



مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران

تابع سازمان گسترش و نوسازی صنایع ایران

مجموعه ۲: مواد و رفتار آنها در حین جوشکاری



عملیات حرارتی فلزات و مقاطع

جوشکاری شده

مجموعه منابع تخصصی مهندسی جوش



مجموعه منابع تخصصی مهندسی جوش

مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران

مجموعه ۲: مواد و رفتار آن‌ها در حین جوشکاری



جلد ۶: عملیات حرارتی فلزات و مقاطع جوشکاری شده



حق چاپ و تکثیر برای مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران محفوظ می باشد.

مجموعه منابع تخصصی مهندسی جوش

مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران

کمیته راهبری و نظارت :

عباس زارعی هنزکی
فریبا نصرتی
امید گل محله
محمود پارسا
کوروش قدر قدر جهرمی

گروه تدوین و گردآوری :

مسعود وطن آرا
محمد رضا وطن آرا
میثم حق شناس

گروه بازخوانی علمی :

رامز وقار
عباس زارعی هنزکی

پیش‌گفتار

جوشکاری یکی از مهمترین فرایندهای ساخت و تولید در صنعت می‌باشد و در صنایع مختلف نظیر خودرو سازی، نفت و گاز، پتروشیمی، تأسیسات و ساختمان و پل‌ها، حمل و نقل، کشتی سازی، صنایع ریلی، نیروگاه‌ها، صنایع دفاعی و هوا و فضا، محصولات پزشکی، الکترونیکی و تجهیزات دقیق و... کاربردهای فراوانی دارد. کشور ایران در حال پیمودن مسیر توسعه صنعتی بوده و ازین رو صنعت جوش برای کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین آموزش منسجم و هماهنگ با جهان در این صنعت، یکی از نیازهای مهم کشور تلقی می‌گردد.

در طول جنگ جهانی دوم و پس از آن، نظر به افزایش حجم تولیدات و به تبع آن افزایش حجم جوشکاری به عنوان یکی از اصلی‌ترین روش‌های ساخت، با بروز مشکلات متعدد در این زمینه، هر یک از کشورهای صنعتی در کشورهای خود، اقدام به ساماندهی صنعت جوش و برش نمودند که این امر از طریق استاندارد سازی فعالیت‌های جوشکاری صورت گرفت. با توجه به تعدد استانداردها و مشکلات ناشی از آن و نیز روند جهانی شدن بازارها، کشورهای صنعتی اروپایی اقدام به تاسیس مرکزی متشکل از نمایندگان کشورهای خود به عنوان فدراسیون جوش اروپا (EWF)^۱ نمودند. بعدها با حضور نمایندگان کشورهای صنعتی نظیر آمریکا و ژاپن و به دنبال آن کشورهای در حال توسعه، سازمان جدیدی تحت عنوان انستیتو بین‌المللی جوش (IIW)^۲ تاسیس گردید. در حال حاضر انستیتو بین‌المللی جوش در تمام کشورهای عضو از جمله ایران دارای نماینده‌ای می‌باشد. این نماینده علاوه بر وظیفه انتقال مشکلات صنعت جوش و برش در کشور خود، جهت بحث و بررسی و ارائه راه حل و نیز انتقال دانش روز جهان و استانداردهای جدید، وظیفه فراهم سازی امکان بهره‌گیری از سیستم آموزش و تایید کیفی هماهنگ IIW را در کشور خود بر عهده دارد.

مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران (IWREC)، وابسته به سازمان گسترش و نوسازی صنایع ایران در سال ۱۳۷۱ با هدف انجام فعالیت‌های پژوهشی و ارائه خدمات علمی، فنی و مهندسی، مشاوره و آموزش در زمینه‌های جوشکاری، بازرسی و کنترل کیفیت تاسیس گردیده است. این مرکز با اخذ نمایندگی انستیتو بین‌المللی جوش (IIW) و فدراسیون جوش اروپا (EWF) و همچنین به عنوان مرجع ملی اعطای مجوز و اعتبار (ANB)^۳ در ایران و اولین مرکز آموزش معتبر بین‌المللی

۱-European Welding Federation

۲-International Institute of Welding

۳-Authorized National Body

جوش در سطح کشور(ATB)^۱ ، اقدام به چاپ مجموعه کتابهای آموزش تخصصی جوش و برش در سطح مهندسی بین‌المللی جوش(IWE)^۲ نموده‌است.

گردآوری و تالیف این مجموعه کتابها بر اساس راهنمای انستیتو بین‌المللی جوش، در خصوص آموزش‌های هماهنگ جهانی، تحت عنوان ۲۰۰۵ Copyright Rev.۲/۴۰۹ EWF/۲۰۰۰-۰۰۲ Doc.IAB، بوده است و تلاش شده است تا استاندارد آموزشی انستیتو بین‌المللی جوش بر مبنای داشتن خصوصیات زیر در آنها تحقق یابد: ۱- جامع بودن و در بر گرفتن تمامی فعالیتهای صنعت جوش و برش ۲- بر مبنای نظام آموزش هماهنگ جهانی ۳- بهره‌وری بالای آموزش ۴- قابلیت ارزیابی منسجم و هماهنگ.

کتاب حاضر بر اساس مفاد جزوه ۶- ۲ در راهنمای ۲۰۰۵ Rev.۲/۴۰۹ EWF/۲۰۰۰-۰۰۲ Doc.IAB انستیتو بین‌المللی جوش، در خصوص عملیات حرارتی فلزات و مقاطع جوشکاری شده ، تدوین شده است. همچنین مطالبی فراتر از مفاد جزوه مذکور، جهت تکمیل شدن هر چه بیشتر مبحث، در این کتاب ارائه شده است و به‌عنوان مرجعی جامع و معتبر برای تمامی کسانی که در حال گذراندن دوره‌های مختلف جوش می‌باشند، توصیه می‌شود.

بدیهی است پیشنهادات و انتقادات سازنده خوانندگان گرامی، این مرکز را در بهبود هر چه بیشتر این مجموعه یاری خواهد رساند.

۱- Approved Training Body

۲- International Welding Engineer



فهرست مطالب

۱- تاریخچه عملیات حرارتی	۱
۲- روشهای عملیات حرارتی	۲
۱-۲- همگن کردن	۳
۲-۲- آنیل کردن	۴
۱-۲-۲- آنیل کامل	۵
۲-۲- آنیل ایزوترمال	۹
۳-۲- آنیل ناقص	۱۰
۴-۲- آنیل اصلاح	۱۱
۳-۲- نرماله کردن	۱۲
۴-۲- کروی کردن	۱۴
۵-۲- بازیابی و تبلور مجدد	۱۸
۱-۵-۲- بازیابی	۱۹
۲-۵-۲- تبلور مجدد	۲۱
۶-۲- تنش گیری	۲۴
۷-۲- آب دهی یا کوئنچ	۲۵
۸-۲- تمپر کردن	۲۶
۱-۸-۲- تغییرات میکروساختار	۲۷
۲-۸-۲- تغییرات خواص مکانیکی	۳۵
۳-۸-۲- اثرات عناصر آلیاژی	۴۲
۴-۸-۲- نقش آستنیت باقیمانده	۴۹
۵-۸-۲- ارتباط درجه حرارت و زمان بازگشت	۵۲
۶-۸-۲- پدیده تردی	۵۳
۱-۶-۸-۲- تردی مارتنزیت تمپر شده (TME)، تردی 350°C ، (تردی 500°F)	۵۵
۲-۶-۸-۲- تردی باز گشتی	۵۷
۳-۶-۸-۲- تردی نیتريد آلومینیم	۵۹
۹-۲- رسوب سختی	۶۰
۱-۹-۲- محلول جامد	۶۰



- ۶۱ ۲-۹-۲- حد حلالیت
- ۶۳ ۳-۹-۲- رسوب گذاری محلول جامد
- ۶۶ ۴-۹-۲- تأثیر رسوب گذاری بر خواص
- ۶۸ ۳- راههای جلوگیری از تغییر شکل، ترک برداشتن و یا ایجاد تنشهای داخلی در ضمن عملیات حرارتی
- ۶۹ ۱-۳- کنترل سرعت حرارت دادن
- ۷۱ ۲-۳- روش های سرد کردن کنترل شده
- ۷۲ ۱-۲-۳- مارتمپرینگ
- ۷۴ ۲-۲-۳- آستمپرینگ
- ۷۵ ۴- سخت کردن سطحی
- ۷۶ ۱-۴- کربوره کردن
- ۷۸ ۱-۱-۴- کربوره کردن جامد
- ۸۲ ۲-۱-۴- کربوره کردن مایع
- ۸۳ ۳-۱-۴- کربوره کردن گازی
- ۸۵ ۲-۴- نیتريده کردن
- ۸۸ ۳-۴- کربو نیتريده کردن
- ۹۰ ۴-۴- سخت کردن سطحی به کمک عملیات حرارتی موضعی
- ۹۰ ۱-۴-۴- سخت کردن شعله ای
- ۹۳ ۲-۴-۴- سخت کردن القایی
- ۹۶ ۵- عملیات حرارتی مناطق جوش
- ۹۶ ۱-۵- پیشگرم کردن
- ۱۰۱ ۲-۵- روش های پیشگرم کردن
- ۱۰۲ ۳-۵- محاسبه دمای پیشگرم در فولادها
- ۱۰۳ ۱-۳-۵- پیشگرم فولادهای ساده کربنی با کربن متوسط
- ۱۰۳ ۲-۳-۵- پیشگرم فولادهای ساده کربنی پر کربن
- ۱۱۱ ۴-۵- عملیات حرارتی پس گرم
- ۱۱۳ ۱-۴-۵- انواع پس گرم برای تشکیل ساختارهای تعادلی
- ۱۱۳ ۱-۱-۴-۵- تنش زدایی
- ۱۱۷ ۲-۱-۴-۵- همگن سازی



- ۵-۴-۲- عملیات حرارتی برای اصلاح تغییرات ابعادی و تابیدگی ها ۱۱۸
- ۶- محیطهای گرم کننده در عملیات حرارتی ۱۲۳
- ۶-۱- کوره های حمام نمک ۱۲۳
- ۶-۲- کوره های موفلی برقی ۱۲۵
- ۶-۳- کوره ها با اتمسفرهای کنترل شده ۱۲۷
- ۶-۳-۱- گاز خنثی ۱۲۷
- ۶-۳-۲- گاز گرمازا ۱۲۸
- ۶-۳-۳- گاز گرماگیر ۱۲۹
- ۶-۴- کوره های خلاء ۱۳۱
- ۶-۵- کوره های موفلی شعله ای (سوخت مایع و یا گاز) ۱۳۲
- ۷- نکاتی در مورد گرم کردن قطعات ۱۳۳
- ۷-۱- سرعت گرم کردن ۱۳۳
- ۷-۲- زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن ۱۳۵
- ۷-۲-۱- فولادهای ساختمانی کم آلیاژ ساده کربنی ۱۳۶
- ۷-۲-۲- فولادهای ساختمانی با آلیاژ متوسط ۱۳۶
- ۷-۲-۳- فولادهای ابزار کم آلیاژ ۱۳۷
- ۷-۲-۴- فولادهای پرآلیاژ کروم دار ۱۳۷
- ۷-۲-۵- فولادهای گرم کار ۱۳۸
- ۷-۲-۶- فولادهای تندبر ۱۳۸
- ۷-۳- زمان گرم کردن و زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن ۱۳۹
- ۸- محیطهای خنک کننده ۱۴۰
- ۸-۱- آب ۱۴۱
- ۸-۲- روغن ۱۴۱
- ۸-۳- محلول آب و روغن ۱۴۲
- ۸-۴- آب با اضافات مخصوص ۱۴۲
- ۸-۵- هوا ۱۴۳
- ۸-۶- حمام های نمک ۱۴۵
- ۹- مشخصات محیطهای سخت کننده ۱۴۷



۱۴۷	۱-۹- کنترل درجه حرارت.....
۱۴۸	۲-۹- بهمزدن محیط-ایجاد تلاطم در محیط.....
۱۴۸	۱۰- عیوب در قطعات عملیات حرارتی شده.....
۱۵۰	۱-۱۰- ترک خوردگی.....
۱۵۲	۲-۱۰- تغییر شکل و یا تاب برداشتن.....
۱۵۳	۳-۱۰- نواحی پراکنده نرم.....
۱۵۴	۴-۱۰- سختی کم پس از کوئنچ کردن.....
۱۵۵	۱۱- اندازه گیری دما.....
۱۵۵	۱-۱۱- اندازه گیری دما به وسیله رنگ.....
۱۵۶	۲-۱۱- دماسنج های انبساط فلز.....
۱۵۷	۳-۱۱- دماسنج های انبساط مایع.....
۱۵۹	۴-۱۱- دماسنج های فشار گاز یا بخار.....
۱۵۹	۵-۱۱- دماسنج مقاومتی.....
۱۶۰	۶-۱۱- پیرومتر ترموالکتریکی.....
۱۶۳	۷-۱۱- مواد ترموکوپل.....
۱۶۵	۸-۱۱- پیرومتر ثبت کننده و کنترل کننده.....
۱۶۵	۹-۱۱- پیرومتر تشعشعی.....
۱۶۷	۱۰-۱۱- پیرومتر نوری.....
۱۶۹	۱۲- اندازه گیری دما در کارگاه جوشکاری.....
۱۷۱	مراجع.....



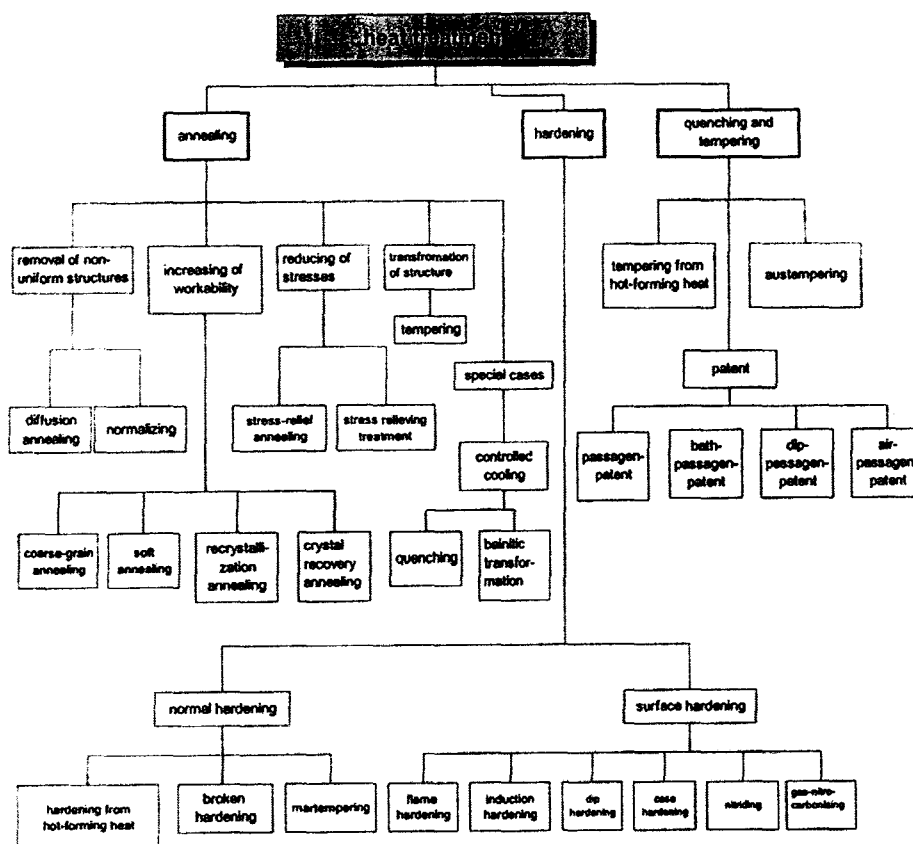
۱- تاریخچه عملیات حرارتی

مشخصات مکانیکی فلزات و آلیاژها با گرم و سرد نمودن آنها تغییر می‌کند. این کار عملیات حرارتی نامیده می‌شود. سخت کردن با آب دادن توسط انسانها از ایام قدیم شناخته شده بود و می‌توان گفت پیشرفت روزافزون صنایع امروزه مرهون کشف فولاد و کاربرد آن در رشته‌های مختلف صنعت در ایام گذشته است. سخت کردن فولاد در گذشته کلاً جهت تهیه شمشیر و اسلحه بکار برده می‌شد. به‌هرحال در رشته عملیات حرارتی تا قبل از قرن نوزدهم، پیشرفت قابل توجهی به چشم نخورده است. بدین دلیل، تکنولوژی عملیات حرارتی مانند ارث از پدر به اولاد منتقل شده و بصورت راز خانواده در چارچوب خانه محبوس می‌گشت. در قرن نوزدهم از این راز پرده برداشته شد و با تکامل جامعه و بررسی و مطالعه تکنولوژی تولیدات فلزی، عملیات حرارتی برای عموم مردم روشن گشت. در این زمان با پیشرفت بررسیهای علمی، رشته متالوگرافی شکوفا شد که در این مقطع زمانی اولین بار دماسنج توسط Le Chatelier فرانسوی بکار برده شد و میکروسکوپ متالورژیکی توسط Sorby انگلیسی کشف گردید و با بکار بردن میکروسکوپ sorby توسط Martin و Osmond کلیه ساختمانهای فولاد شناسایی و دسته بندی شد. در قرن بیستم با کشف میکروسکوپ الکترونی و اشعه X که باعث پیشرفت تئوری و تجربه گردید، چندین آلیاژ مفید برای صنایع کشف گردید. در اثر این پیشرفت، تئوری و روشهای عملیات حرارتی نیز ترقی کرد. هنگام جنگ جهانی اول، کاربرد آلیاژهای کشف شده به حد اعلاي خود رسید و چندین فولاد جدید مورد استفاده قرار گرفته و تولید آنها رو به افزایش نهاده و تکنولوژی عملیات حرارتی در حد چشمگیری توسعه یافته و با کلیه رشته های صنعت ارتباط برقرار کرد [۱]. بطور کلی می‌توان گفت علاوه بر ترکیب شیمیایی و ساختمان اولیه، درجه حرارت و زمان حرارت دادن از جمله فاکتورهای کنترل کننده ساختمان میکروسکوپی و خواص مکانیکی نهایی می‌باشند. از جمله خواص مورد نظر در پی عملیات حرارتی مختلف می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- بهبود انعطاف‌پذیری
 - کاهش تنشهای داخلی و باقیمانده از عملیات قبلی
 - بهبود قابلیت ماشینکاری
 - ایجاد یکنواختی در ساختمان میکروسکوپی
- عملیات حرارتی مورد نظر در چارچوب نمودار تعادلی آهن-کربن و نمودارهای TTT که در فصل آلیاژهای آهن و کربن در کتاب مبانی متالورژی در جوشکاری توضیح داده شده است، تشریح می‌شود [۲].



بر طبق خواص مورد نیاز، می‌توان عملیات حرارتی را بصورت زیر دسته‌بندی کرد:



شکل ۱: دسته‌بندی عملیات حرارتی [۳].

۲- روشهای عملیات حرارتی

در این قسمت، روشهای مختلف عملیات حرارتی با تمرکز بیشتر بر روی عملیات حرارتی فولادها که منجر به تشکیل ساختمانهای میکروسکوپی تعادلی می‌شوند مورد بررسی قرار می‌گیرند. در مورد فولادها این ساختمانها، اغلب شامل فریت و سمنتیت (در مورد فولادهای آلیاژی کاربیدهای آلیاژی هم وجود دارد) ولی با توزیع‌های متفاوت می‌باشند، که در بیشتر موارد به کمک حرارت دادن فولاد



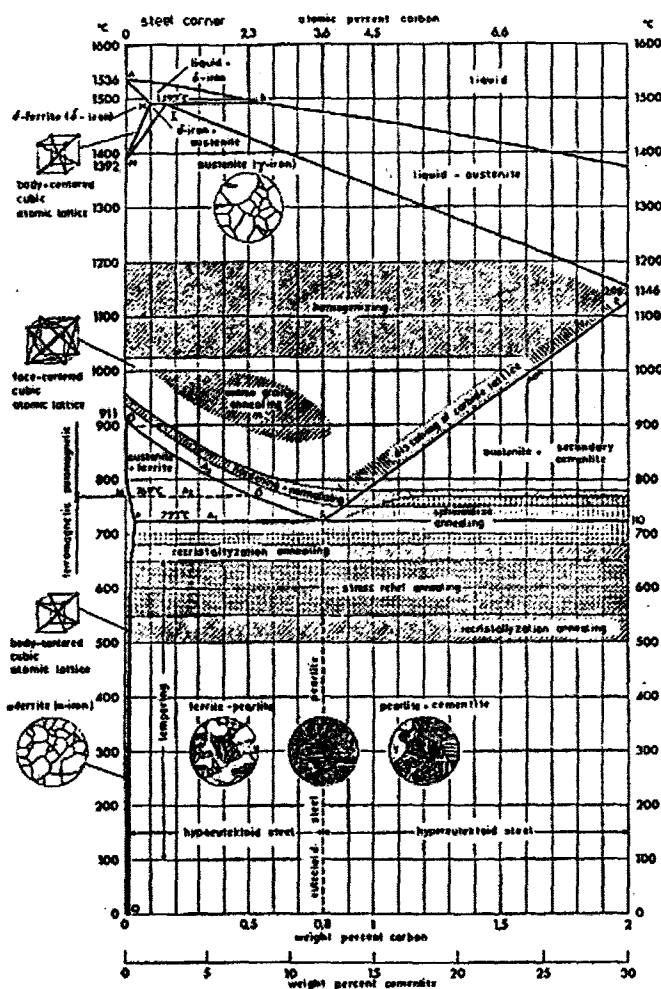
در دماهای نسبتاً بالا و یا برای مدت زمان نسبتاً طولانی و سپس سرد کردن آهسته تا دمای اتاق بدست می‌آیند.

۲-۱- همگن کردن^۱

از جمله مشخصه های فولادهای ریختگری شده می توان به ساختمان دندریتی^۲، جدایش موضعی و ترکیب شیمیایی غیریکنواخت اشاره کرد که پدیده های مزبور که ناشی از غیرتعادلی سرد شدن مذاب و در نتیجه عدم امکان نفوذ کامل می باشند، باعث افت خواص مکانیکی فولاد از جمله قابلیت کارگرم و یا سرد و همچنین کاهش کیفیت شده و برای رفع این نواقص نیاز به عملیاتی دارد که عملیات حرارتی نامگذاری شده است. از اینرو ساختارها و ترکیب شیمیایی فولادهای ریختگری شده باید به کمک عملیات حرارتی مناسب یکنواخت شود. بدین منظور قطعات مورد نظر را در دمای نسبتاً بالا (شکل ۲) برای مدت زمان نسبتاً طولانی (زمان حرارت دادن به ابعاد و ترکیب شیمیایی قطعه بستگی دارد) حرارت داده و سپس به آهستگی تا دمای اتاق سرد می کنند.

این عملیات به همگن (یکنواخت) کردن و یا آنیل نفوذی^۳ موسوم است. از آنجایی که دمای انتخاب شده نسبتاً بالاست، نفوذ سریع بوده و بنابراین پس از پایان عملیات، غیر یکنواختی ساختمان میکروسکوپی و ترکیب شیمیایی از بین می رود. بعلاوه، فازهای ثانویه نظیر کاربیدهای راسب شده در جریان انجماد مجدداً در آستنیت حل شده و بصورت محلول درمی آیند. همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، دامنه حرارتی همگن کردن و کارگرم بر یکدیگر منطبق می باشند [۲].

۱-Homogenising
۲-Dendritic Structure
۳-Diffusion Annealing



شکل ۲: ناحیه ای از نمودار تعادلی آهن-کربن همراه با مناطق حرارتی مربوط به همگن کردن، آنیل کردن، نرماله کردن، تنش زدایی را نشان می‌دهد [۳].

۲-۲- آنیل کردن

لغت آنیل^۱ دارای معنی و مفهوم وسیعی است: بدین صورت که به هر نوع عملیات حرارتی که منجر به تشکیل ساختمان غیرمارتنزیتی با سختی کم و انعطاف‌پذیری بالا شود، اطلاق می‌گردد. از آنجایی که این مفهوم بسیار کلی است، عملیات حرارتی آنیل به یک سری فرآیندهای

۱-Annealing



مشخص و دقیق تقسیم می‌شود. این نوع تقسیم بندی براساس درجه حرارت عملیات، روش سرد کردن و ساختمان و خواص نهایی انجام می‌پذیرد.

۲-۱-۲- آنیل کامل

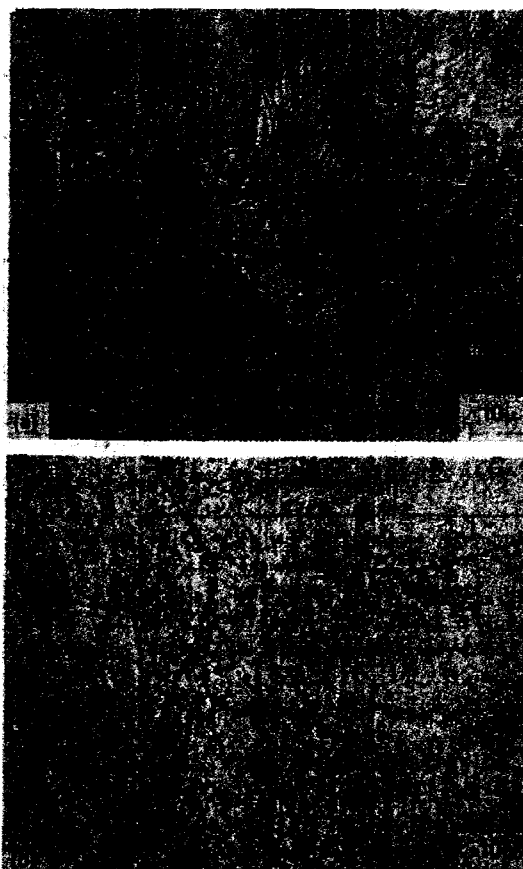
آنیل کامل^۱ عبارتست از حرارت دادن فولاد در منطقه حرارتی نشان داده شده در شکل ۲ و سپس سرد کردن آهسته، معمولاً در کوره، تا اینکه آستنیت کاملاً تجزیه شود. تحت شرایط فوق، سرعت سرد شدن در حدود ۰/۰۲ درجه سانتیگراد بر ثانیه می‌باشد. دامنه حرارتی آستنیت کردن در آنیل کامل (برای فولاد های هیپوئوتکتوئید حدود ۵۰-۳۰ درجه سانتیگراد بالای A_{Cr} و برای فولادهای هیپروئوتکتوئید بالای A_{C1}) تابع درصد کربن فولاد می‌باشد. دماهای بحرانی نامبرده تا حدودی تحت تاثیر عناصر آلیاژی در فولادها تغییر می‌کند. بنابراین بطور کلی در عملیات حرارتی آنیل کامل، فولادهای هیپوئوتکتوئید را در منطقه تک فازی آستنیت و فولادهای هایپروئوتکتوئید را در منطقه دو فازی آستنیت-سمنتیت حرارت می‌دهند. علت آستنیت کردن فولادهای هایپروئوتکتوئید در منطقه دوفازی آستنیت-سمنتیت این است که سمنتیت پروئوتکتوئید در فولاد مزبور بصورت کروی و مجتمع شده درآید. اگر چنین فولادی تا بالای A_{cm} حرارت داده شود در ضمن آهسته سرد شدن، سمنتیت پروئوتکتوئید بصورت شبکه پیوسته ای در مرزدانه‌های آستنیت رسوب می‌کند و در نتیجه منجر به ترد و شکننده شدن فولاد می‌شود. شکل ۳(a) شبکه پیوسته کاربید در فولاد مقاوم به سایش SAE ۵۲۱۰۰ که دارای ۱ درصد کربن و ۱/۵ درصد کروم است را نشان می‌دهد. شکل ۳(b) نشان می‌دهد که در فولاد با ساختمان میکروسکوپی نظیر شکل ۳(a) شکست در آزمایش ضربه در امتداد شبکه پیوسته کاربید که در مرزدانه‌های آستنیت اولیه تشکیل شده پیشرفت کرده است. در شکل ۳(b) فولاد از منطقه تک فازی آستنیت تا بالای خط A_1 آهسته سرد شده و سپس کوئنچ شده است. بنابراین ساختمان نهایی شامل مارتنزیت در جوار شبکه بسته کاربید در مرزدانه‌های آستنیت اولیه می‌باشد. اگر فولاد مزبور به جای کوئنچ شدن تا زیر خط A_1 آهسته سرد شود، ساختمان نهایی شامل شبکه پیوسته کاربید در مرزدانه‌ها و پرلیت خشن، در داخل دانه‌ها خواهد بود (شکل ۴(a)). به بیان دیگر، در داخل دانه‌ها به جای مارتنزیت، پرلیت تشکیل می‌شود. بنابراین در عملیات حرارتی آنیل کامل، هدف از آستنیت کردن فولادهای هایپروئوتکتوئید در منطقه دو فازی آستنیت-سمنتیت، عبارتست از شکستن شبکه پیوسته کاربید فوق الذکر و تبدیل آن به ذرات ریز و کروی شکل مجزا از

۱- Full Annealing

یکدیگر، نیروی محرکه در این عملیات عبارتست از کاهش انرژی فصل مشترک آستنیت-کاربید. شکل (a) ۴، شبکه پیوسته سمنتیت پرویوتکتونید در فولاد SAE ۵۲۱۰۰ بطور جزئی کروی شده است را نشان می‌دهد.



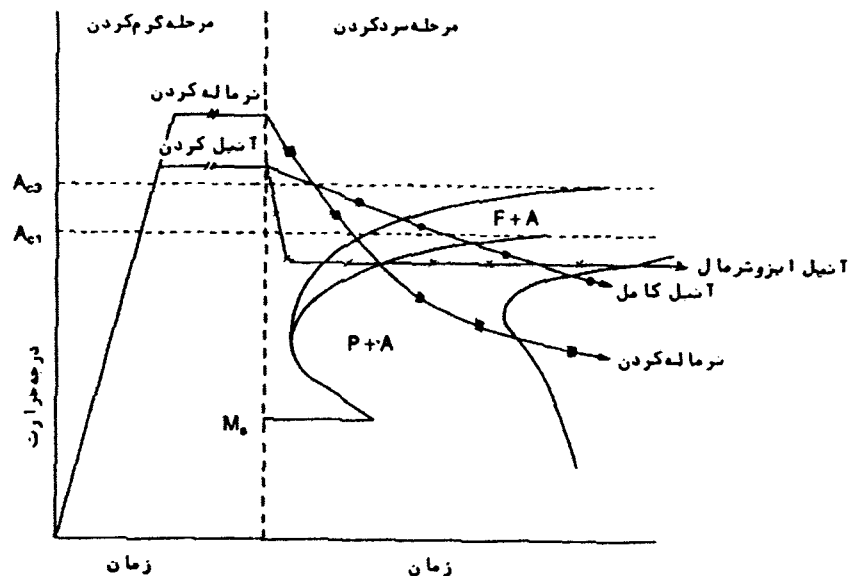
شکل ۳: (a) شبکه کاربید در مرزدانه‌های آستنیت اولیه در فولاد ۵۲۱۰۰. تصویر میکروسکوپی نوری، محلول اچ: نایتال، بزرگنمایی: ۶۰۰X
(b) شکست در امتداد کاربیدهای تشکیل شده در مرزدانه‌های آستنیت در فولاد ۵۲۱۰۰. تصویر میکروسکوپی الکترونی، بزرگنمایی ۴۱۵X [۲].



شکل ۴: (a) سمنتیت پرویوتکتوئید در فولاد ۵۲۱۰۰ نرماله شده، (b) سمنتیت پرویوتکتوئید مربوط به تصویر a پس از اینکه فولاد به منظور سخت شدن در ۸۵۰ درجه سانتیگراد آستنیت شده باشد. در این شکل ذرات بسیار ریز، سمنتیت مربوط به پرلیت اولیه بوده که کروی شده‌اند. علامات پیکان دانه‌های ریز آستنیتی را نشان می‌دهد که در ضمن آستنیت کردن در ۸۵۰ درجه سانتیگراد بوجود آمده‌اند [۲].

در عملیات آنیل کامل، نه تنها درجه حرارت آستنیت کردن بلکه سرعت سرد شدن نیز از اهمیت ویژه ای برخوردار است. منحنی شکل ۵ بطور شماتیک مراحل گرم و سرد شدن عملیات مزبور را برای یک فولاد هیپویوتکتوئید بر روی یک سری محورهای درجه حرارت-زمان و منطبق بر نمودار فرضی CT این فولاد نشان می‌دهد. سرد کردن آهسته که معادل سرد شدن در کوره است باعث می‌شود که در ضمن عبور از خطوط A_1 و A_2 ابتدا فریت و سپس پرلیت از آستنیت بوجود آید. به علت سرد شدن آهسته، فریت تشکیل شده دارای دانه‌های درشت و هم محور بوده و پرلیت دارای فاصله بین

لایه‌ای نسبتاً زیاد (پرلیت خشن یا درشت) می‌باشد. از جمله مشخصه‌های مکانیکی ساختمان میکروسکوپی فوق عبارتست از سختی و استحکام کم و انعطاف پذیری زیاد.



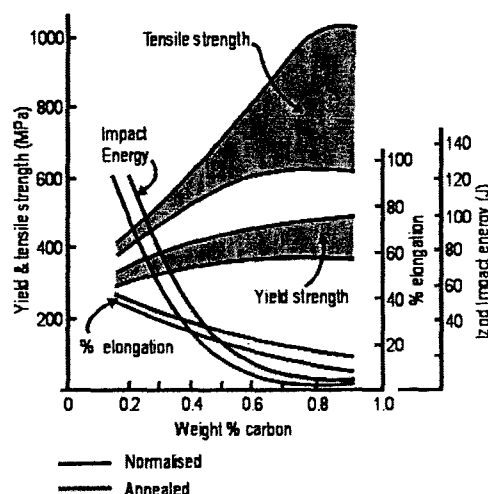
شکل ۵: نمایش شماتیک تغییرات درجه حرارت-زمان برای عملیات نرماله کردن، آنیل کامل و آنیل ایزوترمال [۲].

آنیل کامل بخصوص بر روی قطعات ذوب شده و آهنگری شده انجام می‌گیرد. همچنین به منظور کم کردن سختی شمش‌های فولاد آلیاژی و آسان نمودن برداشت لایه اکسید شده فولاد قبل از نورد، آن را تحت آنیل کامل قرار می‌دهند. آنیل کامل باعث تغییر ویژگی‌های مکانیکی گردیده و در عین حال، اختلاف ویژگی‌های مکانیکی را در طول و عرض محصول نورد شده کم می‌کند.

شکل ۶، اثر آنیل کامل را روی خواص مکانیکی فولاد نورد شده به ازای تغییرات درصد کربن نشان می‌دهد. بطور کلی برای انجام یک آنیل کامل و دستیابی به قابلیت تراشکاری خوب قطعه، لازم است دو قاعده عمومی زیر رعایت شود:



- هرچه مقدار کربن فولاد بیشتر باشد، باید درجه حرارت آنیل کامل به فاصله کمتری بالای A_{C1} انتخاب شده و زمان گرم کردن فقط به اندازه‌ای که برای ایجاد محلول جامد در تمام حجم قطعه کافی است در نظر گرفته شود.
- سرعت سرد شدن قطعه به ترکیب شیمیایی آن بستگی داشته و هرچه مقدار کربن فولاد بیشتر باشد، باید به همان نسبت آرامتر سرد شود [۲ و ۴ و ۵].



شکل ۶: اثر آنیل کامل روی خواص مکانیکی فولاد کربنی بر حسب مقدار درصد کربن [۴].

۲-۲-۲- آنیل ایزوترمال

این عملیات شامل حرارت دادن فولاد در دو دمای مختلف است: ابتدا عملیات آستنیت‌سازی کردن که در همان دما به حرارتی مربوط به آنیل کامل انجام می‌گیرد و سپس سرد کردن تا درجه حرارت استتال (زیر خط A_1) و نگه داشتن در آن دما به مدت کافی جهت انجام استتال. پس از پایان استتال فولاد را با هر سرعت دلخواهی می‌توان سرد کرد. منحنی شکل ۵ بطور شماتیک مراحل گرم و سرد شدن را در عملیات آنیل ایزوترمال^۱ برای یک فولاد هیپوئوتکتوئید نشان می‌دهد. زمان لازم برای آنیل ایزوترمال در مقایسه با آنیل کامل به مراتب کمتر است، در حالیکه سختی نهایی بیشتر می‌باشد. همانند آنیل کامل، ساختمان میکروسکوپی حاصل از آنیل ایزوترمال در فولادهای هیپوئوتکتوئید، یوتکتوئید و هایپروئوتکتوئید به ترتیب عبارتست از فریت-پرلیت، پرلیت و

۱-Isothermal Anneal



پرلیت - سمنتیت با این تفاوت که پرلیت حاصل نسبتاً ظریف تر و درصد فریت و سمنتیت پرویوتکتوئید تا حدی کمتر است. از جمله موارد عمده کاربرد آنیل ایزوترمال در رابطه با فولادهای آلیاژی که دارای سختی پذیری^۱ بالایی هستند، می باشد. در صورتی که بر روی اینگونه فولادها عملیات حرارتی آنیل کامل انجام گیرد، به علت سختی پذیری زیاد، ساختمان نهایی حاصل، به جای پرلیت درشت، ممکن است پرلیت ریز و یا حتی مخلوطی از پرلیت و بینیت بالایی باشد.

آنیل ایزوترمال در ضمن مراحل ساخت قطعات فولادی نیز مورد استفاده قرار می گیرند. اگر یک شمش ریختگری یا نورد شده از جنس فولاد آلیاژی سخت شونده در هوا را از منطقه آستنیت تا درجه حرارت اتاق در هوا سرد کنیم احتمال تشکیل ترکهای سطحی بر روی آن زیاد است. این پدیده به هنگام مارتنزیت شدن مغز قطعه و در نتیجه اعمال تنش کششی (ناشی از انبساط) بر روی سطح آن که قبلاً مارتنزیت و سخت شده است اتفاق می افتد. از اینرو به منظور جلوگیری از ایجاد ترکهای سطحی، شمشهای گرم را در کوره های آنیل ایزوترمال در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد نگهداری می شود تا استحاله آستنیت به پرلیت بطور کامل انجام شود. از این پس سرعت سرد شدن اثر چندانی بر ساختمان و خواص نهایی نخواهد داشت. با اینحال پس از پایان استحاله، قطعات معمولاً در هوا سرد می شوند [۴۲].

۲-۲-۳- آنیل ناقص^۲

این نوع آنیل در درجه حرارتی انجام می شود که از حرارت لازم برای آنیل کامل کمتر (فقط کمی بالاتر از A_{C1}) می باشد. برای فولادهای هیپویوتکتوئید این آنیل به منظور حذف تنشهای داخلی و اصلاح قابلیت ماشینکاری فولاد صورت می گیرد. با این وجود، در این حالت تبلور مجدد فولاد بطور جزئی در اثر دگرگونی پرلیت به آستنیت رخ می دهد ولی فریتهای اولیه وارد محلول جامد نشده و تبلور مجدد نمی یابند.

امتیاز این نوع آنیل، کم کردن اکسیداسیون سطحی قطعه می باشد که با افزایش درجه حرارت، اکسیداسیون می تواند عمیقتر گردد. هنگامی یک قطعه را تحت آنیل ناقص قرار می دهند که شکل دهی قبلی آن قطعه در گرما بطریق مناسبی انجام شده و کار سرد روی آن در حد بحرانی نباشد تا در اثر آنیل درشت شدن دانه ها و در نتیجه ساختار ویدمن اشتاتن حاصل نشود.

۱- Hardenability

۲- Intercritical Annealing



در مورد فولادهای هایپرپوتکتوئید آنیل ناقص اغلب بجای آنیل کامل بکار می‌رود. گرم کردن این فولادها تا بالای A_{C1} عملاً موجب تبلور مجدد می‌گردد. در این حالت آنچه که خیلی مورد توجه قرار دارد، این است که آنیل ناقص شکل کروی پرلیت را تغییر نمی‌دهد و حتی باعث تبدیل پرلیت تیغه‌ای به کروی می‌گردد [۴].

۲-۴- آنیل اصلاح

آنیل اصلاح^۱ شامل گرم کردن قطعه تا زیر درجه حرارت دگرگونی می‌باشد. این نوع آنیل به اندازه آنیل کامل موجب نرم شدن قطعه نمی‌شود ولی در بعضی موارد اجرای این آنیل برای نرم کردن قطعه ترجیح داده می‌شود. همچنین گاهی از اوقات که بدست آوردن سختی بیشتری از سختی مربوط به حداکثر نرمی ضروری باشد، این نوع آنیل انجام می‌گیرد. در این حالت استحکام قطعه بهتر بوده و این امکان را به وجود می‌آورد که سطح قطعه پس از ماشینکاری، به حالت صیقلی و بدون کنده شدن فلز و ایجاد شیارهای عمیق بدست آید.

از سوی دیگر، هنگامی که مثلاً فولادهای سمانتاسیون تا بالای درجه حرارت دگرگونی گرم می‌شوند، هر قدر سرعت سرد کردن آرام و حتی در صندوق سمانتاسیون انجام گیرد به علت بالا بودن کربن سطحی، سختی در سطح قطعه بوجود می‌آید. بدین ترتیب هر بار که قطعه باید بین مرحله سمانتاسیون و آبدهی مورد ماشینکاری قرار گیرد، ضروری است که آنرا با گرم کردن طولانی به مدت ۶ تا ۸ ساعت در ۶۸۰-۶۵۰ درجه سانتیگراد یعنی در زیر دمای استحال مورد اصلاح قرار داد، این نوع آنیل تنها راه برای نرم کردن لایه سمانته شده است که در آن به دلیل وجود کربن اضافه حاصل از سمانتاسیون، کاربیدهای مرکب از عناصر مختلف تشکیل شده است. همچنین قطعاتی که از فولاد Self-Quench ساخته شده اند و نیز با گرم کردن طولانی در محدوده دمایی ۶۸۰-۶۵۰ درجه سانتیگراد آنیل می‌شوند، زیرا در صورتی که دما از درجه حرارت استحال فازی فراتر رود، هر قدر سرد کردن آرام باشد باز هم موجب کوئنچ شدن قطعه می‌گردد. هنگامی که یک فولاد Self-Quench در اثر چکش کاری به شدت تحت کار سرد قرار گیرد یا در اثر کوئنچ شدن به شدت سخت شود برای بدست آوردن نرمی لازم، باید قطعه را دوباره تحت آنی اصلاح قرار داد [۴].

۱-Subcritical or Regeneration Annealing



۲-۳- نرماله کردن

نرماله کردن^۱ یکی دیگر از انواع روشهای عملیات حرارتی است که ساختمان میکروسکوپی حاصل همانند آنیل کردن شامل پرلایت، مخلوطی از پرلایت و فریت و یا مخلوطی از پرلایت و سمنتیت (بسته به ترکیب شیمیایی فولاد و کربن آن) می باشد. با این وجود تفاوت های مهمی بین نرماله کردن و آنیل کردن وجود دارد: در نرماله کردن درجه حرارت آستنیتیزه کردن برای فولادهای هیپویوتکتوئید کمی بالاتر از دامنه حرارتی مربوط به آنیل کردن است. در حالیکه برای فولادهای هایپریوتکتوئید از دامنه حرارتی در حدود ۵۰ درجه سانتیگراد بالای A_{cm} استفاده می شود (شکل ۲). برخلاف آنیل کامل که فولاد در کوره سرد می شود، در عملیات نرماله کردن، قطعات پس از آستنیتیزه شدن در هوا سرد می شوند (شکل ۵). تحت شرایط فوق سرعت سرد شدن در حدود ۰/۱ تا ۱ درجه سانتیگراد بر ثانیه خواهد بود [۲].

از آنجائیکه در نرماله کردن فولادهای هیپویوتکتوئید دامنه حرارتی آستنیتیزه کردن بالاتر از منطقه حرارتی مربوط برای آنیل می باشد، ساختمان آستنیت و همچنین توزیع عناصر آلیاژی از یکنواختی بیشتری برخوردار است. یکی دیگر از اهداف مهم نرماله کردن عبارتست از ریز کردن دانه های درشتی که اغلب به هنگام کارگرم در درجه حرارت بالا و یا در ضمن ریختگری و انجماد بوجود آمده است. هنگامی که قطعه کارگرم یا ریختگری شده با دانه های درشت در دمایی بین A_{c1} و A_{c2} قرار گیرد، دانه های جدید آستنیت جوانه زده و رشد می کنند. در صورتیکه درجه حرارت آستنیتیزه کردن به دامنه حرارتی نشان داده شده در شکل ۲ محدود شود، ساختمان آستنیت همگن با دانه های ریز بوجود می آید. حرارت دادن در دماهای بالاتر از گستره دمایی یاد شده ممکن است منجر به درشت شدن دانه شود. بنابراین در عملیات نرماله کردن فولادهای هیپویوتکتوئید، ابتدا ساختمان آستنیتی همگن با دانه های ریز بوجود می آید که در اثر سرد شدن در هوا به فریت و پرلایت تبدیل می شوند. از نظر خواص مکانیکی، ساختمان میکروسکوپی حاصل از نرماله کردن می تواند در برخی موارد بعنوان عملیات حرارتی نهایی منظور گردد. در مواردی که منظور سخت کردن قطعاتی باشد که دارای دانه های درشت هستند، از نرماله کردن به عنوان عملیات حرارتی اولیه جهت ریز کردن دانه ها استفاده می شود.

برای نرماله کردن فولادهای هایپریوتکتوئید از دامنه حرارتی بین خط A_{cm} و حدود ۵۰ درجه سانتیگراد بالای آن استفاده می شود. منطقه حرارتی فوق به منظور ریز شدن دانه های آستنیت، انحلال

۱-Normalizing



کاربیدهای راسب شده و همچنین شکسته شدن شبکه پیوسته کاربیدی است که احتمالاً در ضمن عملیات قبلی در مرزدانه‌ها بوجود آمده است. از آنجائیکه در نرماله کردن، قطعات از بالای درجه حرارت A_{Cm} در هوا سرد می‌شوند، احتمال تشکیل مجدد شبکه پیوسته و ممتد کاربید در مرزدانه‌های آستنیت وجود دارد. در این صورت ساختمان میکروسکوپی حاصل ممکن است تا حدودی فولاد را ترد و شکننده کند. با این وجود، اگر قرار باشد که فولاد مزبور سخت شود، در ضمن آستنیت شدن مجدد (به منظور سخت کردن) شبکه پیوسته و ممتد کاربید شکسته شده و ذرات مجتمع و کروی کاربید به دست می‌آید.

از آنجائیکه در نرماله کردن، قطعات در هوا سرد می‌شوند ساختمانهای میکروسکوپی به دست آمده، اختلاف قابل توجهی با ساختارهای میکروسکوپی حاصل از آنیل دارند. شکل ۵، بطور شماتیک دامنه‌های حرارتی مربوط به استحاله آستنیت به مخلوط فریت و پرلیت را برای فولاد هیپوئوتکتوئید در عملیات آنیل و نرماله کردن نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در نرماله کردن فریت و پرلیت در دمایی پائینتر و با سرعتی بیشتر از آنیل کردن تشکیل می‌شوند، اندازه دانه‌های فریت و فاصله بین لایه‌ای پرلیت هر دو کاهش می‌یابند. بنابراین در مقایسه با خواص حاصل از فرآیند آنیل، استحکام و سختی افزایش یافته و انعطاف‌پذیری تا حدودی کاهش می‌یابد.

نکته‌ای که باید در رابطه با سرد شدن قطعات در هوا در ضمن نرماله کردن بدان توجه داشت این است که نقاط مختلف در داخل یک قطعه با سرعت‌های متفاوت سرد می‌شوند. همچنین سرعت‌های سرد شدن یاد شده، با تغییر ابعاد قطعه تغییر می‌کند. بدین صورت که هرچه قطعه حجیم‌تر باشد سرعت سرد شدن قطعه و نیز سرعت‌های سرد شدن نقاط مختلف در داخل آن کمتر است. این موضوع به مقدار حرارتی که باید از داخل قطعه به خارج هدایت شود، مربوط می‌شود در حقیقت هرچه قطعه حجیم‌تر باشد، برای اینکه دمای قسمت مرکزی آن کاهش یابد، به زمان بیشتری نیاز دارد. در اثر ابعاد قطعه بر روی سرعت سرد شدن، دو نتیجه مهم استنتاج می‌شود: در مقاطع خیلی بزرگ، سرعت سرد شدن سطح قطعه ممکن است بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از منطقه داخلی باشد و در نتیجه باعث ایجاد تنش در آن شود. از طرف دیگر در قطعات خیلی کوچک، بخصوص در مورد فولادهای آلیاژی سرد شدن در هوا ممکن است منجر به تشکیل بینیت و یا حتی مارتنزیت به جای مخلوط فریت و پرلیت شود. با توجه به نکته اخیر، توصیه می‌شود که عملیات نرماله کردن بر روی فولادهای آلیاژی اعمال نگردد.

از جمله پارامترهای مهم که بر روی خواص مکانیکی فولادهای نرماله و آنیل شده اثر می‌گذارد درصد کربن فولاد است. هرچه درصد کربن فولاد بیشتر باشد (تا حد یوتکتوئید) پرلیت



بیشتری تشکیل شده و در نتیجه استحکام و سختی فولاد زیادتر و انعطاف‌پذیری آن کمتر خواهد بود.

به منظور محاسبه استحکام کششی (TS) فولادهای ساده کربنی و کم آلیاژ در شرایط نرماله شده از روابط موجودی که در کتابها آمده است می‌توان استفاده کرد. بعنوان مثال یکی از این روابط به شکل زیر می‌باشد:

- برای فولاد نورد گرم شده: $TS = 27 + 56 C_p$
- برای فولاد فورج شده: $TS = 27 + 50 C_p$
- برای فولاد ریختگری شده: $TS = 27 + 48 C_p$

در اینجا C_p که به مجموع پتانسیلهای کربن^۱ موسوم است از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C_p = C[100.5(C-0.2)] + Si \times 0.15 + Mn[0.125 + 0.25(C-0.2)] + P[1.25 - 0.5(C-0.2)] + Cr \times 0.2 + Ni \times 0.1$$

همانگونه که از روابط فوق مشخص است، اثر اندازه و ابعاد قطعه در استحکام کششی در نظر گرفته نشده است [۲].

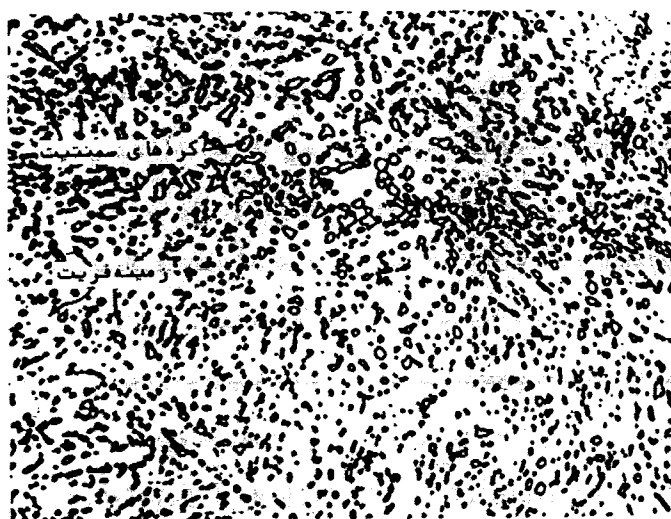
۲-۴-۲- کروی کردن^۲

انعطاف پذیرترین و نرم‌ترین حالت در هر فولاد، مربوط به میکروساختاری شامل سمنتیت کروی توزیع شده بطور یکنواخت در زمینه فریتی می‌باشد. ساختار میکروسکوپی مورد نظر (سمنتیت کروی) در مورد فولاد ۰.۶۶٪C-۱٪Mn در شکل ۷ نشان داده شده است. انعطاف‌پذیری زیاد ساختمان میکروسکوپی مزبور مستقیماً به زمینه کاملاً یکنواخت و پیوسته فریتی مربوط می‌شود. لازم به اشاره است که در پرلیت، لایه‌های سمنتیت باعث ناپیوستگی و تقسیم زمینه فریتی می‌شود که در نتیجه تغییر شکل را بطور موثری کاهش می‌دهد. بنابراین در مقایسه با ساختمان کروی، انعطاف‌پذیری ساختمان پرلیت کمتر و سختی آن بیشتر است. انعطاف‌پذیری 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 از آنجائیکه ساخت قطعات از جنس فولادهای پرکربن

۱-Carbon Potentials
۲-Spheroidizing



اغلب نیاز به ماشینکاری زیاد دارد، سختی کم میکروساختار سمنتیت کروی این فولادها اهمیت قابل ملاحظه ای دارد.

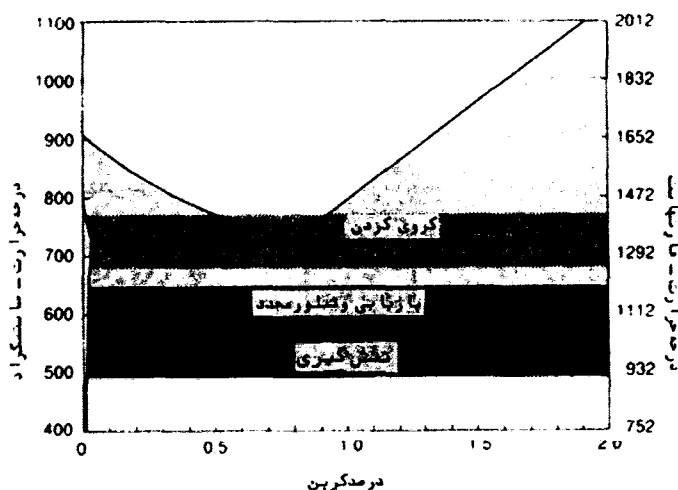


شکل ۷: میکروساختار سمنتیت کروی در فولاد Fe-0.6C-1Mn که با حرارت دادن مارتنزیت به مدت ۲۴ ساعت در ۷۰۴ درجه سانتیگراد (۱۳۰۰ درجه فارنهایت) به دست آمده است. محلول آج: پیکرال، بزرگنمایی ۱۰۰۰X [۲].

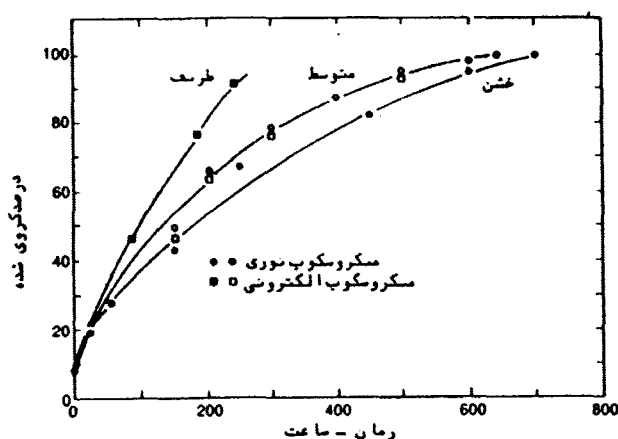
سمنتیت کروی پایدارترین میکروساختار موجود در فولادها است که با حرارت دادن فولاد به مدت زمان مناسب در دامنه حرارتی نشان داده شده در شکل ۸، بدست می‌آید. از آنجائیکه کروی کردن سمنتیت مستلزم نفوذ است درجه حرارت و زمان عملیات باید طوری انتخاب شوند که نفوذ به بهترین وجه انجام گرفته و در نتیجه در کوتاهترین مدت بیشترین درصد سمنتیت کروی شود. سرعت کروی شدن سمنتیت بستگی به ساختمان میکروسکوپی اولیه فولاد و نیز نحوه عملیات حرارتی کروی کردن دارد. از نظر ساختمان میکروسکوپی، پرلیت بیشترین زمان را برای کروی شدن نیاز دارد و در بین ساختمانهای میکروسکوپی پرلیتی، زمان لازم برای کروی شدن به ترتیب از پرلیت درشت به پرلیت متوسط و سپس پرلیت ظریف کاهش می‌یابد (شکل ۹). در حقیقت لایه‌های سمنتیت ابتدا در هم شکسته، به ذرات ریز سمنتیت تبدیل شده و سپس در ادامه عملیات، ذرات ریز به شکل کروی در می‌آید. از اینرو هرچه لایه های سمنتیت درشت تر باشند زمان کروی شدن هم بیشتر است. همانگونه که از شکل ۹ مشخص است، صدها ساعت حرارت دادن در حوالی A_1 لازم است تا اینکه ساختمان میکروسکوپی مربوط به فولاد پرلیتی کاملاً کروی شود. اگر کاربیدهای اولیه به شکل ذرات



ریز و مجزا از یکدیگر (بینیت) باشند، کروی شدن بسیار سریعتر خواهد بود. کروی شدن حتی سریعتر خواهد بود اگر ساختمان اولیه مارتنزیت باشد. در حقیقت در ساختمانهای مارتنزیتی نیازی به شکسته شدن صفحات سمنتیتی و سپس کروی شدن نیست، بلکه کروی شدن بدین صورت است که کربن فوق اشباع در ضمن خروج از شبکه آهن و تشکیل سمنتیت به شکل کروی رسوب می کند [۲].



شکل ۸: بخشی از نمودار تعادلی آهن-کربن همراه با مناطق حرارتی مربوط به کروی کردن، بازریابی و تبلور مجدد [۲]



شکل ۹: پیشرفت عملیات کروی شدن سمنتیت مربوط به پرلیت ظریف، متوسط و خشن، در فولادهای Fe-۰.۷۴C در ۷۰۰ درجه سانتیگراد [۲].



مهمترین روشهای عملیات حرارتی کروی کردن عبارتند از:

- ۱- حرارت دادن فولاد تا درست زیر درجه حرارت Ac_1 نگه داشتن برای مدت زمان کافی جهت کروی شدن و سپس سرد کردن آن در هوا تا درجه حرارت اتاق
 - ۲- حرارت دادن فولاد تا منطقه دوفازی بین Ac_1 و Ac_2 برای فولادهای هیپوئوتکتوئید و یا بین Ac_1 و Ac_{cm} برای فولادهای هایپروئوتکتوئید به منظور آستنیتیزه کردن جزئی، سردکردن آهسته تا زیر درجه حرارت A_{r1} نگه داشتن برای مدت زمان کافی جهت کروی شدن و سپس سردکردن در هوا تا درجه حرارت اتاق
 - ۳- حرارت دادن فولاد تا منطقه دوفازی (بالای دمای Ac_1) و آستنیتیزه کردن جزئی، سردکردن تا زیر درجه حرارت A_{r1} و نگه داشتن برای مدت زمانی در حدود ۳۰ دقیقه، گرم کردن مجدد تا منطقه دوفازی و تکرار عملیات تا اینکه ساختمان میکروسکوپی با سمنتیت کاملاً کروی شده بدست آید. پس از کروی شدن، قطعه را تا درجه حرارت اتاق در هوا سرد می کنند.
- درا اینجا تذکر این نکته ضروری است که پس از پایان سیکل عملیات حرارتی کروی کردن، سرعت سرد شدن تا درجه حرارت اتاق اثری بر روی درصد سمنتیت کروی و یا ساختمان زمینه ندارد. با این وجود، ترجیح داده می شود که قطعات در کوره و یا در هوا سرد شوند. از آنجائیکه در روشهای دوم و سوم فولاد بطور جزئی آستنیتیزه می شود تجزیه و شکسته شدن لایه های سمنتیت تسریع شده و بنابراین انتظار می رود که کروی شدن فولادهای پرلیتی سریعتر از روش اول باشد. در روش سوم، فولاد متناوباً در حوالی درجه حرارت A_{e1} گرم و سرد می شود. در حقیقت هر بار که فولاد به منطقه دوفازی می رسد، عمدتاً لایه های سمنتیت حل شده و با سرد شدن فولاد در زیر درجه حرارت A_{r1} بر کره های سمنتیت افزوده می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که کروی شدن فولادهای پرلیتی توسط روش سوم سریعتر از روش دوم است. علت حل شدن سمنتیت های لایه ای در ضمن گرم کردن و راسب شدن آن بصورت کروی در ضمن سردکردن، به انرژی سطحی آنها مربوط می شود. از آنجائیکه انرژی سطحی لایه ها بیشتر از انرژی آزاد سطحی سمنتیت کروی است، تمایل لایه ها به حل شدن بیشتر بوده و در عوض کره های سمنتیت که پایدارترند، محلهای مناسب برای راسب شدن سمنتیت در ضمن سرد شدن فولاد می باشند [۲].

لازم به اشاره است که در روشهای دوم و سوم، درجه حرارت آستنیتیزه کردن باید به همان دامنه حرارتی کروی کردن که در شکل ۸ نشان داده شده است محدود شود. هرچه درجه حرارت آستنیتیزه کردن پائین تر باشد، میکروساختار آستنیت حاصل غیرهمگن تر و ذرات سمنتیت حل نشده در آن



بیشتر است. از آنجائی که ذرات سمنتیت حل نشده به عنوان جوانه های اولیه برای تشکیل سمنتیت کروی عمل می کنند هرچه تعداد آنها بیشتر باشد (درجه حرارت آستنیتیزه کردن پائین تر باشد) تشکیل ساختمان با سمنتیت کروی سریعتر خواهد بود. همچنانکه در ضمن مطالعات عملیات آنیل و نرماله کردن ملاحظه شد، به علت بالا بودن درجه حرارت آستنیتیزه کردن، ساختمان میکروسکوپی آستنیت حاصل از یکنواختی نسبتاً خوبی برخوردار بوده و عاری از کاربیدهای حل نشده خواهد بود. شرایط فوق تشکیل سمنتیت کروی را محدود و در عوض زمینه را برای تشکیل پرلیت مناسبتر می کند [۲].

از آنجائیکه عملیات کروی شدن مستلزم تجزیه و انحلال جزئی سمنتیت لایه ای و سپس راسب شدن آن بر روی کره های سمنتیت می باشد، نفوذ کربن در فاز فریت نقش مهمی را در این رابطه بازی می کند. بدین صورت که هرچه سرعت نفوذ کربن زیادتر شود، کروی شدن نیز تسریع می شود. بطور کلی، عناصر آلیاژی سرعت نفوذ کربن در فاز فریت را کاهش می دهند، بنابراین، عملیات کروی شدن را به تعویق می اندازند. از آنجائیکه رشد کاربیدهای آلیاژی مستلزم نفوذ عناصر آلیاژی کاربیدزاست و نفوذ این عناصر در مقایسه با کربن بسیار آهسته تر است، بنابراین وجود عناصر آلیاژی کاربیدزا، کروی شدن را بطور قابل ملاحظه ای کاهش می دهد [۵ و ۲].

۲-۵- باز یابی و تبلور مجدد

اعمال کارسرد بر روی فولادها (تقریباً تمامی فلزات و آلیاژها) باعث افزایش استحکام و سختی و کاهش انعطاف پذیری و یا قابلیت تغییر شکل آنها می شود. این پدیده که به کارسختی موسوم است ناشی از افزایش پیوسته معایب کریستالی در اثر ادامه کارسرد می باشد. در اثر کار سرد انرژی داخلی فلز افزایش می یابد و بنابراین از نظر ترمودینامیکی ناپایدار خواهد شد. حرارت دادن چنین قطعه ای باعث از بین رفتن معایب کریستالی موجود و باز یابی میکروساختار و خواص فیزیکی و مکانیکی اولیه می شود. پدیده فوق تحت عنوان باز یابی^۱ و تبلور^۲ مجدد مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته که در اینجا مختصراً شرح داده می شود.

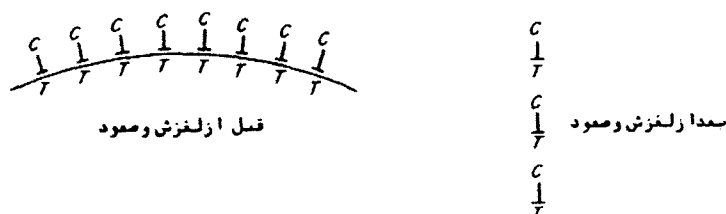
۱-Recovery

۲-Recrystallization

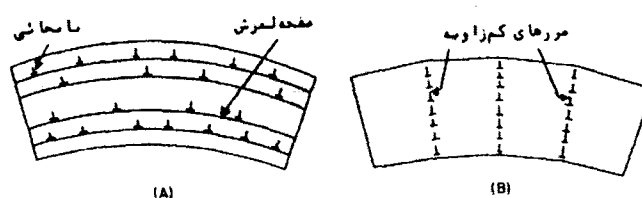


۲-۵-۱- بازیابی

در ضمن عملیات حرارتی بازیابی، تغییرات عمده ای که در ساختمان کریستالی فلز بوجود می‌آید عبارتست از کاهش یا از بین رفتن معایب کریستالی که قدرت تحرک زیاد دارند. در این عملیات معایب نقطه‌ای نظیر جاهای خالی و اتمهای اضافی یکدیگر را خنثی می‌کنند، نابجائیهای پیچی چپگرد و راستگرد و نابجائیهای لبه‌ای مثبت و منفی به ترتیب در همدیگر ادغام شده و حذف می‌شوند. در نتیجه انرژی داخلی کاهش می‌یابد. ادامه عملیات حرارتی بازیابی، توام با لغزش و صعود نابجائیهای باقیمانده (شکل ۱۰) و ردیف قرار گرفتن آنها به نحوی که در شکل ۱۱، نشان داده شده است، می‌باشد [۲].



شکل ۱۰: نمایش شماتیک لغزش و صعود نابجائیها به منظور کاهش انرژی داخلی [۲].



شکل ۱۱: نمایش شماتیک چند وجهی شدن (a) کریستال تغییر شکل داده شده حاوی انبوهی از نابجائیها بر روی صفحات لغزش (b) مرزهای فرعی در کریستال بازیابی شده [۲].

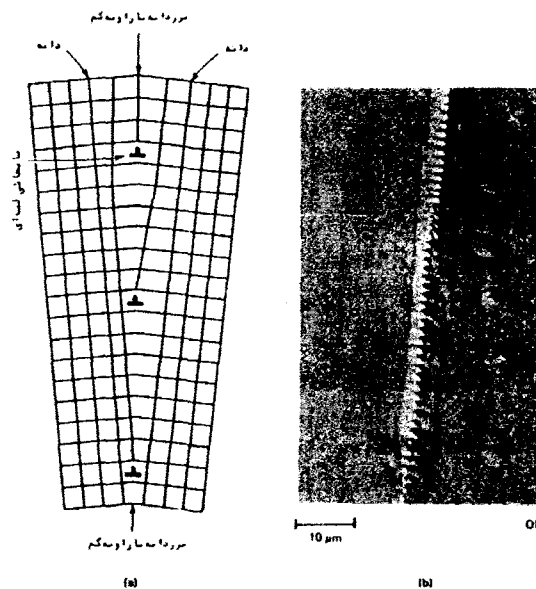
به این ترتیب، مرزهای فرعی^۱ (شکل ۱۱b و شکل ۱۲) تشکیل می‌شوند. تشکیل مرزهای فرعی که به چند وجهی شدن^۲ موسوم است (شکل ۱۱) عملی خودبخود است، زیرا انرژی آزاد داخلی ساختمان میکروسکوپی با دانه‌های فرعی^۳ در مقایسه با قطعه کار سرد شده به مراتب کمتر است. در

۱-Sub Grain Boundary = low-angle grain boundary

۲-Polygonization

۳-Sub grain

حقیقت با ردیف قرار گرفتن نابجائیها در زیر هم (به منظور تشکیل مرزهای فرعی) میدان تنشی کششی هر نابجایی بر میدان تنشی فشاری نابجایی دیگر اثر گذاشته و آنرا کاهش داده و یا خنثی می‌کنند.



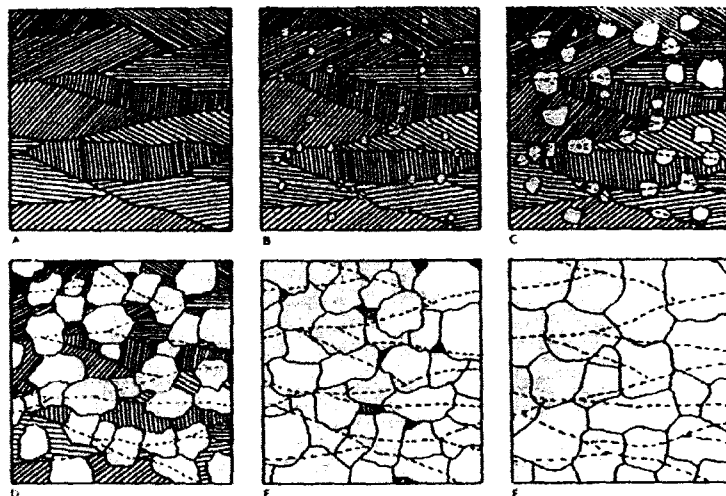
شکل ۱۲: (a) نمایش ردیفی از نابجائیهای لبه ای که باعث انحراف دو قسمت کریستال از یکدیگر شده است (b) مرز فرعی بر روی سطح پولیش و اچ شده کریستال ژرمانیم. مراکز نابجائیها در تماس با محلول شیمیایی اچ بیشتر خورده شده و ردیفی از حفره ها که همان مرز فرعی می‌باشد، را بوجود آورده اند [۲].

بدین ترتیب، بدون آنکه تعداد نابجائیها تغییر کند فقط با آرایش مجدد و مرتب شدن آنها انرژی داخلی کاهش می‌یابد و بنابراین نیروی محرکه در عملیات حرارتی بازیابی همان کاهش انرژی داخلی ناشی از حذف یا آرایش مجدد معایب کریستالی حاصل در ضمن کار سرد می‌باشد. در عملیات بازیابی، خواص فیزیکی تقریباً بطور کامل بازیابی شده و تا حدودی به خواص فیزیکی قطعه قبل از کارسرد بر می‌گردد. درحالیکه، تغییرات خواص مکانیکی چندان محسوس نیست. در حقیقت، عملیات حرارتی تبلور مجدد است که باعث اعاده خواص مکانیکی به قطعه کارسرد شده می‌شود. لازم به ذکر است که تغییراتی که در ساختمان کریستالی در ضمن عملیات بازیابی بوجود می‌آید را نمی‌توان به کمک میکروسکوپ نوری مطالعه کرد و نیاز به میکروسکوپ الکترونی دارد [۲].



۲-۵-۲- تبلور مجدد

از جمله اثرات کار سرد می‌توان به تغییر شکل دانه‌ها در جهت اعمال نیرو (شکل (a) ۱۳) و ایجاد تنشهای داخلی اشاره کرد. در عملیات حرارتی تبلور مجدد، دانه‌های جدید هم محور (شکل (b-f) ۱۳) و عاری از تنش در فلز کارسرد شده بوجود می‌آید. در ضمن این عملیات تغییراتی که در اثر کارسرد در خواص فیزیکی و مکانیکی بوجود آمده از بین می‌رود و قطعه به حالت قبل از کار سرد بر می‌گردد. در حقیقت تبلور مجدد، ادامه عملیات حرارتی بازیابی است و دانه‌های جدید عاری از تنش می‌توانند از دانه‌های فرعی حاصل از عملیات بازیابی بوجود آیند. اساساً فرآیند تبلور مجدد شامل جوانه زنی و رشد است و نیروی محرکه برای این عملیات، کاهش انرژی آزاد حجمی ناشی از کاهش دانسیته نابجائیهایی می‌باشد. از آنجائیکه عملیات حرارتی تبلور مجدد فولادها در منطقه دوفازی فریت - سمنتیت انجام می‌شود، تغییرات ساختمان همراه با تغییرات فاز نخواهد بود. بطور کلی ساختمان میکروسکوپی فولادهای کم کربن و کربن متوسط قبل از کار سرد شامل سمنتیت‌های کروی و یا عمدتاً فریت با مقدار کمی پرلیت می‌باشد که هر دو از انعطاف‌پذیری خوبی برخوردار می‌باشند. فریت موجود در ساختمان فوق، عاری از تنش بوده و دارای دانه‌های هم محور است. کارسرد، دانه‌های فریت را در جهت اعمال کار مکانیکی تغییر شکل داده و معایب کریستالی را در آن افزایش می‌دهد.



شکل ۱۳: مراحل مختلف در تبلور مجدد یک فلز (a) ساختمان میکروسکوپی فلز در شرایط کار سرد شده (b) با تشکیل جوانه‌هایی از دانه‌های هم محور و عاری از تنش، تبلور مجدد شروع می‌شود (c-e) با رشد دانه‌های جدید، تبلور مجدد ادامه می‌یابد (f) تبلور مجدد بطور کامل انجام شده است. خطوط منقطع در شکل f برای نشان دادن موقعیت مرز دانه‌ها در قطعه کار سرد شده می‌باشد [۲].



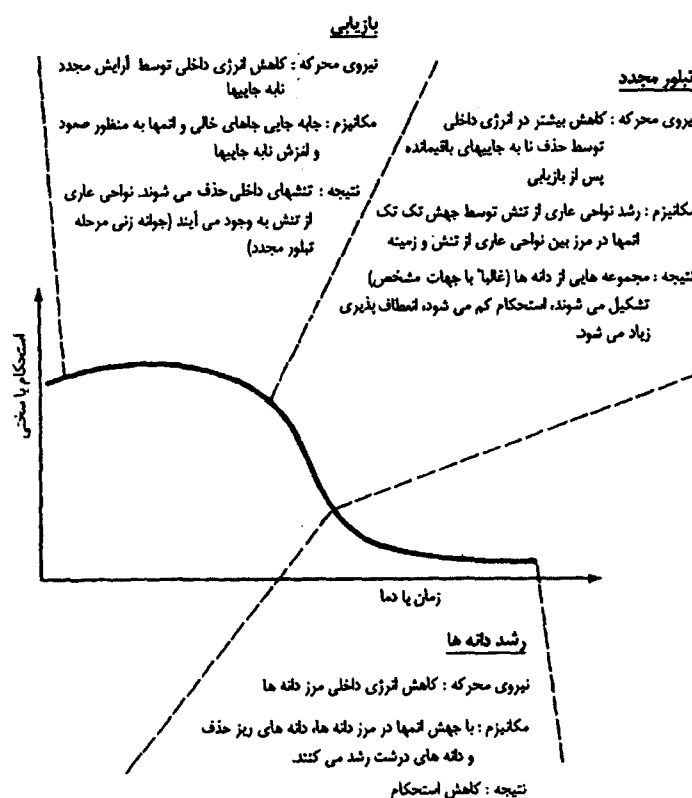
اثر کار سرد بر روی ساختمان میکروسکوپی یک صفحه فولادی کم کربن ($0.003\%C$) پس از ۶۰ درصد کاهش ضخامت در شکل ۱۴(a) نشان داده شده است. در این شکل کشیدگی دانه‌های فریت در جهت نورد و همچنین اثرات تغییر شکل در داخل دانه‌ها بوضوح مشخص است. عملیات حرارتی تبلور مجدد باعث می‌شود که دانه‌های جدید هم محور و عاری از تنش در زمینه فریت تغییر شکل یافته، رشد کند و در نتیجه ساختمان میکروسکوپی اولیه مجدداً بوجود آید. شکل ۱۴(b) میکروساختار فولاد کار سرد شده مربوط به شکل ۱۴(a) را پس از اینکه در دمای ۵۳۸ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت آنیل شده و در حدود ۸۰ درصد تبلور مجدد در آن انجام گرفته است را نشان می‌دهد. همچنانکه ملاحظه می‌شود در این فولاد دانه‌های فریت مجدداً متبلور شده و بصورت هم محور درآمده اند و هیچگونه اثری از کار سرد در این ساختمان دیده نمی‌شود.



شکل ۱۴: (a) ساختمان میکروسکوپی آلیاژها $Fe-0.003\%C$ پس از اینکه به مقدار ۶۰ درصد کار سرد (نورد) بر روی آن انجام شده است. (b) ساختمان میکروسکوپی فولاد (a) پس از اینکه به مدت ۲ ساعت در ۵۳۸ درجه سانتیگراد (۱۰۰۰ درجه فارنهایت) آنیل شده باشد. در شکل b در حدود ۸۰ درصد ساختمان تغییر شکل داده (شکل a) به دانه‌های ریز و هم محور تبدیل شده است. تصویر میکروسکوپی نوری، محلول اچ نتال، بزرگنمایی $100\times$ [۲].



پس از اینکه تبلور مجدد به پایان رسید (ساختار تغییر شکل یافته تماماً توسط دانه‌های هم محور و عاری از تنش جایگزین شد)، اگر باز هم حرارت دادن قطعه ادامه یابد، دانه‌های هم محور شروع به درشت شدن می‌کنند، این عملیات به رشد دانه‌ها^۱ موسوم است و مادامیکه قطعه در دمای بالا قرار دارد، رشد دانه‌ها هم ادامه خواهد داشت. در حقیقت رشد دانه‌ها به این صورت انجام می‌گیرد که با مهاجرت مرزدانه‌ها، دانه‌های ریز به ترتیب به دانه‌های درشت مجاور ملحق می‌شوند. نیروی محرکه یا عامل ترمودینامیکی رشد دانه‌ها همان انرژی مرزدانه‌هاست؛ بدین صورت که با درشت شدن دانه‌ها، مرزدانه‌ها کاهش می‌یابد و بنابراین انرژی داخلی فلز نیز کاهش خواهد یافت. در شکل ۱۵ خلاصه ای از نیروی محرکه، مکانیزم و نتایج حاصل از عملیات بازیابی، تبلور مجدد و رشد دانه‌ها نشان داده شده است [۲].



شکل ۱۵: خلاصه ای از نیروی محرکه، مکانیزم و نتایج حاصل از بازیابی، تبلور مجدد و رشد دانه‌ها [۲].



۲-۶- قنش گیری^۱

برخی از فرآیندهای عملیات حرارتی و یا مکانیکی در قطعات ایجاد تنشهای داخلی می‌کند که می‌تواند مخرب بوده و بر عملکرد قطعات مزبور تاثیر نامطلوب گذارد. 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. از جمله منابع تنشهای داخلی عبارتند از:

۱. غیر یکنواخت سرد شدن نقاط مختلف قطعه در ضمن کاهش دما از منطقه آستنیت. این پدیده به خصوص در رابطه با قطعات حجیم مشاهده می‌شود، به طوریکه حتی ممکن است در چنین قطعاتی که در هوا سرد شده اند نیز تنشهای داخلی بوجود آید. بدین صورت که سطح قطعه که در هوا سرد می‌شود قبل از ناحیه مرکزی به فریت و سمنتیت تبدیل می‌شود. بنابراین به هنگام تغییر فاز منطقه مرکزی، افزایش حجم و یا انبساط ناشی از تشکیل فریت، لایه‌های سطحی تغییر فاز داده و سرد شده را تحت تنش کششی قرار می‌دهند. در صورتیکه این تنش بیشتر از حد تسلیم باشد باعث تغییر شکل پلاستیک و یا حتی شکستن قطعه می‌شود. در عملیات کوئنچ کردن جهت حصول مارتنزیت، پدیده‌ای مشابه ولی در مقیاس وسیعتری وجود دارد، بطوریکه ممکن است در رابطه با مقاطع کوچک نیز منجر به ایجاد تنشهای داخلی و یا حتی شکستن قطعه شود. این مسئله یکی از دلایل اصلی آلیاژ کردن فولادها جهت افزایش سختی پذیری آنها^۲ و در نتیجه به دست آوردن مارتنزیت در سرعتهای سرد کردن آهسته می‌باشد.

۲. ماشینکاری و کار سرد از جمله منابع دیگر ایجاد تنش در فولادهاست. عامل ایجاد تنش در این عملیات، افزایش معایب کریستالی می‌باشد. از طرفی عدم توزیع یکنواخت کارسرد اعمال شده در نقاط مختلف نیز می‌تواند منجر به ایجاد تنشهای داخلی شود.

۳. جوشکاری، عملیات دیگری است که ممکن است منجر به ایجاد تنشهای کششی در قطعه شود. در اینجا نیز منطقه جوش که به حالت مذاب درآمده در ضمن انجماد منقبض می‌شود. از آنجایی که فلز پایه سرد بوده و انعطاف‌پذیری نسبتاً کمی دارد (در مقایسه با فلز منطقه جوش که در دمای بالاتری قرار دارد) در برابر تغییر شکل ناشی از انقباض منطقه جوش مقاومت کرده و منطقه جوش و تا حدودی مناطق مجاور آن را تحت تنش کششی قرار

۱-Stress relieving

۲-Hardenability



می‌دهند. از این رو توصیه می‌شود که در صورت امکان قطعات جوشکاری شده حتماً تنش‌گیری شوند.

برای حذف یا کاهش تنشهای باقیمانده از عملیات قبلی، قطعات مورد نظر را برای زمان مشخص در دمایی زیر درجه حرارت بحرانی A_{C1} حرارت می‌دهند. زمان حرارت دادن بستگی به ابعاد قطعه و درجه حرارت تنش‌گیری دارد. هرچه درجه حرارت تنش‌گیری بالاتر انتخاب شود زمان لازم برای انجام کامل عملیات کمتر است. به منظور جلوگیری از ایجاد تنشهای حرارتی جدید و همچنین احتمال شکستن قطعه در ضمن عملیات حرارتی تنش‌گیری، معمولاً حرارت دادن و یا سرد کردن از دمای تنش‌گیری باید خیلی آهسته انجام گیرد. این موضوع در رابطه با قطعات حجیم و تجهیزات بزرگ جوشکاری شده نیز صادق است.

هدف از عملیات تنش‌گیری این نیست که تغییرات عمده‌ای در خواص مکانیکی قطعه نظیر آنچه در تبلور مجدد مورد نظر است، ایجاد شود، بلکه رفع تنش فقط توسط مکانیزم بازیابی انجام می‌گیرد. عملیات بازیابی همزمان با حرارت دادن و گرم کردن قطعه شروع می‌شود. در یک درجه حرارت ثابت سرعت بازیابی ابتدا زیاد و سپس با گذشت زمان کاهش می‌یابد. از طرف دیگر از آنجایی که در تبلور مجدد نیاز به جوانه زنی می‌باشد، این عملیات خیلی آهسته شروع می‌شود و بنابراین امکان برطرف کردن تنشهای باقیمانده، بدون تغییر قابل توجهی در خواص مکانیکی قطعه وجود دارد. در حقیقت به کمک عملیات تنش‌گیری صحیح، به راحتی می‌توان اثرات زیان‌آور تنشهای کششی سطحی ناشی از کار سرد را کاملاً برطرف کرد، در حالیکه استحکام و سختی قطعه بدون تغییر باقی بماند [۲].

۲-۷- آب دهی یا کوئنچ

سخت کردن یا آب دهی^۱ فولاد، عبارتست از سرد کردن سریع فولاد از دمای آستنیت. محیط‌های سرد کننده می‌تواند آب، روغن، محلول‌های پلیمری و یا نمک باشند؛ گاهی اوقات از هوای فشرده مرطوب نیز استفاده می‌کنند. برای کوئنچ کردن لازم است که قطعه تا بالای دمای استحاله گرم شود و سپس در یکی از محیط‌های سرد کننده نامبرده سرد شود. نتیجه عملیات با پارامترهایی از جمله ترکیب شیمیایی فولاد، ساکن و یا متلاطم بودن محیط سردکننده و درجه حرارت و نوع محیط سردکننده بستگی دارد. به طور کلی عملیات کوئنچ کردن، شامل گرم کردن فولاد در حدود ۳۰ تا ۵۰

۱-Quenching



درجه سانتیگراد بالای A_{C2} (برای فولادهای هیپوئوتکتوئید) و ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد بالای A_{C1} (برای فولادهای هیپریوتکتوئید)، نگهداری در این دما تا پایان استحاله های فازی و پس از آن سرد کردن فولاد با سرعتی بیش از سرعت بحرانی می باشد.

چگونگی گرم کردن نیز در کوئنچ فولادها از اهمیت ویژه ای برخوردار است شیب حرارتی گرم کردن و اتمسفر کوره اثرات قابل توجهی بر روی نتایج به دست آمده دارند. آستنیته کردن فولاد در دمای بیش از حد نیاز باعث کاهش سختی، اکسیداسیون و کربن زدایی سطحی و رشد دانه ها می شود. در گرم کردن همواره باید روشی انتخاب شود که از اکسیداسیون سطحی فولاد جلوگیری شود. این موضوع در مورد فولادهای پرکربن از اهمیت بیشتری برخوردار است؛ زیرا اکسیداسیون کربن را سوزانده و باعث کاهش سختی سطح می شود. از طرف دیگر قشر اکسیدی تشکیل شده مانع از تماس مناسب قطعه با مایع سردکننده شده و کوئنچ نامنظم را موجب می گردد.

معمولاً عملیات کوئنچ کردن یک فرآیند نهایی نیست. برای حذف قابلیت شکنندگی و تنشهایی که در اثر کوئنچ ایجاد می شود و نیز به دست آوردن خواص مکانیکی مورد نظر پس از کوئنچ یک مرحله عملیات بازگشت لازم است [۴].

۲-۸- تمپر کردن

به علت تنشهای داخلی ایجاد شده در ضمن کوئنچ کردن تقریباً تمامی قطعات سخت شده نسبتاً ترد و شکننده می باشند. از اینرو به ندرت فولادها پس از کوئنچ شدن و در شرایط کاملاً سخت شده مورد استفاده قرار می گیرند، مگر در موارد استثنایی نظیر مواقعی که به سختی فوق العاده زیادی نیاز باشد و یا در رابطه با فولادهای کم کربن. معمولاً فولاد پس از کوئنچ شدن و قبل از مورد استفاده قرار گرفتن باید تمپر شود. تمپر کردن^۱ که در فارسی به بازپخت کردن و یا بازگشت دادن نیز خوانده می شود عبارت است از حرارت دادن فولاد سخت شده تا دمایی زیر درجه حرارت A_{C1} ، نگه داشتن برای مدت زمان مشخص و سپس سرد کردن آهسته تا دمای اتاق. درجه حرارت و زمان حرارت دادن به ترکیب شیمیایی فولاد، ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نظر بستگی دارد در اثر تمپر کردن تنشهای داخلی کاهش یافته و یا حذف می شوند و بنابراین انرژی ضربه افزایش می یابد، به عبارتی شکنندگی کاهش یافته و سختی و استحکام قطعه سخت شده تا حدودی کاهش خواهند یافت.

۱-Tempering



۲-۸-۱- تغییرات میکروساختار

ساختمان یک فولاد کوئنچ شده، یعنی مارتنزیت، ناپایدار می‌باشد. دلایل ناپایداری عبارتند از: وجود کربن بصورت فوق اشباع در شبکه کریستالی bcc مارتنزیت، انرژی تنش ناشی از وجود نابجائیها و دوقلوهای بسیار زیاد در ساختمان کریستالی صفحات مارتنزیتی، انرژی سطحی ناشی از فصل مشترکهای بسیار زیاد بین صفحات مارتنزیتی و بالاخره وجود آستنیت باقیمانده که حتی در فولادهای کم کربن نیز اجتناب ناپذیر است. هنگامی که یک فولاد مارتنزیت شده به منظور تمپر شدن حرارت داده می‌شود هرکدام از پارامترهای فوق نقش نیروی محرکه‌ای را برای تغییر ساختار در مراحل مختلف بازی می‌کند، کربن فوق اشباع در شبکه مارتنزیت، نیروی محرکه جهت تشکیل کاربید، انرژی تنش، نیروی محرکه برای بازیابی، انرژی فصل مشترک نیروی محرکه برای رشد دانه‌ها و یا افزایش پیوستگی و وسعت زمینه فریتی و بالاخره آستنیت باقیمانده، نیروی محرکه برای تشکیل مخلوط فریت و سمنتیت در ضمن تمپر کردن می‌باشد.

بررسیهای انجام گرفته سه مرحله کاملاً مشخص و مجزا از یکدیگر در رابطه با تغییر میکروساختار مارتنزیت در ضمن تمپر شدن نشان داده است که عبارتند از:

مرحله اول: تشکیل کاربیدهای انتقالی نظیر کاربید اپسیلون^۱ (ε) و یا کاربید اتا^۲ (η) و در نتیجه کاهش درصد کربن زمینه مارتنزیتی تا حدود ۲۵ درصد.

مرحله دوم: تبدیل آستنیت باقیمانده به فریت و سمنتیت

مرحله سوم: جایگزین شدن کاربیدهای انتقالی و مارتنزیت کم کربن توسط فریت و سمنتیت

بستگی به زمان تمپر کردن، ممکن است دامنه های حرارتی مراحل فوق در بعضی از قسمتها بر روی هم قرار گیرد ولی بطور کلی دامنه های حرارتی ۲۵۰-۱۰۰ درجه سانتیگراد (۴۸۲-۲۱۲ درجه فارنهایت)، ۳۰۰-۲۰۰ درجه سانتیگراد (۵۷۲-۳۹۲ درجه فارنهایت) و ۳۵۰-۲۵۰ درجه سانتیگراد (۶۶۲-۴۸۲ درجه فارنهایت) به ترتیب برای مراحل اول، دوم و شروع مرحله سوم گزارش شده است. لازم به ذکر است که بجز موارد اشاره شده در مراحل سه گانه فوق تغییرات ساختاری دیگری نیز در ضمن تمپر شدن فولادهای کوئنچ شده گزارش شده است، از آن جمله تشکیل کاربیدهای آلیاژی و ایجاد سختی ثانویه می‌باشد که می‌توان آنرا مرحله چهارم بازپخت نامید. مطالعات و گزارشهای دیگری در همین رابطه نشان داده است که در ضمن کوئنچ شدن و یا نگهداشتن فولاد کوئنچ شده در دمای اتاق احتمال رسوب اتمهای کربن بر روی نابجائیها و محلهای پر انرژی دیگر نظیر فصل مشترکهای

۱-Epsilon Carbide

۲-Eta Carbide

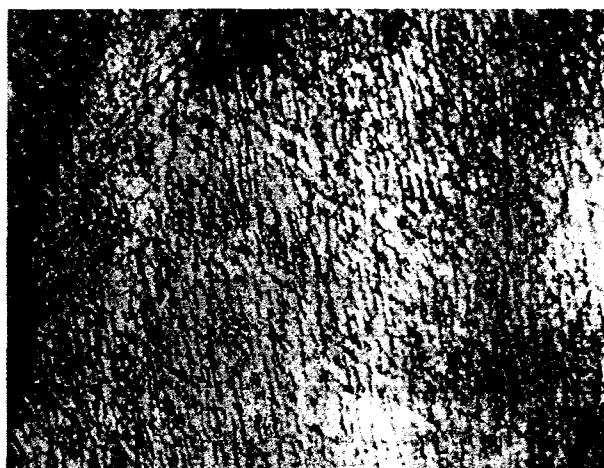


بین صفحات مارتنزیتی وجود دارد. تحت شرایط فوق، رسوب و تجمع اتمهای کربن می‌تواند تشکیل کاربید را به دنبال داشته باشد. در حقیقت در چنین شرایطی مرحله اول بازپخت در ضمن کوئنچ شدن و یا نگهداشتن در دمای اتاق انجام می‌گیرد. به این ترتیب ملاحظه می‌شود که تغییرات ساختمان یک فولاد کوئنچ شده در ضمن تمپر شدن را به بیشتر از ۳ مرحله می‌توان تقسیم کرد. با این حال نظر به اهمیت موضوع و سهولت مطالعه رفتار فولادهای تمپر شده، اثرات بازپخت بر روی تغییرات ساختمان میکروسکوپی در چارچوب مراحل اول، دوم و سوم بررسی می‌گردد. گرچه در بیشتر منابع کاربید انتقالی که در مرحله اول بازگشت تشکیل می‌شود، کاربید اپسیلین با ساختمان کریستالی هگزاگونال گزارش شده ولی مطالعات اخیر نشان داده است که کاربیدهای فوق دارای ساختمان کریستالی اورتورومبیک و ایزومورف با کاربیدهای فلزات انتقالی (M_2C) می‌باشند. این نوع کاربید را کاربید اتا می‌نامند. درصد کربن در هر دو نوع کاربید اپسیلین (با فرمول $Fe_{2.4}C$) و اتا (با فرمول Fe_2C) از درصد کربن سمنتیت با فرمول (Fe_3C) که در دماهای بالاتر تشکیل می‌شود به مراتب کمتر است.

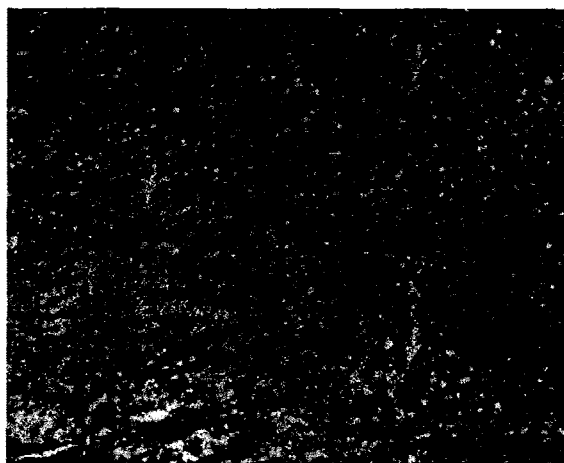
کاربیدهای انتقالی بصورت ذرات بسیار ریز در ساختمان مارتنزیت و در تمامی نقاط آن نظیر داخل صفحات مارتنزیتی و در فصل مشترکهای آنها تشکیل می‌شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داده شده در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ چگونگی توزیع کاربیدهای مزبور را در ساختمان میکروسکوپی مارتنزیت تمپر شده نشان می‌دهد. شکل ۱۶ توزیع یکنواخت ذرات بسیار ریز کاربید اتا را در داخل و بین صفحات مارتنزیتی و همچنین وجود آستنیت باقیمانده (لکه‌های سیاه رنگ) را در بین صفحات مارتنزیتی نشان می‌دهد. آرایش واقعی کاربیدهای اتا در داخل صفحات مارتنزیتی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. ظاهراً از این شکل چنین استنباط می‌شود که کاربیدهای فوق بصورت صفحات بسیار نازک تشکیل می‌شوند در حالیکه مطالعات دقیقتر نشان می‌دهد که هر کدام از صفحات فوق از یک سری ذرات بسیار ریز و کروی با قطری در حدود ۲nm تشکیل شده‌اند (شکل ۱۸).



شکل ۱۶: ساختمان مارتنزیتی در آلیاژ Fe-۱.۲C تمپر شده در ۱۵۰ درجه سانتیگراد (۳۰۲ درجه فارنهایت) ساختمان میکروسکوپی شامل بشقابهایی از مارتنزیت با اندازه های مختلف که در آنها ردیفهایی از کاربیدهای بسیار ریز و آستنیت باقیمانده (نواحی سیاه) وجود دارد [۲]

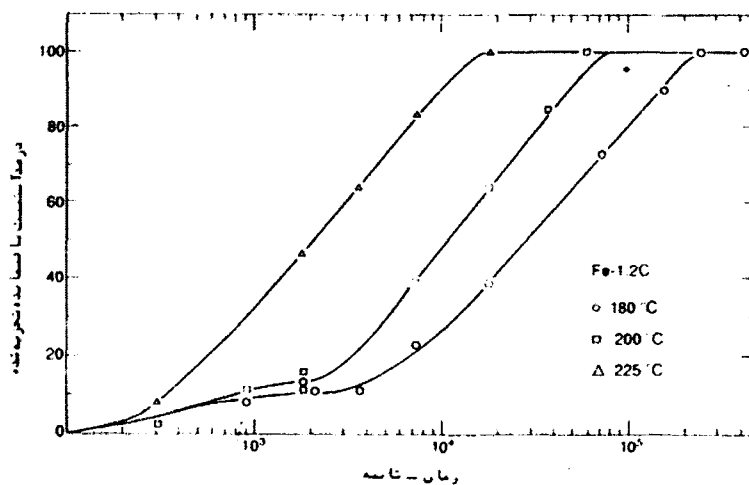


شکل ۱۷: توزیع کاربید اتا در بشقابهای مارتنزیت آلیاژ Fe-۱.۲۲ C که به مدت ۱۶ ساعت در ۱۵۰ درجه سانتیگراد (۳۰۲ درجه فارنهایت) تمپر شده است بزرگنمایی $\times 8000$ [۲]



شکل ۱۸: ردیف هایی از ذرات ریز و کروی کاربید اتا در یک بشقاب مارتنزیتی مربوط به آلیاژ Fe-۱.۲۲C که به مدت ۱۶ ساعت در ۱۵۰ درجه سانتیگراد (۳۰۲ درجه فارنهایت) تمپر شده باشد بزرگنمایی $\times 80000$ [۲].

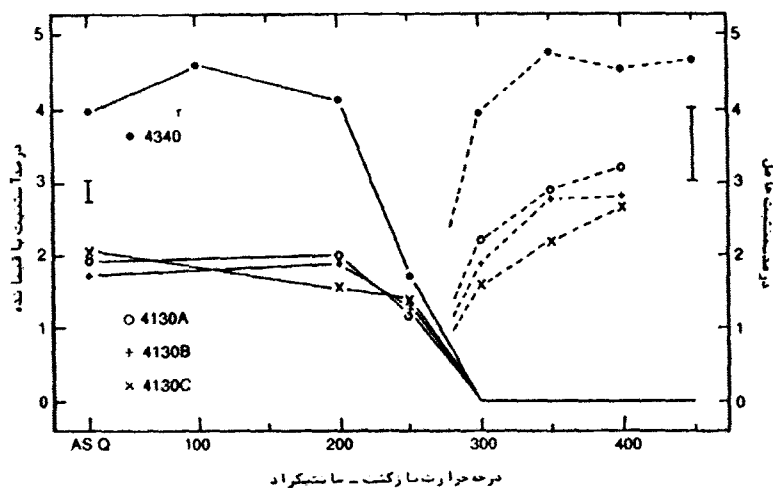
مرحله دوم بازگشت شامل تجزیه آستنیت باقیمانده و تبدیل آن به مخلوط فریت و سمنتیت است. شکل ۱۹، سرعت استحاله فوق را در رابطه با فولاد ۱/۲۲ درصد کربن و در سه درجه حرارت مختلف نشان می دهد.



شکل ۱۹: اثر زمان و درجه حرارت بازگشت بر روی استحاله آستنیت باقیمانده در آلیاژ Fe-۱.۲۲C [۲].



ملاحظه می‌شود که حتی در ۱۸۰ درجه حرارت سانتیگراد اگر فولاد به مدت زمان کافی نگهداشته شود تمامی آستنیت باقیمانده به مخلوط فریت و سمنتیت تبدیل می‌شود. مطالعات بر روی فولادهای کم آلیاژ و کربن متوسط ۴۱۳۰ و ۴۳۴۰ کوئنچ شده نشان داده است که درصد آستنیت باقیمانده در این فولادها به ترتیب در حدود ۲ و ۴ درصد می‌باشد. در صورتیکه زمان تمپر کردن برای فولادهای مزبور یک ساعت باشد، استحاله تجزیه آستنیت باقیمانده در حوالی ۲۰۰ درجه سانتیگراد شروع شده و در حوالی ۳۰۰ درجه سانتیگراد پایان می‌پذیرد (شکل ۲۰). بنابراین با تمپر کردن فولادهای فوق در ۳۰۰ درجه سانتیگراد و یا بالاتر از آن، سمنتیت یکی از اجزاء اصلی و عمده ساختار میکروسکوپی خواهد بود.



شکل ۲۰: آستنیت باقیمانده و سمنتیت در فولادهای ۴۳۴۰ و ۴۱۴۰ بر حسب درجه حرارت بازگشت [۲].

مرحله سوم بازپخت شامل تشکیل مخلوط فریت و سمنتیت براساس نمودار تعادلی Fe-C می‌باشد. شواهدی در دست است که قبل از تشکیل سمنتیت (مخصوصاً در فولادهای پرکربن) کاربید چ۱^۱ با ساختمان کریستالی مونوکلینیک و فرمول Fe_3C بوجود می‌آید. شبکه‌های کریستالی و موقعیت اتمها در دو نوع کاربید سمنتیت و کاربید چ۱ به قدری به همدیگر شبیه است که تشخیص

^۱-Chi-Carbide



آنها به کمک اشعه X و یا تکنیکهای مشابه به سادگی امکان پذیر نیست. شکل ۲۰، افزایش درصد سمنتیت (مرحله سوم) را در اثر افزایش درجه حرارت بازگشت برای فولادهای ۴۱۴۰ و ۴۳۴۰ نشان می دهد [۲].

چنانچه فولادهای آلیاژی با ساختمان مارتنزیتی که دارای عناصر آلیاژی کاربیدزا نظیر وانادیم، مولیبدن، تنگستن، کروم و یا تیتانیم بصورت محلول باشند، در دامنه حرارتی تشکیل کاربیدهای آلیاژی ($500-650^{\circ}\text{C}$) تمپر شوند، کاهش سختی در آنها نسبت به فولاد ساده کربنی به تعویق افتاده و یا حتی سختی آنها افزایش می یابد. به تعویق افتادن کاهش سختی و یا افزایش سختی فولادهای آلیاژی مزبور که به سختی ثانویه موسوم است مستقیماً ناشی از تشکیل و توزیع کاربیدهای آلیاژی بستگی به طبیعت و توزیع سمنتیت تشکیل شده در دماهای پائین و نیز طبیعت استحاله و تبدیل سمنتیت به کاربید آلیاژی دارد.

عملیات بازپخت در تشکیل انواع مختلف کاربیدها خلاصه نشده و برای حصول ساختمان کاملاً تمپر شده که عبارتست از سمنتیت کروی در زمینه فریت هم محور تغییرات مهمی نیز در شبکه کریستالی و ساختار زمینه مارتنزیتی انجام می گیرد. در حقیقت ابتدا با تشکیل کاربیدهای انتقالی، از درصد کربن مارتنزیت کاسته شده و بنابراین تراگوناظری شبکه کریستالی آن کاهش می یابد. به عبارت دیگر شبکه کریستالی غیر تعادلی bcc مارتنزیت به سمت شبکه کریستالی تعادلی fcc فریت متمایل می گردد و نهایتاً با خروج کربن بیشتر از شبکه کریستالی مارتنزیت، صفحات فریتی جایگزین صفحات مارتنزیتی می شوند. با ادامه تمپر کردن، صفحات فریتی رشد کرده و زمینه یکنواخت فریت هم محور بوجود می آید. شکلهای ۲۱ تا ۲۴ تغییرات ساختمان میکروسکوپی زمینه فولاد مارتنزیت شده فولاد Fe-۱.۲۲C را در ضمن بازگشت نشان می دهد. در محدوده تشخیص میکروسکوپ نوری تغییرات حاصل در ظاهر ساختمان فولاد مزبور هنگامی که پس از مارتنزیت شدن به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد تمپر شود، بسیار جزئی است (شکل ۲۱). در صورتی که تغییرات بسیار برجسته و مشخصتر در ساختمان میکروسکوپی نمونه هایی که به مدت ۲ ساعت در ۷۰۰ درجه سانتیگراد تمپر شده اند ملاحظه می شود (شکل ۲۲). تا این مرحله مهمترین اثر بازگشت بر روی میکروساختار عبارت از حذف صفحات کوچک مارتنزیتی و تشکیل کاربیدهای کروی بر روی مرزخانه های آستنیت اولیه در داخل بسته های مارتنزیت است. تمپر کردن بیشتر، موجب می شود تا کریستالهای صفحه ای شکل فریت باقیمانده در داخل بسته های مارتنزیتی از بین رفته و به جای آن دانه های هم محور فریتی بیشتری تشکیل شود (شکل ۲۳). مطالعه ساختار میکروسکوپی نمونه های فوق به کمک میکروسکوپ الکترونی وجود مرزهای فرعی متشکل از ردیفهای نابجایی را در داخل



دانه‌های هم محور فریتی نشان می‌دهد (شکل ۲۴). مکانیزم تشکیل مرزهای فرعی براساس لغزش و صعود و در نتیجه در یک ردیف زیر هم قرار گرفتن نابجائی‌هایی است که هنوز در ساختمان میکروسکوپی باقی مانده اند. همانگونه که گفته شد این پدیده به چند وجهی شدن یا پلی گانیزاسیون موسوم است.



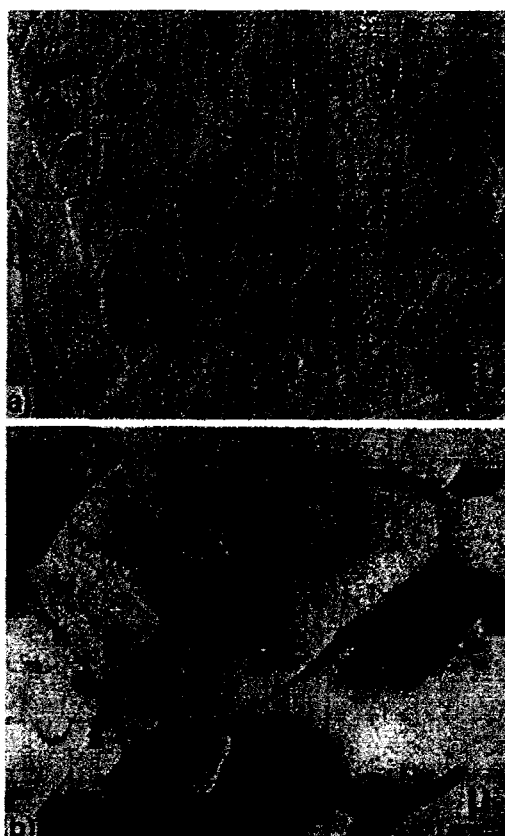
شکل ۲۱: میکرو ساختار مارتنزیت لایه ای در آلیاژ Fe-1.22C بعد از تمپر شدن به مدت ۱۵ دقیقه در ۴۰۰ درجه سانتیگراد. تصویر میکروسکوپی نوری، محلول اچ نیتال، بزرگنمایی ۵۰۰X [۲].



شکل ۲۲: میکرو ساختار مارتنزیت لایه ای در آلیاژ Fe-1.22C بعد از تمپر شدن به مدت ۲ ساعت در ۷۰۰ درجه سانتیگراد. تصویر میکروسکوپ نوری، محلول اچ نیتال، بزرگنمایی ۵۰۰X [۲].



شکل ۲۳: ساختار میکروسکوپی مارتنزیت لایه ای در آلیاژ Fe-۱.۲۲C بعد از تمپر به مدت ۱۲ ساعت در ۷۰۰ درجه سانتیگراد.
تصویر میکروسکوپ نوری، محلول اچ نیتال، بزرگنمایی ۵۰۰X [۲].



شکل ۲۴: ساختار میکروسکوپی مارتنزیت لایه ای در آلیاژ Fe-۱.۲۲C بعد از تمپر کردن به مدت ۱۲ ساعت در ۷۰۰ درجه سانتیگراد

(a) تصویر میکروسکوپی از طریق مشابه سازی سطح مقطع پولیش و اچ شده تهیه شده است
(b) تصویر میکروسکوپ الکترونی [۲].

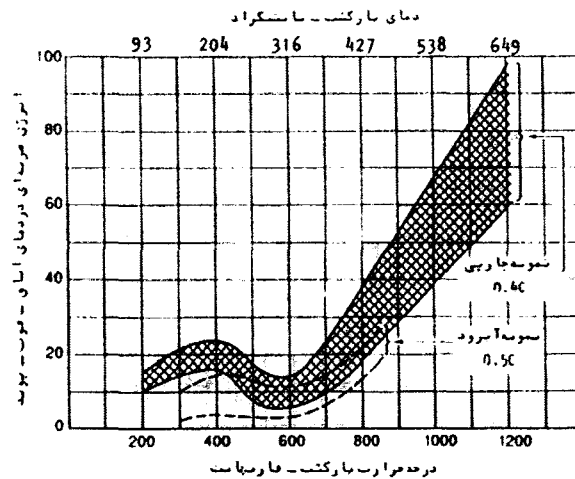


۲-۸-۲- تغییرات خواص مکانیکی

مارتنزیت که میکرو ساختار مورد نظر در عملیات کوئنچ کردن فولادها است، کاملاً سخت و در عین حال بسیار ترد و شکننده می‌باشد. برخی از پارامترها که منجر به ترد و شکننده شدن مارتنزیت می‌شوند عبارتند از: خارج شدن شبکه کریستالی از شکل طبیعی در اثر محبوس شدن کربن اضافی در فضاهای اکتاهدال، رسوب اتمهای ناخالصی در مرز دانه‌های آستنیت اولیه، تشکیل کاربید در ضمن کوئنچ کردن و بالاخره تنشهای حاصل از کوئنچ کردن. هدف اصلی از عملیات حرارتی تمپر کردن کاهش تردی و شکنندگی و یا به بیان دیگر افزایش تافنس و مقاومت فولاد در برابر ضربه است. از آنجایی که برای تمپر کردن هر درجه حرارتی را در محدوده حرارتی دمای اتاق تا دمای A_{e1} می‌توان استفاده کرد، بنابراین می‌توان میکرو ساختار و در نتیجه خواص مکانیکی کاملاً متنوعی از مارتنزیت کوئنچ شده تا سمنتیت کروی در زمینه فریت به دست آورد. عملاً دما و زمان تمپر کردن با توجه به خواص مکانیکی یعنی میزان سختی، استحکام و تافنس که در عمل لازم است انتخاب می‌شود [۲].

تغییرات انرژی ضربه برحسب درجه حرارت بازگشت برای فولادهای ساده کربنی که شامل ۰/۴ و ۰/۵ درصد کربن باشند در شکل ۲۵ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بجز دامنه حرارتی ۳۵۰-۲۶۰ درجه سانتیگراد (۷۰۰-۵۰۰ درجه فارنهایت) تمپر کردن در دماهای دیگر باعث افزایش تافنس فولاد می‌شود. مقاومت به ضربه فولادهایی که در محدوده حرارتی فوق تمپر شوند کاهش می‌یابد. این پدیده به تردی ۳۵۰ درجه سانتیگراد، (تردی ۵۰۰ درجه فارنهایت) و یا تردی مارتنزیت تمپر شده^۱ موسوم است و گاهی آنرا با TME نشان می‌دهند. پدیده‌های تردی در رابطه با تمپر کردن فولادهای کوئنچ شده در بخش ۲-۸-۶ مفصلاً بحث خواهد شد. به منظور جلوگیری از کاهش مقاومت فولاد در برابر ضربه همواره سعی می‌شود که از بازگشت دادن فولاد در محدوده حرارتی فوق اجتناب شود. شکل ۲۵ اثر درصد کربن را نیز بر روی تافنس فولاد کوئنچ و تمپر شده نشان می‌دهد. فولادهایی که ۰/۵ درصد و یا بیشتر کربن داشته باشند مقاومت به ضربه بسیار کم داشته و فقط در مواقعی استفاده می‌شوند که به سختی و یا مقاومت به سایش زیاد نیاز باشد و یا ثابت ماندن زوایا، گوشه‌ها و لبه‌های قطعه به هنگام کار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. به عنوان مثال، ابزارهای دستی نظیر پیچ گوشتی و تیغه‌های برش از فولادهای پرکربن ساخته شده و پس از مارتنزیت شدن در دمایی پائین بازگشت داده می‌شوند [۲].

^۱-Tempered Martensite Embrittlement



شکل ۲۵: اثر درجه حرارت بازگشت بر روی تافنس ضربه ای فولادهای کم آلیاژ با کربن متوسط [۲]

دمای مناسب برای بازگشت فولادهای ساده کربنی و کم آلیاژ را می‌توان با توجه به ترکیب شیمیایی آنها و سختی نهایی مورد نظر بطور تقریب مشخص کرد. این روش براساس فرمول ارائه شده توسط Gordon و Jaffe بوده و با این فرض می‌باشد که فولاد پس از کوئنچ شدن عمدتاً ساختار مارتنزیتی داشته باشد، رابطه ارائه شده به صورت زیر است:

$$T = 30 \cdot (H_c - H_a)$$

در این رابطه :

T : دمای بازگشت بر حسب فارنهایت

H_c : سختی محاسبه شده از ترکیب شیمیایی

H_a : سختی مورد نظر پس از بازگشت

اگر درجه حرارت بازگشت را به سانتیگراد تبدیل کنیم، رابطه فوق به صورت زیر در

می‌آید:

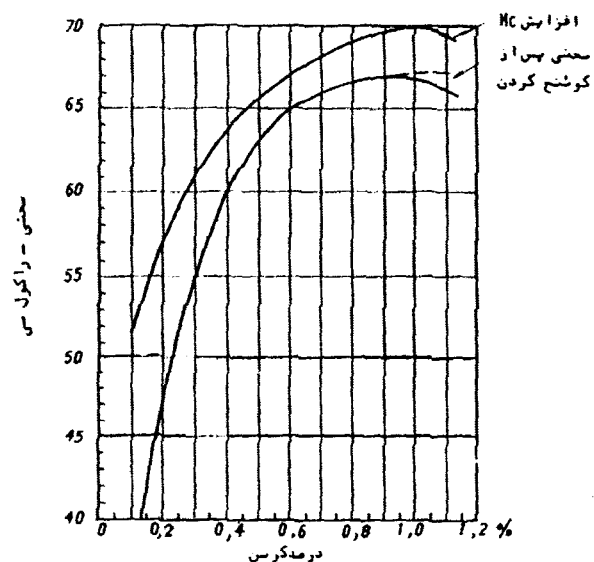
$$T = 16/67(H_c - H_a) - 17/8$$

مقادیر مختلف H_c با توجه به درصد کربن و عناصر آلیاژی از شکل‌های ۲۶ و ۲۷ به دست می‌آید. زمان بازگشت توصیه شده در دمای به دست آمده از رابطه فوق، ۴ ساعت می‌باشد. از آنجایی که با ریز شدن دانه‌های فولاد، مقاومت آن در برابر نرم شدن در ضمن بازگشت

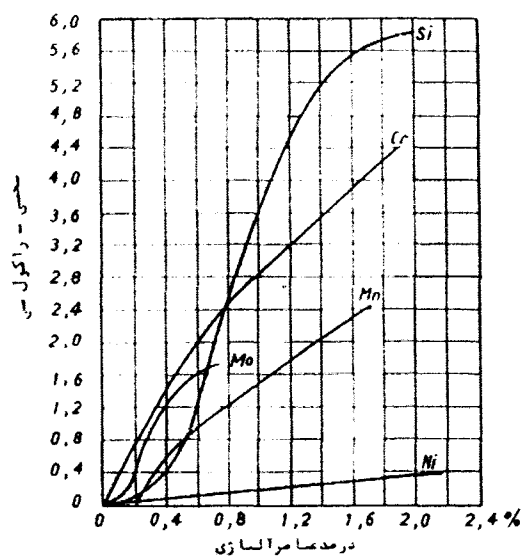


افزایش می‌یابد، اثر اندازه دانه‌ها نیز در مقدار H_c باید در نظر گرفته شود. این اثر به صورت زیر می‌باشد:

عدد اندازه دانه ASTM	۴	۶	۸	۱۰
افزایش مقدار H_c	۰/۶	۰/۹	۱/۲	۱/۵

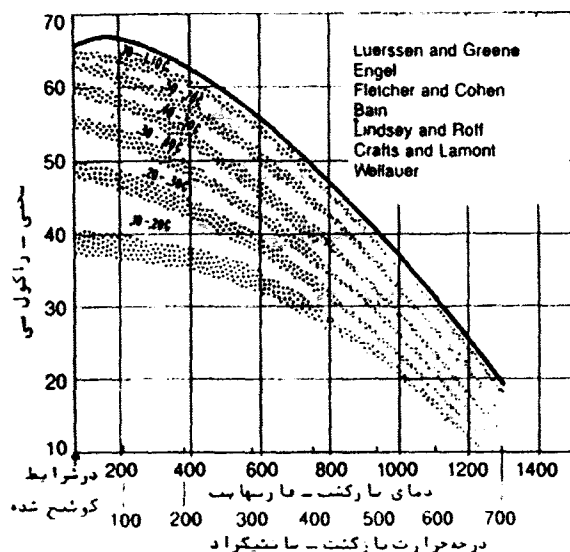


شکل ۲۶: افزایش سختی راکول سی با توجه به درصد کربن فولاد. همچنین سختی پس از کوئنچ کردن بر حسب درصد کربن نشان داده شده است [۲].



شکل ۲۷: افزایش سختی راکول سی با توجه به عناصر آلیاژی مختلف [۲].

اثرات درجه حرارت بازگشت و درصد کربن بر روی سختی فولادهای ساده کربنی مارتنزیت و تمپر شده در شکل ۲۸ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش درجه حرارت بازگشت و یا کاهش درصد کربن سختی نهایی کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه در این رابطه سختی فولادهای پرکربنی است که در دمای پائین تمپر می‌شوند. سختی این فولادها تحت شرایط کوئنچ و تمپر شده تا حدودی بیشتر از سختی حاصل از کوئنچ می‌باشد. مطالعات ریزساختار فولادهای مزبور نشان داده است که افزایش سختی در این مرحله ناشی از تشکیل کاربیدهای انتقالی بسیار ریز در بین دانه های مارتنزیتی می‌باشد.



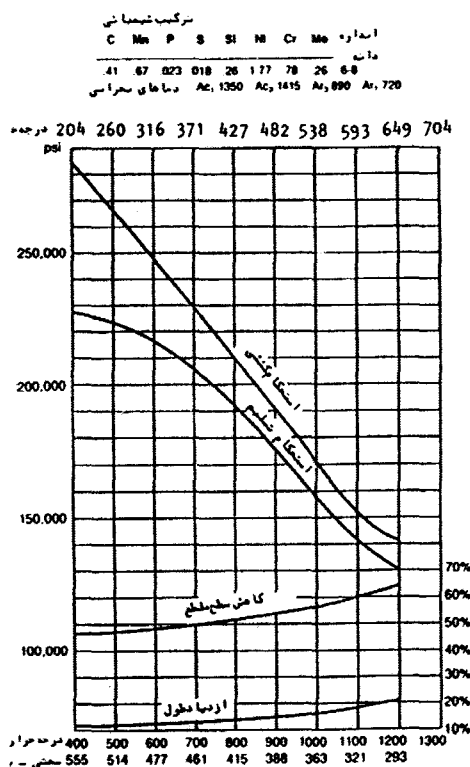
شکل ۲۸: اثر درجه حرارت بازگشت و درصد کربن بر روی منحنی فولادهای ساده کربنی کوئنچ و تمپر شده. اعداد روی منحنیها درصد کربن را مشخص می کنند [۲].

بطور کلی رابطه بین سختی و مقاومت به ضربه در عملیات حرارتی و کاربرد فولادهای کوئنچ و تمپر شده از اهمیت ویژه ای برخوردار است. شکلهای ۲۵ و ۲۸ نشان می دهند که با تمپر کردن فولاد در دمایی زیر دامنه حرارتی تردی، تافنس به میزان کمی افزایش می یابد و کاهش سختی بسیار جزئی است. از طرف دیگر با بازگشت دادن در دمایی بالاتر از محدوده حرارتی فوق تافنس به میزان قابل ملاحظه ای افزایش یافته و سختی به مقدار زیادی کاهش پیدا می کند. از اینرو در مواردی که احتیاج به استحکام و تافنس خستگی زیاد باشد، عمدتاً در رابطه با فولادهای کم کربن و یا جاهایی که نیرو و تنش اساساً فشاری باشد مانند چرخ دنده ها و یاتاقانها (معمولاً فولادهای پرکربن) از دماهایی زیر دامنه حرارتی تردی برای تمپر کردن استفاده می شود. تحت شرایطی که سختی و استحکام از اهمیت کمتری برخوردار بوده و تافنس خیلی زیاد هدف اصلی باشد قطعات را در دمایی بالاتر از محدوده حرارتی تردی بازگشت می دهند.

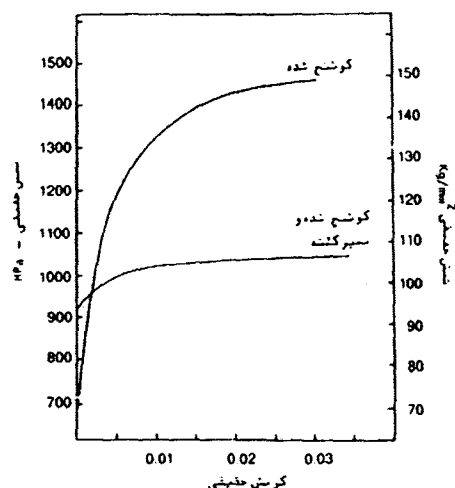
اثرات درجه حرارت بازگشت بر روی بعضی از خواص مکانیکی فولاد AISI ۴۳۴۰ که در روغن کوئنچ و سپس تمپر شده باشد در شکل ۲۹ نشان داده شده است. هرچه درجه حرارت بازگشت افزایش یابد استحکام تسلیم و استحکام کششی کاهش یافته و انعطاف پذیری (از دید طول و کاهش سطح مقطع) زیادتر می شود. در رابطه با شکل ۲۹ دو نکته قابل توجه است: یکی کاهش تفاوت بین استحکام کششی و استحکام تسلیم در اثر افزایش درجه حرارت بازگشت و دیگری مشخص نشدن



اثرات تردی از نتایج (افزایش طول و کاهش سطح مقطع) به دست آمده از آزمایش کشش. موضوع اول که از جمله مشخصه های ویژه فولادهای ساده کربنی و یا کم آلیاژ سخت شده است به اثرات درجه حرارت بازگشت بر روی سرعت کار سختی در این نوع فولادها مربوط می شود. شکل ۳۰ منحنیهای تنش-کرنش را برای فولادهای Fe-۰/۲C تحت شرایط کوئنچ و کوئنچ-تمپر شده نشان می دهد. نمونه اول پس از مارتنزیت شدن در محلول NaOH-NaCl کوئنچ شده و نمونه دوم پس از کوئنچ شدن تحت شرایط فوق، در حمام سرب ۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت بازگشت داده شده است. ملاحظه می شود با افزایش کرنش (کشیدن نمونه) تنش در نمونه مارتنزیت شده خیلی سریع افزایش می یابد. به بیان دیگر سرعت کار سختی در نمونه فوق زیاد است. از طرف دیگر منحنی تنش-کرنش برای فولاد کوئنچ-تمپر شده نشان می دهد که افزایش تنش نسبت به افزایش کرنش بسیار کم است. به بیان دیگر سرعت کار سختی در این حالت بسیار کم می باشد [۲].



شکل ۲۹: اثر درجه حرارت بازگشت بر روی خواص مکانیکی فولاد ۴۳۴۰. عملیات حرارتی: نمونه ها در ۸۷۱ درجه سانتیگراد (۱۶۰۰ درجه فارنهایت) نرماله و سپس در ۸۰۲ درجه سانتیگراد (۱۴۷۵ درجه فارنهایت) آستنیت و در روغن متلاطم کوئنچ شده اند. سختی حاصل از کوئنچ ۶۰۱ برینل [۲].



شکل ۳۰: تغییرات تنش-کرنش برای فولاد Fe-0.2C در شرایط کوئچ و کوئچ-تمپر شده. اندازه بسته‌های مارتنزیت ۸/۲ میکرون [۲].

این رفتار کاملاً متفاوت در سرعت کار سختی مستقیماً به تحرک نابجائیها در ساختمانهای مارتنزیت و مارتنزیت تمپر شده مربوط می‌شود. در نمونه کوئچ شده با افزایش تغییر شکل نابجائیهای زیادی که در ساختمان وجود دارند با یکدیگر برخورد کرده و منجر به تشکیل موانع متعدد بسیار ریز بر سر راه حرکت خود و نابجائیهای دیگر می‌شوند. این پدیده با ادامه تغییر شکل تشدید شده و در نتیجه سرعت کار سختی را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر در نمونه بازپخت شده نابجایی‌ها به مراتب کمتر بوده و موانع بر سر راه حرکت آنها عمدتاً ذرات نسبتاً درشت سمنتیت می‌باشد. به همین دلیل سرعت کار سختی تحت شرایط اخیر به مراتب کمتر است. هرچه سرعت کار سختی در یک فولاد کمتر باشد تفاوت بین استحکام کششی و استحکام تسلیم در آن فولاد کمتر خواهد بود.

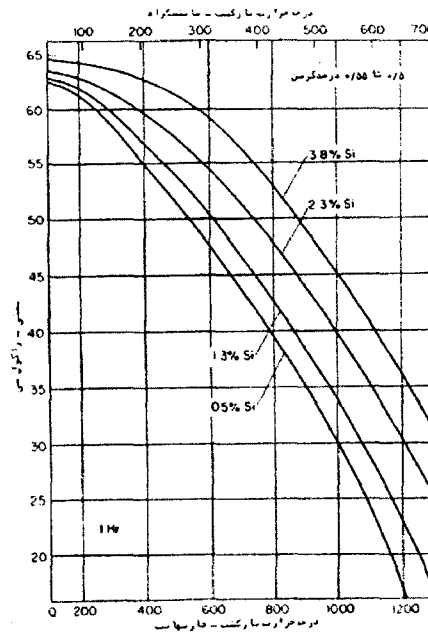
نکته دیگری که در رابطه با خواص مکانیکی فولادهای مزبور از شکل ۲۹ قابل توجه می‌باشد، عدم کاهش انعطاف‌پذیری در دامنه حرارتی مربوط به تردی مارتنزیت تمپر شده است. این پدیده مستقیماً به شکل نمونه‌ها، نوع آزمایش انجام شده و نحوه اعمال تنش مربوط می‌شود. تافنس نشان داده شده در شکل ۲۵ با توجه به آزمایش ضربه محاسبه می‌شود. در این آزمایش انرژی لازم برای شکست یک نمونه شیاردار (نمونه ضربه) تحت اعمال تنش ضربه ای محاسبه شده است. در حالی که نتایج نشان داده شده در شکل ۲۹ براساس اعمال تنش کششی با سرعت نسبتاً کم بر روی نمونه‌های استوانه ای بدون شیار می‌باشد. در حالت دوم در غیاب نقاط تمرکز تنش در انتهای شیار،



ساختار میکروسکوپی فولادی که حتی در دمای TME تمپر شده باشد قادر است نیروی اعمال شده بر روی فولاد را بدون نشان دادن کوچکترین اثری از تردی تحمل کند. از طرف دیگر در حالت اول شرایط کاملاً متفاوت است. بدین صورت که تمرکز تنش در انتهای شیار باعث ایجاد میدان تنشی وسیعی شده که نواحی ترد شده را براحتی در بر گرفته و باعث شکست ناگهانی نمونه، تحت تنشهای نسبتاً کم می‌شود.

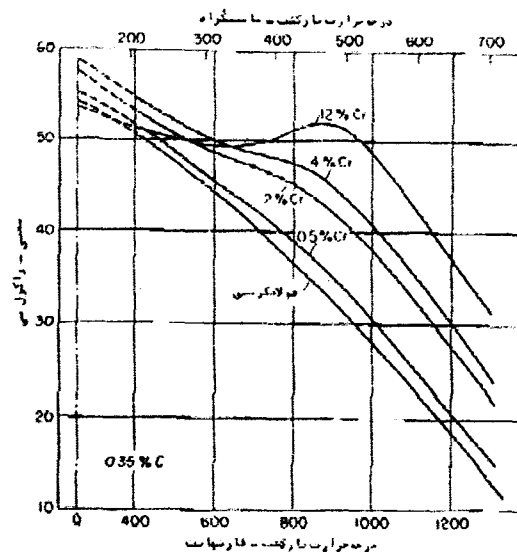
۲-۸-۳- اثرات عناصر آلیاژی

افزودن عناصر آلیاژی در حد متوسط می‌تواند سختی مارتنزیت حاصل از کوئنچ کردن فولادهای کم کربن و یا کربن متوسط را به میزان بسیار کم افزایش دهند. با افزایش درصد کربن احتمال کاهش سختی حاصل از کوئنچ در فولادهای مزبور افزایش می‌یابد. این پدیده ناشی از افزایش درصد آستنیت باقیمانده در ساختار فولاد می‌باشد. بجز موارد فوق عناصر آلیاژی اثرات بسیار جزئی بر روی سختی مارتنزیت حاصل از کوئنچ دارند. بطوری که سختی حاصل از کوئنچ در یک فولاد آلیاژی بندرت از سختی فولاد ساده کربنی با همان درصد کربن تجاوز می‌کند. برعکس در مواردی که میزان آستنیت باقیمانده زیاد باشد سختی فولاد آلیاژی کمتر هم خواهد شد. تمپر کردن در دمایی نظیر ۲۰۰ درجه سانتیگراد (۴۰۰ درجه فارنهایت) منجر به کاهش سختی نهایی فولادهای آلیاژی معمولی می‌شود، اما وجود عناصر آلیاژی باعث به تعویق افتادن کاهش سختی و استحکام خواهد شد. شکل ۳۱ اثر افزایش درصد سیلیسیم را بر روی سختی مارتنزیت و مارتنزیت تمپر شده در دماهای مختلف نشان می‌دهد. از آنجایی که سیلیسیم به مقدار زیادی در کاربرد حل نمی‌شود، نقش آن در فولادها انحلال در فریت زمینه و افزایش سختی و استحکام آن از طریق محلول جامد خواهد بود. عناصری نظیر نیکل و منگنز نیز به مقدار زیادی در فریت حل شده و بنابراین مشابه با سیلیسیم عمل می‌کنند. اگرچه با درصد یکسان اثرات آنها ضعیفتر است. در فولادهای که بیشتر از ۰/۹ درصد کربن داشته باشند (به ویژه اگر منگنز بیشتر از یک درصد بوده و یا اینکه مقدار قابل ملاحظه‌ای نیکل در فولاد باشد) کاهش سختی در ضمن بازگشت ممکن است به تعویق بیفتد. این پدیده ناشی از مقدار قابل ملاحظه‌ای آستنیت باقیمانده است که در میکروساختار فولاد کوئنچ شده وجود دارد. این اثر در درصدهای کم آستنیت باقیمانده بسیار جزئی است بطوری که ممکن است به حساب خطا در اندازه گیری سختی گذاشته شود.



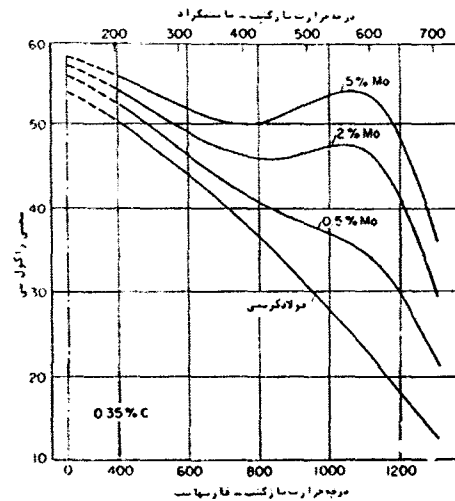
شکل ۳۱: اثر سیلیسیم بر روی سختی حاصل از بازگشت فولادهای کوئنچ و تمپر شده در دماهای مختلف و زمان بازگشت یک ساعت [۲].

اثرات کروم در ضمن بازگشت بر روی منحنی حاصل از مارتنزیت تمپر شده در فولاد $\text{Fe}-0.35\text{C}-\text{Cr}$ در شکل ۳۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که حتی ۰/۵ درصد کروم مقاومت فولاد در برابر نرم شدن را افزایش داده بنحوی که بدون توجه به درجه حرارت بازگشت سختی حاصل از کوئنچ و بازپخت در فولاد کروم دار همواره بالاتر از سختی فولاد ساده کربنی با همان درصد کربن می‌باشد. با افزایش درصد کروم به بیشتر از ۲ درصد سختی مارتنزیتی که در دماهای بالا تمپر شود افزایش می‌یابد. این افزایش سختی به سختی ثانویه موسوم است که در دماهای بازپخت نسبتاً بالا مشاهده شده و علت آن تشکیل کاربیدهای آلیاژی می‌باشد. رفتار فولاد ۱۲ درصد کروم در این شکل قابل توجه است. در این نوع فولاد پس از کوئنچ شدن مقدار قابل ملاحظه‌ای آستنیت باقیمانده وجود دارد. بطوری که قادر است سختی ساختار حاصل از کوئنچ کردن را حتی تا کمتر از سختی مارتنزیت حاصل از فولاد ساده کربنی با همان درصد کربن کاهش دهد. تجزیه آستنیت باقیمانده در ضمن بازگشت باعث افزایش سختی و تشدید سختی ثانویه می‌شود. در اینجا تذکر این نکته ضروری است که بطور کلی عناصر کاربیدزا در حالی که اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی افزایش ضخامت لایه سخت شده (سختی پذیری) دارند اثرات آنها در رابطه با افزایش آستنیت باقیمانده بمراتب کمتر از Mn و Ni می‌باشد.

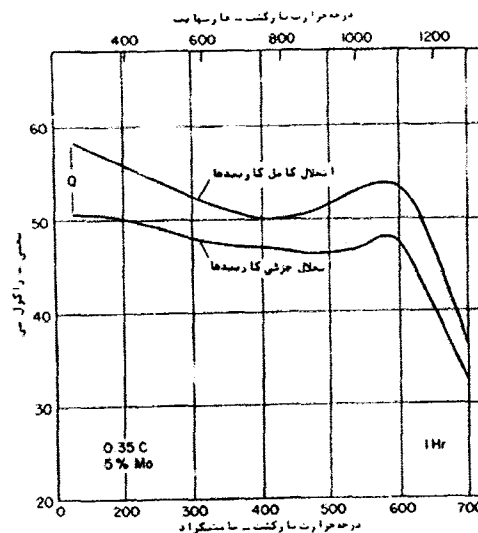


شکل ۳۲: اثر کروم بر روی سختی حاصل از تمپر کردن فولادهای کوئنچ و بازگشت داده شده در دماهای مختلف. زمان بازگشت یک ساعت [۲].

اثر مولیبدن که قدرت کاربیدزائی آن بیشتر از کروم است بر روی سختی فولادهای کوئنچ و تمپر شده در شکل ۳۳ نشان داده شده است. از مقایسه شکل‌های ۳۲ و ۳۳ مشخص است که سختی و بنابراین استحکام حاصل، پس از بازگشت در دمای بالا در فولادهای مولیبدن دار بمراتب بیشتر از فولادهای کروم دار است. بعلاوه سختی کامل در فولادهای مولیبدن دار نسبت به فولادهای کروم دار در دمائی نسبتاً بالاتر به دست می‌آید. لازم به تذکر است که در رابطه با بررسی اثرات کروم و مولیبدن (شکل‌های ۳۲ و ۳۳) سعی شده که آستنیت کردن بنحوی انجام گیرد که حتی الامکان تمامی کاربیدها در آستنیت به صورت محلول درآید. اهمیت انحلال کاربیدها در آستنیت قبل از کوئنچ کردن و اثرات آن بر روی سختی حاصل از کوئنچ و همچنین تغییرات سختی بر حسب درجه حرارت بازگشت در شکل ۳۴ نشان داده شده است. در شکل فوق دو درجه حرارت آستنیت کردن یکی ۱۲۰۴ درجه سانتیگراد (۲۲۰۰ درجه فارنهایت) و دیگری ۹۵۰ درجه سانتیگراد (۱۷۴۰ درجه فارنهایت) استفاده شده است. در حالت اول که کاربیدهای بیشتری در آستنیت حل شده سختی حاصل از کوئنچ و همچنین سختی تحت شرایط کوئنچ-تمپر شده همواره بیشتر است از حالت دوم (یعنی تحت شرایطی که درصد کاربیدهای حل نشده بیشتر باشد)، است.



شکل ۳۳: اثر مولیبدن بر روی منحنی حاصل از بازگشت دادن فولادهای کوئنچ و تمپر شده در دماهای مختلف. زمان بازگشت یک ساعت [۲].



شکل ۳۴: اثر انحلال کاربرد در آستنیت بر روی سختی حاصل از بازگشت فولاد کوئنچ و تمپر شده در دماهای مختلف: زمان بازگشت، یک ساعت. درجه حرارت آستنیت و کوئنچ کردن منحنی بالایی و پائینی به ترتیب ۱۲۰۴ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد (۲۲۰۰ و ۱۷۴۰ درجه فارنهایت [۲]).

اهمیت میزان انحلال عناصر کاربیدزا در آستنیت و اثرات آن بر روی سختی در ضمن بازگشت به بهترین وجه در رابطه با فولاد کروم-مولیبدن -وانادیم دار مشخص است (شکل ۳۵). کوئنچ کردن این فولاد از 815°C (1500°F) باعث خواهد شد که فقط کروم به صورت محلول در آستنیت درآید

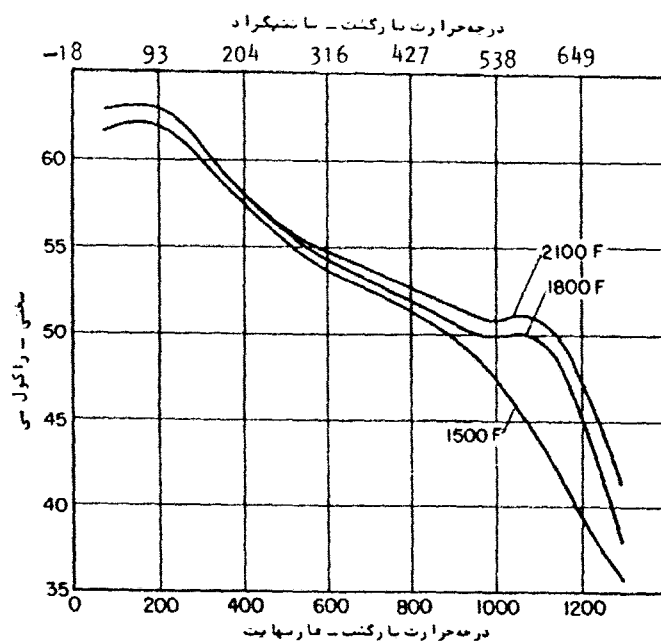


و بنابراین با افزایش درجه حرارت بازگشت سختی آن سریعاً کاهش یابد. در این حالت تاخیر بسیار جزئی در کاهش سختی در حوالی درجه حرارت تشکیل کاربید کروم ملاحظه خواهد شد. از طرف دیگر موقعی که فولاد از درجه حرارت ۹۸۲ درجه سانتیگراد (۱۸۰۰ درجه فارنهایت) و یا ۱۰۹۳ درجه سانتیگراد (۲۰۰۰ درجه فارنهایت) کوئنچ شود درصد بیشتری از عناصر آلیاژی فوق در آستنیت حل شده و بنابراین نه تنها تاخیر بیشتری در کاهش سختی ملاحظه می‌شود بلکه منجر به سختی ثانویه نیز خواهد شد.

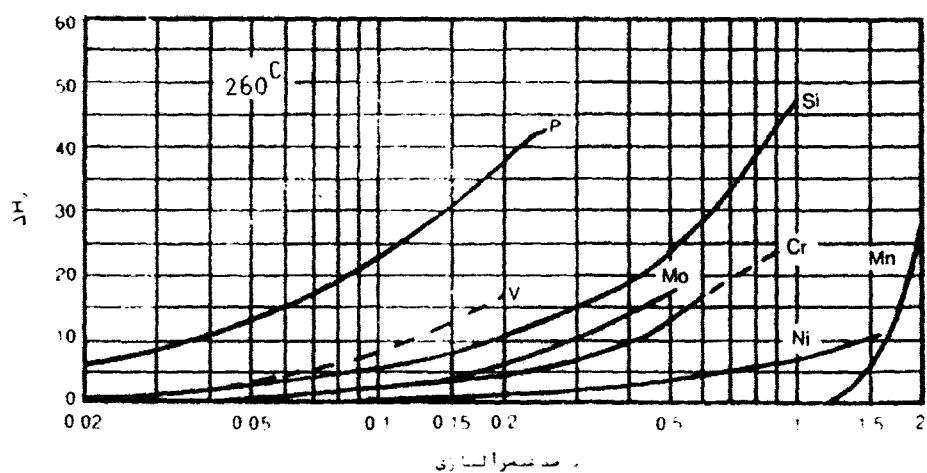
بطور کلی حضور عناصر آلیاژی در فولادها باعث افزایش سختی قطعات کوئنچ و تمپر شده نسبت به فولادهای ساده کربنی با همان درصد کربن خواهد شد. اما بر حسب نوع، درصد و نقش عنصر آلیاژی و درجه حرارت بازگشت میزان افزایش سختی متفاوت می‌باشد. به کمک نتایج حاصل از مطالعاتی که در همین رابطه انجام گرفته اثرات بعضی از عناصر آلیاژی تا حد ۱/۵ درصد در فولادهای کم آلیاژ توسط نمودارهایی مشابه با شکل‌های ۳۵ و ۳۶ نشان داده شده است. هر کدام از منحنیها در شکل‌های فوق و یا شکل‌های مشابه دیگر، تفاوت بین سختی فولاد ساده کربنی و فولاد آلیاژی حاوی یک عنصر آلیاژی مشخص، وقتی که به مدت یک ساعت در دمای نشان داده شده بر روی شکل تمپر شود، را نشان می‌دهد. با داشتن درصد کربن و دمای بازگشت می‌توان سختی فولاد کوئنچ و تمپر شده را از نمودار ۳۷ تخمین زد. به کمک نمودارهای ۳۵ و ۳۶ و یا نمودارهای مشابه دیگر (نمودار مناسب باید بنا به توجه به درجه حرارت بازگشت انتخاب شود) افزایش سختی ناشی از وجود عناصر آلیاژی را تعیین شده و با استفاده از رابطه زیر سختی فولاد آلیاژی پس از تمپر کردن محاسبه می‌شود.

$$H_{AS} = H_{CS} + \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \dots$$

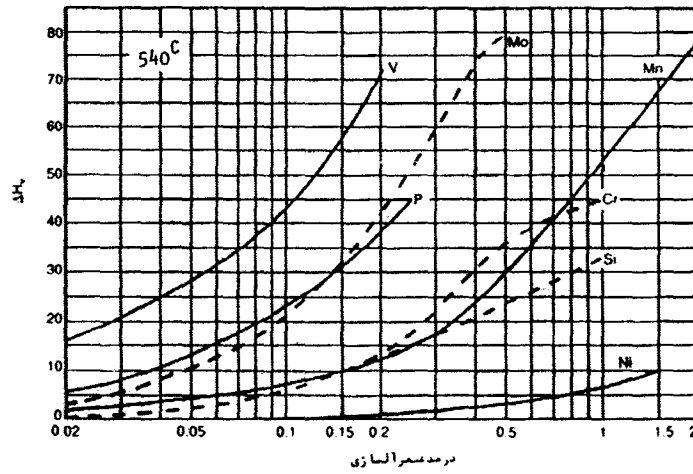
در این رابطه H_{AS} سختی فولاد آلیاژی پس از کوئنچ و تمپر کردن، H_{CS} سختی فولاد ساده کربنی با همان درصد کربن پس از کوئنچ و تمپر شدن (شکل ۳۸) و ΔH_n اثر عنصر آلیاژی بر روی افزایش سختی پس از تمپر شدن می‌باشد که از شکل‌های ۳۶ و ۳۷ و یا شکل‌های مشابه با آنها به دست می‌آید [۲].



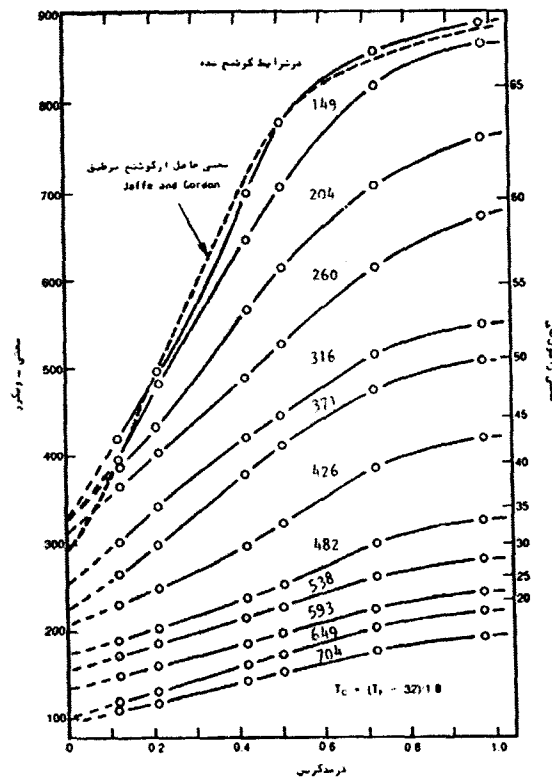
شکل ۳۵: اثر انحلال کاربید در آستنیت (اثر درجه حرارت آستنیت کردن) بر روی سختی حاصل از بازگشت فولاد کروم-مولیبدن-وانادیم دار پس از کوئنچ و تمپر کردن در دماهای مختلف [۲].



شکل ۳۶: اثر عناصر آلیاژی بر روی سختی حاصل از بازگشت فولادهای کوئنچ و تمپر شده در دمای ۲۶۰ درجه سانتیگراد (۵۰۰ درجه فارنهایت) در مقایسه با فولاد ساده کربنی [۲].



شکل ۳۷: مشابه با شکل ۳۵ ولی مربوط به دمای بازگشت ۵۴۰ درجه سانتیگراد (۱۰۰۰ درجه فارنهایت) [۲].



شکل ۳۸: اثر درصد کربن و درجه حرارت بازگشت بر روی منحنی مارتنزیت تمپر شده در فولادهای ساده کربنی [۲].



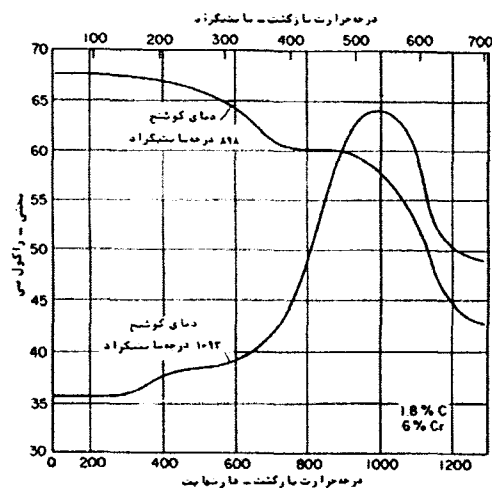
شکلهای ۳۶ و ۳۷ تفاوت‌های جالب ناشی از اثرات عناصر آلیاژی مختلف را نیز نشان می‌دهد. عناصر کاربیدزای قوی نظیر وانادیم، مولیبدن و غیره تا قبل از دماهای بالا (دمای تشکیل کاربید) اثرات قابل ملاحظه‌ای بر روی افزایش سختی نخواهند داشت. در دماهایی که کاربید تشکیل می‌شود سختی بسیار سریع افزایش می‌یابد. اثر نیکل بر روی سختی فولاد کوئنچ و تمپر شده در تمام دماهای بازگشت نسبتاً کم و تقریباً ثابت است. همانطور که قبلاً بحث شد اثر نیکل بر روی سختی و استحکام ناشی از انحلال در فریت و تشکیل محلول جامد است. سیلیسیم اثر قابل توجهی بر روی به تعویق افتادن کاهش سختی در حوالی ۳۱۶ درجه سانتیگراد (۶۰۰ درجه فارنهایت) دارد. مطالعات ساختار میکروسکوپی فولادهای کوئنچ و تمپر شده نشان داده است که نقش سیلیسیم عمدتاً در رابطه با ممانعت از تبدیل کاربیدهای انتقالی به سمنتیت می‌باشد. منگنز در دماهای پائین اثرات بسیار جزئی ولی در دماهای بالا اثرات قابل توجهی بر روی جلوگیری از کاهش سختی دارد. گفته می‌شود که دلیل این موضوع به دلیل مشارکت منگنز در تشکیل کاربیدها در دماهای بالا می‌باشد. منگنز با ضریب دیفوزیون کم درشت شدن سمنتیت را به تعویق می‌اندازد [۲].

۲-۸-۴- نقش آستنیت باقیمانده

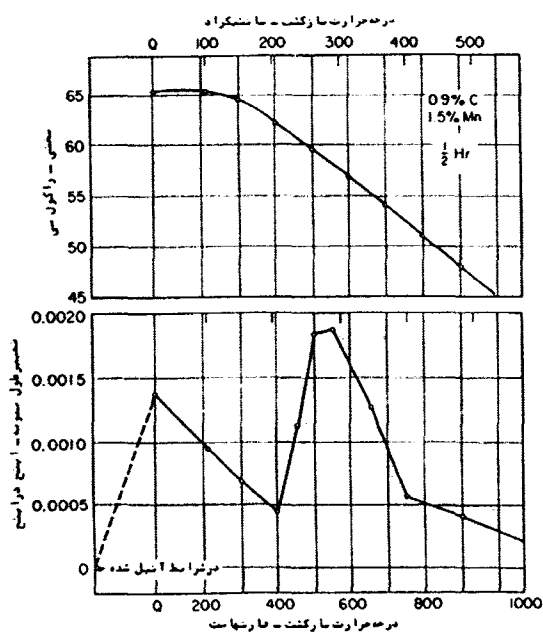
در فولادهای پرکربن مخصوصاً در مواردی که نیکل و یا مقدار قابل ملاحظه‌ای منگنز در فولاد وجود داشته باشد به علت پائین بودن دماهای M_s و M_f استحاله آستنیت به مارتنزیت معمولاً بطور کامل انجام نشده و مقداری آستنیت ناپایدار در ساختمان باقی خواهد ماند. حتی با سرد کردن تا زیر درجه حرارت اتاق آستنیت فوق تماماً به مارتنزیت تبدیل نشده و درصدی از آن همچنان باقی می‌ماند. درصد آستنیت باقیمانده، حتی در فولادهای معمولی می‌تواند به ۱۰ تا ۲۵ درصد برسد، بنابراین اثرات آن در ضمن بازگشت باید در نظر گرفته شود. در بسیاری از فولادها وجود درصد کمی از آستنیت باقیمانده سختی حاصل از کوئنچ را به میزان کمی کاهش می‌دهد. اندازه‌گیری دقیق سختی نشان می‌دهد که با گذشت زمان ممکن است سختی به مقدار کمی افزایش یابد. این پدیده می‌تواند ناشی از تبدیل آستنیت باقیمانده به مارتنزیت باشد. برای کاهش سختی به اندازه تقریباً $10RC$ به مقدار نسبتاً زیادی آستنیت باقیمانده در قطعه کوئنچ شده نیاز می‌باشد. این موضوع ممکن است ناشی از نحوه توزیع آستنیت باقیمانده در ساختمان میکروسکوپی باشد. بطور کلی هنگامی که فولاد کوئنچ شده برای مدت زمان نسبتاً کوتاه در دمایی زیر ۲۳۲ درجه سانتیگراد (۴۵۰ درجه فارنهایت) بازگشت داده شود، آستنیت باقیمانده در ساختار تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. وجود و یا



تجزیه آستنیت باقیمانده در دماهای بالاتر بازگشت را می‌توان به کمک تفرق اشعه X و یا اندازه‌گیری دانسیته و یا تغییر ابعاد نمونه مشخص کرد. متناسب با درصد آستنیت باقیمانده که همراه مارتنزیت در قطعه کوئنچ شده وجود دارد، در ضمن بازگشت ممکن است کاهش سختی به تعویق افتاده و یا اینکه سختی افزایش یابد (سختی ثانویه). این مطلب از شکل ۳۹ که تغییرات سختی در ضمن بازگشت را برای فولاد Fe-1/8C-6/4Cr تحت شرایط کوئنچ شده از دماهای ۸۹۸ درجه سانتیگراد (۱۶۵۰ درجه فارنهایت) و ۱۰۹۳ درجه سانتیگراد (۲۰۰۰ درجه فارنهایت) نشان می‌دهد، مشخص است. فولادی که از ۱۰۹۳ درجه سانتیگراد (۲۰۰۰ درجه فارنهایت) کوئنچ شده باشد بدون شک حاوی در حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد آستنیت باقیمانده است که در ضمن تمپر کردن به اجزاء سخت تر از آستنیت تجزیه شده و باعث افزایش سختی قطعه می‌شود. تحت شرایط فوق اساساً تمپر کردن باعث کاهش سختی نخواهد شد زیرا ساختمان حاصل از کوئنچ کردن عمدتاً آستنیتی می‌باشد. از طرف دیگر فولادی که از ۸۹۸ درجه سانتیگراد (۱۶۵۰ درجه فارنهایت) کوئنچ شده است فقط درصد کمی آستنیت باقیمانده داشته که می‌تواند کاهش سختی در ضمن بازگشت را تا حدودی به تعویق بیندازد. هنگامی که مقدار کمی از آستنیت در فولاد ساده کربنی کوئنچ شده باقی بماند، تجزیه آن در ضمن بازگشت منجر به افزایش ابعاد قطعه می‌شود، در حالی که معمولاً اثر مشخص و قابل ملاحظه‌ای بر روی سختی نخواهد داشت. این موضوع در شکل ۴۰ در رابطه با فولاد Fe-0/9C-1/5Mn که در روغن کوئنچ شده است نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که آستنیت باقیمانده همیشه منجر به سختی ثانویه نمی‌شود. درحقیقت با تجزیه آستنیت باقیمانده در محدوده حرارتی ۲۰۰-۳۰۰ درجه سانتیگراد افزایش طول قابل ملاحظه‌ای در نمونه به وجود می‌آید در حالی که تغییری در سختی مشاهده نمی‌شود [۲].



شکل ۳۹: اثر درجه حرارت کوئنچ کردن بر روی سختی فولاد پر کروم- پر کربن پس از بازگشت دادن در دماهای مختلف. فولادی که از ۸۹۸ درجه سانتیگراد (۱۶۵۰ درجه فارنهایت) کوئنچ شده باشد درصد کمی آستنیت باقیمانده وجود خواهد داشت. در حالی که کوئنچ کردن از دمای ۱۰۹۳ درجه سانتیگراد (۲۰۰۰ درجه فارنهایت) تقریباً به طور کامل آستنیتی خواهد بود [۲].



شکل ۴۰: اثر درجه حرارت بازگشت در فولاد Fe-۰.۹C-۱.۵Mn بر روی سختی (منحنی بالایی) و تغییر طول (منحنی پایینی) نمونه کوئنچ و تمپر شده برای مدت ۰/۵ ساعت در دماهای مختلف [۲].



آستنیت باقیمانده برسیدن به دمای مناسب بازگشت براساس نمودارهای استحاله ایزوترمال (IT) شروع به تجزیه شدن می‌کند. در این مرحله سرعت تجزیه آستنیت باقیمانده کماکان برطبق سرعت انجام استحاله آستنیت در آن درجه حرارت می‌باشد. در حقیقت نمودارهای استحاله ایزوترمال نشان می‌دهد که برای تجزیه کامل آستنیت باقیمانده در مدت ۳۰ تا ۶۰ دقیقه گاهی به دمایی بیشتر از ۲۰۰ درجه سانتیگراد (۴۰۰ درجه فارنهایت) نیاز است. همچنین نمودارهای مزبور نشان می‌دهد که محصول استحاله آستنیت باقیمانده مارتنزیت سخت نبوده بلکه محصولی از خانواده بینیت با سختی در حدود سختی مارتنزیت تمپر شده و یا کمی بالاتر از آن است. بطور خلاصه آستنیت باقیمانده در فولادهای کوئنچ شده شبیه به آستنیتی عمل می‌کند که از دمایی در منطقه آستنیت تا درجه حرارت بازگشت سرد شده باشد. با این تفاوت که تنشهای داخلی ممکن است نحوه استحاله آنرا تغییر دهد. فولادهای پرآلیاژ که درجه حرارت M_F آنها زیر درجه حرارت اتاق باشد در حالت کوئنچ شده دارای مقدار قابل ملاحظه‌ای آستنیت باقیمانده خواهند بود. با تمپر کردن این نوع فولادها در حوالی ۵۳۸-۵۶۵ درجه سانتیگراد (۱۰۵۰-۱۰۰۰ درجه فارنهایت) کاربید آلیاژی از آستنیت رسوب کرده و سختی ثانویه به وجود می‌آید. با تشکیل کاربید آلیاژی درصد کربن آستنیت باقیمانده کاهش یافته و بنابراین درجه حرارت M_F آن افزایش می‌یابد. با سرد کردن فولاد مزبور از درجه حرارت بازگشت تا دمای اتاق، آستنیت فقیر از کربن به مارتنزیت تبدیل می‌شود. تحت شرایط مزبور چنین قطعه‌ای باید قبل از مورد استفاده قرار گرفتن، مجدداً بازگشت داده شود. این موضوع به بازگشت دو مرحله‌ای^۱ موسوم است [۲].

۲-۸-۵- ارتباط درجه حرارت و زمان بازگشت

در عملیات بازگشت وقتی که به زمان تمپر کردن اشاره ای نشود منظور زمان یک ساعت است. برای حصول سختی مورد نظر می‌توان زمان بازگشت را تغییر داد. به شرط اینکه درجه حرارت بازگشت نیز تغییر داده شود. رابطه زمان و درجه حرارت بازگشت توسط پارامتر بازگشت^۲ $T (C + \log t)$ مشخص می‌شود. در این رابطه T درجه حرارت بازگشت برحسب درجه کلوین و t زمان بازگشت برحسب ساعت و C ثابت بازگشت می‌باشد. لازم به اشاره است که C تابع درصد کربن فولاد بوده و عناصر آلیاژی بر روی آن اثر قابل ملاحظه‌ای ندارند.

۱-Double -tempering
۲-Tempering parameter



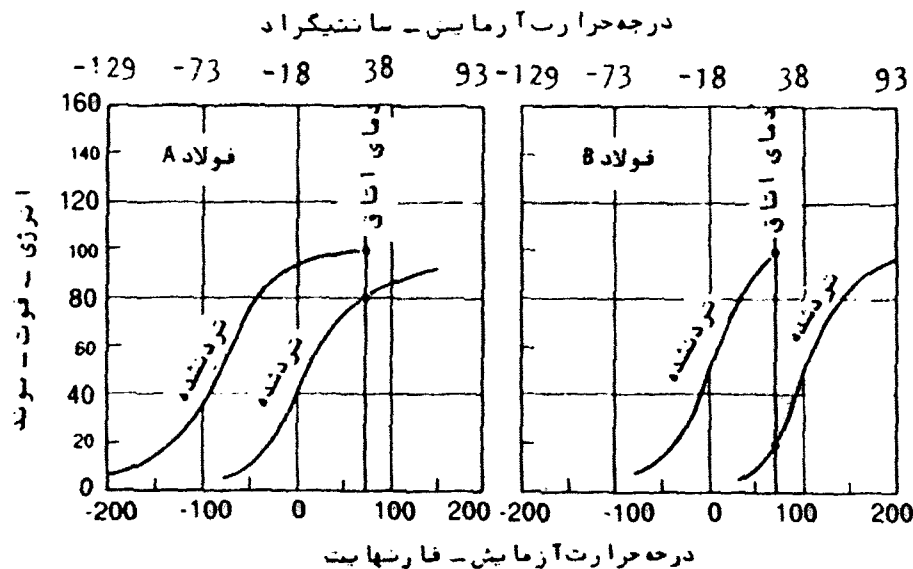
پارامتر بازگشت را می‌توان با موفقیت در خصوص فولادهای ساده کربنی به کار برد، در مورد فولادهای آلیاژی که از خود سختی ثانویه نشان می‌دهند، کاربرد این پارامتر، محدودیت دارد. در حقیقت در ضمن سختی ثانویه، حداکثر سختی به دست آمده در اثر تمپر کردن اغلب تابع درجه حرارت بازگشت می‌باشد. به عنوان مثال در رابطه با فولاد مولیبدن دار (شکل ۳۳) سختی ثانویه به دست آمده در اثر بازپخت در ۶۰۰ درجه سانتیگراد، به مراتب بالاتر از سختی به دست آمده در ۷۰۰ درجه سانتیگراد است، حتی سختی ۶۰۰ درجه سانتیگراد را نمی‌توان با بازگشت فولاد کوئچ شده برای مدت زمان بسیار کوتاه در ۷۰۰ درجه سانتیگراد به دست آورد. مطلب فوق به این حقیقت مربوط می‌شود که در دماهای بالاتر کاربیدهای تشکیل شده نسبتاً درشت تر بوده و یا اینکه پیوستگی (میزان کوهرنسی)^۱ آنها با زمینه کمتر می‌باشد [۲].

۲-۸-۶- پدیده تردی

تردی در فولادهای کوئچ و تمپر شده پدیده‌ای است که باعث کاهش مقاومت به ضربه می‌شود. این پدیده که ناشی از تغییرات ایجاد شده در ساختار میکروسکوپی مارتنزیت در ضمن تمپر شدن است، عملاً بر روی خواص مکانیکی دیگر نظیر استحکام کششی، استحکام تسلیم و انعطاف‌پذیری (درصد ازدیاد طول و یا کاهش سطح مقطع) اثری ندارد (شکل ۲۹). در حقیقت، اثر تردی با انتقال درجه حرارت تبدیل در آزمایش ضربه به سمت دماهای بالاتر به بهترین وجه مشخص می‌شود. از اینرو برای مطالعه اثرات تردی در یک فولاد کوئچ و تمپر شده لازم است که منحنی تغییرات انرژی ضربه بر حسب درجه حرارت آزمایش برای آن فولاد رسم شده و با منحنی مشابه برای فولاد ترد نشده مقایسه گردد. به بیان دیگر نتیجه حاصل از انجام فقط یک آزمایش ضربه در دمای اتاق ممکن است نه تنها تردی را دقیقاً مشخص نکند بلکه همراه کننده نیز باشد. این مطالب در شکل ۴۱ نشان داده شده است. در این شکل فولادهای فرضی A و B با دورفتار کاملاً متفاوت مقایسه شده‌اند. دمای تبدیل برای فولاد A در حدود ۵۹- درجه سانتیگراد (۷۵- درجه فارنهایت) است که پس از ترد شدن به تقریباً ۲- درجه سانتیگراد (۲۵+ درجه فارنهایت) افزایش می‌یابد. از طرف دیگر فولاد B دارای درجه حرارت تبدیلی در حدود ۱۸- درجه سانتیگراد (صفر درجه فارنهایت) بوده که با ترد شدن به تقریباً ۳۸ درجه سانتیگراد (۱۰۰ درجه فارنهایت) افزایش پیدا می‌کند. گرچه میزان جابجایی درجه حرارت تبدیل برای هر دو نوع فولاد تقریباً یکسان و برابر ۵۶ درجه سانتیگراد (۱۰۰ درجه فارنهایت) است

^۱-Coherency

ولی همانطور که از شکل فوق مشخص است در صورتی که فولادهای ترد شده A و B تحت آزمایش ضربه در دمای اتاق قرار بگیرند انرژی لازم برای شکست فولاد B به مراتب کمتر از انرژی لازم برای شکست فولاد A می‌باشد. به بیان دیگر نتایج به دست آمده از فقط یک آزمایش ضربه در دمای اتاق بر روی فولادهای A و B نشان می‌دهد که فولاد A اساساً ترد نشده در حالی که فولاد B کاملاً ترد شده است. در صورتی که واقعیت امر چنین نیست و هر دو فولاد به یک میزان ترد شده اند. اما از آنجائی که فولاد A دارای تافنس بالایی است (درجه حرارت تبدیل بسیار کم) پس از ترد شدن نیز از خود تافنس خوبی نشان می‌دهد [۲].



شکل ۴۱: مقایسه جابجایی درجه حرارت تبدیل در اثر سرد شدن برای دو فولاد فرضی A و B [۲].

بطور کلی فولادهای کوئنچ و تمپر شده نسبت به سه نوع تردی حساس هستند، یکی در اثر بازگشت در دامنه حرارتی ۳۵۰-۲۶۰ درجه سانتیگراد (۷۰۰-۵۰۰ درجه فارنهایت) که به تردی ۳۵۰ درجه سانتیگراد، (تردی ۵۰۰ درجه فارنهایت) و به تردی مارتنزیت تمپر شده^۱ موسوم است و بطور خلاصه با TME نشان داده می‌شود. دیگری تردی در اثر حرارت دادن در محدوده حرارتی ۵۷۵-۳۷۵

۱-Tempered Martensite Embrittlement



درجه سانتیگراد (۷۰۶ تا ۱۰۷۰ درجه فارنهایت) و یا آهسته سرد کردن از دامنه حرارتی فوق که به تردی بازگشتی^۱ معروف است و با TE نشان داده می‌شود. نوع سوم تردی ناشی از تشکیل نیتريد آلومینیم^۲ می‌باشد. در ادامه انواع مختلف تردی، مشخصات عمومی و مکانیزم به وجود آمدن آنها مورد بررسی قرار می‌گیرند [۲].

۸-۶-۱-۲- تردی مارتنزیت تمپر شده (TME)، تردی ۳۵۰°C، (تردی ۵۰۰°F)

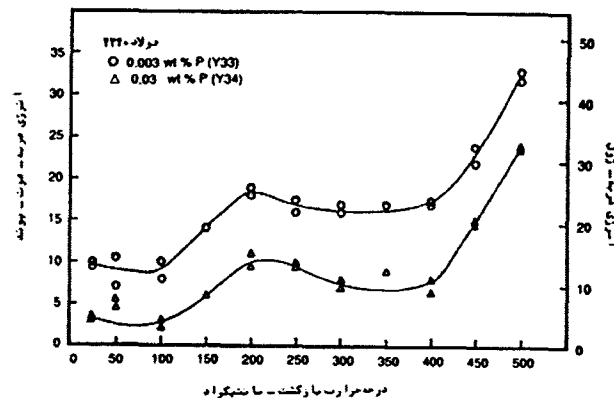
این نوع تردی در بیشتر فولادهای ساده کربنی، کم آلیاژ و فولادهای ابزار و همچنین فولادهای ساختمانی که پس از کوئنچ شدن در محدوده حرارتی ۲۶۰-۳۵۰ درجه سانتیگراد بازگشت داده شده باشند دیده می‌شود. دامنه حرارتی مربوط به این نوع تردی تقریباً منطبق به محدوده حرارتی مربوط به تجزیه آستنیت باقیمانده می‌باشد (شکلها ی ۱۹ و ۲۵). بنابراین به احتمال بسیار قوی استحاله فوق نقش تعیین کننده ای را در این نوع تردی ایفاء می‌کند. در همین رابطه مطالعات ساختار میکروسکوپی که به کمک میکروسکوپ الکترونی که بر روی فولادهای کوئنچ و کوئنچ-تمپر شده انجام گرفته نشان می‌دهد که در فولادهای کوئنچ شده فیلم نازکی از آستنیت باقیمانده در بین صفحات مارتنزیتی وجود دارد که پس از تمپر شدن در دامنه حرارتی ۲۰۰-۳۰۰ درجه سانتیگراد به فریت و سمنتیت تجزیه می‌شود. سمنتیت حاصل به صورت نوار نازک و ممتدی در بین صفحات مارتنزیتی تشکیل می‌شود.

آزمایشهایی که بر روی فولادها با درصدهای مختلف فسفر انجام گرفته نشان می‌دهد که با افزایش درصد فسفر تافنس ضربه برای تمامی دماهای بازگشت کاهش می‌یابد (شکل ۴۲). شکست فولادهای فسفردار کوئنچ و تمپر شده عمدتاً بین دانه‌ای و در امتداد مرز دانه‌های آستنیت اولیه رخ می‌دهد (شکل ۴۳). از اینرو گفته می‌شود که کاهش تافنس ناشی از رسوب اتمهای فسفر در مرز دانه‌های آستنیت در ضمن آستنیت کردن می‌باشد. بنابراین رسوبات فسفر در مرز دانه‌های آستنیت در ضمن بازگشت به وجود نیامده بلکه قبل از کوئنچ کردن وجود داشته است. مطالعات انجام گرفته بر روی فولادها با درصد بسیار کم فسفر نشان می‌دهد که پس از اینکه فولاد مارتنزیت شده در دامنه حرارتی TME تمپر شود، کاهش استحکام به ضربه قابل توجه نمی‌باشد. بعلاوه گزارش شده که درصد شکست بین دانه ای در فولادهای فسفرداری که در دامنه حرارتی TME تمپر شده اند بمراتب بیشتر از حالتی است که در دمائی خارج از محدوده حرارتی TME بازگشت داده شوند. بنابراین به نظر

۱-Temper Embrittlement

۲-Aluminum nitride

می رسد که حضور فسفر در ایجاد تردی در دامنه حرارتی فوق دخالت دارد. به بیان دیگر، اثرات متقابل فسفر و سمنتیت بر همدیگر لازمه تردی TME می باشد.



شکل ۴۲: انرژی ضربه (آزمایش چاری) در درجه حرارت اتاق بر حسب درجه حرارت بازگشت برای فولاد ۴۳۴۰ حاوی مقادیری مختلف فسفر، درجه حرارت آستنیتیزه کردن ۸۷۰ درجه سانتیگراد (۱۵۹۸ درجه فارنهایت)، محیط کوئنچ شده: روغن، زمان بازگشت در هر درجه حرارت، یک ساعت [۲].



شکل ۴۳: شکست بین دانه ای فولاد ۴۳۴۰ حاوی ۰/۰۳ درصد فسفر پس از کوئنچ کردن و تمپر شدن به مدت یک ساعت در ۴۰۰ درجه سانتیگراد (۷۵۲ درجه فارنهایت) نمونه توسط نیروی ضربه ای در درجه حرارت اتاق شکسته شده [۲].

اگر یک فولاد ترد شده در دامنه حرارتی ۲۶۰-۳۵۰ درجه سانتیگراد را در دمائی بالاتر از ۳۵۰ درجه سانتیگراد حرارت دهیم تردی آن حذف شده و بنابراین تافنس آن به مقدار اولیه برمی گردد. حرارت دادن مجدد فولاد فوق در محدوده حرارتی ۲۶۰-۳۵۰ درجه سانتیگراد منجر به ترد شدن



مجدد نخواهد شد. از اینرو این نوع تردی را گاهی تردی غیربرگشت می‌نامند. گفته می‌شود که حرارت دادن فولاد در دمائی بالاتر از ۳۵۰ درجه سانتیگراد احتمالاً باعث کاهش و یا حذف پیوستگی فیلم نازک سمینتیت در فصل مشترکهای صفحات مارتنزیتی خواهد شد که برگشت آن به حالت اولیه امکان پذیر نخواهد بود [۲].

۲-۸-۶-۲- تردی بازگشتی

تردی بازگشتی تحت شرایط زیر ممکن است به وجود آید:

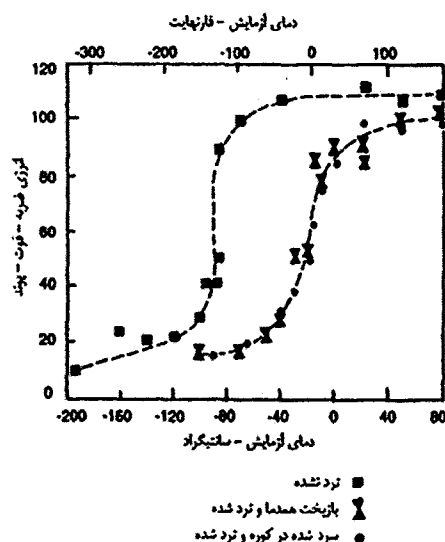
۱- در اثر حرارت دادن ایزوترمال فولاد در دامنه حرارتی ۳۷۵ تا ۵۷۵ درجه سانتیگراد، بدون توجه به سرعت سرد شدن

۲- در اثر حرارت دادن فولاد در دمائی بالاتر از ۵۷۵ درجه سانتیگراد و سپس آهسته سرد کردن آن در محدوده حرارتی ۳۷۵ تا ۵۷۵ درجه سانتیگراد.

در حالت دوم، موقعی که فولاد از دامنه حرارتی تردی سریع عبور کند (مثلاً کوئنچ شدن در آب) امکان ترد شدن آن وجود ندارد. از طرف دیگر سرد کردن سریع در حالت اول از به وجود آمدن تردی نمی‌تواند جلوگیری کند. بنابراین بطور خلاصه وارد شدن به محدوده حرارتی تردی از دماهای پائین (در حرارت دادن و نگهداشتن در دامنه حرارتی فوق) و یا دماهای بالا (در آهسته سرد کردن) نتیجه یکسان خواهد داشت. این موضوع در رابطه با فولاد SAE ۳۱۴۰ با $0.65\%Cr$ و $1.5\%Ni$ در شکل ۴۴ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با حرارت دادن ایزوترمال در محدوده حرارتی تردی (منحنی ▲) و یا آهسته سرد کردن فولاد در دامنه حرارتی فوق (منحنی ●) درجه حرارت تبدیل به یک میزان افزایش می‌یابد. سینتیک تردی حرارتی نسبت به درجه حرارت و زمان به نحوی است که تردی در ۵۵۰ درجه سانتیگراد (۱۰۲۲ درجه فارنهایت) در حداقل زمان به وجود می‌آید. مطالعات در این زمینه نشان می‌دهد که برای مشاهده اولیه اثرات تردی در ۵۵۰ درجه سانتیگراد زمانی در حدود یک ساعت کافی است. در حالی که در حوالی ۲۷۵ درجه سانتیگراد که پائینترین درجه حرارت در دامنه حرارتی تردی است صدها ساعت حرارت دادن لازم است.

یکی از مهمترین مشخصه‌های تردی حرارتی طبیعی برگشت پذیری آن است. اگر فولادی که در اثر قرار گرفتن در دامنه حرارتی تردی و یا عبور کردن از آن ترد شده باشد را تا بالاتر از ۵۷۵ درجه سانتیگراد حرارت داده و سپس آنرا از محدوده حرارتی ۳۷۵-۵۷۵ درجه سانتیگراد سریع عبور دهیم، تافنس فولاد افزایش یافته و به مقدار قبل از ترد شدن بر می‌گردد. اگر فولاد مزبور مجدداً در دامنه

حرارتی TE قرار گیرد (حرارت دادن ایزوترمال و یا سرد شدن آهسته) مجدداً ترد خواهد شد. از اینرو گاهی به این پدیده، تردی برگشت پذیر^۱ گفته می‌شود.



شکل ۴۴: تاثیر شرایط سرد کردن بر انرژی ضربه [۲].

تئوریهایی که برای توجیه تردی بازگشتی و مکانیزم آن ارائه شده بر اساس مطالعات ساختار میکروسکوپی و تعیین نوع و غلظت عناصر آلیاژی و یا ناخالصیهای متمرکز شده بر روی سطح مقطع شکست فولادهایی است که در محدوده حرارتی TE حرارت داده شده باشند. این تئوریها کاهش تافنس ضربه را عمدتاً ناشی از تشکیل یک فاز ثانویه نظیر فسفیدها^۲ و یا افزایش غلظت ناخالصیها به صورت نوار باریک و پیوسته ای در مرزدانه‌های آستنیت اولیه می‌دانند. به کمک اسپکتروسکوپ الکترونی اوزنه^۳ ترکیب شیمیایی لایه سطحی سطوح شکست فولادهای ترد شده از این طریق مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شده است که کاهش تافنس مستقیماً در ارتباط با افزایش غلظت ناخالصیها در حوالی مرز دانه‌های آستنیت اولیه می‌باشد.

۱-Reversible Embrittlement

۲-Phosphides

۳-Auger Electron spectroscopy



در دماهای بالاتر از ۵۷۵ درجه سانتیگراد با انحلال ناخالصیها، تجمع آنها در مرزدانه‌های آستنیت کاملاً از بین می‌رود (نظیر آنتیموان) و یا اینکه به مقدار بسیار زیادی کاهش می‌یابد (نظیر فسفر). در اثر سرد کردن سریع (مثلاً در آب) زمان جهت تجمع ناخالصیها در مرزدانه‌ها کافی نبوده و بنابراین فولاد ترد نخواهد شد. برعکس تحت شرایط سرد کردن آهسته ناخالصیها فرصت کافی جهت رسوب در مرزدانه‌های آستنیت را داشته و در نتیجه باعث ترد شدن آن می‌شوند. مخرب ترین ناخالصیها در این رابطه عبارتند از آنتیموان، فسفر، قلع و آرسنیک. مشخص شده که وجود مقدار بسیار کمی از عناصر فوق در حد ۱۰۰ ppm (۰/۰۱ درصد) و حتی در بعضی موارد کمتر از این حد می‌تواند منجر به ترد شدن فولاد شود.

نقش عناصر آلیاژی در ایجاد تردی بازگشتی کمتر از ناخالصیها نیست. در فولادهای ساده کربنی (Fe-C) تجمع ناخالصیهای مضر آنقدر کم است که منجر به تردی حرارتی نمی‌شود. در حالی که در حضور عناصر آلیاژی نظیر کروم، منگنز، نیکل و سیلیسیم تجمع ناخالصیهای فوق در مرزدانه‌ها شدیداً افزایش می‌یابد. بعلاوه در حضور ناخالصیهای مضر، عناصر آلیاژی محلول در مرزدانه‌های آستنیت تجمع خواهند کرد. بنابراین چنین استنباط می‌شود که ناخالصیها و عناصر آلیاژی محلول در فاز آلفا متقابلاً بر همدیگر اثر گذاشته و تجمع یکدیگر را در مرزدانه‌های آستنیت تشدید می‌کنند. توجیه دیگری در این رابطه می‌گوید که بعضی اتمهای ناخالصی و عناصر آلیاژی به مراتب بیشتر از اتمهای ناخالصی و آهن همدیگر را جذب می‌کنند. بنابراین حضور عناصر آلیاژی فوق در فولاد منجر به تشدید تجمع ناخالصیها و اتمهای عناصر آلیاژی در مرزدانه‌های آستنیت می‌شود. معمولاً وجود چند عنصر آلیاژی تجمع ناخالصیها را بیشتر می‌کند. به عنوان مثال تجمع آنتیموان در فولادهای آلیاژی نیکل-کروم دار بمراتب بیشتر از تجمع آن در فولادهای کروم و یا نیکل دار می‌باشد. گزارش شده، در صورتی که درصد منگنز کمتر از ۰/۵ درصد باشد فولاد نسبت به تردی حرارتی حساس نیست. همچنین مشخص شده که اگر مولیبدن فولاد بین ۰/۲ تا ۰/۴ درصد باشد از ترد شدن بازگشتی جلوگیری می‌کند. حضور بیشتر از ۰/۴ درصد مولیبدن اثر معکوس دارد.

۲-۸-۶-۳- تردی نیتريد آلومينيم

یکی دیگر از انواع تردی که گاهی در فولادهای سخت شده مشاهده می‌شود ناشی از رسوب نیتريد آلومينيم در مرزدانه‌های آستنیت اولیه می‌باشد. در حالی که توزیع ذرات بسیار ریز و ظریف نیتريد آلومينيم در مرزدانه‌های آستنیت برای کنترل و رشد دانه‌ها و بنابراین تهیه فولادهای ریزدانه



موثر و مورد نظر است. رسوبات صفحه ای شکل نیتريد آلومينيم که در حين سرد شدن در درجه حرارت انجماد و يا در ضمن آستنيته کردن در دمای نسبتاً بالا تشکیل شده باشند تافنس ضربه ای را به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. شکست بين دانه ای ناشی از وجود ذرات نیتريد آلومينيم در مرزدانه‌های آستنيته اغلب در فولادهای ساده کربنی که از طريق ريختگري تهیه شده باشند مشاهده می‌شود. البته این نوع شکست در فولادهای ساده کربنی کارپذیر^۱ نیز دیده شده است.

۲-۹-رسوب سختی

یکی از روشهای افزایش استحکام مواد فلزی، اضافه کردن ذره‌های سخت و پراکنده به آنها است. گرچه این عمل را می‌توان با مخلوط کردن انجام داد ولی مخلوط کردن همیشه عملی نیست. با انتخاب مناسب عناصر آلیاژی اضافه شونده و عملیات حرارتی، می‌توان توزیع مناسبی از ذرات فاز دوم را در زمینه‌ای که آن رسوبات را در خود حل کرده است پدید آورد. اگر با این عمل فلز استحکام یابد، این روش را رسوب سختی می‌نامند که روشی قابل استفاده در سطح وسیع برای استحکام بخشی مواد فلزی است [۲].

۲-۹-۱- محلول جامد

اگر ترکیب شیمیایی آلیاژ جامد تک فازی را بتوان در حد مجاز تغییر داد، طوری که باز هم آلیاژ به صورت تک فاز باقی بماند آن آلیاژ را محلول جامد می‌نامند. اگر فاز، بر مبنای عنصر حلال خالص باشد آن را محلول جامد انتهایی^۲ می‌نامند. اگر فاز، ساختار بلوری متفاوتی با ساختار بلوری اتمهای موجود (به صورت عناصر خالص) در محلول داشته باشد آن را محلول جامد واسطه^۳ می‌نامند [۶]. محلول جامد (انتهایی یا واسطه) می‌تواند با جایگزین شدن یک اتم حلال واقع در مکان اتمی شبکه، با یک اتم محلول تشکیل شود؛ به این ترتیب محلول جامد جانشینی^۴ حاصل می‌شود. اما اگر اتم محلول در بین اتمهای حلال قرار گیرد یعنی در فضای بین آنها، آن را محلول جامد بین نشینی^۵

۱-Wrought

۲-Terminal Solid Solafion

۳-Intermediafe Solid Solution

۴-Substitutional

۵-Interstitual



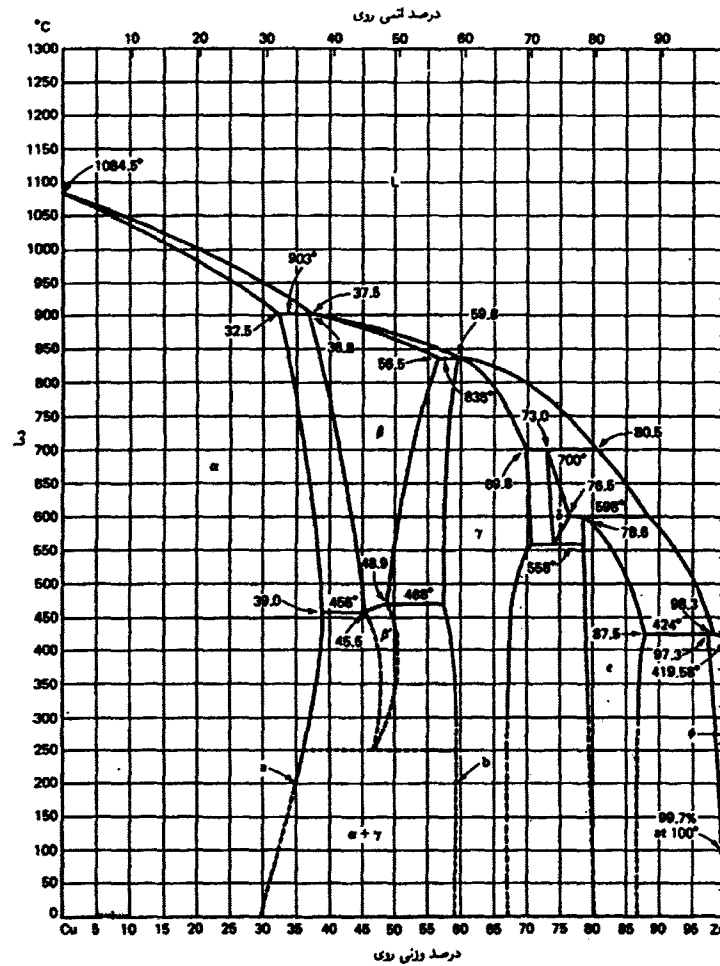
می‌نامند. تشکیل این نوع محلول جامد ایجاب می‌کند که اتم محلول نسبتاً کوچک باشد، که این امر معمولاً در مورد عنصرهای H، C، N، B و شاید O صادق است.

۲-۹-۲- حد حلالیت

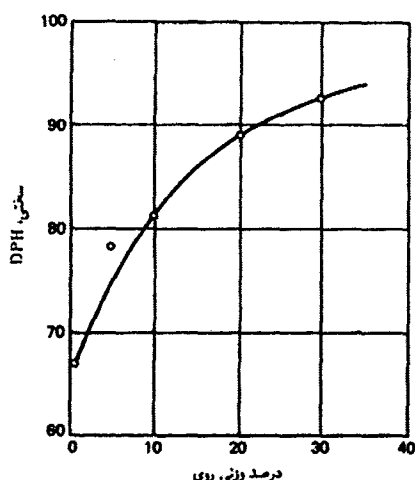
وجود اتمهای با اندازه و ساختار الکترونی مشابه و ساختار بلوری یکسان به تشکیل محلولهای جامد نهایی کمک می‌کند. نیکل و مس از لحاظ اندازه اتمی فقط ۲/۵٪ با هم اختلاف دارند و همچنین دارای ظرفیت‌های مشابه بوده و هر دو دارای ساختمان FCC هستند. اگر این سه عامل کاملاً یکسان نباشند حلالیت محدودی وجود خواهد داشت. این امر را می‌توان به صورت زیر تشریح کرد. در حلالی خالص چند اتم خارج شده، اتمهای محلول به جای آنها می‌نشینند و مخلوط حاصل به تعادل می‌رسد و محلول جامد تشکیل می‌دهد. سپس چند اتم دیگر جانشین می‌شوند تا غلظت اتمهای محلول بالا رود. اما سرانجام غلظتی از اتمهای محلول حاصل خواهد شد که وقتی چند اتم حلال خارج شوند و اتمهای محلول جای آنها بنشینند، زمینه دیگر نتواند اتم محلولی را در خود حل کند و این اتمهای محلول اضافی دفع شوند. این اتمهای دفع شده ممکن است گرد هم آیند و بلوری کوچک از جنس خود تشکیل دهند، یا شاید چند اتم حلال را نیز در خود حل کنند، یا با چند اتم حلال واکنش کرده، فازی با ساختار بلوری متفاوت با ساختار بلوری هر یک از فلزات خالص تشکیل دهند (یعنی ترکیب واسطه‌ای حاصل شود) [۶].

ترکیبی که در آن، این رسوب گذاری رخ می‌دهد، حد حلالیت می‌باشد که در نمودار فازی، یک طرف منطقه دو فازی را محدود می‌کند. این مساله در شکل ۴۶ برای سیستم مس-روی نشان داده شده است. به طور عنوان مثال در 200°C حداکثر مقدار روی که می‌توان به مس اضافه کرد و حالت تعادل تک فازی با شبکه FCC همچنان وجود داشته باشد ۳۵٪ (نقطه a) است. اگر بیش از این مقدار روی به آلیاژ اضافه شود مقدار اضافه بر ۳۵٪ به صورت ترکیب بین فلزی γ که حاوی ۵۹٪ روی است (نقطه b) ظاهر می‌شود. همان گونه که مرز فازی نشان می‌دهد حد حلالیت کاملاً به دما وابسته است. ترکیب فاز γ که با α در تعادل است نیز به دما بستگی دارد.

حتی اگر حلالیت محدود باشد، در گستره محلول جامد نیز خواص به صورت آهسته و یکنواخت تغییر می‌کنند. مثلاً تغییرات سختی بر حسب مقدار روی، در گستره α در شکل ۴۷ نشان داده شده است [۶].



شکل ۴۶: نمودار فازی Cu-Zn که حد حلالیت روی در مس را نشان می‌دهد.



شکل ۴۷: تغییرات سختی برحسب مقدار روی در آلیاژهای محلول جامد Cu-Zn
در منطقه محلول جامد نهایی α

۲-۹-۳- رسوب گذاری محلول جامد

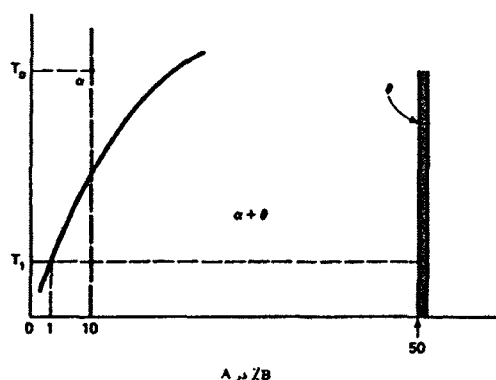
اکنون مکانیسم رسوب گذاری محلول جامد فوق اشباع مورد بررسی قرار می گیرد. فرض می شود که سیستم A-B طوری است که قسمتی از نمودار فازی آن به صورت نشان داده شده در شکل ۴۸ است. آلیاژی حاوی ۱۰٪ ماده B تا دمای T_1 ، یعنی منطقه تک فازی محلول جامد گرم می شود تا تعادل حاصل شود. سپس به سرعت تا دمای T_1 ، که در آن حالت تعادلی مخلوط دو فازی α و θ وجود دارد سرد می شود. فرض می کنیم آهنگ سرد کردن از T_1 به حد کافی سریع باشد که هیچ گونه تغییری در α ، بجز کاهش دمای آن تا T_1 ، اتفاق نیفتد. بنابراین ابتدا در T_1 فاز α ، فوق اشباع است، زیرا این فاز ۱۰٪ ماده B دارد، ولی حد حلالیت B در A در T_1 فقط ۱٪ است. با گذشت زمان در دمای T_1 مقداری از اتمهای B با اتمهای A واکنش کرده، ذرات θ را تشکیل می دهند و به این ترتیب مقدار B در α به ۱٪ می رسد.

شکل ۴۹ تصویر شماتیک حرکت های اتمی را که ممکن است در تشکیل بلورهای نوع θ از فاز فوق اشباع انجام شود نشان می دهد. ملاحظه می شود که گروه کوچکی از اتمها منطقه ای با شبکه و ترکیب θ را تشکیل می دهند. به این ترتیب مقدار B در فاز α ، در اطراف θ کاهش می یابد، به طوری که یک شیب غلظتی از عنصر B در فاز α بین مناطق دور از θ و مناطق نزدیک θ وجود خواهد داشت. سپس این شیب باعث می شد که اتمهای B به طرف فصل مشترک $\alpha - \theta$ حرکت کرده، در

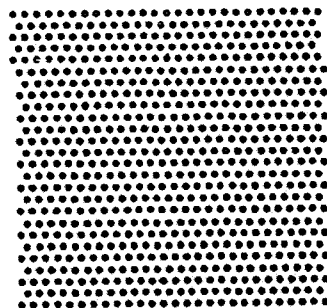


آنجا برای افزایش دادن اندازه بلور θ مکانهای شبکه‌ای را اشغال کنند. این شیب در شکل ۴۹ (و) برای مقطع نشان داده شده در شکل ۴۹ (ه) نمایش داده شده است. این تصاویر مراحل اولیه تشکیل رسوب را نشان می‌دهند.

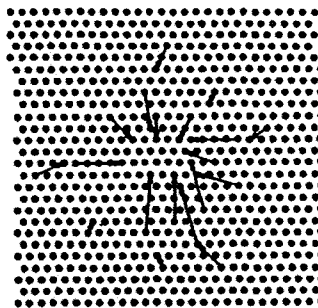
شکل ۵۰ به صورت شماتیک نشان می‌دهد که شیب غلظت در زمینه α با رشد رسوبها نیز حفظ می‌شود. این در واقع فرآیندی حالت پایدار است که آهنگ رشد را فرآیند نفوذ کنترل می‌کند. این آهنگ با عبارت $\exp(-Q/RT)$ به دما وابسته است که Q انرژی اکتیواسیون برای فرایند نفوذ، R ثابت جهانی گازها و T دمای مطلق است. سرانجام مناطق شیب غلظت بر روی مناطق رسوب های مجاور خود قرار می‌گیرد، شیب غلظت کاهش می‌یابد، آهنگ رشد کاهش پیدا می‌کند و بالاخره تعادل شیمیایی حاصل می‌شود که در آن حالت زمینه به صورت یکنواخت حاوی ۱٪ ماده B است [۶].



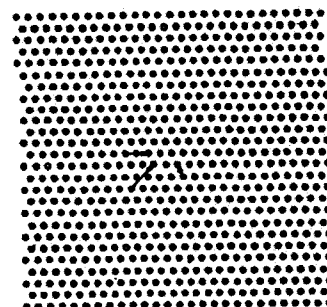
شکل ۴۸: نمودار فاز فرضی سیستم A-B کاهش حلالیت B در α با کاهش دما سبب می‌شود که آلیاژ حاوی ۱۰٪ ماده B در دمای بالا (یعنی T_1) به صورت تک فاز ولی در دمای پایین (T_0) دو فاز باشد.



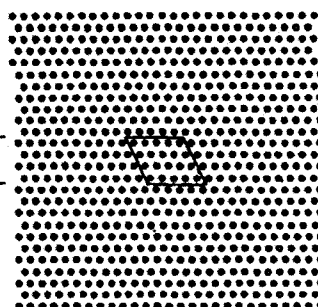
(الف) آلیه تصادفی B (سیاه) و A (سفید) حاوی ۱۰٪ ماده B



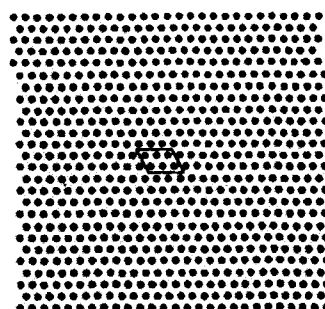
(د) انتهای مشخص شده به وسیله پیکان به مکانهای جدید می‌روند



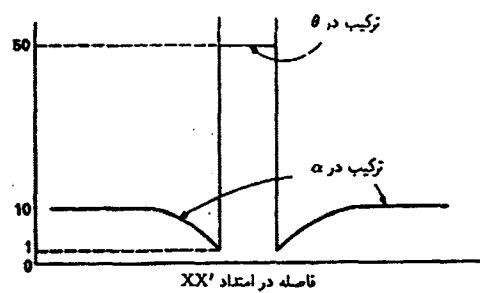
(ب) سه اتم نشان داده شده به مکانهای جدید منتقل می‌شوند



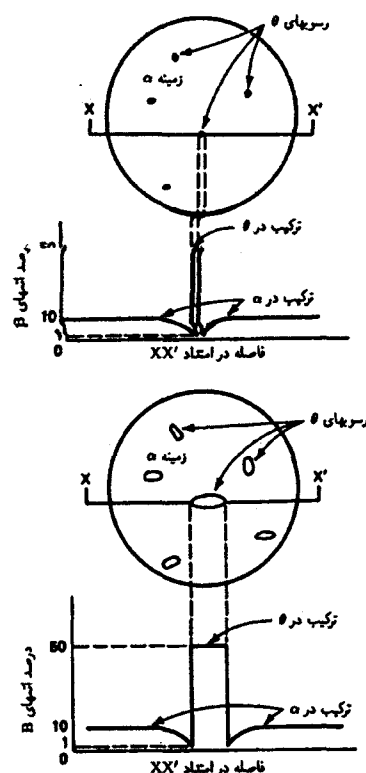
(ه) بلور θ اکنون از نظر اندازه بزرگ شده است



(ج) رسوب ریز θ اکنون تشکیل شده است



شکل ۴۹: نمایش شمایی مکانیسم احتمال رسوب گذاری از محلول جامد فوق اشباع از (الف) به (ه) زمان افزایش می‌یابد و در (ه) هنوز تعادل حاصل نشده است.



شکل ۵۰: نمایش شمایی ابقای شیب غلظت در زمینه α با رشد رسوب

۲-۹-۴- تأثیر رسوب گذاری بر خواص

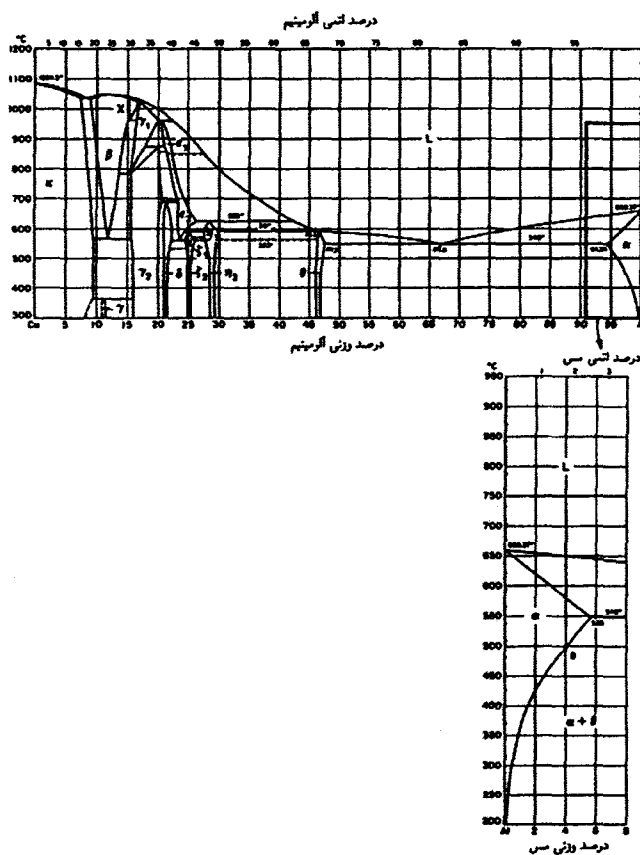
برای نشان دادن تغییراتی که ممکن است در حین رسوب گذاری اتفاق افتد، رفتار آلیاژ Al-4Cu را در نظر می‌گیریم. قسمتهای مورد نظر در نمودار فازی شکل ۵۱ نشان داده شده است. اگر این آلیاژ به مدت چند ساعت در 550°C حرارت داده شود دارای ساختاری تک فاز خواهد بود. سپس اگر این آلیاژ به سرعت (مثلاً از طریق سرد کردن سریع در آب) تا 20°C سرد شود این ساختار تک فاز باقی می‌ماند و در نتیجه محلول جامد فوق اشباع حاصل می‌شود. سپس اگر آلیاژ تا دمای متوسط (کمتر از 50°C ، نقطه a در شکل ۵۱) گرما داده شود و خواص آن برحسب زمان اندازه‌گیری شود، شکل ۵۲ دست می‌آید [۶].

همانطور که ملاحظه می‌شود، سختی و استحکام از مقداری ماکزیمم می‌گذرند و منحنی کاملاً به دما بستگی دارد. ماکزیمم منحنی در حالتی حاصل می‌شود که رسوب به اندازه و توزیع بحرانی برسد.

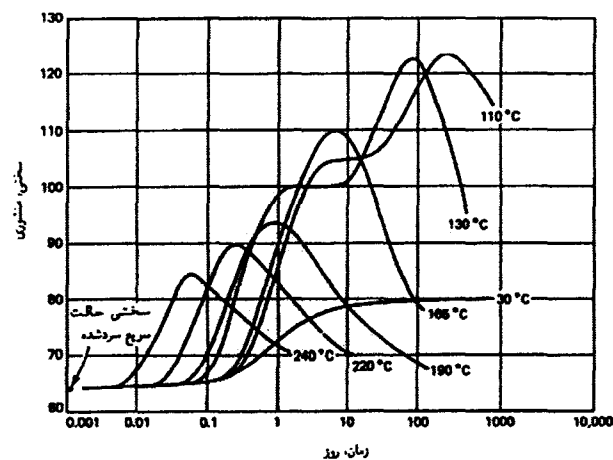


وقتی ذرات رسوب درشت شوند، پراکنده‌تر از آن اند که بتوانند مانع حرکت نابجایی‌ها شوند و در نتیجه سختی کاهش می‌یابد. تشکیل این ذرات با اندازه و توزیع بهینه در دماهای بالا سریعتر است طوری که با افزایش دمای رسوب گذاری، ماکزیمم سختی منحنی در زمانهای کوتاه تری پدید می‌آید. اما مقدار رسوبی که تشکیل می‌شود با افزایش دما کاهش پیدا می‌کند (میزان فوق اشباع کاهش می‌یابد) و در نتیجه اندازه حداکثر سختی نیز کاهش می‌یابد. همچنین انتظار می‌رود که در دمای مفروض رسوب گذاری، هر چه مقدار عنصر آلیاژی بیشتر باشد این ماکزیمم سریعتر حاصل شود، زیرا میزان فوق اشباع بیشتر است و بنابراین نفوذ سریعتر خواهد بود.

این مکانیزم استحکام بخشی را رسوب سختی می‌نامند. اگر رسوب گذاری در دمای محیط اتفاق افتد این استحکام بخشی را پیرسختی می‌نامند [۶].



شکل ۵۱: نمودار فازی Al-Cu؛ گوشه پراآلومینیم نمودار را به صورت بزرگ شده نشان داده شده است [۶].



شکل ۵۲: تغییرات سختی بر حسب زمان برای آلیاژ Al-Cu. آلیاژ به مدت حداقل ۴۸ ساعت در ۵۲۰°C عملیات گرمایی محلول شده، سپس به سرعت (از طریق سرد کردن در آب) تا ۲۰°C سرد شده است [۶].

۳- راههای جلوگیری از تغییر شکل، ترک برداشتن و یا ایجاد تنشهای داخلی در ضمن عملیات حرارتی

یکی از مهمترین مسائل و مشکلات عملیات حرارتی، تغییرات ابعاد در ضمن گرم و سرد کردن قطعات است. از جمله اثرات این پدیده تنشهای حاصل از انقباض ها و انبساط های غیر یکنواخت در قطعه می باشد. هنگامی که یک قطعه فولادی از دمای اتاق تا ناحیه آستنیت گرم شده و یا از دمایی در ناحیه آستنیت تا دمای اتاق سرد شود، دو نوع تغییر ابعاد در آن به وجود می آید: یکی انبساط و انقباض حرارتی که به ترتیب ناشی از گرم و سرد شدن بوده و دیگری انقباض و انبساط استحاله ای که به ترتیب شامل تشکیل و تجزیه آستنیت است. تغییر حجم در انواع استحاله های ممکن در سرد و گرم شدن فولاد که منجر به انقباض و انبساط استحاله ای می شود در جدول ۱ آورده شده است.



جدول ۱: تغییر حجم در اثر استحاله بین فازهای مختلف [۲].

نوع دگرگونی	تغییر حجم (%)
سمتیت کروی ← آستنیت	$-4/64 + 2/21 (\%C)$
آستنیت ← مارتنزیت	$4/64 - 0/53 (\%C)$
سمتیت کروی ← مارتنزیت	$1/68 (\%C)$
آستنیت ← بینیت پایینی	$4/64 - 1/43 (\%C)$
سمتیت کروی ← بینیت پایینی	$0/78 (\%C)$
آستنیت ← بینیت بالایی	$4/64 - 2/21 (\%C)$
سمتیت کروی ← بینیت بالایی	

مهمترین اثر ناشی از تغییر ابعاد در ضمن عملیات حرارتی، ایجاد تنش در قطعه است. در صورتی که تنش های حاصل به اندازه کافی زیاد باشد (بیشتر از حد تسلیم و یا تنش سیلان) می تواند منجر به تغییر شکل دائمی قطعه و یا حتی ترک برداشتن آن در ضمن عملیات حرارتی شود. پدیده اخیر به ترک برداشتن در اثر سریع سرد شدن^۱ موسوم است. ترک های حاصل از سریع سرد کردن اساساً به صورت بین دانه ای می باشند. در مواردی که تنش های حاصل کم باشند (کمتر از حد تسلیم و یا تنش سیلان) به صورت تنش های داخلی در قطعه باقی می ماند که با گذشت زمان ممکن است منجر به تغییر شکل یا شکسته شدن قطعه شود و یا اینکه موجب انهدام زودرس قطعه در هنگام کار گردد.

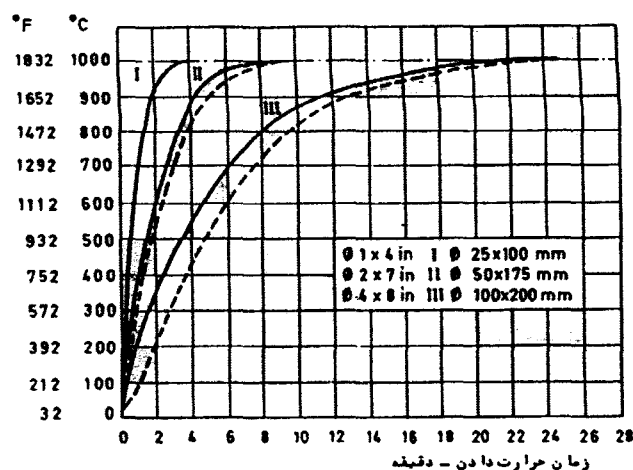
۳-۱- کنترل سرعت حرارت دادن

اگر سرعت حرارت دادن تا درجه حرارت سخت کردن خیلی زیاد باشد مقاطع مختلف قطعه که دارای ابعاد مختلف هستند با سرعت های متفاوت گرم می شوند. این پدیده که بستگی به نوع کوره عملیات حرارتی نیز دارد در شکل های ۵۳ و ۵۴ نشان داده شده است. در مراحل اولیه حرارت دادن اختلاف دماهای سطح و مرکز برای مقاطع بزرگ زیاد بوده و با گذشت زمان و رسیدن به درجه حرارت آستنیت کاهش می یابد. با پیش گرم کردن قطعات در درجه حرارتی درست زیر درجه حرارت استحاله Ac_1 فولاد، تفاوت های سرعت های گرم شدن مقاطع مختلف را می توان به حداقل رساند. برای این منظور، قطعه را به آهستگی در محدوده حرارتی ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده برای مدت زمان کافی نگه می دارند و پس از یکنواخت شدن دما در نقاط مختلف قطعه، مجدداً آن را تا

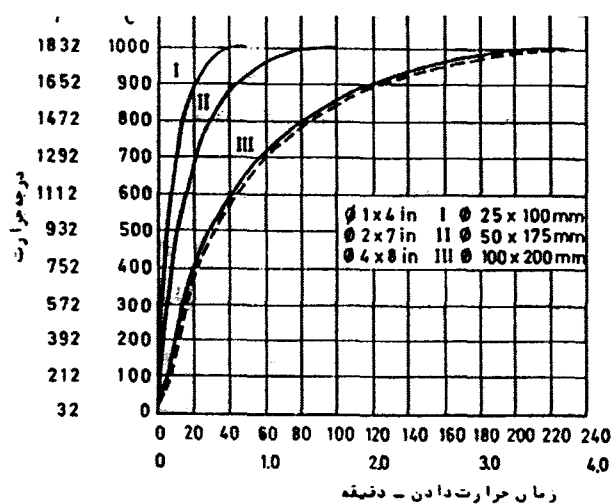
۱-Quench Cracking



درجه حرارت سخت کردن حرارت می دهند. در هنگام آستنیتیزه کردن در کوره های موفلی می توان از پیشگرم کردن صرفنظر کرد، این در حالی است که پیشگرم کردن قطعات در رابطه با کارکردن با حمام های نمک ضروری است. تحت شرایطی که قطعات کوچک بوده، شکل متقارن داشته باشند و یا اینکه تغییرات ابعاد در نقاط مختلف آنها زیاد نباشد، حتی در هنگام آستنیتیزه کردن در حمام های نمک نیز می توان تا حدودی از پیشگرم کردن صرفنظر کرد [۶].



شکل ۵۳: منحنی های گرم شدن برای میله های فولادی که در حمام نمک در ۱۰۰۰ درجه حرارت داده شوند.
خط ممتد: درجه حرارت سطح خط منقطع: درجه حرارت مرکز [۲].



شکل ۵۴: منحنی های گرم شدن برای میله های فولادی که در جعبه سمانتاسیون حاوی براده چدن در کوره موفلی در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد گرم شوند [۲].

خط ممتد: درجه حرارت سطح خط منقطع: درجه حرارت مرکز

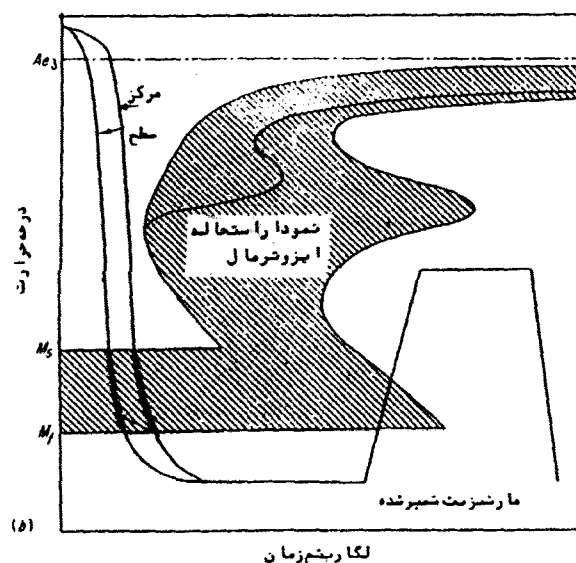


۳-۲- روش های سرد کردن کنترل شده

روش سرد کردن که به منظور سخت کردن فولاد استفاده می شود بستگی به نوع فولاد، شکل قطعه، ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نظر پس از عملیات حرارتی دارد. سه روش سرد کردن وجود دارد که عبارتند از:

- کوئنچ کردن مستقیم (کوئنچ یک مرحله ای)
- مارتمپرینگ^۱
- آستمپرینگ^۲

در روش اول که مستلزم سریع سرد کردن فولاد از درجه حرارت آستنیتیزه کردن تا زیر درجه حرارت M_f می باشد، سطح و مرکز قطعه با آهنگ های متفاوت سرد شده و بنابر این تشکیل مارتنزیت به طور همزمان در نواحی مختلف انجام نمی شود (شکل ۵۵). این پدیده منجر به ایجاد تنش های داخلی در قطعه می شود و برای کاهش اثرات زیان آور تنش های داخلی می توان تحت شرایط خاص از دو روش دیگر استفاده نمود [۲].



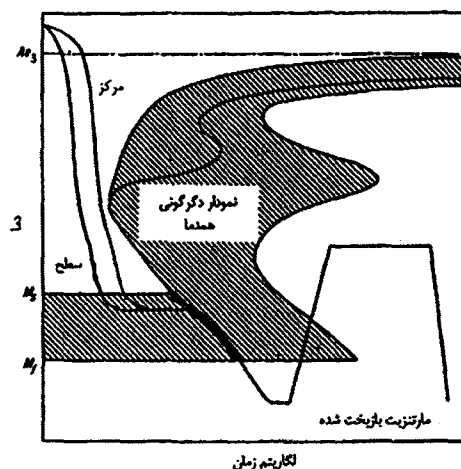
شکل ۵۵: نمای شماتیک از عملیات کوئنچ یک مرحله ای [۲].

۱-Martempering
۲-Austempering

۳-۲-۱- مارتمپرینگ

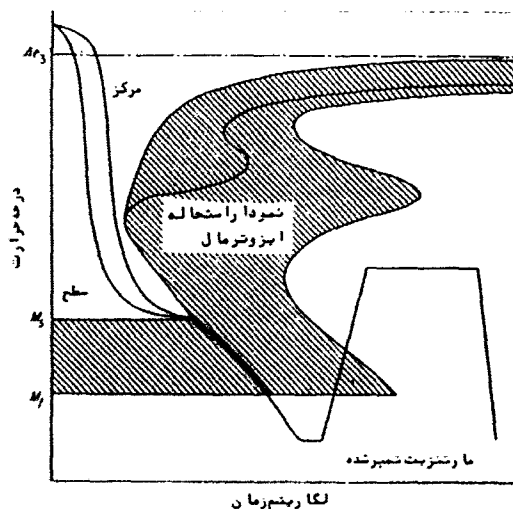
عملیات حرارتی مارتمپرینگ یا کوئنچ منقطع یا مارکوئیچینگ^۱ شامل مراحل زیر می‌باشد:

- ۱- آستنیت‌ه کردن فولاد
 - ۲- کوئنچ کردن فولاد در روغن داغ و یا نمک مذاب تا درجه حرارت درست بالاتر (یا درست پائینتر) از درجه حرارت شروع تشکیل مارتنزیت (M_s)
 - ۳- نگه داشتن در محیط کوئنچ شده تا اینکه درجه حرارت در تمام قسمتهای آن یکنواخت شود. زمان نگهداری به موقعیت نمودار TTT و ضخامت قطعه دارد ولی معمولاً بین ۲ تا ۴ دقیقه برای هر ۱۰ میلیمتر ضخامت می‌باشد (زمان کمتر برای حالتی است که فولاد در دمای کمتر آستنیت‌ه شود، در حالی که زمان بیشتر برای مواردی است که فولاد در دماهای بالاتر آستنیت‌ه شده باشد).
 - ۴- سردکردن با سرعت متوسط (معمولاً در هوا) به نحوی که مرکز و سطح همزمان سرد شده و مارتنزیت شوند
 - ۵- تمپر کردن قطعه به منظور افزایش تافنس.
- شکل های ۵۶ و ۵۷ مراحل مختلف مارتمپرینگ را بطور شماتیک بر روی نمودار TTT نشان می‌دهند.



شکل ۵۶: عملیات حرارتی مارتمپرینگ همراه با نمودار TTT برای فولاد متوسط کربن [۲].

^۱-Marquenching



شکل ۵۷: نمایش شماتیک برای عملیات حرارتی مارتمپرینگ اصلاح شده همراه با نمودار TTT برای فولاد متوسط کربن [۲].

همان گونه که از شکل ۵۶ و ۵۷ مشخص است، در مرحله اول سرد شدن، سطح و مرکز نمونه با دو آهنگ متفاوت سرد می‌شوند در حالی که در ضمن دگرگونی آستنیت به مارتنیت تمام قسمتهای قطعه تقریباً به طور همزمان سرد شده و بنابر این دگرگونی در سطح و مرکز همزمان انجام می‌شود؛ از اینرو احتمال ترک خوردن، اعوجاج و ایجاد تنش در قطعه به حداقل می‌رسد.

جدول ۲، خواص مکانیکی فولاد ۱۰۹۵ را پس از مارتمپر شدن و مارتنیت و تمپر شدن به روش معمولی نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود برای سختی یکسان، مقاومت به ضربه فولاد مارتمپر و تمپر شده به مراتب بیشتر از فولاد کوئنچ و تمپر شده است.

جدول ۲: خواص مکانیکی فولاد ۱۰۹۵ به روش مارتمپر و کوئنچ یک مرحله ای [۲]			
نوع عملیات حرارتی	سختی	مقاومت به ضربه	ازدیاد طول درصد
	HRC	Fb-lb	
کوئنچ در آب و تمپر شده	۵۳	۱۲	۰
مارتمپر و تمپر شده	۵۳	۲۸	۰



۳-۲-۲-آستمپرینگ

آستمپرینگ از جمله روش های دیگر عملیات حرارتی است که برای کاهش تنش های حاصل در ضمن سخت کردن فولادهای ساده کربنی جانشین کوئنچ کردن مستقیم می شود. شکل ۵۸ عملیات حرارتی آستمپرینگ را بصورت شماتیک نشان می دهد که شامل مراحل زیر است:

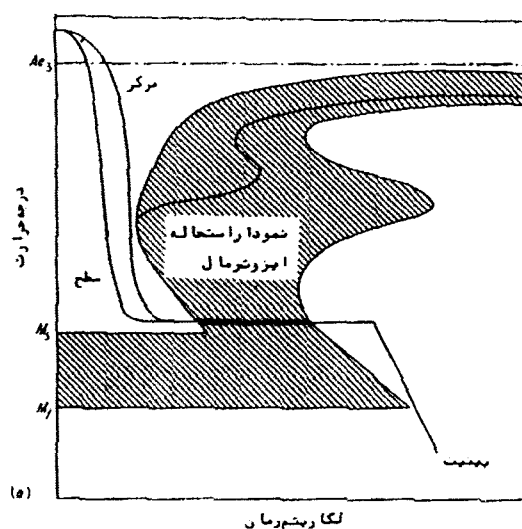
- ۱- آستنیتیزه کردن فولاد
- ۲- کوئنچ کردن در حمام نمک مذاب یا روغن داغ تا درجه حرارتی قبل از درجه حرارت شروع تشکیل مارتنزیت
- ۳- نگه داشتن در این مرحله به نحوی که استحاله آستنیت به بینیت کاملاً انجام شود
- ۴- سرد کردن در هوا تا درجه حرارت اتاق

هدف از انجام این عملیات حرارتی به جای کوئنچ و تمپر عبارتست از:

- افزایش استحکام به ضربه و انعطاف پذیری برای یک سختی مشخص و ثابت
- حذف و یا کاهش احتمال ترک برداشتن، تغییر شکل دادن و یا ایجاد تنش های داخلی در حین عملیات حرارتی.

خواص مکانیکی فولاد ۱۰۹۵ تحت شرایط آستمپرینگ و کوئنچ مستقیم و تمپر برای سختی یکسان در جدول ۳ مقایسه شده اند. علت افزایش تافنس و انعطاف پذیری به جایگزین شدن ساختار بینیتی به جای ساختار مارتنزیت مربوط می شود [۲].

جدول ۳: مقایسه خواص مکانیکی فولاد ۱۰۹۵ که به روشهای آستمپرینگ و کوئنچ یک مرحله ای عملیات حرارتی شده باشند [۲]			
نوع عملیات حرارتی	سختی	مقاومت به ضربه	ازدیاد طول در ۱ اینچ (%)
	HRC	Fb-۱b	
آستمپر شده	۵۲	۴۵	۱۱
کوئنچ در آب و تمپر شده	۵۳	۱۲	۰



شکل ۵۸: عملیات حرارتی آستمپرینگ فولاد با کربن متوسط همراه با نمودار TTT [۲].

۴- سخت کردن سطحی

در بسیاری از کاربردهای صنعتی به قطعاتی نیاز است که دارای سطح سخت بوده و در عین حال از چقرمگی یا تافنس ضربه ای خوبی برخوردار باشند. از جمله مواردی که می‌توان در این رابطه به عنوان مثال به آن اشاره کرد قطعاتی نظیر میل لنگ، میل بادامک و چرخ دنده ها می باشند که باید سطح بسیار سخت و مقاوم در برابر سایش داشته و در ضمن بسیار چقرمه و مقاوم در برابر ضربات وارده در حین کار باشند.

بسیاری از قطعات فولادی را می‌توان به نحوی عملیات حرارتی نمود که نهایتاً دارای مجموعه خواص فوق الذکر باشند. یعنی در حالی که از مقاومت به سایش خوبی برخوردارند دارای استحکام دینامیکی خوبی نیز باشند. این نوع عملیات حرارتی که اصطلاحاً به سخت کردن سطحی^۱ موسوم اند، آخرین عملیاتی هستند که باید در مرحله پایانی ساخت قطعه و پس از انجام تمام مراحل مربوط به شکل دادن نظیر ماشینکاری و غیره انجام گیرد.

روش های مختلف عملیات حرارتی که به کمک آنها می‌توان سطح قطعات را سخت کرد عمدتاً به دو دسته تقسیم می‌شوند. یکی عملیاتی که منجر به تغییر ترکیب شیمیایی سطح فولاد می‌شوند و به

^۱-Case hardening (Surface hardening)



عملیات حرارتی-شیمیایی^۱ موسومند، نظیر کربوره کردن^۲، نیتريد کردن^۳ و کربونیتريده کردن^۴ و دیگری روش هائی که بدون تغییر ترکیب شیمیائی سطح و فقط به کمک عملیات حرارتی که در لایه سطحی متمرکز شده و باعث سخت شدن سطح می شوند و به عملیات حرارتی موضعی^۵ موسومند، نظیر سخت کردن شعله ای^۶ و سخت کردن القائی^۷.

در ادامه روش های مختلف عملیات حرارتی سخت کردن سطحی با توجه به روش کار، مکانیزم سخت شدن، ساختمان میکروسکوپی و خواص مکانیکی حاصل مورد بررسی قرار خواهند گرفت. همچنین کاربرد، مزایا و معایب هر یک از این روش ها مختصراً بررسی خواهند شد.

۴-۱- کربوره کردن

هنگامی که یک قطعه فولاد کم کربن (مثلاً ۰/۱۵ درصد) را در مواد کربن دار مثلاً زغال قرار داده و در دمای بالایی نظیر ۹۲۵ درجه سانتیگراد (۱۷۰۰ درجه فارنهایت) حرارت دهیم کربن از ماده کربن دار به داخل سطح قطعه نفوذ می کند. گرچه عملیات فوق نیاز به زمان دارد ولی در مدت چند ساعت سطح قطعه مقدار قابل ملاحظه ای کربن (تا ۱/۲ درصد) جذب خواهد کرد. به این ترتیب قطعه ای ساخته می شود که مغز آن فولاد کم کربن و سطح را فولاد پرکربن تشکیل می دهد. اگر قطعه مزبور را سخت کنیم، در سطح مارتنزیت پرکربن تشکیل شده و بنابراین از سختی زیادی برخوردار خواهد بود. در حالی که مغز آن که همان درصد کم کربن اولیه (۰/۱۵ درصد) را داراست از تافنس خوبی برخوردار خواهد بود.

عمق نفوذ کربن برحسب فاصله از سطح از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{C_c - C_s}{C_o - C_s} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (1)$$

Cs = درصد کربن سطح بوده که توسط پتانسیل کربن^۸ محیط مشخص می شود (wt%)

Co = درصد کربن اولیه فولاد قبل از کربوره شدن (wt%)

۱-Thermo-Chemical treatment

۲-Carburizing

۳-Nitriding

۴-Carbonitriding

۵-Localized heat treatment

۶-Flame hardening

۷-Induction hardening

۸-Carbon potential



C_c = درصد کربن در فاصله X از سطح (wt%)

X = فاصله از سطح (Cm)

D = ضریب دیفوزیون کربن در آستنیت (Cm^2/sec)

T = زمان کربوره شدن (ثانیه)

در اینجا فرض شده که ضریب دیفوزیون مستقل از ترکیب شیمیایی بوده و مقدار متوسط آن از

رابطه زیر به دست آید.

$$D_c' = 0.12 \exp\left(\frac{-32000}{RT}\right) \quad \text{Cm}^2/\text{sec} \quad (2)$$

در این رابطه:

R = ثابت گازها

T = درجه حرارت کربوره کردن بر حسب درجه حرارت کلونین (K) می باشد. erf در رابطه (۱) به تابع خطا^۱ موسوم است و مقادیر آن از جدول ۴ به دست می آید.

در عمل پتانسیل کربن عبارت است از درصد کربن لایه سطحی تشکیل شده بر روی سطح قطعه که با اتمسفر گازی در تماس با آن در حال تعادل باشد. در عملیات کربوره کردن معمولاً از پتانسیل کربنی در حدود ۰/۸ درصد استفاده می شود.

جدول ۴: مقادیر تابع خطا [۲]

y	erf(y)	y	erf(y)
۰	۰/۰۰۰	۰/۸	۰/۷۴۲
۰/۱	۰/۱۱۲	۰/۹	۰/۷۹۷
۰/۲	۰/۲۲۳	۱/--	۰/۸۴۳
۰/۳	۰/۳۲۹	۱/۲	۰/۹۱۰
۰/۴	۰/۴۲۸	۱/۴	۰/۹۵۲
۰/۵	۰/۵۲۱	۱/۶	۰/۹۷۶
۰/۶	۰/۶۰۴	۲/--	۰/۹۹۵
۰/۷	۰/۶۷۸	۲/۴	۰/۹۹۹

۱-Error function



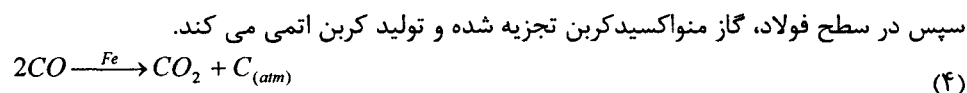
۴-۱-۱- کربوره کردن جامد

در این روش قطعات مورد نظر را همواره با مواد کربوره کننده که معمولاً زغال چوب و یک ماده انرژی زا (جدول ۵) می باشد را در یک جعبه فولادی از جنس فولاد نسوز (۲۵٪Cr-۲۰٪Ni) به نحوی بسته بندی می کنند که فاصله بین آنها در حدود ۵۰ میلیمتر باشد. سپس در جعبه را به نحوی می بندند که هیچ گونه تبادل هوا با خارج نداشته باشد. برای این منظور می توان از آربست استفاده کرد. این جعبه را تا دمای کربوره کردن که معمولاً بین ۸۷۵ تا ۹۲۵ درجه سانتیگراد می باشد حرارت داده و برای مدت زمان مشخصی در این دما نگه می دارند. زمان نگهداری در درجه حرارت کربوره کردن بستگی به ضخامت لایه کربوره شده مورد نیاز دارد. شکل ۵۹ ارتباط بین درجه حرارت و زمان کربوره کردن و عمق نفوذ کربن را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش درجه حرارت و یا زمان کربوره کردن ضخامت لایه کربوره شده نیز افزایش می یابد.

جدول ۵: ترکیب مخلوط مواد کربوره کننده جامد (wt%) [۲]

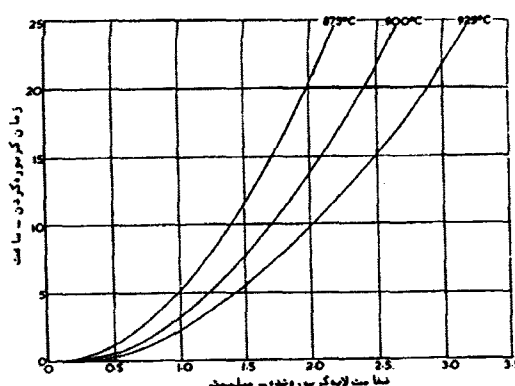
شماره مخلوط	زغال چوب	کربنات باریم BaCO _۳	کربنات کلسیم CaCO _۳	سود خشک NaOH	کک	کربنات سدیم Na _۲ CO _۳
۱	۸۷	--	۳	۱۰	-	-
۲	۸۵-۹۰	--	-	۱۰-۱۵	-	-
۳	۹۰	۱۰	-	-	-	-
۴	۶۰	۴۰	-	-	-	-
۵	۴۵	۱۲	-	-	۴۳	-
۶	۵۵	۱۰-۱۲	-	-	۳۰	۳-۵

گرچه در این روش قطعه کار در مواد کربوره کننده جامد حرارت داده می شود ولی عامل اصلی کربوره کننده گاز منواکسید کربن (CO) است که کربن اتمی را به سطح قطعه حمل می کند. گاز منواکسید کربن براساس واکنش زیر که بین اکسیژن محبوس شده در جعبه و مواد کربوره کننده (زغال) انجام می گیرد تولید می شود.





کربن اتمی آزاد شده در سطح فولاد که تا منطقه حرارتی آستنیت گرم شده است به صورت بین نشینی در فولاد حل می‌شود.



شکل ۵۹: ارتباط بین زمان و درجه حرارت کربوره کردن و ضخامت لایه کربوره شده [۲].

نقش مواد انرژی را عبارت است از افزایش سرعت کربوره شدن، به عنوان مثال یکی از این مواد که کربنات باریوم ($BaCO_3$) می‌باشد (جدول ۵) در درجه حرارت کربوره کردن براساس واکنش زیر تجزیه می‌شود.



دی اکسید کربن (CO_2) حاصل براساس واکنش زیر با زغال ترکیب شده و تولید منواکسید کربن (CO) می‌کند.



و منواکسید کربن حاصل براساس واکنش (۴) در سطح فولاد تجزیه شده و کربن اتمی آزاد می‌کند. به این ترتیب عملیات کربوره شدن تسریع می‌شود. واکنش (۶) برگشت پذیر بوده و هرچه درجه حرارت عملیات افزایش یابد در فشار ثابت درصد منواکسید کربن حاصل افزایش یافته و بنابراین سرعت کربوره شدن زیادتر می‌شود.

اگر نیاز باشد که قسمتهایی از سطح قطعه کربوره نشوند، نواحی فوق را می‌توان توسط یک لایه مسی به ضخامت ۰/۱ تا ۰/۷۵ میلیمتر پوشاند. از آنجائی که در درجه حرارت کربوره کردن، کربن در مس غیر محلول است سطوح مناطق پوشش داده شده کربوره نخواهند شد. همچنین نواحی فوق را



می‌توان توسط خمیری از مخلوط گل رس و آزیست^۱ پوشانید. در این حالت قبل از شروع عملیات کربوره کردن باید خمیر مزبور بر روی سطح قطعه کار کاملاً خشک شده باشد.

پس از اینکه عملیات کربوره کردن خاتمه یافت بر حسب ساختمان و خواص مکانیکی مورد نظر قطعات کربوره شده را می‌توان در آب و یا روغن کوئنچ کرد و یا اینکه تا درجه حرارت اتاق در جعبه و یا در هوا سرد کرد.

قطعات فولادی را معمولاً پس از کربوره شدن مستقیماً کوئنچ نمی‌کنند، زیرا امکان شکسته شدن آنها در ضمن سرد شدن و یا عدم دستیابی به سختی مورد نیاز وجود دارد. علت این امر عبارت است از:

- ۱- از آنجائی که درجه حرارت کربوره کردن نسبتاً بالاست (در حدود ۹۰۰ درجه سانتیگراد)، محدوده حرارتی که قطعه در ضمن کوئنچ شدن سریع سرد می‌شود زیاد بوده، در نتیجه تنش‌های ایجاد شده در قطعه (مخصوصاً تنش‌های حرارتی) زیاد خواهند بود.
- ۲- از آنجائی که قطعه برای مدت زمان نسبتاً طولانی در درجه حرارت بالائی بوده است، دانه‌ها نسبتاً درشت شده، در نتیجه احتمال ترد و شکننده شدن فولاد وجود دارد
- ۳- کوئنچ کردن مستقیم از درجه حرارت کربوره کردن باعث می‌شود که ساختمان نهائی لایه کربوره شدن شامل مقدار زیادی آستنیت باقیمانده باشد، در نتیجه سختی سطح در حد مورد نظر افزایش نیابد.

به منظور جلوگیری از به وجود آمدن معایب فوق، در قطعات کربوره شده، مناسب‌ترین روش عبارت است از سرد کردن فولاد از درجه حرارت کربوره کردن، در هوا و یا در قوطی سمانتاسیون و سپس انجام یکی از سیکل‌های عملیات حرارتی زیر:

- حرارت دادن قطعه کربوره شده تا درجه حرارت سخت کردن مناسب، نگه داشتن برای مدت زمان مشخص و سپس کوئنچ کردن در آب و یا روغن، معمولاً روغن محیط مناسب‌تری برای این منظور می‌باشد

۱- امروزه به دلیل مسائل محیط زیست کاربرد آزیست کاملاً متروک شده است.



این روش شامل دو مرحله حرارت دادن و سرد کردن به صورت زیر می باشد.

- در مرحله اول، فولاد کربوره شده را در درجه حرارتی در حدود ۸۵۰ درجه سانتیگراد آستنیته کرده و سپس در هوا سرد می کنند. این عملیات به منظور ریز کردن دانه های مغز قطعه می باشد

- در مرحله دوم، قطعه مزبور را مجدداً حرارت داده و در دمائی در حدود ۷۶۰ درجه سانتیگراد آستنیته می کنند. سپس نمونه را در روغن کوئنچ می نمایند. هدف از این مرحله ریز کردن دانه های لایه سطح کربوره شده و سخت کردن همزمان آن می باشد.

گاهی از مواقع که قطعات مورد نظر دارای شکل هندسی پیچیده ای باشند و یا اینکه نیاز به دقت عمل بسیار زیاد داشته باشند، در مرحله دوم نیز آنها را در هوا سرد کرده و پس از آن مجدداً قطعات را در درجه حرارت مناسب آستنیته کرده و سپس در روغن کوئنچ می کنند.

در حالتی که قطعه دارای شکل پیچیده ای نباشد و یا زمان کربوره کردن نسبتاً کوتاه باشد، به نحوی که دانه های فولاد در ضمن عملیات فرصت رشد کردن نداشته باشند، می توان قطعه کربوره شده را از درجه حرارت کربوره کردن تا درجه حرارت مناسب برای سخت کردن سطح (۷۵۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد) در کوره سرد کرده و سپس آنها را از کوره خارج کرده در روغن کوئنچ کرد. سیکل فوق را به ویژه در مورد فولادهای ریزدانه می توان استفاده کرد.

فولادهای ساده کربنی که برای سخت کردن سطحی به روش کربوره کردن استفاده می شوند، معمولاً در حدود ۰/۲ درصد کربن دارند. درصد کربن فوق موجب می شود که مغز قطعه کربوره شده از تافنس و انعطاف پذیری خوبی برخوردار باشند. در شرایطی که نیاز به استحکام بیشتر در مغز قطعه باشد، میزان کربن را می توان تا ۰/۳ درصد افزایش داد. گرچه توصیه می شود که تحت شرایط فوق از فولادهای آلیاژی استفاده شود.

فولادهایی که برای کربوره کردن استفاده می شوند گاهی در حدود حداکثر ۱/۴ درصد منگنز دارند. نقش منگنز پایداری سمنتیت و در نتیجه کمک به کربوره شدن فولاد می باشد. بعلاوه منگنز عمق سخت شده را افزایش می دهد ولی از سوی دیگر تمایل فولاد به ترک برداشتن در ضمن کوئنچ شدن را زیاد می کند.



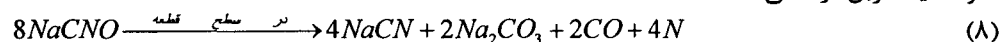
۴-۱-۲- کربوره کردن مایع

کربوره کردن مایع در مذاب مخلوط نمک های سیانید سدیم (۲۰ تا ۵۰ درصد)، کربنات سدیم (۴۰ درصد) و مقادیر متناهی از کلرید سدیم و یا کلرید باریم انجام می گیرد. مخلوط غنی از سیانید فوق را در بوتلهائی با پوشش شیمیایی آلومینیم (آلومینیم کاری^۱ شده) ذوب کرده و در دمائی بین ۸۷۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد نگه می دارند. قطعات مورد نظر را در سبدهای فلزی ریخته و یا توسط سیم های فلزی بطور معلق در مذاب فوق برای مدت زمانی در حدود ۵ دقیقه تا یک ساعت کربوره می کنند. زمان کربوره کردن بستگی به عمق نفوذ مورد نظر دارد. پس از پایان عملیات سبد حاوی قطعات کربوره شده را در آب و یا روغن فرو می برند. کربوره کردن مایع را معمولاً برای قطعات کوچک که نیاز به ضخامت کربوره شده کمی داشته باشند به کار می برند. از آنجائی که ظرفیت حرارتی نمک مذاب بالا بوده و انتقال حرارت از مایع به قطعه سریع می باشد این روش نسبت به کربوره کردن جامد سریعتر و اقتصادی تر است.

در رابطه با مکانیزم کربوره شدن مایع، اعتقاد بر این است که سیانید سدیم در سطح حمام با اکسیژن ترکیب شده و بر طبق واکنش زیر به سیانات سدیم تبدیل می شود.



سپس سیانات حاصل در تماس با سطح فولاد براساس واکنش زیر تجزیه شده نیتروژن و منواکسید کربن آزاد می کند.



همچنین گاز منواکسید کربن حاصل مطابق واکنش زیر در سطح فولاد تجزیه شده کربن اتمی تولید می کند.



کربن و نیتروژن اتمی حاصل از واکنشهای (۹) و (۸) به صورت بین نشینی در سطح فولاد حل می شوند. درصد کربن و نیتروژن جذب شده توسط فولاد بستگی به ترکیب شیمیایی حمام و درجه حرارت آن دارد.

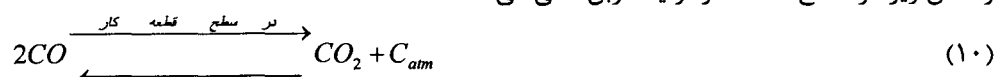
در اینجا تذکر این نکته ضروری است که نمک های سیانید و بخارات حاصل از مذاب آنها بسیار سمی بوده و هنگام کار کردن با آنها باید کلیه نکات ایمنی مربوطه، به کار گرفته شوند.

^۱-Calorizing



۴-۱-۳- کربوره کردن گازی

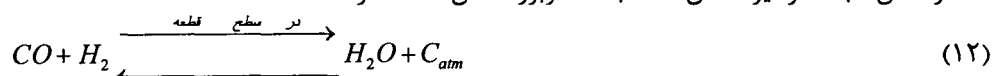
کربوره کردن گازی که نسبت به روش های جامد و مایع از قدمت کمتری برخوردار می باشد به عنوان اقتصادی ترین و سریع ترین روش کربوره کردن برای تولید انبوه شناخته شده است. تحت شرایطی که ضخامت کربوره شده نسبتاً کمی مورد نظر باشد، مزیت فوق بسیار حائز اهمیت می باشد. بعلاوه در این روش کربن سطح را خیلی دقیق تر و ساده تر از روش های دیگر می توان کنترل کرد. در کربوره کردن گازی قطعات کار را در ۹۰۰ درجه سانتیگراد برای مدت ۳ تا ۴ ساعت در اتمسفری که شامل گاز یا گازهایی باشد که بتواند در سطح فولاد تجزیه شده و تولید کربن اتمی کند حرارت می دهند. اتمسفر فوق معمولاً از هیدروکربنها نظیر متان (گاز طبیعی)، CH_4 و یا پروپان C_3H_8 تشکیل شده که بطور جزئی در کوره سوخته و یا اینکه با یک گاز رقیق کننده موسوم به گاز حامل^۱ مخلوط شده باشد. سوختن ناقص و یا استفاده از گاز حامل به منظور حصول پتانسیل کربن مورد نظر در سطح فولاد می باشد. گازهای حامل که از نوع گرماگیر (اندوترمیک)^۲ هستند در یک مولد مجزا تهیه شده و معمولاً شامل مخلوطی از نیتروژن، هیدروژن و منواکسیدکربن می باشند. بنابراین همانند روش های جامد و مایع در این روش نیز عامل فعال منواکسیدکربن می باشد که براساس واکنش زیر در سطح قطعه کار تولید کربن اتمی می کند.



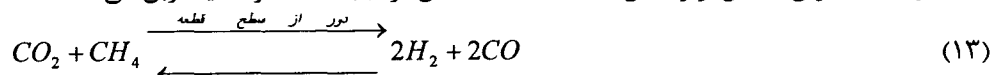
احتمالاً متان موجود در اتمسفر گازی نیز در سطح قطعه تجزیه شده و کربن اتمی تولید می کنند:



واکنش آب-گاز نیز ممکن است باعث کربوره شدن قطعه شود:



دی اکسیدکربن حاصل از واکنش (۱۰) احتمالاً با متان ترکیب شده منواکسیدکربن می دهد:



به این ترتیب برای ادامه کربوره شدن باید درصد منواکسیدکربن در اتمسفر دقیقاً کنترل شود.

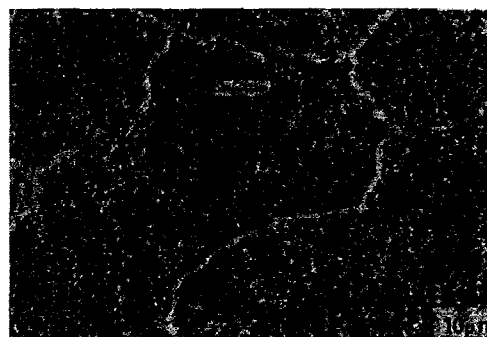
۱-Carrier gas

۲-Endothermic gas

از جمله نکات بسیار مهم در رابطه با کربوره کردن قطعات فولادی توجه به درصد کربن لایه کربوره شده است. شکل های ۶۰ و ۶۱ به ترتیب تصاویر میکروسکوپی آستنیت باقیمانده در لایه کربوره و کوئنچ شده و شبکه بسته سمنتیت در مرزخانه های آستنیت در قطعه کربوره و تعادلی سرد شده را نشان می دهند. هرچه درصد کربن در لایه کربوره و کوئنچ شده بیشتر باشد میزان آستنیت باقیمانده نیز بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر با افزایش درصد کربن بیشتر از ۰/۸ درصد، سمنتیت پرویوکتوئید بیشتر شده و در مرزخانه های آستنیت بطور پیوسته تر تشکیل می شود. درصد زیاد کربن در سطح ممکن است ناشی از زمان کوتاه دیفوزیون پس از به حالت اشباع رسیدن لایه سطحی از کربن باشد و یا اینکه ناشی از شکل هندسی خاص قطعه باشد، به نحوی که کربن پراحتی وارد سطح قطعه شده ولی دیفوزیون آن به داخل قطعه به کندی انجام گیرد. اثرات مخرب کربن اضافی جذب شده توسط سطح فولاد را می توان با استفاده از روش های مناسب عملیات حرارتی حذف کرد [۲].



شکل ۶۰: آستنیت باقیمانده (مناطق سفیدرنگ) در ناحیه کربوره شده فولاد ۸۶۲۰ نمونه مزبور در ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد (۱۹۲۰ درجه فارنهایت) کربوره شده و سپس تا ۸۴۵ درجه سانتیگراد (۱۵۵۰ درجه فارنهایت) به آهستگی سرد و بعداً در روغن کوئنچ شده است [۲].



شکل ۶۱: شبکه پیوسته سمنتیت در مرزخانه های آستنیت در ناحیه کربوره شده فولاد EX۲۴. این نمونه پس از کربوره شدن در ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد (۱۹۲۰ درجه فارنهایت) در روغن کوئنچ شده و سپس در ۸۴۵ درجه سانتیگراد (۱۵۵۰ درجه فارنهایت) بازگشت داده شده است [۲].



۴-۲- نیتريده کردن

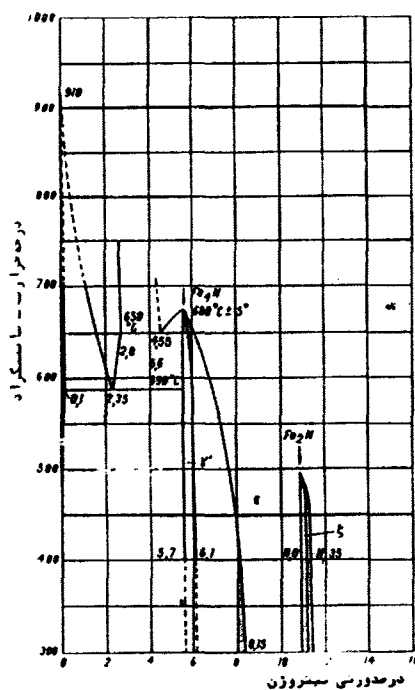
نیتريده کردن عبارت از وارد کردن نیتروژن اتمی در لایه سطح فولاد است. بنابراین سختی سطح در این روش بستگی به نیتريد فلزی تشکیل شده دارد. درحالی که امکان نیتريده کردن برای بسیاری از فولادها وجود دارد، فقط موقعی می‌توان سختی زیاد در سطح به دست آورد که قطعه مورد نظر از جنس فولادهای آلیاژی مخصوص، شامل عناصر آلیاژی نظیر آلومینیم، کروم، مولیبدن و یا وانادیم باشد. عناصر فوق بمحض تماس پیدا کردن با نیتروژن اتمی در سطح قطعه با آن ترکیب شده و تشکیل نیتريدهای پایدار و سخت می‌دهند.

با مراجعه به نمودار تعادلی آهن-نیتروژن (Fe-N) که در شکل ۶۲ نشان داده شده است، فازهایی که در ضمن عملیات سخت کردن سطحی به روش نیتريده کردن در لایه سطحی فولادهای ساده کربنی تشکیل می‌شوند را می‌توان مشخص کرد. این فازها به ترتیب افزایش درصد نیتروژن عبارتند از:

- ۱- محلول جامد نیتروژن در آهن با شبکه کریستالی bcc، این فاز به نیتريد آلفا^۱ (α) موسوم است و در ۹۵۰ درجه سانتیگراد ۰/۱ درصد و در درجه حرارت اتاق حداکثر ۰/۰۱ درصد نیتروژن را در خود حل می‌کند
- ۲- تحت شرایطی که مقدار نیتروژن موجود بیشتر از حد حلالیت آن در فاز آلفا باشد، فاز گاما پیریم (γ') با فرمول شیمیایی Fe_3N به وجود می‌آید. فاز مزبور تا حداکثر ۶ درصد نیتروژن پایدار می‌باشد.

۱-Alpha nitride

۲-Gamma Prime nitride



شکل ۶۲: نمودار تعادلی آهن-نیتروژن [۲].

۳- اگر مقدار نیتروژن بیشتر از ۶ درصد باشد، فاز نیتريد اپسيلن^۱ (ϵ) با فرمول شیمیایی Fe_3N و

شبکه کریستالی هگزاگونال به وجود می‌آید. فاز مزبور که تا ۱۱ درصد نیتروژن پایدار است از

استحکام کم و شکنندگی بسیار زیاد برخوردار می‌باشد

۴- اگر درصد نیتروژن از ۱۱ درصد هم تجاوز کند، در درجه حرارتهای کمتر از ۵۰۰ درجه

سانتیگراد نیتريد زتا^۲ (ζ) به فرمول شیمیایی Fe_2N به وجود می‌آید

۵- علاوه بر فازهای فوق، در دماهایی بالاتر از ۵۹۰ درجه سانتیگراد، نیتريد گاما^۳ (δ) که محلول

بین نشینی نیتروژن در آهن با شبکه کریستالی fcc است پایدار خواهد بود.

همچنین نیتروژن با برخی از عناصر آلیاژی ترکیب شده و تشکیل نیتريد آلیاژی می‌کند. مانند

نیتريد های کروم (CrN, Cr_2N)، نیتريد تیتانیم (TiN)، نیتريد آلومینیم (AlN) و غیره. بطور کلی

عناصر گروه انتقالی (آهن، کروم، منگنز، وانادیم، تنگستن، مولیبدن و تیتانیم) با نیتروژن ترکیب شده

۱-Epsilon nitride

۲-Zeta nitride

۳-Gamma nitride

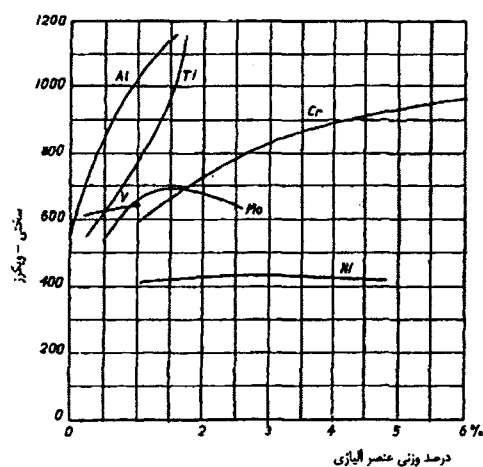


و تشکیل نیتريد می‌کنند. در حقيقت سختی زياد لایه سطحی فولادهای نیتريد شده، ناشی از وجود همین ذرات بسیار ریز و پراکنده نیتريدهای آلیاژی می‌باشد.

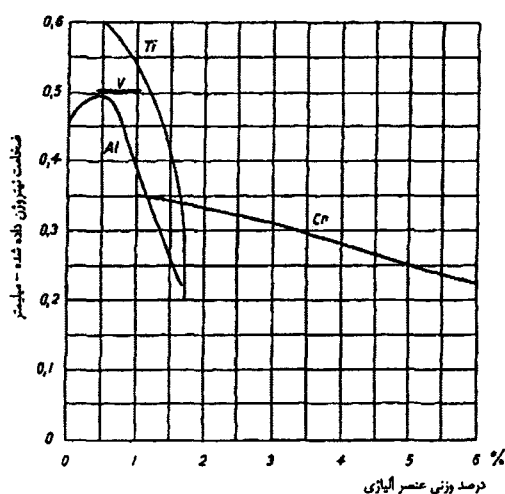
با توجه به آنچه گفته شد، تفاوت بین عملیات کربوره کردن و نیتريده کردن مشخص می‌شود. در حالی که کربوره کردن باید در منطقه پایداری آستنیت (۸۷۵ تا ۹۲۵ درجه سانتیگراد) انجام شود نیتريده کردن را می‌توان در محدوده حرارتی پایداری فریت (۵۵۰ تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد) انجام داد. بعلاوه پس از نیتريده کردن نیازی به کوئنچ کردن قطعه نیست. معمولاً قطعات نیتريده شده را پس از پایان عملیات و از درجه حرارت نیتريده کردن در هوا سرد می‌کنند. ساختمان میکروسکوپی پوسته در شرایط فوق به ترتیب از خارج به داخل دارای فازها α , γ , ϵ خواهد بود. علاوه بر فازهای فوق، نیتريدهای آلیاژی که عامل اصلی سختی سطح می‌باشند نیز به صورت ذرات بسیار ریز و پراکنده در ساختمان لایه سطحی وجود دارند.

اگر فولادهای ساده کربنی نیتريده شوند، سختی سطح در حد متوسط (در حدود ۴۰۰HV) افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع این است که در درجه حرارت نیتريده کردن، نیتروژن نسبتاً سریع به داخل فولاد نفوذ کرده و تشکیل Fe_3N و برخی مواقع Fe_2N می‌کند. از آنجائی که نیتريدهای فوق در عمق نسبتاً زیادی پراکنده می‌شوند سختی سطح را نمی‌توانند در حد زیادی افزایش دهند. آلومینیم و تا حدودی کروم، وانادیم و مولیبدن میل ترکیبی زیادی با نیتروژن دارند. بنابراین از نفوذ آن به داخل قطعه جلوگیری کرده و تشکیل یک لایه نسبتاً نازک (تا حداکثر ۱ میلیمتر) پایدار و سخت نیتريده بر روی سطح قطعه تولید می‌کنند. با افزایش درصد عناصر آلیاژی فوق سختی سطح نیتريد شده افزایش یافته (شکل ۶۳) و ضخامت لایه مزبور کاهش می‌یابد (شکل ۶۴). از آنجائی که نیتريد کروم در مقایسه با نیتريد آلومینیم تا عمق بیشتری تشکیل می‌شود، وجود این عنصر آلیاژی باعث جلوگیری از تغییر سریع ترکیب شیمیایی و افت ناگهانی سختی از پوسته سخت شده به مغز سخت نشده می‌شود و بنابراین احتمال پوسته شدن سطح را کاهش می‌دهد. مولیبدن علاوه بر مشارکت در سخت کردن سطح باعث افزایش تافنس مغز قطعه نیز می‌شود.

برای نیتريده کردن موضعی، مناطقی که نیاز به نیتريده شدن نداشته باشند را توسط مخلوطی از سیلیکات سدیم و پودر گچ می‌پوشانند.



شکل ۶۳: تأثیر عناصر آلیاژی بر روی سختی پس از نیتریده شدن. آلیاژ اولیه حاوی ۰,۳۵C, ۰,۳Si, ۰,۷Mn بوده است [۲].



شکل ۶۴: تأثیر عناصر آلیاژی بر روی ضخامت لایه نیتریده شده، زمان و درجه حرارت عملیات به ترتیب ۸ ساعت و ۵۲۰ درجه سانتیگراد. ضخامت لایه نیتریده شده، فاصله سطح تا محلی که سختی ۴۰۰ ویکرز داشته در نظر گرفته شده است [۲].

۳-۴- کربو نیتریده کردن

کربو نیتریده کردن عملیات سخت کردن سطحی است که در آن نیتروژن و کربن هر دو جذب سطح فولاد می‌شوند و به این ترتیب نیتروژن جذب شده سختی سطح کربوره شده را بیشتر افزایش می‌دهد. گرچه در کربوره کردن مایع نیز تقریباً همین عمل انجام می‌گیرد، ولی لغت



کربو نیتريده کردن معمولاً به سخت کردن سطحی که در آن از اتمسفر گازی استفاده شود اطلاق می‌گردد. عملیات حرارتی کربو نیتريده کردن معمولاً در دامنه حرارتی ۸۰۰ تا ۸۷۵ درجه سانتیگراد و در اتمسفری از مخلوط منواکسید کربن و هیدروکربن شامل ۳ تا ۸ درصد آمونیاک انجام می‌گیرد. درصد کربن و نیتروژن جذب شده توسط فولاد را می‌توان با کنترل درجه حرارت و غلظت آمونیاک تغییر داد.

برای انحلال سریع کربن در فولاد، قطعه کار باید در شرایط آستنیتی باشد و این موضوع برای انحلال نیتروژن مناسب نیست. زیرا سرعت انحلال نیتروژن در آستنیت تقریباً پنجاه برابر کمتر از سرعت انحلال آن در فریت است. معه‌ذا در صورتی که درجه حرارت عملیات زیر ۹۰۰ درجه سانتیگراد حفظ شود مقدار نسبتاً قابل ملاحظه‌ای نیتروژن در آستنیت حل خواهد شد. لازم به اشاره است که در غلظت مشخصی از آمونیاک، قابلیت انحلال نیتروژن در آستنیت با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد.

حضور بیشتر از ۰/۲ درصد نیتروژن همراه با ۰/۸ درصد کربن در پوسته، سرعت استحاله آستنیت را آنقدر کاهش می‌دهد که گاهی برای سخت کردن سطح حتی کوئنچ کردن در روغن کافی می‌باشد. در صورتی که مقدار نیتروژن بیشتر از ۰/۴ درصد باشد درجه حرارت شروع تشکیل مارتنزیت آنقدر کاهش می‌یابد که در پوسته قطعه کوئنچ شده مقدار زیادی آستنیت باقیمانده وجود خواهد داشت. ولی بطور خلاصه کربو نیتريده کردن در مقایسه با نیتريده و یا کربوره کردن تنها، سختی پذیری و مقاومت به سایش را بیشتر افزایش می‌دهد. در صورتی که عملیات کربن و نیتروژن دهی همزمان، در محدوده حرارتی نیتريده کردن (یعنی بین ۵۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد) انجام می‌گیرد، اصطلاحاً به نیتروکربوره کردن^۱ موسوم می‌باشد. در این روش سطح قطعه عمدتاً نیتريده شده ولی چون مقداری کربن نیز جذب می‌شود، سختی قطعه بیشتر از حالتی است که آنرا فقط نیتريده کرده باشند. این فرآیند نیز شامل نفوذ همزمان نیتروژن و کربن به داخل فولاد است که در محدوده پایداری فاز فریت (زیر دمای A_۱) انجام می‌شود. انجام این فرآیند به هر دو صورت گازی و مایع امکان پذیر است [۲].

^۱-Nitro carburizing



۴-۴- سخت کردن سطحی به کمک عملیات حرارتی موضعی

در این روش مغز و سطح قطعه دارای ترکیب شیمیایی یکسان بوده و تنها عملیات حرارتی سخت کردن است که در سطح متمرکز می‌شود. از آنجایی که سطح باید به اندازه کافی کربن جهت سخت شدن داشته باشد این عملیات معمولاً بر روی فولادهای کربنی که شامل ۰/۳۵ تا ۰/۵ درصد کربن داشته باشند انجام می‌شود. همچنین فولادهای کم آلیاژ که دارای حداکثر ۱ درصد کروم و در حدود ۰/۲۵ درصد مولیبدن و ۰/۵ درصد نیکل باشند را از این طریق مورد عملیات سخت کاری سطحی قرار می‌دهند. در این روش تنش های فشاری حاصل از مارتنزیت شدن لایه سطحی استحکام خستگی قطعه را افزایش می‌دهد.

برای به دست آوردن ساختمان و خواص مکانیکی مناسب (تافنس ضربه خوب) در مغز قطعاتی که باید به روش عملیات حرارتی موضعی سخت شوند، ابتدا آنها را کوئنچ و تمپر کرده و یا نرماله می‌کنند، سپس با حرارت دادن موضعی، سطح قطعات را آستنیت و بلافاصله کوئنچ می‌کنند. بنابراین درحالی که درصد کربن قطعه در تمام نقاط ثابت و در حدود ۰/۴ درصد است مغز قطعه مارتنزیت تمپر شده و یا مخلوطی از فریت و پرلیت با تافنس ضربه خوب بوده و سطح آن مارتنزیت با سختی نسبتاً بالا می‌باشد. سطح و مغز در قطعات فوق معمولاً توسط یک لایه بینیتی از یکدیگر جدا شده و به این ترتیب احتمال پوسته شدن به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

۴-۴-۱- سخت کردن شعله ای

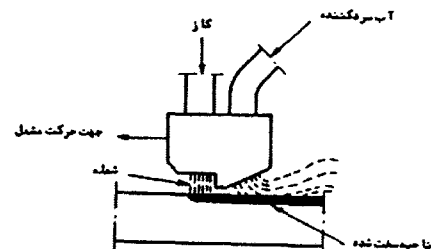
در این روش سطح قطعه به کمک یک شعله گازی حرارت داده شده و پس از آستنیت شدن بلافاصله کوئنچ می‌شود. شعله مورد نیاز در این روش را می‌توان از طریق مشعل اکسیژن و یک گاز قابل احتراق نظیر استیلن، پروپان و یا گاز طبیعی^۱ تهیه کرد. قطعات کوچک و یا مناطق موضعی نظیر لبه ابزارهای برش و یا انتهای آچارها را می‌توان به کمک شعله دستی حرارت داده و سپس تمام قطعه را در آب کوئنچ کرد. برای سخت کردن قطعات بزرگ و یا سطوح زیاد می‌توان از دستگاه های اتوماتیک که در آنها شعله و یک فواره آب تعبیه شده اند استفاده کرد. دو نوع مختلف از این دستگاه ها که برای سخت کردن سطحی در این روش به کار می روند در شکل های ۶۵ و ۶۶ نشان داده شده اند.

^۱-Natural Gas

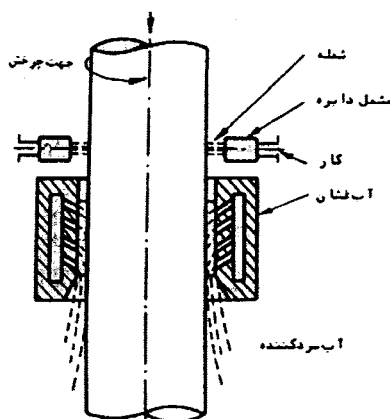


در شکل ۶۵ مشعل با سرعت مناسبی بر روی سطح قطعه به نحوی حرکت می‌کند که تا عمق مشخصی از آن را آستنیته کرده و به دنبال آن فواره آب منطقه آستنیته شده را کوئنچ می‌کند. قطعات با شکل های متقارن مانند میله های استوانه ای شکل را می‌توان در داخل یک مشعل حلقه ای شکل و یا تعدادی مشعل معمولی با حرکت دورانی و انتقالی ابتدا آستنیته و سپس توسط فواره آبی که به دنبال مشعل و در فاصله نزدیک از آن در حال حرکت است کوئنچ کرد (شکل ۶۶). از جمله معایب عمده سخت کردن شعله ای اکسیده و یا دی کربوره شدن سطح قطعه است. اکسیده و یا دی کربوره شدن سطح ناشی از تماس مستقیم قطعه گرم شده با اکسیژن هوا می‌باشد. بعلاوه نوع شعله نیز در میزان اکسیده و یا دی کربوره شدن سطح دخالت دارد. با استفاده از شعله های اکسید کننده ضعیف و یا احیا کننده می‌توان این عیب را تا حدودی کاهش داده و یا حتی حذف کرد.

مقدار کربن توصیه شده و مناسب برای فولادهائی که قرار است به روش سخت کردن شعله‌ای سخت شوند در حدود ۰/۴ تا ۰/۵ درصد می‌باشد. همچنین فولادهائی که بیشتر از این مقدار کربن داشته باشند را نیز می‌توان با استفاده از این روش سخت کرد. ولی حرارت دادن و سرد کردن این نوع فولادها باید با دقت بسیار زیاد انجام گیرد تا اینکه از شکسته شدن و یا ترک برداشتن احتمالی آنها جلوگیری شود.

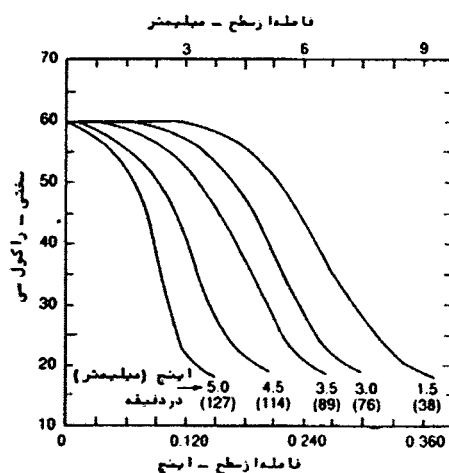


شکل ۶۵: سخت کردن سطح قطعات طویل به روش شعله ای [۲].



شکل ۶۶: سخت کردن سطحی قطعات استوانه ای به روش شعله ای [۲].

معمولاً ضخامت پوسته های سخت شده شعله ای بین ۳ تا ۱۲ میلی متر متغیر است. گزارش شده است که برای سخت کردن ضخامت مشخصی از سطح قطعه، سرعت حرارت دادن و هدایت به داخل قطعه در مقایسه با قابلیت سختی پذیری فولاد از اهمیت بیشتری برخوردار می باشد. شکل ۶۷ اثر سرعت حرکت مشعل به هنگام حرارت دادن را بر روی پوسته سخت شده فولاد ساده کربنی ۱۰۵۰ نشان می دهد.



شکل ۶۷: اثر سرعت حرکت مشعل بر روی عمق سخت شده فولاد فورج شده ۱۰۵۰ [۲].

۱-Case depth



۴-۴-۲- سخت کردن القایی

اصول این روش شبیه به سخت کردن شعله‌ای است. به این صورت که تنها سطح قطعه، آستنیت شده و سپس کوئنچ می‌شود. اما در این روش حرارت دادن سطح به کمک یک سیم پیچ هادی که از آن جریان متناوب با فرکانس زیاد (در محدوده ۲ تا ۵۰ کیلوهرتز) عبور می‌کند انجام می‌گیرد. ضخامت پوسته آستنیت و بنابراین سخت شده بستگی به فرکانس جریان دارد. هرچه فرکانس جریان بیشتر باشد عمق نفوذ جریان و بنابراین ضخامت لایه سخت شده کمتر خواهد بود. ارتباط ضخامت لایه سخت شده و فرکانس جریان به صورت زیر است:

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu F}} \quad (15)$$

در این رابطه:

δ : عمق نفوذ جریان = ضخامت پوسته آستنیت و بنابراین سخت شده (cm)

ρ : مقاومت الکتریکی سیم پیچ هادی (ohm-cm)

μ : نفوذپذیری مغناطیسی^۱ (Gs/°C)

F : فرکانس جریان (HZ)

موقعی که یک جریان الکتریکی از یک سیم پیچ هادی عبور کند یک میدان مغناطیسی در اطراف سیم پیچ به وجود می‌آید (شکل ۶۸). حال اگر یک میله فولادی به داخل میدان مغناطیسی وارد شود، یک سری خطوط جریان مغناطیسی از آن عبور می‌کند. از آنجائی که خطوط جریان مغناطیسی توسط یک جریان متناوب با فرکانس خیلی زیاد به وجود می‌آیند در لایه‌های سطحی میله فولادی جریان‌های فوکو^۲ به وجود می‌آید که نهایتاً منجر به گرم شدن آن می‌شود (شکل ۶۸). بعلاوه اثر اتلاف‌های پسماند^۳ در فولاد باعث گرم شدن سریعتر قطعه کار می‌شود. به این ترتیب در مدت چند ثانیه ضخامتی از سطح نمونه به دمای بحرانی بالائی خود می‌رسد. از آنجائی که سیم پیچ مسی در اثر تشعشع حاصل از قطعه کار گرم می‌شود معمولاً برای ساخت آن از لوله‌های مسی استفاده کرده با عبور آب از داخل لوله، آنرا سرد می‌کنند.

به مجرد اینکه سطح قطعه به درجه حرارت مورد نظر رسید با انداختن آن در مخزن آب و یا پائین آوردن و قرار دادن آن در بین فواره‌هایی از آب آنرا بلافاصله کوئنچ می‌کنند. محورها و قطعات مشابه دیگر که دارای شکل‌های متقارن هستند را توسط دستگاه‌های اتوماتیک که از یک سیم پیچ

۱-Magnetic permeability

۲-Eddy currents

۳-Hysteresis losses

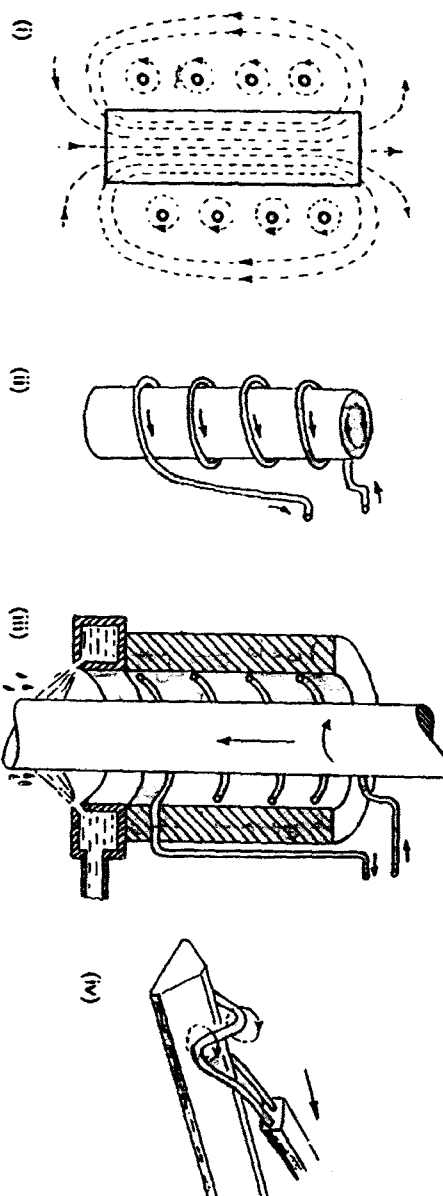


هادی در یک سمت و یک فواره آب در انتهای دیگر (شکل iii ۶۸) تشکیل شده اند بطور ممتد سخت می کنند. در این حالت به منظور اطمینان از گرم شدن یکنواخت، قطعه کار در ضمن حرکت انتقالی یک حرکت دورانی هم دارد. سخت کردن سطحی موضعی به روش القائی را توسط هادی های متناسب با شکل قطعه (شکل iv ۵۹) می توان انجام داد. در این حالت معمولاً قطعه پس از آستنیت شدن در هوا سرد می شود.

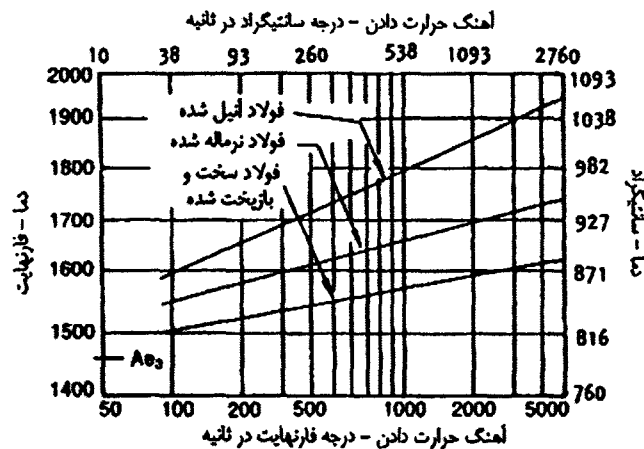
در این روش به راحتی می توان سختی RC ۶۰ را در برخی از فولادها تا عمق ۳ میلیمتر تولید کرد. به دلیل زمان کوتاهی که قطعه در درجه حرارت بحرانی بالائی قرار می گیرد اکسیده شدن، دی کربوره شدن و یا رشد دانه ها ناچیز می باشد. لیکن باید توجه داشت که کاربیده ها در همان زمان کوتاه حل می شوند.

مدت زمان حرارت دادن توسط جریان های القائی با فرکانس بالا بسیار کوتاه و اغلب در حدود چند ثانیه می باشد. از این رو محدودیت ناشی از زمان بسیار کم برای آستنیت شدن را توسط افزایش درجه حرارت آستنیت کردن جبران می کنند. شکل ۶۹ نشان می دهد که درجه حرارت A_{Cr} در فولاد ۱۰۴۲ تابعی از سرعت گرم کردن و ساختمان میکروسکوپی اولیه فولاد می باشد. همان گونه که از شکل مزبور ملاحظه می شود هرچه سرعت گرم کردن زیادتر باشد، درجه حرارت A_{Cr} نیز بالاتر خواهد بود. از سوی دیگر، ساختمان های میکروسکوپی شامل کاربید درشت مانند فولاد ۱۰۴۲ در شرایط آنیل شده یا فولادها با سمنتیت کروی درشت و یا فولادها شامل کاربید آلیاژی در مقایسه با فولادهائی که دارای ساختار میکروسکوپی ظریف و ریز باشند نیاز به درجه حرارت آستنیت کردن بیشتری برای انحلال کامل کاربیده های خود دارند. لازم به اشاره است که اگر درجه حرارت آستنیت کردن خیلی زیاد باشد احتمال درشت شدن دانه ها وجود دارد. از جمله نتایج قابل توجه در رابطه با آستنیت شدن سریع فولاد در مدت زمان بسیار کوتاه در سخت کردن القائی عبارت است از سختی بیشتر که در مقایسه با سخت کردن به روش های معمولی به دست می آید. این افزایش سختی گاهی به فوق سختی^۱ و یا سختی اضافی موسوم می باشد و ناشی از تشکیل مارتنزیت از آستنیت با دانه های بسیار ریز که حاوی معایب کریستالی بسیار زیاد هستند، می باشد.

۱-Super hardness



شکل ۶۸: اصول سخت کردن القائی (i) میدان مغناطیسی به وجود آمده در اثر عبور جریان متناوب از سیم پیچ (ii) سیم پیچ مناسب برای سخت کردن سطوح خارجی قطعات استوانه ای، (iii) مجموعه سیم پیچ جهت گرم کردن و آب جهت سرد کردن، (iv) بستگی به شکل قطعه، سیم پیچ متناسب با آن باید ساخته و استفاده شود [۲].



شکل ۶۹: اثر میکروساختار اولیه و نرخ گرم کردن بر روی دمای A_{c1} در مورد فولاد ۱۰۴۲ [۲]

۵- عملیات حرارتی مناطق جوش

۵-۱- پیشگرم کردن

جوشکاری موفق موادی با هدایت حرارتی بالا و یا با مقاطع ضخیم، همچنین جوشکاری فولادهای سختی پذیر نیازمند کنترل دقیق سرعت سرد کردن می باشد، زیرا وقتی مقطع جوشکاری تا دمای بالا در حین جوشکاری حرارت داده می شود، در حین سرد کردن سریع، سخت می شوند. سرد کردن در چنین شرایطی باعث تردی در منطقه HAZ خواهد شد. با پیشگرم کردن مناسب، نرخ سرد شدن کاهش یافته و در نتیجه مسائل نامبرده پیش نخواهد آمد [۷].

بالا بردن دمای یک قطعه، قبل از جوشکاری را پیشگرم^۱ می گویند. پیشگرم یکی از مهمترین روش های موثر در بهبود کیفی اتصالات است که می تواند بر روی قسمتی از اتصال یا تمامی آن انجام شود [۸]. اهداف پیشگرم کردن را می تواند در موارد زیر خلاصه نمود:

- ۱- کاهش افت حرارت از منطقه جوش که به نوبه خود باعث کاهش نرخ سرد شدن می گردد
- ۲- جلوگیری و یا کاهش ترک با جلوگیری از تشکیل سطوح سخت (در اثر تشکیل مارتنزیت)
- ۳- کاهش انقباض و انقباض و در نتیجه کاهش تنش های باقیمانده

۱-Preheating



۴- سوزاندن روغن، گریس و پوسته ها از منطقه جوش برای افزایش سرعت جوشکاری

۵- افزایش دما به بیش از دمایی که امکان رخ دادن شکست ترد در برخی از فولادها وجود دارد

۶- سیالیت بیشتر حوضچه جوش

۷- زمان کافی برای خروج هیدروژن از جوش و منطقه HAZ

محدوده معمولی دمای پیشگرم ۱۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد است اما چنانچه نیاز به نرخ سردکردن بسیار پائین باشد، پیشگرم تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد نیز انجام می گیرد.

سرعت سرد کردن پائین که در نتیجه عملیات پیشگرم کردن حاصل می شود، باعث کاهش استحکام کششی و افزایش داکتیلیتی می گردد. پیشگرم کردن بیش از حد نیاز، منجر به کاهش تافنس ضربه خواهد شد [۷]. در ادامه مهمترین اثرات پیشگرم بر روی قطعات مختلف مورد بررسی قرار می گیرد:

۱- کاهش نرخ سرد شدن، جوش و منطقه HAZ

پیشگرم کردن، سرعت سرد شدن بعد از جوشکاری را کاهش می دهد. سرعت سرد شدن در قطعه ای که پیشگرم نشده، بیشتر از قطعه ای است که پیشگرم شده باشد؛ هر چه دمای پیشگرم کردن بیشتر باشند، سرعت سرد شدن بعد از جوشکاری کمتر خواهد بود زیرا پیشگرم کردن علاوه بر کم کردن اختلاف دما که در سرعت سرد شدن عامل تعیین کننده ای دارد، قابلیت هدایت حرارتی فولاد را نیز کاهش می دهد که در نتیجه، از خروج و توزیع حرارت از ناحیه جوش جلوگیری کرده و شدت آن را کاهش می دهد و در نتیجه سرعت سرد شدن را کم می کند [۸].

۲- جلوگیری از بروز ترک های سرد در ناحیه HAZ به ویژه در فولادهای سختی پذیر

در فولادهای سختی پذیر اگر با عملیات حرارتی بتوان استحالۀ آستنیت به مارتنزیت را به نحوی به استحالۀ آستنیت به پرلیت مبدل کرد، می توان در نهایت از بروز ترک های سرد در جوش و HAZ به همان نسبت جلوگیری کرد. اگر بتوان فولاد را تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد پیشگرم کرد، هر چند استحالۀ آستنیت به مارتنزیت اتفاق می افتد، اما مارتنزیت حاصل، تولید ترک سرد نمی کند، زیرا به دلیل کم بودن سرعت سرد شدن، تنش های ناشی از اختلاف دما و نیز تنش های انقباضی کمتر خواهد بود، علاوه بر این با این عمل حالیت و نفوذ هیدروژن نیز به حداقل رسانده می شود و در نتیجه ترک سرد ایجاد نمی گردد.



البته اگر بتوان فولاد را بیش از ۲۰۰ درجه و حتی تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد پیشگرم نمود، استحاله آستنیت به مارتنزیت کلاً متوقف شده و استحاله آستنیت به پرلیت جایگزین آن می‌گردد؛ به شرط آن که دمای پیشگرم در تمام مدت جوشکاری ثابت نگه داشته شود و سرعت سرد شدن از دمای جوش به اندازه کافی کند و آرام باشد. تولید ساختار پرلیتی یا بینیتی احتمال بروز ترک‌های سرد را به حداقل می‌رساند [۸].

۳- افزایش چقرمگی جوش به ویژه در درجه حرارت‌های پایین و شرایط ضربه

انجام عملیات پیشگرم با ایجاد ساختار پرلیتی یا بینیتی که حداقل ۱۰ تا ۴۰ RC نرم‌تر از ساختار مارتنزیتی است، مقاومت به ضربه و انرژی ضربه فولاد را به ویژه در درجه حرارت‌های پایین افزایش می‌دهد. علاوه بر آن، مطالعات نشان داده است که پیشگرم کردن، تنش‌های باقی مانده در نوک عیوب را که ترک از آن جا شروع می‌شود، کاهش می‌دهد، در نتیجه فلز در نزدیکی نوک عیوب از نرمی و چقرمگی قابل توجهی برخوردار خواهد بود [۸].

۴- کاهش مقدار انرژی ورودی که برای جوش نفوذی خوب مورد نیاز است.

پیشگرم کردن مقدار انرژی و حرارت ورودی به جوش را کاهش می‌دهد. اگر به معادله حرارت ورودی توجه شود:

$$H = \frac{V.I}{S}$$

(که در آن v ، ولتاژ جوشکاری و I ، جریان جوشکاری و S ، سرعت جوشکاری است)

معلوم خواهد شد که افزایش دمای پیشگرم یا به عبارتی پیشگرم کردن، سبب افزایش سرعت جوشکاری یعنی S می‌گردد که در نهایت به بزرگتر شدن مخرج کسر منتهی شده و مقدار حرارت ورودی به جوش (H) را کاهش می‌دهد [۸].

۵- کاهش مقدار تابیدگی و پیچیدگی و کشیدگی انقباضی

پیشگرم کردن فولادها تا دمای بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد علاوه بر کاهش تنش‌های انقباضی، تابیدگی و پیچش و خمیدگی کلی را تا اندازه قابل توجهی کم کرده و تنش تسلیم فولاد را نیز کاهش می‌دهد. کاهش تنش تسلیم سبب آزادسازی برخی تنش‌های پسماند به ویژه انواع انقباضی



آن گشته و در نتیجه از تاب برداشتن قطعه در اثر جوشکاری تا حد قابل توجهی ممانعت به عمل می‌آورد [۸].

۶- کاهش تنش‌های انقباضی پسماند

علاوه بر این که تنش‌های باقیمانده در اثر تغییرات تند دما و تغییر شکل دایمی به وجود می‌آیند، انتقال یا استحاله‌های فازی نیز در ساختار فولادها ایجاد تنش می‌نمایند. در زمان استحاله آستنیت به مارتنزیت، مارتنزیت سوزنی ایجاد شده، بیشتر از آستنیت، فضای طولی را اشغال می‌کند اما به دلیل چسبندگی لایه‌های آستنیتی دیگر به آن امکان بروز این انبساط را در طول نداده و بنابراین مارتنزیت تحت یک تنش فشاری فوق‌العاده قرار گرفته و آستنیت مجاور آن نیز تحت یک تنش کششی بسیار زیاد که اصطلاحاً به آن تنش‌های انقباضی پسماند گفته می‌شوند قرار می‌گیرد. در صورت پیشگرم کردن قطعه این اختلاف انبساط و انقباض به حداقل می‌رسد، ضمن آن که استحاله آستنیت به مارتنزیت نیز تا حد امکان به استحاله آستنیت به پرلیت با بینیت مبدل خواهد شد [۸].

۷- ایجاد خواص ویژه مکانیکی و فیزیکی مورد انتظار در جوش با تغییر در ساختارهای کریستالی

از آن جایی که به وسیله پیشگرم کردن امکان تغییر در ساختارهای کریستالی فلز پایه و جوش همواره فراهم می‌گردد، دستیابی به خواص ویژه مکانیکی و فیزیکی مورد انتظار از جوش دور از دسترس نیست. رسیدن به سختی یا انعطاف پذیری مورد نظر، استحکام کششی، فشاری و مقاومت به ضربه، پیچش، خمش و حتی خستگی از جمله خواصی هستند که در محدوده‌های نسبتاً گسترده‌ای با تغییر دمای پیشگرم و شرایط آن قابل انجام است.

۸- جلوگیری و کاهش ورود هیدروژن به جوش و ناحیه HAZ و کاهش تأثیرات ناشی از آن مانند هیدروژن تردی

پیشگرم کردن، بیش از آن که سبب کاهش ورود هیدروژن به حوضچه جوش گردد، در فرصت دادن به هیدروژن محبوس برای خروج از فلز پایه مؤثر است، زیرا لایه‌های جوش در قطعات پیشگرم شده زمان بیشتری در حالت مذاب باقی مانده و همچنین شکل محدب‌تری به خود می‌گیرند که در خروج گاز بسیار مؤثر است.



۹- افزایش مقاومت در برابر خوردگی، به ویژه خوردگی تنش SCC

با انجام عملیات پیشگرم، امکان زدودن لایه‌های اولیه اکسیدی، نیتریدی و سایر نمک‌های فلزی و غیرفلزی از سطح قطعه کار فراهم گشته و در نتیجه کاهش نفوذ ناخالصی‌های غیرهمجنس را به درون لایه‌های جوش در پی خواهد داشت. از این جهت، احتمال تشکیل پیل‌های الکتروشیمیایی که اساس انجام خوردگی‌های درون و کناره‌های جوش می‌باشند را به حداقل می‌رساند. از جهت دیگر، انجام عملیات پیشگرم، با کاهش خطر بروز ترک‌ها و ممانعت از تمرکز تنش‌ها به ویژه در محل ریشه ترک، از بروز خوردگی‌های تنش نیز تا حد زیادی جلوگیری می‌کند [۸].

۱۰- ایجاد امکان جوشکاری فلزات و آلیاژهای نامتجانس به یکدیگر

به کمک عملیات پیشگرم کردن، با نزدیک کردن ساختارهای کریستالی و برخی خواص فیزیکی و مکانیکی می‌توان فلزات و آلیاژهای نامتجانس را به یکدیگر جوش داد. یکی از مشکلاتی که بر سر راه جوشکاری فلزات و آلیاژهای غیرمتجانس به یکدیگر وجود دارد، عدم همگونی ساختارهای کریستالی و عدم امکان اتصال آن‌ها به یکدیگر است. مشکل دیگر این است که در صورت اتصال فلزات نامتجانس به یکدیگر، تفاوت زیاد خواص فیزیکی و مکانیکی باعث جدا شدن اتصال می‌شود. همان طور که گفته شد، در بعضی موارد با پیشگرم کردن یک یا هر دو فلز غیرمتجانس با یک یا دو دمای متفاوت پیشگرم، می‌توان این مشکلات را به حداقل رسانده و به جوش قابل قبولی دست پیدا یافت [۸].

۱۱- پاک سازی سطح قطعه کار از آلودگی ها و به خصوص مواد چرب

یکی از روش های پاک سازی سطح قطعه کار از آلودگی ها و به خصوص چربی‌هایی مثل روغن، دوده، گریس و غیره، حرارت دادن سطح قطعه و سوزاندن آن‌ها است. با پیشگرم کردن سطح قطعه کار تا حدود ۲۰۰ درجه سانتیگراد، می‌توان مطمئن بود که هرگونه آلودگی به ویژه چربی و رطوبت، از سطح آن زدوده شده و سطح تمیز، آماده جوشکاری است. از این رو به ویژه در مورد قطعاتی که پیش از قرار گرفتن در فرآیند جوشکاری در فرآیند تولید تحت عملیاتی مثل ماشینکاری، اکستروژن و غیره قرار می‌گیرند، پیشگرم کردن تا حدود ۱۵۰ الی ۲۰۰ درجه سانتیگراد توصیه شده است [۸].



۱۲- کاهش قابلیت هدایت حرارتی فلز پایه

آن چه از روابط ریاضی هدایت حرارتی به دست می‌آید این است که افزایش درجه حرارت فلز، سبب کاهش قابلیت هدایت حرارتی آن می‌گردد [۸].

۱۳- افزایش پهنای ناحیه HAZ

یکی از تأثیرات پیشگرم کردن بیش از حد، پهن تر شدن ناحیه متأثر از حرارت است. افزایش پهنای منطقه HAZ، سبب بروز تغییرات ساختاری و کاهش خواص مکانیکی در سطح گسترده‌تری از فلز پایه می‌شود و این، تنها نقطه ضعف پیشگرم کردن است، البته در شرایطی که قطعه کار بیش از حد پیشگرم شود.

همان گونه که گفته شد، پیشگرم کردن قطعه کار قبل از جوشکاری، نرخ سرد شدن جوش را کاهش داده ولی عرض منطقه HAZ را افزایش می‌دهد. همچنین پیشگرم کردن می‌تواند تأثیرات به سزایی بر ساختارهای میکروسکوپی فلز پایه و جوش و نیز میزان سختی و استحکام و چقرمگی جوش داشته باشد [۸].

۵-۲- روش های پیشگرم کردن

روش های فراوانی برای پیشگرم کردن موضعی وجود دارد. عمومی ترین روش های پیشگرم کردن عبارتند از:

- ۱- گرم کردن شعله‌ای
- ۲- گرم کردن مقاومتی یا القائی
- ۳- گرم کردن به روش مادون قرمز
- ۴- گرم کردن به روش لامپ کوارتز

از میان چهار روش فوق نیز، گرمایش شعله ای و مقاومتی از روش های دیگر کاربرد بیشتری دارند. روش گرم کردن شعله ای به وسیله مشعل اکسی-گاز انجام می‌شود. شعله های متفاوتی (کربوره کننده، خنثی و اکسیدکننده) با تنظیم نسبت اکسیژن به سوخت قابل دستیابی است.



هرچند که در اکثر موارد از شعله خنثی استفاده می‌شود. این روش دقت کمی دارد و نیازمند مهارت اپراتور می‌باشد. در روش گرم کردن مقاومتی که از مزایایی چون قابل حمل بودن و هزینه کمتر برخوردار است، توزیع حرارت یکنواخت تری حاصل می‌گردد. دما به راحتی و به دقت در این روش قابل کنترل می‌باشد. محدودیت‌های این روش این است که عناصر آلیاژی ممکن است در حین پیشگرم کردن اکسیده شوند [۷].

۵-۳- محاسبه دمای پیشگرم در فولادها

برای محاسبه و انتخاب درجه حرارت پیشگرم کردن، روش‌های علمی و تجربی زیادی وجود دارد. به عنوان مثال برای انتخاب دمای پیشگرم فولادهای آلیاژی کم آلیاژ، مراجعه به استانداردهایی مثل الف-جلد نهم از سری ASME (Boiler Code)، ب-سری D1-1 از استانداردهای AWS (Structural Welding Code)، ج-API یا AASHTO معادل (American Association of state Highway and Transportation Officials) یا دیگر کدها و استانداردهای جوشکاری توصیه شده است. روش دیگر محاسبه دمای پیشگرم، به کمک مقدار کربن معادل آلیاژ است که اغلب در مورد فولادهای کربنی و آلیاژی کم آلیاژ پاسخ‌های مناسبی به دست می‌دهد. همچنین روش دیگر، محاسبه و انتخاب درجه حرارت پیشگرم کردن با استفاده از دیاگرام‌ها یا منحنی‌های CCT است. به هر حال، معمولاً با داشتن کربن معادل و ضخامت قطعه فولادی می‌توان دمای پیشگرم نسبتاً مناسبی برای فولاد مورد نظر انتخاب کرد. برای محاسبه کربن معادل (CE)، دانستن آنالیز فولاد مورد نظر و فرمول زیر کافی است:

$$CE = \%C + \frac{1}{6}(\%Mn) + \frac{1}{15}(\%Ni) + \frac{1}{4}(\%Mo) + \frac{1}{4}(\%Cr) + \frac{1}{13}(\%Cu)$$

بر این اساس:

- اگر $CE < 0.45$ باشد، به پیشگرم نیاز چندانی وجود ندارد.
- اگر $0.45 < CE < 0.6$ باشد، پیشگرم بین ۹۵ تا ۲۰۵ درجه سانتیگراد توصیه می‌گردد.
- اگر $CE > 0.6$ باشد، پیشگرم در فاصله دمایی ۲۰۰ تا ۳۷۵ درجه سانتیگراد مناسب می‌باشد.



علاوه بر موارد بالا، توجه به نکات زیر نیز ضروری است.

- ۱- اگر دمای اولیه فلز پایه از دمای محیط بالاتر باشد می‌تواند دمای پیشگرم محسوب شود.
 - ۲- کنترل درجه حرارت فلز پایه در طول مدت جوشکاری در لایه‌های مختلف در جوش‌های چند پاسی که دمای بین پاسی نامیده می‌شود.
 - ۳- هر نوع سیکل حرارتی که پس از انجام جوشکاری اعمال می‌شود به عملیات پس گرمایی موسوم است.
 - ۴- درست بودن درجه حرارت پیشگرم در عمل و اطمینان از درست بودن آن به کمک ابزارهای سنجش حرارت و ابزارهای پیشگرم کردن
 - ۵- زمان نگهداری در درجه حرارت پیشگرم
 - ۶- محاسبه سرعت سرد شدن فلز جوش
- بر این اساس می‌توان درجه حرارت‌ها و زمان‌های نگهداری پیشگرم کردن تعدادی از فلزات و آلیاژهای گوناگون را بررسی کرد [۸].

۵-۳-۱- پیشگرم فولادهای ساده کربنی با کربن متوسط

برای قطعات ضخیم‌تر از ۱۵mm باید از پیشگرم در حدود ۴۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد استفاده کرد. با افزایش ضخامت، نیاز به افزایش درجه حرارت نبوده و فقط لازم است به ازای هر ۲۵mm افزایش ضخامت، زمان نگهداری حدود ۱ ساعت افزایش یابد. باید همواره در نظر داشت. علی‌رغم آن که پیشگرم فولادهای ساده کربنی با کربن متوسط سبب کاهش خطر نفوذ هیدروژن و کاهش ترک‌های سرد می‌گردد، افزایش بیش از حد زمان نگهداری در دمای پیشگرمایی نیز سبب افزایش پهنای منطقه HAZ خواهد شد [۸].

۵-۳-۲- پیشگرم فولادهای ساده کربنی پر کربن

دمای بالای تحول یا استحاله فازی و حساسیت بیش از حد نسبت به خطرات ناشی از هیدروژن تردی و ترک‌های ناشی از آن موجب شده تا بحث پیشگرم، کنترل درجه حرارت‌های بین پاسی و حرارت ورودی در خصوص فولادهای کربنی پر کربن و به ویژه انواع سختی پذیر آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد، اما همواره باید این نکته را در نظر داشت که افزایش بیش از حد دمای پیشگرم در



فولادهای پرکربن سختی‌پذیر، ممکن است سبب ترک خوردگی قطعه گردد. برای پیشگرم کردن این قبیل فولادها، اغلب استفاده از المنت‌ها یا گرم‌کننده‌های حرارتی برقی و در صورت کوچک بودن قطعه، کوره‌های حرارتی یا الکتریکی توصیه می‌شود. پیشگرم کردن در حقیقت نرخ سرد شدن جوش و منطقه HAZ را کاهش داده و در نتیجه موجب کاهش ترک‌های سرد و هیدروژن تردی گردیده و سختی فولاد را تا حد مورد نظر کاهش می‌دهد. در جوشکاری چند پاسی فولادهای پرکربن، علاوه بر پیشگرم کنترل، درجه حرارت بین پاسی هم بسیار حائز اهمیت است و همواره باید سعی کرد تا دمای قطعه و ناحیه جوشکاری شده در فاصله بین دو پاس در دمای بین پاسی بالاتری نگهداری شود. همیشه باید در نظر داشت که افزایش بی‌رویه درجه حرارت رشد بیش از حد دانه‌ها در HAZ و در نتیجه کاهش خواص مکانیکی را در پی دارد. برای محاسبه حداقل درجه حرارت پیشگرم لازم برای جوشکاری فولادهای ساده کربنی و پرکربن قابل سختکاری، توجه به نکات زیر ضروری است:

- ترکیب شیمیایی فلز پایه و الکتروود مصرفی
 - مقدار هیدروژن ورودی به جوش
 - تنش اعمال شده به سرتاسر جوش
- فاکتور تمرکز تنش در ریشه یا گرده جوش، رابطه نزدیکی با طرح اتصال داشته و تأثیر به سزایی در افزایش احتمال ترک برداشتن جوش دارد. جدول ۶ نمونه‌هایی از اتصالات مختلف را با ذکر فاکتور تمرکز تنش (K_t) در ریشه یا گرده جوش نشان می‌دهد.

جدول ۶: فاکتور تمرکز تنش در ریشه یا گرده جوش در اتصالات مختلف [۸]

فاکتور تمرکز تنش (K_t)	نوع اتصال
۴	Y شکل - ریشه
۳/۵	X شکل - ریشه
۴ تا ۵	Y شکل - ریشه
۶ تا ۸	Y شکل یکطرفه - ریشه
۱/۵	V شکل - ریشه
۱/۵	کلیه اتصالات - گرده



کد جوشکاری فلزات ساختمانی کانادا (CSA W59) و آمریکا (AWS D1-1)، در انتخاب درجه حرارت پیشگرم برای بسیاری از فولادها پیشنهادهایی ارائه میکنند. در جدول ۷ و ۸ نمونه‌ای از این اطلاعات آورده شده است.

جدول ۷: حداقل درجه حرارت پیشگرمایی و درجه حرارت بین پاسی برای جوشکاری قوسی الکتریکی مخصوص فولادهای کربنی پرکربن [۸]

حداقل دمای پیشگرمی و بین پاسی (°C)												ضخامت قطعه کار	
Cf۵۳	Ck۰۱	Ck۶۷	Ck۶۷	Ck۶۰	Cm۶۰	Ck۵۵	Cm۵۵	Ck۴۵	Cm۴۵	Ck۳۵	Cm۳۵	DIN	(mm)
۱۰۵۰	۱۰۹۵	۱۰۸۰	۱۰۷۰	۱۰۶۰	۱۰۶۰	۱۰۵۵	۱۰۵۵	۱۰۴۵	۱۰۴۵	۱۰۳۵	۱۰۳۵	AISI	
۶۵	۶۵	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	کمتر از ۱۰mm	
۹۵	۹۵	۶۵	۴۰	۴۰	۴۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۵-۲۰	
۹۵	۹۵	۶۵	۶۵	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۲۰-۲۵	
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۹۵	۹۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۲۵-۳۵	
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۶۵	۴۰-۵۰	
۱۵۰	۱۷۵	۱۷۵	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۲۰	۱۲۰	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۵۵-۶۰	
۲۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۰۰	۱۷۵	۱۷۵	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	بیش از ۶۰mm	

جدول ۸: حداقل درجه حرارت پیشگرمایی و بین پاسی برای جوشکاری فولادهای کربنی در استاندارد ASTM آمریکا [۸]

حداقل دمای پیشگرمی و بین پاسی (°C)					ضخامت قطعه کار (mm)
۱۰۸۰	۱۰۷۰	Cm۴۵	CK۳۵	A۵۱۴/a۵۱۷	
۱۰	۴۰	۱۰	۱۰	۱۰	کمتر از ۱۰
۴۰	۵۰	۱۰	۴۰	۱۰	۱۵-۲۰
۴۰	۶۵	۱۰	۴۰	۵۰	۲۰-۲۵
۶۵	۹۵	۴۰	۹۵	۵۰	۲۵-۳۵
۶۵	۹۵	۶۵	۹۵	۷۵	۴۰-۵۰
۶۵	۱۵۰	۶۵	۱۵۰	۷۵	۵۵-۶۰
۱۵۰	۱۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۱۰۰	بیش از ۶۰



آنچه در پیشگرم کردن فولادهای این خانواده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زمان نگهداری یا به بیان دیگر فاصلهٔ حرارت دیده است. باید سعی کرد که حداکثر ۷۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر از دو طرف محل اتصال پیشگرم شود. همچنین در صورت استفاده از فرآیند جوشکاری زیرپودری به صورت تک پاسی، می‌توان درجه حرارت پیشگرم را تا حد قابل توجهی کاهش داد. مطالعات نشان داده است که محاسبات یا انتخاب درجه حرارت پیشگرم ارتباط بسیار نزدیکی با مقدار هیدروژن و کنترل آن دارد. تجربه نشان داده است فاکتورهایی مثل نرخ سرد شدن در فاصله دمایی ۳۰۰-۱۰۰ درجه سانتیگراد، و مقدار هیدروژن همان طور که گفته شد، مهم‌ترین عوامل انتخاب در درجه حرارت پیشگرم در این قبیل فولادها به شمار می‌آیند. محققان، دو پارامتر مهم ترکیب شیمیایی فلز و مقدار هیدروژن را در یک فاکتور ریاضی به صورت معادله درآورده‌اند. Ito و Bessyo در فرمولی، مقدار نفوذ هیدروژن برحسب میلی‌متر جیوه در ۱۰۰ گرم از فلز جوش را، ملاک قرار داده و فرمول P_{cm} را به شکل زیر ارائه کرده اند:

$$12P_{cm} = \log_{10} H$$

$$P_{cm} = C + \frac{Mn + Si + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

که بر این اساس

در واقع ۳ نوع مقدار هیدروژن ۵، ۱۰ و ۳۰ میلی‌لیتر در ۱۰۰ گرم فلز با عناوین H_1 ، H_2 و H_3 در نظر گرفته می‌شود. به کمک جدول ۹ می‌توان حساسیت جوش را نسبت به ترک‌های ناشی از هیدروژن بررسی کرد [۸].

جدول ۹: حساسیت جوش نسبت به ترک‌های ناشی از هیدروژن [۸]

P_{cm}						مقدار هیدروژن در مواد مصرفی جوش (ml/۱۰۰gr)
≤ 0.43	≤ 0.38	≤ 0.33	≤ 0.28	≤ 0.23	≤ 0.18	
F	E	D	C	B	A	۵ (H_1)
-	F	E	D	C	B	۱۰ (H_2)
-	-	F	E	D	C	۳۰ (H_3)



درباره این جدول:

A: حداقل حساسیت نسبت به بروز ترک (کمترین)

B: متوسط کم

C: متوسط زیاد

D: زیاد

F: حداکثر حساسیت نسبت به بروز ترک (بیشترین)

تقسیم بندی الکترودها نیز براساس مقدار هیدروژن موجود در ترکیب آن‌ها صورت پذیرفته است:
H₁: با مقدار هیدروژن بسیار ناچیز؛ با حداکثر 5ml/100 gr هیدروژن می‌باشد که اغلب الکترودهای قلیایی Low Hydrogen از این دسته‌اند. برای استفاده از الکترودهای قلیایی مذکور پیشگرم کردن در 400 درجه سانتی‌گراد، توصیه شده است. الکترودهای مذکور را تا 2 ساعت پس از پیشگرم نیز می‌توان مورد استفاده قرار داد.

H₂: با مقدار هیدروژن کم؛ دارای حداکثر 10ml/100gr هیدروژن هستند. الکترودهای قلیایی کم هیدروژن از این گروه را می‌توان پس از خارج نمودن از بسته و پیشگرم (پخت مجدد) در 300-400 درجه سانتی‌گراد برای مدت 4 ساعت استفاده کرد.

H₃: با هیدروژن کنترل نشده: این نوع، دارای حداکثر 30ml/100gr هیدروژن بوده و اغلب الکترودهای سلولزی و پودرهای مورد استفاده در مورد سیم جوش‌های توپودری از این دسته‌اند.

جدول‌های (10) و (11) کمترین درجه حرارت پیشگرم و بین پاسی پیشنهادی برای فولاد کربنی، پرکربن را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهند [8].



جدول ۱۰: حداقل درجه حرارت پیشگرم و بین پاسی برای جوش گوشه [۸]

P _{cm}						ضخامت فلز پایه (mm)
F	E	D	C	B	A	
۱۴۰	۶۰	حداکثر ۲۰	حداکثر ۲۰	حداکثر ۲۰	حداکثر ۲۰	<۱۰mm
۱۴۰	۱۰۵	۲۰	حداکثر ۲۰	حداکثر ۲۰	حداکثر ۲۰	۱۰-۲۰
۱۴۰	۱۱۵	۶۵	حداکثر ۲۰	حداکثر ۲۰	حداکثر ۲۰	۲۰-۴۰
۱۴۰	۱۲۰	۹۰	۴۵	حداکثر ۲۰	حداکثر ۲۰	۴۰-۸۰
۱۴۰	۱۲۵	۱۰۰	۹۰	حداکثر ۲۰	حداکثر ۲۰	بیش از ۸۰mm

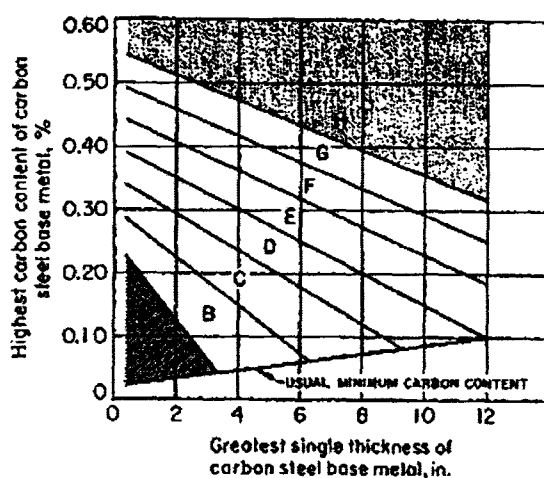
جدول ۱۱: حداقل درجه حرارت پیشگرم و بین پاسی برای جوش تخت [۸]

P _{cm}						ضخامت فلز پایه (mm)
F	E	D	C	B	A	
۱۵۰	۱۵۰	۱۰۰	حداکثر ۲۰	حداکثر ۲۰	حداکثر ۲۰	کمتر از ۱۰mm
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۲۰	۶۰	حداکثر ۲۰	۱۰-۲۰
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۹۵	۲۰-۴۰
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۲۰	۴۰-۸۰
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۲۵	بیش از ۸۰mm

یکی دیگر از راه‌های محاسبه دمای پیشگیری برای جوشکاری فولادهای ساده کربن و پرکربن، استفاده از دو پارامتر ترکیب شیمیایی (کربن معادل) و ضخامت به صورت توأم می‌باشد که به کمک منحنی‌های شکل ۷۰ و ۷۱ قابل محاسبه و انتخاب می‌باشند [۸].



همان گونه که از منحنی شکل ۷۰ و اعداد مندرج در جدول ۱۲ ملاحظه می شود، هنگام استفاده از مواد مصرفی جوشکاری پرهیدروژن که مقدار هیدروژن آنها کنترل نشده است باید از دمای پیشگرم بالاتری استفاده کرد [۸].



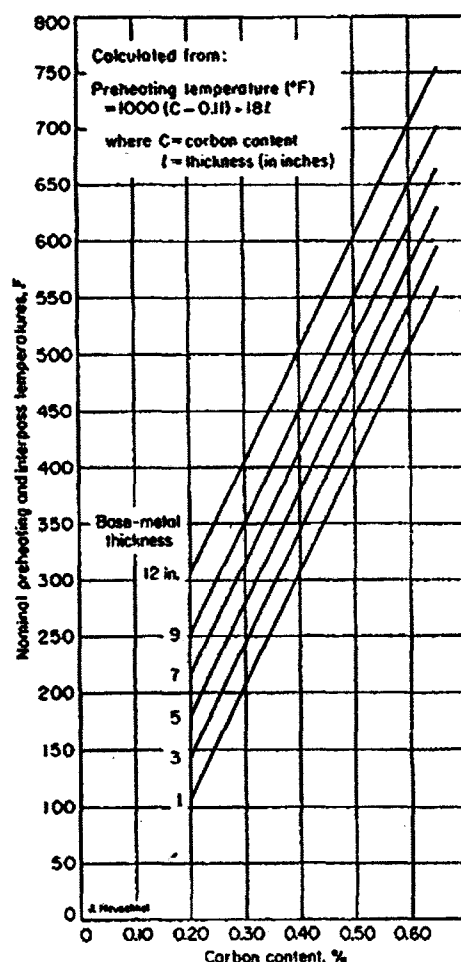
شکل ۷۰: منحنی های ضخامت- درصد کربن برای تعیین محدوده دمایی برای انتخاب دمای پیشگرم و بین پاسی فولادهای ساده کربنی با کربن بالا [۸].

جدول ۱۲: انتخاب درجه حرارت پیشگرم و بین پاس برای جوشکاری فولاد ساده کربن
پرکربن از روی منحنی های درصد کربن- ضخامت [۸]

انتخاب درجه حرارت پیشگرمایی و بین پاسی (°C)		محدوده حرارتی
جوشکاری با الکتروود کم هیدروژن	جوشکاری با الکتروود هیدروژن کنترل نشده	
۱۰-۴۰	۱۰-۴۰	A
۱۰-۴۰	۴۰-۹۵	B
۴۰-۹۵	۹۵-۱۵۰	C
۶۵-۱۵۰	۱۲۰-۲۰۰	D
۹۵-۲۰۰	۱۵۰-۲۶۰	E
۱۲۰-۲۶۰	۱۷۵-۳۱۵	F
۱۵۰-۳۱۵	۲۰۰-۳۷۰	G
۲۰۰-۴۲۵	۲۳۲-۴۲۵	H



منحنی شکل ۷۱ تأثیر ترکیب شیمیایی به ویژه درصد کربن فلز پایه را در ضخامت‌های مختلف بر درجه حرارت پیشگرم و دمای بین پاسی در جوشکاری MMA نشان می‌دهد. با استفاده از این منحنی نیز می‌توان، درجه حرارت‌های پیشگرم و بین پاسی را برای قطعات مورد نظر انتخاب کرد [۸].



شکل ۷۱: منحنی‌های تأثیرات ترکیب شیمیایی و درصد کربن فلز پایه در ضخامت‌های مختلف بر درجه حرارت‌های پیشگرم و بین پاسی فولادهای پرکربن در فرآیند جوشکاری MMA [۸].



اندازه مهره های جوش^۱ نیز، بر درجه حرارت پیشگرم اثر دارند، زیرا مهره جوشهای کوتاه و کوچک، سریع تر از مهره های جوش بلند و بزرگ سرد می شوند. اندازه مهره های جوش، با کاهش سرعت جوشکاری، حرارت ورودی به جوش را افزایش می دهد که نتیجه آن، کاهش نرخ سرد شدن جوش و در نتیجه کاهش سختی در منطقه HAZ می باشد. به همین سبب، در مواردی که به پیشگرم خیلی زیاد و محاسبات مهندسی نیاز نباشد، برای بهبود خواص جوش می توان با کنترل اندازه مهره های جوش (کم یا زیاد کردن اندازه آن ها) به خواص مورد نظر در منطقه HAZ دست یافت [۸].

همچنین تعداد پاس های جوشکاری نیز به نوبه خود بر درجه حرارت پیشگرم فولاد اثر دارند. مقایسه خواص مکانیکی، میزان و اندازه ترک های انقباضی دو جوش تک پاسی و چند پاسی با ابعاد مشابه نشان می دهد که در جوش های چند پاسی، نیاز به پیشگرم، به مراتب کمتر از جوش های تک پاسی است زیرا در جوش های چند پاسی که دمای بین پاسی به دقت کنترل می شود حرارت ناشی از جوشکاری پاس قبل، در حقیقت به عنوان دمای پیشگرم برای پاس بعدی به حساب می آید. از این رو، کنترل دمای بین پاسی در جوش های چند پاسی از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده و عموماً در جوشکاری فولادهای پرکربن از قوانین، جدول ها و منحنی های گفته شده برای پیشگرم تبعیت کرده و مقدار آن را در هر پاس، با حداقل درجه حرارت پیشگرم مورد نیاز برابر می کنند (به منحنی های شکل های ۷۰ و ۷۱ مراجعه شود).

۵-۴- عملیات حرارتی پس گرم

در اثر جوشکاری دمای فلز به شدت بالا رفته و فرآیند ذوب در منطقه جوش و قرار گرفتن فلز در درجه حرارت های بالا در منطقه HAZ، سبب ایجاد تغییرات ناخواسته و گاهی نامطلوب در ساختار میکروسکوپی فلز یا آلیاژ مربوط می باشد. با گرم کردن مجدد فلز جوشکاری شده پس از اتمام جوشکاری و سرد شدن آن، به کمک قرار دادن فلز در درجه حرارت های دلخواه و کنترل دما و زمان نگهداری و بالاخره سرعت سرد شدن، می توان خواص از دست رفته فلز در اثر جوشکاری را تا حدود زیادی بازگردانید و حتی به خواص جدیدی دست یافت. به طور کلی، عملیات حرارتی اعمال شده بعد از اتمام جوشکاری را عملیات پس گرم^۲ (PWHT) می نامند [۸].

^۱-Weld Bead

^۲-Post Weld Heat Treatment



تصحیح ساختار متالورژیکی، آزادسازی تنش‌های پسماند، اصلاح تغییرات ابعادی و شکلی مانند تابیدگی و انقباض، افزایش مقاومت در برابر خوردگی‌های تنشی، و نیز بازگرداندن یا افزایش چقرمگی، انعطاف پذیری، سختی عمق یا سطحی، و سایر خواص مکانیکی از مهم‌ترین نتایج بعضی از عملیات پس گرمایی به حساب می‌آید. بعضی از مشکلات ناشی از سیکل حرارتی جوش و آثار متالورژیکی آن‌ها به قرار زیر می‌باشند:

- ۱- جذب گازهای محیطی در فلز جوش
- ۲- ترک خوردن جوش و فلز پایه در محدوده HAZ
- ۳- انقباض و تنش‌های باقیمانده یا تمرکز تنش
- ۴- تغییرات در اندازه دانه‌های فلز جوش و فلز پایه در محدوده HAZ
- ۵- کاهش چقرمگی
- ۶- کاهش یا افزایش سختی
- ۷- کاهش مقاومت به خوردگی به ویژه SCC
- ۸- کاهش استحکام کششی، فشاری، خمشی، خستگی و انعطاف پذیری
- ۱۰- کاهش مقاومت‌های حرارتی جوش و فلز پایه به ویژه در محدوده HAZ

به طور کلی، به کمک پس گرم می‌توان بسیاری از مشکلات گفته شده را مرتفع ساخت [۸]. انواع عملیات پس گرم را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- ۱- عملیات حرارتی پس گرم برای تشکیل ساختارهای تعادلی
- ۲- عملیات حرارتی پس گرم به منظور سختکاری سطحی که مشابه سخت کردن سطحی در فلز پایه انجام می‌شود.
- ۳- عملیات حرارتی پس گرم برای اصلاح تغییرات ابعادی و تابیدگی

بدون تردید در انتخاب شرایط عملیات حرارتی دیاگرام‌های تعادلی فازی هر آلیاژ پایه اطلاعات اولیه تشکیل می‌دهند. اما همان طور که از کاربرد آن‌ها مشخص است، این نمودارها فقط شرایط تعادل بین دو عنصر آلیاژی را در ارتباط با درجه حرارت‌های مختلف نشان می‌دهند، در حالی که در بیشتر عملیات حرارتی، دگرگونی‌های فازی در شرایطی غیرتعادلی به وقوع می‌پیوندد. در این شرایط، پارامتر زمان از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است، پس دخالت دادن آن در معادلات عملیات



حرارتی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. از این رو، شناخت و آگاهی از چگونگی به کارگیری و استفاده از نمودارهای TTT، مهمترین پیش نیاز برای مطالعه عملیات پس گرم قطعات جوشکاری شده به حساب می‌آید. به وسیله نمودارهای TTT، می‌توان اثر هر دو پارامتر زمان و دما را روی پیشرفت دگرگونی فازها در آلیاژهای مورد نظر به سادگی بررسی کرد. برحسب اینکه استحاله فاز یا ساختار به فاز یا ساختار جدید به صورت ایزوترم (در دمای ثابت)^۱ و یا به شکل غیرایزوترم (در اثر سرد شدن مداوم) انجام گیرد، نمودارهای TTT مورد استفاده نیز باید به ترتیب از نوع نمودارهای دگرگونی ایزوترمال^۲ و یا دگرگونی غیرایزوترمال یا دگرگونی در اثر سرد شدن مداوم^۳ باشند [۸].

۵-۴-۱- انواع پس گرم برای تشکیل ساختارهای تعادلی

۵-۴-۱-۱- تنش زدایی

جوشکاری، به عنوان یک عملیات شدید حرارتی، در قطعه، ایجاد تنش‌های حرارتی داخلی می‌کند که این تنش‌ها به نوبه خود به تاب برداشتن، ترک خوردن و در نهایت شکستن قطعه جوشکاری به ویژه در قطعات ضخیم‌تر منجر می‌شود. حوضچه جوش که در طی جوشکاری به حالت مذاب در آمده، در ضمن انجماد، منقبض می‌شود. از آن جایی که فلز پایه سرد بوده و انعطاف پذیری نسبتاً کمی دارد (در مقایسه با فلز جوش که در دمای بسیار بالاتری قرار دارد) در برابر تغییر شکل ناشی از انقباض منطقه جوش مقاومت کرده و منطقه جوش و تا حدودی مناطق مجاور آن را تحت تنش‌های کششی قرار می‌دهد [۸]. راه حل بسیار ساده برای حذف تنشهای باقیمانده، آنیل کردن تمام جوش می‌باشد اما همانطور که می‌دانیم در اغلب موارد قطعه جوشکاری شده بدلیل اندازه و شکل آن، امکان آنیل کردن را ندارد. به همین دلیل دو روش زیر توصیه می‌گردد:

۱- آنیل دمای پائین

۲- تنش زدائی در اطراف منطقه جوش با عملیات حرارتی تنش زدائی دمای پائین [۷].

برای حذف یا کاهش تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری، قطعه مورد نظر را برای زمان مشخصی در درجه حرارتی زیر درجه حرارت بحرانی A_{C1} حرارت می‌دهند. زمان حرارت دادن، به ابعاد قطعه و درجه حرارت تشنگیری بستگی دارد. هر چه درجه حرارت تشنگیری بالاتر انتخاب شود، زمان

۱-Isotermal

۲-Isotermal Termsformation (IT)

۳-Continios Trmsformayion (CT)



لازم برای انجام کامل تنش زدایی کمتر خواهد بود. به طور مثال، درجه حرارت لازم برای تنش زدایی فولادها از ۴۸۰ تا ۶۷۰ درجه سانتیگراد توصیه گردیده‌اند که این دما در زیر درجه حرارت A_{c1} یا دمای دگرگونی فازی یوکتوئیدی است (زمان نگهداری اغلب ۱ ساعت به ازای هر ۲۵mm ضخامت توصیه شده است). برای جلوگیری از ایجاد تنش‌های حرارتی جدید و همچنین احتمال شکستن قطعه در ضمن عملیات حرارتی تنش زدایی، معمولاً حرارت دادن و یا سرد کردن از درجه حرارت رفع تنش باید خیلی آهسته انجام گیرد. این موضوع، به ویژه در رابطه با قطعات ضخیم و تجهیزات بزرگ جوشکاری شده باید بیشتر کنترل و رعایت گردد.

هدف از عملیات تنش زدایی ایجاد تغییرات عمده‌ای در خواص مکانیکی قطعه نیست، بلکه رفع تنش فقط توسط یک مکانیزم بازیابی انجام می‌گیرد. عملیات بازیابی، تقریباً همزمان با حرارت دادن و گرم کردن قطعه شروع می‌شود. در یک درجه حرارت ثابت، سرعت بازیابی، ابتدا زیاد و سپس با گذشت زمان، کاهش می‌یابد [۸]. میزان تنش پسماند ایجاد شده در قطعه می‌تواند حداکثر معادل تنش تسلیم قطعه باشد. با افزایش دما میزان تنش تسلیم کاهش یافته و به تبع آن تنش پسماند موجود در قطعه نیز از مقدار اولیه تا تنش تسلیم مواد در دمای تنش زدایی کاهش می‌یابد [۹]. شرایط و دمای لازم جهت تنش زدایی توسط ترکیب شیمیایی قطعه مشخص می‌شود.

به طور مثال برای تنش زدایی فولاد AISI ۴۱۳۰، علاوه بر انتخاب صحیح درجه حرارت، باید عملیات پس گرم را بلافاصله پس از خاتمه جوشکاری و پیش از آن که دمای قطعه از درجه حرارت پیشگرم یا بین پاسی آن پایین‌تر آید، آغاز کرد.

به این ترتیب و با توجه به تبدیل فازی آستنیت‌های باقی مانده به بینیت در جریان تنش زدایی، در نهایت اثری از مارتنزیت در ساختار نهایی جوش ملاحظه نخواهد شد. منحنی‌های TTT فولاد AISI ۴۱۳۰ به خوبی این مورد را تأیید می‌کند [۸].

عملیات حرارتی پیشگرم و عملیات حرارتی پس از جوشکاری برای برخی فولادهای عمومی

در جدول ۱۳ ارائه شده است [۷].



جدول ۱۳: عملیات حرارتی پیشگرم و پس گرم برای برخی از فولادهای معمولی [۷].

نوع فولاد	محدوده کربن فولاد (%)	محدوده ضخامت	حداقل پیش گرمایش (°C)		محدوده گرمایی عملیات حرارتی پس از جوشکاری (°C)
			الکترودهای هیدروژن پائین	الکترودهای دیگر	
AISI-SAE ۱۰۱۰	--	≤۵۰	بالای ۱۲°C -	بالای ۱۲°C -	اختیاری (۵۹۵-۶۷۵)
ASTM A۳۶-۸۱	≤۰/۲۵	۲۵-۵۰	۱۰°C	۹۵°C	(۵۹۵-۶۷۵)
۲, ۱/۴ Cr-۱ Mo	≤۰/۱۵	≤۱۳	۶۵°C	۲۰۵°C	۶۷۵-۷۶۰ (سرد کردن در هوا)
API ۵L	۰/۲۱-۰/۲۵	۱۳-۲۵	بالای ۱۲°C -	۴۰°C	۵۹۵-۶۷۵
ASTM A۳۷۲-۸۲	≤۰/۲۵	۲۵-۵۰	بالای ۱۲°C -	۴۰°C	۵۹۵-۶۷۵
ASTM A۴۴۱-۸۱	≤۰/۲۵	۲۵-۵۰	۴۰°C	۹۵°C	۵۹۵-۶۷۵
ASTM A۵۷۲-۸۲	≤۰/۲۲	۱۳-۲۵	۱۰°C	۶۵°C	--
ASTM A۵۸۸-۹۲	--	۲۵-۵۰	۴۰°C	پیشنهاد نمی شود	--
AISI-SAE ۴۱۳۰	۰/۲۷-۰/۳۳	≤۲۵	۱۵۰°C	۲۰۵°C	۵۹۵-۶۷۵
AISI-SAE ۸۶۲۰	≤۰/۲۰	۱۳-۵۰	۴۰°C	۱۵۰°C	۵۹۵-۶۷۵

شرایط تنش زدایی انواع فولادهای آلیاژی به جز فولادهای زنگ نزن در جدول ۱۴ آورده شده است.

جدول ۱۴: انتخاب درجه حرارت و شرایط تنش زدایی انواع فولادهای آلیاژی [۸]

آلیاژ	شرایط عملیات پس گرم- تنش زدایی
فولاد ساده با کربن متوسط	گرم کردن تا ۵۳۰ الی ۶۰۰ درجه سانتیگراد با سرعت ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد در ساعت و نگهداری در این محدوده دمایی به مدت ۲۵ دقیقه به ازای هر ۱ سانتیمتر ضخامت قطعه و سپس سرد کردن آرام، با سرعت ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد در ساعت.
فولاد ساده کربنی پرکربن	گرم کردن تا ۶۲۰ تا ۶۷۵ درجه سانتیگراد با سرعت ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد در ساعت و نگهداری در این محدوده دمایی به مدت ۲۵ دقیقه به ازای هر ۱ سانتیمتر ضخامت قطعه و سپس سرد کردن آرام، با سرعت ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد در ساعت.
فولادهای کم آلیاژ منگنزدار	گرم کردن تا حدود ۵۵۰ درجه سانتیگراد با سرعت ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد در ساعت و نگهداری در این محدوده دمایی به مدت ۲۵ دقیقه به ازای هر ۱ سانتیمتری ضخامت قطعه و سپس سرد کردن آرام، با سرعت ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد در ساعت.
فولادهای آلیاژی پرآلیاژ منگنزدار	نیاز به تنش زدایی ندارد.
فولاد کم آلیاژ منگیزی- کروم دار	گرم کردن آهسته تا ۵۷۵ درجه سانتیگراد و نگهداری در این دما به مدت ۰/۵ ساعت به ازای هر ۲۵ میلی متر ضخامت، در انتهای سرد کردن با یک شیب آهسته



جدول ۱۴ (ادامه)

شرایط عملیات پس گرم - تنش زدایی	آلیاژ
در صورت ضخیم بودن قطعه و اطمینان از وجود تنش‌های پسماند گرم کردن حداکثر تا دمای ۳۰۰ الی ۳۵۰ درجه سانتیگراد	فولادهای آلیاژی پرآلیاژ منگنز - کروم دار
گرم کردن در ۵۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتیگراد و نگه داری در این دما به مدت ۱ ساعت به ازای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت، و در ادامه، سرد کردن آرام	فولادهای آلیاژی، کم آلیاژ منگنز - سیلیسیم دار
در صورت نیاز و در صورتی که با چکش زدن برطرف نمودن تنش‌ها فراهم نگردد، گرم کردن تا ۶۲۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۵ دقیقه به ازای هر ۱۰ میلی‌متر ضخامت لازم است.	فولاد آلیاژی، کم آلیاژ منگنز - نیکل دار و فولاد کم آلیاژ منگنز - مولیبدن دار
گرم کردن تا حدود ۴۵۰ درجه سانتیگراد و نگهداری در این دما به مدت ۱ ساعت به ازای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت، سپس سرد کردن آهسته.	فولاد کم آلیاژ کروم - مولیبدن دار
حرارت دادن تا ۵۵۰ درجه سانتیگراد، نگهداری به مدت ۱ ساعت به ازای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت، سرد کردن آهسته	فولاد آلیاژ کروم - مولیبدن دار، تندبر
حرارت دادن تا ۶۰۰ الی ۶۵۰ درجه سانتیگراد، نگهداری به مدت ۳۰ تا ۴۰ دقیقه به ازای هر ۲۵mm ضخامت و سپس سرد کردن آرام و تعادلی	فولاد پرآلیاژ کروم - مولیبدن، گرم کار
گرم کردن در ۵۵۰ تا ۵۷۰ درجه سانتیگراد، به مدت ۱ ساعت به ازای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت، سرد کردن بسیار آرام	فولاد پرآلیاژ کروم - منگنز دار، فولاد سوپاپ
حرارت دادن تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد، به مدت ۳۰ دقیقه به ازای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت، سپس سرد کردن بسیار آرام	فولاد پرآلیاژ کروم - سیلیسیم - دار پرکربن و کم کربن
گرم کردن تا ۵۸۰ درجه سانتیگراد، به مدت ۱ ساعت به ازای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت، سرد کردن تعادلی	فولاد پرآلیاژ کروم - آلومینیم - مولیبدن دار
حرارت دادن تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد، به مدت ۱ ساعت به ازای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت، سپس سرد کردن بسیار آهسته	فولاد پرآلیاژ کروم - آلومینیم - دار
گرم کردن در ۳۵۰ تا ۵۵۰ درجه سانتیگراد (هر چه درصد کربن بیشتر باشد، دمای تنشگیری باید بالاتر در نظر گرفته شود)، به مدت ۱ ساعت به ازای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت، سرد کردن آرام	فولاد کم آلیاژ کروم - سیلیسیم دار - فولاد فنر
حرارت دادن تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد، نگهداری به مدت ۱ ساعت به ازای هر ۲۵ میلی‌متر ضخامت، سپس سرد کردن بسیار آهسته در کوره	فولاد کم آلیاژ گوگرد دار - فولاد خوش تراش
نیازی به تنشگیری در اغلب موارد وجود ندارد	فولاد کم آلیاژ نیکل دار
حرارت دادن تا ۵۶۰ الی ۵۷۰ درجه سانتیگراد و نگهداری به مدت ۱۵ دقیقه به ازای هر سانتی متر ضخامت، سرد کردن تعادلی	فولاد پرآلیاژ نیکل دار
نیازی به تنشگیری وجود ندارد. در صورت تنشگیری، در فاصله دمایی بیش از ۶۰۰ درجه سانتیگراد به دلیل تبدیل فاز δ به σ کاهش خواص مقاومت به ضربه در فولاد جوش به چشم خواهد خورد. در صورت لزوم، تنشگیری در دمای حداکثر ۴۵۰ درجه سانتیگراد	فولاد پرآلیاژ نیکل - کروم



جدول ۱۴ (ادامه)

آلیاژ	شرایط عملیات پس گرم - تنش زدایی
فولاد کم آلیاژ نیکل - کروم - مولیبدن دار	حرارت دادن تا ۶۲۰ درجه سانتیگراد، به مدت ۱ ساعت به ازای هر ۲۵ میلی متر ضخامت، سرد کردن تعادلی
فولاد کم آلیاژ مولیبدن - کروم دار	گرم کردن در ۵۰۰ درجه سانتیگراد، به مدت ۱ ساعت به ازای هر ۲۵ میلی متر ضخامت، سرد کردن آهسته
فولاد کم آلیاژ کروم دار - کم کربن	حرارت در ۵۸۰ درجه سانتیگراد و نگهداری به مدت ۱ ساعت به ازای هر ۲۵ میلی متر ضخامت، سرد کردن بسیار آرام
فولاد کم آلیاژ کروم دار - پرکربن	حرارت در ۶۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد و نگهداری به مدت ۱ ساعت به ازای هر ۲۵ میلی متر ضخامت، سرد کردن بسیار آرام
فولاد پرآلیاژ کروم دار - پرکربن (SPK)	تنش زدایی در ۵۰۰ درجه، آنیل کردن نرم در ۸۳۰ درجه و سختکاری مجدد، در ۹۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، در تمامی این عملیات، زمان نگهداری به ازای هر ۲۵ میلی متر ضخامت، حدوداً ۳۰ تا ۴۵ دقیقه است. در پایان عملیات سختکاری، سرد کردن در آب با روغن انجام می پذیرد.

۵-۴-۱-۲- همگن سازی

عملیات حرارتی همگن کردن، اغلب برای قطعات ریختگی کاربرد دارد، زیرا در بیشتر قطعات ریختگی، جدایش های موضعی، ترکیب شیمیایی غیریکنواخت و توزیع عناصر شیمیایی غیرمتعادل به همراه دانه های شاخه ای و دندریتی، نیاز به انجام عملیات حرارتی همگن سازی ساختار را ضروری می سازد. هر یک از موارد یاد شده که ناشی از انجماد غیرتعادلی و در نتیجه عدم نفوذ کامل می باشند، خواص مکانیکی قطعه تولیدی را تا حد زیادی کاهش می دهند. از آن جا که عملیات جوشکاری، به ویژه در قطعات ضخیم، فرآیندی شبیه ریخته گری را تداعی می کند، در بعضی موارد که پس از جوشکاری قرار است روی قطعه کار، کارگرم یا سرد مکانیکی بعدی نیز اعمال شود، استفاده از همگن سازی به عنوان عملیات حرارتی پس گرم برای این قبیل قطعات جوشکاری شده نیز توصیه می شود.

برای همگن سازی ساختار قطعات جوشکاری شده بعد از جوشکاری، آن ها را در درجه حرارت های بالا، برای مدت زمان طولانی حرارت داده و سپس به آهستگی تا دمای محیط سرد می کنند. بدیهی است که دمای مورد استفاده، به جنس قطعه و زمان نگهداری و نیز به جنس و ابعاد قطعه جوشکاری شده بستگی دارد. شکل ۷۲ محدوده حرارتی همگن کردن برای انواع فولادهای کربنی را در نمودار تعادلی آهن- کربن نمایش داده است.



۵-۴-۱-۳- آنیل کردن

همانطور که گفته شد آنیل کردن به هر نوع عملیات حرارتی گفته می‌شود که به تشکیل ساختار غیرمارتنزیتی با سختی کم و انعطاف‌پذیری بالا منجر گردد. که در مفهوم جزئی‌تر و براساس کاربرد، انواع زیر تقسیم می‌شود: آنیل کامل که در عملیات پس گرم بعضی فولادهای زنگ‌نزن جوشکاری شده کاربرد مؤثری پیدا کرده و اغلب توصیه می‌گردد؛ و آنیل ایزوثرم که به طور معمول برای فولادهای آلیاژی که دارای سختی‌پذیری بالایی هستند استفاده می‌شود، زیرا اگر روی این فولادها عملیات حرارتی آنیل کامل انجام شود، به دلیل سختی‌پذیری زیاد، ساختمان نهایی حاصل، به جای پرلیت درشت، ممکن است پرلیت ریز و یا حتی مخلوطی از پرلیت ریز و بینیت بالایی باشد.

در قطعات جوشکاری شده از جنس فولاد آلیاژی سخت شونده، وقتی پس از جوشکاری فولاد از منطقه آستنیت تا درجه حرارت محیط در هوا سرد شود، احتمال تشکیل ترک‌های سطحی روی آن زیاد است. این پدیده، هنگام مارتنزیتی شدن مغز قطعه در نتیجه اعمال تنش کششی (ناشی از انبساط) روی سطح آن که پیش تر مارتنزیتی و سخت شده است اتفاق می‌افتد. از این رو، و برای جلوگیری از ایجاد ترک‌های سطحی، قطعات جوشکاری شده را به صورت گرم در کوره و در دمای 700°C نگهداری کرده تا استحاله آستنیت به پرلیت به طور کامل انجام شود. از این پس، سرعت سرد شدن اثر چندانی در ساختمان و خواص نهایی ندارد. با این حال، پس از پایان استحاله، قطعات را به طور معمول در هوا سرد می‌کنند [۸].

۵-۴-۲- عملیات حرارتی برای اصلاح تغییرات ابعادی و تابیدگی‌ها

ویژگی‌های فلز جوشکاری شده در نقاط مختلف اتصال یکسان نیست. عواملی همچون شکل و پروفیل ظاهری جوش تأثیرات به سزایی، میزان رسوب، حرارت ورودی، طرح اتصال و تنش حاصل از جوشکاری، بر این ویژگی‌ها در نقاط گوناگون جوش تأثیرات به سزایی اعمال می‌دارند. تنش پسماند، با ایجاد پدیده انقباض در اثر سرد شدن ناشی از انجماد فلز جوش، افزایش یافته و گستره محسوسی را در فلز اطراف جوش دربر می‌گیرد. انقباض طولی^۱ ناشی از جوشکاری از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S_L = \alpha \cdot \Delta T$$

که در آن:

۱-Longitudinal Shrinkage



S_L : انقباض طولی (درصد)

α : ضریب انبساط حرارتی فلز جوش ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) و

ΔT : اختلاف درجه حرارت نقطه انجماد و دمای محیط ($^{\circ}\text{C}$) است.

اگر سطح مقطع فلز پایه نسبت به جوش بزرگ باشد، تنش انقباضی و پسماند ناچیز بوده و در نتیجه تغییر الاستیکی در فلز جوش پدید می آورد، این تغییر شکل بدون نیاز به اعمال نیرو قابل رفع است. البته در اغلب موارد، مقدار S_L تنشی بیش از حد الاستیک ایجاد می کند که موجب تغییر شکل پلاستیک در فلز جوش می گردد. این تغییر شکل های پلاستیکی اغلب خود را به صورت پیچیدگی یا تاب برداشتن^۱ نشان می دهند. در چنین شرایطی، تنش پسماند در جسم برابر با حد الاستیک فلز جوش است. اگر فلز جوش نازک باشد (نازک تر از ۶mm)، احتمال خنثی شدن تنش های کششی در دو طرف جوش با تنش فشاری نزدیک به آنها که در منطقه خنثی ایجاد شده، زیاد است. اما در قطعات با ضخامت متوسط یعنی بین ۶-۲۵mm که برای جوشکاری به بیش از یک پاس نیاز دارند، تنش در اولین پاس ریشه ایجاد می گردد. در قطعات ضخیم، علاوه بر تنش پاس اول، به دلیل لبه سازی، تنش های تحت زاویه^۲ و در نتیجه پیچیدگی زاویه ای^۳ نیز پدید می آید.

علاوه بر آن چه گفته شد، انقباض های ناشی از انجمادهای عرضی^۴ نیز یکی دیگر از عوامل مهم بروز تاب برداشتن در قطعات جوشکاری شده می باشند. مهمترین عوامل مؤثر در تاب برداشتن قطعات تحت جوشکاری و جوشکاری شده، به قرار زیر است:

- ۱- حرارت دادن غیریکنواخت و سرد شدن غیرهمگن
- ۲- حرارت دادن بیش از اندازه در یک موضع
- ۳- عدم استفاده از قید و بست و نگه دارنده های مناسب
- ۴- تنش های پسماند
- ۵- اختلاف ضریب انتقال حرارت در فلز پایه و فلز جوش
- ۶- اختلاف ضریب انبساط حرارتی فلز پایه و فلز جوش
- ۷- نامناسب بودن طرح اتصال
- ۸- انتخاب نامناسب قطر الکترود یا فلز پرکننده

۱-Distortion

۲-Angle stress

۳-Angular Distortion

۴-Transverse Shrinkage



۹- عدم یا کمبود مهارت جوشکار و رعایت نکردن ترتیب^۱ عملیات جوشکاری،

۱۰- تعداد پاس و رعایت نکردن توالی رسوب دهی پاس های جوش

۱۱- درجه حرارت نامناسب بین پاسی

۱۲- عدم استفاده از پیشگرم مناسب

۱۳- مونتاژ نامناسب

به عنوان مثال تاثیر تعداد پاس های جوشکاری بر میزان پیچیدگی زاویه ای در جدول ۱۵ نشان

داده شده است.

جدول ۱۵: رابطه بین تعداد پاس های جوشکاری با مقدار پیچیدگی [۸]



تعداد پاس جوش	اندازه تاب برداشتن (L) (mm)
۱	۸
۲	۱۰
۳	۱۱
۴	۱۳
۵	۱۴/۵
۶	۱۶
۷	۱۷/۵
۸	۱۹
۹	۲۱
۱۰	۲۲/۵
۱۱	۲۴
۱۲	۲۵/۵
۱۳	۲۷
۱۴	۲۸/۵
۱۵	۳۰



توجه به این نکته ضروری است که در تمام قطعات جوشکاری شده، پس از سرد شدن، انقباض رخ می‌دهد که البته با توجه به اندازه فلز پایه و حجم جوش، حرارت ورودی و شیب سرد شدن، مقدار این انقباض قابل اندازه‌گیری است. هر چند مقدار انقباض در حد مجاز بی‌خطر است، اما برای کاهش آن باید از طریق محاسبه و با استفاده از ترندهای طراحی و مونتاژ قطعه با در نظر گرفتن اضافات مجاز و یا با عملیات حرارتی تابگیری پس از جوشکاری اقدام کرد.

مقدار انقباض عرضی در جوش گوشه، به ازای هر جوش که طول ساق آن از $\frac{3}{4}$ برابر ضخامت ورق بیشتر نباشد به اندازه‌ای 0.8mm مجاز است. همین انقباض در جوش لب به لب، به ازای هر جوش با اتصال V شکل با زاویه پخ 60° درجه، بسته به تعداد پاس‌های جوش متغیر است و تابع اعداد مندرج در جدول ۱۵ بوده که در محدوده 2mm - 1.5mm مجاز می‌باشد. مقدار مجاز انقباض طولی در جوش گوشه، به ازای هر 3m متر جوش، معادل 0.8mm است و در جوش لب به لب به ازای هر 3m متر نباید از 3mm بیشتر باشد.

از آن جایی که همیشه امکان محاسبه و کنترل دقیق تنش‌های پسماند و انقباضی و در نتیجه پیچیدگی وجود ندارد، برای اصلاح تنش‌ها و پیچیدگی‌ها می‌توان از عملیات حرارتی تابگیری استفاده کرد. در این شرایط، با اعمال حرارت در پشت قسمت تاب برداشته (در قسمت محدب)، می‌توان قطعه را به حال اول برگردانید. اگر مقدار انحناء زیاد باشد، ممکن است لازم شود تا در قسمت انحناء از پشت، با جوشکاری اضافی، حرارت بسیار زیادی به قطعه اعمال کرد. برای تابگیری قطعات فولادی کربنی، به طور معمول از مشعل‌های هوا-گاز یا اکسی استیلن با درجه حرارتی نزدیک به 400°C - 600°C استفاده می‌شود. حرارت دادن می‌تواند به صورت موضعی یا نقطه‌ای و یا به شکل خطی باشد. تابگیری قطعات پیچیده و ضخیم، به ویژه قطعاتی که المان‌های متعددی روی آنها جوش داده شده یا دارای سوراخکاری‌های بسیار و یا عدم تطابق ضخامت در مقطع خود هستند، بسیار مشکل بوده و باید برای عملیات حرارتی پس گرمایی تابگیری، طرح عملیات تابگیری^۱ یا به صورت نقطه‌ای و موضعی در نقاط و مواضع مختلف قطعه تهیه و اجرا گردد. حرارت کله قندی یا مثلثی یکی از این طرح‌هاست که در شکل ۷۲ به صورت شماتیک نشان داده شده است.

۱-Warp Relief Plan or Distortion Relieve Plan

122



۶- محیط‌های گرم کننده در عملیات حرارتی

در ضمن گرم کردن قطعات در عملیات حرارتی باید از هرگونه تغییر ترکیب شیمیایی ناخواسته نظیر دی کربوره شدن، کربوره شدن و یا اکسیده شدن جلوگیری شود. زیرا تغییر ترکیب شیمیایی سطح می‌تواند باعث گمراه کردن شخص عملیات حرارتی کننده و یا حتی معیوب شدن قطعات شود. به عنوان مثال، تحت شرایطی که هدف سخت کردن قطعه ای باشد، در صورتی که ترکیب شیمیایی سطح تغییر کند سختی اندازه گرفته شده پس از سخت کردن می‌تواند گمراه کننده باشد: به این صورت که منجر به انتخاب عملیات نامناسب بازگشت برای قطعه مزبور شود. بعلاوه، تغییر درصد کربن لایه سطحی می‌تواند باعث ترک خوردن آن در ضمن سخت شدن شود. اگر اکسیداسیون سطحی خیلی شدید باشد، پس از پوسته زدائی و ماشینکاری نهائی ممکن است تولرانس طراحی شده برای قطعه تغییر کند. روش مناسب برای حفاظت سطح در برابر تغییر ترکیب شیمیایی، بستگی به نوع کوره عملیات حرارتی دارد. از اینرو در این قسمت انواع کوره های عملیات حرارتی و اتمسفر داخلی آنها مورد بررسی قرار داده می شود.

۶-۱- کوره های حمام نمک

از آنجائی که زمان لازم برای آستنیته کردن قطعات در حمام های نمک نسبتاً کوتاه بوده و بعلاوه نمک مورد استفاده خنثی می‌باشد، استفاده از این نوع کوره‌ها بهترین راه برای جلوگیری از تغییر ترکیب شیمیایی فولاد می‌باشد. معمولاً تولیدکنندگان نمکهای مورد استفاده در حمامهای عملیات حرارتی، ترکیب شیمیائی نمک ها را مشخص نکرده و تنها آنها را تحت نام تجارتي عرضه می‌کنند. با این حال اطلاعات کلی در رابطه با خواص و کاربرد، همراه با نمک ها موجود می‌باشد. جدول ۱۶ ترکیب شیمیائی، درجه حرارت ذوب و درجه حرارت کار را برای برخی از نمکهای خنثی نشان می‌دهد. در صورتی که حمام نمک حاوی اکسیژن باشد، امکان اکسیده و یا دی کربوره شدن سطوح قطعات وجود دارد. از اینرو قبل از وارد کردن قطعات در حمام نمک، باید مذاب، اکسیژن زدایی شود. عملیات اکسیژن زدایی به کمک زغال چوب انجام می‌گیرد. نحوه عمل به این صورت است که زغال چوب را در سبدهای فلزی قرار داده و وارد حمام نمک می‌کنند. زغال چوب با اکسیژن موجود در حمام نمک سوخته و باعث اکسیژن زدایی آن می‌شود. وجود اکسیژن در حمام با خارج شدن شعله از آن، موقع وارد کردن زغال به داخل مذاب مشخص می‌شود. تمام شدن شعله نشان دهنده پایان مرحله



اکسیژن زدائی می‌باشد. عمل اکسیژن زدائی حمام معمولاً دو یا سه مرتبه در هر شیفت کاری باید انجام شود.

در ضمن کار، مقداری آهن (از قطعات فولادی که عملیات حرارتی می‌شوند) وارد حمام نمک شده که بعلت تماس مستقیم مذاب با هوا به صورت اکسید آهن درمی‌آید. اکسید آهن تشکیل شده می‌تواند قطعات کار را دی کربوره کند، از اینرو، هرچند وقت یک بار باید اکسیدهای آهن تشکیل شده را از حمام نمک خارج کرد. براساس توصیه های تولیدکنندگان نمک، مذاب کلرید باریم (همراه با ترکیبات دیگری که به آن اضافه می‌شود) را برای آستینته کردن قطعات فولادهای تندبر^۱ و فولادهای پرآلیاژ دیگر می‌توان بکار برد. اکسید آهن تشکیل شده در حمامهای مزبور را می‌توان به کمک چند قطعه آجر سیلیسی^۲ از آن خارج کرد. آجرسیلیسی اضافه شده با آهن موجود در حمام ترکیب شده و به صورت کف یا سرباره بر روی مذاب جمع می‌شود که باید مرتباً از حمام خارج کرد. برای پی بردن به وجود آهن در حمام نمک از یک میله گرافیتی که به داخل آن فروبرده می‌شود کمک می‌گیرند. در صورتی که اکسید آهن در حمام باشد توسط کربن گرافیتی احیا شده و ذرات ریز و براق آهن بر روی میله تشکیل می‌شود.

خاصیت کربوره و یا دی کربوره کنندگی حمام را به کمک ورقه‌های بسیار نازک فولادی با درصدهای مختلف کربن می‌توان مشخص کرد. ورقه نازک فولادی با درصد مشخصی کربن را به داخل حمام فرو برده و برای چند دقیقه نگه داشته، سپس آنرا در آب کوئنچ می‌کنند. اگر نمونه آزمایش شده پس از کوئنچ کردن نرم باشد (به راحتی خم شود)، حمام در شرایط دی کربوره کننده (نسبت به درصد کربن ورقه فولادی) می‌باشد. در صورتی که اگر نمونه شکننده تر از حالتی است که معمولاً باید باشد، حمام در شرایط کربوره کننده (نسبت به درصد کربن ورقه فولادی) خواهد بود.

۱-High-Speed steels

۲-Silica brick



جدول ۱۶: مشخصات نمکهای خنثی مورد استفاده در حمامهای نمک عملیات حرارتی [۲].

ردیف	نوع نمک	فرمول شیمیایی	درصد وزنی	درجه حرارت ذوب - °C	درجه حرارت گار - °C
۱	کلرید سدیم کربنات سدیم	NaCl Na ₂ CO ₃	۵۰ ۵۰	۵۶۵	۵۹۰-۹۰۰
۲	کلرید سدیم کلرید کلسیم	NaCl CaCl ₂	۵۰ ۵۰	۵۹۰	۶۳۰-۸۵۰
۳	کلرید سدیم کلرید باریم	NaCl BaCl ₂	۲۰ ۸۰	۶۳۵	۶۷۵-۱۰۶۰
۴	کلرید سدیم کلرید پتاسیم	NaCl KCl	۴۵ ۵۵	۶۶۰	۶۷۵-۹۰۰
۵	نیتрат پتاسیم نیترات سدیم	KNO ₃ NaNO ₃	۵۵ ۴۵	۱۵۳	۱۷۰-۵۰۰
۶	نیترات پتاسیم نیترات سدیم	KNO ₃ NaNO ₃	۵۰ ۵۰	۲۲۰	۲۲۰-۵۰۰
۷	کلرید سدیم	NaCl	۱۰۰	۸۰۰	۸۳۰-۱۱۰۰
۸	کلرید باریم	BaCl ₂	۱۰۰	۹۶۰	۱۰۴۵-۱۰۲۵
۹	نیترات سدیم	NaNO ₃	۱۰۰	۳۱۵	۳۲۵-۵۰۰
۱۰	نیترات پتاسیم	KNO ₃	۱۰۰	۳۲۵	۳۵۰-۵۰۰
۱۱	کربنات سدیم	Na ₂ CO ₃	۱۰۰	۲۲۲	۳۵۰-۷۰۰
۱۲	کربنات پتاسیم	K ₂ CO ₃	۱۰۰	۳۶۰	۴۰۰-۶۵۰
۱۳	کربنات سدیم کربنات پتاسیم	Na ₂ CO ₃ K ₂ CO ₃	۳۷ ۶۳	۱۵۹	۱۸۰-۳۵۰

۶-۲- کوره های موفلی برقی^۱

برای استفاده از این نوع کوره ها در صورتی که مجهز به اتمسفر کنترل شده نباشند باید از جعبه های آنیل که به جعبه های سمانتاسیون نیز موسوم هستند استفاده شود. این جعبه ها، معمولاً از جنس فولاد مقاوم حرارتی که به فولاد نسوز نیز معروف است ساخته می شوند. قطعات کار را در جعبه های مزبور گذاشته و اطراف آنها را با مواد محافظ که نسبت به قطعه کار خنثی باشند، پر

^۱-Electrically-heated muffle furnaces



می‌کنند. متأسفانه یک نوع ماده مشخص که بتواند نسبت به انواع مختلف فولادها خنثی باشد، وجود ندارد. به بیان دیگر هر نوع ماده ای که برای این منظور انتخاب شود فقط نسبت به یک و یا حداکثر چند کلاس مشخص از فولادها و در محدوده حرارتی مشخصی کارایی دارد. یکی از هدف های اصلی استفاده از این روش، ممانعت از رسیدن هوا (اکسیژن) به قطعه کار می‌باشد. یکی از مناسب ترین مواد برای این منظور براده چدن می‌باشد. زیرا هوای (اکسیژن) وارد شده به جعبه قبل از اینکه به قطعه کار برسد باعث اکسید شدن براده های چدن شده و اکسیژن آن حذف می شود.

نتایج تحقیقات و آزمایش های انجام گرفته نشان می‌دهند که براده چدن نسبت به فولادهای ساده کربنی و فولادهای کم آلیاژ که درصد کربن آنها بین ۰/۱۶ تا ۱ درصد باشد عملاً خنثی بوده و یکی از مناسب ترین مواد برای این منظور می‌باشد. همچنین براده چدن نسبت به فولادهای ابزار آلیاژی پرکروم نظیر D۶ ، D۲ SAE-AISI خنثی می‌باشد. در مورد فولادهای ابزار گرم کار که در حدود ۰/۳ درصد کربن داشته باشند براده چدن اثر کربوره کنندگی بسیار کمی از خود نشان می‌دهد. در حوالی ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد خطر زینتر شدن^۱ و یا به حالت خمیری در آمدن براده های چدن وجود دارد و در دماهای بالاتر از ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد، بهتر است که از براده چدن استفاده نشود. در صورتی که در محدوده حرارتی فوق مجبور به استفاده از براده چدن به عنوان ماده محافظ باشیم، می‌توان قطعات کار را در کاغذ آغشته به روغن نسوز (روغنی که به عنوان محیط کوئنچ کننده از آن استفاده می‌شود) پیچیده و به این ترتیب از خسارت های سطحی ناشی از زینتر شدن و چسبیدن براده های چدن بر روی سطوح قطعه کار جلوگیری کرد.

زغال چوب و خرده کک باعث دی کربوره شدن فولادهای ساده کربنی و کم آلیاژ با کربن متوسط تا زیاد شده ولی فولادهای آلیاژی پرکروم و فولادهای گرم کار را کربوره خواهد کرد. آنچه در این رابطه باید بدان توجه داشت این است که پارامتر تعیین کننده در کربوره و یا دی کربوره کردن فولاد، عمدتاً درجه حرارت کار می‌باشد و نه ترکیب شیمیایی آن.

برای جلوگیری از دی کربوره شدن قطعاتی که از فولادهای پرکربن ساخته شده اند، می‌توان آنها را ابتدا در محلول غلیظ بوراکس^۲ به فرمول شیمیایی $B_2O_3 \cdot Na_2O$ فروبرده و سپس حرارت داد. همچنین می‌توان بر روی سطحی که قرار است محافظت شود پودر بوراکس ریخته شده و سپس حرارت داده شود. در اثر حرارت دادن، پودر بوراکس ذوب و تشکیل یک لایه پوشش محافظ می کند

۱-Sinter

۲-Borax



که می‌تواند از دی کربوره شدن قطعه جلوگیری نماید. باید توجه داشت که قبل از کوئنچ کردن، فیلم مزبور باید از روی قطعه کار برطرف شود. در غیر این صورت سرعت سرد شدن را کاهش خواهد داد. همچنین برای جلوگیری از اکسیده و یا دی کربوره شدن از ورقه های بسیار نازک فولاد مقاوم به حرارت و یا ورقه های بسیار نازک مسی نیز می‌توان استفاده کرد. برای اینکار قطعات را کاملاً در ورقه های مزبور پیچیده و سپس در کوره حرارت می‌دهند. پس از حرارت دادن، قطعات را بلافاصله از لفاف فلزی خارج کرده و کوئنچ می‌کنند.

۶-۳- کوره ها با اتمسفرهای کنترل شده

استفاده از این نوع اتمسفرها که از گازهای محافظ تشکیل شده اند هم از نظر اقتصادی و هم از جنبه کاربردی یکی از بهترین روش ها برای عملیات حرارتی ابزارها و قطعات گرانیقیمت می‌باشد. این موضوع مخصوصاً در سخت کردن قطعات در مقیاس تولید انبوه صادق است. گاز مورد نیاز در اتمسفرهای کنترل شده ابتدا در یک واحد تولیدکننده گاز تهیه شده و سپس به داخل کوره عملیات حرارتی فرستاده می‌شود. تذکر این نکته ضروری است که در موقع استفاده از اتمسفرهای کنترل شده، کوچکترین نشت گاز از کوره مجاز نمی‌باشد. گاز محافظ برای اتمسفر کنترل شده براساس یکی از روش های زیر تهیه می‌شود [۲].

۶-۳-۱- گاز خنثی

اتم‌سفر گاز خنثی از گازهای محافظی تشکیل شده که تحت هیچ شرایطی با فلزی که در حال عملیات حرارتی است واکنش انجام نمی‌دهد. این گازها عبارتند از : هیدروژن، هلیوم، آرگون و نیتروژن. از آنجائی که هیدروژن قابل انفجار بوده و هلیوم و آرگون نسبتاً گرانیقیمت هستند، معمول ترین این محیطها را گاز نیتروژن تشکیل می‌دهد.

گاز هیدروژن با فلزات واکنش انجام نمی‌دهد، اما باعث احیاء اکسیدها و دی کربوره شدن فولادها می‌شود. بعلاوه مخلوط هیدروژن و هوا که شامل ۵ تا ۷۵ درصد هیدروژن باشد قابل انفجار می‌باشد. به همین علت و همچنین به علت مخارج زیاد که باید صرف حذف اکسیژن شود. این گاز عمده‌تاً در مقیاس کم و آن هم در کوره های کوچک استفاده می‌شود. گاز هیدروژن معمولاً به عنوان



اتمسفر محافظ در آنیل فولادهای زنگ نزن، عملیات حرارتی فولادهای مقاوم حرارتی، فولادهای پراآلیاژ دیگر، فولادهای کم کربن وبالاخره فلزات غیرآهنی استفاده می‌شود.

درجه خلوص گازهای هیدروژن تجارتي ۹۸ تا ۹۹/۹ درصد می‌باشد. ناخالصی‌های موجود همراه با این گاز عبارتند از CH_4 , CO_2 , CO , H_2O , O_2 . مزیت عمده این گاز نسبت به دیگر اتمسفرهای خنثی، خاصیت احیاءکنندگی آن می‌باشد. ولی بخار آب موجود همراه با آن این خاصیت را محدود می‌کند. از سوی دیگر عیب عمده این گاز عبارت است از جذب آن توسط برخی از فلزات (مثلاً فولادهای پرکربن) که منجر به ترد شدن هیدروژنی آنها می‌شود. هیدروژن را می‌توان توسط الکترولیز آب، شکست هیدروکربنها و یا تفکیک آمونیاک تولید کرد.

گاز هلیوم را از گاز طبیعی مایع که حاوی ۵ تا ۸ درصد هلیوم است تهیه می‌کنند. گاز آرگون را از هوا که حاوی ۰/۹ درصد آرگون می‌باشد تهیه می‌کنند. درجه خلوص این گاز ۹۹/۹۵ درصد می‌باشد و فقط حاوی چند ppm نیتروژن، اکسیژن و یا هیدروژن است. اتمسفرهای خنثی شامل گازهای آرگون و هلیوم را معمولاً تحت شرایطی استفاده می‌کنند که بعلت خطر جذب نیتروژن (نیتريده شدن قطعه) امکان استفاده از اتمسفر نیتروژن نباشد.

از نظر تئوری، ساده ترین اتمسفر خنثی، گاز نیتروژن است. رفتار این گاز نسبت به فلزات، شبیه گازهای نادر (آرگون و هلیوم) می‌باشد. قابلیت کاربردی گاز نیتروژن به عنوان یک گاز خنثی بستگی به واکنشهای شیمیائی بین فلز و ناخالصی‌هایی دارد که به‌همراه این گاز وجود دارند. بعلاوه، اگر نیتروژن به صورت اتمی درآید، به سادگی می‌تواند جذب سطحی شده و باعث نیتريده شدن فلزات شود. نیتروژن خالص را برای آنیل درخشنده^۲ فولادهای کربنی، آنیل چدن مالیل مغزسیاه^۳، به عنوان گاز حاصل در کربوره کردن گازی و همچنین به عنوان محیط سخت (سرد) کننده تحت شرایطی که عملیات حرارتی در خلاء انجام گیرد استفاده می‌شود.

۶-۳-۲- گاز گرمازا^۴

این گاز با احتراق ناقص و گرمازا (بدون حرارت دادن) توسط گاز قابل احتراق و هوا تهیه می‌شود. علت سوخت ناقص برای تهیه این گاز، جلوگیری ازوجود اکسیژن در محصولات نهائی احتراق می‌باشد.

۱-Hydrogen Embrittlement

۲-Bright Annealing

۳-Black-heart malleable cast Iron

۴-Exothermic Gas



نسبت هوا به سوخت (فاکتور هوا)^۱ برای این منظور در حدود ۰/۸ تا ۰/۹۹ می‌باشد. ترکیب شیمیایی گازهای حاصل از احتراق توسط نسبت هوا به سوخت و درجه حرارت واکنش مشخص می‌شود. این گاز معمولاً حاوی عوامل احیاکننده (نظیر H_2 و CO)، عوامل اکسیدکننده (نظیر H_2O و CO_2) و عوامل خنثی (نظیر N_2) که قسمت عمده اتمسفر را تشکیل می‌دهد (بیشتر از ۷۰ درصد) و همچنین احتمالاً ناخالصی‌هایی از متان می‌باشد.

گاز اگزوترمیک فقیر^۲ دارای حداکثر ۵ تا ۱۰ درصد گاز قابل احتراق (منواکسیدکربن و هیدروژن) می‌باشد. از سوی دیگر گاز اگزوترمیک غنی^۳ حاوی درصد بیشتری از این نوع گازهاست. ترکیب شیمیایی این دو نوع گاز در جدول ۱۷ آمده است. قبل از استفاده از گازهای فوق عوامل اکسیدکننده نظیر CO_2 و H_2O باید تا حداقل ممکن کاهش داده شوند. کاهش گازهای فوق به ترتیب توسط روش‌های جذب شیمیایی درمحلول منواتانولامین^۴ و خشک کردن انجام می‌گیرد. اگر هر دو جزء یعنی CO_2 و H_2O بطور کامل حذف شوند گاز حاصل فقط شامل CO ، H_2 و N_2 بوده و به منوگاز^۵ موسوم است [۲].

جدول ۱۷: ترکیب شیمیایی گازهای اگزوترمیک [۲]

H_2O	ترکیب شیمیایی (%)					نوع گاز اگزوترمیک
	N_2	CH_4	H_2	CO	CO_2	
بقیه	۸۷	--	۱	۱/۵	۱۰	فقیر
بقیه	۷۱	۰/۵	۱۲	۱۰	۵	غنی

۶-۳-۳- گاز گرماگیر^۶

این گاز با احتراق اندوترمیک (به سیستم حرارت باید داده شود) مخلوط سوخت گازی (معمولاً گاز طبیعی و یا پروپان) و هوا در درجه حرارتی معمولاً بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد تهیه می‌شود. مقدار هوای لازم برای این منظور باید از مقدار هوای لازم برای سوخت کامل کمتر باشد

- ۱-Air factor
- ۲-Lean exogas
- ۳-Rich exogas
- ۴-Monoethanolamine
- ۵-Monogas
- ۶-Endothermic gas



(فاکتور هوا بین ۰/۴ و ۰/۵ مناسب است). تحت شرایط فوق اجزای تشکیل دهنده محصولات حاصل از احتراق (گاز گرماگیر) عبارتند از H_2O و H_2 , N_2 , CO_2 , CO . همچنین درصد خیلی کمی متان نیز ممکن است در گاز حاصل وجود داشته باشد. جدول ۱۸ ترکیب شیمیایی گازهای اندوترمیک حاصل از احتراق گازهای طبیعی و پروپان را نشان می‌دهد. انتخاب فاکتور هوایی در حدود ۰/۴ تا ۰/۵ بر این اساس است که اکسیژن موجود فقط به اندازه‌ای باشد که منواکسیدکربن و هیدروژن تولید شده و دی اکسیدکربن و بخار آب بوجود نیاید. در حقیقت بعلت کمبود هوا برای احتراق کامل، حرارت آزاد شده برای ادامه واکنش‌ها کافی نبوده و عملیات احتراق فقط در صورتی می‌تواند ادامه یابد که از خارج بدان حرارت داده شود. از این رو این گاز به گاز اندوترمیک موسوم است.

جدول ۱۸: مشخصات گازهای اندوترمیک تهیه شده از گاز طبیعی و پروپان [۲]

حدود ترکیب شیمیایی (%)						واکنش انجام شده	سوخت اولیه
H_2O	N_2	CH_4	H_2	CO	CO_2		
۰/۲	۴۰	۰/۵	۴۰	۲۰	۰/۱	$2CH_4 + O_2 = 2CO + 4H_2$	گاز طبیعی
---	۴۵	۰/۲	۳۱	۲۳	---	$2C_3H_8 + 3O_2 = 6CO + 8H_2$	پروپان

پتانسیل کربن^۱ این نوع گازها معمولاً در حدود ۰/۴ درصد می‌باشد. بنابراین بدون آنکه خطر تغییر ترکیب شیمیایی سطح وجود داشته باشد، کلاس‌های مختلفی از فولادها را می‌توان در تماس مستقیم با این گاز عملیات حرارتی قرار داد. موقعی که هدف عملیات حرارتی فولادها با درصد کربن بیشتر باشد، برای جلوگیری از دی کربوره شدن آنها، با فرستادن مستقیم متان و یا پروپان خالص به داخل کوره پتانسیل کربن گاز را افزایش می‌دهند [۲].

^۱-Carbon potential



۶-۴- کوره‌های خلاء

در گذشته از کوره خلاء فقط برای آنیل کردن و لحیم کاری^۱ فلزات و آلیاژهایی که تمایل بسیار زیاد به اکسیده شدن و یا جذب گاز دارند نظیر تیتانیم، زیرکونیم، نیوبیم، تانتالیم و غیره استفاده می‌شد. سپس کوره خلاء به عنوان محیطی مناسب برای عملیات حرارتی فولادهای مقاوم حرارتی انتخاب شد. بالاخره نتایج حاصل از مطالعات مربوطه نشان داد که خلاء، محیط بسیار ایده آلی برای عملیات حرارتی فولادهای پرآلیاژ می‌باشد. گرچه معنی لغوی خلاء بمفهوم فضای بدون هواست ولی عملاً حتی در خلاءهای بسیار زیاد مقداری گاز در محیط وجود دارد.

در عملیات حرارتی در خلاء قبل از اینکه کوره گرم شود قطعات را در داخل آن گذاشته و هوای آنرا توسط یک پمپ خلاء تخلیه می‌کنند. در اکثر موارد فشار هوایی در حدود 10^{-2} torr (mmHg) قابل قبول می‌باشد. در صورتی که فشار کمتر (خلأ بیشتر) مورد نیاز باشد باید از پمپ‌های دیفیوژنی^۲ استفاده شود. که در این صورت مخارج ساخت کوره افزایش می‌یابد. بستگی به نوع کوره خلاء، ترکیب شیمیایی فولاد و عملیات حرارتی مورد نظر، قطعات پس از آستنیته شدن در کوره خلاء و یا در یک اتمسفری از گاز نیتروژن و یا آرگن تا درجه حرارت اتاق سرد می‌شوند و یا اینکه در حالی که در خلاء قرار دارند در روغن کوئنچ می‌شوند. برای حالت اخیر، روغن‌های ویژه‌ای با فشار بخار بسیار کم ساخته شده‌اند. روغنهای مزبور را می‌توان تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داد و به کمک آن قطعات را آستمپر کرد. سیستم دیگر برای کوئنچ کردن قطعات در این روش عبارت است از وارد کردن قطعات از خلاء به محفظه‌ای با گاز خنثی و سپس کوئنچ کردن آنها در آب، فلز مایع و یا نمک مذاب.

از جمله مزایای خلاء این است که محیط نسبت به اتمسفرهای دیگر کمتر آلوده است. از اینرو هیچ گونه تغییر ترکیب شیمیایی سطح در این روش نخواهیم داشت. به عبارت دیگر قطعات از کربوره شدن، دی کربوره شدن و یا اکسیده شدن مصون بوده و پس از عملیات حرارتی کاملاً تمیز شده و براق هستند. برخلاف محیط‌های محافظ دیگر که اکثراً قابل انفجار می‌باشند، خلاء هیچ گونه خطر انفجاری ندارد. همچنین برخلاف حمام‌های نمک که اکثراً سمی هستند، خلاء هیچ گونه مسمومیتی ایجاد نمی‌کند.

مهمترین اثرات جنبی نامناسب خلاء عبارت است از احتمال تبخیر بعضی از عناصر آلیاژی که در خلاءهای بسیار زیاد فرآرمی باشند. بعلاوه، در عملیات حرارتی در خلاء، انتقال حرارت توسط هدایت

۱-Soldering

۲-Diffusion pump



انجام نگرفته، بلکه فقط توسط تشعشع انجام می گیرد. این پدیده ممکن است به گرم و سرد شدن غیریکنواخت قطعه، مخصوصاً در دماهای پائین منجر شود.

۶-۵- کوره های موفلی شعله ای (سوخت مایع و یا گاز)

در این نوع کوره ها محفظه گرمائی و بنابراین قطعاتی که باید عملیات حرارتی شوند توسط شعله گرم می شوند. سوخت مورد استفاده می تواند یک گاز قابل احتراق (نظیر گاز طبیعی و یا پروپان) و یا یک سوخت مایع (نظیر سوخت دیزل) باشد.

معمول ترین کوره ها از این نوع، کوره های شعله ای مستقیم^۱ می باشد. در این نوع کوره ها قطعات یا مستقیماً با شعله در تماس بوده و یا اینکه شعله از فاصله نزدیکی از آنها عبور کرده و آنها را گرم می کند. در هر صورت در این نوع کوره ها قطعات مستقیماً در تماس با محصولات حاصل از احتراق می باشند. بنابراین، اجزاء تشکیل دهنده محصولات حاصل از احتراق و یا به بیان دیگر نوع شعله (خنثی، احیاء کننده و اکسید کننده) اثر بسیار زیادی بر روی کیفیت قطعات عملیات حرارتی شده خواهد داشت. نوع شعله را می توان توسط تعدیل نسبت سوخت به هوا در سیستم احتراق کنترل کرده و یا اینکه تغییر داد. این کنترل می تواند بصورت دستی انجام شود ولی بهتر است که توسط دستگاه های اتوماتیک انجام گیرد.

معمولاً از کوره های شعله ای برای عملیات حرارتی و یا گرم کردن در مراحل اولیه و یا مبانی ساخت (مثلاً برای آهنگری، پتک کاری^۲) قطعه استفاده می شود. تحت شرایط فوق اگر سطوح قطعات کربوره، اکسیده و یا دی کربوره شوند در مراحل بعدی ساخت، لایه سطحی معیوب را به کمک سنگ زدن و یا ماشینکاری حذف می کنند. در صورتی که از کوره های شعله ای مستقیم برای عملیات حرارتی در مراحل نهائی ساخت قطعات و ابزارها استفاده شود، بهتر است نسبت هوا به سوخت به نحوی تنظیم و کنترل شود که با توجه به ترکیب شیمیائی فولاد، شعله یا محصولات احتراق مناسب که اثر زیان آوری روی سطوح نداشته باشند، تولید شود. در شرایط فوق بهترین نوع شعله برای اینکار، شعله احیاء کننده ضعیف و یا خنثی می باشد.

مشعل هایی که در کوره های شعله ای استفاده می شوند، هم توسط گاز و هم توسط سوخت مایع کار می کنند. در بیشتر موارد سوخت مایع به عنوان سوخت کمکی بکار می رود. در حقیقت از سوخت

۱-Direct-fired furnaces

۲-Forging



مایع معمولاً هنگامی استفاده می‌شود که تهیه گاز طبیعی برای مدت زمان نسبتاً طولانی با وقفه روبرو شود.

۷- نکاتی در مورد گرم کردن قطعات

۷-۱- سرعت گرم کردن

همان گونه که پیش از این نیز گفته شد در ضمن حرارت دادن یک قطعه، مقاطع مختلف آن که دارای ابعاد متفاوت هستند با سرعت‌های مختلف گرم می‌شوند. بنابراین در صورتی که سرعت حرارت دادن زیاد باشد، قطعه کار ممکن است در ضمن گرم شدن شکسته شده و یا اینکه تاب بردارد. این مشکل را می‌توان با پیشگرم کردن قطعه در درجه حرارتی زیر خط AC_1 برطرف کرد.

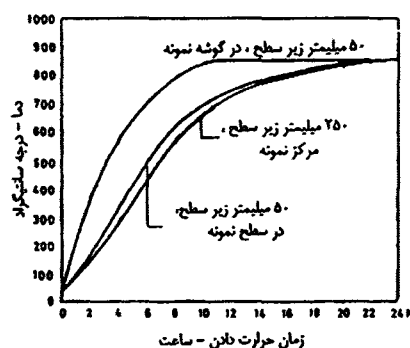
در اولین مرحله حرارت دادن، سطح قطعه در دمایی بالاتر از مرکز آن قرار دارد. هرچه درجه حرارت قطعه به درجه حرارت آستنیتیزه کردن نزدیکتر می‌شود تفاوت بین دماهای سطح و مرکز کاهش می‌یابد. بنابراین عملاً می‌توان فرض کرد که وقتی که درجه حرارت سطح قطعه به درجه حرارت کوره رسید، قطعه تقریباً بطور کامل گرم شده است.

به نظر می‌رسد که فرض فوق برخلاف این تصور عمومی باشد که می‌گویند سطوح قطعات خیلی سریعتر از مرکز آنها به درجه حرارت کوره می‌رسد. درحقیقت تصور فوق براساس مقایسه نتایج به دست آمده از اندازه گیری سرعت گرم شدن گوشه ها و مقاطع دیگر قطعات مختلف می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که گوشه های قطعات نسبت به مقاطع دیگر آنها خیلی سریعتر گرم می‌شود. این مطلب در شکل ۷۳ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل ملاحظه می‌شود، درحالی که گوشه ها خیلی سریع گرم می‌شوند، سطوح و مرکز در قسمت های دیگر تقریباً همزمان به درجه حرارت کوره می‌رسند.

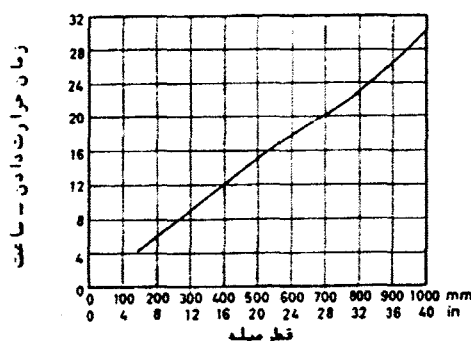
زمان حرارت دادن را می‌توان با استفاده از روابطی که براساس سعی و خطا و به کمک نتایج حاصل از آزمایشهای متعدد به دست آمده مشخص کرد. این زمان برای حرارت دادن قطعات استوانه‌ای با قطرهای مختلف (تا حداکثر ۱۰۰۰ mm) در یک کوره موفلی شعله ای با سوخت مایع از درجه حرارت اتاق تا ۸۵۰ درجه سانتیگراد در شکل ۷۴ نشان داده شده است. این نمودار برای فولادهای ساده کربنی و فولادهای کم آلیاژ صادق است. فرض دیگری که در رابطه با رسم و استفاده از این نمودارها شده است، این است که طول نمونه ها باید حداقل دوبرابر قطر قاعده آنها باشد. در صورتی که نمونه‌ای با مقطع مربع و یا مربع مستطیل داشته باشیم با استفاده از نمودار ۷۳ و یا



نمودارها و یا جدول های مشابه، ابتدا مقطع دایره ای معادل آنرا به دست آورده و سپس می توان با استفاده از نمودار ۷۴ زمان حرارت دادن را مشخص کرد [۲].



شکل ۷۳: منحنیهای زمان-درجه حرارت برای نقاط مختلف در قطعه ای به ابعاد $2300 \times 950 \times 500$ میلیمتر در ضمن گرم شدن در کوره ای موقلی از نوع نفت سوز [۲].



شکل ۷۴: زمان لازم برای گرم کردن تا درجه حرارت سخت کردن (850°C درجه سانتیگراد) برای میله هایی با قطرهای مختلف تا ۱۰۰۰ میلیمتر. طول تمام نمونه ها، دو برابر قطر آنها بوده و درجه حرارت شروع عملیات از 20°C درجه سانتیگراد می باشد. کوره مورد استفاده از نوع موقلی نفت سوز بوده است [۲].



مثال: ابعاد نمونه 50×950 میلیمتر مربوط به شکل ۷۳ معادل میله استوانه ای به قطر مقطع ۷۰۰ میلیمتر می باشد. براساس شکل ۷۴ زمان حرارت دادن برای یک میله استوانه ای به قطر فوق در حدود ۲۰ ساعت است. همانطور که ملاحظه می شود این زمان با زمان نشان داده شده در شکل ۷۳ (یعنی ۲۲ ساعت) تفاوت زیادی ندارد.

زمان حرارت دادن نه تنها بستگی به ابعاد قطعه دارد بلکه بستگی به ظرفیت حرارتی کوره و تراکم قطعات در ضمن بارگیری نیز خواهد داشت. بنابراین لازم است که برای کارکردن با کوره های مختلف تجربه کافی داشته و جدولها و یا نمودارهای مناسب برای زمان حرارت دادن قطعات با ابعاد مختلف تهیه شود.

همان طور که قبلاً اشاره شد با افزایش درجه حرارت سخت کردن، سختی پذیری فولاد افزایش می یابد. این افزایش سختی پذیری ناشی از انحلال بیشتر کاربیدها در آستنیت همچنین درشت شدن دانه های آن می باشد. برای سخت کردن فولادهای تندبر، معمولاً از درجه حرارتی در حدود چند ده درجه سانتیگراد زیر درجه حرارت ذوب آنها استفاده می شود. تحت شرایط فوق، اگر درجه حرارت سخت کردن فقط به مقدار کمی افزایش یابد، می تواند منجر به ذوب شدن موضعی در اطراف کاربیدها گردد. فاز مذاب فوق در مرز دانه ها نفوذ کرده و به این ترتیب باعث کاهش تافنس فولاد می شود. افزایش بیشتر درجه حرارت احتمال ذوب شدن نواحی فوق را بطور قابل ملاحظه ای افزایش می دهد. تحت شرایط فوق گفته می شود که فولاد سوخته^۱ است.

۷-۲- زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن

در صورتی که درجه حرارت سخت کردن صحیح انتخاب شود، هنگامی که فولاد به آن دما رسید آستنیت شده است. زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن بستگی به نوع و درصد کاربیدهایی دارد که باید در آستنیت حل شوند. در حقیقت زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن باید طوری تنظیم شود که کاربیدها به اندازه کافی حل شده و سختی مطلوب به دست آید. همان گونه که قبلاً بحث شد، میزان انحلال کاربید و در نتیجه درصد کربن و عناصر آلیاژی محلول در آستنیت در درجه حرارت سخت کردن بستگی به درجه حرارت و زمان آستنیت کردن دارد. از جمله موارد دیگر که در رابطه با اهمیت زمان آستنیت کردن می توان بدان اشاره کرد، اندازه دانه های آستنیت درست

^۱-Burnt



قبل از سخت کردن فولاد می‌باشد. این امر مخصوصاً در مورد فولادهای پرآلیاژ که درجه حرارت آستنیت کردن آنها نسبتاً بالا باشد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در فولادهای آلیاژی، همگن شدن آستنیت نیاز به زمان نسبتاً طولانی‌تری دارد. در این فولادها، عناصر آلیاژی بطور غیر یکنواخت بین فریت و کاربیدها توزیع می‌شوند. بدین صورت که عناصر آلیاژی غیرکاربیدزا در فریت حل شده، در حالی که عناصر آلیاژی کاربیدزا، عمدتاً در کاربیدها متمرکز می‌شوند. از اینرو، موقعی که آستنیت تشکیل می‌شود توزیع عناصر آلیاژی مختلف و کربن در نقاط مختلف مخصوصاً در محلهائی که قبلاً فریت و کاربید بوده اند متفاوت می‌باشد.

سرعت دیفیوژیون اکثر عناصر آلیاژی در مقایسه با کربن به مراتب کمتر می‌باشد. به همین دلیل است که برای یکنواخت شدن ترکیب شیمیایی آستنیت در فولادهای آلیاژی در مقایسه با فولادهای ساده کربنی، نیاز به زمان آستنیت کردن بیشتری می‌باشد. با توجه به آنچه گفته شد، زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن بستگی به کلاس فولاد دارد. از اینرو، در ادامه این بحث، زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن، در رابطه با انواع مختلف فولادها مورد بررسی قرار داده می‌شود.

۷-۲-۱- فولادهای ساختمانی کم آلیاژ ساده کربنی

این نوع فولادها دارای کاربیدهایی هستند که براحتی در آستنیت حل می‌شوند. از این رو پس از رسیدن قطعه به درجه حرارت سخت کردن، فقط کافی است که چند دقیقه‌ای در این درجه حرارت نگهداری شود. به منظور اطمینان از انحلال کافی کاربیدها، معمولاً زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن را بین ۵ تا ۱۵ دقیقه انتخاب می‌کنند.

۷-۲-۲- فولادهای ساختمانی با آلیاژ متوسط

برای این نوع فولادها، بدون توجه به ابعاد قطعه، زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن بین ۱۵ تا ۲۵ دقیقه توصیه شده است. برای سخت کردن به روش های شعله ای و القائی که امکان تنظیم دقیق زمان حرارت دادن وجود دارد درجه حرارت سخت کردن را به اندازه قابل ملاحظه‌ای بالاتر از درجه حرارت سخت کردن در روش های معمولی انتخاب می‌کنند. به این ترتیب زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن را تا چند ثانیه نیز می‌توان کاهش داد.



۷-۲-۳- فولادهای ابزار کم آلیاژ

این نوع فولادها که به فولادهای گروه L (AISI L) موسوم‌اند، حاوی ۰/۵ تا ۱/۱ درصد کربن، ۰/۷۵ تا ۱ درصد کروم و گاهی ۱/۵ درصد نیکل و ۱۰/۲۵ درصد مولیبدن (نوع L۶) و یا ۰/۲ درصد وانادیم (نوع L۲، L۳) می‌باشند. زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن برای این نوع فولادها بستگی به ابعاد قطعه دارد. برای اطمینان از حصول سختی کافی، زمان پیشنهاد شده با ۰/۵ دقیقه برای هر میلیمتر ضخامت مقطع است. با این وجود حداقل و حداکثر زمان استفاده شده باید به ترتیب از ۵ دقیقه کمتر و از یک ساعت بیشتر نباشد. علت اینکه با افزایش ضخامت مقطع زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن را افزایش می‌دهند به این دلیل است که با افزایش ضخامت مقطع، اندازه ذرات کاربید درشت تر شده و در نتیجه تمایل آنها به انحلال در آستنیت کاهش می‌یابد. بعلاوه سختی پذیری اکثر فولادهای کم آلیاژ نسبتاً پائین می‌باشد. ولی با انحلال بیشتر کاربیدها در آستنیت سختی پذیری آنها را (مخصوصاً در مورد قطعات حجیم) بنحو مطلوبی می‌توان افزایش داد. انحلال بیشتر کاربیدها در آستنیت و در نتیجه افزایش سختی پذیری با افزایش زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن امکان پذیر است.

۷-۲-۴- فولادهای پرآلیاژ کروم دار^۱

این فولادها که به فولادهای گروه D (AISI D) معروفند، حاوی ۱/۵ تا ۲/۳۵ درصد کربن، ۱۲ درصد کروم ۱ درصد مولیبدن (بجز فولاد D۳) و گاهی ۳ درصد کبالت (D۵) و ۱ تا ۴ درصد وانادیم (D۲ و D۷) می‌باشند. در میان تمامی فولادهای ابزار، این گروه از فولادها بیشترین زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن را نیاز دارند. با این وجود، زمان نگهداری شدیداً بستگی به درجه حرارت سخت کردن دارد. برای هر دمای سخت کردن، به منظور اطمینان از حصول حداکثر سختی، زمان نگهداری مشخصی مورد نیاز می‌باشد.

اگر زمان نگهداری خیلی کوتاه باشد بعلمت عدم انحلال کافی کاربیدها سختی کمتر از حد معمول خواهد بود. از سوی دیگر اگر زمان نگهداری خیلی طولانی باشد بعلمت حضور آستنیت باقیمانده نسبتاً زیاد مجدداً سختی کمتر از حد معمول می‌باشد. زمانهای پیشنهاد شده برای نگهداری این نوع فولادها در درجه حرارت سخت کردن ۰/۵ تا ۰/۸ دقیقه برای هر میلیمتر ضخامت است. با توجه به این نکته که حداقل و حداکثر زمان به ترتیب کمتر از ۱۰ و بیشتر از ۶۰ دقیقه نباشد. فاکتور ۰/۵ دقیقه

^۱-High-alloy chromium steels



هنگامی استفاده می‌شود که درجه حرارت سخت کردن در نزدیکی حد بالائی محدوده سخت کردن باشد. از سوی دیگر فاکتور $0/8$ دقیقه را هنگامی استفاده می‌کنند که درجه حرارت سخت کردن در حوالی حد پائینی محدوده سخت کردن باشد [۲].

۷-۲-۵- فولادهای گرم کار^۱

این نوع فولادها دارای کاربیدهائی هستند که تا حدود 1000 درجه سانتیگراد پایدار بوده و به صورت محلول در نمی‌آیند. از آنجائی که در دماهای فوق دانه‌های آستنیت خیلی سریع درشت می‌شوند، زمان نگهداری باید محدود باشد. اگر از حمام نمک استفاده می‌شود، هنگامی که فولاد به درجه حرارت مورد نظر رسید، بدون توجه به ابعاد قطعه زمان نگهداری در حدود 20 تا 30 دقیقه می‌باشد. لازم به اشاره است که در موقع کار با حمام های نمک براحتی می‌توان مشخص کرد که چه موقع قطعه به دمای سخت کردن رسیده است. اگر قطعه در کوره موفلی و همراه با مواد محافظ در جعبه سماتاسیون حرارت داده می‌شود، دمای آنرا به سادگی نمی‌توان مشخص کرد. تحت شرایط فوق بهترین درجه حرارتی که برای سخت کردن می‌توان استفاده کرد، دمائی است در حوالی حد پائینی سخت کردن است، زیرا در این صورت از زمان نگهداری طولانی‌تری می‌توان استفاده کرد؛ به شرط آنکه این زمان از یک ساعت تجاوز نکند.

۷-۲-۶- فولادهای تندبر^۲

این گروه از فولادها پرآلیاژترین فولادهای ابزار بوده و درجه حرارت سخت کردن آنها بین 1200 تا 1300 درجه سانتیگراد می‌باشد. به منظور جلوگیری از درشت شدن بیش از حد دانه‌ها که در محدوده حرارتی فوق به سادگی امکانپذیر است، زمان نگهداری برای این فولادها فقط باید در حدود چند دقیقه باشد. روش معمول برای عملیات حرارتی این نوع فولادها به ترتیب زیر است: ابتدا آنها را در درجه حرارتی در محدوده 800 تا 1000 درجه سانتیگراد پیشگرم کرده و سپس قطعه کار را به حمام نمکی با درجه حرارت مناسب (درجه حرارت سخت کردن) وارد می‌کنند. زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن را از لحظه انتقال فولاد از کوره پیشگرم به حمام نمک در نظر می‌گیرند. جدول ۱۹ زمان نگهداری در حمام نمک در درجه حرارت سخت کردن پس از اینکه فولاد در 850

۱-Hot-Work steels
۲-High-speed steels



درجه سانتیگراد پیشگرم شده باشد را برای مقاطع مختلف نشان می‌دهد. لازم به تذکر است که زمان‌های اشاره شده در جدول ۱۹ را می‌توان در حدود ۵۰ درصد افزایش داد بدون آنکه نتایج زیان‌آوری داشته باشند.

جدول ۱۹: سخت کردن فولادهای ابزار تندبر، اثر ضخامت مقطع بر روی زمان نگهداری در حمام کوئنچ کننده [۲].

زمان نگهداری (دقیقه)	ضخامت مقطع (میلیمتر)
۳	کمتر از ۱۰
۴	۱۰-۲۰
۵	۲۰-۳۰
۶	۳۰-۴۰
۷	۴۰-۵۰

۷-۳- زمان گرم کردن و زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن

زمان‌های نگهداری در درجه حرارت سخت کردن پس از پیشگرم شدن در حمام نمک (که زمان حرارت دادن در آن کوتاه می‌باشد) و یا در کوره موفلی (که زمان حرارت دادن، مخصوصاً اگر قطعه در براده چدن گذاشته شده باشد بسیار طولانی خواهد بود) در جدول ۲۰ نشان داده شده‌اند. در کوره موفلی با افزایش ابعاد قطعه، زمان لازم برای حرارت دادن و همچنین زمان لازم برای گرم کردن قطعه در چند ده درجه سانتیگراد آخر به شدت افزایش می‌یابد. از سوی دیگر باید توجه داشت که انحلال کاربیدها در درجه حرارتی در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد زیر درجه حرارت معمولی سخت کردن شروع می‌شود و این حقیقت باید در موقع استفاده از زمان‌های طولانی حرارت دادن (به عنوان مثال برای قطعات حجیم، زمان گرم کردن و رساندن قطعه از ۸۲۵ به ۸۵۰ درجه سانتیگراد در حدود ۴ ساعت می‌باشد) در نظر گرفته شود. با توجه به این نکته، در موقع حرارت دادن قطعه در کوره موفلی، زمان نگهداشتن در درجه حرارت سخت کردن را تا نصف زمان نگهداری که قبلاً بدان اشاره شد می‌توان کاهش داد. در حقیقت باید به خاطر سپرد که در چنین مواردی همواره حداقل زمان توصیه شده برای مقاطع مختلف باید استفاده شود.



در موقع کار با کوره های موفلی، زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن برای تمام فولادها بجز فولادهای تندبر را می توان بطور تقریب تخمین زد. تقریب فوق باید براساس نتایج تجربی حاصل از کارکرد با کوره های مزبور و عملیات حرارتی فولادهای مختلف با مقاطع مختلف می باشد. برای فولادهای تندبر، بدون توجه به ابعاد و اندازه های قطعه، زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن باید ۲۰ دقیقه باشد. تحت این شرایط، درجه حرارت سخت کردن باید حد متوسط دامنه حرارتی سخت کردن انتخاب شود. به این ترتیب، ملاحظه می شود که برای کارکردن صحیح با کوره های مختلف عملیات حرارتی، قبل از هرچیز مطالعه مشخصات حرارتی آنها از نظر اقتصادی، کیفیت قطعات عملیات حرارتی شده و بازده کار بسیار مهم و ضروری می باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد، برای هر کوره عملیات حرارتی بهتر است منحنی تغییرات دمای قطعه برحسب زمان برای قطعات با ابعاد مختلف و مقادیر مختلف بار در کوره مشخص شود.

جدول ۲۰: زمان گرم کردن بین درجه حرارتها ی ۹۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد [۲]

مقطع قطعه (میلیمتر)	حمام نمک (دقیقه)	کوره موفلی (دقیقه)
۲۵	۱	۱۵
۵۰	۴	۳۰
۱۰۰	۸	۶۰

۸- محیطهای خنک کننده

هدف از سخت کردن فولادها، مارتنزیت کردن حداقل لایه سطحی آنها می باشد. بنابراین سرعت سردکردن باید بنحوی کنترل شود که پرلیت و بینیت به وجود نیاید. از آنجائی که ضخامت ها و ابعاد قطعه معمولاً از قبل مشخص می شوند، ضخامت پوسته مورد نیاز برای سخت شدن باید با انتخاب صحیح فولاد و محیط سردکننده مناسب کنترل شود. برای سخت کردن فولادهای ساده کربنی عملاً همیشه از آب استفاده می شود. هرچه فولاد آلیاژی تر باشد، به محیط سخت کننده ملایم تری (سرعت سردکنندگی کمتر) نیاز دارد. همچنین هرچه محیط ملایم تر باشد، احتمال تاب برداشتن و یا تغییر شکل قطعه در ضمن سرد شدن کمتر خواهد بود. در ادامه، در ضمن مطالعه معمول ترین



محیط های سردکننده مورد استفاده در کارگاه های عملیات حرارتی، قدرت سردکنندگی هر کدام تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار می گیرند.

۸-۱-آب

شاید آب قدیمی ترین محیط سردکننده برای سخت کردن فولادها بوده و برای قرن ها مهمترین محیط سخت کننده همچنان باقیمانده است. معهذا آب خالص، محیط سردکننده نسبتاً نامناسبی می باشد. زیرا بیشترین سرعت سردکنندگی آب در حوالی ۳۰۰ درجه سانتیگراد است، یعنی دمایی که در اکثر فولادها مارتنزیت شروع به تشکیل شدن می کند. با اضافه کردن ۱۰ درصد کلرید سدیم (نمک طعام) و یا بیکربنات دو سود (جوش شیرین- سودا) به آب قدرت سردکنندگی آن به نحو قابل ملاحظه ای افزایش یافته و در عین حال حداکثر سرعت سردکنندگی آن از ۳۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتیگراد افزایش می یابد. مهمترین نکته منفی در رابطه با آب آهنگ یا قدرت سردکنندگی زیاد آن در گستره دمایی تشکیل مارتنزیت است. این موضوع باعث خواهد شد که فولاد به طور همزمان تحت تاثیر تنشهای حرارتی و استحاله ای قرار گیرد که در نتیجه احتمال ترک برداشتن یا تاب برداشتن آن افزایش می یابد [۲].

۸-۲-روغن

روغن در مقایسه با آب، محیط سردکننده بسیار ملایمتری می باشد. سرعت سردشدن در روغن در حوالی ۶۰۰ درجه سانتیگراد حداکثر و در محدوده حرارتی تشکیل مارتنزیت نسبتاً آهسته می باشد. از آنجائی که توانائی جذب حرارت روغن در مقایسه با آب نسبتاً کم است استفاده از آن به عنوان محیط سخت کننده برای فولادهای کم آلیاژ تا آلیاژ متوسط محدود به قطعات با مقطع کوچک می باشد. به عنوان مثال، اگر قطعاتی از جنس فولاد AISI D1 با ابعادی در حدود ۱۰۰ میلیمتر در روغن آرام کوئنچ شوند، احتمال سخت شدن آنها به اندازه کافی بسیار کم می باشد. یکی از مطمئنترین روش ها برای افزایش قدرت سردکنندگی روغن ها، ایجاد تلاطم در مخزن روغن و یا حرکت دادن قطعه در آن می باشد.

یکی دیگر از راه های افزایش قدرت سردکنندگی روغن، گرم کردن آن تا ۴۰ الی ۸۰ درجه سانتیگراد می باشد. این افزایش درجه حرارت باعث افزایش سیالیت روغن شده و به این ترتیب قدرت سردکنندگی (توانائی حذف حرارت از قطعه) آنرا افزایش می دهد [۲].



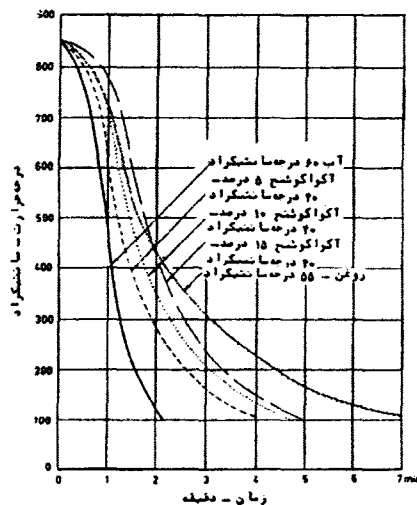
۸-۳- محلول آب و روغن

با مخلوط کردن آب و روغن محلول در آب به نسبت‌های مختلف امکان تهیه محیط‌های سردکننده با قدرتهای سردکنندگی مختلف وجود دارد. معیذاً تحت شرایط فوق کیفیت محیط حاصل نسبت به روغن کاهش خواهد یافت.

خواص و کیفیت یک محیط سردکننده را با توجه به سرعت سردکنندگی آن در محدوده حرارتی تشکیل مارتنزیت ارزیابی می‌کنند. هرچه سرعت سردکنندگی یک محیط در محدوده حرارتی فوق کمتر باشد، گفته می‌شود که محیط فوق از کیفیت بالاتری برخوردار بوده و محیط سردکننده مطلوبتری می‌باشد [۲].

۸-۴- آب با اضافات مخصوص

یک محیط کوئنچ کننده خوب باید فولاد را خیلی سریع به درجه حرارت شروع تشکیل مارتنزیت (M_s) رسانده و سپس آنرا با سرعتی نسبتاً آهسته به درجه حرارت اتاق و یا درجه حرارت حمام کوئنچ کننده برساند. با اضافه کردن بعضی مواد به آب امکان تهیه محیط کوئنچ کننده با خواص مطلوب وجود دارد. به عنوان مثال می‌توان از ماده ای به نام تجاری Aquaquench-A نام برد (شکل ۷۵). نتایج حاصل از مطالعات انجام گرفته نشان داده است که این ماده عمدتاً از ۸ درصد پلی اتر با استخلاف‌های هیدروکسیل و ۹۲ درصد آب تشکیل شده است. مشخص شده که اگر ۲ درصد از ماده فوق به آب اضافه شود، بدون اینکه سختی حاصل از کوئنچ کاهش یابد، خطر ترک برداشتن فولادهای غیر آلیاژی در ضمن کوئنچ شدن بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد یافت. با اضافه کردن ۱۰ درصد از ماده فوق به آب، محیط کوئنچ کننده ای به دست می‌آید که از نظر کیفیت و خواص سردکنندگی مشابه با روغن می‌باشد. با این مزیت که خطر آتش گرفتن محیط کوئنچ کننده نیز کاملاً از بین می‌رود. در ضمن کوئنچ کردن در این نوع محیط‌ها، درجه حرارت حمام‌های آرام و حمام‌هایی که در آنها تلاطم ایجاد شده نباید به ترتیب از ۳۰ و ۴۵ درجه سانتیگراد بیشتر باشد. مشخص شده که در ضمن استفاده از حمام‌های کوئنچ کننده از این نوع، pH محیط به مرور زمان کاهش می‌یابد و بنابراین به کمک اضافه کردن مواد خنثی کننده، pH محیط را باید بنحوی تنظیم و کنترل کرد که از ۷/۵ کمتر نشود. در غیر این صورت خطر خوردگی قطعات و تجهیزاتی که در تماس با محیط مزبور هستند وجود دارد [۲].



شکل ۷۵: منحنی های سرد شدن برای مراکز میله های استوانه ای به قطر ۷۰ میلیمتر و طول ۱۵۰ میلیمتر در محیط های کوئینچ کننده مختلف [۲].

۸-۵- هوا

مقاطع نازک از فولادهای کم آلیاژ و همچنین مقاطع نسبتاً ضخیم از فولادهای پرآلیاژ را با استفاده از هوای فشرده و یا هوای آرام به شکل موفقیت آمیزی می توان سخت کرد. از جمله مزایای سخت کردن در هوا، قابل اغماض بودن تغییر شکل و تاب برداشتن احتمالی قطعه است. بعلاوه تحت شرایطی که قطعه در هوا سرد می شود، در صورتی که نیاز به تابگیری^۱ داشته باشد، انجام آن به راحتی امکان پذیر می باشد. از جمله معایب عمده سرد کردن در هوا احتمال اکسید شدن سطوح قطعه است. در میان فولادهای پرآلیاژ فولاد AISI D۶ از سختی پذیری بالایی برخوردار است، به نحوی که مقاطع نسبتاً حجیمی از این فولاد به سادگی در هوا سخت می شوند. در شکل ۷۶ سختی پذیری فولادهای AISI D۳، D۶ با مقادیر مختلف منگنز هنگامی که در هوا سرد شوند مقایسه شده است. معروفترین فولادهای سخت شونده در هوا^۲ فولاد AISI H۱۳ می باشد. مقاطعی از فولاد فوق تا قطر ۲۰۰ میلیمتر را به سادگی می توان در هوای آرام سخت کرد. شکل ۷۷ منحنی های سرد شدن نقاط مختلف از مقاطع مختلف این فولاد وقتی که در هوا سرد شود را نشان می دهد [۲].

۱-Straightening

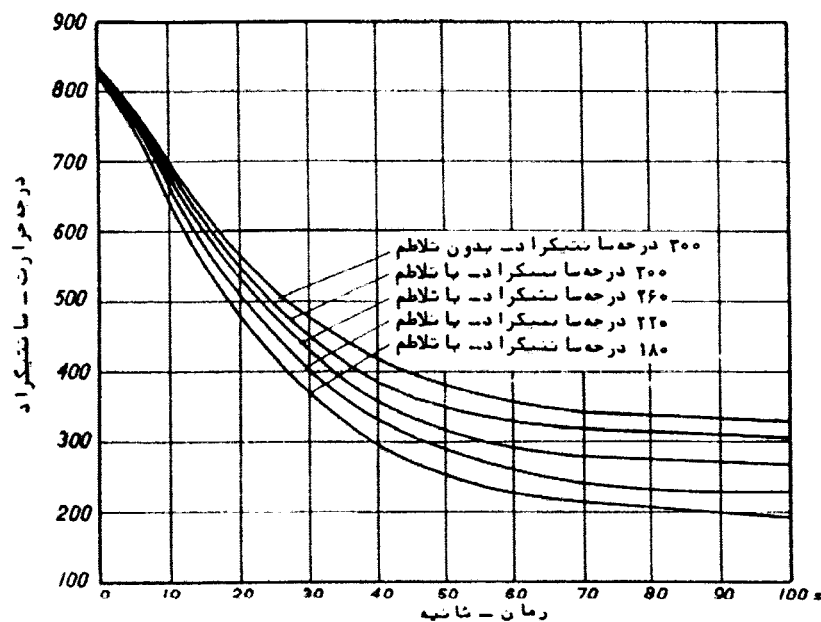
۲-Air hardening steels

۱۴۴



۸-۶- حمام های نمک

معمول ترین حمام نمک که به عنوان محیط سردکننده استفاده می شود شامل تقریباً نسبت های مساوی از نیتريت سدیم (NaNO_2) و نیترات پتاسیم (KNO_3) می باشد. درجه حرارت کار برای این حمام بین ۱۶۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد می باشد. همچنین حمام های نمک دیگری نیز با ترکیبهای شیمیائی مختلف برای این منظور وجود دارند. حمام های نمک از این نوع معمولاً محیط های سردکننده مناسبی برای سخت کردن فولادهایی هستند که از سختی پذیری نسبتاً خوبی برخوردار بوده و در عین حال زیاد هم حجیم نباشند. قدرت سردکنندگی حمام های نمک تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد نسبتاً خوب می باشد ولی با کاهش درجه حرارت فولاد کمتر از این مقدار، قدرت سردکنندگی حمام (سرعت سرد شدن قطعه) نیز کاهش می یابد. هرچه درجه حرارت حمام نمک کمتر بوده و یا تلاطم در آن بیشتر باشد قدرت سردکنندگی آن نیز بیشتر خواهد بود (شکل ۷۸).



شکل ۷۸: اثر درجه حرارت محیط کوئنچ کننده بر روی سرعت سرد شدن در عملیات مارتمپرینگ. نمونه های مورد آزمایش به شکل استوانه و به قطر ۲۷ میلیمتر، طول ۱۰۰ میلیمتر و از جنس فولاد زنگ نزن بوده است [۲].



اگر حمام نمک آلوده شود، قدرت سردکنندگی آن به نحو قابل توجهی کاهش می یابد. در واقع تحت شرایطی که حمام نمک در اثر وجود ذرات خارجی آلوده شده باشد، بهتر است که اجازه داده شود که ذرات فوق به ته ظرف رسوب کرده و به جای ایجاد تلاطم در محیط، قطعه کار در قسمتی از حمام که عاری از ناخالصی است به آرامی حرکت داده شود. در صورتی که تلاطم در حمام آلوده شده ایجاد شود، ذرات خارجی به صورت معلق درمی آیند که در این صورت به قطعه کار چسبیده و انتقال حرارت از قطعه به محیط را کاهش می دهند. مدت زمان توصیه شده برای نگهداری قطعات در حمام نمک بین ۲ تا ۴ دقیقه برای هر سانتیمتر ضخامت مقطع می باشد. زمان کوتاه تر به دماهای سخت کردن پائینتر و یا با ضخامت های کم و زمان طولانی تر به درجه حرارت های سخت کردن بالا و یا ضخامت های بیشتر مربوط می شود.

با اضافه کردن آب به حمام نمک، قدرت سردکنندگی آنرا می توان افزایش داد. درصد آب اضافه شده باید در یک دامنه مشخص و محدودی (بین ۰/۳ تا ۰/۵ درصد) باشد. تحت این شرایط قدرت سردکنندگی نمک تقریباً تا دو برابر افزایش خواهد یافت. از آنجائی که آب اضافه شده در ضمن کار به صورت بخار درآمده و از حمام خارج می شود، بهتر است که برای تنظیم درصد آب در محدوده ۰/۳ تا ۰/۵ درصد. بطور مرتب و یا هرچند وقت یکبار مقداری آب به حمام اضافه شود. برای اضافه کردن آب به حمام و همچنین جلوگیری از خطر انفجار احتمالی، بهتر است که آب در نزدیک همزنی که در داخل حمام در حال کار است اضافه شود تا بلافاصله در نمک مذاب حل شود. درصد آب حمام را با اندازه گیری دانسیته نمک و به کمک یک چگالی سنج^۱ که قبلاً برای این منظور کالیبره شده باشد می توان اندازه گرفت. برای کالیبره کردن چگالی سنج، درصد آب حمام را با وزن کردن حجم مشخصی از مذاب پس از اینکه منجمد شد مشخص می کنند. قطعاتی که در حمام های سیانید حاوی بیشتر از ۱۰ درصد سیانید آستنیت شده اند را نباید در حمام های نیتريت-نیتترات کوئنچ کرد. زیرا خطر انفجار وجود دارد.

وجود پوسته های ضخیم اکسیدی و غیراکسیدی بر روی سطح، همچنین لایه هائی از نمک جامد که از حمام نمک مذاب بر روی سطح قطعه چسبیده باشد (احتمالاً در ضمن خروج قطعه از حمام نمک آستنیت کننده و یا در ضمن ورود آن به حمام نمک سردکننده) سرعت سرد شدن را بنحو قابل ملاحظه ای کاهش می دهند. لایه های بسیار نازک اکسیدی که پس از حرارت دادن فولاد در براده چدن بر روی سطح آن تشکیل می شود، اثر بسیار کمی بر روی سرعت سرد شدن قطعه دارد [۲].

۱-Hydrometer



۹- مشخصات محیط‌های سخت کننده

نتایج حاصل از سرد کردن فولادها در یک محیط سخت کننده مشخص بستگی به درجه حرارت و میزان تلاطم محیط دارد. در این قسمت پارامترهای مزبور همراه با برخی از تجهیزات مورد نیاز برای سخت کردن قطعات مختلف توضیح داده می‌شوند.

۹-۱- کنترل درجه حرارت

بهترین درجه حرارت برای آب و روغن به عنوان محیط کوئنچ کننده به ترتیب ۲۰ تا ۴۰ و ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. درجه حرارت حمام باید مرتباً کنترل شده و سعی شود که حتماً در محدوده‌های حرارتی فوق نگهداشته شود. یکی از ساده‌ترین راه‌ها برای گرم کردن روغن قرار دادن تعدادی قطعه فولادی داغ در آن می‌باشد. روش دیگر استفاده از المان‌های الکتریکی است. این المان‌ها را به داخل مخزن وارد کرده و پس از گرم شدن روغن تا درجه حرارت مورد نظر آنها را خارج می‌کنند. لازم به اشاره است که در هر دو روش، قبل از شروع عملیات کوئنچ کردن، درجه حرارت حمام باید به درجه حرارت مورد نظر رسیده و قطعات فولادی یا المان‌های حرارتی که برای گرم کردن استفاده گردیده از آن خارج شده باشند. استفاده از مخازن پیش ساخته که مجهز به تجهیزات گرم و سرد کننده و همچنین کنترل کننده درجه حرارت باشند نیز در بسیاری از کارگاه‌های عملیات حرارتی معمول می‌باشد. در این نوع مخازن کنترل درجه حرارت محیط به کمک عبور آب گرم و یا سرد از لوله‌های مبدل حرارتی که در داخل آن نصب شده انجام می‌گیرد.

سیستم‌های کوئنچ کننده، به ویژه المان‌های گرم و سرد کننده برای مخازن روغن نباید از جنس مس و یا آلیاژهای آن باشد. زیرا فلزات فوق به عنوان کاتالیزور عمل کرده و باعث پلی‌مریزه شدن^۱ و اکسید شدن روغن‌های معدنی می‌شوند. برای این کار، فلزات و آلیاژهایی نظیر فولاد معمولی، فولاد زنگ نزن، صفحات نیکلی و یا مواد دیگر با روکش قلع توصیه شده‌اند.

^۱-Polymerization



۹-۲- بهمزدن محیط- ایجاد تلاطم در محیط

برای سخت کردن قطعات حجیم، ایجاد تلاطم در محیط سرد کننده به کمک حرکت دادن قطعات در آن معمولاً امکان پذیر نیست. از این رو بستگی به شکل و اندازه قطعه و همچنین نوع محیط سردکننده از روش های مختلفی برای این منظور استفاده می شود. برای ایجاد تلاطم در مخازن آب و روغن معمولاً از پروانه و یا پمپ استفاده می کنند. برای یکنواخت سخت شدن روتورهای توربین و یا قطعات مشابه، آنها را در تونل هوا سرد می کنند. در این نوع تونلها، در ضمن اینکه روتور به دور خودش می چرخد تعدادی دمنده از اطراف جریان کنوکسیونی از هوا در داخل تونل ایجاد می کنند. از سوی دیگر یک دمنده قوی که در ته تونل مستقر شده جریان شدیدی از هوا از قسمت پائین به سمت بالا ایجاد می نمایند. در نتیجه تمام قسمت های روتور بطور یکنواخت سخت می شود.

ابزارهای ساخته شده از فولادهای ساده کربنی و یا کم آلیاژ که در آب سخت می شوند ممکن است به علت شکل خاصی که دارند سرد شدن در برخی از نواحی آنها به تاخیر بیافتد. علت این تاخیر می تواند مربوط به مثلاً حفره ها و یا سوراخهای ایجاد شده بر روی قطعه باشد. بدین صورت که محیط سرد کننده به راحتی نتواند در داخل حفره ها و سوراخها جریان پیدا کند و یا اینکه حباب های هوا در داخل آنها محبوس شده و در نتیجه مانع از سریع سرد شدن و سخت شدن آنها شود. تحت این شرایط، اگر هدف حصول ساختمان مارتنزیتی باشد، باید سرعت جریان و یا تلاطم محیط سردکننده را افزایش داد، در غیر این صورت در ضمن سرد شدن یا پس از آن در ضمن کار ممکن است قطعه از محل هایی در حوالی سوراخ ها شکسته شود.

۱۰- عیوب در قطعات عملیات حرارتی شده

یکی از عوامل اصلی شکست و انهدام قطعات صنعتی و ابزارهای فولادی، عملیات حرارتی غلط انجام شده بر روی آنها می باشد. به نحوی که گفته می شود بررسی و تحقیق در رابطه با علل شکست یک قطعه بهتر است که همیشه با مطالعه روش عملیات حرارتی آن قطعه شروع شود. بررسی علل شکست ابزارها نشان داده است که در بیشتر از ۸۰ درصد از آنها، عملیات حرارتی نادرست عامل اصلی شکست بوده و یا اینکه حداقل سهمی در شکست داشته است. یکی از بهترین راه ها برای مشخص کردن علل شکست و احتمال دخالت عملیات حرارتی در آن، مطالعه ساختمان میکروسکوپی قطعه در محل شکست و نواحی اطراف آن می باشد. در بسیاری از موارد، دیده شده که عملیات حرارتی نادرست منجر به شکسته شدن قطعه نشده ولی معایب مهم دیگری نظیر پوسته شدن، کربوره و یا



دی کربوره شدن، اکسیده شدن، سختی کم و یا سختی زیاد، سختی غیریکنواخت و بالاخره دانه‌های درشت را به همراه داشته است.

برای اینکه عملیات حرارتی به نحو صحیح انجام گیرد و احتمال شکسته شدن و یا معیوب شدن قطعه در ضمن عملیات حرارتی و یا پس از آن حذف شده و یا به حداقل ممکن کاهش یابد، باید به نکات زیر توجه داشت:

۱- برای حرارت دادن قطعات در روش های مختلف عملیات حرارتی، از دامنه حرارتی مناسب که توسط شرکت تولید کننده فولاد توصیه شده است استفاده شود

۲- زمان و روش گرم کردن باید براساس نوع فولاد، ابعاد و شکل قطعه، روش بارگیری و نوع کوره عملیات حرارتی انتخاب شود و حتی الامکان سعی شود از روشهای توصیه شده و یا مشابه آن کمک گرفته شود

۳- با توجه به نوع کوره عملیات حرارتی و با استفاده از روش یا روش های مناسب، از تغییر ترکیب شیمیائی سطح در ضمن گرم کردن و نگهداشتن در دماهای بالا جلوگیری شود

۴- با توجه به ترکیب شیمیائی، شکل و ابعاد قطعه و همچنین خواص نهائی مورد نظر، از تجهیزات و محیط سردکننده مناسب استفاده شود

۵- در صورتیکه هدف سخت کردن ابزارها باشد، باید:

a. قطعات در حالتی که هنوز گرم هستند از حمام کوئنچ کننده خارج شوند

b. بلافاصله پس از خارج شدن از حمام، به کوره بازگشت که قبلاً تا درجه حرارت مناسب گرم شده است انتقال داده شوند.

بسیاری از ابزارها بدون توجه به دو نکته اخیر (شماره ۵) به نحو موفقیت آمیزی سخت شده اند. معیناً ابزارهای زیادی نیز در ضمن عملیات حرارتی سخت شدن شکسته شده و علت آن عدم رعایت نکات فوق تشخیص داده شده است.

در بسیاری از کارگاه های عملیات حرارتی رسم بر این است که سختی راکول قطعه کوئنچ شده قبل از بازگشت اندازه گرفته شود. گرچه این امر همیشه منجر به خسارت دیدن و یا شکسته شدن قطعه نمی شود. ولی گزارش های زیادی وجود دارد که ابزار کوئنچ شده در ضمن اندازه گیری سختی شکسته شده است. گفته می شود که بهتر است قطعه بلافاصله پس از کوئنچ شدن در درجه حرارتی نسبتاً پائین بنحوی بازگشت داده شود که سختی آن از حد مورد نظر کمتر نشود. سپس سختی راکول



آن اندازه گرفته شده و مجدداً در درجه حرارتی مناسب برای سختی نهائی موردنظر، بازگشت داده شود. به منظور آشنائی بیشتر با عیوب در قطعات عملیات حرارتی شده در ادامه، برخی از این معایب، مورد بررسی قرار داده می‌شوند.

۱-۱- ترک خوردگی

این پدیده می‌تواند در اثر عوامل مختلف باشد، مهمترین آنها عبارتند از:

- ۱- سرعت سرد شدن خیلی زیاد. به عنوان مثال، اگر فولادی که در روغن سخت می‌شود را در آب کوئنچ کنند به احتمال خیلی زیاد ترک خواهد خورد. روغن هائی که به عنوان محیط کوئنچ کننده استفاده می‌شوند، اغلب محتوی مقداری آب، می‌باشند. این امر می‌تواند منجر به ترک خوردن قطعات در ضمن کوئنچ شود. در صورتی که قطعات فولادی در روغن آلوده به آب، سرد شوند، از آنجائی که آب در ته مخزن روغن جمع می‌شود، احتمال ترک برداشتن قسمت پائینی آنها که ابتدا وارد مخزن می‌شود وجود دارد.
- ۲- سردکردن قطعه کوئنچ شده تا درجه حرارت اتاق، قبل از اینکه بازگشت داده شود. این نکته در رابطه با قطعات کوچک و قطعاتی که دارای شکل ساده هستند ممکن است مسئله آفرین نباشد، ولی قطعات حجیم و قطعاتی که دارای شکل‌های پیچیده هستند نسبت به این امر بسیار حساس هستند. قطعات مزبور را معمولاً قبل از سردشدن تا کمتر از ۶۰ الی ۸۰ درجه سانتیگراد، بازگشت می‌دهند. اگر امکان تمپر کردن، بلافاصله پس از کوئنچ کردن نباشد، بهتر است که قطعات را حداقل با قراردادن در آب جوش تنش گیری نمود، تا احتمال ترک برداشتن آنها حذف شود.
- ۳- متوقف کردن عملیات کوئنچ در درجه حرارت بالا و انتقال مستقیم قطعات به کوره تمپر با درجه حرارت نسبتاً بالا. تحت شرایط فوق، تشکیل مارتنزیت موقتاً متوقف شده و در ضمن سردکردن پس از بازگشت می‌تواند مجدداً ادامه یابد. این امر باعث می‌شود که ساختار میکروسکوپی نهائی شامل مخلوطی از مارتنزیت تمپر شده و مارتنزیت تمپر نشده باشد. شرایط ساختاری مزبور می‌تواند منجر به ایجاد تنشهای داخلی خیلی زیاد در قطعه شده و نهایتاً منجر به ترک خوردن آن شود. خطر شکسته شدن قطعه در این مورد را می‌توان با تمپر کردن مجدد آن، بلافاصله پس از بازگشت و سردشدن تا درجه حرارت اتاق کاهش داد. از



آنجائی که بازگشت دادن عملیات کم خرجی است، تمپیر کردن دو مرحله ای^۱ برای تمامی ابزارهای فولادی توصیه می شود

۴- دی کربوره شدن یا اکسیده شدن شدید قطعه در ضمن حرارت دادن و قبل از کوئنچ کردن نیز می تواند منجر به ترک برداشتن قطعه شود. روش هائی که به کمک آنها می توان از دی کربوره یا اکسیده شدن جلوگیری کرد، در بخش های قبلی توضیح داده شده اند

۵- سرعت زیاد حرارت دادن، مخصوصاً در مورد قطعاتی که یک بار سخت شده اند و قرار است مجدداً سخت شوند. در صورتی که قطعه ای یک بار سخت شده باشد، ولی به دلایلی نیاز به سخت شدن مجدد داشته باشد، توصیه می شود که قبل از حرارت دادن به منظور سخت کردن مجدد، قطعه کار بطور کامل آنیل شود. این امر مخصوصاً در مورد فولادهای ابزار تاکید می شود. این نوع فولادها باید پس از آنیل کامل تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد به آهستگی سرد شوند

۶- معایب ناشی از طراحی و شکل قطعه. در مواردی که تغییرات ضخامت در قسمت های مختلف قطعه زیاد باشد و یا اینکه، زوایا و گوشه های تیز در قطعه وجود داشته باشد، امکان ایجاد تنش های داخلی ناشی از سرعت های مختلف سرد شدن در قسمت های مختلف قطعه و در نتیجه شکسته شدن آن زیاد می شود.

در شرایطی که وجود سوراخ هائی که در قطعه تعبیه شده اند باعث ترک خوردن و یا شکسته شدن آن شوند، توصیه می شود که به منظور جلوگیری از ورود مایع کوئنچ کننده به داخل سوراخ ها، قبل از شروع عملیات حرارتی آنها را با موادی نظیر پنبه نسوز، گل رس و یا میله های آهنی (که قابلیت سخت شدن ندارند) کاملاً پر و مسدود کنند. این امر در صورتی امکان پذیر است که سخت کردن سطوح داخلی سوراخ های فوق مورد نظر نباشد.

ظاهر شکست در اغلب موارد، عملیاتی که منجر به ترک خوردن قطعه شده است را مشخص می کند. اگر سطوح ترک کاملاً تمیز باشند، به احتمال زیاد شکست بعد از عملیات حرارتی افتاده و علت آن می تواند سختی بیش از حد یا بازگشت نامناسب باشد. اگر قطعه در حمام نمک حرارت داده شده و در محل شکست رسوب هائی از نمک دیده شود و یا قطعه در کوره موفلی حرارت داده شده و در محل شکست اکسید فلزی مشاهده شود، واضح است که قبل از کوئنچ کردن ترک در قطعه وجود داشته است. در این حالت، شکست به احتمال زیاد ناشی از سرعت زیاد گرم کردن و یا معایب داخلی

^۱-Double tempering



در قطعه می‌باشد. ترک هائی که رنگی منطبق و یا معادل رنگ مربوط به درجه حرارت بازگشت داشته باشند^۱، یقیناً پس از کوئنچ کردن و قبل از تمپر شدن به وجود آمده‌اند [۲].

۱۰-۲- تغییر شکل و یا تاب برداشتن

مهمترین عواملی که می‌تواند منجر به ایجاد این عیب شود عبارتند از:

۱- سریع گرم کردن یا سرعت زیاد سرد شدن در ضمن کوئنچ کردن، به ویژه در دامنه حرارتی تشکیل مارتنزیت

۲- انتخاب دمای بسیار بالا برای آستنیت‌دهی کردن. این پارامتر به ویژه در حالتی که قطعه دارای شکل پیچیده ای باشد بسیار اهمیت دارد

۳- بارگیری نادرست قطعات در کوره. این امر در مورد کوره های حمام نمک، که قطعات به صورت معلق در مذاب آویزان می‌شوند، صادق نیست؛ ولی در موقع کار با کوره های دیگر باید بدان توجه زیاد شود.

۴- طراحی غیر صحیح قطعه. به عنوان مثال ترکیب قسمت های ضخیم و نازک، تغییرات ناگهانی در مقطع عرضی، برآمدگی های نوک تیز، سوراخ ها در قطعات سنگین و غیره. بطور کلی هرچه یک قطعه یا ابزار از نظر شکل منظم تر و ساده تر باشد، به همان نسبت توزیع تنش ها و تغییر بعدهای نسبی حاصل از آن یکنواخت تر بوده و احتمال تاب برداشتن (و یا شکسته شدن) در ضمن عملیات حرارتی کمتر می‌باشد

۵- استفاده از روش های غیر صحیح برای فروبردن قطعات در محیط سرد کننده. بطور کلی هنگام وارد کردن قطعات یا ابزارهای گرم در یک مایع سردکننده، اصول زیر باید رعایت شود:

a. قطعات تشکیل شده از مقاطع ضخیم و نازک، باید ابتدا از طرف مقطع ضخیم وارد

حمام کوئنچ کننده شوند

b. قطعات طویل و نازک نظیر، سرپشته ها، قلاویزها، برقوها و فنرها باید همیشه بطور

عمودی وارد محیط سردکننده شوند

c. قطعات نازک و تخت نظیر دیسک ها و تیغه فرزهای دیسکی باید همواره از طرف

لبه، وارد مخزن کوئنچ کننده شوند

^۱-Temper color



d. قطعات استوانه ای شکل و نازک باید به نحوی وارد محیط سردکننده شوند که محور

طولی آنها عمود بر سطح مایع باشد

e. قطعات که دارای سطح مقعر باشند، نباید از طرف مقعر وارد حمام سرد کننده شوند

در غیر این صورت لایه ای از بخار در ناحیه فوق تشکیل شده و از سخت شدن آن

جلوگیری می کند.

در موقع سخت کردن قطعات خیلی طویل، تخت و نازک نظیر اهرهای نواری، دیسک

اهرها، تیغه فرزهای دیسکی، فنرهای تخت، داسهای کشاورزی و قطعات مشابه دیگر، حتی وقتی که

کلیه اصول فوق الذکر به خوبی رعایت شوند، به راحتی نمی توان از تغییر شکل و تاب برداشتن آنها

جلوگیری کرد. از اینرو، پیشنهاد می شود که قطعات مزبور در دستگاه ها یا نگهدارنده هایی با طرح

مناسب کوئنچ شوند. بدین صورت که قطعه گرم شده در داخل گیره پیشگرم شده ای بطور محکم قرار

گرفته و همراه با آن به داخل محیط کوئنچ کننده وارد شود [۲].

۱۰-۳- نواحی پراکنده نرم

نواحی نرم، عمدتاً در قطعات ساخته شده از فولادهای ساده کربنی و یا کم آلیاژ دیده

می شوند. برخی از معمول ترین مواردی که می تواند منجر به تشکیل نواحی نرم شود عبارتست از:

۱- کوئنچ کردن در آبی که حاوی حباب های هوا باشد. همچنین حباب های بخار تشکیل شده

در ضمن وارد شدن قطعه داغ به داخل آب می تواند نواحی پراکنده نرم به وجود آورد. در این

شرایط، باید از افزایش درجه حرارت آب بیشتر از ۲۵ درجه سانتیگراد جلوگیری کرد. برای

کاهش اثرات حباب های هوا و بخار، آب داخل مخزن را به کمک پروانه و یا پمپ به هم

می زنند و یا اینکه قطعه کار را در داخل آن حرکت می دهند. اضافه کردن در حدود ۱۰

درصد نمک معمولی (NaCl) و یا ۵ درصد سودا (NaHCO_3) به آب اثر مخرب فوق را کاهش

می دهد

۲- آب هائی که توسط روغن، صابون و یا ناخالصی های مشابه دیگر آلوده شده باشند می توانند

منجر به ایجاد نقاط پراکنده نرم بر روی سطح قطعه شوند

۳- کافی نبودن آب مخزن برای حجم قطعاتی که در آن کوئنچ می شوند



- ۴- غیرهمگن بودن ترکیب شیمیایی و یا ساختمان میکروسکوپی (مثلاً نوع فازها و اندازه دانه‌ها) در قسمت‌های مختلف قطعه
- ۵- وجود پوسته‌های اکسیدی و یا مواد دیگر نظیر گریس، روغن، ماسه و مواد مشابه دیگر بر روی سطوح قطعه.

۴-۱۰- سختی کم پس از کوئنچ کردن

اگر سختی قطعه پس از عملیات سخت کردن به اندازه کافی افزایش نیافته باشد، علت آن می‌تواند در اثر یک یا تعدادی از عوامل زیر باشد:

۱- درجه حرارت آستنیت‌زدن خیلی کم یا زمان آستنیت‌زدن خیلی کوتاه باشد. حالت دوم می‌تواند ترک خوردن و یا شکسته شدن قطعه را نیز موجب شود، زیرا در زمان کوتاه، مقاطع نازک می‌توانند به راحتی آستنیت‌زدن شده در حالی که مقاطع ضخیم هنوز به درجه حرارت کافی نرسیده باشند. این امر باعث غیریکنواخت سخت شدن قطعه و در نتیجه ایجاد تنش‌های بسیار زیاد در آن خواهد شد

۲- سرعت سردکردن بسیار کم، به عنوان مثال تحت شرایطی که قطعه شکل پیچیده‌ای داشته و نباید در آب کوئنچ شود. از سوی دیگر، بعلت حجیم بودن آن، سرعت سرد شدن در روغن کافی نباشد

۳- دی‌کربوره شدن

۴- حضور آستنیت باقیمانده بسیار زیاد، ناشی از درجه حرارت آستنیت‌زدن بسیار بالا.

گرچه در اینجا، تنها چهار نوع عمده از معایب عملیات حرارتی و آنهم فقط در ضمن سخت کردن مورد بررسی قرار داده شد ولی باید به این نکته توجه داشت که تعداد عیوبی که در ضمن عملیات حرارتی ممکن است بروز کنند، به مراتب بیشتر می‌باشد. درحقیقت، در هر مورد، ابتدا باید عامل به وجودآورنده هر عیب با توجه به عملیات (اعم از حرارتی و یا غیر حرارتی) انجام شده بر روی قطعه مشخص شده و سپس با در نظر گرفتن آن در رفع عیب کوشیده و سعی در جلوگیری از معیوب شدن قطعات دیگر به عمل آید [۲].



۱۱- اندازه‌گیری دما

در تحقیقات علمی و در اغلب کشورهای خارجی مقیاس اندازه‌گیری استاندارد دما، مقیاس سانتیگراد است. اما در کارخانجات صنعتی آمریکا، تقریباً بدون استثنا مقیاس فارنهایت بکار می‌رود. تبدیل یک مقیاس به مقیاس دیگر را می‌توان از روی رابطه‌های زیر انجام داد.

$$^{\circ}C = \frac{5}{9}(^{\circ}F - 32) \quad (1)$$

$$^{\circ}F = \frac{9}{5}(^{\circ}C + 32) = 1.8(^{\circ}C + 32) \quad (2)$$

دقت اندازه‌گیری و کنترل دما موفقیت در بعضی از فرآیندهای مربوط به متالورژی، از قبیل ریختگری، ذوب، تصفیه و عملیات حرارتی را تعیین خواهد کرد. همچنین تاثیر عمیقی بر خواص استحکامی خیلی از فلزات و آلیاژها خواهد داشت. بنابراین به دست آوردن چگونگی اندازه‌گیری دما ضروری می‌باشد.

پیرومتري^۱ به اندازه‌گیری دماهای بالا، معمولاً بیش از $510^{\circ}C$ ($950^{\circ}F$) مربوط می‌شود و وسایلی که بدین منظور به کار می‌روند پیرومتر نامیده می‌شوند.
ترمومتري^۲ به اندازه‌گیری دماهای کمتر از $510^{\circ}C$ ($950^{\circ}F$) مربوط می‌شود و وسایلی که بدین منظور به کار می‌روند ترمومتر (دماسنج) نامیده می‌شوند.

۱-۱- اندازه‌گیری دما به وسیله رنگ

یکی از ساده‌ترین روش‌های تخمین دمای یک فلز توجه به رنگ جسم داغ است. همچنان که در جدول ۲۱ نشان داده می‌شود ارتباط آشکاری بین دمای یک فلز و رنگ آن وجود دارد. این روش، به جز در مواردی که توسط یک فرد با تجربه به کار می‌رود، فقط تخمین‌های تقریبی از دما به دست می‌دهد. مشکل اصلی این روش این است که قضاوت در مورد تغییرات رنگ توسط افراد مختلف، متفاوت است. سایر منابع خطا این است که ممکن است رنگ یکنواخت نباشد و یا در مواد مختلف تا اندازه‌ای تغییر کند.

۱- Pyro یک واژه یونانی به معنی آتش است. Pyrometer را می‌توان آذرسنج گفت که در فارسی زیاد مصطلح نیست
۲- Thermometer که در فارسی به آن دماسنج یا گرماسنج گفته می‌شود



جدول ۲۱- تغییرات رنگ با دما [۱۰]

درجه حرارت		رنگ
۹۵۰ °F	۵۱۰ °C	قرمز ضعیف
۱۱۵۰	(۶۲۱)	قرمز تیره
۱۱۷۵	(۶۳۵)	قرمز
۱۳۰۰	(۷۰۴)	قرمز روشن
۱۴۷۵	(۸۰۱)	قرمز متمایل به نارنجی
۱۶۵۰	(۸۹۸)	نارنجی تیره
۱۷۵۰	(۹۵۴)	نارنجی
۱۸۰۰	(۹۸۲)	زرد

اگر تعیین و یا ثبت مداوم دما لازم باشد، از دو گروه متفاوت از وسایل اندازه گیری دما می توان استفاده کرد [۱۰]:

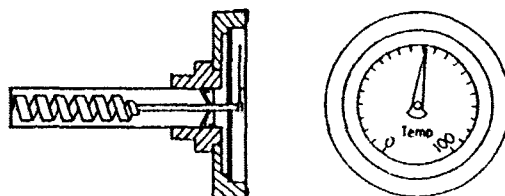
- ۱- سیستمهای مکانیکی که به انبساط یک فلز، مایع، گاز یا بخار بستگی دارند.
- ۲- سیستم های الکتریکی که به مقاومت، ترموکوپل^۱، تشعشع و پیرومترهای نوری مربوط می شوند.

۱۱-۲- دماسنج های انبساط فلز

اغلب فلزات هنگامی که گرم می شوند منبسط می شوند که مقدار انبساط به دما و ضریب انبساط حرارتی فلز بستگی دارد. از این اصل در نوارهای بی متال (دو فلزی) ترموستات های معمولی استفاده می شود. بی متال ها با اتصال یک فلز با ضریب انبساط حرارتی زیاد به یک فلز با ضریب انبساط حرارتی کم ساخته می شوند. در نتیجه تغییرات اندک دما، نوار خم می شود و یک مدار الکتریکی را وصل یا قطع کرده و گرمایش یک سیستم را کنترل می کند.

هنگامی که بی متال در اندیکاتور (نشانگر) های صنعتی به کار می رود معمولاً آن را به صورت یک سیم پیچ درست کرده یک سر آن را طوری ثابت نگاه می کنند که با انبساط، به طور خودکار در طرف دیگر حرکت چرخشی ایجاد شود (شکل ۷۹).

^۱-Thermocouple



شکل ۷۹: اندیکاتور درجه حرارت صنعتی با یک بی متال مارپیچی [۱۰].

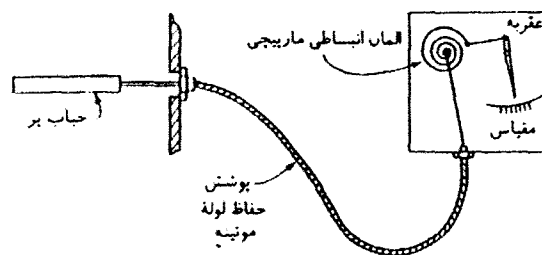
در اغلب نوارهای بی متال از اینوار^۱، (به دلیل ضریب انبساط حرارتی کم آن) به عنوان یکی از فلزات استفاده کرده و در دماهای پایین از برنج زرد و دماهای بالا از نیکل به عنوان فلز دیگر استفاده می‌شود. از نوارهای بی متال می‌توان در محدوده دمایی -75°C (-100°F) تا 540°C (1000°F) استفاده کرد و با توجه به اینکه این دماسنج‌ها وسیله ظریفی نیستند نیازی به تعمیر و نگهداری ندارند. محدودیت عمده این نوارها این است که بعلت ضرورت نگهداری در یک لوله محافظ سرعت پاسخ دهی آنها ممکن است پایین تر از سایر وسایل باشد [۱۰].

۱۱-۳- دماسنج‌های انبساط مایع

سایر تجهیزات اندازه‌گیری دما با سیستم مکانیکی، چه با انبساط مایع یا گاز باشند و چه با فشار بخار، شامل یک حباب که در معرض دمای مورد نظر قرار می‌گیرد و همچنین یک وسیله قابل انبساط، (معمولاً یک لوله بوردن^۲)، می‌باشند. یک عقربه نشانگر دما یا یک قلم ثبت کننده نتایج را نشان می‌دهد. حباب و لوله بوردن با یک لوله موئینه به هم متصل شده و با یک مایع یا گاز مناسب پر می‌شوند (شکل ۸۰) [۱۰].

۱- Invar آلیاژی است از نیکل و منگنز و کربن و آهن که ضریب انبساط بسیار کوچکی دارد.

۲- Bourdon



شکل ۸۰: سیستم ساده حرارتی برای اندازه گیری دما در صنعت [۱۰].

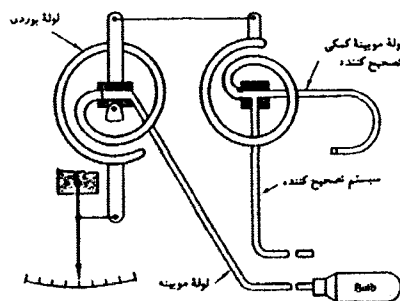
دماسنج بر اساس انبساط مایع، سیستم کلی فوق را دارد که با یک مایع آلی مناسب یا جیوه پر می‌شود. تغییرات در دمای جواب موجب می‌شود که مایع منبسط یا منقبض شود که در نتیجه آن لوله بردن نیز منبسط یا منقبض می‌شود. تغییرات دما در طول لوله مونیوم و پوشش مربوط نیز موجب انبساط و انقباض مایع می‌شود. بنابراین وجود یک وسیله تصحیح کننده نیز ضروری می‌باشد. شکل ۸۱ یک دماسنج انبساط مایع که با استفاده از یک سیستم دوتایی کاملاً تصحیح شده را نشان می‌دهد لوله کمکی بدون جواب بوده به طوری که مقدار حرکت های دو لوله از هم کم می‌شوند. بعضی از مایعاتی که در این سیستم به کار می‌روند و محدوده درجه حرارت آنها عبارتند از:

جیوه: از 37°C تا 510°C (از 35°F تا 950°F)

الکل: از 78°C تا 71°C (از 110°F تا 160°F)

پنتان: از 29°C تا 165°C (از 85°F تا 330°F)

جوهر قطران: از 6°C تا 204°C (از 20°F تا 400°F)



شکل ۸۱: دماسنج انبساط مایع با سیستم تصحیح کننده [۱۰].

۱۱-۴- دماسنج های فشار گاز یا بخار

در دماسنج فشار بخار، قسمتی از حباب با یک مایع فرار پر می شود. دماهای متفاوت حباب متقابلاً موجب تغییرات فشار بخار اشباع شده بالای سطح مایع داخل حباب می شود. این تغییرات فشار به لوله خوردن انتقال داده می شوند و در نتیجه عقربه نشان دهنده، از روی تغییرات فشار، دمای داخل حباب را مشخص می کند. با انتخاب مایع فرار مناسب تقریباً هر دمایی مابین -50°C و 260°C (-60°F و 500°F) را می توان اندازه گرفت. برخی از مایعاتی که بدین منظور به کار می روند عبارتند از: کلرید متیل، اتر، الکل اتیل و تولوئن.

دماسنج فشار گاز مشابه دماسنج فشار بخار است بجز اینکه این سیستم با یک گاز پر می شود، که معمولاً نیتروژن است. محدوده اندازه گیری دما به وسیله دماسنج فشار گاز از -130°C تا 430°C (-200°F تا 800°F) است.

دماسنج های با سیستم پرشونده معمولاً برای اندازه گیری در محیط هایی با دمای کم از قبیل حمام های آبکاری و تمیزکاری، روغن زدایی آب یا روغن سردکن، دماهای زیر صفر در عملیات کار سرد فلزات استفاده می شوند. این دستگاه ها نسبتاً ارزان هستند اما در جایی که پاسخ سریع یا دقت خیلی بالا مورد نیاز است استفاده نمی شوند [۱۰].

۱۱-۵- دماسنج مقاومتی

اصول کار دماسنج مقاومتی بر اساس افزایش مقاومت الکتریکی یک رسانا با افزایش دما است. اگر تغییرات مقاومت بر حسب تغییرات دمای یک فلز رسم شود، تعیین دمای جسم با اندازه گیری مقاومت



الکتریکی جسم امکان پذیر خواهد بود. سیم پیچ مقاومت در انتهای بسته یک لوله محافظ نصب می‌شود و دو سر آن به یک دستگاه مقاومت سنج مناسب که معمولاً یک پل وینستون است، وصل می‌شود.

سیم پیچ های مقاومت معمولاً از مس، نیکل، یا پلاتین ساخته می‌شوند. نیکل و مس برای دماهای مابین ۶۵°C و ۲۶۰°C (۱۵۰°F و ۵۰۰°F) بسیار مناسب می باشند، در حالی که پلاتین می‌تواند در دماهایی در محدوده ۲۱۵°C تا ۵۹۰°C (۳۵۰°F تا ۱۱۰۰°F) به کار رود. دماسنج مقاومتی بسیار دقیق بوده و در آزمایشگاه از اهمیت بالایی برخوردار است. اما کاربرد صنعتی آن محدود است زیرا ظریف بوده و مستلزم حفاظت زیاد است [۱۰].

۱۱-۶- پیرومتر ترموالکتریکی

این سیستم پرمصرف ترین روش اندازه گیری و کنترل دما در متالورژی است و تا دمای تقریباً ۱۶۵۰°C (۳۰۰۰°F) به طور رضایت بخش کار می‌کند. پیرومتر ترموالکتریکی ساده که در شکل ۸۲ نشان داده می‌شود، شامل واحدهای زیر است:

۱- ترموکوپل، که از دو فلز یا آلیاژ متفاوت تشکیل یافته است.

۲- بلوک اتصال، در خارج از کوره

۳- سیم‌های رابط

۴- وسیله نشان دهنده یا ثبت کننده

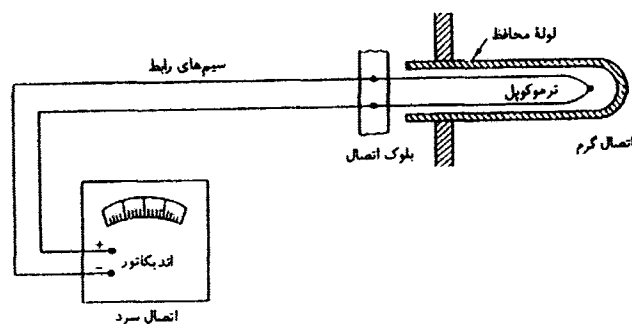
کاربرد این پیرومتر بر اساس دو اصل زیر استوار است:

اثر پلتیر؛ اگر دو سیم فلزی متفاوت یک اتصال الکتریکی داشته باشند، یک نیروی محرکه الکتریکی (emf) در نقطه اتصال وجود خواهد داشت. مقدار نیروی محرکه الکتریکی ایجاد شده به وسیله ترکیب شیمیایی سیم ها و دمای نقطه اتصال تعیین خواهد شد.

اثر تامسون؛ اگر مابین دو انتهای یک سیم فلزی همگن اختلاف دمایی وجود داشته باشد یک emf بین دو سر این سیم به وجود خواهد آمد. مقدار emf به وسیله ترکیب شیمیایی، یکنواختی شیمیایی سیم و اختلاف دما تعیین خواهد شد.



کل نیروی محرکه الکتریکی در یک پیرومتر ترموالکتریکی که گاهی اوقات اثر سیبیک نامیده می‌شود، مجموع جبری چهار نیروی محرکه الکتریکی خواهد بود. دو نیروی محرکه الکتریکی پلتیر در اتصالات گرم و سرد و دو نیروی محرکه الکتریکی تامسون در طول سیم‌ها. اتصال سرد یا اتصال مرجع باید در دمای ثابتی نگه داشته شود که معمولاً 0°C یا 32°F است. در دستگاه نشان دهنده دما این مسئله معمولاً به وسیله یک سیم پیچ تصحیح کننده اتصال سرد، که مقاومت آن را با نوسانات دمای محیط تغییر می‌دهد برطرف می‌شود و دمای آن را همیشه در 0°C نگه می‌دارد. اگر اتصال سرد یا مرجع در دمای ثابتی نگه داشته شود پس نیروی محرکه الکتریکی در مدار پیرومتر تابع معینی از دمای اتصال گرم خواهد بود.



شکل ۸۲: یک پیرومتر ترموالکتریکی ساده [۱۰].

با مدرج کردن مناسب می‌توان یک رابطه دقیق بین emf ایجاد شده و دمای واقعی اتصال گرم تعیین کرد (جدول ۲۲).

قانون ترموالکتریک مفید دیگری نشان می‌دهد که اگر فلز سومی به مدار اضافه شود نیروی محرکه کل مدار متاثر نخواهد شد مشروط بر اینکه دمای این فلز سوم در کل طول آن یکنواخت باشد. کار اصلی سیم‌های رابط، انتقال اتصال مرجع به نقطه‌ای است که در آنجا دما متغیر نیست. سیم‌های ترموکوپل که مستقیماً به دستگاه وصل می‌شوند معمولاً نه خیلی طویل بوده و نه به خوبی عایق بندی می‌شوند. سیم‌های رابط معمولاً از همان مواد سیم‌های ترموکوپل ساخته شده و در یک کابل دوتایی با پوشش مجزا که رنگ مشخصی برای شناسایی دارد، قرار داده می‌شوند [۱۰].



جدول ۲۲: دما در مقابل نیروی محرکه الکتریکی، emf به میلی ولت،
دمای اتصال سرد ۳۲°F [۱۰]

دما °F	پلاتین +۱۰٪ رادیوم و پلاتین	کرومیل و آلومل	آهن و کنستانتان	مس و کنستانتان
۳۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
۱۰۰	۰/۲۲۱	۱/۵۲	۱/۹۴	۱/۵۱۷
۲۰۰	۰/۵۹۵	۳/۸۲	۴/۹۱	۳/۹۶۷
۳۰۰	۱/۰۱۷	۳/۰۹	۷/۹۴	۶/۶۴۷
۴۰۰	۱/۴۷۴	۸/۳۱	۱۱/۰۳	۹/۵۲۵
۵۰۰	۱/۹۵۶	۱۰/۵۷	۱۴/۱۲	۱۲/۵۷۵
۶۰۰	۲/۴۵۸	۱۲/۸۶	۱۷/۱۸	۱۵/۷۷۳
۷۰۰	۲/۹۷۷	۱۵/۱۸	۲۰/۲۵	۱۹/۱۰۰
۸۰۰	۳/۵۰۶	۱۷/۵۳	۲۳/۳۲	
۹۰۰	۴/۰۴۶	۱۹/۸۹	۲۶/۴۰	
۱۰۰۰	۴/۵۹۶	۲۲/۲۶	۲۹/۵۲	
۱۱۰۰	۵/۱۵۶	۲۴/۶۳	۳۲/۷۲	
۱۲۰۰	۵/۷۲۶	۲۶/۹۸	۳۶/۰۱	
۱۳۰۰	۶/۳۰۷	۲۹/۳۲	۳۹/۴۳	
۱۴۰۰	۶/۸۹۷	۳۱/۶۵	۴۲/۹۶	
۱۵۰۰	۷/۴۹۸	۳۳/۹۳	۴۶/۵۳	
۱۶۰۰	۸/۱۱۰	۳۶/۱۹	۵۰/۰۵	
۱۷۰۰	۸/۷۳۲	۳۸/۴۳		
۱۸۰۰	۹/۳۶۵	۴۰/۶۲		
۱۹۰۰	۱۰/۰۰۹	۴۲/۷۸		
۲۰۰۰	۱۰/۶۶۲	۴۴/۹۱		
۲۱۰۰	۱۱/۳۲۳	۴۷/۰۰		
۲۳۰۰	۱۲/۶۵۷	۵۱/۰۵		
۲۴۰۰	۱۳/۳۲۵	۵۳/۰۱		
۲۵۰۰	۱۳/۹۹۱	۵۴/۹۲		
۲۶۰۰	۱۴/۶۵۶			
۲۷۰۰	۱۵/۳۱۹			
۲۸۰۰	۱۵/۹۷۹			
۲۹۰۰	۱۶/۶۳۷			
۳۰۰۰	۱۷/۲۹۲			



گاهی اوقات از سیم‌های رابط مسی استفاده می‌شود اما در این صورت اتصالاتی سرد به جای داخل دستگاه در یک بلوک اتصال قرار داده می‌شوند و ممکن است نگهداری آنها در دماهای ثابت بسیار مشکل باشد [۱۰].

۱۱-۷- مواد ترموکوپل

از نظر تئوری هنگامی که در نقاط اتصال دو سیم فلزی غیر مشابه اختلاف دمایی وجود داشته باشد، یک emf به وجود می‌آید. اما در صنعت فقط عملاً ترکیبات اندکی برای ساخت ترموکوپل‌ها به کار می‌روند، این ترکیبات اساساً به دلیل پتانسیل ترموالکتریکی هزینه مناسب، ثبات اندازه دانه، خطی بودن منحنی دما-emf و نقاط ذوب بالاتر از محیط اندازه‌گیری آنها انتخاب می‌شوند. اولین ماده نامبرده شده در ترکیب‌های زیر همیشه به ترمینال مثبت وصل می‌شود.

کرومل - آلومل، کرومل (۹۰٪ نیکل، ۱۰٪ کروم) و آلومل (۹۴٪ نیکل، ۳٪ منگنز، ۲٪ آلومینیم، ۱٪ سیلیسیم) یکی از پرمصرف‌ترین ترکیبات صنعتی است. این ترکیبات منحنی درجه بندی نسبتاً خطی داشته و مقاومت به اکسیداسیون خوبی دارد و برای محدوده دمای ۶۵۰ تا ۱۲۰۰°C (۱۲۰۰ تا ۲۲۰۰°F) بسیار مناسب است.

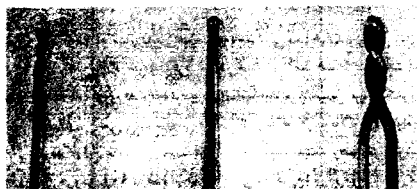
آهن - کنستانتان، کنستانتان آلیاژی است دارای تقریباً ۵۴٪ مس و ۴۶٪ نیکل. این ترکیب را می‌توان در محدوده ۱۵۰ تا ۷۶۰°C (۳۰۰ تا ۴۰۰°F) به کار برد. مزایای عمده آن هزینه نسبتاً پایین، قدرت ترموالکتریکی بالا و سازگاری با محیط‌های متفاوت است.

مس - کنستانتان، آلیاژ کنستانتانی که با مس استفاده می‌شود اندکی با کنستانتان مصرفی با آهن متفاوت است و ممکن است مقدار کمی منگنز و آهن داشته باشد. این ترکیب برای اندازه‌گیری دماهای پایین تا ۲۵۰°C (-۴۲۰°F) بسیار مناسب است، حد بالای دمای اندازه‌گیری، تقریباً ۳۱۵°C (۶۰۰°F) است.

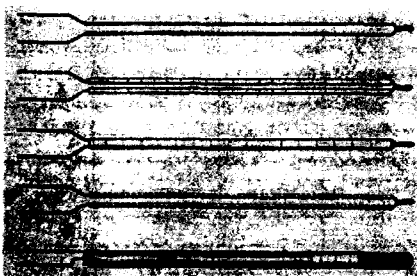
ترکیبات بالا به عنوان ترموکوپل‌های فلزات کم بها معروف هستند.

پلاتین، ۱۰٪ رودیم - پلاتین، پلاتین ترموکوپلی از فلزات نجیب است. این ترموکوپل برای اندازه‌گیری دماهایی به کار می‌رود که برای ترموکوپل‌های فلزات کم بها بسیار بالاست و پیرومترهای نوری یا تشعشعی عملکرد رضایت بخشی ندارند. این ترموکوپل برای کار مداوم در محدوده ۰ تا ۱۶۵۰°C (۳۲ تا ۳۰۰۰°F) مناسب است اما در محیط‌های احیاکننده به سرعت خراب می‌شود [۱۰].

ترموکوپل ها با بریدن طول های مناسبی از دو سیم ساخته می شوند انتهای سیم ها تقریباً دو دور با احتیاط به یکدیگر پیچانده شده یا گاهی اوقات به هم وصل می شوند و سپس جوشکاری شده و سر آن را به صورت گرد و ظریف در می آورند (شکل ۸۳-الف). سیم های ترموکوپل باید فقط در اتصال گرم با هم تماس داشته باشند، زیرا تماس در هر نقطه دیگر معمولاً موجب می شود نیروی محرکه الکتریکی بسیار اندکی اندازه گیری شود. سیم ها به وسیله مهره های سرامیکی یا لوله های سرامیکی از هم جدا می شوند (شکل ۸۳-ب).



الف



ب

شکل ۸۳: الف) نمونه هایی از ترموکوپل هایی که به طور مناسب جوشکاری شده اند. ب) انواع مختلفی از چینی های جداکننده سیم های ترموکوپل [۱۰].

غالباً ترموکوپل ها در لوله های محافظ قرار داده می شوند. لوله های محافظ ممکن است از مواد سرامیکی یا فلزی باشند. لوله محافظ، ترموکوپل را در مقابل صدمات مکانیکی حفظ کرده و از آلوده شدن سیم های ترموکوپل به وسیله محیط کوره جلوگیری می کند. انواع مختلفی از لوله های محافظ فلزی وجود دارد از قبیل آهن کار شده یا چدن (تا 1300°F معادل 704°C)، آهن با ۱۴٪ کروم (تا 1500°F معادل 815°C)؛ آهن با ۲۸٪ کروم یا نایکروم (تا 2000°F معادل 1093°C). بالاتر از 2000°F از لوله های محافظ سرامیکی یا کاربید سیلیسیم استفاده می شود [۱۰].



۱۱-۸- پیرومتر ثبت کننده و کنترل کننده

در اغلب دستگاه های صنعتی، لازم است که کار پیرومتر بیشتر از نشان دادن ساده دما باشد. می توان عقربه پتانسیومتر را با یک قلم که روی صفحه کاغذ حرکت می کند جایگزین کرد، تا دما را به طور کامل ثبت کرد. این وسیله پیرومتر ثبت کننده، نامیده می شود. با استفاده از این وسیله و به کمک مدارهای الکتریکی می توان جریان گاز یک مشعل یا جریان الکتریکی المان های حرارتی را کنترل کرد و بدین ترتیب دمای یک کوره را در حد معینی ثابت نگه داشت، که در این صورت پیرومتر کنترل کننده نامیده می شود. ممکن است پیرومتر را طوری طراحی کرد که دمای یک ترموکوپل یا ترموکوپلهای بیشتری را ثبت و کنترل کند [۱۰].

۱۱-۹- پیرومتر تشعشی

اصول اساسی کارکرد پیرومتر تشعشی به یک منبع استاندارد تشعشع، که به عنوان جسم سیاه معروف است، مربوط می شود. جسم سیاه یک جسم فرضی است که کلیه تشعشعی را که به آن برخورد می کنند جذب می کند. چنین جسمی در یک دمای یکسان، از هر جسم دیگری به میزان بیشتری انرژی تشعشع می کند. پیرومترهای تشعشی عموماً برای نشان دادن جسم سیاه یا دماهای حقیقی مدرج می شوند. قانون استفان-بولتزمن که اساس مقیاس دمای پیرومترهای تشعشی است، نشان می دهد که میزان انرژی تشعشع یافته از یک جسم سیاه با توان چهارم دمای مطلق آن متناسب است:

$$W=KT^4$$

که در آن:

W = میزان انرژی نشر یافته توسط یک جسم سیاه

K = ضریب تناسب

T = دمای مطلق جسم سیاه

دمای ظاهری اندازه گیری شده از مواد جسم غیرسیاه همیشه پائینتر از دمای حقیقی خواهد بود. این امر به علت قابلیت انتشار ماده است که به عنوان نسبت میزان انرژی تشعشی نشر شده از جسم غیرسیاه به میزان انرژی نشر شده از یک جسم سیاه در یک دمای یکسان تعریف می شود. از این رو:



$$W = Ke_i T^4 = KT_a^4$$

$$T_a^4 = e_i T^4$$

که در آن

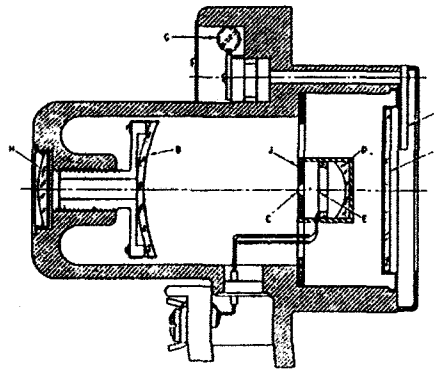
T_a = دمای مطلق ظاهری جسم غیرسیاه که با پیرومتر اندازه گیری می شود.

e_i = قابلیت انتشار کلی جسم غیرسیاه است.

بنابراین با دانستن قابلیت انتشار کلی ماده، دمای نشان داده شده توسط پیرومتر را می توان بسادگی به دمای مطلق حقیقی که در شرایط جسم سیاه یا پیرومتر خوانده می شود تصحیح کرد. شکل ۸۴ مقطع یک پیرومتر تشعشعی نوع آینه ای را نشان می دهد. تشعشع هدف از داخل دریچه A عبور کرده به آئینه B برخورد می کند و روی صفحه دیاگرام داخلی J به صورت تصویر هدف متمرکز می شود. این تصویر سپس به وسیله آینه D روی یک گروه ترموکوپل که ترموپیل E نامیده می شوند متمرکز می شود. با نگاه کردن از داخل عدسی H به سوراخ C، می توان تعیین کرد که آیا تصویر هدف بقدر کافی بزرگ است که دریچه را بپوشاند و آیا پیرومتر به خوبی تنظیم شده است یا خیر؟ افزایش دمای ترموپیل تقریباً متناسب با میزان تشعشعی است که بر روی آن برخورد می کند و بنابراین emf متناسب با T^4 است. اما در عمل، تمامی انرژی تشعشعی به ترموکوپل نمی رسد زیرا بخشی از آن توسط محیط و قطعات نوری دستگاه جذب خواهد شد. بنابراین قانون استفان - بولتزمن به طور دقیق صدق نخواهد کرد و رابطه مابین دمای منبع تشعشع کننده و emf ترموکوپل را می توان به طور تجربی چنین بیان کرد

$$E = KT^b$$

ثابت های K و b باید به طور تجربی به وسیله مدرج کردن در دو نقطه استاندارد تعیین شوند.



شکل ۸۴: پیرومتر تشعشعی نوع آینه ای [۱۰].

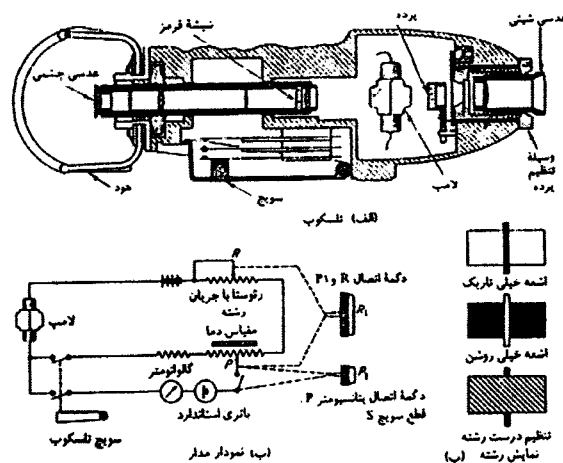
لزومی ندارد که پیرومتر تشعشعی با بدنه گرم تماس داشته باشد و از این رو حد بالایی برای دما وجود ندارد که پیرومتر نتواند بالاتر از آن را تحمل کند. با استفاده از وقفه های مناسب در سیستم نوری، حد بالایی برای دما وجود نخواهد داشت. حد پایین دما در حدود 535°C (1000°F) است [۱۰].

۱۱-۱۰- پیرومتر نوری

وسیله ای که در قسمت قبل شرح داده شد برای تمام طول موج های تشعشع پاسخگو است و از این رو به پیرومتر تشعشعی (تابشی) معروف است. اصول کارکرد پیرومتر نوری بر همان اصول پیرومتر تشعشعی استوار است، با این تفاوت که پیرومتر نوری از یک طول موج یا بخش باریکی از طول موجهای مرئی طیف استفاده می کند. پیرومتر نوری به وسیله مقایسه روشنی نور منتشر شده از منبع با نور یک منبع استاندارد، دما را اندازه گیری می کند. برای اینکه مقایسه رنگ ساده تر باشد از یک صافی قرمز استفاده می شود تا تشعشع مرئی فقط منحصر به طول موج نور قرمز باشد.

متداول ترین نوع پیرومتر نوری در صنعت نوع رشته ناپدید شونده است. این پیرومتر شامل دو قسمت تلسکوپ و جعبه کنترل است. تلسکوپ (شکل ۸۵- الف) دارای یک فیلتر شیشه ای قرمز است که در مقابل عدسی چشمی نصب شده و یک لامپ با یک رشته مدرج که عدسی های شیئی تصویری از جسمی را که دمای آن اندازه گیری می شود روی آن متمرکز می کند، می باشد. همچنین این دستگاه دارای یک کلید برای قطع مدار الکتریکی لامپ و یک صفحه جاذب برای تغییر محدوده اندازه گیری دما توسط پیرومتر است.

جعبه کنترل محتوی قسمت های اصلی مدار اندازه گیری است که در شکل ۸۵- ب نشان داده می شود. این مدار شامل باتری های خشک تامین جریان برای روشنایی لامپ، یک مقاومت متغیر R برای تنظیم جریان رشته، و یک پتانسیومتر عقربه دار، به همراه باتری استاندارد و گالوانومتر، برای اندازه گیری دقیق جریان رشته است. این جریان به طور دستی با چرخاندن دگمه R_1 تا آنجائی که رنگ رشته منطبق بر روشنی تصویر جسم مورد نظاره باشد و بنظر رسد که رشته ناپدید می شود، تنظیم می شود (شکل ۸۵- پ)، سپس تنظیم دقیق با چرخاندن دگمه P_1 تا اینکه گالوانومتر صفر را بخواند بدست می آید. مقیاسی به اتصال P گالوانومتر نصب می شود تا مستقیماً دما را نشان دهد [۱۰].



شکل ۸۵: پیرومتر نوری با رشته ناپدید شونده (الف) تلسکوپ، (ب) نمودار مقدار، (پ) نمایش رشته [۱۰].

محدوده دمای اندازه گیری پیرومتر نوری فوق از 760°C (1400°F) تا نزدیکی 1315°C (2400°F) است. وجود حد بالایی برای اندازه گیری دما بعلت خطر خراب شدن رشته در دماهای بالاتر و همچنین بعلت اثر خیره کننده روشنی دماهای بالاتر روی چشم است. محدوده دما را می توان با استفاده از یک پرده جاذب که مابین عدسی شیئی و رشته نصب می شود به طرف دماهای بالاتر گسترش داد. در این صورت انطباق های روشنی در دماهای پایین رشته تامین می شود و پیرومتر را می توان با استفاده از دماهای پایین رشته برای محدوده دمای بالا مدرج کرد. بنابراین با



استفاده از پرده‌های جاذب مختلف حد بالای پیرومتر نوری می‌توان تا 5500°C (10000°F) یا بالاتر توسعه داد.

برخی از مزایای پیرومترهای نوری و تشعشعی عبارتند از [۱۰]:

- ۱- اندازه‌گیری دماهای بالا
- ۲- اندازه‌گیری دمای اجسام غیرقابل دسترس
- ۳- اندازه‌گیری دمای اجسام متحرک و یا کوچک
- ۴- هیچکدام از قطعات دستگاه در معرض اثرات مخرب حرارت قرار نمی‌گیرند.

معایب عمده آنها عبارتند از:

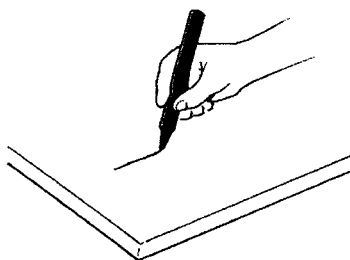
- ۱- خطاهای ناشی از انطباق نورسنجی که ناشی از قضاوت‌های مختلف افراد است
- ۲- خطاهای ناشی از دود یا گازهای موجود مابین ناظر و منبع
- ۳- عدم قطعیت از مقدار انحراف از شرایط جسم سیاه.

۱۲- اندازه‌گیری دما در کارگاه جوشکاری

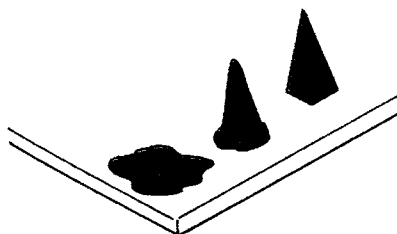
وقتی انواع خاصی از صابون روی سطح ماده‌ای داغ مالیده شود، در دماهای معینی تغییر رنگ می‌دهد. رنگ‌ها یا قلم‌های شاخص دما بر همین اساس ساخته شده‌اند و می‌توان برای اندازه‌گیری دقیق دما، با دقت یک درجه و تا دمای 1370°C از آنها استفاده کرد (شکل ۸۶).

استفاده از مخروط‌های زیگر یکی از روش‌های کارگاهی اندازه‌گیری دماست. این مخروط‌ها از مخلوط گل رس و اکسیدهای مختلف ساخته می‌شود. این مخروط‌ها را طوری می‌سازند که هر یک از آنها در دمای خاصی ذوب شود. از این مخروط‌ها باید در بالاتر از 600°C استفاده کرد. وقتی برای تعیین دمای پیشگرم از مخروط زیگر استفاده می‌شود بهتر است سه مخروط به کار برده شود:

یک مخروط که در دمایی کمتر از دمای مورد نظر ذوب می‌شود، یک مخروط که در دمای مورد نظر ذوب می‌شود و یک مخروط که درست بالای دمای مورد نظر ذوب می‌شود. بدین ترتیب وقتی اولین مخروط ذوب می‌شود، قطعه به دمای مورد نظر نزدیک می‌شود و به محض آن که مخروط دوم شروع به خم شدن کرد می‌توان برای جوشکاری آماده شد. دما را باید در حدی نگه داشت که مخروط سوم ذوب نشود (شکل ۸۷).



شکل ۸۶: قلم شاخص دما



شکل ۸۷: مخروطهای زیگر



مراجع

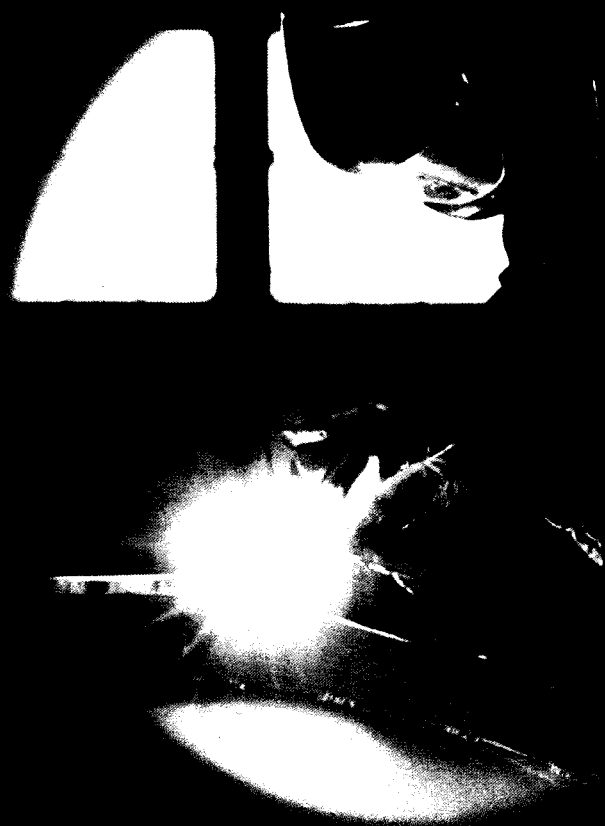
- ۱- محمدحسن جولزاده، "عیوب عملیات حرارتی و پیشگیری و اصلاح آنها" چاپ دوم، ۱۳۷۱.
- ۲- محمدعلی گلغذار "اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها و چدن‌ها"، ویرایش دوم، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی، اصفهان، ۱۳۷۸.
- ۳- Mittelstädt, "Heat treatment of base materials and welded joints" SLV, ۲۰۰۴
- ۴- مهدی طاهری، "اصول عملیات حرارتی فولادها"، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۶۸.
- ۵- پاول م. آنتروایزر، ترجمه منصور طهماسبی، "راهنمای عملیات حرارتی فولادها"، نشر مرکز تحقیقات صنایع سنگین تبریز، ۱۳۶۸.
- ۶- چارل آر. بروکس، ترجمه اردشیر طهماسبی، «عملیات حرارتی، ساختار و خواص آلیاژهای غیر آهنی»، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ۱۳۸۰.
- ۷- R.S.Parmar, "Welding Engineering and Technology", Khanna publishers, India, ۲۰۰۲.
- ۸- مهرداد معینیان، «کلید جوشکاری، جلد دوم»، انتشارات آزاده، چاپ اول، ۱۳۸۲
- ۹- "Heat treatment of base materials and welded joints", SZA
- ۱۰- سیدنی اچ. اونر، ترجمه عبدالوحید فتی و محمد عرفانیان، "آشنایی با متالورژی فیزیکی"، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، چاپ اول، ۱۳۸۱.
- ۱۱- استوارت گیبسون، "جوشکاری عملی"، انتشارات فنی ایران، تهران، چاپ دوم، ۱۳۸۱



پیشنهادهای و انتقادات :



Iranian Welding Research & Engineering



*Heat treatment of base
materials and welded joints*