فصل هشتم

سایر روشهای عملیات حرارتی

روشهای سرد کردن کنترل شده

روش سرد کردن که به منظور سخت کردن یک فولاد استفاده می‌شود به نوع فولاد، شکل قطعه، ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نظر پس از عملیات حرارتی بستگی دارد. به طور کلی سه روش سرد کردن برای سخت کردن فولادها وجود دارد که عبارت‌انـد از

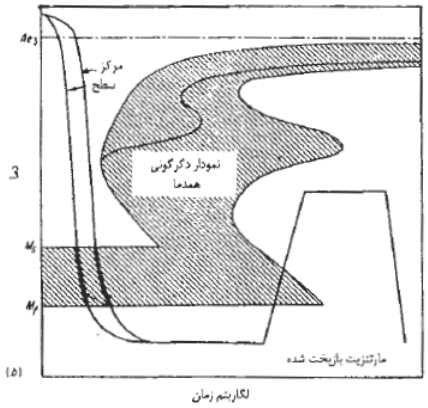
۱) سـریع سـرد کـردن مستقیم،

۲) مارتمپرینگ[1]

۳) آستمپرینگ[2]

همان گونه که در بخشهای پیش به طور مفصل بحث شد، در روش اول که مستلزم سریع سرد شدن فولاد از دمای آستنیته شدن تا زیر دمای M_f است (شکل ۹-۱۲)، سطح و مرکز قطعه با آهنگهای متفاوت سرد شده و بنابراین تشکیل مارتنزیت به طور همزمان در نواحی فوق انجام نمی‌شود.

این پدیده منجر به ایجاد تنشهای داخلی در قطعه شده و نهایتاً می‌تواند قطعه را شکسته و یا تغییر شکل دهد. تحت شرایط خاص، می‌توان از روشهای دوم و سوم به جای روش اول استفاده کرد و در نتیجه از اثرات زیان‌آور تنشهای داخلی جلوگیری نمود.



شکل ۹-۱۲ شمایی از عملیات حرارتی سریع سرد کردن یک مرحله‌ای (سریع سرد کردن مستقیم) منطبق بر نمودار TTT فولاد با کربن متوسط [رسم مجدد با استفاده از مرجع ۱].

3

الف : مارتمپرینگ

عملیات حرارتی مارتمپرینگ یا سریع سرد کردن ناپیوسته[1] که آن را مارکوئنچینگ[2] نیز می‌نامند شامل مراحل زیر است:

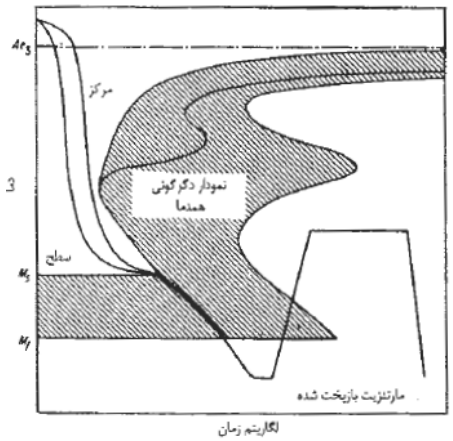
۱- آستنیته کردن فولاد

۲- سریع سرد کردن فولاد در روغن داغ و یا نمک مذاب تا دمایی درست بالاتر (و یا درست پایینتر) از دمای شروع تشکیل مارتنزیت (M_s). سریع سرد کردن در این مرحله باید به نحوی انجام گیرد که از تجزیه آستنیت در دماهای بالا جلوگیری شود.

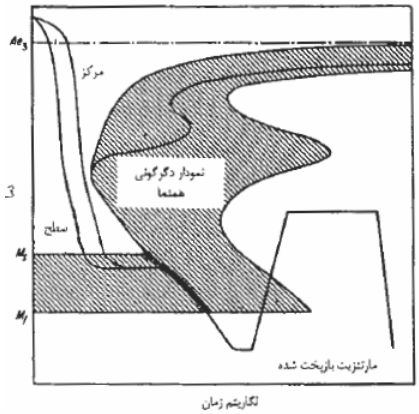
۳- نگه داشتن در محیط یاد شده تا اینکه دمای قطعه در تمام قسمتهای آن یکنواخت شود. زمان نگهداری در این دما بستگی به موقعیت نمودار TTT و ضخامت قطعه دارد. این زمان معمولاً بین ۲ تا ۴ دقیقه برای هر ۱۰ میلیمتر ضخامت است. زمان کمتر برای حالتی است که فولاد در دماهای پایین آستنیته شود، در حالی که زمان بیشتر برای مواردی است که فولاد در دماهای بالا آستنیته شده باشد.

۴- سرد کردن با آهنگی متوسط (معمولاً در هوا) به نحوی که سطح و مرکز تقریباً همزمان سرد شده و به مارتنزیت تبدیل شوند.

۵- بازپخت دادن قطعه به منظور افزایش چقرمگی.



شکل ۹-۱۳ شمایی از عملیات حرارتی مارتمپرینگ همراه با نمودار TTT برای یک فولاد با کربن متوسط 5



شکل ۹-۱۴ شمایی از عملیات حرارتی مارتمپرینگ اصلاح شده همراه با نمودار TTT برای یک فولاد با کربن متوسط [رسم مجدد با استفاده از مرجع ۱].

روش دوم (شکل ۹-۱۴) اصطلاحاً به مارتمپرینگ اصلاح شده[۳] موسوم است.

همان گونه که از شکلهای ۹-۱۳ و ۹-۱۴ مشخص است، در مرحلهٔ اول سرد شدن سطح و مرکز نمونه با دو آهنگ متفاوت سرد می‌شوند، در حالی که در ضمن دگرگونی آستنیت به مارتنزیت تمام قسمتهای قطعه تقریباً به طور همزمان سرد شده و بنابراین دگرگونی در سطح و مرکز همزمان انجام می‌شوند. از این رو احتمال ترک برداشتن، اعوجاج و ایجاد تنش در قطعه به حداقل ممکن کاهش می‌یابد.

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

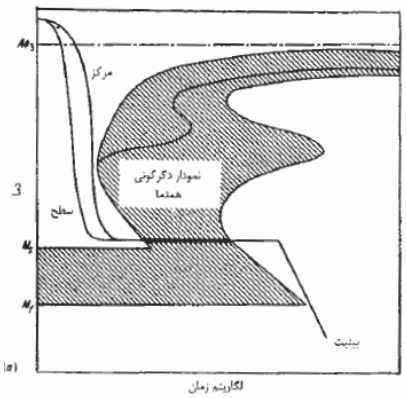
نوع عملیات حرارتی	سختی HRC	مقاومت به ضربه fb-lb	ازدیاد طول درصد
سرد کردن در آب و بازپخت	۵۳	۱۲	۰
مارتمپر و بازپخت	۵۳	۲۸	۰

ب : آستمپرینگ

آستمپرینگ از جمله روشهای دیگر عملیات حرارتی است که به منظور کاهش تنشهای حاصل در ضمن سخت کردن فولادهای کربنی ساده (پرکربن) جانشین سریع سرد کردن مستقیم می‌شود. آستمپرینگ شامل مراحل زیر است:

۱- آستنیته کردن فولاد
۲- سریع سرد کردن در حمام نمک مذاب یا روغن داغ تا دمایی بلافاصله قبل از دمای شروع تشکیل مارتنزیت (M_s).
۳- نگه داشتن در این دما به نحوی که دگرگونی آستنیت به بینیت به طور کامل انجام گیرد. زمان نگهداری در این دما با توجه به موقعیت نمودار IT مشخص می‌شود.
۴- سرد کردن در هوا تا دمای اتاق

همان گونه که از شکل ۹-۱۶ مشخص است در این روش نیز سطح و مرکز نمونه در مرحلهٔ اول سریع سرد شدن (قبل از M_s) با آهنگهای متفاوت سرد می‌شوند. اما از آنجایی که قبل از شروع دگرگونی آستنیت به بینیت دماهای نقاط مختلف قطعه یکسان خواهند شد، دگرگونی در نقاط مختلف تقریباً همزمان انجام شده و بنابراین تنشهای داخلی به حداقل ممکن کاهش می‌یابند.



شکل ۹-۱۶ شمایی از عملیات حرارتی آستمپرینگ فولاد با کربن متوسط همراه با نمودار TTT [۱].

هدف از به کارگیری آستمپرینگ به جای سریع سرد کردن و بازپخت عبارت است از: ۱) افزایش استحکام ضربه (چقرمگی) و انعطاف پذیری برای یک سختی مشخص و ثابت، ۲) حذف و یا کاهش احتمال ترک برداشتن، تغییر شکل دادن و یا ایجاد تنشهای داخلی در ضمن عملیات حرارتی. برای عملیات حرارتی مقاطع نازک فولادهای کربنی ساده تحت شرایطی که سختی در حدود ۵۰ راکول‌سی کافی بوده و استحکام ضربه و انعطاف پذیری بسیار خوبی مورد نیاز باشد، آستمپرینگ بهترین روش عملیات حرارتی است.

جدول ۹-۵ مقایسه خواص مکانیکی فولاد ۱۰۹۵ که به روشهای آستمپرینگ و سریع سرد کردن یک مرحله‌ای (مستقیم) عملیات حرارتی شده باشد [۱۳].

نوع عملیات حرارتی	سختی HRC	مقاومت به ضربه ft-lb	ازدیاد طول در ۱ اینچ (٪)
آستمپر شده	۵۲	۴۵	۱۱
سرد شده در آب و بازپخت شده	۵۳	۱۲	۰

همانند روش مارتمپرینگ در اینجا نیز فولادهایی مناسب برای آستمپرینگ‌اند که از سختی‌پذیری نسبتاً خوبی برخوردار باشند. به نحوی که در ضمن سرد شدن در حمام نمک مذاب و یا روغن داغ در دماهای بالا پرلیت تشکیل نشود.

در رابطه با آستمپرکردن فولادهای
کربنی ساده (کم‌کربن) که از سختی پذیری نسبتاً کمی برخوردار بوده و بنابراین زمان لازم برای شروع دگرگونی در حوالی دماغه منحنی IT نسبتاً کم است، باید توجه داشت که فقط مقاطع نسبتاً نازک (در حدّود حداکثر ۵ میلیمتر) را می‌توان با استفاده از این روش عملیات حرارتی کرد.

در حالی که مقاطع نسبتاً ضخیم از فولادهای آلیاژی که سختی پذیری نسبتاً خوبی داشته باشند را می‌توان آستمپر نمود. لیکن، اگر سختی پذیری بسیار زیاد باشد، زمان لازم برای دگرگونی آستنیت به بینیت نیز زیاد می‌شود که در این صورت عملاً آستمپر کردن فولاد روش بسیار طولانی بوده و لذا اقتصادی نیست.

سخت کردن سطحی

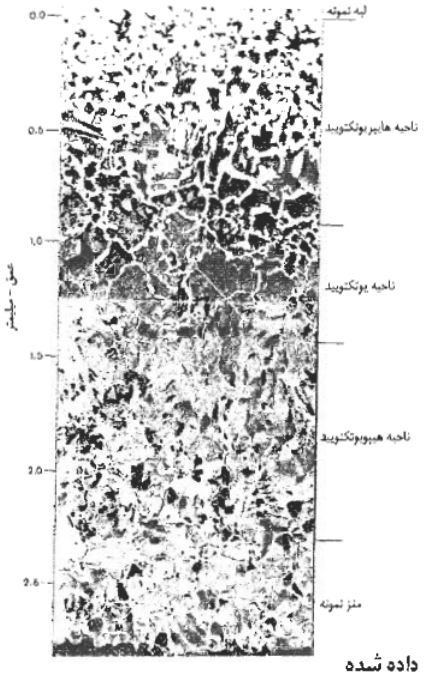
در بسیاری از کاربردهای صنعتی نیاز به قطعاتی است که دارای سطحی سخت بوده و در عین حال از چقرمگی یا مقاومت به ضربه خوبی نیز برخوردار باشند. از جمله مواردی که می‌توان در این رابطه به عنوان مثال به آنها اشاره کرد عبارت‌اند از: میل‌لنگ، میل بادامک، چرخ دنده و قطعات مشابه.این قطعات باید سطحی بسیار سخت و مقاوم در برابر سایش داشته و همچنین بسیار چقرمه و مقاوم در برابر ضربه‌های وارده درحین کار باشند.

بسیاری از قطعات فولادی را می‌توان به نحوی عملیات حرارتی کرد که در پایان دارای مجموعهٔ خواص بالا 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[1] موسوم‌اند، آخرین عملیاتی‌اند که باید در مرحلهٔ پایانی ساخت قطعه و پس از انجام تمام مراحل مربوط به شکل‌دهی نظیر ماشینکاری و غیره انجام شود.

روشهای مختلف عملیات حرارتی که به کمک آنها می‌توان سطح قطعات را سخت کرد، عمدتاً به دو دسته تقسیم می‌شوند. دستهٔ اول عملیاتی که منجر به تغییر ترکیب شیمیایی سطح فولاد می‌شوند و به عملیات حرارتی - شیمیایی[2] یا عملیات ترموشیمی موسوم‌اند، نظیر کربن‌دهی[3]، نیتروژن‌دهی[4]، و کربن‌نیتروژن‌دهی[5]. دستهٔ دوم روشهایی که بدون تغییر ترکیب شیمیایی سطح و فقط به کمک عملیات حرارتی که در لایه سطحی متمرکز شده و باعث سخت شدن سطح می‌شوند و به عملیات حرارتی موضعی[6] موسوم‌اند، مانند سخت کردن شعله‌ای[1] و سخت کردن القایی[2].

کربن‌دهی

هنگامی که یک قطعه فولاد کم‌کربن (مثلاً ۰/۱۵ درصد) در مواد کربن‌ده مانند ذغال قرار گرفته و در دمایی بالا نظیر ۹۲۵ درجهٔ سانتیگراد (۱۷۰۰ درجهٔ فارنهایت) حرارت داده شود کربن اتمی از ماده کربن‌ده آزاد شده و به داخل سطح قطعه نفوذ می‌کند. گرچه این عملیات نیاز به زمان دارد ولی در مدت چند ساعت سطح قطعه می‌تواند مقدار قابل ملاحظه‌ای کربن (تا ۱/۲ درصد) جذب کند. به این ترتیب قطعه‌ای ساخته می‌شود که مغز آن را فولاد کم‌کربن و سطح آن را فولاد پرکربن تشکیل می‌دهد.



شکل ۱۰-۱ میکروساختار تعادلی سرد شدهٔ لایه کربن داده شده

کربن‌دهی پودری (جامد)

در این روش قطعات مورد نظر همراه با مواد کربن‌ده که اغلب ذغال چوب و یک ماده انرژی‌زا (جدول ۱۰-۲) است را در یک جعبه فولادی که از جنس فولاد نسوز (٪۲۰Ni-٪۲۵Cr) است، به نحوی بسته‌بندی می‌کنند که فاصله بین قطعات در حدود ۵۰ میلیمتر باشد. سپس در جعبه را به نحوی می‌بندند که هیچ گونه تبادل هوا با خارج نداشته باشد. برای این منظور می‌توان از آزبست استفاده کرد. این جعبه را تا دمای کربن‌دهی که اغلب بین ۸۷۵ تا ۹۲۵ درجهٔ سانتیگراد است حرارت داده و برای مدت زمان مشخصی در این دما نگه می‌دارند. زمان نگهداری در دمای کربن‌دهی بستگی به ضخامت لایهٔ سطحی مورد نیاز دارد.

جدول ۱۰-۲ ترکیب مخلوط مواد کربن‌ده پودری (جامد) برحسب درصد وزنی [۱].

شماره مخلوط	ذغال چوب	کربنات باریم $BaCO_3$	کربنات کلسیم $CaCO_3$	سودخشک NaOH	کک	کربنات سدیم Na_2CO_3
۱	۸۷	–	۳	۱۰	–	–
۲	۹۰-۸۵	–	–	۱۵-۱۰	–	–
۳	۹۰	۱۰	–	–	–	–
۴	۶۰	۴۰	–	–	–	–
۵	۴۵	۱۲	–	–	۴۳	–
۶	۵۵	۱۲-۱۰	–	–	۳۰	۵-۳

نقش مواد انرژی‌زا افزایش نرخ کربن‌دهی است.

گرچه در این روش قطعه کار در مخلوط پودری از مواد کربن‌ده حرارت داده می‌شود ولی عامل اصلی تولید کنندهٔ کربن، گاز منواکسید کربن (CO) است که کربن اتمی را به سطح قطعه حمل می‌کند. گاز منواکسید کربن براساس واکنش (۱۰-۳) که بین اکسیژن محبوس شده در جعبه و مواد کربن‌ده (ذغال) انجام می‌گیرد تولید می‌شود.

$$2C_{(\text{ذغال})} + O_2 \longrightarrow 2CO$$

سپس در سطح فولاد، گاز منواکسید کربن تجزیه شده و تولید کربن اتمی می‌کند.

$$2CO \xrightarrow{Fe} CO_2 + C_{(atm)} \qquad (۴-۱۰)$$

کربن اتمی آزاد شده در سطح فولاد که تا ناحیهٔ حرارتی آستنیت گرم شده است به صورت بین‌نشینی در فولاد حل می‌شود.

اگر نیاز باشد که قسمتهایی از سطح قطعه کربن داده نشوند، این نواحی را می‌توان توسط یک لایه مسی به ضخامت ۰/۱ تا ۰/۷۵ میلیمتر پوشش داد. از آنجایی که در دمای کربن‌دهی، کربن در مس نامحلول است در نواحی پوشش داده شده کربن جذب نمی‌شود.

پس از اینکه عملیات کربن‌دهی پایان یافت، برحسب ساختار و خواص مکانیکی مورد نظر قطعات کربن داده شده را می‌توان در آب و یا روغن سریع سرد کرده و یا اینکه تا دمای اتاق در جعبه و یا در هوا سرد نمود.

معمولاً قطعات فولادی را پس از کربن‌دهی مستقیماً (به ویژه در آب) سریع سرد نمی‌کنند، زیرا امکان شکسته شدن آنها در ضمن سریع سرد شدن، و / یا عدم دستیابی به سختی مورد نیاز زیاد است. علت این امر عبارت‌اند از:

۱- از آنجایی که دمای کربن‌دهی نسبتاً بالاست (در حدود ۹۰۰ درجهٔ سانتیگراد)، گسترهٔ دمایی که قطعه در ضمن سریع سرد شدن از آن عبور می‌کند زیاد است و در نتیجه تنشهای ایجاد شده در قطعه (به ویژه تنشهای حرارتی) زیاد خواهند بود.
۲- از آنجایی که قطعه برای مدت زمان نسبتاً طولانی در دمای بالایی بوده است، دانه‌ها نسبتاً درشت شده و در نتیجه احتمال ترد و شکننده شدن فولاد وجود دارد.
۳- سریع سرد شدن مستقیم از دمای کربن‌دهی باعث می‌شود که ساختار نهایی لایه کربن داده شده شامل مقدار زیادی آستنیت باقیمانده باشد، در نتیجه سختی سطح در حد مورد نظر افزایش نمی‌یابد.

به منظور جلوگیری از به وجود آمدن معایب بالا در قطعات کربن داده شده، مناسبترین روش عبارت‌اند از سرد کردن فولاد از دمای کربن‌دهی در هوا و یا در جعبهٔ سمانتاسیون و سپس انجام یکی از فرایندهای عملیات حرارتی زیر:

۱- حرارت دادن قطعه کربن داده شده تا دمای سخت کردن مناسب، نگه داشتن برای مدت زمان مشخص و سپس سریع سرد کردن در آب و یا روغن. اغلب روغن محیط مناسبتری برای این منظور است.
۲- این روش شامل دو مرحله حرارت دادن و سرد کردن به صورت زیر است:
در *مرحلهٔ اول*، فولاد کربن داده شده را در دمایی در حدود ۸۵۰ درجهٔ سانتیگراد آستنیته کرده و سپس در هوا سرد می‌کنند. این عملیات به منظور ریز کردن دانه‌های مغز قطعه است.
در مرحلهٔ دوم، قطعه را دوباره حرارت داده و در دمایی در حدود ۷۶۰ درجهٔ سانتیگراد آستنیته می‌کنند. سپس نمونه را در روغن سریع سرد می‌کنند. هدف از این مرحله ریز کردن دانه‌های لایه سطحی کربن داده شده و سخت کردن همزمان آن است.

کربن‌دهی مایع

کربن‌دهی مایع در مذاب مخلوط نمکهای سیانیدسدیم (۲۰ تا ۵۰ درصد)، کربنات سدیم (۴۰ درصد) و مقادیر متنابهی از کلرید سدیم و یا کلرید باریم انجام می‌شود. این مخلوط غنی از

سیانید را در بوته‌هایی با پوشش شیمیایی آلومینیم (آلومینیم کاری[1] شده) ذوب کرده و در دمایی بین ۸۷۰ تا ۹۵۰ درجهٔ سانتیگراد نگه می‌دارند. قطعات مورد نظر برای کربن‌دهی را در سبدهای فلزی ریخته و یا توسط سیمهای فلزی به طور معلق در مذاب فوق برای مدت زمانی در حدود ۵ دقیقه تا یک ساعت نگه می‌دارند. زمان کربن‌دهی بستگی به عمق نفوذ مورد نظر دارد.

پس از پایان عملیات، سبد حاوی قطعات کربن داده شده را در آب و یا روغن فرو می‌برند. کربن‌دهی مایع را معمولاً برای قطعات کوچک که نیاز به ضخامت لایهٔ سطحی کمی داشته باشند، به کار می‌برند. از آنجایی که ظرفیت حرارتی نمک مذاب بالا بوده و انتقال حرارت از مایع به قطعه سریع است، این روش نسبت به کربن‌دهی پودری سریعتر و اقتصادیتر است.

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

کربن‌دهی گازی

کربن‌دهی گازی که نسبت به روشهای پودری و مایع از قدمت کمتری برخوردار است، به عنوان اقتصادیترین و سریعترین روش کربن‌دهی برای تولید انبوه شناخته شده است. تحت شرایطی که ضخامت لایهٔ سطحی کربن داده شدهٔ نسبتاً کمی مورد نظر باشد، این مزیت بسیار حائز اهمیت است. به علاوه در این روش کربن سطح را بسیار دقیقتر و ساده‌تر از روشهای دیگر می‌توان کنترل کرد.

در کربن‌دهی گازی قطعات کار را در ۹۰۰ درجهٔ سانتیگراد برای مدت ۳ تا ۴ ساعت در محیطی که شامل گاز یا گازهایی باشد که بتواند در سطح فولاد تجزیه شده و تولید کربن اتمی کند حرارت می‌دهند. این محیط معمولاً از هیدروکربنها نظیر متان (گاز طبیعی)، اتان (CH_4) و یا پروپان (C_3H_8) تشکیل شده است که به طور جزیی در کوره سوخته شده و یا اینکه با یک گاز رقیق‌کننده موسوم به گاز حامل[1] مخلوط شده باشد.

نیتروژن‌دهی

نیتروژن‌دهی عبارت از وارد کردن نیتروژن اتمی در لایه سطحی فولاد است. بنابراین سختی سطح در این روش بستگی به نیترید فلزی تشکیل شده دارد. در حالی که امکان نیتروژن‌دهی برای بسیاری از فولادها وجود دارد، تنها هنگامی می‌توان سختی زیاد در سطح به‌دست آورد که قطعه مورد نظر از جنس فولادهای آلیاژی مخصوص، شامل عناصر آلیاژی نظیر آلومینیم، کرم، مولیبدن و یا وانادیم باشد. این عناصر در سطح قطعه به محض تماس پیدا کردن با نیتروژن اتمی با آن ترکیب شده و تشکیل نیتریدهای پایدار و سخت می‌دهند.

با توجه به انچه گفته شد، تفاوت بین عملیات کربن‌دهی و نیتروژن‌دهی مشخص می‌شود. در حالی که کربن‌دهی باید در گسترهٔ دمایی پایداری آستنیت (۸۷۵ تا ۹۲۵ درجهٔ سانتیگراد) انجام شود، نیتروژن‌دهی را می‌توان در گسترهٔ دمایی پایداری فریت (۵۵۰ تا ۶۵۰ درجهٔ سانتیگراد) انجام داد. به علاوه، پس از نیتروژن‌دهی نیازی به سریع سرد کردن قطعه نیست. معمولاً قطعات نیتروژن داده شده را پس از پایان عملیات و از دمای نیتروژن‌دهی در هوا سرد می‌کنند.

کربن - نیتروژن‌دهی

کربن - نیتروژن‌دهی 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 کربن داده شده را بیشتر افزایش می‌دهد. گرچه در کربن‌دهی مایع نیز تقریباً همین عمل انجام می‌شود ولی واژه کربن - نیتروژن‌دهی معمولاً به سخت کردن سطحی که در آن از محیط گازی استفاده شود گفته می‌شود.

عملیات کربن - نیتروژن‌دهی معمولاً در گسترهٔ دمایی ۸۰۰ تا ۸۷۵ درجهٔ سانتیگراد و در محیطی از مخلوط منواکسیدکربن و هیدروکربن شامل ۳ تا ۸ درصد آمونیاک انجام می‌شود. درصد کربن و نیتروژن جذب شده توسط فولاد را می‌توان با کنترل دما و غلظت آمونیاک تغییر داد.

نیتروژن - کربن‌دهی

این فرایند که شامل نفوذ همزمان نیتروژن و کربن به داخل فولاد است در گسترهٔ دمایی پایداری فاز فریت (زیر دمای A_1) انجام می‌شود و لذا به نیتروژن - کربن‌دهی فریتی[۲] نیز موسوم است. انجام این فرایند به هر دو صورت گازی و مایع امکانپذیر است. از جمله مزایای مشترک این روشها، تشکیل لایهٔ نازک تکفازی از کاربونیترید اپسیلن و یک ترکیب سه‌تایی از آهن - نیتروژن و کربن تشکیل شده در گسترهٔ دمایی ۴۵۰ تا ۵۹۰ درجهٔ سانتیگراد است.

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 کربن کافی جهت سخت شدن داشته باشد، این عملیات معمولاً بر روی فولادهای کربنی که شامل ۰/۳۵ تا ۰/۵ درصد کربن داشته باشند اعمال می‌شود. همچنین فولادهای کم‌آلیاژ که دارای حداکثر ۱ درصد کرم و در حدود ۰/۲۵ درصد مولیبدن و ۰/۵ درصد نیکل باشند را نیز از این روش سختی سطحی می‌کنند. در این روش تنشهای فشاری حاصل از مارتنزیت شدن لایه سطحی استحکام خستگی قطعه را نیز افزایش می‌دهد.

برای به‌دست آوردن ساختار و خواص مکانیکی مناسب (چقرمگی خوب) در مغز قطعاتی که باید به روش عملیات حرارتی موضعی سخت شوند؛ ابتدا آنها را مارتنزیت کرده و بازپخت می‌دهند و یا نرماله می‌کنند، سپس با حرارت دادن موضعی، سطح قطعات را آستنیته و بلافاصله سریع سرد می‌کنند. بنابراین در حالی که درصد کربن قطعه در تمام نقاط ثابت و در حدود ۰/۴ درصد است، مغز قطعهٔ مارتنزیت بازپخت شده و یا مخلوطی از فریت و پرلیت با چقرمگی خوب بوده و سطح آن از مارتنزیت با سختی نسبتاً بالا تشکیل شده است. سطح و مغز در این قطعات معمولاً توسط یک لایهٔ بینیتی از یکدیگر جدا شده و به این ترتیب احتمال پوسته شدن به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

سخت کردن شعله‌ای

در این روش سطح قطعه به کمک یک شعلهٔ گازی حرارت داده شده و پس از آستنیته شدن بلافاصله سریع سرد می‌شود. شعلهٔ مورد نیاز در این روش را می‌توان از طریق مشعل اکسیژن و

یک گاز قابل احتراق مانند استیلن [۱]، پروپان [۲] و یا گاز طبیعی [۳] تهیه نمود. قطعات کوچک و یا نواحی موضعی مانند لبهٔ ابزارهای برش و یا انتهای آچارها را می‌توان به کمک شعلهٔ دستی حرارت داده و سپس تمام قطعه را در آب سریع سرد کرد. برای سخت کردن قطعات بزرگ و یا سطوح زیاد می‌توان از دستگاههای خودکار که در آنها شعله و یک آب‌فشان تعبیه شده‌اند، استفاده کرد.

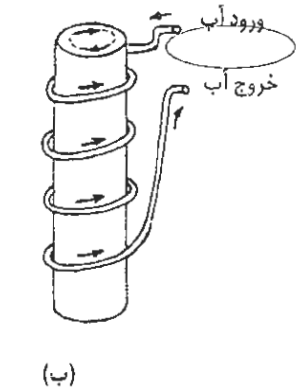
از جمله معایب عمدهٔ سخت کردن شعله‌ای، اکسایش سطح و یا کاهش درصد کربن سطح قطعه است. این امر ناشی از تماس مستقیم قطعه گرم شده با اکسیژن هواست. به علاوه، نوع شعله نیز در این رابطه دخالت دارد. با استفاده از شعله‌های اکسیدکنندهٔ ضعیف و یا احیاکننده، این عیب را تا حدودی می‌توان کاهش داده و یا حتی حذف کرد.

مقدار کربن توصیه شده و مناسب برای فولادهایی که قرار است به روش سخت کردن شعله‌ای سخت شوند، در حدود ۰/۴ تا ۰/۵ درصد است. همچنین فولادهایی 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 شود تا اینکه از شکسته شدن و یا ترک برداشتن احتمالی آنها جلوگیری شود.

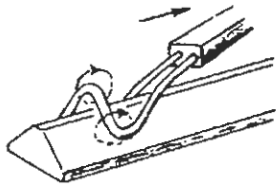
سخت کردن القایی

اصول این روش شبیه به سخت کردن شعله‌ای است.

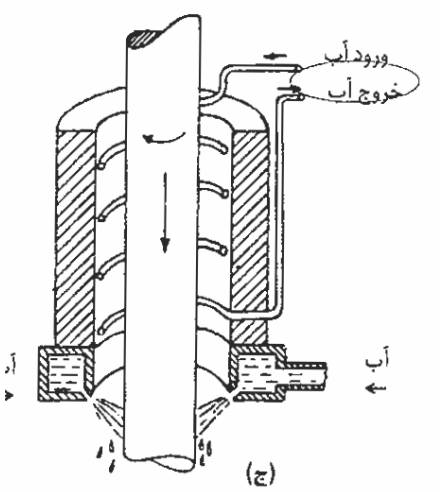
اما در این روش حرارت دادن سطح به کمک یک سیم‌پیچ هادی که از آن جریان متناوب با فرکانس زیاد (در محدود ۲ تا ۵۰ کیلوهرتز[1]) عبور می‌کند انجام می‌شود.



(ب)



(د)



(ج)