circ}C$ بالای خـط $A_3$ و بـرای فولادهـای هیپـر یوتکتوئیـد حـدود $50^{\circ}C$ بـالای خـط $A_{cm}$ می‌باشـد کـه در شـکل (۸) محدوده دمایـی نرماله‌کـردن در فولادهـا بـر روی قسـمتی از منحنـی آهـن ـ کربـن نشـان داده شـده اسـت. و همچنیـن از جدول‌هـای اسـتاندارد نیـز برای محاسـبه دمای آسـتنیته‌کردن اسـتفاده می‌شـود. جـدول ۱ دمای آسـتنیته‌کردن فولادهـای کربنـی بـرای فراینـد نرمالـه را نشـان می‌دهد.




**شکل ۸ــ محدودهٔ نرماله کردن فولادها بر روی منحنی آهن ــ کربن که با رنگ آبی مشخص شده است.**

**جدول ۱ـ دمای آستنیته‌کردن فولادهای کربنی**

| نوع فولاد کربنی | دما | |
|---|---|---|
| | سلسیوس | فارنهایت |
| ۱۰۱۵ | ۹۱۵ | ۱۰۱۵ |
| ۱۰۲۵ | ۹۰۰ | ۱۶۵۰ |
| ۱۰۴۰ | ۸۶۰ | ۱۵۸۰ |
| ۱۰۶۰ | ۸۳۰ | ۱۵۲۵ |
| ۱۰۸۰ | ۸۳۰ | ۱۵۲۵ |

پس از تعیین دمای آستنیته‌کردن، قطعات داخل کوره قرار داده شده و به مدت زمان لازم جهت آستنیته‌کردن در کوره نگهداری می‌شوند که زمان نگهداری درکوره برای فرایند نرماله یک ساعت به ازای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت می‌باشد و همچنین می‌توان به‌صورت تقریبی از رابطهٔ زیر زمان نگهداری در کوره را به‌دست آورد.

$$t = ۶۰ + D$$

که t زمان نگهداری بر حسب دقیقه است و D بیشترین قطر یا ضخامت قطعه است.

پس از نگهداری به مدت زمان تعیین شده قطعات از کوره خارج شده و مطابق شکل۹ در هوای آرام تا دمای محیط خنک می‌شوند.

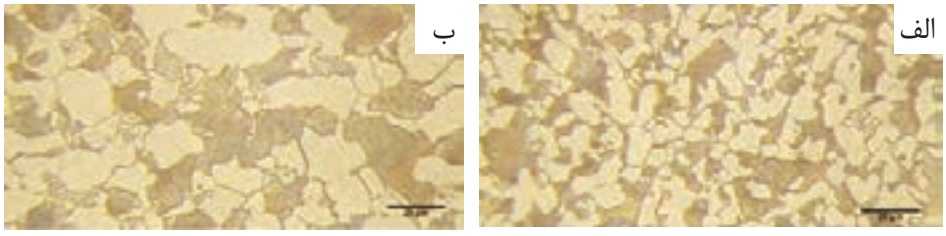
**شکل ۹ـ خارج کردن قطعات از کوره و سرد شدن در هوای ساکن**

چند تفاوت عمده بین نرماله‌کردن و آنیل‌کردن وجود دارد ۱ـ در نرماله‌کردن دمای آستنیته‌کردن برای فولادهای هیپویوتکتوئید کمی بالاتر از گسترهٔ دمایی مربوط به آنیل کردن است. در حالی‌که برای فولادهای هیپر یوتکتوئید از گستره دمایی حدود ۵۰ درجهٔ سلسیوس بالای $A_{cm}$ استفاده شده است. ۲ـ در عملیات نرماله‌کردن قطعات پس از آستنیته شدن در هوا سرد می‌شوند. ۳ـ از آنجایی‌که در نرماله‌کردن فولادهای هیپو یوتکتوئید گسترهٔ دمایی آستنیته‌کردن بالاتر از گسترهٔ دمایی مربوط به آنیل است، ساختار آستنیت و همچنین توزیع عناصر آلیاژی از یکنواختی بیشتری برخوردار است. ۴ـ با توجه به‌اینکه در نرماله‌کردن، قطعات در هوا سرد می‌شوند ریز ساختارهای حاصل نسبت به آنیل ریزتر هستند بنابراین در مقایسه با خواص حاصل از فرایند آنیل‌کردن، استحکام و سختی افزایش یافته و انعطاف‌پذیری تا حدودی کاهش می‌یابد. در جدول صفحه بعد سختی فولادهای کربنی را در سه حالت نورد گرم، آنیل و نرماله نشان می‌دهد. همان‌طور که ذکر شد سختی در فرایند آنیل کمتر از فرایند نرماله است.

جدول۲ـ سختی فولادهای کربنی در سه فرایند، الف) نورد گرم، ب) نرمالیزه، ج) آنیل

| نوع فولاد | نوع عملیات | سختی (برینل) |
|---|---|---|
| ۱۰۲۰ | نورد شده | ۱۴۳ |
| | نرمالیزه در دمای $870^{\circ}C$ | ۱۳۱ |
| | آنیل در دمای $870^{\circ}C$ | ۱۱۱ |
| ۱۰۳۰ | نورد شده | ۱۷۹ |
| | نرمالیزه در دمای $925^{\circ}C$ | ۱۴۹ |
| | آنیل در دمای $845^{\circ}C$ | ۱۲۶ |
| ۱۰۵۰ | نورد شده | ۲۲۹ |
| | نرمالیزه در دمای $900^{\circ}C$ | ۲۱۷ |
| | آنیل در دمای $790^{\circ}C$ | ۱۸۷ |

شکل (۱۰) تصاویری از ریز ساختار فولاد میان کربن CK۴۵ بعد از عملیات حرارتی آنیل و نرماله را نشان می‌دهد که دو نمونه در دمای ۸۵۰ درجهٔ سلسیوس و به مدت ۱ ساعت نگهداری شده و سپس یک نمونه در کوره و نمونهٔ دیگر در هوا خنک گردیده است. نمونهٔ آنیل که در کورهٔ سرد شده دارای دانه‌های درشت تر و پرلیت خشن‌تری است.




شکل ۱۰ـ تصاویری از فولاد CK۴۵ تحت عملیات (الف) نرماله (ب) آنیل

فعالیت کارگاهی ۵

## نرماله‌کردن فولاد

**وسایل مورد نیاز:**

۱ کورهٔ عملیات حرارتی آزمایشگاهی ۲ انبر ۳ دستگاه سختی‌سنج ۴ نمونه‌های مورد آزمایش

**نمونهٔ مورد آزمایش:** قطعات فولاد کربن متوسط (CK۴۵)

**مراحل انجام آزمایش:**

پس از تشکیل گروه‌های ۵ نفری با راهنمایی هنرآموز، هر گروه یک نمونه از فولاد کربن متوسط (CK۴۵) به قطر و ارتفاع ۱cm را آماده کنید. دو سطح نمونه‌ها را سنباده‌زده و یک طرف آنها را با سنبه شماره‌گذاری کنید یک نمونه را به عنوان شاهد نگه داشته و آزمایش را به‌صورت زیر ادامه دهید.

۱ سختی نمونه شاهد را با استفاده از سختی‌سنج اندازه گرفته و یادداشت کنید و ریز ساختار آن را در جدول رسم کنید.

- **نکات ایمنی:** قبل از روشن کردن کوره اتصالات کوره را کنترل کنید.
- هنگام روشن کردن کوره از دستورالعمل‌های سازنده استفاده کنید.
- از سلامت نشانگر دیجیتالی دما اطمینان حاصل کنید.
- حتماً از محافظ صورت، کلاه و عینک ایمنی، دستکش مخصوص و در مواقعی که با فلز داغ کار می‌کنید از لباس ضد آتش استفاده کنید.

۲ کوره را روشن کرده به دمای ۹۰۰ درجهٔ سلسیوس تنظیم کنید.

۳ پس از رسیدن کوره به دمای مورد نظر، نمونه‌ها را در داخل کوره قرار داده و یک ساعت در این دما حرارت دهید.

۴ نمونه‌ها را از کوره خارج کرده و اجازه دهید نمونه‌ها به آرامی در هوا سرد شوند.

۵ سختی نمونه‌های سرد شده را با استفاده از سختی‌سنج اندازه گرفته و یادداشت کنید و ریزساختار آن را در جدولی رسم کرده و به همراه پاسخ سؤالات در گزارش کار تحویل هنرآموز محترم دهید.

بحث گروهی

- چه تفاوتی بین سختی و ریز ساختار نمونه شاهد و نمونه عملیات حرارتی شده وجود دارد؟
- چه تغییری در ریز ساختار حاصل از نمونه عملیات حرارتی نرماله با آنیل شده مشاهده می‌کنید؟
- پس از بحث و گفتگو پاسخ تحلیلی خود را به همراه گزارش کار به هنرآموز خود تحویل دهید.

## ارزشیابی پایانی آنیل

**نقشه کار: انجام عملیات حرارتی آنیل**
**شاخص عملکرد:** ۱ـ تنظیم دمای کوره ۲ـ قرار دادن قطعات داخل کوره ۳ـ زمان نگهداری قطعات داخل کوره ۴ـ خارج‌کردن قطعات از کوره در دمای مناسب

**شرایط انجام کار:**
۱ـ انجام کار در محیط کارگاه عملیات حرارتی ۲ـ نور یکنواخت با شدت ۴۰۰ لوکس ۳ـ تهویه استاندارد و دمای $20^{\circ}C \pm 3^{\circ}$ ۴ـ ابزارآلات و تجهیزات استاندارد و آماده به کار ۵ـ وسایل ایمنی استاندارد ۶ـ زمان ۲۳۰ دقیقه

**مواد مصرفی:**

**ابزار و تجهیزات :**
کوره عملیات حرارتی ـ ترمومتر ـ زمان‌سنج ـ انواع انبر ـ سبد فلزی نسوز ـ گاری ـ جرثقیل

**نمونه و نقشه کار:**
۱ـ راه‌اندازی و تنظیم دمای کوره مطابق با سیکل عملیات حرارتی آنیل فلز و آلیاژ موردنظر طبق دستورالعمل
۲ـ واردکردن قطعات داخلی کوره مطابق برنامه زمان‌بندی سیکل عملیات حرارتی آنیل و چیدمان صحیح قطعات داخل کوره
۳ـ نگهداری قطعات در کوره جهت عملیات آنیل در زمان مشخص شده سیکل عملیات حرارتی طبق دستورالعمل
۴ـ خارج‌کردن صحیح قطعات از کوره مطابق سیکل عملیات حرارتی آنیل در دمای مناسب طبق دستورالعمل

**معیار شایستگی :**

| ردیف | مرحله کار | حداقل نمره قبولی | نمره هنرجو |
|---|---|---|---|
| ۱ | تنظیم کردن دمای کوره | ۲ | |
| ۲ | واردکردن قطعات به داخل کوره | ۱ | |
| ۳ | کنترل کردن دمای کوره | ۲ | |
| ۴ | نگهداری قطعات در کوره خاموش تا دمای مناسب | ۲ | |
| ۵ | خارج کردن قطعات از کوره | ۱ | |
| | **شایستگی‌های غیرفنی، ایمنی، بهداشت، توجهات زیست‌محیطی و نگرش:**<br>۱ـ رعایت قواعد و اصول در مراحل کار<br>۲ـ مسئولیت‌پذیری<br>۳ـ مدیریت مواد و تجهیزات<br>۴ـ استفاده از لباس کار نسوز، دستکش نسوز، کفش ایمنی و عینک محافظ<br>۵ـ تمیز کردن وسایل و محیط کار | ۲ | |
| | **میانگین نمرات** | | * |

* حداقل میانگین نمرات هنرجو برای قبولی و کسب شایستگی، ۲ می‌باشد.

## ارزشیابی پایانی نرماله

**نقشه کار: انجام عملیات حرارتی نرماله**
**شاخص عملکرد:** ۱ـ تنظیم دمای کوره ۲ـ قرار دادن قطعات داخل کوره ۳ـ زمان نگهداری قطعات داخل کوره ۴ـ خارج‌کردن قطعات از کوره در دمای مناسب

**شرایط انجام کار:**
۱ـ انجام کار در محیط کارگاه عملیات حرارتی ۲ـ نور یکنواخت با شدت ۴۰۰ لوکس ۳ـ تهویه استاندارد و دمای $۲۰^{\circ}C \pm ۳^{\circ}$ ۴ـ ابزارآلات و تجهیزات استاندارد و آماده به کار ۵ـ وسایل ایمنی استاندارد ۶ـ زمان ۱۱۰ دقیقه

**مواد مصرفی:**

**ابزار و تجهیزات :** کوره عملیات حرارتی ـ ترمومتر ـ زمان‌سنج ـ انواع انبر ـ سبد فلزی نسوز ـ گاری ـ جرثقیل
**نمونه و نقشه کار:**
۱ـ راه‌اندازی و تنظیم دمای کوره مطابق با سیکل عملیات حرارتی نرماله فلز و آلیاژ موردنظر طبق دستورالعمل
۲ـ واردکردن قطعات داخل کوره مطابق برنامه زمان‌بندی سیکل عملیات حرارتی نرماله و چیدمان صحیح قطعات در داخل کوره
۳ـ نگهداری قطعات در کوره جهت عملیات نرماله‌کردن در زمان مشخص شده سیکل حرارتی طبق دستورالعمل
۴ـ خارج‌کردن صحیح قطعات از کوره مطابق سیکل عملیات حرارتی نرماله‌کردن در دمای مناسب طبق دستورالعمل

**معیار شایستگی :**

| ردیف | مرحله کار | حداقل نمره قبولی | نمره هنرجو |
|---|---|---|---|
| ۱ | تنظیم کردن دمای کوره | ۲ | |
| ۲ | واردکردن قطعات به داخل کوره | ۱ | |
| ۳ | کنترل کردن دمای کوره | ۲ | |
| ۴ | خارج‌کردن قطعات از کوره | ۱ | |
| | **شایستگی‌های غیرفنی، ایمنی، بهداشت، توجهات زیست‌محیطی و نگرش:**<br>۱ـ رعایت قواعد و اصول در مراحل کار<br>۲ـ مسئولیت‌پذیری<br>۳ـ مدیریت مواد و تجهیزات<br>۴ـ استفاده از لباس کار نسوز، دستکش نسوز، کفش ایمنی و عینک محافظ<br>۵ـ تمیز کردن وسایل و محیط کار | ۲ | |
| | **میانگین نمرات** | | * |

* حداقل میانگین نمرات هنرجو برای قبولی و کسب شایستگی، ۲ می‌باشد.