



فولاد حامیران

شرکت حامی آلیاژ آسیا

اولین و بزرگترین مرجع تخصصی

انواع فولادهای آلیاژی و
آهن آلات صنعتی و ساختمانی
با بیش از شش دهه تجربه

☎ 021-63511

www.hamiransteel.com

📷 hamiransteel 📍 hamiransteel



مقاله

ایستاده در غبار

بهترین روش عملیات حرارتی فولادهای گرمکار، از افسانه تا واقعیت

نویسنده: دکتر مجتبی چنارانی،
هلدینگ حامیران - مدیرعامل صنایع
حرارتی حامی

■ بازنگری و ویرایش:
مهندس سید حامد میری - هلدینگ
حامیران - مدیرعامل حامی الپاز آسیا
مهندس سید علیرضا میری - هلدینگ
حامیران - مدیرعامل الماس فولاد
ایرانیان



چکیده

«بهترین روش عملیات حرارتی» برای فولادهای گرمکار (به ویژه H13 یا 1.2344) کدام است؟ هرکس پاسخ این پرسش را بر اساس تجربیات خود می‌دهد و فرایندها را بر اساس افراد قضاوت می‌کنند و همین می‌شود که پاسخ‌های متناقضی به این پرسش داده می‌شود.

این مقاله بارویکرد تحلیلی و با تمرکز بر سختکاری حجمی فولاد 1.2344، نشان می‌دهد که پاسخ این پرسش تابع تعامل عوامل مختلفی، از جمله خواص ذاتی مورد انتظار (مثل سختی و استحکام)، کیفیت سطحی، کیفیت اجرای روش‌ها توسط مجریان عملیات، هزینه و... می‌باشد.

در اینجا، سه مسیر اصلی گرمایش تا دمای آستنیت به عنوان عامل اصلی کنترل‌کننده روش عملیات حرارتی (حمام نمک، خلأ، اتمسفر کنترل شده) معرفی و مقایسه می‌شوند و نشان داده می‌شود که چگونه «کیفیت اجرا» می‌تواند نتیجه استفاده از هر فناوری را بهبود داده و یا تخریب نماید.

در ادامه، بازه‌های عددی گزارش شده برای ضریب انتقال حرارت همرفتی (h)، نمودار سختی‌پذیری جامینی (به صورت عددی) و کاهش مدول الاستیسیته در دمای بالا و اثر آن بر اعوجاج ارائه شده است. نتیجه نهایی این است که «بهترین روش مطلق» وجود ندارد؛ اما «بهترین انتخاب» برای شرایط مشخص و قابل تعریف، وجود دارد.

واژه‌های کلیدی

فولاد گرمکار، 1.2344، H13، سختی‌پذیری، جامینی، شدت سرمايش مؤثر، اعوجاج، حمام نمک، خلأ، اتمسفر کنترل شده، تمپر، تنش‌گیری، قیمت تمام شده عملیات حرارتی.

مقدمه

فولادهای ابزار گرمکار در صنایع دایکست، فورج، اکستروژن و سایر فرآیندهای شکل‌دهی در دمای بالا، نقش کلیدی دارند. در این کاربردها، قطعات معمولاً بزرگ، چندحفره، دارای اختلاف ضخامت‌های قابل توجه، حساس به پایداری ابعادی بوده و نیازمند سختی و مقاومت به سایش در دمای بالا و در عین حال، چقرمگی و مقاومت به تنش‌های کششی و فشاری در دمای بالا هستند. با چنین ویژگی‌هایی، طبیعی است که صنعت به دنبال «بهترین روش» برای عملیات حرارتی باشد. در ادامه مقاله هرچا به فرآیند عملیات حرارتی اشاره می‌شود، منظور عملیات حرارتی فولاد ابزار گرمکار H13 یا همان 1.2344 است، مگر آنکه به صورت مستقیم به این موضوع اشاره شود.

واقعیت این است که عملیات حرارتی تلفیقی است از دانش، هنر، تخصص، تعهد و تجربه که با تجهیزات و ابزار مناسب تلفیق شده و نتیجه نهایی را شکل می‌دهند. چه بسا پیشرفته‌ترین ابزارها هم در صورت بکارگیری اشتباه، نتایج فاجعه‌باری رقم زنند و چه بسا با حداقل امکانات و بکارگیری دانش و تجربه، نتایج درخشانی به دست آید.

این مقاله می‌کوشد به جای دادن حکم قطعی در مورد انتخاب بهترین روش در همه شرایط، مسئله را مهندسی کند: ابتدا مرز موضوع را روشن می‌کند، سپس سه مسیر اصلی گرمایش تا دمای آستنیت را معرفی و مقایسه می‌کند و نهایتاً با تحلیل عددی سختی‌پذیری،

مشخصه‌های انتقال حرارت و مکانیک دمای بالا، چارچوبی را برای تصمیم سازی در انتخاب بهترین روش عملیات حرارتی در شرایط مختلف ارائه می‌دهد [1,2,3].

قبل از ادامه بحث لازم به یادآوری است همه آنچه در ادامه گفته می‌شود با فرض یکسان بودن کیفیت فولاد مورد استفاده است، حال آنکه نقش کیفیت فولاد، می‌تواند اثر بهترین طراحی قالب، قالب‌سازی و شیوه عملیات حرارتی را هم از بین ببرد که قبلاً در مقالات متعدد به آن پرداخته شده است.

با توجه به گستردگی استفاده از فولاد ابزار گرمکار فولادسازان معتبر دنیا گریدهای مختلف این فولاد را با روش‌های متفاوت تولید می‌کنند، به طور مثال شرکت بهلر دو گرید مختلف برای این فولاد دارد:

ISODISK که فولادی است که به روش ریخته‌گری و فورج تولید می‌شود و کمتر مرسوم است.

ISOBLÖK که فولادی است که پس از ریخته‌گری، برای افزایش یکنواختی ریزساختار و کاهش ناخالصی‌ها، تحت فرآیند ESR (**ذوب مجدد سرباره الکتریکی**) قرار گرفته است.

برای برخی گریدهای ویژه از ذوب تحت خلاء نیز استفاده می‌شود که **VMR** است و در موارد خاص از روش متالورژی پودر نیز برای تولید برخی فولادهای ابزار ویژه استفاده می‌شود. پس مشاهده می‌شود در حالیکه ممکن است چند فولاد مختلف آنالیز یکسانی داشته باشند، اما مسیرهای متفاوتی را برای رسیدن به محصول نهایی طی کرده باشند.

در ادامه مقاله فرض می‌کنیم که فولاد مورد استفاده، از تامین‌کننده‌های معتبر تهیه شده و گواهی‌نامه‌های انجام تست‌های مورد نیاز بر روی فولاد از تامین‌کننده فولاد، اخذ شده است.

۲. طبقه‌بندی روش‌های عملیات حرارتی

در منابع علمی هر جا به عملیات حرارتی اشاره می‌شود، منظور سه خانواده اصلی آن است: **(الف)** سختکاری حجمی؛ **(ب)** سختکاری سطحی؛ **(ج)** لایه‌نشانی. در «سختکاری حجمی»، هدف ایجاد ریزساختار مناسب (عمدتاً مارتنزیت تمپر شده) در کل مقطع مؤثر قطعه است؛ که این همان موضوع اصلی این مقاله است. در «سختکاری سطحی» (مانند نیتراسیون، سمانتاسیون و سختکاری القایی)، هدف سخت کردن لایه سطحی با حفظ مغز نرم‌تر است و در «لایه‌نشانی یا سخت‌پوشی» (پوشش‌های **PVD** یا **CVD** یا جوشکاری و روکش‌های مقاوم به سایش و خوردگی)، هدف نشاندن یک لایه سخت بر روی سطح برای افزایش مقاومت به سایش و خوردگی است [1,4]. در این مقاله در ادامه هر جا به عملیات حرارتی اشاره می‌شود منظور «عملیات حرارتی سختکاری حجمی» است.

۳. سه مسیر اصلی گرمایش تا دمای آستنیت

از نگاه نوع فناوری، فرآیند گرمایش و حفاظت سطح در دمای آستنیت در فولادهای ابزار، به عنوان وجه تمایز اصلی روش‌های عملیات حرارتی است که به شدت بر خواص نهایی قطعه مؤثر می‌باشد و سه مسیر اصلی صنعتی برای این منظور استفاده می‌شود:

۱- کوره خلأ با کوئنچ گازی

۲- کوره حمام نمک

۳- کوره با اتمسفر محافظ

در حقیقت در این تقسیم‌بندی، وجه تمایز روش‌های مختلف در شیوه «گرمایش تا دمای آستنیت و روش کنترل سطح از اکسیداسیون است» تعریف می‌شود، چراکه فرآیند آستنیت‌شدن مهمترین بخش در سختکاری حجمی است و بیشترین تأثیر را در خواص نهایی قطعه عملیات حرارتی شده دارد، از سوی دیگر سایر مراحل تمپر قطعه را می‌توان به روش‌های دیگر انجام داد و به طور مثال قطعه سختکاری شده خلأ با حمام نمک تمپر شود، یا قطعه سختکاری شده با حمام نمک در کوره با اتمسفر محافظ یا محیط تمپر شود [1,4,5]. در ادامه به معرفی کوتاه هر روش و مزیت‌ها و محدودیت‌های اصلی آنها می‌پردازیم.

۱-۳. کوره خلأ با کوئنچ گازی

در این روش، گرمایش و انتقال حرارت به روش تابش انجام می‌شود و سپس کوئنچ با گاز (عموماً نیتروژن) در فشارهای مختلف بین ۲ تا ۶ bar انجام می‌گیرد. مزیت اصلی این روش کیفیت سطح بالا (اکسیداسیون و دکربوره ناچیز) و تکرارپذیری مناسب در صورت کنترل درست شرایط عملیات است. عدم جابجایی قطعات حین کوئنچ در کوره‌های تک محفظه باعث می‌شود در صورت چینش مناسب، به ویژه در قطعات نسبتاً کوچک و دارای حفره داخلی، میزان اعوجاج به حداقل خود کاهش یابد. محدودیت‌های کلیدی این روش عبارتند از: پایین‌تر بودن نرخ سرمایش نسبت به سایر روش‌های کوئنچ، و حساسیت شدید به نحوه چیدمان و اعوجاج شدید در قطعات با طول بلند و نسبت سطح به حجم بالا. قبلاً در مقاله «عملیات حرارتی تحت خلأ، مزیت‌ها و محدودیت‌ها» به این موارد به صورت کامل پرداخته شده است [1,4,5].

در فرآیند حمام نمک، قطعات به جای آنکه مستقیماً در معرض حرارت باشد، در یک پاتیل حاوی نمک مذاب خنثی که دمای مورد نظر را دارد قرار می‌گیرند. مثال کلاسیکی که برای فهم این فرآیند زده می‌شود «آب پز کردن تخم مرغ» است. برای این کار ظرف روی گاز قرار می‌گیرد، شعله ظرف را گرم می‌کند، ظرف آب را گرم می‌کند و آب داغ تخم مرغ را گرم می‌کند. در این روش خیالتان راحت است که پوسته تخم مرغ نمی‌سوزد و دمای آن هم از ۱۰۰ درجه بالاتر نمی‌رود.

در حمام نمک هم شعله پاتیل را گرم می‌کند، پاتیل داغ نمک داخلش را (که معمولاً پایه کلریدی داشته و بخش عمده‌اش کلرید باریوم است) ذوب نموده و دمای آن را بالا می‌برد. نمک داغ هم قطعه‌ای که داخلش غوطه‌ور است را داغ می‌کند. به این ترتیب به دلیل ترکیب خنثی نمک سطح اکسید نمی‌شود و دمای آن هم از دمای حمام نمک بالاتر نمی‌رود.

این روش باعث می‌شود:

- سطح قطعه از خوردگی و اکسیداسیون و تغییر ترکیب در امان بماند؛
- گرمایش بسیار یکنواخت در سراسر قطعه داشته باشیم؛
- امکان اجرای مسی‌های چند مرحله‌ای (پیش گرم‌های پله‌ای و کوئنچ چند مرحله‌ای) وجود داشته باشد؛
- امکان کوئنچ در با محیط‌های با ظرفیت جذب حرارت بالا فراهم است؛
- امکان انجام عملیات آستمپرینگ و مارتمپرینگ وجود دارد.

لازم به ذکر است، کیفیت نتایج آستنیته شده در حمام نمک به شدت به کیفیت اجرا وابسته است، عواملی از جمله: حداکثر دمای کوره، یکنواختی دمای کوره، کنترل دقیق دما، تعداد مراحل پیش گرم، کیفیت نمک، مدیریت انتقال قطعه بین مخازن کوئنچ، و نحوه صحیح بستن و آویزان کردن قطعات. اجرای ناقص فرآیند (مثلاً حذف پیش گرم و آستنیته در دمای پایین‌تر برای کاهش استهلاک) خواص را به طور معناداری کاهش می‌دهد [1,4].

چالش بعدی این روش، کیفیت سطحی نهایی است؛ در صورتی که کیفیت نمک مورد استفاده پایین باشد یا پروتکل‌های شست و شو به درستی رعایت نشود، باقی ماندن نمک در سطح یا بخصوص سوراخ‌های قطعه، چالش‌های زیادی را برای مصرف‌کننده نهایی ایجاد خواهد کرد، ولی در صورت استفاده از نمک با کیفیت و رعایت صحیح الزامات شست و شوی میانی و نهایی، کیفیت سطح، قابل رقابت با روش خلأ و کوره‌های اتمسفر محافظ خواهد بود [5].

۳-۳. کوره با اتمسفر محافظ

در این روش، هدف کاهش اکسیداسیون و کنترل واکنش سطح با استفاده از اتمسفرهای کنترل شده است. اتمسفر کنترل شده در این کوره‌ها اغلب نسبتی کنترل شده از گازهای CO و CO₂ در غیاب اکسیژن است تا محیطی خنثی یا کمی احیایی ایجاد کند.

این کوره‌ها دو تیپ اصلی دارند، «پیوسته یا کانتینیوس» و «محفظه‌ای» که معروف‌ترینشان «پیت تایپ (Pit type)» است. در کوره‌های پیت تایپ، که معمولاً برای عملیات حرارتی فولادهای ابزار استفاده می‌شود، منبع حرارت یک محفظه از فولاد مقاوم به حرارت (نسوز) را گرم نموده و قطعات به صورت غیر مستقیم گرم میشوند. توسعه صنعتی این روش در فولادهای گرمکار که آستنیته شدن در دماهای بالا انجام می‌شود، به دلیل چالش‌های فناوری و هزینه، در بسیاری از محیط‌های صنعتی محدودتر از خلأ و نمک است و اقتصادی نیست؛ این روش بیشتر برای فولادهای ابزاری ساده‌تر که دمای آستنیته زیر ۹۵۰ درجه سانتیگراد دارند مرسوم است. در برخی موارد مشاهده می‌شود که برای کاهش هزینه، فولادهایی که در دمای بالا آستنیته می‌شوند، نظیر فولادهای ابزار گرمکار هم در کنار سایر فولادهای ابزار و در همین کوره‌ها و در دمای پایین آستنیته می‌شوند که می‌توان انتظار داشت قطعاتی که در این شرایط عملیات حرارتی می‌شوند افت خواص و عملکرد داشته باشند [1,4,5].

این کوره‌ها علاوه بر محدودیت‌های خود این روش، مشکلات سایر روش‌ها را هم دارند، که مهمترینش این است که مانند کوره‌های خلأ، قطعات با مدول و وزن متفاوت که نیاز به زمان‌های متفاوت نگهداری در دمای آستنیته را دارند، باید به ناچار در یک زمان و دما نگهداری نمود. مزیت بالقوه این روش در صورت طراحی و کنترل مناسب و رسیدن به دمای واقعی آستنیته، آن است که کیفیت قابل رقابت سطح و خواص با خلأ داشته و در کوره‌های پیت تایپ امکان چینش ایستاده و آویزان قطعات بلند وجود دارد که باعث کاهش اعوجاج خواهد شد. هزینه این روش با توجه به هزینه کمتر سرمایه‌گذاری و نگهداشت، بسیار کمتر از خلأ است [1,5].

۳-۳-۳. کوره با اتمسفر محیط

کوره های با اتمسفر محیط، شکل ساده تری از کوره با اتمسفر محافظ است که فاقد محفظه هستند و منبع حرارت به صورت مستقیم با قطعه در تماس است. به دلیل وجود اکسیژن در محیط و دمای بالای قطعه، اکسیداسیون و دگرپوره سطحی شدید در سطح قطعه اتفاق می افتد [1,4].

از این روش برای نرماله کردن یا کوئنچ و تمپر کردن فولادها در برخی فولادسازی های بزرگ که امکان استفاده از روش های دیگر وجود ندارد یا بسیار پر هزینه است، استفاده می شود، به ویژه اینکه بعد از عملیات حرارتی، لایه دگرپوره با ماشینکاری حذف می شود و مشکلی در عملکرد فولاد هم ایجاد نمی کند [4].

در برخی کارگاه های کوچک هم از این روش با تغییراتی استفاده می شود؛ در این روش برای کاهش آسیب سطح، از بسته بدی قطعه به همراه کمی کربن در فویل فولاد ضد زنگ استفاده می شود و پس از رسیدن به دمای آستنیت و نگهداری در این دما، قطعه از کوره خارج شده و بسته باز شده و در محیط مناسب کوئنچ می شود [1,4].

در این راهکارها معمولاً کنترل دقیق پتانسیل کربن ممکن نیست و ممکن است سطح کربوره و یا دگرپوره شود، به همین دلیل این روش برای عملیات حرارتی قطعات حساس و همچنین برای عملیات حرارتی در حجم زیاد مناسب نیست. با این حال، اگر ماشینکاری نهایی پس از عملیات حرارتی پیش بینی شده باشد و لایه سطحی حذف شود، این مسیر می تواند در سناریوهای خاص کاربرد عملی داشته باشد [3]. به همین دلیل در ادامه مقاله این روش کمتر وارد بررسی و مقایسه می شود.

«بستر سیال» نیز روشی دیگر برای آستنیت کردن فولاد است که شبیه به روش اتمسفر محافظ است، اما به دلیل مشکلات تکنولوژیک چندان مرسوم و صنعتی نیست. اکسیداسیون، دگرپوره شدن سطح، مشکلات کنترل ترکیب شیمیایی بستر و امکان الودگی سطح از یک سو و بالا بودن هزینه سرمایه گذاری اولیه و هزینه تعمیرات و نگهداری تجهیزات، مصرف بالای انرژی و استهلاک بالای تجهیزات در دمای بالا از سوی دیگر از جمله دلایل کمتر صنعتی شدن این روش هستند [1,4].

۴. مقایسه و ارزیابی سه مسیر گرمایش

برای مقایسه علمی و کاربردی این سه روش و انتخاب روش بهینه برای هر کاربرد، باید معیارها شفاف باشند. در این مقاله، مقایسه بر پایه شش محور انجام می شود:

- (۱) کیفیت سطح پس از کوئنچ؛
- (۲) حداکثر سختی و اختلاف سختی سطح و مغز
- (۳) اعوجاج؛
- (۴) قابلیت اجرای صحیح پیش گرم؛
- (۵) اعمال دما و زمان مورد نیاز آستنیت؛
- (۶) هزینه عملیات حرارتی [1,3,4].

۴-۱ کیفیت سطح پس از کوئنچ

قهرمان بلامنازع کیفیت سطح پس از سختکاری، قطعا روش خلأ است؛ در صورتیکه:

- میزان خلأ به اندازه کافی مناسب باشد؛
- کوره نشتی نداشته باشد؛
- گاز مورد استفاده برای سختکاری ناخالصی نداشته باشد؛
- تمپر هم با کوره های خلأ یا اتمسفر محافظ انجام شود.

از این لحاظ روش اتمسفر محافظ در درده بعدی قرار می گیرد و پس از آن حمام نمک و در انتها کوره اتمسفر محیط.

البته همانگونه که گفته شد، در روش حمام نمک در صورت استفاده از نمک آستنیت به کیفیت بالا و رعایت پروتکل های صحیح شست و شو کیفیت سطحی قابل رقابت با خلأ و اتمسفر محافظ خواهد بود [1,4,5].

کیفیت سطحی بسیار مهم است، اما آنچه از کیفیت سطحی مهمتر است خواص ذاتی قطعه است. خروجی عملیاتی که بهترین کیفیت سطحی و کمترین اعوجاج را ایجاد کند، اما در زمان استفاده راندمان خوبی نداشته باشد، عملاً فایده‌ای ندارد و همه هزینه‌های انجام شده برای قطعه را نابود می‌کند.

بهترین معیار برای بررسی خواص ذاتی، تست کشش است. اما این تست مخرب و پرهزینه است و امکان انجام آن بر روی قطعه وجود ندارد. به جای آن از تست سختی سنجی که تستی مقایسه‌ای، غیرمخرب، ارزان و مرسوم است، استفاده می‌شود.

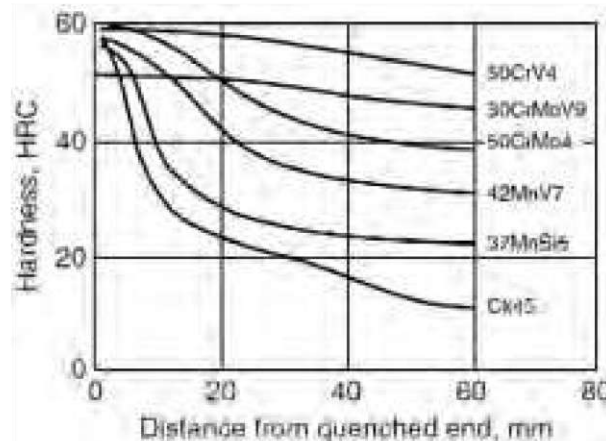
هرچه سختی پس از کوئنچ بالاتر باشد و سختی سطح و مغز یکنواخت‌تر باشد، می‌توان انتظار راندمان بهتر قطعات را داشت. اینکه بر حداکثر سختی پس از کوئنچ تاکید می‌شود به این دلیل است که در بسیاری از کاربردهای سنگین صنعتی فولادهای گرمکار، سختی در بازه ۴۸ تا ۵۰ HRC است، حال می‌توان فرایند سختکاری را به گونه‌ای تنظیم نمود که سختی پس از کوئنچ در همین محدوده باشد و حتی بدون تمپر قطعه را تحویل بیشتری داد و هم می‌توان با استفاده از محیط صحیح کوئنچ، سختی اولیه ۵۲ تا ۵۴ HRC را به دست آورد و با تمپر صحیح و طی نمودن سیکل مورد نیاز برای سختی ثانویه و در نهایت تمپر در دمای بالا، به بازه سختی مورد نظر رسید. هرچند سختی نهایی هر دوروش یکسان است اما با توجه به مباحث ریز ساختاری، روش دوم با توجه به داشتن ریز ساختار یکنواخت‌تر و مارتنزیت تمپر شده نتایج بهتری در راندمان و عملکرد خواهد داشت.

اینکه پس از پایان آستنیت‌شدن، قطعه در چه محیطی کوئنچ می‌شود به شدت بر میزان سختی سطح و اختلاف سختی سطح و مغز قطعه مؤثر است. در ادامه به تشریح دقیق‌تر این موضوع می‌پردازیم. اگر نرخ سرمایش کم باشد حتی اگر دمای محیط کوئنچ هم پایین باشد مانند آنچه در شرایط کوئنچ کوره‌های خلأ با آن مواجهیم و از گاز نیتروژن با دمای محیط برای کوئنچ استفاده می‌شود، ممکن است علیرغم آنکه سختی سطح قطعه به خصوص در قطعات بزرگ در محدوده مناسب باشد، ولی سختی مغز بسیار پایین باشد [1,4,5].

اگر دمای محیط کوئنچ بالا باشد و قدرت جذب حرارت آن هم بالا باشد (مثل نمک مذاب ۲۵۰ درجه سانتیگراد برای فولادهای سردکار و ۵۵۰ درجه سانتیگراد برای فولادهای ابزار گرمکار و تندبر) می‌توان فرآیندهای آستمپرینگ و مارتمپرینگ را که ویژگی‌های منحصر به فردی به قطعه می‌دهند و سختی بالا، اعوجاج کم و چقرمگی بالا را فراهم می‌کند، اجرا نمود.

اگر دمای محیط کوئنچ پایین و قدرت جذب حرارت آن بالا باشد (مانند آنچه در کوئنچ با آب و روغن با آن مواجهیم)، فولاد سختی بسیار بالایی می‌گیرد و می‌توان انتظار داشت سختی سطح و مغز هم اختلاف ناچیزی داشته باشند، هرچند این نرخ بالای سرمایش می‌تواند منجر به اعوجاج و یا حتی شکست قطعه شود [4].

در فولادهای ابزار گرمکار به دلیل وجود مقادیر بالای عناصر مولیبدن (Mo)، وانادیوم (V) و کرم (Cr) سختی پذیری فولاد بالا است و آزمون جامینی هم آن را نشان می‌دهد [2]. در شکل ۱ نمودار جامینی چند فولاد مرسوم از جمله فولاد نزدیک به فولاد ابزار گرمکار ۱.۲۳۴۴ آمده است.



شکل ۱- نمودار جامینی چند فولاد پرکاربرد. نمودار فولاد ۱.۲۳۴۴ نزدیک به 30CrMoV9 میباشد [3].

همانگونه که در این نمودار مشاهده می شود، در فولادهای ساده کربنی اختلاف سختی در سطح و عمق ۶۰ میلیمتری می تواند به 45HRC هم برسد. حال آنکه در مورد فولاد ابزار گرمکار به دلیل وجود عناصر یاد شده، سختی حدود 6HRC افت نموده و از 52 به 46 در عمق ۶۰ میلیمتری کاهش می یابد. این در حالی است که تا عمق ۲۰ میلیمتری این افت تقریباً ناچیز است.

سختی پذیری (Hardenability) توانایی فولاد برای تشکیل مارتنزیت در عمق است و به دلیل وجود این عناصر که سختی پذیری را افزایش می دهند، چنین فولادهایی خاصیت هوا سختی (Air Quench) دارند و امکان سختکاری مقاطع نازک آن ها در محیط های با جذب حرارت پایین نظیر کوره های خلأ وجود دارد [1,2,5].

با این وجود، در مقاطع ضخیم به دلیل وجود شیب حرارتی از سطح به مغز در حین کوئنچ در صورت استفاده از محیط های با قدرت خنک کنندگی پایین (مانند آنچه در کوره های خلأ با فشار کوئنچ پایین وجود دارد)، اختلاف سختی سطح و مغز زیاد خواهد بود.

در حقیقت نتایج تست جامینی ارائه شده برای یک محیط با قدرت خنک کنندگی بسیار بالا است؛ در صورت افت قدرت خنک کنندگی محیط مثل استفاده از هوای فشرده یا نیتروژن برای کوئنچ، فازهای تعادلی در مغز تشکیل شده و علاوه بر ایجاد غیر یکنواختی در خواص که منجر به افت خواص مکانیکی می شود، استحکام مغز را به شدت کاهش داده و قطعه را مستعد شکست در برابر بارهای ضربه ای و فشاری می کند.

علاوه بر این، تنش های ناشی از اختلاف حجم فازهای مختلف نیز در این مرحله، باعث حساس شدن قطعه به ضربه می شود. در کاربردهایی که قطعه تحت بارهای کششی و فشاری سنگین قرار دارد مثل دایکست، فورج و اکستروژن، این موضوع می تواند منجر به شکست قطعه شود [4,5].

برای اجتناب از کلی گویی، باید شدت سرمایش مؤثر را به صورت عددی بررسی نمود. میزان حرارت منتقل شده از سطح قطعه به محیط کوئنچ با رابطه $q = h(T_s - T_m)$ توصیف می شود. در این رابطه T_s دمای قطعه، T_m دمای محیط کوئنچ، h ضریب انتقال حرارت همرفتی است و q شار حرارتی در واحد سطح است و هرچه q بیشتر باشد قدرت خنک کنندگی محیط بالاتر است.

هرچه اختلاف دمای قطعه و محیط کوئنچ بالاتر باشد و هرچه h بالاتر باشد قطعه با نرخ بیشتری حرارت از دست می دهد و سطح و مغز سریع تر با دمای محیط کوئنچ هم دما می شود [5]. h بیشتر از همه به جنس محیط و پس از آن به فشار، جریان، آشفتگی، هندسه و دما وابسته است. بازه های گزارش شده در منابع برای محیط های رایج کوئنچ به شرح زیر است [4,6]:

جدول ۱- بازه تقریبی ضریب انتقال همرفتی محیط های مرسوم کوئنچ [4,6].

محیط	بازه تقریبی h (W/m ² ·K)
گاز با فشار 1-6 bar	50 - 150
گاز با فشار 6-10 bar	150 - 400
حمام نمک آرام	300 - 800
حمام نمک آشفته	500 - 1000
روغن آرام	500 - 1000
روغن آشفته	1000 - 2500
آب آرام	2000 - 10000
آب آشفته	10000 - 20000

لازم به ذکر است اعداد فوق تقریبی است و برای مقایسه بهتر ارائه شده اند و مقدار دقیق h به عوامل بسیار زیادی از جمله نحوه هم زدن، دمای محیط کوئنچ و حجم کل محیط کوئنچ بستگی دارد.

اگر h دو برابر شود، شار حرارتی هم دو برابر می‌شود. اما در قطعات ضخیم، h تنها عامل محدودکننده نیست؛ مقاومت هدایت حرارتی داخل قطعه هم وارد بازی می‌شود. در قطعات ضخیم، حتی اگر h بسیار بالا باشد (مثلاً آب)، انتقال حرارت داخلی می‌تواند گلوگاه شود.

حال نوبت مقایسه روش‌های مختلف عملیات حرارتی در فرایند کوئنچ است:

در روش خلأ، چون h مربوط به کوئنچ با گاز کم است، در قطعات ضخیم و سنگین، این مشکل تشدید شده و اختلاف سختی سطح و مغز زیاد می‌شود، اما در قطعات با ضخامت کم و نسبتاً سبک و در فولادهای با سختی پذیری بالا، مانند H13 این موضوع چالش نیست و باز هم میتوان انتظار سختی بالا و یکنواختی را داشت [3,4,5,6].

در روش حمام نمک از تمامی روش‌های کوئنچ در صورت وجود زیرساخت مناسب می‌توان استفاده نمود، حتی امکان کوئنچ ترکیبی و استفاده از چند محیط مختلف حین کوئنچ در صورت نیاز به خواص ویژه وجود دارد و می‌توان انتظار سختی یکنواخت‌تر سطح و مغز را حتی در قطعات ضخیم مانند قالب‌های دایکست داشت.

در روش اتمسفر کنترل شده و روش اتمسفر محیط، معمولاً از روش کوئنچ در روغن و یا هوای فشرده استفاده می‌شود. در صورت استفاده از روغن احتمال افزایش تنش حین کوئنچ وجود دارد و در صورت استفاده از هوای فشرده احتمال ایجاد پروفیل سختی و کاهش شدید سختی از سطح به مغز وجود دارد.

۴-۳ اعوجاج

برای فهم علت اعوجاج در قالب‌های بزرگ و طویل، باید مکانیک دمای بالا را وارد تحلیل کرد. استحکام فولاد در دمای آستنیت بسیار کم می‌شود، مدول الاستیسیته فولاد در دمای محیط حدود ۲۱۰ گیگاپاسکال است؛ اما در دمای نزدیک به آستنیت (حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد) این مقدار می‌تواند به حدود ۸۰ تا ۱۰۰ گیگاپاسکال کاهش یابد. این افت بیش از ۵۰ درصدی باعث می‌شود قطعه در برابر خمش ثقلی بسیار حساس‌تر شود [1].

اگر قطعه بلند به صورت خوابیده در کوره قرار گیرد، به هر روشی که آستنیت به دلیل آزاد بودن هردو سمت قطعه و نیز تحت وزن خود دچار خمش و کمانش می‌شود. در حین کوئنچ، تنش‌های ناشی از کاهش حجم و انقباض ناشی از تغییر فاز و کاهش دما و آزاد بودن دو سر قطعه، می‌تواند این حالت را تشدید کند و تابیدگی و کمانش دائمی ایجاد نماید.

گزارش‌های صنعتی برای قطعات با طول بلند و نسبت سطح به حجم بالا مانند کانتینرهای دایکست و اکستروژن و پیستون و سیلندرهای این دستگاه‌ها، نشان می‌دهد که در صورتیکه این قطعات به صورت خوابیده عملیات حرارتی شود، تابیدگی در برخی موارد در بازه ۵ تا ۱۰ میلیمتر مشاهده می‌شود. در مقابل، اگر همان قطعه به صورت آویزان (عمودی) عملیات شود، بار در راستای طول توزیع می‌شود، خمش کاهش می‌یابد و در بسیاری موارد تابیدگی به کمتر از ۱ تا ۲ میلیمتر محدود می‌گردد. بنابراین، در قطعات بلند، «چینش و تکیه‌گاه» عامل اصلی کنترل اعوجاج است و قضاوت درباره فناوری بدون اشاره به این عامل، علمی نیست [4].

در کوره‌های خلأ که عموماً از روبرو شارژ می‌شوند، امکان آویزان کردن قطعات بلند حین آستنیت شدن وجود ندارد، مگر در کوره‌های بزرگ و یا کوره‌های خلأ عمودی که از بالا یا پایین شارژ می‌شوند. این مشکل در کوره‌های اتمسفر محافظ پیوسته نیز معمولاً به چشم می‌خورد، اما در کوره‌های اتمسفر محافظ حفظ‌های پیت تاب که معمولاً عمودی هستند و از بالا شارژ می‌شوند، می‌توان قطعات را به صورت آویزان عملیات حرارتی نمود.

در کوره‌های حمام نمک با توجه به ماهیت این کوره‌ها تقریباً تمامی قطعات بلند به صورت آویزان عملیات حرارتی می‌شوند و در صورت رعایت سایر الزامات عملیات حرارتی به این روش، قطعات بلند سختکاری شده در حمام نمک کمترین اعوجاج را خواهند داشت. این موضوع باعث می‌شود در قطعاتی مثل ابزارهای خان‌کشی، عملیات حرارتی حمام نمک کمترین اعوجاج را داشته باشند.

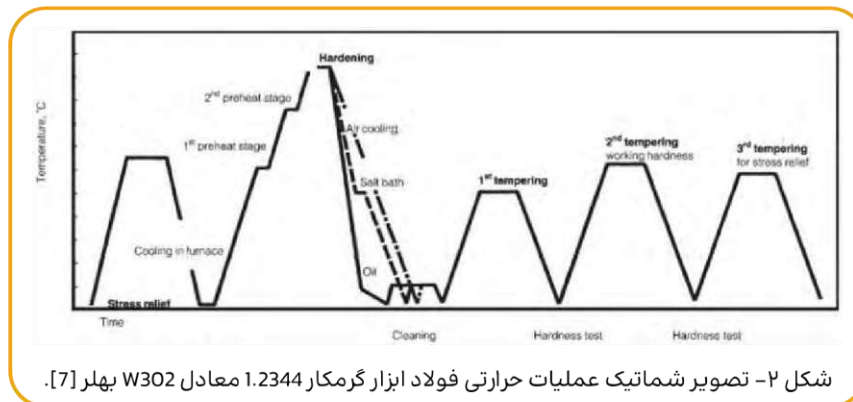
در مورد قطعات کوچک‌تر مثل قالب‌های اکستروژن، که عموماً حفره داخلی دارند در این موارد خوابیده عملیات حرارتی شدنشان در کوره‌های خلأ و اتمسفر محافظ می‌تواند نتایج بهتری داشته باشد [1,4,5]، هر چند با فیکسچر مناسب می‌توان آنها را به صورت خوابیده در حمام نمک هم عملیات نمود.

۴-۴ قابلیت اجرای صحیح پیشگرم

افزایش یکنواخت و کنترل شده دمای قطعات از دمای محیط تا دمای آستنیت نقش تعیین کننده‌ای در کیفیت عملیات حرارتی دارد. در کوره‌های خلأ و اتمسفر محافظ، افزایش دمای قطعات از دمای محیط تا دمای آستنیت به آهستگی اتفاق می‌افتد و تنش بسیار کمی به قطعه وارد می‌شود. چالش پنهان این روش آن است که اغلب قطعات باید زمان نسبتاً کوتاهی بین ۱۵ تا ۳۵ دقیقه را در محدوده دمای آستنیت (۱۰۲۰ تا ۱۰۸۰ درجه سانتیگراد) باقی بمانند تا از رشد دانه‌ها در آنها جلوگیری شود، اما در کوره خلأ و اتمسفر محافظ عملاً این کار ممکن نیست و در عمل قطعه از دمای ۸۵۰ درجه در محدوده آستنیت قرار می‌گیرد و در صورت طولانی شدن این زمان، ریزساختار درشت دانه می‌شود [1,4,5]. این مشکل در عملیات حرارتی فولادهای تندبر که باید زمان نگهداریشان در دمای انحلال (که معمولاً بالای ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد است) بین ۳ تا ۵ دقیقه باشد بسیار بیشتر است، چون امکان اینکه بتوان در زمان کوتاهی دمای کوره را از ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد به ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد رساند وجود دارد و عملاً تمام زمانی که قطعه در این بازه زمانی قرار دارد جزو زمان انحلال محسوب شده و قطعه درشت دانه می‌شود.

در استانداردهای عملیات حرارتی و روش‌های توصیه شده فولادسازان معتبر از جمله بهلر برای عملیات حرارتی این فولادها در کوره‌های حمام نمک که در شکل ۲ آمده است، دو مرحله پیشگرم در دماهای ۶۵۰ و ۸۵۰ درجه سانتیگراد پیش‌بینی شده است. در صورتی که این دو مرحله رعایت شود، قطعه در حمام آستنیت ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد خیلی زود به دمای انحلال رسیده و بیشتر از زمان مورد نیاز در دمای آستنیت باقی نمی‌ماند و ریزدانه خواهد شد [1,4,7].

در فولادهای تندبر هم در صورت استفاده از کوره‌های پیشگرم مناسب حمام نمک، می‌توان زمان واقعی انحلال را بر قطعه اعمال کرد و از نگهداری بیش از حد مجاز اجتناب نمود. جی دون کیم و همکارانش نیز در تحقیقات خود به همین موضوع اشاره مینمایند [8].



متأسفانه رعایت صحیح سیکل پیشگرم در اغلب کارگاه‌های عملیات حرارتی به روش حمام نمک در ایران اجرا نمی‌شود و قطعه از دمای محیط و پس از پیشگرم جزئی تا حداکثر دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد، مستقیماً وارد حمام آستنیت می‌شوند. این موضوع علاوه بر شوک حرارتی که به قطعه وارد می‌کند، باعث می‌شود قطعه زمان طولانی در دمای آستنیت باقی مانده و دانه درشت شود [1].

۴-۵ اعمال دما و زمان مورد نیاز برای آستنیت شدن

قطعات متناسب با وزن و مدول شکل خود به دماها و زمان‌های متفاوت آستنیت نیاز دارند. هرچه قطعه کم وزن تر و نازک تر باشد زمان کمتری برای آستنیت شدن نیاز دارد و هرچه حجیم تر و سنگین تر باشد به زمان بیشتری نیاز دارد.

در کوره‌های خلأ و کوره‌های پیت تایپ، به دلیل محدودیت تکنولوژیک که امکان باز کردن درب کوره و بیرون کشیدن قطعات حین عملیات حرارتی وجود ندارد، در این موارد و به ویژه در کوره‌های بزرگ، در صورتی که نتوان آرایش بار را انجام داد، اپراتور ناچار است قطعاتی با مدولها و وزن‌های متفاوت - و حتی گاهی جنس‌های متفاوت - را در یک شارژ بچیند و همین باعث می‌شود قطعات یا به اندازه کافی آستنیت نشوند و کاربیدها به خوبی در ریزساختار حل نشوند و یا زمان بیشتری در این دما بمانند و دانه درشت شوند که باز هم به افت خواص منجر خواهد شد [1,4,5].

یکی از نقاط قوت برجسته کوره‌های حمام نمک این است که به دلیل نوع تکنولوژی آن‌ها، می‌توان هر قطعه را در زمان مناسب خودش از کوره بیرون کشید و در محیط کوئنچ مناسب همان قطعه کوئنچ نمود. کاهش یا افزایش دمای آستنیت نیز به سادگی انجام شده و می‌توان در یک فاصله کوتاه، کوره را روی دماهای مختلف تنظیم نمود.

اما محدودیت عمده کوره‌های حمام نمک در این زمینه، مشکل بودن رساندن دمای کوره به دمای مورد نیاز برای عملیات حرارتی فولادهای گرمکار است، این محدودیت‌ها عبارتند از:

- توان حرارت دهی اغلب کوره‌های حمام نمک محدود است و امکان رساندن دما به محدوده بالای ۱۰۲۰ درجه سانتیگراد برای آستنیت کردن فولادهای ابزار گرمکار را ندارند،
- بالاتر رفتن دمای کوره از ۹۵۰ درجه سانتیگراد، استهلاک پاتیل و کوره را به شدت افزایش می‌دهد و به همین دلیل عملیات حرارتی کنندگان از آن احتراز می‌کنند
- نوع نمک مورد استفاده برای فولادهای گرمکار علاوه بر اینکه قیمت بیشتری دارند باید توان تحمل دماهای بالا را داشته باشد و نمک‌های مرسوم مورد استفاده برای آستنیت کردن سایر فولادهای ابزار، که دمای آستنیت پایین‌تری دارند، در دمای بالای ۱۰۲۰ درجه سانتیگراد به شدت تبخیر می‌شوند و حتی به سطح قطعه هم آسیب می‌رسانند.

به همین دلیل است که در اغلب کارگاه‌های حمام نمک، دمای آستنیت ۹۵۰ تا ۹۸۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شود که باعث می‌شود انحلال کاربیدها به طور کامل انجام نشود و در نتیجه علیرغم آنکه به دلیل کوئنچ در روغن، قطعه سختی خوبی می‌گیرد اما راندمان قطعه در نهایت پایین‌تر از سایر روش‌ها باشد. حال آنکه اگر دو کوره پیش‌گرم ۶۵۰ و ۸۵۰ درجه سانتیگراد استفاده شده و از نمک و دمای مناسب برای آستنیت کردن قطعات گرمکار استفاده شود، چه بسا این قطعات راندمان بالاتری از سایر روش‌ها داشته باشند [1,4,5].

۶-۴ هزینه عملیات حرارتی

هزینه قالب به ازای واحد محصول، نقش مهمی در قیمت تمام شده محصول دارد. انتخاب روش مناسب عملیات حرارتی و از آن مهمتر اجرای صحیح آن می‌تواند هزینه‌های قالب به ازای واحد محصول را کاهش دهد.

جمع هزینه‌های فرآیند عملیات حرارتی شامل موارد زیر است:

- لجستیک
- تعرفه خدمات عملیات حرارتی
- تمیزکاری
- ماشینکاری نهایی
- راندمان

در زمان انتخاب روش بر اساس هزینه، توجه صرف بر هزینه عملیات حرارتی، باعث می‌شود سایر زوایای هزینه مغفول بماند.

● لجستیک

با توجه به خدماتی بودن فرآیند عملیات حرارتی، توجه به هزینه لجستیک مهم است اما معمولاً در مقایسه با سایر هزینه‌های فرآیند عملیات حرارتی، بخصوص در مورد فولادهای ابزار، از اهمیت بسیار کمتری برخوردار است. این هزینه در مورد فولادهای معمولی که ارزش افزوده پایینی دارند و عملیات حرارتی آنها از حساسیت کمتری برخوردار است اهمیت دارد.

● تعرفه خدمات عملیات

تعرفه عملیات حرارتی تابع عوامل زیادی است:

- هزینه سرمایه‌گذاری اولیه
- هزینه‌های سربار
- هزینه نیروی انسانی

- هزینه تعمیرات و نگهداری
- هزینه مواد مصرفی
- هزینه انرژی
- سود مورد انتظار

در صنعت عملیات حرارتی سه مورد اول از جنس هزینه های ثابت و سه مورد آخر از جنس هزینه متغیر است و مورد آخر تابع سیاستگذاری شرکت است و ترکیب عوامل فوق این تعرفه را شکل می دهد.

در عملیات حرارتی، با توجه به ماهیت خدماتی آن، سهم هزینه متغیر نسبت به هزینه کل کم است و اگر OEE یک واحد عملیات حرارتی بالا باشد، با توجه به ظرفیت بالایی که از خط تولید استفاده می شود هزینه ثابت به ازای واحد محصول را به شدت کاهش می دهد و سازمان می تواند تعرفه نهایی خود را کاهش دهد.

برعکس اگر از ظرفیت عملیات حرارتی یک خط به خوبی استفاده نشود سرشکن هزینه های ثابت بسیار بالا خواهد بود و قیمت تمام شده به ازای واحد محصول به شدت افزایش یافته و حتی ممکن است با تعرفه بسیار بالا هم سازمان وارد ضرر شود.

رعایت کامل مراحل عملیات حرارتی و استفاده از مواد با کیفیت نیز می تواند هزینه ها را افزایش دهد، هرچند همانگونه که گفته شد سهم این هزینه ها که هزینه متغیر محسوب می شود در قیمت تمام شده نهایی خیلی زیاد نیست.

هزینه سرمایه گذاری اولیه و تعمیرات و نگهداری نیز به ویژه در روش خلاء بسیار مهم است. رقم بالای سرمایه گذاری اولیه مورد نیاز و هزینه بالای تعمیرات و نگهداری این روش باعث می شود قیمت تمام شده این روش به نسبت حمام نمک و اتمسفر بالاتر باشد.

با توجه به آنچه گفته شد، هرچند رسیدن به کیفیت ارزان نیست اما نه قیمت بالا نشان دهنده کیفیت است و نه قیمت پایین نشان دهنده ضعف در اجرا. حجم بالای سفارشات و لحاظ نمودن حاشیه سود کمتر، اجازه می دهد یک واحد عملیات حرارتی حتی با تعرفه مناسب هم بتواند اصول عملیات حرارتی را به درستی رعایت نماید و تعرفه بالاتر هم الزاما نشان دهنده کیفیت بالاتر نیست و می تواند ناشی از هزینه سربار بالای ناشی از پایین بودن حجم تولید و یا حاشیه سود بالای در نظر گرفته شده باشد.

● تمیزکاری

در مورد کیفیت سطحی متفاوت روش های مختلف عملیات حرارتی قبلا به تفصیل صحبت شد. بهترین کیفیت سطحی را روش خلاء دارد و پس از آن اتمسفر محافظ کیفیت بهتری دارد. اگر پروتکل های عملیات حرارتی از جمله استفاده از انجام صحیح مراحل، استفاده از نمک با کیفیت، و اجرای دستورالعمل های شستشورعایت شود، کیفیت سطحی حمام نمک نیز برای اغلب کاربردهای صنعتی، مطلوب خواهد بود.

اما اگر از نمک با کیفیت پایین استفاده شود یا شستشو درست انجام نشود، هزینه فرآیند تمیزکاری می تواند از تعرفه عملیات حرارتی هم بیشتر شود و حتی باعث زیرسایز رفتن قطعه و ضایع شدن آن شود.

اگر قطعه دارای سوراخهای ریز باشد (مثل سوراخهای تعبیه شده برای پیران های باریک) استفاده از حمام نمک چالش برانگیز است و خالی کردن این سوراخها از نمک بسیار دشوار می شود و در این شرایط بهتر است از خلاء یا اتمسفر محافظ استفاده شود.

● ماشینکاری نهایی

اعوجاج بخشی از ذات فرآیند عملیات حرارتی است و در نظر نگرفتن امکان تابیدگی حین عملیات حرارتی ریسک بزرگی است و بخصوص برای قطعات با ضخامت های مختلف غیر قابل اجتناب است. هرچند در برخی موارد اگر فولاد با کیفیت باشد، باربرداری حین قالبسازی اصولی باشد، تنش گیری قبل از عملیات حرارتی انجام شده باشد، پیشگرم ها، آستنیته کردن، کوئنچ و تمپر ها درست انجام شده باشد، می توان انتظار داشت اعوجاج به حداقل خود کاهش یابد.

با این وجود ماشین کاری نهایی قالب با توجه به بالا بودن سختی قطعه پس از عملیات حرارتی بسیار سخت و هزینه بر خواهد بود. بر این اساس انتخاب فرایندی که با توجه به موفولوژی قطعه کمترین اعوجاج را ایجاد کند و انتخاب مجری عملیات حرارتی که اصول عملیات حرارتی را رعایت کند حتی اگر تعرفه بالایی داشته باشد، ارجحیت دارد.

● راندمان

یک عملیات حرارتی غیر اصولی ممکن است تعرفه پایی داشته باشد، اما اثری که بر کاهش عمر قطعه نهایی خواهد داشت، باعث می شود هزینه قالب به ازای واحد محصول به شدت افزایش یابد. در نتیجه انتخاب فرآیند مناسب و مجری عملیات حرارتی که بتوانید به اجرای صحیح فرآیند توسط او اعتماد کنید، از اهمیت بالایی در کاهش هزینه کل عملیات حرارتی برخوردار است.

۵. نقشه راه

این مقاله نشان داد که نتیجه عملیات حرارتی فولادهای گرمکار تابع یک متغیر واحد نیست. سه مسیر اصلی گرمایش تا دمای آستنیت (نمک، خلأ، اتمسفر کنترل شده) هر کدام مزایا و محدودیت های خود را دارند. داده های عددی نشان دادند که شدت سرمايش مؤثر در گاز، نمک و روغن بازه های متفاوتی دارد که خواص متفاوتی ایجاد می کند و این اختلاف در قطعات ضخیم معنادارتر است.

همچنین تحلیل مکانیکی نشان داد در قطعات بلند، کاهش مدول الاستیسیته در دمای آستنیت می تواند چينش را به عامل غالب اعوجاج تبدیل کند.

از این رو، به جای پرسش «کدام روش بهترین است؟» باید پرسید: با این ضخامت، این هندسه، این تolerانس اعوجاج، این کیفیت فولاد، این زیرساخت اجرایی و این هزینه، کدام مسیر و کدام کیفیت اجرا، بهترین نتیجه را دارد و قابل کنترل تر است. بهترین روش مطلق وجود ندارد؛ بهترین انتخاب برای شرایط مشخص وجود دارد.

بر اساس تحلیل سختی پذیری، شدت سرمايش مؤثر، رفتار مکانیکی در دمای بالا و تجربه های صنعتی، می توان سناریوهای زیر را تفکیک کرد:

الف - قطعات بلند و حساس به اعوجاج

(مانند کانتینر و پیستون در قالب های دایکست و اکستروژن)

در این قطعات:

- طول زیاد است
- نسبت طول به ضخامت بالا است
- حساسیت به تابیدگی زیاد است
- کاهش مدول الاستیسیته در دمای آستنیت اثرگذار است

در چنین شرایطی، امکان عملیات به صورت آویزان (عمودی) مزیت تعیین کننده دارد که در بسیاری از کارگاه ها این امکان در حمام نمک بیشتر فراهم است.

در این سناریو، اگر مسیر پیش گرم، دمای آستنیت و کوئنچ مرحله ای به درستی اجرا شود، حمام نمک می تواند اعوجاج را در محدوده تolerانس صنعتی نگه دارد و سختی سطح و مغز یکنواختی را فراهم کند.

در مقابل، اگر قطعه در کوره خلأ یا اتمسفر محافظ به صورت خوابیده عملیات شود، احتمال تثبیت خمش ثقلی و کمایش افزایش می یابد.

نتیجه این سناریو:

برای قطعات بلند و حساس به اعوجاج، حمام نمک با اجرای صحیح معمولاً کم ریسک تر است.

ب - قطعات با ضخامت کم (کمتر از حدود ۵۰ میلیمتر) و حساس به کیفیت سطحی

در این قطعات:

- مقاومت انتقال حرارت داخلی غالب نیست
- سختی مغز به راحتی تأمین می شود
- شدت سرمايش بسیار بالا ضرورت ندارد

در چنین حالتی، مزیت کیفیت سطحی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. کوئنچ گازی در خلأ یا کوره‌های پیت تایپ با اتمسفر محافظ، که کنترل مناسب فشار و جریان دارند می‌تواند:

- سطحی تمیز و بدون دکر بوره ایجاد کند
- پرداخت کاری نهایی را کاهش دهد
- یکنواختی ظاهری بهتری ارائه دهد

نتیجه این سناریو: برای قطعات با ضخامت محدود و حساس به کیفیت سطح، خلأ و پیت تایپ گزینه منطقی و کارآمدی است.

پ- قطعات ضخیم (مثلاً بالاتر از ۱۵۰-۲۰۰ میلیمتر)

در این قطعات:

- تحقق سختی مغز به شدت سرمایه‌ش مؤثر وابسته می‌شود
- اختلاف H بین گاز و نمک و روغن اهمیت پیدا می‌کند
- زمان عبور از ناحیه بینیتی بحرانی است

در چنین شرایطی، اگر هدف سختی یکنواخت تر مغز باشد، مسیرهایی که امکان شدت سرمایه‌ش مؤثر بالاتر با مرحله‌ای کنترل شده را فراهم می‌کنند (مانند نمک) مزیت دارند. با این حال، اگر سختی پایین تر مجاز باشد و تنش پذیری مهم تر از سختی حداکثر باشد، خلأ و پیت تایپ نیز می‌تواند عملکرد قابل قبولی ارائه دهد.

نتیجه این سناریو:

در قطعات بسیار ضخیم، انتخاب وابسته به اولویت سختی مغز در برابر کنترل تنش است. اگر پایین بودن سختی مغز مشکلی ایجاد نکند - که در بسیاری از کاربردهای سنگین صنعتی مطلوب نیست - می‌توان از سختکاری در خلأ استفاده نمود در غیر این صورت بهتر است از روش حمام نمک استفاده نمود.

ت- زمانی که کیفیت سطحی بسیار حیاتی است و پرداخت نهایی پیش بینی نشده است

در این حالت:

- جلوگیری از اکسیداسیون و دکر بوره اهمیت دارد
 - یکنواختی ظاهری مهم است
- خلأ و اتمسفر محافظ در این سناریو برتری نسبی دارند.

۶- جمع بندی نهایی:

انتخاب روش عملیات حرارتی در فولادهای گرمکار نباید مبتنی بر نام فناوری باشد، بلکه باید مبتنی بر موارد زیر باشد:

- هندسه قطعه
- ضخامت مقطع
- حساسیت به اعوجاج
- الزامات سختی مغز
- کیفیت سطح مورد نیاز
- زیرساخت اجرایی موجود
- توانایی مجری فرآیند چه از لحاظ زیرساخت و چه از لحاظ دانش و تعهد برای اجرای صحیح
- فرآیند
- هزینه عملیات حرارتی

هنگامی که در غبار انتخاب‌ها ایستاده‌اید، بهترین روش وجود ندارد؛ تنها بهترین تصمیم وجود دارد.

منابع

- [1] Krauss, G., Steels: Processing, Structure, and Performance, ASM International.
- [2] ASTM A255 – Standard Test Method for Hardenability of Steel (Jominy Test).
- [۳] چنارانی، مجتبی. فولادهای صنعتی. تهران: فانوس دانش؛ ۱۳۹۶.
- [4] ASM Handbook, Vol. 4: Heat Treating, ASM International.
- [۵] چنارانی، مجتبی، «عملیات حرارتی تحت خلأ - ویژگی ها و محدودیت ها»، نشریه ریخته گری تحت فشار، سال اول، شماره ۷، ۱۳۹۶.
- [6] Totten, G.E., Steel Heat Treatment Handbook, CRC Press.
- [7] Böhler Edelstahl GmbH & Co KG. W302 – Hot Work Tool Steel, DIN 1.2344 / AISI H13. Technical Datasheet. Kapfenberg, Austria.
- [8] Kim, J.D., Kim, K.S. Effects of Vacuum Heat Treatment and Salt Bath Heat Treatment Conditions on Mechanical Properties of High Speed Tool Steel. J Korean Soc Heat Treat. 2013;26(1):7–13.



فولاد حامیران

شرکت حامی آلیاژ آسیا

اولین و بزرگترین مرجع تخصصی

انواع فولادهای آلیاژی و
آهن آلات صنعتی و ساختمانی
با بیش از شش دهه تجربه

☎ 021-63511

www.hamiransteel.com

📷 hamiransteel 📍 hamiransteel

