

بسمه تعالی



دانشگاه شهید بهشتی
دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی

فصل دهم: سخت کردن سطحی

برگرفته از کتاب مبانی و کاربردهای عملیات حرارتی فولادها و چدن ها
(نوشته دکتر محمد علی گل‌عذار)

دکتر محمود سمیع زاده

m_sameezadeh@sbu.ac.ir

فصل دهم-سخت کردن سطحی

در بسیاری از کاربردهای صنعتی نیاز به قطعاتی است که دارای **سطحی سخت و در عین حال از چقرمگی بالایی** نیز برخوردار باشند.

در این قطعات نیاز به **مقاومت سطحی به سایش و توانایی تحمل ضربه به طور هم زمان** مورد نیاز است. این نوع عملیات حرارتی که در اصطلاح به **سخت کردن سطحی (Case Hardening)** موسوم‌اند، آخرین عملیاتی هستند که باید در **مرحله پایانی ساخت قطعه** و پس از تمام مراحل مربوط به شکل‌دهی انجام شوند.

این روش‌های عملیات حرارتی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

(1) عملیات حرارتی که منجر به **تغییر ترکیب شیمیایی سطح فولاد** می‌شود، عملیات حرارتی-شیمیایی یا عملیات ترموشیمی؛ مثل کربن‌دهی، نیتروژن‌دهی و کربن-نیتروژن‌دهی.

(2) روش‌هایی که **بدون تغییر ترکیب شیمیایی** سطح‌اند و فقط به کمک عملیات حرارتی که در لایه سطحی متمرکز می‌شود، باعث سخت شدن سطح می‌شود و به **عملیات موضعی (Localized heat treatment)** موسوم‌اند، مانند سخت کردن شعله‌ای و سخت کردن القایی.

۱-Case hardening (Surface hardening)

۲-Thermo-chemical treatment

۳-Carburizing

۴-Nitriding

۵-Carbonitriding

۱-Localized heat treatment

۲-Flame hardening

۳-Induction hardening

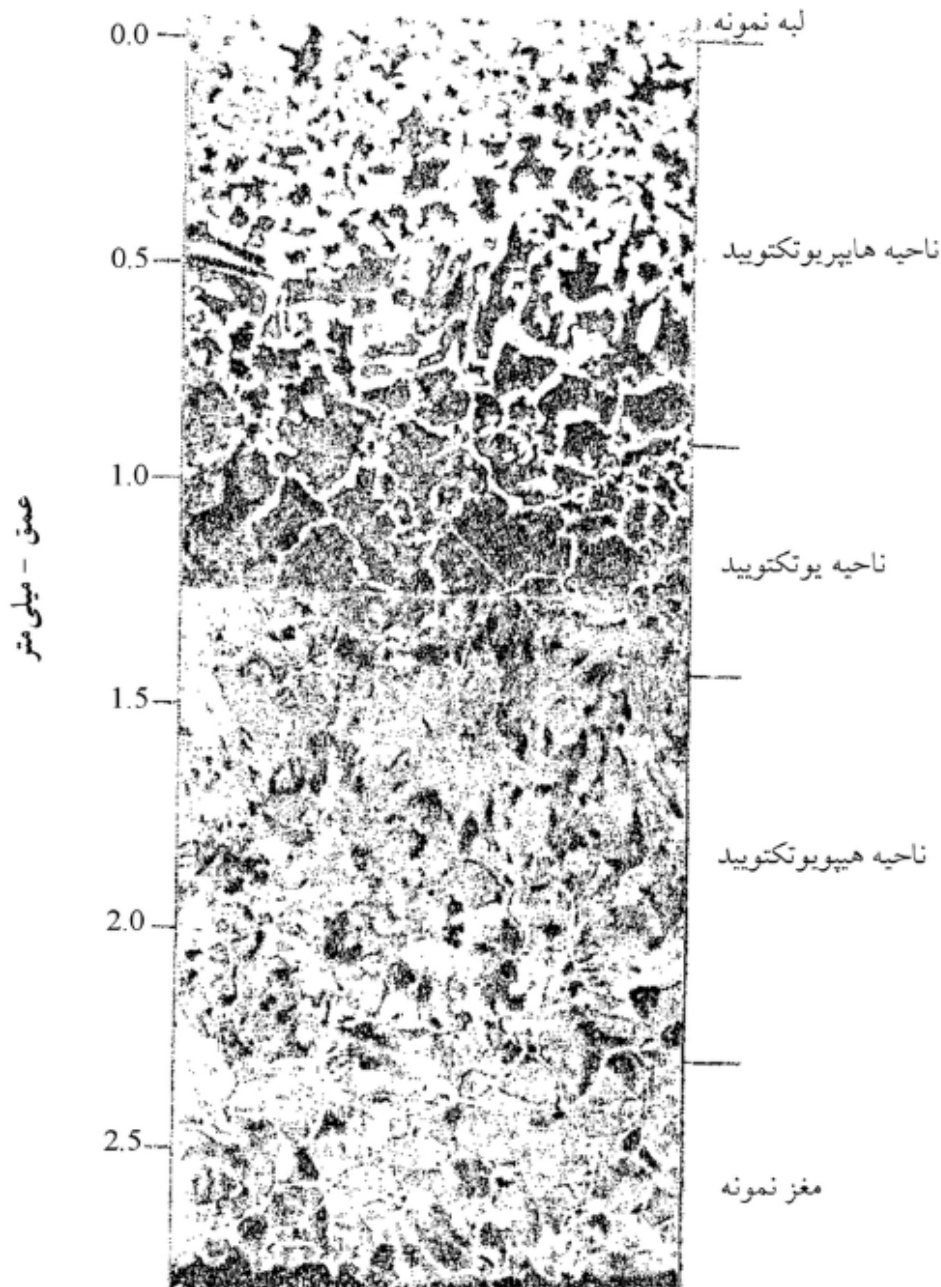
کربن دهی

هنگامی که یک قطعه فولاد کم کربن در مواد [اتمسفر] کربن ده مانند ذغال قرار گرفته و در دمای بالا نظیر ۹۲۵ درجه سلسیوس حرارت داده شود، کربن اتمی از ماده کربن ده آزاد شده و به داخل سطح قطعه نفوذ می کند.

گرچه این عملیات نیاز به زمان دارد ولی در مدت چند ساعت سطح قطعه می تواند مقدار قابل ملاحظه ای جذب می کند.

به این ترتیب مغز قطعه فولاد کم کربن و سطح آن فولاد پرکربن است. اگر این قطعه سخت شود در سطح آن مارتنزیت با سختی بالا و در عمق آن فولاد کم کربن با چقرمگی بالا تشکیل می شود.

ساختار تشکیل شده در شکل ۱-۱۰ از چقرمگی خوبی برخوردار است، زیرا ساختار آن مخلوطی از فریت و پرلیت و یا فریت و مارتنزیت کم کربن است.



شکل ۱-۱۰ ریزساختار تعادلی سردشده مربوط به فولاد کربن داده شده [۴].

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

$$\frac{C_c - C_s}{C_o - C_s} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{Dt}}\right)$$

C_s درصد کربن سطح، C_o درصد کربن اولیه فولاد قبل از کربن دهی،
 C_c درصد کربن در فاصله x از سطح، x فاصله از سطح، t زمان کربن دهی
 و D ضریب نفوذ کربن در آستنیت، می باشد:

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

R ثابت گازها و T دمای کربن دهی بر حسب کلوین است.

جدول ۱-۱۰ مقادیر تابع خطا [۶].

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	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	۰/۹۹۵
۰/۷	۰/۶۷۸	۲/۴	۰/۹۹۹

کربن دهی پودری (جامد)

در این روش قطعه مورد نظر همراه با مواد کربن ده (ذغال چوب و یک ماده انرژی زا) درون یک جعبه از جنس فولاد نسوز (25%Cr-20%Ni) به نحوی که فاصله بین قطعات ۵۰ میلیمتر باشد، قرار داده شده و محفظه با استفاده از موادی مانند آزبست به نحوی که تبادل هوا با محیط بیرون نداشته باشد آب بندی می شود. این جعبه را تا دمای کربن دهی که بیش تر بین ۸۷۵ تا ۹۲۵ درجه سانتی گراد است گرم می کنند و برای مدت زمان مشخصی در این دما نگه می دارند.

جدول ۱۰-۲ ترکیب مخلوط مواد کربن ده پودری (جامد) بر حسب درصد وزنی [۱].

شماره مخلوط	ذغال چوب	باریم کربنات $BaCO_3$	کلسیم کربنات $CaCO_3$	سود خشک $NaOH$	کک	سدیم کربنات Na_2CO_3
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

عامل اصلی تولید کنند کربن اتمی، **گاز مونواکسید کربن** است که کربن اتمی را تولید و به سطح قطعه حمل می کند.



واکنش در سطح ذغال:



واکنش در سطح فولاد:

نقش مواد انرژی زا افزایش نرخ کربن دهی می یابد.



این واکنش برگشت پذیر است و هرچه دمای عملیات افزایش یابد، در فشار ثابت، درصد مونواکسید کربن حاصل افزایش خواهد یافت.

در صورتی که نیاز باشد قسمتی از سطح، کربن داده نشود با لایه ای از مس به ضخامت ۰.۱ تا ۰.۷۵ میلیمتر یا باخمیری از گل رس و ازبست پوشانده می شود.

قطعه‌های فولادی را پس از کربن‌دهی سریع سرد نمی‌کنند، زیرا امکان شکسته شدن آن‌ها و یا عدم دستیابی به سختی مورد نظر زیاد است.

✓ به دلیل دمای نسبتاً بالای کربن‌دهی بازه دمایی که قطعه حین سرد شدن از آن عبور می‌کند زیاد است، پس تنش‌های ایجاد شده در قطعه زیاد خواهند بود.

✓ به دلیل زمان زیاد نگهداری قطعه در دمای بالا، دانه‌ها درشت بوده و احتمال ترد و شکننده بودن فولاد وجود دارد.

✓ سریع سرد شدن از دمای کربن‌دهی موجب ساختار نهایی لایه کربن داده شده شامل آستنیت باقی‌مانده می‌شود، که سختی سطح در حد مورد نظر افزایش نمی‌یابد.

برای جلوگیری از این عیوب، مناسب‌ترین روش سرد کردن فولاد از دمای کربن‌دهی در هوا یا جعبه سمنتاسیون و سپس انجام یکی از فرآیندهای زیر است:

➤ گرم کردن قطعه تا دمای سخت کردن مناسب ➡ نگهداشتن ➡ سریع سرد کردن در آب یا روغن.
➤ گرم کردن و یا سرد کردن در دو مرحله:

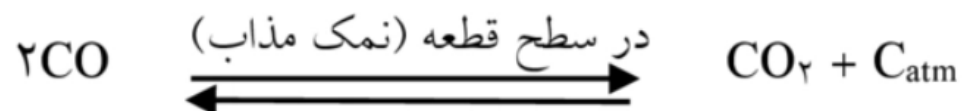
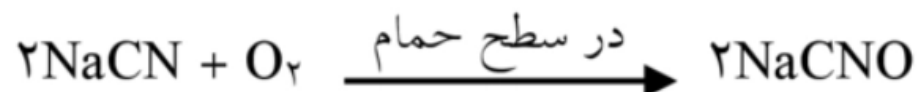
۱. آستنیت‌کردن در دمای ۸۵۰ درجه ➡ سرد کردن در هوا (ریز کردن دانه‌های مغزی قطعه).

۲. آستنیت‌کردن در دمای ۷۶۰ درجه ➡ سرد کردن در روغن (ریز کردن دانه‌های لایه سطحی کربن داده شده و همزمان سخت کردن آن).

از فولادهای ساده کربنی که حدود ۰/۲ درصد کربن دارند برای کربن‌دهی استفاده می‌شود.

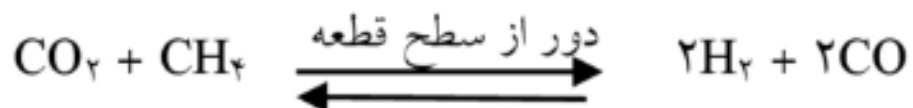
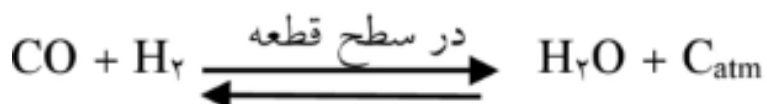
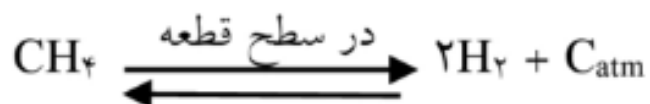
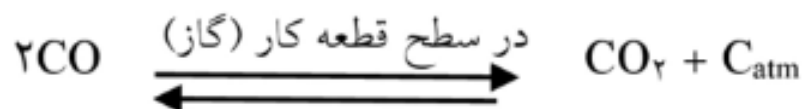
کربن دهی مایع

کربن دهی مایع در مذاب مخلوط نمک‌های سیانید سدیم، کربنات سدیم و مقادیر متنابهی از کلرید سدیم و کلرید باریم انجام می‌گیرد. این مخلوط که **بسیار سمی** است را در بوتله‌هایی با پوشش آلومینیم ذوب کرده و قطعات را در سبدهایی قرار داده یا به صورت آویخته از سیم‌های فلزی درون مواد مذاب برای زمانی در حدود ۵ دقیقه تا یک ساعت قرار می‌دهند. به دلیل بالا بودن ظرفیت حرارتی نمک و بالا بودن انتقال حرارت از مایع به قطعه **این روش نسبت به روش قبلی سریع‌تر و اقتصادی‌تر است.** از این روش برای قطعه‌های کوچک که نیاز به ضخامت لایه سطحی کمی دارند استفاده می‌شود.

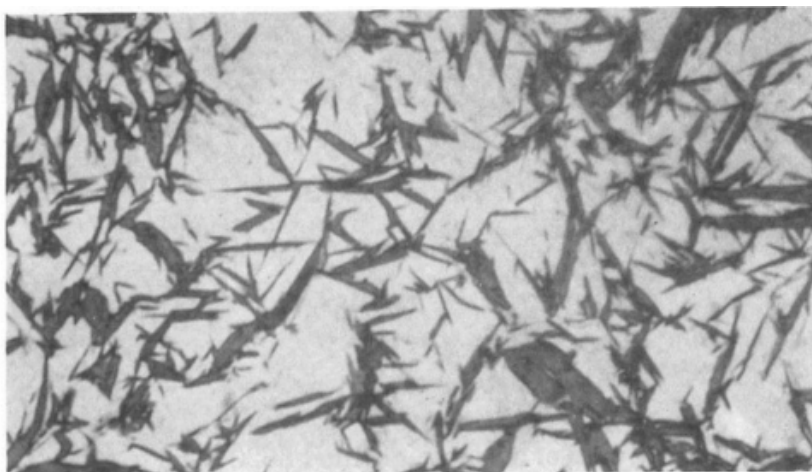


کربن دهی گازی

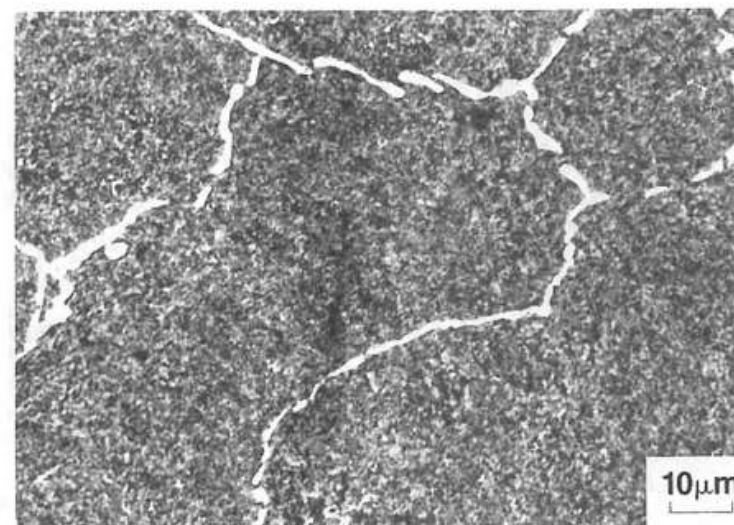
این روش جدیدترین، اقتصادی ترین و سریع ترین روش برای تولید انبوه است. همچنین کنترل کربن سطح در آن آسان تر و دقیق تر صورت می گیرد. در این روش قطعه ها را در دمای ۹۰۰ درجه برای ۳ تا ۴ ساعت در محیطی که شامل گازهایی باشد که بتوانند در سطح فولاد تجزیه شوند و تولید کربن اتمی کنند، حرارت می دهند. این محیط معمولاً از هیدروکربن هایی نظیر متان، اتان و پروپان تشکیل شده که به طور جزئی در کوره سوخته و یا با یک گاز رقیق کننده موسوم به گاز حامل (نیتروژن، هیدروژن، منو اکسید کربن و ...) مخلوط شده باشد.



از جمله نکات مهم در کربن‌دهی **توجه به درصد کربن سطح قطعه است**. بالا بودن درصد کربن باعث تشکیل **آستنیت باقی‌مانده و یا سمنتیت در مرزدانه‌ها** می‌شود. هرچه درصد کربن در لایه کربن‌داده و سریع سرد شده بیش‌تر باشد، مقدار آستنیت باقی‌مانده نیز بیش‌تر است. با افزایش درصد کربن به بیش از ۰/۸ درصد، سمنتیت پرویوکتوئید افزایش می‌یابد و در مرزدانه‌های آستنیت پیوسته‌تر تشکیل می‌شود. درصد زیاد کربن در سطح می‌تواند به دلیل زمان کوتاه نفوذ پس از رسیدن به حالت اشباع و یا ناشی از هندسه خاص قطعه باشد. این اثرات را می‌توان با انجام عملیات حرارتی بعد از کربن‌دهی حذف کرد.



شکل ۱۰-۳ آستنیت باقیمانده (نواحی سفیدرنگ) همراه با تیغه‌های مارتنزیت (نواحی سیاه‌رنگ) در ناحیه کربن‌داده‌شده فولاد ۸۶۲۰. این نمونه در ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد (۱۹۲۰ درجه فارنهایت) کربن‌داده شده است و سپس تا ۸۴۵ درجه سانتی‌گراد (۱۵۵۰ درجه فارنهایت) به‌آهستگی و سپس در روغن سریع سرد شده است [۱].



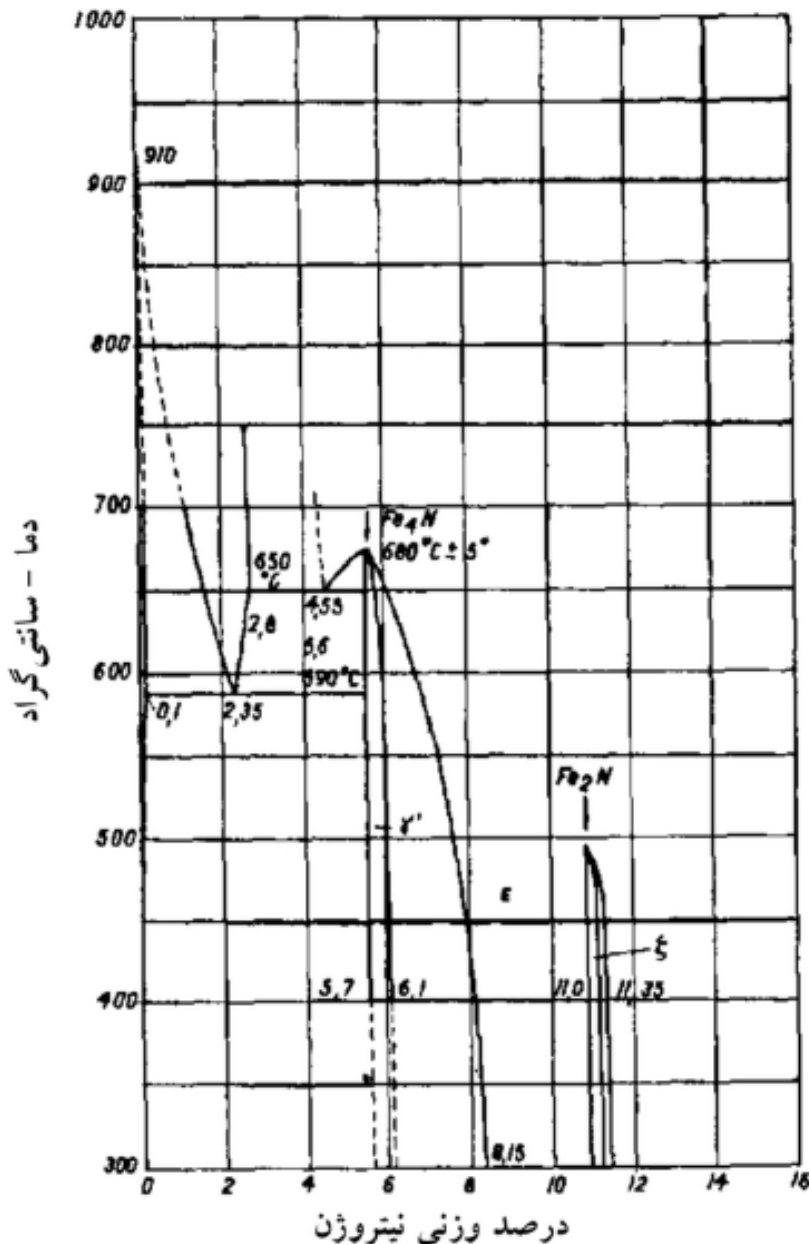
شکل ۱۰-۴ شبکه پیوسته سمنتیت در مرز دانه‌های آستنیت در ناحیه کربن‌داده‌شده فولاد EX۲۴. این نمونه پس از کربن‌دهی در ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد (۱۹۲۰ درجه فارنهایت) در روغن سریع سرد شده و سپس در ۸۴۵ درجه سانتی‌گراد (۱۵۵۰ درجه فارنهایت) بازگشت داده شده است [۱].

نیتروژن دهی

نیتروژن دهی عبارت است از وارد کردن اتم نیتروژن در لایه سطحی فلز. این نیتروژن با عناصر موجود در سطح فلز تشکیل نیتريد می دهد. بنابراین سختی سطحی بدست آمده به نیتريد تشکیل شده بستگی دارد.

این عملیات در دمای ۵۵۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی گراد انجام می گیرد. با وجود اینکه امکان نیتروژن دهی برای بسیاری از فلزات وجود دارد، تنها هنگامی می توان با این روش به سختی های بالایی دست یافت که فولاد حاوی عناصر آلیاژی آلومینیم، کرم، مولیبدن یا وانادیم باشد. این عناصر با نیتروژن تشکیل نیتريد های سخت و پایدار می دهند. که باعث سختی سطحی فلز می گردند.

به طور کلی عناصر گروه انتقالی (Fe, Cr, Mn, V, W, Mo, Ti) با نیتروژن ترکیب می شوند و نیتريد تشکیل می دهند. در حقیقت سختی زیاد لایه سطحی فولادهای نیتروژن داده شده، ناشی از وجود همین ذرات بسیار ریز و پراکنده نیتريد های آلیاژی است.

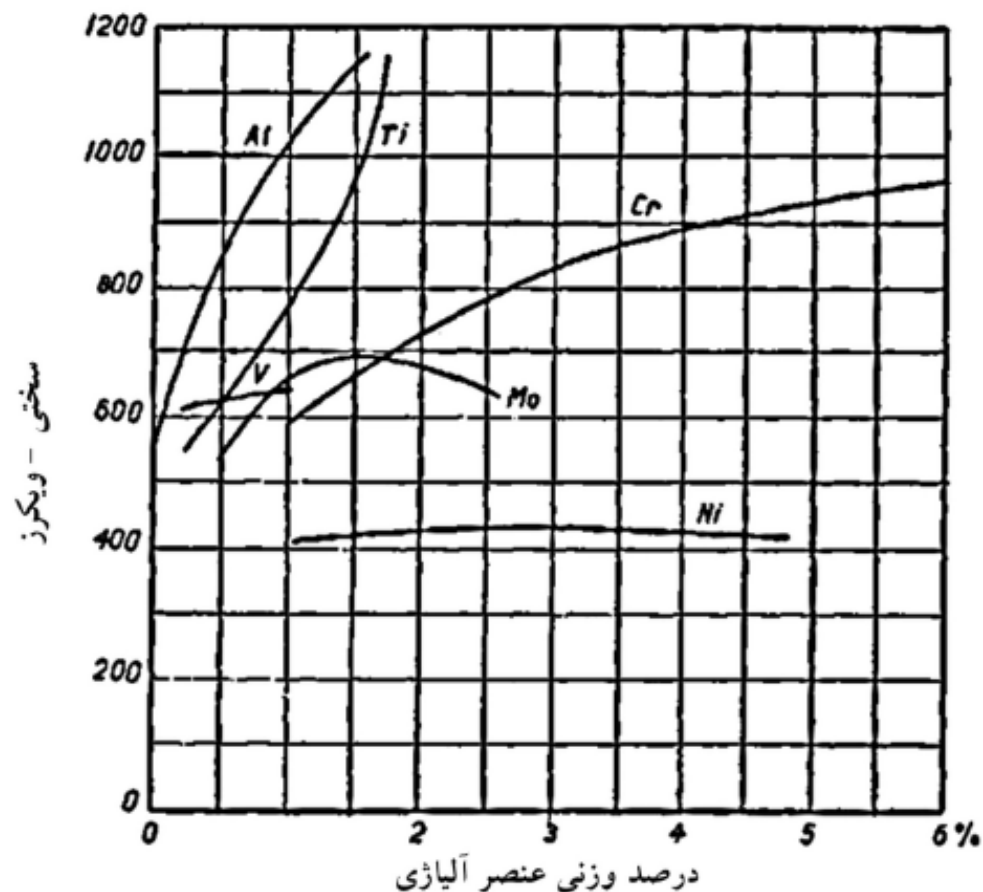
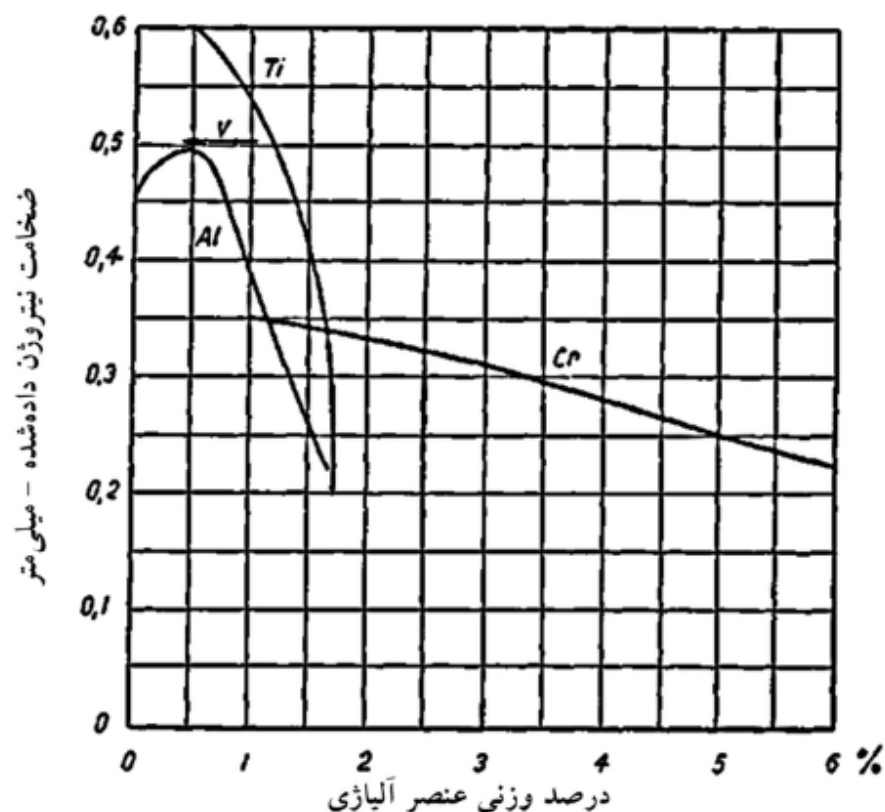


شکل ۱۰-۵ نمودار تعادلی آهن - نیتروژن [۶].

با توجه به آنچه گفته شد، تفاوت بین عملیات کربن دهی و نیتروژن دهی مشخص می شود. در حالی که کربن دهی باید در بازه دمایی پایداری آستنیت (۸۷۵ تا ۹۲۵ درجه سانتی گراد) انجام شود، نیتروژن دهی را می توان در بازه دمایی پایداری فریت (۵۵۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی گراد) انجام داد. افزون بر این، پس از نیتروژن دهی نیازی به سریع سرد شدن قطعه نیست. به طور معمول، قطعه های نیتروژن داده شده را پس از پایان عملیات و از دمای نیتروژن دهی در هوا سرد می کنند. ریزساختار پوسته در این شرایط، به ترتیب از خارج به داخل دارای فازهای ϵ ، γ' و α است. افزون بر این فازها، نیتrideهای آلیاژی که عامل اصلی سختی سطح اند نیز به صورت ذره های بسیار ریز و پراکنده در ساختار لایه سطحی وجود دارند.

اگر فولادهای ساده کربنی نیتروژن دهی شوند، سختی سطحی در حد متوسط (حدود ۴۰۰ HV) افزایش می یابد. دلیل این موضوع این است که در دمای نیتروژن دهی، نیتروژن، به نسبت سریع به داخل فولاد نفوذ می کند و Fe_3N و گاهی Fe_2N تشکیل می دهد. از آنجایی که نیتrideهای یادشده تا حدودی در عمق زیادی پراکنده می شوند، سختی سطح را نمی توانند در حد زیادی افزایش دهند. آلومینیوم و تا حدودی کروم، واندیم و مولیبدن میل ترکیبی زیادی با نیتروژن دارند، بنابراین از نفوذ آن به داخل قطعه جلوگیری می کنند و یک لایه تا حدودی نازک و پایدار (تا حداکثر یک میلی متر) و سخت نیتride روی سطح قطعه تشکیل می دهند. با افزایش درصد این عناصر آلیاژی، سختی سطح نیتروژن داده شده افزایش می یابد (شکل ۱۰-۶)، در حالی که ضخامت لایه نیتروژن داده شده کاهش خواهد یافت (شکل ۱۰-۷).

برای نیتروژن‌دهی موضعی، مناطقی که نیاز به نیتروژن‌دهی نداشته باشند را توسط مخلوطی از سدیم سیلیکات و پودر گچ، پوشش می‌دهند.



شکل ۱۰-۶ اثر عناصر آلیاژی روی سختی پس از نیتروژن‌دهی. آلیاژ اولیه دارای ۰/۳۵C، ۰/۳Si و ۰/۷Mn بوده است. زمان و دمای نیتروژن‌دهی، به ترتیب هشت ساعت و ۵۲۰ درجه سانتی گراد بوده است [۶].

شکل ۱۰-۷ اثر عناصر آلیاژی روی ضخامت لایه نیتروژن‌داده‌شده. زمان و دمای عملیات، به ترتیب هشت ساعت و ۵۲۰ درجه سانتی گراد بوده است. ضخامت لایه نیتروژن‌داده‌شده عبارت است از فاصله سطح تا محلی که سختی ۴۰۰ ویکرز باشد [۶].

کربن - نیتروژن دهی (Carbonitriding)

کربن - نیتروژن دهی به عملیات سخت کاری که در آن **کربن و نیتروژن هر دو جذب فولاد** می شوند گفته می شود. به این ترتیب نیتروژن داده شده، سختی سطحی را بیش تر افزایش می دهد. این واژه به سخت کردن سطحی که در آن **از محیط گازی** استفاده شود، گفته می شود.

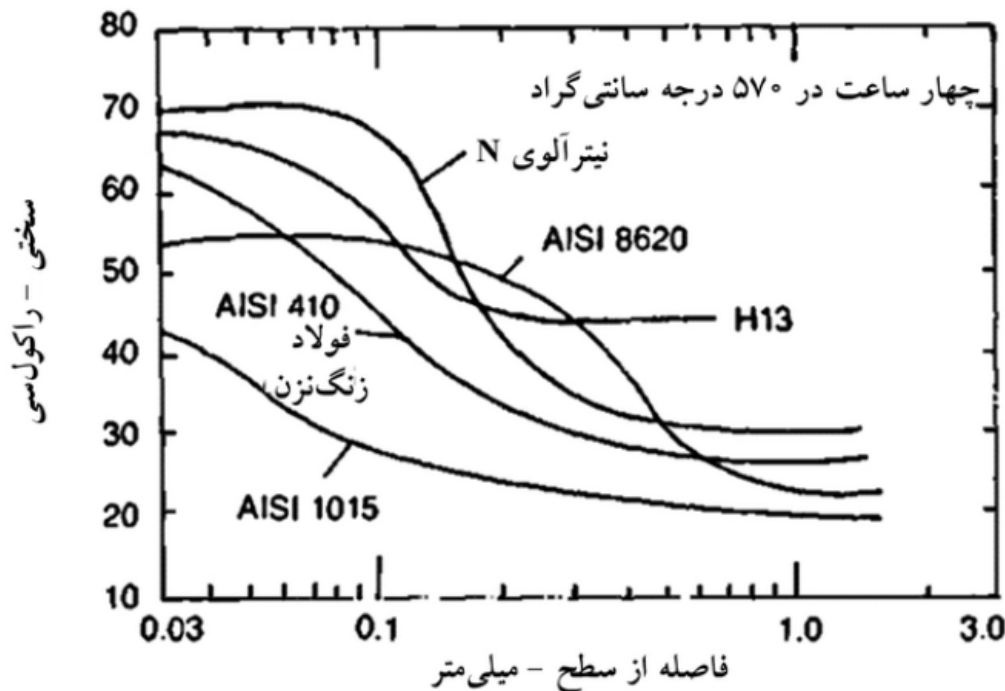
این عملیات در گستره دمایی ۸۰۰ تا ۸۷۵ درجه سلسیوس انجام شده و **در محیطی از مخلوط منواکسید کربن و هیدروکربن شامل ۳ تا ۸ درصد آمونیاک** انجام می شود. برای انحلال سریع کربن در فولاد قطعه باید در محدوده فاز **آستنیت** باشد، که این شرایط برای حل شدن نیتروژن مناسب نیست. ولی در صورتی که دما در زیر ۹۰۰ درجه سانتی گراد حفظ شود، مقدار قابل ملاحظه ای نیتروژن در آستنیت حل خواهد شد.

کربن - نیتروژن دهی در مقایسه با کربن یا نیتروژن دهی تنها، سختی سطحی و مقاومت به سایش را بیشتر افزایش می دهد.

نیتروژن-کربن دهی (Nitrocarburizing)

این فرآیند که شامل نفوذ همزمان نیتروژن و کربن به داخل فولاد است در گستره دمایی پایدار فاز فریت (زیر دمای A_1) انجام می‌شود و لذا به نیتروژن-کربن دهی فریتی نیز موسوم است. انجام این فرآیند به هر دو صورت گازی و مایع امکان‌پذیر است. از جمله مزایای مشترک این دو روش تشکیل یک لایه نازک تک‌فازی از کاربونیترید اپسیلن (یک ترکیب سه‌تایی از آهن-نیتروژن-کربن) که دارای مقاومت به سایش عالی بوده و هنگام تشکیل شدن کمترین اعوجاج در قطعه را به همراه دارد.

سختی زیاد سطح و ضخامت کم لایه سطحی تولید شده روی فولادهای آلیاژی و فولادهای ساده کربنی در این فرآیند از جمله ویژگی‌های خاص آن‌ها است.



شکل ۸-۱۰ چگونگی تغییرهای سختی در فولادهای مختلف پس از نیتروژن-کربن دهی گازی فریتی [۱].

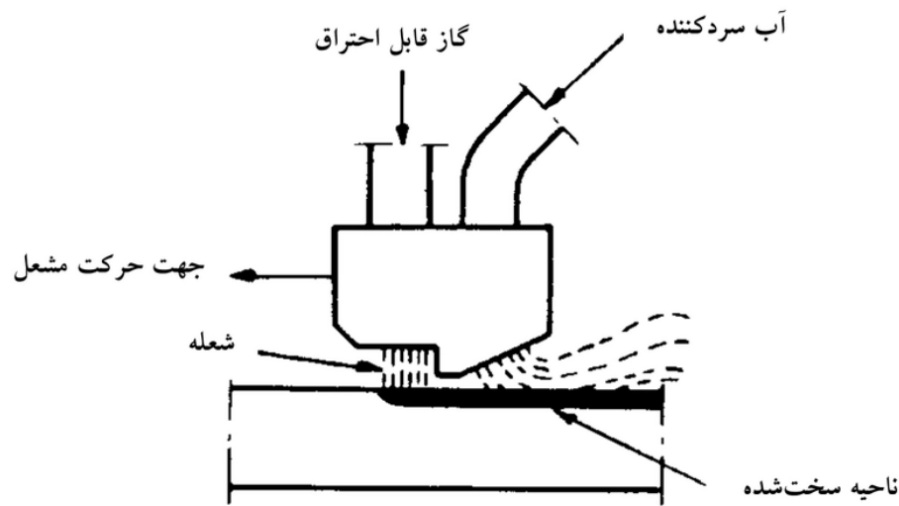
سخت کردن سطحی به کمک عملیات حرارتی موضعی

در این روش مغز و سطح قطعه دارای ترکیب شیمیایی یکسانی بوده و تنها از طریق عملیات حرارتی باعث سختی سطح می‌گردد. این روش روی فولادهای کربنی که شامل ۰/۳۵ تا ۰/۵ درصد کربن داشته باشند قابل اجرا است. فولادهای کم آلیاژی که حداکثر ۱٪ کرم، ۰/۲۵ درصد مولیبدن و ۰/۵ درصد نیکل باشد را نیز با این روش سخت می‌کنند. در این روش تنش‌های فشاری ناشی از مارتنزیت شدن لایه سطحی، استحکام خستگی را نیز افزایش می‌دهد.

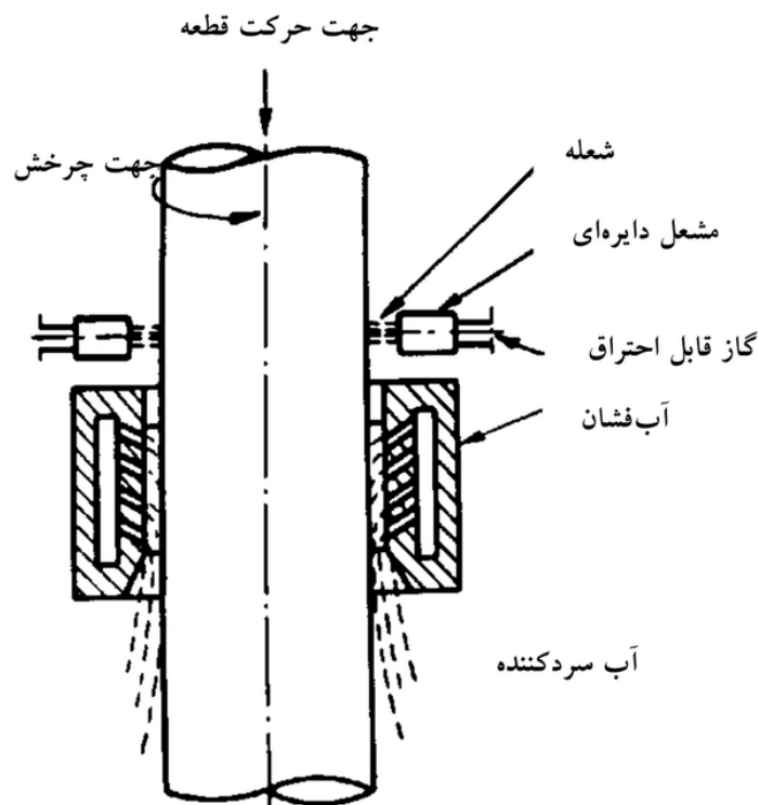
برای بدست آوردن ساختار و خواص مکانیکی مناسب در مغز قطعاتی که باید به روش عملیات حرارتی موضعی سخت شوند، ابتدا آنها را مارتنزیت کرده و بازپخت یا نرماله می‌کنند. سپس سطح را آستنیت کرده و بلافاصله سریع سرد می‌کنند. در نتیجه با وجود ثابت بودن درصد کربن در سرتاسر قطعه (حدود ۰/۴ درصد) مغز آن از مارتنزیت بازپخت شده یا از مخلوطی از پرلیت و فریت با چقرمگی خوب و سطح آن از مارتنزیت با سختی نسبتاً بالا تشکیل شده است. این دو لایه معمولاً با یک لایه بینیتی از هم جدا می‌شوند.

سخت کردن شعله‌ای

در این روش سطح قطعه به وسیله یک مشعل اکسیژن و یک گاز قابل احتراق (استیلن، پروپان، گاز طبیعی و ...) آستنیت شده و بلافاصله بعد از آن به وسیله یک آب فشان خنک می‌شود.

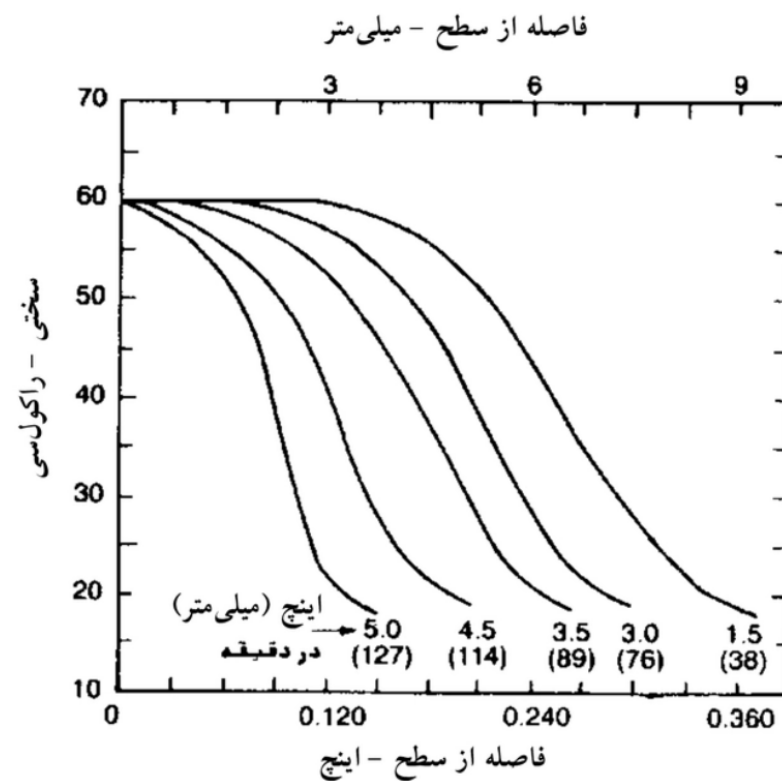


شکل ۱۰-۱۰ سخت کردن سطحی قطعه‌های مسطح و بزرگ به روش شعله‌ای [۶].



شکل ۱۰-۱۱ سخت کردن سطحی قطعه‌های استوانه‌ای به روش شعله‌ای [۶].

از معایب اصلی سخت کردن شعله‌ای، اکسایش سطح و یا کاهش درصد کربن سطح قطعه است. این روش برای فولادهای کربنی که بین ۰/۴ تا ۰/۵ درصد کربن دارند مناسب است. معمولاً ضخامت لایه سخت شده بین ۳ تا ۱۲ میلی‌متر متغیر است. برای سخت کردن ضخامت مشخصی از فولاد آهنگ گرم کردن و هدایت حرارتی از اهمیت بیشتری نسبت به سختی‌پذیری قطعه برخوردار است.



شکل ۱۰-۱۲ اثر سرعت حرکت مشعل روی عمق (ضخامت) سخت شده فولاد ۱۰۵۰ آهنگری شده [۱].

سخت کردن القایی

در این روش حرارت دادن سطح با کمک یک سیم‌پیچ هادی که جریان متناوب با فرکانس بالا از آن عبور می‌کنند، انجام می‌شود. این سیم‌پیچ یک میدان مغناطیسی قدرتمند دور تا دور قطعه ایجاد می‌کند. عبور خطوط میدان مغناطیسی جریان متناوب از قطعه در لایه‌های سطحی آن جریان‌های فوکو را به وجود می‌آورند که باعث گرم شدن قطعه کار می‌شوند.

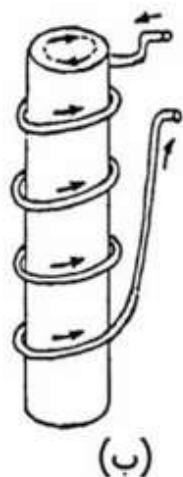
پس از آن قطعه به وسیله آب فشان خنک شده و یا درون آب انداخته می‌شود. از جمله مزایای این روش نسبت به گرم کردن با شعله، سرعت بیش‌تر عملیات آستنیت‌زدن و در نتیجه اکسایش کمتر در سطح قطعه می‌باشد.

ارتباط ضخامت پوسته سخت شده و فرکانس جریان بصورت زیر است:

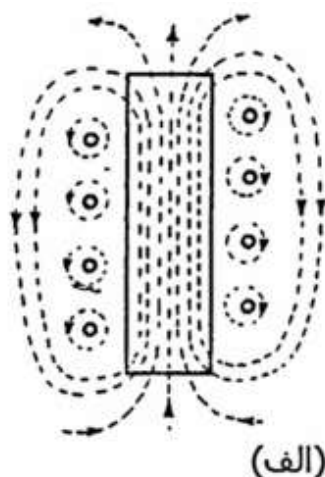
$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu F}}$$

δ عمق نفوذ جریان، ρ مقاومت الکتریکی سیم‌پیچ،
 μ نفوذپذیری مغناطیسی و F فرکانس جریان است.

مدت زمان گرم کردن توسط جریان‌های القایی با فرکانس بالا، بسیار کوتاه و بیش‌تر وقت‌ها فقط چند ثانیه است.

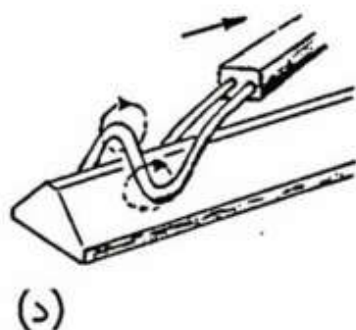


(ب)

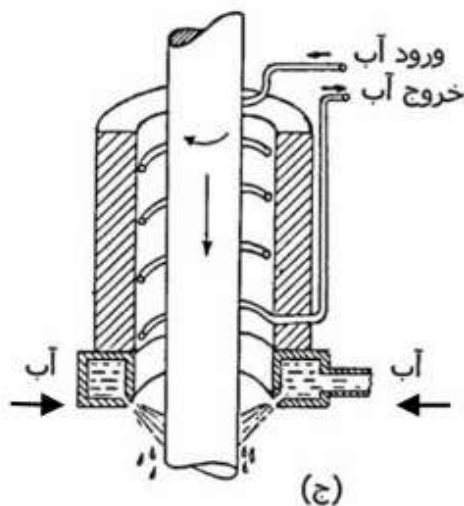


(الف)

با این روش در مدت زمان بسیار کوتاه، **سختی** **بیشتری در مقایسه با روش‌های معمولی** دیگر به دست می‌آید. این افزایش سختی به سختی اضافی (Super Hardness) موسوم است، که علت آن تشکیل مارتنزیت از آستنیت با دانه‌های بسیار ریز است.



(د)



(ج)

شکل ۱۰-۱۳ اصول سخت کردن القایی. (الف) میدان مغناطیسی به وجود آمده در اثر عبور جریان متناوب از سیم پیچ، (ب) سیم پیچ مناسب برای سخت کردن سطوح خارجی قطعه‌های استوانه‌ای، (ج) مجموعه سیم پیچ برای گرم کردن و آب برای سرد کردن، (د) سیم پیچ مناسب با توجه به شکل قطعه باید ساخته و استفاده شود [۳].

بوردهی

این روش که شامل نفوذ اتم‌های بور به داخل سطح به صورت بین نشینی است برای سخت کردن گستره‌ی وسیعی از آلیاژهای آهنی، غیرآهنی و حتی مواد سرمت است. این عملیات شامل حرارت دادن قطعه تا دمای ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ تا ۱۲ ساعت است.

بوردهی می‌تواند به صورت جامد، مایع یا گاز انجام شود. اتم‌های بور در سطح یک لایه بسیار نازک با سختی بسیار بالا (معادل سختی کاربید تنگستن) و دمای ذوب بالا تشکیل می‌دهند. همچنین ضریب اصطکاک این لایه بسیار پایین است. این لایه مقاومت به سایش، اکسایش، خوردگی و همچنین استحکام خستگی فولاد را بسیار افزایش می‌دهد.

در ضمن بوردهی ترکیب‌های مختلف بین‌نشینی به وجود می‌آیند، که ممکن است شامل یک یا چند فاز بوراید باشد. این لایه‌ها از سختی بسیار زیاد و دمای ذوب بالا برخوردار هستند. سختی ایجاد شده در سطح فولادهای ساده کربنی با این روش بسیار بیش‌تر از سختی حاصل از روش‌های متداول سخت کردن سطحی است.

مزایای بوردهی:

- ✓ لایه‌های بوراید در مقایسه با سطوح نیتروژن داده شده، سختی خود را تا دماهای بالاتر حفظ می‌کنند.
- ✓ بازه گسترده‌ای از فولادها قابلیت بوردهی دارند.
- ✓ کاربردهای صنعتی فراوان.
- ✓ مقاومت اکسایشی خوبی دارند و در برابر فلزهای مذاب بطور کامل مقاوم هستند.
- ✓ مقاومت خستگی خوبی در محیط‌های اکسیدان و محیط‌های خورنده دارند.

فرآیندهای نفوذی جانشینی

این فرآیندها شامل نفوذ یک یا چند عنصر جانشینی به صورت هم زمان نظیر آلومینیم، کرم، سیلیسیم، منگنز، تیتانیم، وانادیم و ... است. تیتانیوم دهی سختی سطح را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. آلومینیم، سیلیسیم و کرم دهی باعث افزایش مقاومت به خوردگی و اکسایش می‌شوند. فرآیند دیگر نفوذ هم‌زمان تیتانیم و کربن و تشکیل یک لایه سطحی از تیتانیم به روش رسوب شیمیایی از فاز بخار است. (در بازه ۹۰۰ تا ۱۰۱۰ درجه سانتی‌گراد)

شرایط لازم برای تشکیل پوشش‌های نفوذی فلزی روی آهن بصورت زیر است:

- ❖ شعاع اتمی فلز پوشش نباید بیش از ۱۵ تا ۱۶ درصد از شعاع اتمی آهن بیش‌تر باشد.
- ❖ فلز پوشش باید در دماهای پایین و بالا در آهن حل شود.
- ❖ بین زیرلایه و فلز پوشش باید یک تماس فلزی باشد.

*روش‌های نوین سخت کاری

در این روش‌ها ممکن است ترکیب شیمیایی سطح عوض شود و یا اینکه تغییر نکند.

عملیات حرارتی سطحی به کمک لیزر

این روش مشابه عملیات حرارتی سطحی شعله ای و القایی است با این تفاوت که گرم کردن سطح تا دمای **آستنیت به کمک لیزر انجام شده** و خنک شدن آن با هدایت حرارت به سمت مغز قطعه خود به خود بعد از قطع شدن لیزر انجام می گیرد. در این روش هیچ نوع تغییر ترکیب شیمیایی سطح وجود ندارد. از روش‌های دیگر عملیات سطحی لیزری، ذوب کردن سطحی (پالایش ساختار در اثر سریع سرد شدن از حالت مذاب) و آلیاژسازی سطحی (اضافه کردن عناصر آلیاژی به حوضچه مذاب) است. از جمله مزایای این روش **تاب بر نداشتن قطعه حین عملیات**، سختی خوب، مقاومت به سایش و بهبود خواص خستگی است.

سخت کردن توسط پرتوی الکترونی

این روش مشابه روش قبل است با این تفاوت که **از تفنگ الکترونی برای گرم کردن سطح** استفاده می‌شود. در تفنگ الکترونی الکترون‌ها شتاب داده شده و برخورد این الکترون‌ها با سطح انرژی آزاد می‌کند. در این روش باید قطعه و تفنگ الکترونی در یک محفظه‌ی خلا قرار داده شوند چون مولکول‌های هوا باعث انحراف الکترون‌ها می‌شوند و همچنین اکسیژن با سطح قطعه واکنش می‌دهد که باعث کاهش خواص سطح می‌گردد.

عملیات حرارتی سطحی به روش کاشت یون

این فرآیند برای اصلاح ترکیب شیمیایی سطح است که در آن یونها با انرژی بسیار زیاد به داخل سطح فرستاده می‌شوند. گفته شده است که برای این منظور تقریباً از یون‌های هر نوع ماده‌ای می‌توان استفاده کرد. اما یون‌های نیتروژن را به طور گسترده‌ای برای بهبود مقاومت به خوردگی و بهبود خواص تریبولوژیکی فولادها و آلیاژهای دیگر به کار می‌رود.

در تجهیزات کاشت یون، یون‌های آزاد شده از منبع ویژه طراحی شده برای این منظور با انرژی بسیار زیاد شتاب داده شده و در محل مورد نظر به سطح نمونه برخورد می‌کند. این فرآیند در **دمای اتاق** انجام می‌شود و **یک لایه بسیار نازک اما سخت به وجود می‌آورد**.

کاشت یون یک فرآیند پیچیده و ناتهادلی است که در اثر آن، خسارت‌های شبکه‌ای زیاد در قالب جاهای خالی و معایب نقطه‌ای از نوع بین‌نشینی به وجود می‌آیند. چون در این فرآیند اصلاحاتی در خود سطح قطعه انجام می‌شود، مشکلات مربوط به چسبندگی پوشش‌های بسیار سخت را نخواهیم داشت.

((و اینکه برای انسان بهره‌ای جز سعی [و کوشش] او، نیست)) (سوره مبارکه نجم، آیه ۳۹)

اللَّهُمَّ مَا بِنَا مِنْ نِعْمَةٍ فَمِنْكَ

بارالها؛ هر نعمتی که بر ماست، از آن توست

با آرزوی سلامتی و موفقیت روز افزون شما

* دکتر محمود سمیع زاده *

m_sameezadeh@sbu.ac.ir