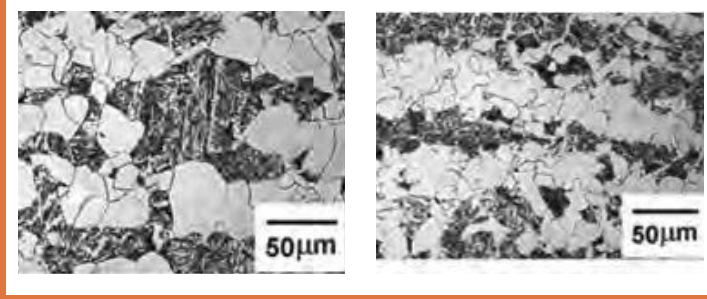
فصل چهارم

عملیات حرارتی آنیل و نرماله



واحد یادگیری ۱: عملیات حرارتی آنیل

عملیات حرارت آنیل عموماً برای کاهش سختی فلزات و آلیاژها انجام می‌گیرد و در نتیجه آن خواصی مانند قابلیت ماشین‌کاری، خواص الکتریکی، قابلیت کار سرد و پایداری ابعادی و ساختار آلیاژ تغییر قابل توجهی می‌کند. عملیات آنیل باعث حذف تنش‌های داخلی شده و ساختمان داخلی قطعه را تغییر می‌دهد. همچنین این امر منجر به بهبود قابلیت ماشین‌کاری قطعات می‌گردد.

استاندارد عملکرد کار

انجام عملیات حرارتی آنیل بر روی انواع فولادها و چدن‌ها براساس استانداردها و دستورالعمل‌های 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 می‌باشد. با انجام این فرآیند 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 فرآیند آنیل می‌باشیم. در واقع به هر گونه عملیات حرارتی که منجر به تشکیل ساختارهای تعادلی با سختی کم و انعطاف‌پذیری زیاد شود آنیل گفته می‌شود.

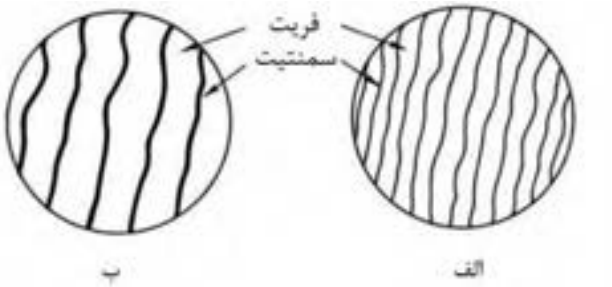
آنیل فولادها

عبارتست 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 می‌باشد. عملیات آنیل فولادها به یک سری فرآیندهای مشخص و دقیق براساس دمای عملیات، روش سردکردن، ساختار و خواص نهایی به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود.

که هر کدام از فرآیندها 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.

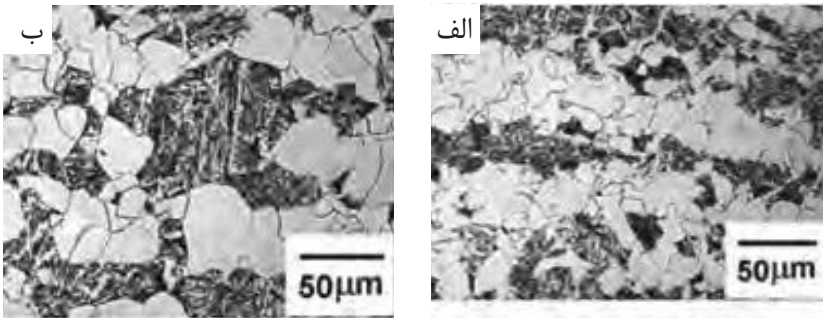


آنیل کامل عبارتست از حرارت دادن فولاد در دامنه حرارتی آستنیت، نگهداری به مدت زمان لازم (یک ساعت به ازای هر اینچ ضخامت) در این دما و سپس سرد کردن آهسته که معمولاً در کوره انجام می‌شود تا آستنیت به‌طور کامل تجزیه شود. دامنه حرارتی آستنیته‌کردن برای آنیل کامل، تابع درصد کربن می‌باشد بدین صورت که برای فولادهای 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) محدوده دمایی آنیل کامل برای فولادها نشان داده شده است. در نظر داشته باشید که یک منطقه محدودی از دیاگرام آهن ـ کربن آورده شده است که در این شکل درصد کربن حدود ۲ درصد و دما تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که منطقه خاکستری رنگ مربوط به منطقه آنیل کامل می‌باشد.

شکل ۱ــ محدود دمایی آنیل کامل در فولادها (منطقه خاکستری رنگ)

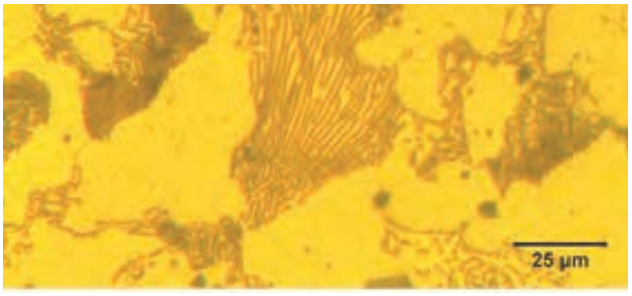
ولی با توجه به این که عناصر آلیاژی روی دمای آنیل کامل تأثیر می‌گذارند بهتر است برای انتخاب دمای آنیل از جداول سازنده فولاد با ترکیب شیمیایی معیّن استفاده گردد. هدف از انجام این فرآیند بهبود قابلیت ماشین‌کاری و مقاومت به ضربه فولاد با ایجاد یک زمینه یکنواخت فریتی به همراه پرلیت ضخیم می‌باشد. در واقع در فرآیند 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.

آنیل کامل عموماً بر روی قطعات با ابعاد بزرگ و آهنگری شده صورت می‌گیرد. با انجام این فرآیند به حداکثر نرمی و همچنین کاهش سختی و استحکام می‌رسیم.



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

شکل (۳) تصویری از ریزساختار فولاد Ck۴۵ که تحت عملیات حرارتی آنیل کامل قرار گرفته است را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به اینکه سرعت سرد شدن نمونه بسیار آهسته بوده، پرلیت درشت و خشن به‌دست آمده است.



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

فعالیت کارگاهی ۱

آنیل کامل

وسایل مورد نیاز:

۱ کوره عملیات حرارتی آزمایشگاهی ۲ انبر ۳ دستگاه سختی سنجی ۴ نمونه‌های مورد آزمایش

نمونه مورد آزمایش: قطعات فولاد کربن متوسط (CK۴۵)

مراحل انجام آزمایش:

ابتدا هنرجویان در گروه‌های پنج نفری تقسیم شده، هر گروه یک نمونه از فولاد کربن متوسط (CK۴۵) به قطر و ارتفاع ۱cm را آماده نمایید. دو سطح نمونه‌ها را سنباده زده و یک طرف آنها را با سنبه شماره‌گذاری نمایید یک نمونه را به عنوان شاهد نگه داشته و آزمایش را به‌صورت زیر ادامه دهید.

۱ سختی نمونه شاهد را با استفاده از سختی سنج برینل اندازه گرفته و یادداشت نمایید و ریز ساختار آن را در جدول زیر ترسیم نمایید.

- **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 نمایید.
- حتماً از محافظ صورت، کلاه و عینک ایمنی، دستکش مخصوص و در مواقعی که با فلز داغ کار می‌کنید از لباس ضد آتش استفاده نمایید.

۲ کوره را روشن کرده و به دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم نمایید.
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 نمایید. 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 نمایید و ریز ساختار آن را در جدول ترسیم نموده و به همراه گزارش کار به هنرآموز خود تحویل دهید.

نمونه	شاهد	نمونه سرد شده در کوره
سختی		
شکل ریز ساختار		

بحث گروهی

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 نمونه شاهد مشاهده می‌نمایید.
۳ پس از بحث و گفتگو پاسخ تحلیلی خود را به همراه گزارش کار به هنرآموز خود تحویل دهید.

آنیل هم‌دما (Isotermal): در این فرآیند، ابتدا آستنیته‌کردن فولاد در همان دامنه حرارتی مربوط به آنیل کامل انجام می‌شود. سپس فولاد را سریعاً به زیر خط A_1 می‌رسانند تا تجزیه 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. و از طرفی پرلیت حاصل ریزتر می‌باشد. از جمله اهداف کاربرد آنیل هم‌دما در رابطه با فولادهای آلیاژی برای به‌دست آوردن ساختار پرلیتی می‌باشد.

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، هر گروه یک نمونه از فولاد کربن متوسط (CK۴۵) به قطر و ارتفاع ۱cm را آماده نمایید. دو سطح نمونه‌ها را سنباده زده و یک طرف آنها را با سنبه شماره‌گذاری نمایید.

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

۱ سختی نمونه شاهد را با استفاده از دستگاه سختی سنج برینل اندازه گرفته و یادداشت نمایید و ریز ساختار آن را در جدول ترسیم نمایید.

- **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 نمایید.
- حتماً از محافظ صورت، کلاه و عینک ایمنی، دستکش مخصوص و در مواقعی که با فلز داغ کار می‌کنید از لباس ضد آتش استفاده نمایید.

۲ دو کوره را روشن کرده یکی را به دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و دیگری را به دمای ۷۱۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم نمایید.

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

۴ سپس درب کوره را باز کرده و سریعاً نمونه‌ها را به کوره با دمای ۷۱۰ درجه منتقل نمایید و به مدت زمان دو ساعت در این دما نگهداری کنید و سپس نمونه‌ها در هوا سرد نمایید.

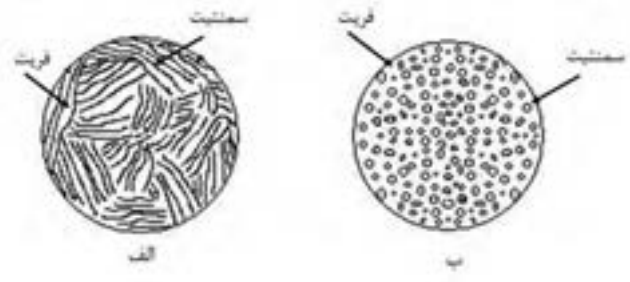
۵ سختی نمونه‌های سرد شده را با استفاده از سختی سنج برینل اندازه گرفته و یادداشت نمایید و ریز ساختار آن را در جدول ترسیم کنید به همراه گزارش کار تحویل هنرآموز خود دهید.

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 کروی کردن: به شکل زیر نگاه کنید با چه روشی می‌توان ریز ساختار شکل الف را به شکل ب تبدیل نمود؟

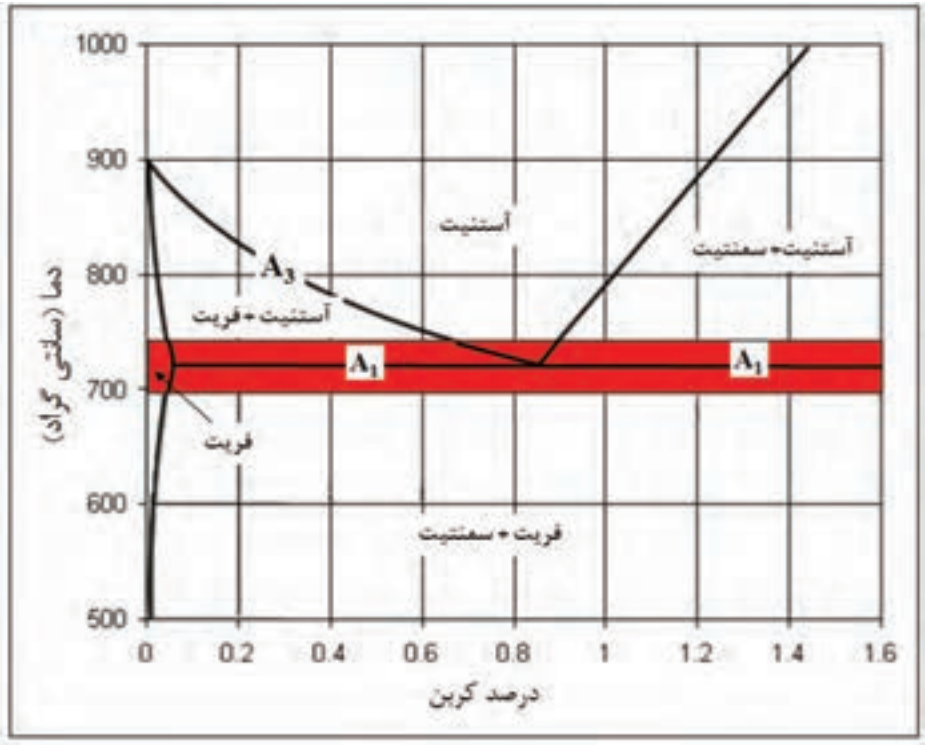


روش‌های متفاوتی برای فرآیند کروی‌کردن به‌کار برده شده است که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

الف) حرارت دادن فولاد تا درست 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_3ـA_1 برای فولادهای هیپو یوتکتوئید و یا بین A_{cm}ـA_1 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 می‌باشد. در حقیقت هدف از فرآیند کروی‌کردن، دستیابی به ساختاری متشکل از سمنتیت کروی در زمینه فریتی می‌باشد. به‌طور کلی با انجام فرآیند 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 فرآیند کروی‌کردن راحت‌تر خواهد بود. هدف از انجام این عملیات، بهبود قابلیت ماشین‌کاری و شکل‌پذیری سرد در فولادها می‌باشد.



شکل ۴ـ محدوده 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 $700^{\circ}C$ به مدت زمان ۲۱ ساعت

فعالیت کارگاهی ۳

آنیل کروی سازی

وسایل مورد نیاز:

۱ کوره 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 نمایید. سپس برای تسریع در عملیات کروی‌سازی دو نمونه فولاد کربن متوسط را مطابق سیکل عملیات سخت‌کاری در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد در آب سریع سرد نمایید. یکی از نمونه‌های سخت‌کاری شده را به عنوان شاهد نگه داشته و بقیه آزمایش را به‌صورت زیر انجام دهید:

۱ سختی نمونه شاهد و نمونه سریع سرد شده در آب را توسط سختی‌سنج راکول اندازه گرفته و در جدول زیر یادداشت نمایید و ریز ساختار آنها را در جدول ترسیم 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 نمایید.
- حتماً از محافظ صورت، کلاه و عینک ایمنی، دستکش مخصوص و در مواقعی که با فلز داغ کار می‌کنید از لباس ضد آتش استفاده نمایید.

۲ کوره را روشن کرده و به دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم نمایید.

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 نمایید.

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

۶ سختی نمونه‌های سرد شده را با استفاده از سختی‌سنج اندازه گرفته و یادداشت کنید و ریز ساختار آن را در جدول ترسیم نموده وبه 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 نمونه آنیل شده وجود دارد؟
- چه تغییری در ریز ساختار حاصل از نمونه‌های عملیات حرارتی شده با نمونه شاهد مشاهده می‌نمایید.
- 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

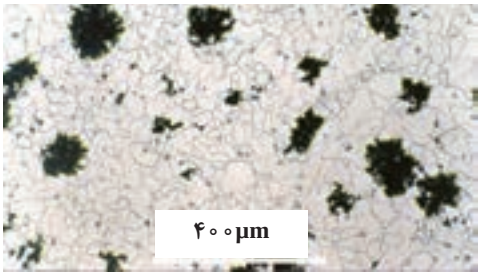
از آنجا که قطعات چدنی عمدتاً به روش ریخته‌گری تولید می‌شوند پس از انجماد نیاز به فرآیندهایی نظیر تمیزکاری سطح، عملیات حرارتی و ماشین‌کاری دارند در مورد چدن‌ها بررسی‌ها نشان داده‌اند که هرچه ساختار زمینه از فریت به سمت پرلیت می‌رود عمر ابزار کاهش و توان مصرفی برای ماشین‌کاری افزایش می‌یابد به نحوی که زمینه 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 فرآیند 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 فرآیند قطعات را در درجه حرارتی بین ۹۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده و سپس به مدت زمان لازم (۱ تا ۳ ساعت به علاوه 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 تهیه چدن چکش خوار از چدن سفید می‌باشد. این نوع از چدن به وسیله عملیات حرارتی چدن سفید به‌دست می‌آید.

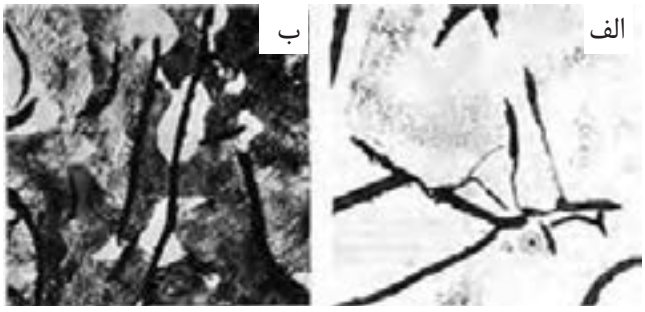
چدن سفید سخت و شکننده است و تنها چدنی است که گرافیت آزاد ندارد. با اعمال عملیات حرارتی سمنتیت تجزیه شده و کربن به شکل گرافیت برفکی در ساختار چدن به وجود می‌آید. گرافیت در چدن مالیبل با عناوین گرافیت برفکی، تمپر شده، کره از هم پاشیده و یا شبه کروی یاد می‌شود. زمینه چدن مالیبل می‌تواند فریتی یا پرلیتی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



شکل ۶ـ تصویری از ریزساختار چدن مالیبل

آنیل کردن در درجه حرارت متوسط (آنیل کامل): در این روش قطعات چدنی را تا درجه حرارت ۸۲۰ـ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد 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 درجه سانتی‌گراد حرارت می‌دهند و سپس به ازای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت مقطع ۴۵ دقیقه در این دما نگهداری کرده و سپس به آرامی سرد می‌کنند. در این روش زمینه 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.



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 درجه سانتی‌گراد به مدت زمان یک ساعت

فعالیت کارگاهی ۴

آنیل فریتی

وسایل مورد نیاز:

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

نمونه مورد آزمایش: چدن خاکستری با زمینه پرلیتی

مراحل انجام آزمایش:

ابتدا هنرجویان در گروه‌های پنج نفری تقسیم شده سپس هر گروه یک نمونه از چدن خاکستری با زمینه پرلیتی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر آماده نمایید. دو سطح نمونه‌ها را سنباده‌زده و یک طرف آنها را با سنبه شماره‌گذاری نمایید 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 نمایید و ریز ساختار آنها را در جدول ترسیم نمایید.

- **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 نمایید.
- حتماً از محافظ صورت، کلاه و عینک ایمنی، دستکش مخصوص و در مواقعی که با فلز داغ کار می‌کنید از لباس ضد آتش استفاده نمایید.

۲ کوره را روشن کرده و به دمای ۷۸۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم نمایید.

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 نمایید.

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 نمایید و ریز ساختار آن را در جدولی ترسیم نموده و به همراه پاسخ سئوالات در گزارش کار تحویل هنرآموز محترم دهید.

نمونه	شاهد	آنیل شده
سختی		
شکل ریز ساختار		

بحث گروهی

- چه تفاوتی بین سختی نمونه شاهد، و نمونه آنیل شده وجود دارد؟
- چه تغییری در ریز ساختار حاصل از نمونهٔ عملیات حرارتی شده با نمونه شاهد مشاهده می‌نمایید.
- 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 کارگرم در درجه حرارت بالا و یا ضمن ریخته‌گری و انجماد به‌وجود آمده است.

استاندارد عملکرد کار

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

پیش نیاز

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

نرماله

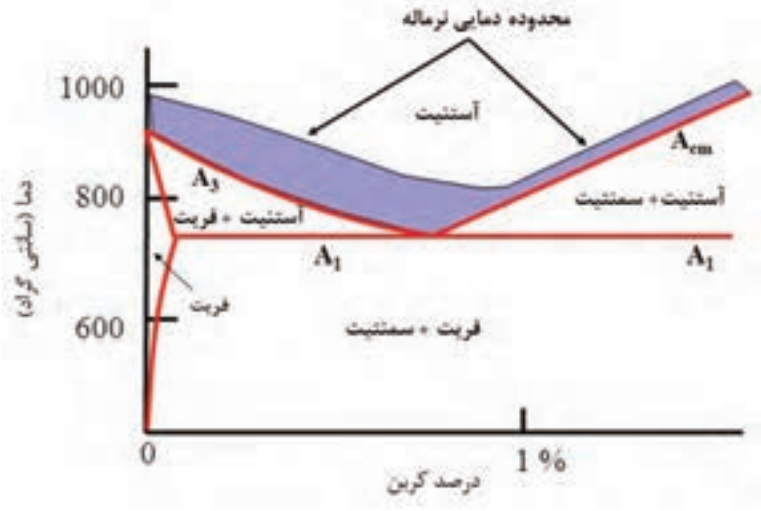
نرماله‌کـردن یکـی دیگـر از انـواع روش‌هـای عملیات حرارتی اسـت کـه با این فرآینـد می‌توان تمـام تغییراتی که در نتیجـه عملیـات قبلـی بر روی فولاد در سـاختار دانـه‌ای و در خواص معین ظاهر گشـته را برطـرف کرد. و همچنین ایـن عملیـات پایـه یـک عملیـات حرارتـی برای انجـام عملیـات حرارتی بعـدی می‌باشـد. به منظـور اهـداف زیر در فولادهـا فرآینـد نرماله انجـام می‌گیرد.

۱ تولید فولادی با استحکام و سختی بالاتر نسبت به فرآیند آنیل؛
۲ بهبود قابلیت ماشین‌کاری؛
۳ ریز کردن دانه ها؛
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 حراتی نرماله مراحل زیر طی می‌شود:
۱ مشخص‌کردن درصد کربن فولاد و محاسبه دمای آستنیته کردن فولاد براساس دیاگرام یا جداول استاندارد؛
۲ محاسبه زمان نگهداری قطعه در کوره؛
۳ سرد کردن در هوا؛

مراحـل آسـتنیته‌کردن در فرآینـد نرمالـه بـرای فولادهـای هیپویوتکتوئید در منطقـه دمایی 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 دمایی نرماله‌کردن در فولادها بر روی قسـمتی از منحنی آهن ـ کربن نشـان داده شـده اسـت. و همچنین از جداول اسـتاندارد نیـز بـرای محاسـبه دمـای آسـتنیته‌کردن اسـتفاده می‌شـود. جـدول ۱ دمـای آسـتنیته‌کردن فولادهای کربنـی بـرای فرآینـد نرماله را نشـان می‌دهد.



شکل ۸ــ محدوده 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	
	سانتی گراد	فارنهایت
۱۰۱۵	۹۱۵	۱۰۱۵
۱۰۲۵	۹۰۰	۱۶۵۰
۱۰۴۰	۸۶۰	t= ۶۰ +D
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 فرآیند نرماله یک ساعت به ازای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت می‌باشد و همچنین می‌توان به‌صورت تقریبی از رابطه ی زیر زمان نگهداری در کوره را به‌دست آورد.

که t زمان نگهداری بر حسب دقیقه می‌باشد و D بیشترین قطریا ضخامت قطعه می‌باشد.

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

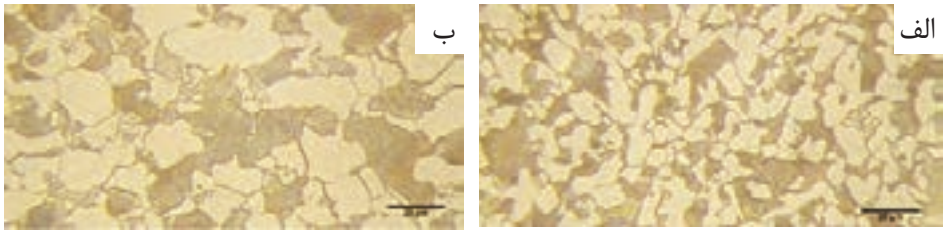
شکل ۹ـ خارج کردن قطعات از کوره و سرد شدن در هوای ساکن

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 درجه سانتی‌گراد 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 می‌باشند بنابراین در مقایسه با خواص حاصل از فرآیند آنیل‌کردن، استحکام و سختی افزایش یافته و انعطاف‌پذیری تا حدودی کاهش می‌یابد. در جدول زیر سختی فولادهای کربنی را در سه حالت نورد گرم، آنیل و نرماله نشان می‌دهد. همان‌طور که ذکر شد سختی در فرآیند آنیل کمتر از فرایند نرماله می‌باشد.

جدول۲ـ سختی فولادهای کربنی در سه فرآیند، 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 درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱ ساعت نگهداری شده و سپس یک نمونه در کوره و نمونه دیگر در هوا خنک گردیده است. نمونه آنیل که در کوره سرد شده دارای دانه‌های درشت تر و پرلیت خشن‌تری می‌باشد.



شکل ۱۰ـ تصاویری از فولاد Ck۴۵ تحت عملیات (الف) نرماله و (ب) آنیل

فعالیت کارگاهی ۵

نرماله‌کردن فولاد

وسایل مورد نیاز:

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

نمونه مورد آزمایش: قطعات فولاد کربن متوسط (CK۴۵)

مراحل انجام آزمایش:

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

۱ سختی نمونه شاهد را با استفاده از سختی سنج اندازه گرفته و یادداشت نمایید و ریز ساختار آن را در جدول ترسیم نمایید.

- **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 نمایید.
- حتماً از محافظ صورت، کلاه و عینک ایمنی، دستکش مخصوص و در مواقعی که با فلز داغ کار می‌کنید از لباس ضد آتش استفاده نمایید.

۲ کوره را روشن کرده به دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم نمایید.

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 نمایید و ریز ساختار آن را در جدولی ترسیم نموده و به همراه پاسخ سئوالات 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 می‌نمایید؟
- 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 در کوره ۳ـ زمان نگهداری قطعات در 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 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 غیر فنی، ایمنی، بهداشت، توجهات زیست‌محیطی و نگرش: ۱ـ رعایت قواعد و اصول در مراحل کار ۲ـ مسئولیت‌پذیری ۳ـ مدیریت مواد و تجهیزات ۴ـ استفاده از لباس کار نسوز، دستکش نسوز، کفش ایمنی و عینک محافظ 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 در کوره ۳ـ زمان نگهداری قطعات در 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 غیر فنی، ایمنی، بهداشت، توجهات زیست‌محیطی و نگرش: ۱ـ رعایت قواعد و اصول در مراحل کار ۲ـ مسئولیت‌پذیری N۷۲ L۲ ۳ـ مدیریت مواد و تجهیزات N۶۶ L۲ ۴ـ استفاده از لباس کار نسوز، دستکش نسوز، کفش ایمنی و عینک محافظ ۵ـ تمیز کردن وسایل و محیط کار	۲	
	میانگین نمرات		*

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