

QUENCHING FOR STEELS

1385/07/27

MSA

Translated to Persian by: A.R.Nouri
Heat treatment Expert
Metallurgy Goup
Foring Unit

ASM METALS HANDBOOK

VOL. 4

***HEAT
TREATMENT***

۲۷/۰۷/۱۳۸۵

کوئنچ به فرآیندی اطلاق می شود که قطعه از دمای آستنیتنه کردن و یا دمای انحلال سریعاً سرد شود که معمولاً این دما برای فولادها در محدوده 815-870 C قرار دارد. فولادهای زنگ نزن برای اینکه مقدار کاربیدهای موجود در مرزدانه به کمترین مقدار خود برسد و یا توزیع فریت را اصلاح سازد، کوئنچ می شوند ولی فولادهایی مثل فولادهای کربنی، کم آلیاژی و ابزار برای دستیابی به ریزساختار مارتنزیتی کوئنچ می شوند. زمانی می شود ادعا کرد که کوئنچ بدرستی انجام شده است که به ریزساختار، سختی، استحکام و یا چقرمگی مورد نظر برسیم در حالیکه مقدار تنش های پس ماند، اعوجاج و احتمال ترک برداری کاهش یابد.

انتخاب محیط کوئنچ بستگی به سختی پذیری آلیاژ، ضخامت و شکل قطعه کار و نرخ سردایش لازم برای دستیابی به ریزساختار مطلوب دارد. محیط های کوئنچ متداول مایع و یا گازی هستند. محیط های مایع عبارتند از:

۱. روغن که گاهی اوقات افزودنی هایی دارد

۲. آب

۳. محلولهای پلیمری مایع

۴. آب که مقداری نمک و یا افزودنی های خورنده caustic دارد

محیط های گازی که برای کوئنچ استفاده می شوند شامل گازهای خنثی مثل هلیوم، آرگون و نیتروژن هستند. این گازها معمولاً هنگامی بکار می روند که آستنیتنه کردن در خلا انجام شده باشد.

قابلیت سخت گردانی فولاد بوسیله محیط کوئنچ به ویژگی های سرد کنندگی محیط کوئنچ بستگی دارد. هم چنین موثر بودن کوئنچ بستگی به ترکیب شیمیایی فولاد، محیط کوئنچ و شرایط کوئنچ دارد.

اصول کوئنچ و بررسی محیط کوئنچ:

همانطوریکه قبلاً نیز بدان اشاره شد، هدف از کوئنچ، سرد کردن سریع قطعه از دمای آستنیتنه بنحویکه در ریزساختار بینیت و یا اغلب مارتنزیت تشکیل شود، است. در واقع عملکرد اصلی محیط کوئنچ، کنترل نرخ انتقال حرارت از سطح قطعه کار است.

فرآیند کوئنچ:

نرخ انتقال حرارت و مکانیسم آن در طی سرد شدن در محیط کوئنچ باعث شده است که انواع مختلفی روش کوئنچ بوجود

آید:

- کوئنچ مستقیم
- کوئنچ زمانی
- کوئنچ انتخابی
- کوئنچ با اسپری
- کوئنچ با مه
- کوئنچ منقطع

کوئنچ مستقیم Direct Quenching: به روش کوئنچی اطلاق می شود که قطعه کار مستقیماً از دمای آستنیت به وارد محیط

کوئنچ شود. به این دلیل از این نام استفاده می شود که با روش های دیگر کوئنچ که مستقیماً انجام نمی شود، تمییز شود.

کوئنچ زمانی Time Quenching: این روش هنگامی استفاده می شود که لازم است نرخ سردایش قطعه در حین کوئنچ

تغییر یابد. این تغییر می تواند شامل کاهش و یا افزایش نرخ سردایش باشد که بستگی به نتایج مورد نظر بعد از فرآیند کوئنچ

دارد. روش مرسوم در این نوع کوئنچ این است که ابتدا قطعه کار در محیطی کوئنچ می شود که نرخ سردایش بالایی داشته

باشد (مثل آب) و در این محیط تا زمانی نگهداشته میشود که دمای قطعه به زیر دماغه در منحنی TTT برسد در این نقطه

، قطعه به محیط کوئنچ دوم که نرخ سردایش کمتری دارد (مثل روغن) انتقال داده میشود تا در محدوده تشکیل مارتزیت آرام

سرد شود. در برخی موارد محیط دوم می تواند هوا یا یک گاز خنثی باشد. این روش معمولاً برای کاهش اعوجاج، ترک

برداری و تغییرات ابعادی استفاده می شود.

کوئنچ انتخابی Selective Quenching: موقعی استفاده می شود که بخواهیم مناطقی از سطح قطعه تحت تاثیر محیط

کوئنچ قرار نگیرد. اینکار با عایق کردن مناطق مورد نظر جهت آرام سرد کردن آن مناطق انجام می گیرد و مناطق دیگر با

تماس با محیط کوئنچ با سرعت بالا سرد خواهند شد.

کوئنچ اسپری Spray Quenching: در این نوع کوئنچ، محیط کوئنچ با فشار بالا به آن منطقه از سطح قطعه که می

خواهیم با نرخ بالا سرد شود، اسپری می شود. بخاطر اینکه قطرات محیط کوئنچ با شدت بالا بر سطح قطعه برخورد می کنند

و حرارت را سریعتر انتقال می دهند، نرخ سردایش بالاتر خواهد بود. با این وجود، اسپری با فشار کم و همراه با محیط های پلیمری خاص مناسب هستند.

کوئنچ با مه Fog Quenching: در این روش از قطرات ریز محیط کوئنچ در یک حامل گازی به عنوان محیط کوئنچ استفاده می شود. این روش تقریباً مشابه با روش کوئنچ اسپری بوده ولی جریان کوئنچ که حاوی درصد کمتری از قطرات کوئنچ است سبب می شود که نرخ سردایش در این روش کمتر از روش کوئنچ با اسپری باشد.

کوئنچ منقطع Interrupted Quenching: در این روش، ابتدا قطعه در محیط مناسب با نرخ بالایی تا دمای بالای M_s سرد می شود و سپس بمدت زمان مشخصی در این دما نگهداشته می شود و در نهایت در هوا سرد خواهد شد. این روش خود مشتمل بر سه نوع است: آستمپرینگ، مار کوئنچ (مار تمپرینگ) و کوئنچ ایزوترمال. دمایی که در آن کوئنچ قطع می شود، طول مدت نگهداری و نرخ سردایش با توجه نوع قطعه کار و ضخامت آن متغیر است. مقایسه کوئنچ مستقیم و منقطع در شکل ۱ نشان داده می شود.

آستمپرینگ: در این روش قطعه کار از دمای آستنیت تا دمای $230-400C$ (با توجه به نوع فولاد) به سرعت سرد شده و در این دما نگهداشته می شود تا استحاله ایزوترمال انجام شده و سپس در هوا سرد می شود.

این روش کوئنچ برای فولادهای کربن متوسط و فولادهای آلیاژی استفاده می شود. فولادهای کم آلیاژی با ضخامت 9.5 mm و نازکتر و فولادهای سختی پذیر با ضخامت 50 mm را می توان آستمپر کرد.

حمام های نمک مذاب برای آستمپرینگ بسیار مناسب هستند. البته بعضی روغن ها نیز برای این استفاده می شوند. اما حمام های نمک مذاب بخاطر انتقال حرارت بهتر و خطر کم آتش گرفتن بهتر بوده و ترجیح داده می شوند.

مار کوئنچ: این فرآیند مشابه آستمپرینگ است که در طی آن قطعه از دمای آستنیت تا دمای نزدیک M_s با سرعت بالا سرد می شود. آنچه باعث می شود این فرآیند با آستمپرینگ متفاوت باشد، در زمان نگهداری قطعه در دمای انقطاع کوئنچ است. در این روش، نگهداری فقط بمقداری است که توزیع دما و درجه حرارت در سطح قطعه یکنواخت باشد و لزومی ندارد که زمان آنقدر باشد تا استحاله انجام شوند. وقتی که درجه حرارت قطعه یکنواخت شد، قطعه از حمام نمک خارج شده و تا

دمای اتاق در هوا سرد خواهد شد. برای این روش هم می توان از روغن استفاده کرد اما بدلیل خواص انتقال حرارت بهتر، نمک مذاب ترجیح داده می شود.

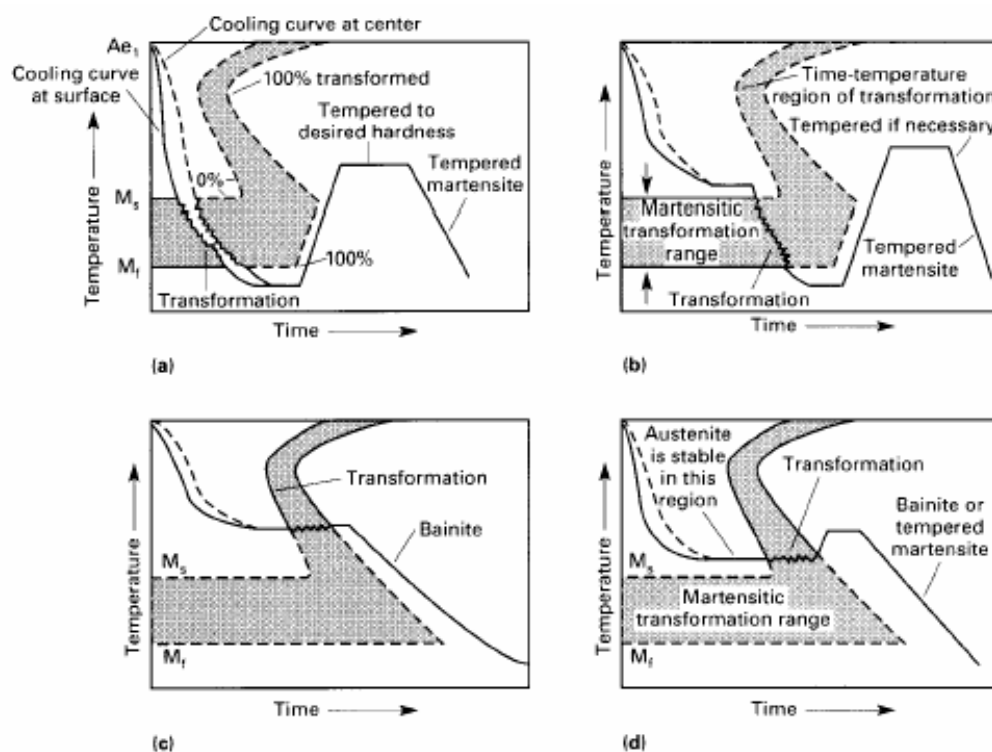


Fig 1 Comparison of cooling rates and temperature gradients as workpieces pass into and through martensite transformation range for a conventional quenching and tempering process and for interrupted quenching processes. (a) Conventional quenching and tempering processes that use oil, water, or polymer quenchants. (b) Marquenching, which uses either salt or hot oil as a quenchant. (c) Austempering, which uses a salt as a quenchant. (d) Isothermal quenching, which uses either salt or hot oil as a quenchant. Source: Ref 1

سرد کردن بعد از خارج شدن از حمام نمک معمولاً در هوای آرام انجام می شود. فولادهای با سخی پذیری بالا به ترک حساس ترند و اگر سرعت سردایش بالاتر باشد، مارتنزیت تشکیل خواهد شد. آلیاژهای کربوریزه که مرکز نرمتری دارند، در حین سردایش و تشکیل مارتنزیت به ترک حساس نیستند و نرخ سردایش از دمای M_s بحرانی نیست. مارتمپرینگ الزام عدم انجام برگشت بعد از آبکاری را حذف نمی کند و ریزساختار شبیه ساختار بعد از کوئنچ مستقیم است. کوئنچ ایزوترمال: این روش مشابه با کوئنچ آستمپرینگ بوده که در آن قطعه از دمای آستنیت در محدوده تشیل فریت و پرلیت سریعاً تا دمای M_s سرد می شود. در این روش از دو محیط کوئنچ برخلاف آستمپرینگ استفاده می شود. بعد از اولین کوئنچ و قبل از آغاز استحاله، قطعه سریعاً به محیط کوئنچ دوم انتقال داده می شود که معمولاً دمایش بالاتر از محیط اول است. بعد از انجام ایزوترمال استحاله، در هوا سرد می شود.

منحنی های سردایش و تاثیر فرآیند بر شکل آنها

آزمایش کیفیت و کارایی محیط کوئنچ بوسیله با آنالیز منحنی سردایش تعیین می شود و شاید یکی از متداولترین آزمایش ها برای مشخص کردن خصوصیات و ویژگی های محیط کوئنچ مورد نظر باشد. این منحنی ها با کوئنچ نمونه های آزمایش (پروب) و اتصال ترموکوپل ها به آنها و محیط کوئنچ بدست می آیند. جنس نمونه های آزمایش (پروب) می تواند همان فولاد مورد نظر، زنگ نزن و یا آلیاژهای پایه نیکل مثل اینکونل باشد. استفاده از فولادهای پایه نیکل و یا زنگ نزن این مزیت را دارد که نیاز به ایجاد اتمسفر محافظ را حذف می کند. از نقره نیز برای تولید پروب می توان استفاده کرد.

پروبهای آزمایش تا دماهای بالا حرارت داده می شوند و سپس در محیط مورد نظر کوئنچ می شوند. یک ثبات با سرعت بالا برای ثبت تغییرات دما بکار می رود. منحنی حاصل تغییرات درجه حرارت را نسبت به زمان نشان خواهد داد. در واقع این منحنی ها نشانگر انتقال حرارت و رابطه آن با جرم و مساحت قطعه هستند.

این منحنی ها بیانگر نرخ سردایش قطعه هستند. اغلب داده های مربوط به استحاله های متالورژیکی براساس نرخ سردایش لازم برای دستیابی به ریزساختار خاص تعریف می شوند و این نرخ ها نیز از داده های بدست آمده از آنالیز منحنی های سردایش منتج می شوند. در یک فولاد معمولی، در نرخ سردایش های کم ریزساختار فریتی تشکیل می شود و با افزایش نرخ سردایش به ترتیب پرلیت، بینیت و در نهایت مارتنزیت تشکیل خواهد شد.

در هنگام کوئنچ، سه مرحله انتقال حرارت در داخل محیط کوئنچ اتفاق می افتد که بنام مراحل A, B, C شناخته می شوند. این منحنی های دما-زمان در شکل ۲ نشان داده می شوند. نمونه پروب استفاده شده برای این منحنی ها، نمونه به ضخامت 38 mm از فولاد زنگ نزن بوده که به مرکز هندسی نمونه متصل شده بودند. این نمونه ها در دمای 845 C در آب آرام و ساکن آنیل انحلالی شده اند. در شکل ۲ علاوه بر منحنی سردایش، منحنی نرخ سردایش نیز نشان داده شده است.

مرحله A: در این مرحله، فیلمی از بخار پیرامون قطعه تشکیل می شود. از اینرو این مرحله بنام مرحله سردایش با فیلم بخار نیز نامیده می شود. به این پدیده که در طی آن فیلم پیوسته و یکنواخت از بخار آب تشکیل می شود، پدیده Leidenfrost نیز اطلاق می شود. تا زمانیکه انتقال حرارت از مرکز قطعه بطرف بیرون ادامه یابد و مقدار آن از گرمای لازم برای تبخیر آب فراتر باشد، این فیلم بخار گسترش یافته و حفظ می شود.

در این مرحله، فیلم بخار آب مثل یک عایق عمل کرده و انتقال حرارت از طریق تشعشع از فیلم انجام می شود و از اینرو در این مرحله نرخ سردایش نسبتاً کم خواهد بود. در این مرحله، دمایی تعریف می شود که دمای مشخصه یا Characteristic Temperature بوده و آن عبارت از دماییست که در بالاتر از آن دما، فیلم بخار آب پایدار خواهد بود. به این دما Leidenfrost Temperature نیز اطلاق می شود. Beck نشان داد که برای یک محیط کوئنچ، این دما مستقل از دمای اولیه قطعه ایست که در آن کوئنچ می شود. (شکل ۳)

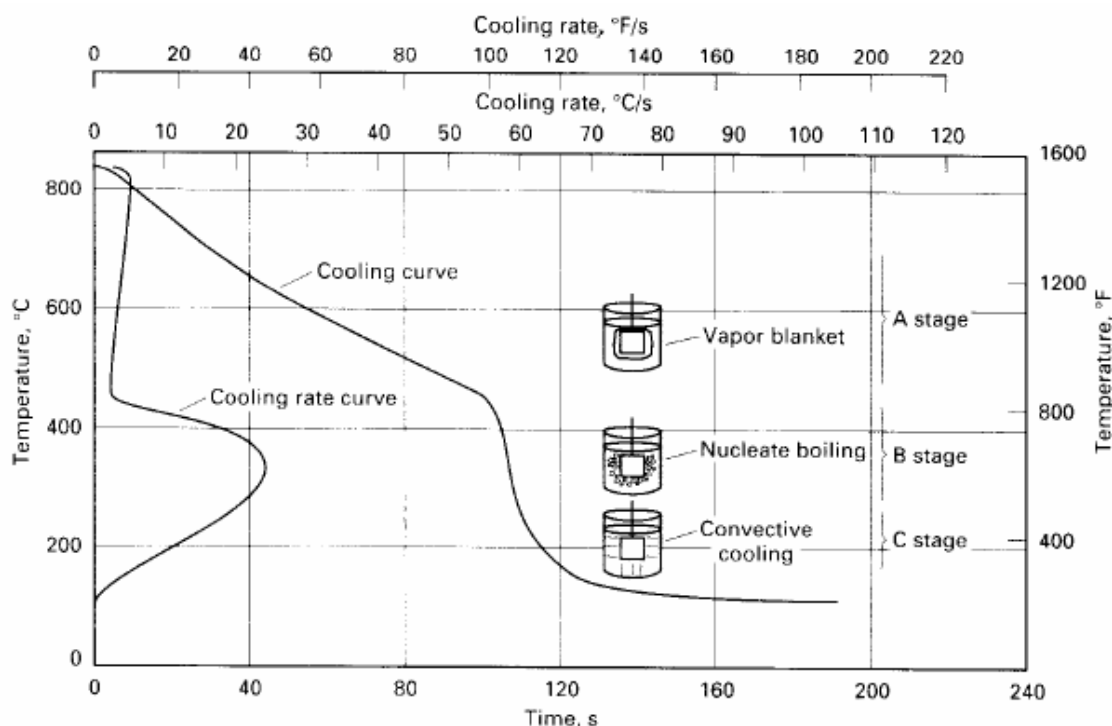


Fig 2 Cooling curve and cooling rate curve at the center of a 25 mm (1.0 in.) diameter probe quenched with 95 °C (200 °F) water flowing at 15 m/min (50 ft/min)

در محیط های کوئنچ که حاوی 5 wt% از مواد یونی و بیشتر نظیر کلرید پتاسیم، کلرید لیتیم، هیدروکسید پتاسیم و اسید سولفریک هستند، مرحله A از منحنی های سردایش حذف می شوند و منحنی آنها از مرحله B شروع می شوند. در محیط های کوئنچ غیر فرار مثل حمام های نمک مذاب، مرحله A دیده نمی شود. ولی در محیط های گازی مانند هوا و گازهای خنثی تنها مکانیسم انتقال حرارت، مرحله A است.

مرحله B: بیشترین نرخ سردایش در این مرحله اتفاق می افتد که همان مرحله شروع جوشش محیط کوئنچ است. در این مرحله، فیلم بخار اطراف قطعه می شکند و هنگام جوشیدن محیط در سطح فلز، به بیشترین میزان انتقال حرارت اط فلز می توان دست یافت. با برخورد محیط کوئنچ با سطح فلز و تبخیر سریع آن حرارت سریعاً از آن خارج می شود.

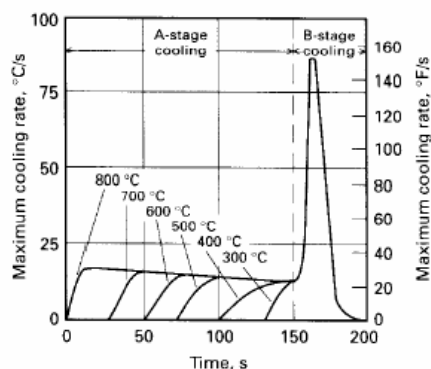


Fig 3 Cooling rate in a 24 mm ($1\frac{3}{16}$ in.) diam by 72 mm ($2\frac{7}{16}$ in.) long Inconel 600 probe quenched from temperatures between 300 and 800 °C (570 to 1470 °F) into 100 °C (212 °F) water. Source: Ref 2

مرحله C: این مرحله، مرحله سرد شدن با محیط کوئنچ نیز نامیده می شود و زمانی آغاز می شود که دمای سطح فلز تا زیر دمای جوش محیط کاهش یابد. در کمتر از این دما، جوشیدن متوقف می شود و انتقال حرارت از طریق هدایت و همرفتی انجام می شود. این مرحله از سردایش بستگی به ویسکوزیته محیط کوئنچ دارد و در صورت ثابت ماندن سایر فاکتورها، با افزایش ویسکوزیته، نرخ سردایش کاهش خواهد یافت.

تلاطم: به حرکت نسبی محیط کوئنچ نسبت به قطعه اطلاق می شود. در این روش محیط کوئنچ حرکت می کند. گاهی اوقات، قطعه در داخل محیط کوئنچ به حرکت در آورده می شود. تلاطم فاکتور مهمی در انتقال حرارت است. تلاطم باعث می شود که فیلم بخار در مرحله A سریعتر شکسته شده و انتقال به مرحله B تسریع شده و انتقال حرارت بیشتر خواهد شد. با افزایش تلاطم، طول مرحله A کوتاهتر شده و نرخ سردایش در هر سه مرحله افزایش می یابد.

دمای بالای حمام کوئنچ سبب می شود که طول منطقه A بیشتر شده و نرخ سردایش در مناطق B, C کاهش یابد. با این وجود اگر دمای روغن کمی بالا باشد، بدلیل کاهش ویسکوزیته روغن، نرخ سردایش را افزایش می دهد. افزایش دمای

روغن سبب بهبود و اصلاح خواص خیس کنندگی روغن می شود و به انتقال حرارت کمک می کند. بنابراین کارآیی سردایشی روغن تا حد زیادی مستقل از تغییرات متوسط دمای آن است.

در صورتیکه تلاطمی در سیستم وجود نداشته باشد، نقاط گرم در سطح قطعه ایجاد می شود و لذا باعث می شود که کوئنچ بصورت غیریکنواخت انجام شود. نتیجه نهایی این حالت را می توان در توزیع نامناسب سختی در سطح قطعه، افزایش ترک های سطحی، اعوجاج و تنش های پس ماند بالا جستجو کرد.

عوامل موثر بر نرخ انتقال حرارت نرخ انتقال حرارت از سطح قطعه کار تحت تاثیر اکسیداسیون سطحی است. با توجه به ضخامت اکسید روی قطعه کار، نرخ انتقال حرارت می تواند زیاد یا کم شود.

تاثیر شکل نامنظم بر جریان حرارتی در کوئنچ یک دنده در شکل ۵ نشان داده شده است. در ریشه های دندانه ها بدلیل دمای بالا هنوز حبابهای بخار بزرگی دیده می شوند که شاید بدلیل عدم تلاطم مناسب باشد. در صورتیکه حرارت دهی با مکانیسم القایی و یا مشعلی انجام شود، لایه های سطحی بصورت یکنواخت حرارت می بینند و در نتیجه کوئنچ بشکل یکنواخت و سریع انجام می شود.

نرخ دقیق سردایش و محدوده دمایی سه منطقه در نمودار سردایش با توجه به نوع محیط کوئنچ و وزن و مساحت سطح قطعه متغیر است. بیشترین نرخ کوئنچ در محلول های آب نمک (Brine)، آب، محلول پلیمر سنتزی، روغن، حمام نمک، بسترسیال و گازها دارند. البته با توجه با پارامترهایی همچون دما، میزان تلاطم، ویسکوزیته وزن مولکولی و قابلیت خیس کنندگی می توان به مقادیر مختلفی از نرخ های سردایش دست یافت.

منحنی های سردایش اغلب بستگی به اندازه قطعه و جنس آن، محل ترموکوپل در نمونه آزمایش و شرایط کوئنچ دارند. منحنی های سردایش که برای یک سری از نمونه ها بدست می آیند، را می توان برای نمونه های دیگر با بکار بردن معادله های مناسب انتقال حرارت استفاده کرد.

آنالیز منحنی سردایش

آنالیز منحنی سردایش در هنگام مطالعه مکانیسم های انتقال حرارت در محیط کوئنچ در محدوده ای از درجه حرارت بسیار مفید هستند. هم چنین می توان داده های کمی انتقال حرارت را بشکل تابعی از دما در آورد.

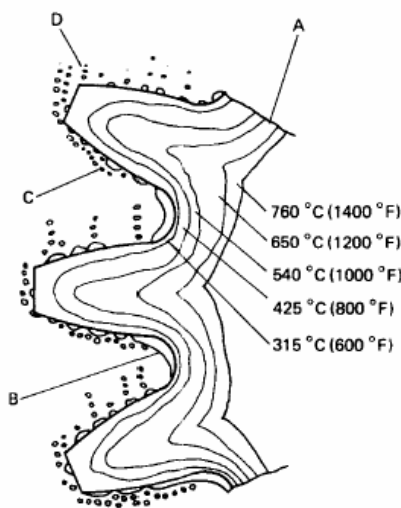


Fig 5 Temperature gradients and other factors affecting the edgewise quenching of a gear in a quiescent volatile liquid. A, flow of heat from hot core of gear. Temperature and flow rate vary with time; B, vapor blanket stage still exists due to large source of heat and poor agitation; C, trapped vapor bubbles condensing slowly; D, vapor bubbles escaping and condensing

امروزه، منحنی های نرخ سردایش که مهمترین نتیجه داده های دما - زمان نسبت به زمان هستند، در مقایسه با منحنی های دما-زمان بسیار قابل اعتمادتر هستند. در صورتیکه داده ها با ثبات های الکترونیکی و یا کامپیوترها بدست آیند، به راحتی می توان منحنی های نرخ سردایش را محاسبه کرد.

ویژگی انتقال حرارت یک محیط کوئنچ را می توان با کمک نمونه های تست استاندارد (پروپ) محاسبه کرد. این نمونه ها می توانند بشکل میلگرد، ورق و یا کره باشند. متداولترین نمونه به شکل استوانه با طول چهاربرابر قطر است تا اثر انتهای کوئنچ را حذف نماید. ترموکوپل در مرکز هندسی نمونه قرار می گیرد. در برخی موارد، حتی می توان از پروبهایی استفاده کرد که دو ترموکوپل داشته و ترموکوپل دومی در و یا نزدیکی سطح قرار می گیرد. این حالت، بررسی چگونگی تغییرات دما در مقطع نمونه را میسر می سازد.

دو پارامتر مهم در آنالیز منحنی های سردایش عبارتند از بیشترین نرخ سردایش $(\dot{T}_{max}, CR_{max})$ بهترین حالت برای موقعی که بخواهیم به بیشترین سختی دست پیدا کنیم، اینست که CR_{max} در دماهای بالاتر از منطقه فریت و پرلیت اتفاق افتد که این باعث می شود استحاله فریت و پرلیت رخ ندهد. نرخ سردایش CR در ناحیه ای که مارتنزیت از آستنیت

تشکیل می شود، باید تا حد امکان کم باشد تا احتمال ترک برداری و اعوجاج کاهش یابد. CR_{300} به این خاطر اهمیت دارد که در نزدیکی دمای تشکیل مارتنزیت می باشد.

Tensi معیارهای نرخ سردایشی ارایه کرد که در شکل ۶ نشان داده شده اند:

- زمان t_u ، دما T_u و نرخ سردایش \dot{T}_{DHmin} که در مرحله گذر از منطقه A به منطقه B اتفاق می افتد.
- بیشترین نرخ سردایش CR_{max} و دمای T_{max}
- نرخ سردایش در دمای معین که در مرحله C در دمای $300C$ (CR_{300}) و یا $200C$ (CR_{200}) رخ می دهد.

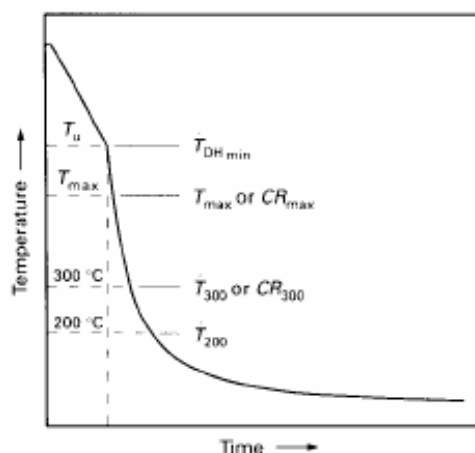


Fig 6 Critical cooling curve parameters. Source: Ref 6

یکی از محدودیت هایی که در مراحل آنالیز منحنی کوئنچ تابحال وجود دارد، ارتباط کم خواص متالورژیکی است. Tensi این مورد را نیز اشاره کرده است که در آن بیان می کند زمان خیس کنندگی محیط کوئنچ Rewetting time با سختی بعد از کوئنچ در ارتباط است. برای بدست آوردن این زمان که بیانگر قابلیت خیس کنندگی محیط کوئنچ است، از یک پروب با چند ترموکوپل استفاده می شود (شکل ۷) مقادیر حاصل جهت دستیابی به رابطه سختی HRC و زمان خیس شوندگی فولادهای مختلف از جمله AISI 1045 بکار می رود که در شکل ۸ نمونه ای از آن نشان داده می شود. روش دیگر که برای تخمین و پیش بینی سختی بعد از کوئنچ فولاد با کمک از منحنی کوئنچ وجود دارد، استفاده از آنالیز فاکتور کوئنچ است. آنالیز فاکتور کوئنچ، ارتباط شکل منحنی کوئنچ با خواص فولاد مورد نظر را نشان می دهد. جزئیات بیشتر در بخش "آنالیز فاکتور کوئنچ" توضیح داده خواهد شد.

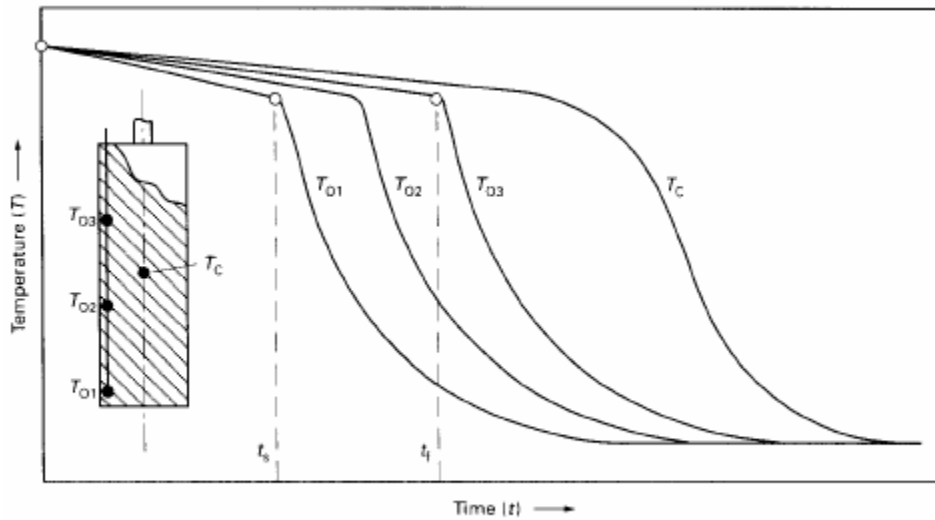


Fig 7 Wetting kinetics data obtained by using a multiple thermocouple probe. T_c , center thermocouple placement; T_{O1} , T_{O2} , and T_{O3} , outside thermocouple placement

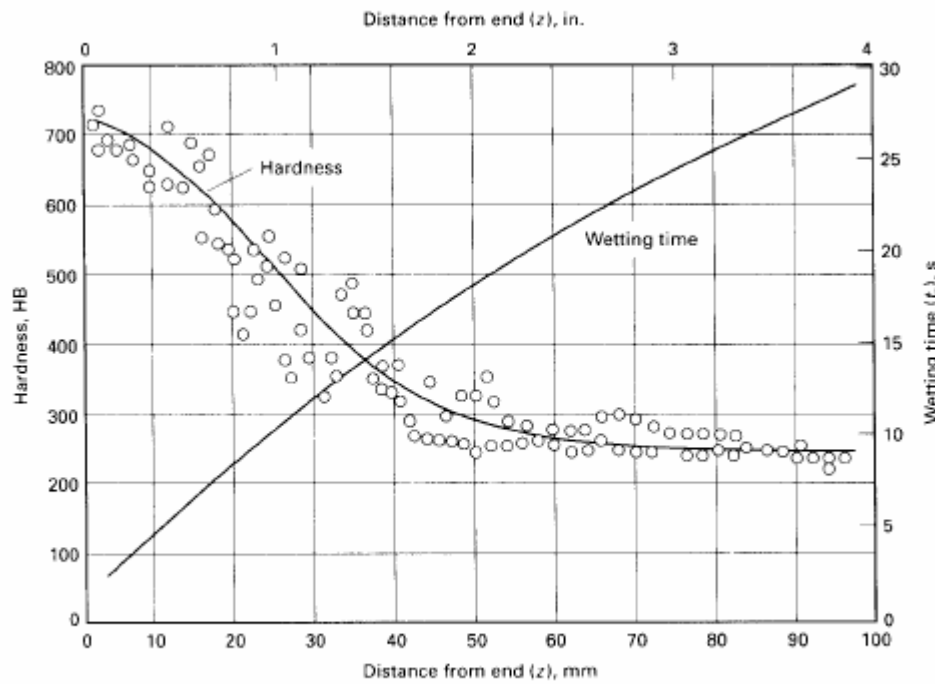


Fig 8 Wetting time and surface hardness of quenched 1045 steel as a function of the distance from the end of the specimen. Source: Ref 11

انتقال حرارت در حین کوئنچ: انتقال حرارت در سطح قطعه در حین کوئنچ را می توان با استفاده از فرمول های ریاضی

برحسب ضریب انتقال حرارت موثر فصل مشترک بیان نمود. محیط کوئنچ برای اینکه بتواند از استحاله آستنیت به فریت و یا

پرلیت جلوگیری نماید و بتواند باعث تشکیل مقادیر معینی مارتزیت و یا بینیت در ریزساختار شود، باید از ضریب انتقال حرارت بالایی در فصل مشترک برخوردار باشد.

ضریب انتقال حرارت فصل مشترک را می توان از فرمول زیر محاسبه کرد:

$$h = \frac{q}{A(T_1 - T_2)} \quad (\text{Eq.1})$$

در این فرمول، h ضریب انتقال حرارت فصل مشترک، A سطح قطعه، T_1 دمای سطح قطعه و T_2 دمای محیط کوئنچ می باشند.

فرمول دیگر که در کوئنچ فولاد استفاده زیادتری دارد، عدد گراسمن H است که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$H = \frac{h}{2k} \quad (\text{Eq.2})$$

بنابراین، ضریب انتقال حرارت فصل مشترک برابر حاصل ضرب عدد گراسمن در دو برابر قابلیت هدایت حرارتی فلز مورد نظر است.

اگر لازم باشد که ضریب انتقال حرارت فصل مشترک در شرایط معینی محاسبه شود، از یک پروب استوانه ای شکل استفاده می شود که ترموکوپل ها در مرکز استوانه قرار می گیرند و تغییرات دما را در بازه دمایی مشخص (595-705 C) ثبت می کنند. در نهایت داده های بدست آمده بشکل عبارتهای چند جمله ای با ضریب انتقال حرارت فصل مشترک ارتباط داده می شوند. اگر ضریب انتقال حرارت فصل مشترک موثر را بر دو برابر هدایت حرارتی فلز تقسیم کنیم، عدد گراسمن H بدست خواهد آمد.

Table 1 Approximate Grossmann quenching severity factor of various media in the pearlite temperature range

Circulation or agitation	Grossmann quench severity factor, H			
	Brine(a)	Water(a)	Oil(a) and salt	Air(b)
None	2	0.9-1.0	0.25-0.30	0.02
Mild	2-2.2	1.0-1.1	0.30-0.35	...
Moderate	...	1.2-1.3	0.35-0.40	...
Good	...	1.4-1.5	0.4-0.5	...
Strong	...	1.6-2.0	0.5-0.8	...
Violent	5	4	0.8-1.1	...

(a) Ref 3. (b) Ref 14. Source: Ref 15

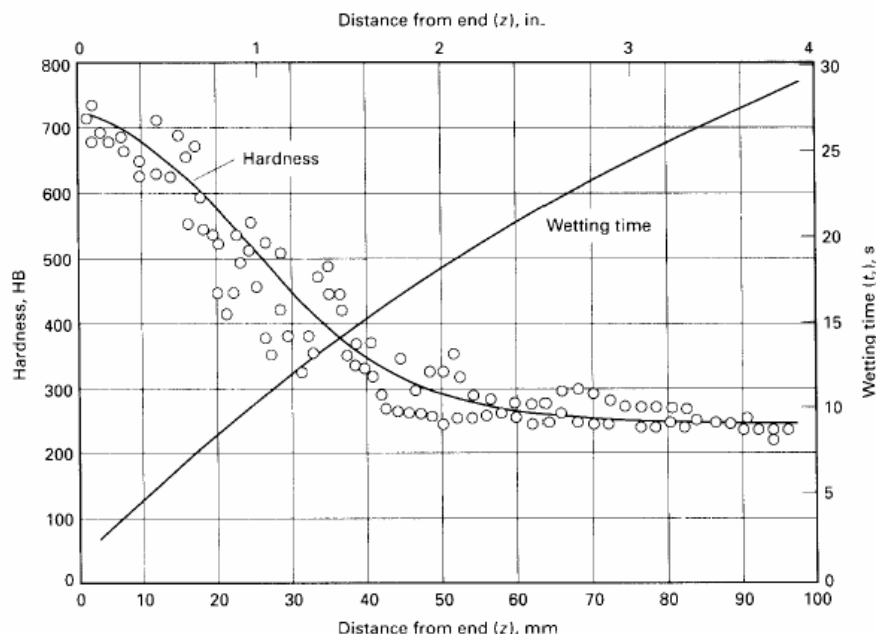


Fig 8 Wetting time and surface hardness of quenched 1045 steel as a function of the distance from the end of the specimen. Source: Ref 11

جدول ۱ که در سال ۱۹۴۷ به چاپ رسیده است، عدد گراسمن را برای محیط های خاصی در حالت های مختلف محاسبه و آورده است. این جدول راهنمای خوبی برای آبکارها بشمار می رود.

معمولا آبکارها به ارقام دقیق تری از آنچه که در جدول ۱ آورده شده اند، نیاز دارند. به عنوان مثال، نرم افزارهایی که اخیرا برای پیش بینی سختی بعد از کوئنچ طراحی شده اند، نیاز به تعریف فاکتور کوئنچ (H) دارند. بنابراین باید بدنبال روش های ساده برای تعیین مقدار فاکتور کوئنچ بود.

اخیرا الگوریتمی برای محاسبه فاکتور کوئنچ ارایه شده است که شکل کلی آن در زیر آمده است:

$$H=A(CR_{1300})^C \exp(BX)^D \quad (Eq.3)$$

در این فرمول CR_{1300} نرخ کوئنچ در دمای $C = 705$ است و A, B, C, D ضرایب آماری هستند که در جدول ۲ مقادیرشان آورده شده اند. برای محاسبه این مقادیر از استوانه هایی از جنس 304 با قطر های 13, 25, 38, 50 mm استفاده شده است. که اطلاعات لازم در شکل ۹ نشان داده شده اند.

شدت محیط کوئنچ به توانایی محیط در انتقال حرارت از سطح فلز داغ بستگی دارد. داده های کوئنچ که از منحنی های کوئنچ بدست آمده اند، در جدول ۳ برای آب، روغن سریع، روغن معمولی، محلول پلیمری 25% پلی وینیل پیرولیدین و هوا

در سرعت‌های و دماهای مختلف آورده شده‌اند. یکی از ابزارهای مفیدی که این داده‌ها در اختیار قرار می‌دهند، توضیح چگونگی وابسته بودن ضریب انتقال حرارت به شرایط استفاده از محیط کوئنچ می‌باشد.

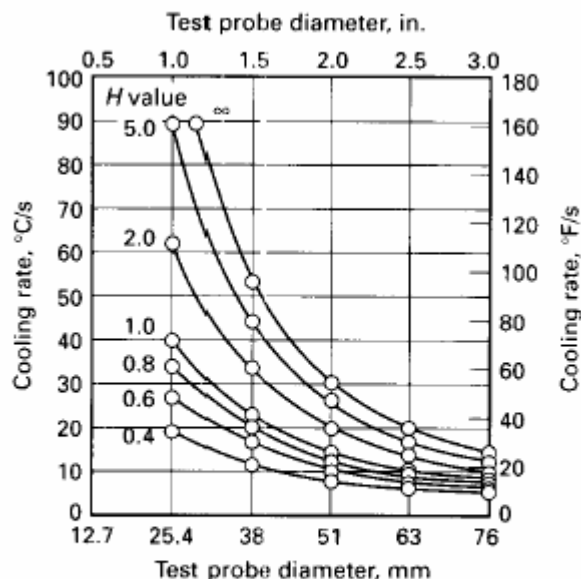


Fig 9 Calculation of the Grossmann constant, H , from cooling rate data at a temperature of 705 °C (1300 °F)

Table 3 Grossmann numbers and film coefficients for selected quenchants

Quenchant	Quenchant temperature		Quenchant velocity		Grossmann number, $(H = h/2k)$	Effective film coefficient	
	°C	°F	m/s	ft/min		W/m ² · K	Btu/ft ² · h · °F
Water	32	90	0.00	0	1.1	5000	880
			0.25	50	2.1	9000	1600
			0.51	100	2.7	12000	2100
			0.76	150	2.8	12000	2100
			0.00	0	0.2	1000	180
Fast oil	60	140	0.25	50	0.6	2500	440
			0.51	100	1.5	6500	1100
			0.76	150	2.4	10500	1850
			0.00	0	0.5	2000	350
25% polyvinyl pyrrolidone	43	110	0.25	50	1.0	4500	790
			0.51	100	1.1	5000	880
			0.76	150	1.5	6500	1200
			0.00	0	0.8	3500	620
Conventional oil	65	150	0.25	50	1.3	6000	1100
			0.51	100	1.5	6500	1200
			0.76	150	1.8	7500	1300
Martempering oil	150	300	0.51	100	0.7	3000	530
			0.51	100	1.2	5000	880
Air	27	80	0.00	0	0.05	200	35
			2.54	500	0.06	250	44
			5.08	1000	0.08	350	62

Source: Ref 12

همانطوریکه در جدول ۳ نشان داده می شود، فاکتور گراسمن برای محیط کوئنچ آب آرام در دمای 32C برابر ۱ و ضریب انتقال حرارت فصل مشترک 5000 W/m².K است. ضریب انتقال حرارت موثر فصل مشترک برای این آب در این دما با افزایش سرعت حرکت آب از 0.25 و 0.5 m/s به ترتیب 9000 و 12000 W/m².K خواهد شد. هرچه انتقال حرارت بیشتر باشد، نرخ سردایش نیز بیشتر می شود. آب سرد که قدرت سردکنندگی نسبتاً بالایی دارد، سبب افزایش گرادیان حرارتی بین سطح و مرکز و یا بین مقطع نازک و ضخیم شده و در نتیجه احتمال ترک برداری و یا اعوجاج را افزایش خواهد داد. با افزایش دمای آب، ضریب انتقال حرارت موثر فصل مشترک کاهش می یابد. آب آرام در دمای 55 C ضریب انتقال حرارت 1000 W/m².K داشته در حالیکه با افزایش سرعت آب به 0.76 m/s این مقدار تا 10500 W/m².K در همان دما افزایش می یابد.

شدت کوئنچ: Tensi و همکاران دیگر روشی را برای محاسبه شدت کوئنچ در مقیاس کارگاهی و آزمایشگاهی پیشنهاد کرده اند. روش لاسچیک که یکی از همکاران وی بود، براساس محاسبه فلاکس حرارتی در سطح قطعه با اندازه گیری گرادیان حرارتی از سطح به مرکز یک پروب با قطر 50 mm و در طول 200 mm بود. این نوه پروب در شکل ۱۰ نشان داده می شود.

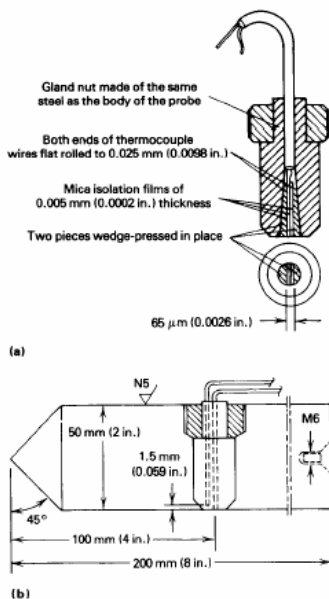


Fig 10 Schematic of a Lišić-NANMAC probe that incorporates fast-response thermocouples to provide transient thermal measurements of metal surface temperatures. (a) Probe construction. (b) Probe installed in a test specimen

محاسبه منحنی های سردایش با کمک از فرمول زیر انجام می شود:

$$\Phi = \lambda (\delta T / \delta n) \quad (\text{Eq.4})$$

در این فرمول فلاکس حرارتی Φ (W/m²)، هدایت حرارتی فلز پروب بر حسب δT ، گرادیان حرارتی در پروب و عمود بر سطح δn می باشند. نوعی از منحنی های سردایش و فلاکس حرارتی که با این روش بدست آمده اند، در شکل ۱۱ نشان داده شده اند.

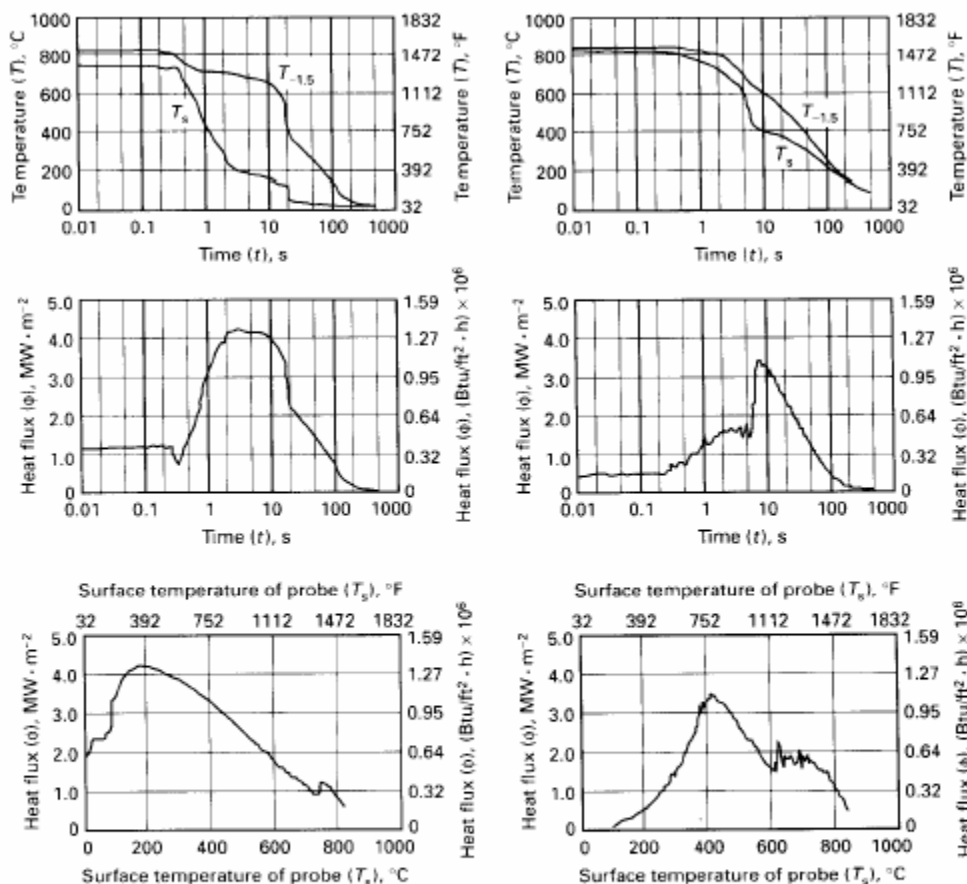


Fig 11(a) Heat transfer characteristics of unagitated tap water at 20 °C (70 °F). Top: Recorded cooling curves for the very surface of the probe, T_s , and for the point 1.5 mm (0.059 in.) below the surface $T_{-1.5}$, during quenching in plain water at 20 °C (70 °F) without agitation. Middle: Relevant heat flux versus surface temperature curve. Bottom: Heat flux versus surface temperature curve

Fig 11(b) Heat transfer characteristics of unagitated mineral oil at 20 °C (70 °F). Top: Recorded cooling curves for the very surface of the probe, T_s , and for the point 1.5 mm (0.059 in.) below the surface $T_{-1.5}$, during quenching in mineral oil at 20 °C (70 °F) without agitation. Middle: Relevant heat flux versus surface temperature curve. Bottom: Heat flux versus surface temperature curve

علاوه بر داده های حاصل از این نوع پروبها، نمونه دومی نیز با همان اندازه و نمونه جومینی از همان فولاد در شرایط مشابه کوئنچ می شوند. سپس از سطح تا مرکز و به فواصل $R, 1/2 R, 3/4 R$ سختی سنجی می شوند. از این داده های برای

ایجاد یک پایگاه داده ای مناسب برای شرایط مختلف کوئنچ و نیز تعیین اندازه متوسط جومینی استفاده می شوند. مراحل مختلف و مرحله به مرحله روش لایچ عبارت است از:

● مرحله ۱: ثبت مقدار اندازه گیری شده شدت کوئنچ برای شرایط کوئنچ بر حسب دمای سطح پروب $T_s(C)$ ، زمان

$$t(s) \text{ و فلاکس حرارتی پروب } (MW/m^2)$$

● مرحله ۲: مشخص کردن نوع فولاد و شرایط کوئنچ

● مرحله ۳: نمونه را براساس شرایط ذکر شده در مرحله ۲ کوئنچ می کنند.

● مرحله ۴: مقطع زنی و سختی سنجی براساس شکل ۱۲

● مرحله ۵: با کمک منحنی جومینی برای فولاد مورد نظرتان، میزان سختی معادل جومینی را در

$$E_s, E_{1/4R}, E_{1/2R}, E_{3/4R}, E_C \text{ تعیین کنید.}$$

● مرحله ۶: شدت کوئنچ را براساس فرمول زیر برای هر کدام از شرایط یاد شده محاسبه کنید:

$$E_i = A \cdot (D \cdot \exp B_1) / (H \cdot \exp B_2) \quad (\text{Eq 5})$$

در این فرمول، E_i نقاط متناظر و با فواصل یکسان با منحنی جومینی هستند و A, B و C ضرایب رگراسیون، D قطر میلگرد و H فاکتور شدت کوئنچ گراسمن می باشند.

روابط زیر براساس آنالیز رگراسیونها بدست آمده اند:

$$E_s = D \exp 0.718 / (5.11 \cdot H \exp 1.28) \quad (\text{Eq 6})$$

$$E_{3/4R} = D \exp 1.05 / (8.62 \cdot H \exp 0.668) \quad (\text{Eq 7})$$

$$E_{1/2R} = D \exp 1.16 / (9.45 \cdot H \exp 0.51) \quad (\text{Eq 8})$$

$$E_{1/4R} = D \exp 1.14 / (7.7 \cdot H \exp 0.44) \quad (\text{Eq 9})$$

$$E_C = D \exp 1.18 / (8.29 \cdot H \exp 0.44) \quad (\text{Eq 10})$$

این معادلات برای $20\text{mm} < D < 90\text{ mm} \ \& \ 0.2 < I < 2.0 \ \& \ 1\text{mm} < E < 40\text{ mm}$ صادق هستند و با کمک از این

معادلات و نیز منحنی های جومینی مربوطه می توان توزیع سختی در سایر قطعات را نیز تعیین کرد.

کاربرد منحنی های سردایش

آب محیط کوئنچ بسیار عالی و ارزان قیمت است که قابلیت انتقال حرارت آن بستگی به دما و سرعت نسبی قطعه و آب دارد. آب قدرت سردایش بسیار قوی دارد بطوریکه روغن و سایر پلیمرهای آبی در مقایسه با آن از شدت کوئنچ متوسطی برخوردار هستند.

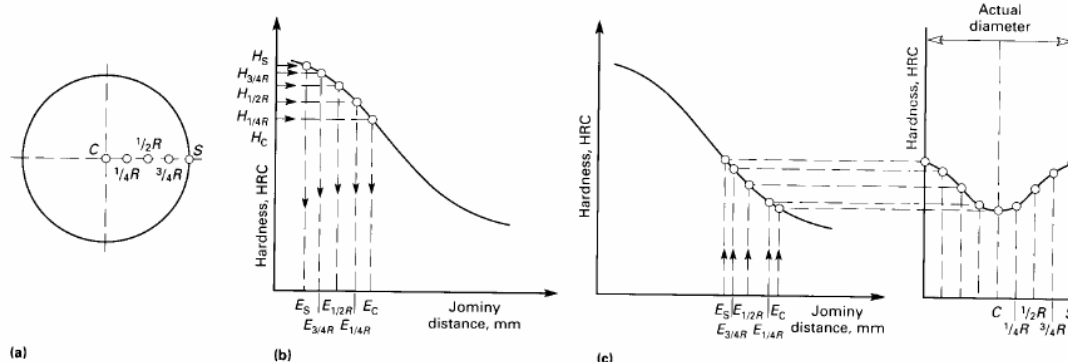


Fig 12 Procedure for predicting hardness distribution in a steel bar using a Jominy hardenability curve. (a) Cross section of a 50 mm (2 in.) diameter end quench test specimen. (b) Determination of Grossmann quench intensity factor. (c) Determination of equivalent Jominy distance and actual bar diameter

اثر دمای وان: تاثیر دمای وان آب بر منحنی های کوئنچ و نیز نرخ کوئنچ با استفاده از میلگرد قطر 38 mm در دماهای مختلف وان آب (27,32,60,71 C) بررسی شده که در شکل ۱۳ نتایج مشاهده می شود. سرعت آب در وان 0.25m/s است. تمام پروب ها در دمای 845 C و در آب با سرعت 0.25 m/s کوئنچ شده اند. برخی از مشخصات این محیط ها در جدول ۴ ارایه شده اند. نرخ سردایش آب با دمای 60 C در دمای 705 C برابر 9.4 C/s است در حالیکه همان آب با دمای 27 C نرخ سردایشی برابر با 32.8 C/s در دمای 705 C ایجاد می کند که تقریباً ۳٫۵ برابر نرخ سردایش آب با دمای 60 C است.

Table 4 Effects of quenchant temperature on cooling rates and predicted hardness in 38.1 mm (1.5 in.) diameter 4130 low-alloy steel bars quenched in water (velocity at 0.25 m/s, or 50 ft/min) from 845 °C (1550 °F)

Bath temperature		Cooling rate at						Film coefficient	
		705 °C (1300 °F)		345 °C (650 °F)		205 °C (400 °F)			
°C	°F	°C/s	°F/s	°C/s	°F/s	°C/s	°F/s	W/m ² · K	Btu/ft ² · h · °F
27	80	32.6	58.6	14.6	26.2	7.3	13.2	9382.9	1652.5
32	90	32.3	58.1	14.6	26.3	7.2	13.0	9024.6	1589.4
38	100	31.0	55.8	14.3	25.8	7.0	12.5	7645.4	1346.5
49	120	24.3	43.7	14.4	25.9	6.8	12.2	3504	617.1
60	140	9.3	16.8	14.3	25.7	6.3	11.3	754.0	132.8
71	160	5.6	10.1	13.7	24.6	5.9	10.6	417	73.5
82	180	4.7	8.5	13.5	24.2	5.4	9.7	341	60.1
93	200	3.5	6.3	13.2	23.7	5.1	9.1	241	42.5
100	212	3.0	5.4	12.6	22.6	5.5	9.9	203	35.8

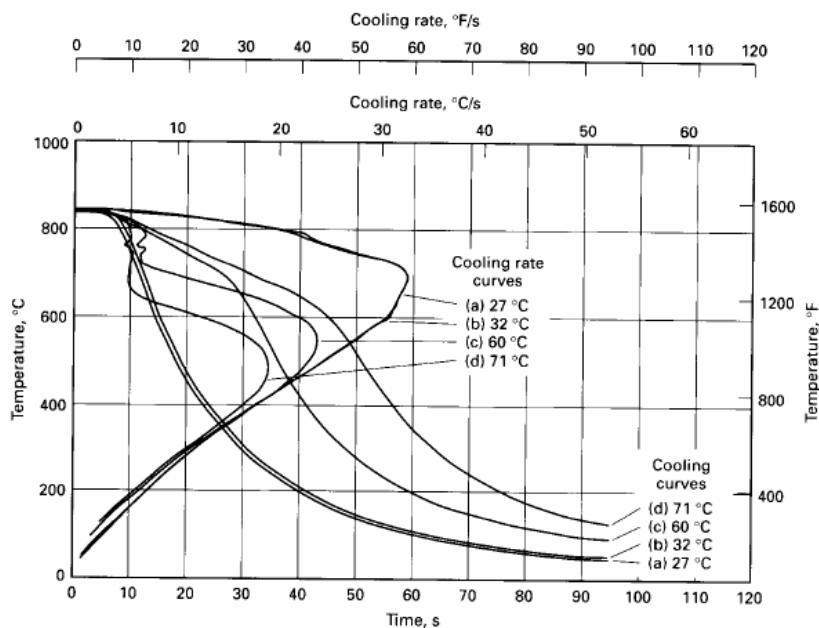


Fig 13 Cooling curves and cooling rate curves produced by 27, 32, 60, and 71 °C (80, 90, 140, and 160 °F) water that is flowing at 15 m/min (50 ft/min) past a 38 mm (1.5 in.) diameter bar

اثر محیط کوئنچ: تاثیر محیط کوئنچ بر نرخ سردایش شکل ۱۴ این تاثیر نشان داده شده است. این منحنی ها از کوئنچ یک میلگرد با قطر 25.4 mm که در آب، محلول آبی گلیکول پلی آلکالی 20 %، روغن متحرک، روغن آرام و روغن مارتمپر در دماهای 32, 49, 65, 65, 150 C کوئنچ شده است، بدست آمده اند. منحنی ها شکلهای مختلفی دارند.

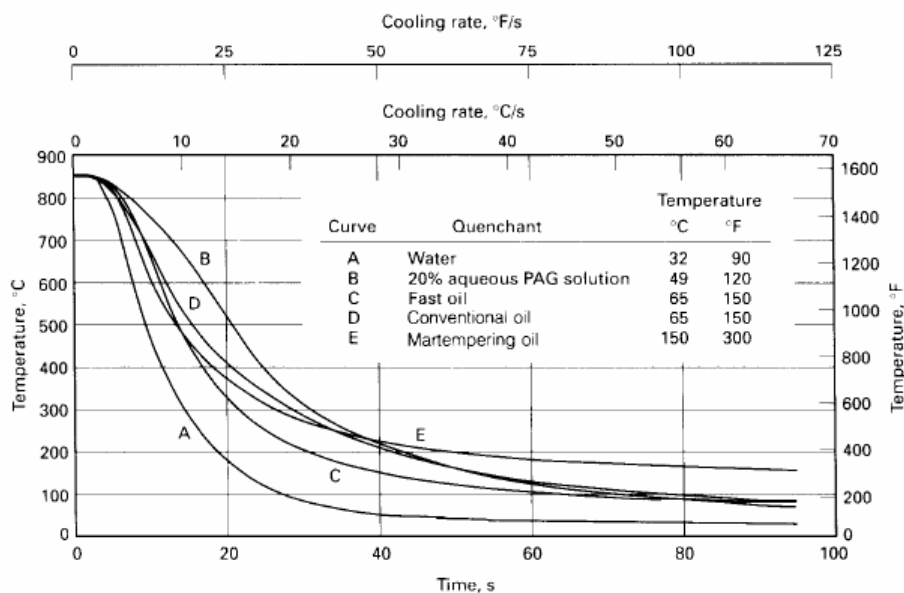


Fig 14 Effect of selected quenchant on the cooling curve of a 25.4 mm (1.0 in.) diameter steel bar. All quenchant flowing at 0.50 m/s (100 ft/min)

انتقال حرارت آب در دمای 55 C در مقایسه با آب در دمای 27 C پایین بوده و ضریب فیلم در دمای 55 C در حالت بدون تلاطم برابر $340 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ بوده ولی در سرعت 0.75 m/s این مقدار به $4100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ می رسد. بنابراین ، قابلیت انتقال حرارت آب بدون تلاطم، در دمای 32 C تقریباً ۵ برابر قابلیت آب در دمای 55 C با همان سرعت است. در سرعت 0.25 m/s ، آب با دمای 55 C کمتر از یک سوم قابلیت انتقال حرارت آب با دمای 32 C را داراست. افزایش سرعت تلاطم آب 55 C، این میزان به تقریباً نصف افزایش می یابد.

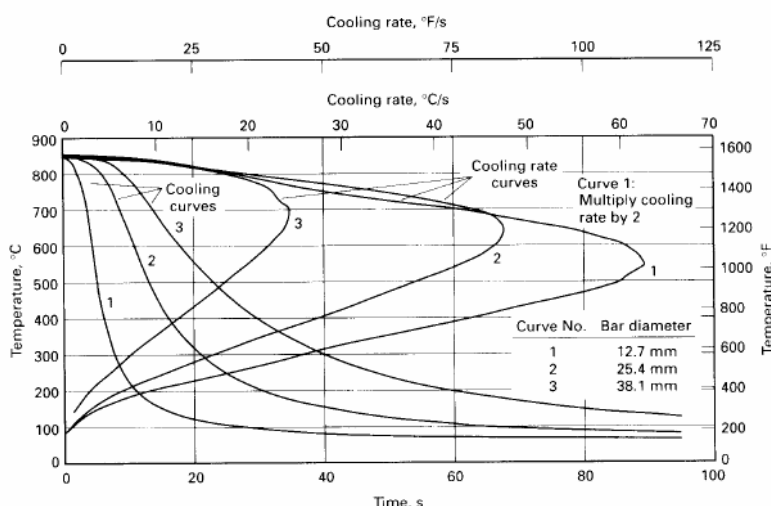


Fig 15 Effect of section size on cooling curves and cooling rate curves in 65 °C (150 °F) fast oil that is flowing at 0.50 m/s (100 ft/min)

دمای محیط کوئنچ آب باید بدقت کنترل شود تا بتوان به یک ثبات در فرآیند دست یافت. برخی از محیط های کوئنچ پلیمری بر پایه آب باید به شدت متلاطم شوند تا از بیش گرمایی Overheating در روی قطعه جلوگیری شود. این پدیده سبب می شود که نقاط نرم در روی قطعه تشکیل شوند.

دمای محیط کوئنچ تاثیر قابل ملاحظه ای بر انتقال حرارت دارد. با افزایش دمای آب و نزدیک شدن آن به نقطه جوش، قابلیت انتقال حرارت آب کاهش می یابد. در مورد روغن شاید نتوان این موضوع را درست خواند. زیرا که با افزایش دما، ویسکوزیته روغن کاهش می یابد که باعث افزایش انتقال حرارت می شود. کاهش ویسکوزیته روغن اثر منفی افزایش دمای روغن را خنثی می کند.

اثر اندازه مقطع: اثر اندازه مقطع بر نرخ سردایش برای میلگردهای با قطرهای 12.7, 25.4, 38.1 mm در شکل ۱۵ در روغن سریع با دمای 65 C و با سرعت 0.50 m/s نشان داده شده است. نرخ های سردایش با افزایش اندازه مقطع شدیداً

کاهش می یابد. در شرایط کوئنچ مشخص، بیشترین نرخ سرداش برای قطر 38.1mm در مقدار 24.5 C/s و برای قطر 12.7 mm برابر 135 C/s می باشد.

در مقاطع بزرگ، نرخ انتقال حرارت از سطح به مرکز محدود است. امکان سرد کردن سریع مرکز با هر محیط کوئنچی وجود ندارد. اگر لازم باشد که مرکز نیز سخت شود، بهتر است فولاد آلیاژی با سختی پذیری بالا انتخاب شود.

داده های شکل های ۱۴، ۱۳ و ۱۵ نمایانگر تاثیر عوامل مختلف هستند از جمله اندازه مقطع، ویژگی های محیط کوئنچ، نوع محیط کوئنچ و شرایط کوئنچ. در نهایت این عوامل بر سختی و استحکام قطعه کوئنچ شده تاثیر گذار خواهند شد.

اثر اکسیداسیون سطحی: اثر اکسیداسیون سطحی بوسیله تست مغناطیسی، مشاهده تصاویر با سرعت حرکت بالا و منحنی های سردایش انجام می شود. نرخ انتقال حرارت یک گلوله نیکلی با دمای 885 C در محیط اکسید کننده با گلوله مشابه در همان دما ولی در یک محیط محافظ و احیا کننده مقایسه می شود. نرخ های انتقال حرارت از دمای 835 C تا دمای 355 C که در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده اند، بیانگر این مطلب هستند که گلوله هایی که در محیط اکسید کننده قرار دارند، با نرخ بیشتری از گلوله های موجود در محیط احیاء سرد می شوند.

Table 5 Comparison of the cooling power of commercially available quenching and martempering oils according to magnetic quencher test results

Types of quenching oil	Oil sample	Viscosity at 40 °C (100 °F) SUS(a)	Flash point		Quenching duration from 885 °C (1625 °F) to 355 °C (670 °F), s			
					At 27 °C (80 °F)		At 120 °C (250 °F)	
					Ni-ball	Chromized Ni-ball	Ni-ball	Chromized Ni-ball
Conventional	1	102	190	375	22.5	27.2	...	...
	2	105	195	380	17.8	27.9	...	...
	3	107	170	340	16.0	24.8	...	...
Fast	4	50	145	290	7.0	(a)	...	...
	5	94	170	335	9.0	15.0	...	...
	6	107	190	375	10.8	17.0	...	...
	7	110	185	370	12.7	19.6	...	...
	8	120	190	375	13.3	17.8	...	...
Martempering, without speed improvers	9	329	235	455	19.2	27.6	18.4	22.1
	10	719	245	475	26.9	29.0	25.1	30.4
	11	2550	300	575	31.0	32.0	31.7	32.8
Martempering, with speed improvers	12	337	230	450	15.3	(b)	12.8	(b)
	13	713	245	475	16.4	17.9	14.0	15.6
	14	2450	300	570	19.7	17.0	15.1	15.4

(a) SUS, Saybolt universal seconds. (b) Not available

Table 6 Comparison of the ranges of cooling power of commercially available quenching and martempering oils according to magnetic quencher test results using pure nickel balls

Type of quenching oil	Quenching duration from 885 °C (1625 °F) to 355 °C (670 °F)			
	At 65 °C (150 °F)	At 120 °C (250 °F)	At 175 °C (350 °F)	At 230 °C (450 °F)
Conventional	14-22	14-22	...	...
Fast	7-14	7-14	...	...
Martempering, without speed improvers	18-34	18-34	22-38	≈47
Martempering, with speed improvers	14-20	13-18	16-22	≈33

روش تصویربرداری با سرعت بالا برای بررسی تاثیر پوشش اکسیدی بر نرخ سردایش استفاده می شود. در این روش، از محیط های کوئنچ آب حاوی الکل پلی وینیل، فسفات تری سدیم، یا کربوکسیل متیل سلولز استفاده می شود. هنگامی که نمونه فولاد در یک محیط محافظ حرارت داده شده و سپس وارد محیط کوئنچ می گردد، باید به این نکته توجه نمود که ابتدا یک پوشش پیرامون قطعه در محیط کوئنچ تشکیل می شود که از کوئنچ جلوگیری می کند و بعد از گذشت چند ثانیه این لایه حذف شده و کوئنچ آغاز می شود. زمان سردایش در محیط آب حاوی الکل پلی وینیل 37 Sec است که در مقایسه با روغن معمولی، نرخ سردایش آرامی است. ولی وقتی نمونه ای از همان قطعه با همان شرایط در محیط اکسید کننده حرارت داده و سپس در همان محیط کوئنچ شود، تماس سطح با محیط سریعاً اتفاق افتاده و لذا زمان کل سردایش تنها 2.7 SEC خواهد بود.

منحنی های سردایش همانند آنچه که در شکل ۱۶ نشان داده شده اند، تاثیر ضخامت پوسته اکسیدی بر کوئنچ فولاد را توضیح می دهد. این منحنی ها حاصل کوئنچ نمونه در روغن سریع هستند. ضخامت پوسته اکسیدی کمتر از 0.08 mm نرخ سردایش در فولاد 1095 در مقایسه با فولاد بدون پوسته اکسیدی می افزاید. از طرفی اگر این ضخامت 0.13 mm باشد، نرخ کوئنچ را خواهد کاست. هم چنین برای یک فولاد رنگ نزن، وجود پوسته اکسیدی با ضخامت 0.013 mm سبب افزایش نرخ سردایش خواهد شد.

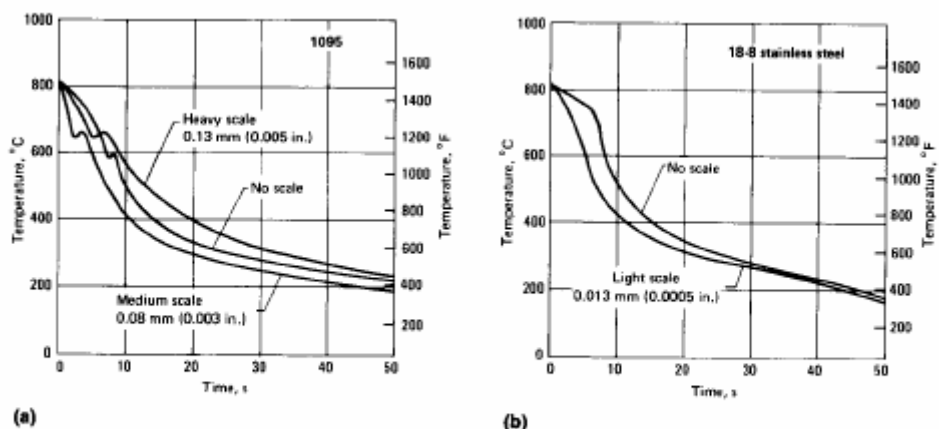


Fig 16 Center cooling curves showing the effect of scale on the cooling curves of steels quenched without agitation in fast oil. (a) 1095 steel; oil at 50 °C (125 °F). (b) 18-8 stainless steel; oil at 25 °C (75 °F). Specimens were 13 mm (½ in.) diam by 64 mm (2½ in.) long.

اعوجاج و ترک

ترک برداری و اعوجاج، شدت کوئنچ و تجهیزات مورد استفاده را محدود می کنند. شدت کوئنچ زیاد سبب می شود که مارتنزیت تا عمق بیشتری تشکیل شود اما از طرفی احتمال ترک و اعوجاج را نیز بیشتر می کند.

اعوجاج: برای بررسی و فهم علت آن می توان دو نکته زیر را مورد توجه قرار داد:

- فولادها در حالت سرد استحکام بالاتری نسبت به حالت گرم دارند.
- فولادها در حالیکه هنگام سردایش منقبض می شوند، حین کوئنچ انبساط می یابند.

تغییرات ابعاد خطی هنگام سرد کردن آرام و کوئنچ در شکل ۱۷ نشان داده شده اند. کوئنچ سبب انبساط ماده در مقایسه با زمانی می شود که ماده ساختار پرلیتی داشته باشد. البته یادآوری این نکته لازم است که مواد مارتنزیتی و پرلیتی هنگام سردایش بیش از ۱ درصد انقباض دارند اما ساختار مارتنزیتی درصد کمتری انقباض خالص از خود نشان می دهد.

اعوجاج ناشی از سه پدیده زیر است: تاب برداری *Warping*، تغییر شکل ناشی از حرارت و تشکیل مارتنزیت. علت تاب برداری را می توان در حرارت دهی غیر یکنواخت و یا عدم یکنواخت نگهداشتن قطعه در داخل کوره برای حرارت دهی جستجو کرد. تغییر شکل حرارتی نیز ناشی از انقباض غیر یکنواخت در حین سردایش اتفاق می افتد. انبساط همراه با تشکیل مارتنزیت نیز تنش هایی ایجاد میکند که می تواند سبب اعوجاج شوند.

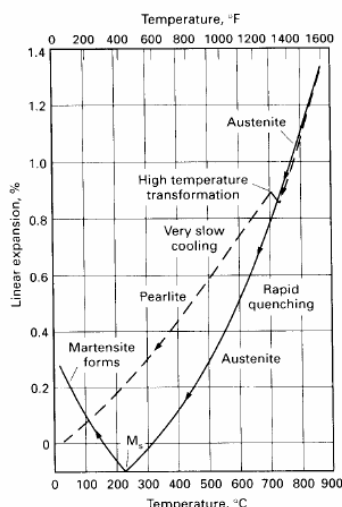


Fig 17 Dilatometric study of steel cooled from a high temperature to show that the steel undergoes reversals of its dimensional contractions depending on variations in its quenching rate. Source: Ref 12

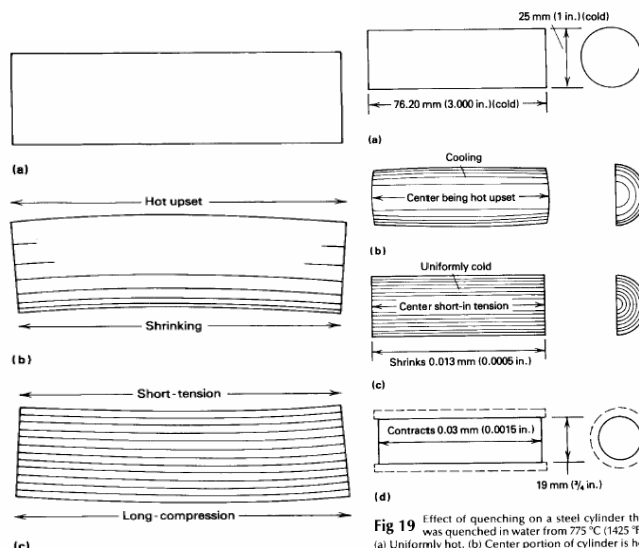


Fig 18 Warpage caused by nonuniform quenching of a steel block. (a) Uniformly hot. (b) Non-uniform cooling. (c) Uniformly cold. Source: Ref 21

Fig 19 Effect of quenching on a steel cylinder that was quenched in water from 775 °C (1425 °F). (a) Uniformly hot. (b) Center portion of cylinder is hot upset during quenching. (c) Center portion of cylinder is short in tension when uniformly cold. (d) Machining of the shell removes tensile stress from core to allow cylinder to decrease in length. Source: Ref 21

تاب برداری در حین سرد کردن غیریکنواخت در شکل ۱۸ نشان داده می شود. فرض کنید که میل گردی در دمای یکنواختی حرارتی داده شده است. (شکل 18a) اگر این میلگرد از یک طرف کوئنچ شود (شکل 18b)، در این صورت قسمتی که اول وارد آب شده است، سریعاً انقباض یافته و با نرخ بالاتری در مقایسه با طرف مقابل سرد می شود. طرفی که اول وارد آب شده است، کوتاهتر می شود و باعث تغییر شکل پلاستیک در طرف دیگر می شود.

وقتی قطعه ای سرد می شود، (در صورتیکه تنش از استحکام تسلیم فراتر رود) قطعه در قسمتی که سردتر است، کوتاهتر شده و حالت مقعری پیدا می کند. (شکل 18C) تغییر شکل پلاستیک در قسمت گرمتر باعث می شود که تنش های فشاری در قسمت گرمتر و تنش های کششی در قسمت سردتر ایجاد شود.

تغییر شکل ناشی از حرارت: تغییر شکل ناشی از گرادیان حرارتی در هنگام سرد کردن در شکل ۱۹ نشان داده شده است. اگر قطعه ای بصورت یکنواخت گرم شود، همانند شکل 19a، و سریعاً کوئنچ شود، در این حالت سطح بیرونی منقبض می شود در حالیکه سطح داخلی هنوز گرم است. در نهایت سطح بیرونی در حالت کشش و سطح داخلی در حالت فشار قرار می گیرد. برآیند این توزیع تنشی سبب ایجاد تغییر شکل پلاستیک در قطعه می شود. (شکل 19b) وقتی که دمای مرکز قطعه بطور یکنواخت کاهش می یابد، در مرکز نیز انقباض حرارتی رخ می دهد و حالت تنش تغییر می کنند بطوریکه مرکز در حالت کشش قرار می گیرد. (شکل 19c) ماشینکاری نهایی سبب می شود که تنش کششی موجود در مرکز حذف شود. (شکل 19d را ببینید).

تشکیل مارتنزیت: در حین آبکاری فولاد بمنظور تشکیل مارتنزیت فرآیندهای تغییر شکل رخ می دهد. درصد انقباض خالص در هنگام سرد کردن از دمای آستنیت تا دمای اتاق در استحاله مارتنزیتی ۱ درصد است. در حین سرد کردن سریع، سطح بیرونی با کوئنچ تبدیل به مارتنزیت شده و انقباض بعدی مرکز نمونه منجر به ایجاد سطح فشاری و مرکز کششی می شود. (شکل ۲۰)

میلگردی با قطر 16 mm و با طول 75 mm (شکل ۲۰) از دمای 775 C در آب کوئنچ شده است. تغییر شکلی که در مرکز میلگرد اتفاق می افتد، سبب می شود که قطر میلگرد به اندازه 0.038 mm بزرگتر از قطر اولیه میلگرد شود. حال اگر سطح سخت میلگرد سنگ زنی شود تا سطح در تنش حذف گردد، در این صورت قطر نهایی میلگرد 7.62 mm خواهد بود.

و طول نهایی میلگرد نیز 0.2 mm کوچکتر از طول بعد از کوئنچ می شود. آزمایشات زیادی در این خصوص برای توضیح گسترش تنشهای کششی و فشاری و تغییر شکل قطعات فولادی به سبب این نوع تنش ها انجام شده اند.

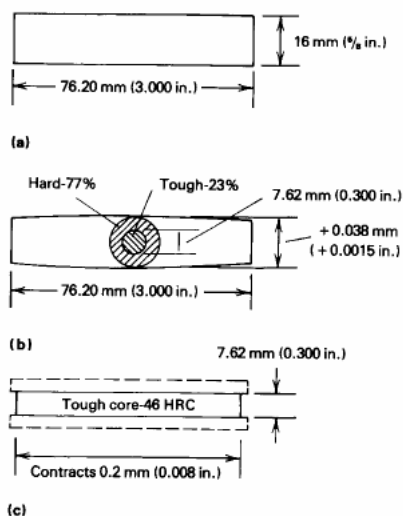


Fig 20 Strains produced by hardening a cylinder of 1.10% C tool steel. (a) Dimensions of an annealed bar before quenching. (b) Hardness values at selected locations inside cylinder after water quenching at 775 °C (1425 °F) based on surface hardness of 68 HRC. (c) Core hardness after water-quenched cylinder diameter reduced from 16 mm (5/8 in.) to 7.62 mm (0.300 in.) by wet grinding. Source: Ref 21

توزیع تنش در فولادهای 0.6% C با آبکاری کامل و همان فولاد در حالت بدون آبکاری و فولاد 0.3% C که مرکزش آبکاری شده است، در شکل ۲۱ نشان داده شده است. تغییرات طول و قطر میلگرد براساس پروفیل تنش در میلگرد با طول 50 mm بعد از کوئنچ در آب از دمای 850 C نشان داده شده است.

منابع دیگر اعوجاج: عموماً اعوجاجیکه در حین کوئنچ رخ می دهد بستگی به اندازه و شکل میلگرد، ترکیب شیمیایی آن و مشخصات محیط کوئنچ دارد. قطعات با نسبت های اندازه مقطع 1:4، قطعات بزرگ با ضخامت کم و قطعات دارای سوراخ، شیار سبب بروز مشکلاتی در دستیابی به یکنواختی حرارت دهی و سردایش و نیز نرخ سردایش می شوند. (شکل 22a را ببینید)

همانطوریکه در شکل 22a دیده میشود، وجود شیار سبک در کفشک سبب اعوجاج شده است. فلنجها به سبب شکلی که دارند، مسایلی را در حین کوئنچ ایجاد میکنند که رسیدن به نرخ سردایش ثابت همانند میلگردها در آنها بسیار مشکل می شود و اغلب نیز منجر به ترک خواهند شد.

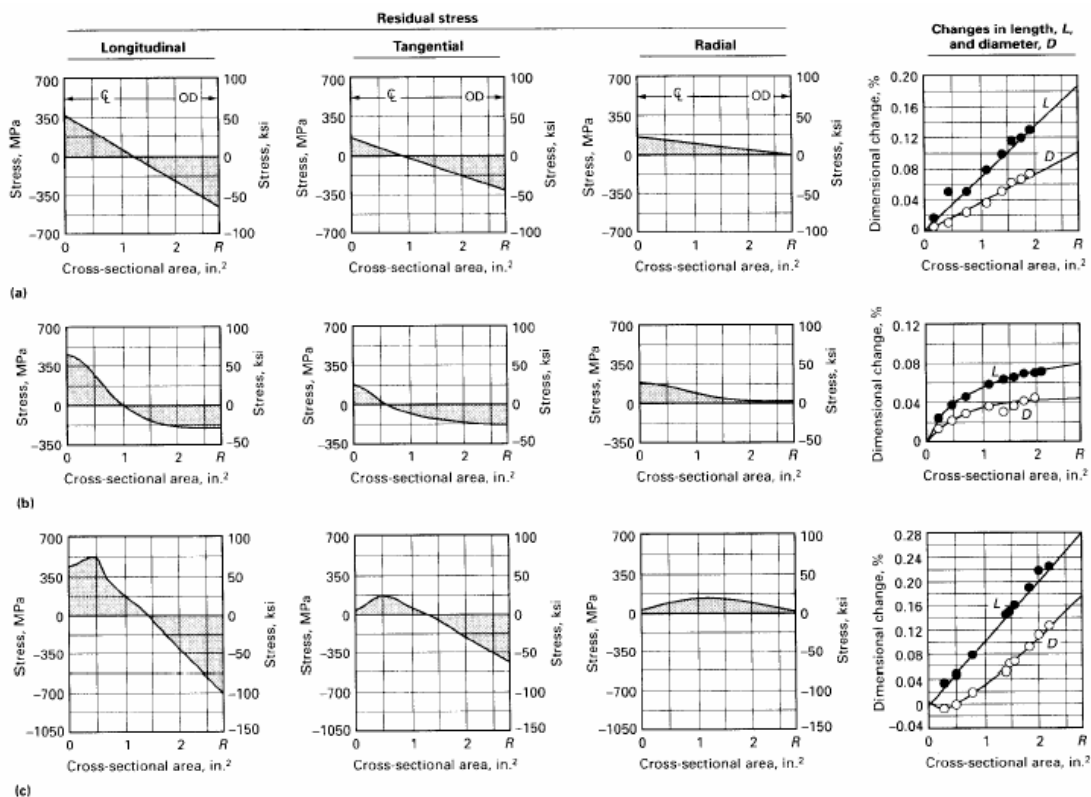


Fig 21 Residual stress distribution and distortion in 50.0 mm (1.97 in.) diameter carbon steel bars water quenched from 850 °C (1560 °F). (a) Through hardened 0.6% C steel. (b) Unhardened 0.25% C steel. (c) Hardened core 0.30% C steel. OD, outside diameter. Source: Ref 22

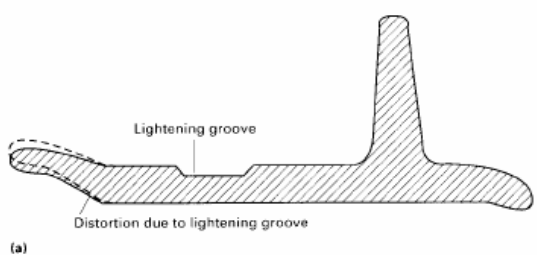


Fig 22(a) Cross section of a water quenched SAE/AISI 1037 steel track shoe with 0.25 mm (0.010 in.) distortion caused by lightening groove. Redesigning of the shoe to remove the grooves improved uniformity of the section and reduced the distortion to a maximum of 0.08 mm (0.003 in.). Source: Ref 23

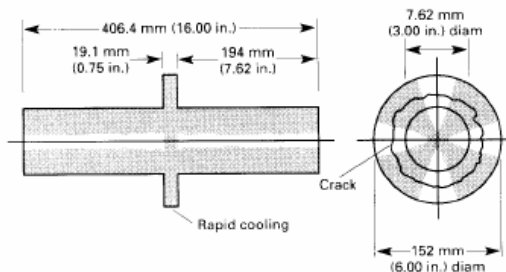


Fig 22(b) The design of this steel flange on this shaft will cause the flange to crack during quenching. Source: Ref 23

سوراخها و شیارهای موجود در شفت ها معمولا در عملیات حرارتی سبب ایجاد اعوجاج می شوند. جاخارهایی که گوشه های تیز دارند، سبب جوانه زنی ترک می شوند. برای کاهش احتمال ترک برداری می توان تا حد امکان شعاع گوشه ها بیشتر نمود. (شکل 22c)

ترکیب شیمیایی فولاد می تواند تاثیر قابل ملاحظه ای بر اعوجاج و تاب برداری داشته باشد. آلیاژهای پرکربن و آلیاژهای با سختی پذیری بالا تمایل به اعوجاج بیشتری دارند. از طرفی دمای بالای آستنیت کردن و M_s پایین نیز می تواند بر میزان اعوجاج تاثیر داشته باشد.

مشخصات مراحل کوئنچ از جمله مراحل اولیه که سبب افزایش نرخ کوئنچ از دمای استحاله می شوند، سبب بیشتر شدن احتمال اعوجاج می شود. سرد کردن سریع تا دمای بالای M_s و بعد از آن سرد کردن آرام در محدوده تشکیل مارتنزیت میزان اعوجاج را می کاهش دهد. عامل دیگری که سبب کاهش اعوجاج می شود، نرخ یکنواخت انتقال حرارت از واحد سطح می باشد.

ترک برداری

ترک ها به همان علتی رخ می دهند که اعوجاج اتفاق می افتد. اما در ترک برداری، کرنش موضعی از کرنش شکست ماده فراتر می رود. معمولا ترک ها در امتداد مرز دانه آستنیت اشاعه می یابند. اما مربوط به اندازه دانه آستنیت نمی باشد.

تمایل به ترک برداری با افزایش دمای M_s کاهش می یابد. دمای M_s بطور تقریبی از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$M_s = 521 - 353(\%C) - 225(\%Si) - 24.3(\%Mn) - 27.4(\%Ni) - 17.7(\%Cr) - 25.8(\%Mo) \quad \text{Eq. 11}$$

ارتباط بین ترک های کوئنچ و دمای M_s برای دو فولاد در شکل 23(a) نشان داده شده است.

تابعیت ترک برداری با ترکیب شیمیایی با فرمول زیر نیز نشان داده می شود:

$$CE = C + Mn/5 + Mo/5 + Cr/10 + Ni/50 \quad (\text{Eq 12})$$

که CE همان کربن معادل بوده و عناصر بر حسب درصد وزنی بیان می شوند.

ترک های کوئنچ همانطوریکه در شکل 23(c) نشان داده می شود در کربن معادل های بالاتر از 0.525 رخ می دهند.

عموما محیط های کوئنچ طوری انتخاب می شوند که توانایی فراهم آوردن نرخ سردایش و گرمایش مناسب برای حصول به ریزساختار در مقاطع ضخیم را داشته باشند. هرچند که در صورتی که لازم باشد اعوجاج و ترک برداری در حد کمترین خود باشد، دیگر نباید از محیط های کوئنچ با توانایی نرخ بالای سردایش استفاده کرد. ضریب انتقال حرارت بالا منجر به افت سریع

حرارت، گرادیان دمایی بالا در مقاطع ضخیم و اختلاف دمایی زیاد در مقاطع ضخیم می شود. این شرایط، تنش های پس ماند، اعوجاج و مشکلات مربوط به ترک برداری را تشدید می کند.

هنگامیکه قسمت گرمتر قطعه از انقباض قسمت سردتر آن جلوگیری می کند، هرچقدر گرادیان حرارتی بالا باشد، تنش های حرارتی نیز بیشتر می شود. در دماهای بالاتر از Ms، فولاد هنوز داکتیل بوده و میتواند بخشی از تنش های موجود را با تغییر شکل پلاستیک آزاد کند که منجر به اعوجاج خواهد شد. از طرفی در دمای Ms و یا کمتر از آن که مارتنزیت تشکیل می شود، بدلیل پایین بودن داکتیلیتی مارتنزیت، توانایی تغییر شکل محدود می شود. علاوه بر آن، وجود انبساط حجمی همراه با تشکیل مارتنزیت سبب ایجاد تنش های اضافی در ساختار خواهد شد.

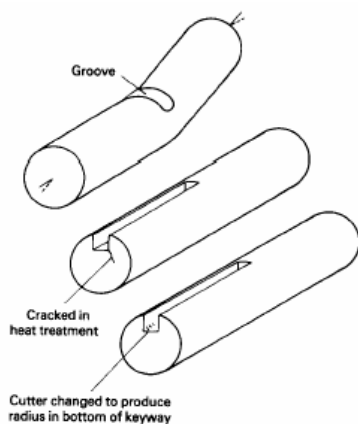


Fig 22(c) Grooves will cause a shaft to warp in heat treating (top). A keyway with sharp corners often initiates cracks in quenching (center). The keyway crack problem is avoided with a radius (bottom). Source: Ref 23

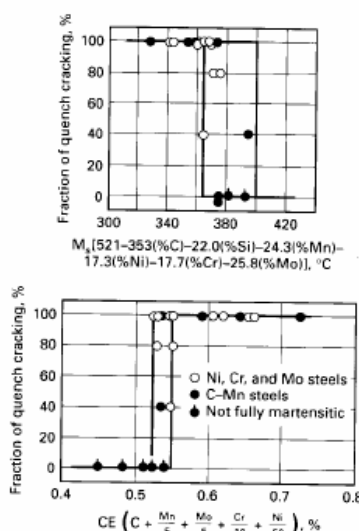


Fig 23 Effect of Ms temperature (a) and carbon equivalent (b) on the quench cracking of selected steels

Table 7 Effect of carbon concentration and % martensite on the as-quenched hardness of steel

Carbon, %	Hardness, HRC				
	99% M	95% M	90% M	80% M	50% M
0.10	38.5	32.9	30.7	27.8	26.2
0.12	39.5	34.5	32.3	29.3	27.3
0.14	40.6	36.1	33.9	30.8	28.4
0.16	41.8	37.6	35.3	32.3	29.5
0.18	42.9	39.1	36.8	33.7	30.7
0.20	44.2	40.5	38.2	35.0	31.8
0.22	45.4	41.9	39.6	36.3	33.0
0.24	46.6	43.2	40.9	37.6	34.2
0.26	47.9	44.5	42.2	38.8	35.3
0.28	49.1	45.8	43.4	40.0	36.4
0.30	50.3	47.0	44.6	41.2	37.5
0.32	51.5	48.2	45.8	42.3	38.5
0.34	52.7	49.3	46.9	43.4	39.5
0.36	53.9	50.4	47.9	44.4	40.5
0.38	55.0	51.4	49.0	45.4	41.5
0.40	56.1	52.4	50.0	46.4	42.4
0.42	57.1	53.4	50.9	47.3	43.4
0.44	58.1	54.3	51.8	48.2	44.3
0.46	59.1	55.2	52.7	49.0	45.1
0.48	60.0	56.0	53.5	49.8	46.0
0.50	60.9	56.8	54.3	50.6	46.8
0.52	61.7	57.5	55.0	51.3	47.7
0.54	62.5	58.2	55.7	52.0	48.5
0.56	63.2	58.9	56.3	52.6	49.3
0.58	63.8	59.5	57.0	53.2	50.0
0.60	64.3	60.0	57.5	53.8	50.7

M, martensite

انبساط حرارتی و انقباض کوئنچ فولاد ۴۳۴۰ در شکل ۲۴ نشان داده شده است. هنگام حرارت دادن این فولاد، انبساط حرارتی تا زمان تشکیل آستنیت ادامه می یابد. بعد از رسیدن به دمای C 845 فولاد کوئنچ می شود. انبساط حجمی همراه با تشکیل مارتنزیت از دمای C 315 آغاز می شود که همراه با ایجاد تنشهایی در آستنیت است که می تواند میزان این تنش ها از تنش شکست مارتنزیت نیز فراتر رود.

تغییرات حجمی حاصل از تشکیل مارتنزیت را فقط با کنترل درصد کربن فولاد می توان کنترل کرد. داده های حاصل از پراش اشعه X که بروی ساختار کاملاً مارتنزیتی انجام شده اند، نشان می دهند که انبساط حجمی بصورت خطی با درصد کربن افزایش می یابد. Thelning تغییرات حجمی که در هنگام تشکیل مارتنزیت رخ می دهد را با کمک فرمول زیر توضیح داد:

$$(\Delta V/V) \cdot 100 = (100 - V_c - V_a) \cdot (1.68 \cdot C) + V_a (-4.64 + 2.21 \cdot C) \quad (\text{Eq 13})$$

$\Delta V/V$ تغییرات حجم برحسب درصد، V_c درصد حجمی سمیتیت حل نشده، V_a درصد حجمی آستنیت و $100 - V_c - V_a$ درصد حجمی مارتنزیت است و C درصد وزنی کربن حل شده در آستنیت و مارتنزیت است.

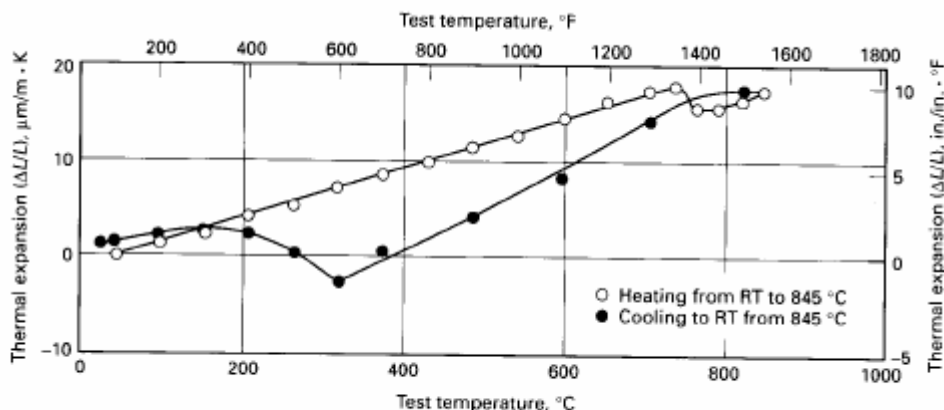


Fig 24 Thermal expansion and contraction curves for 4340 steel. RT, room temperature

با وجود اینکه درصد کم کربن سبب کاهش احتمال ترک برداری می شود، اما لازم است که درصد کربن آنقدر بالا باشد که بتوان به سختی و استحکام لازم دست یافت.

تغییرات دما در پروب کوئنچ شده: منحنی های دما-زمان برای دو نقطه از پروب با قطر 50 mm در شکل ۲۶ نشان داده شده اند. این پروب در آب با دمای 32°C و با سرعت 0.5 m/s کوئنچ شده که ضریب انتقال حرارت فصل مشترک $1.5 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ است. این منحنی ها با اتصال ترموکوپل ها به مرکز نمونه و فاصله 18 mm از مرکز ترسیم شده اند.

اختلاف دمایی بین دو ترموکوپل از کم کردن دمای مرکز از دمای نزدیک سطح محاسبه می شود که بصورت تابعی از دمای نزدیک سطحی ترسیم می شود. مشاهده شده است که بیشتری اختلاف دمایی در میلگردی که در آب کوئنچ شده است، 320 C است و این بیشترین اختلاف زمانی رخ می دهد که دمای نزدیک سطح در حدود 420 C باشد.

بیشترین گرادیان حرارتی زمانی ایجاد می شود که دمای نزدیک سطح 300 C باشد. گرادیان بالا که در نزدیکی دمای Ms بسیاری از فولادها اتفاق می افتد، همراه با افت داکتیلیتی در هنگام تشکیل مارتنزیت است که می توان منجر به ترک برداری در حین کوئنچ در آب شود.

در شکل ۲۷ منحنی سردایش در نزدیک سطح و خط مرکزی میلگردی با قطر 50 mm و با ضریب انتقال حرارت فصل مشترک $4300 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ که در روغن با سرعت بالا کوئنچ شده است، نشان داده می شود. بیشترین گرادیان حرارتی در دمای 209 C بوده و زمانی است که دمای نزدیک سطح به 575 C رسیده باشد که دمایی بالاتر از دمای Ms است. چنین حالتی سبب شده است که کوئنچ فولاد در روغن سبب کاهش احتمال ترک برداری فولادها شود.

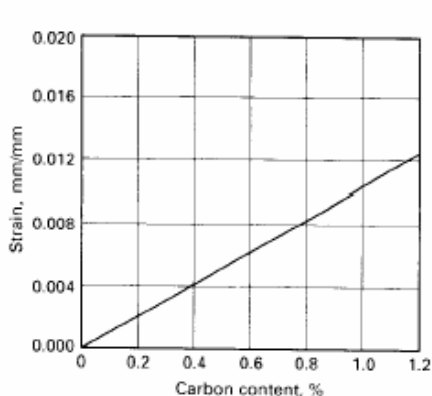
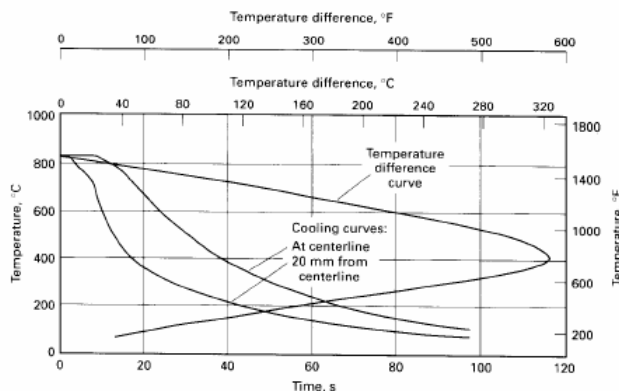


Fig 25 Linear expansion in steel after quenching to produce fully martensitic microstructures



26 Cooling curves and temperature difference curve between thermocouple A on centerline and thermocouple B 20 mm (3/4 in.) from centerline of 50 mm (2 in.) diameter probe quenched in 32°C (90°F) water that is flowing at 0.50 m/s (100 ft/min)

ضریب انتقال حرارت فصل مشترک زیاد سبب ایجاد اختلاف دمایی بالا در دو مقطع نازک و ضخیم می شود. منحنی های سردایش برای دو مقطع با اندازه 38 mm و 25.4 mm که در روغن 60 C و سرعت 0.50m/s کوئنچ شده اند، در شکل ۲۸ نشان داده شده اند. ضریب انتقال حرارت فصل مشترک در این شرایط برابر $3500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ است. بیشترین اختلاف دمایی بین این دو مقطع در دمای 260 C اتفاق می افتد. وقتی دمای مرکز نمونه کوچکتر به 500 C می رسد که بالاتر از دمای Ms است و سبب ترک نمی شود، بیشترین اختلاف دمایی ظاهر می شود.

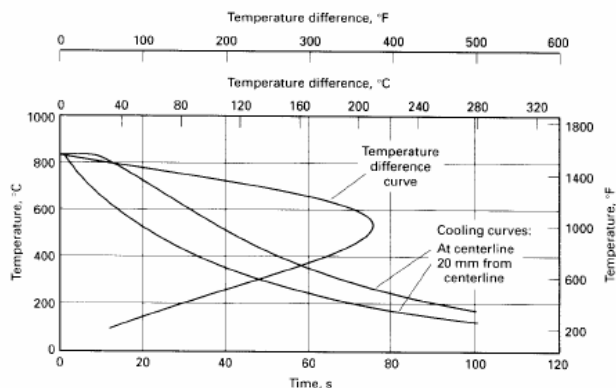


Fig 27 Cooling curves and temperature difference curve between thermocouple A on centerline and thermocouple B 20 mm (3/4 in.) from centerline and thermocouple C 20 mm (3/4 in.) from centerline of 50 mm (2 in.) diameter probe quenched in fast oil with film coefficient of 4300 W/m²·K (760 Btu/ft²·h·°F)

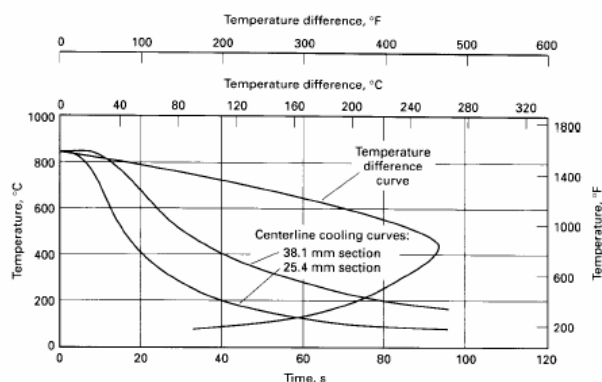


Fig 28 Cooling curves and temperature difference curves between 38.1 mm (1.5 in.) section and 25.4 mm (1.0 in.) section of steel quenched in conventional oil at 60 °C (140 °F) that is flowing at 0.5 m/s (100 ft/min)

تنش حرارتی که سبب اعوجاج در کوئنچ می شود، تابعی از ضریب انبساط حرارتی آلیاژ، مدول الاستیک، انبساط حجمی هنگام تشکیل مارتنزیت و اختلاف دمایی در قطعه است. کاهش تنش حرارتی نیاز به کم کردن اختلاف دمایی است زیرا تنها این عامل است که می توان تحت کنترل درآورد و پارامترهای دیگر چندان قابل کنترل نمی باشند.

وقتی قطعه ای در محیطی مثل آب که ضریب انتقال حرارتی بالایی ایجاد می کند، کوئنچ می شود، دمای مقاطع نازک سریعتر از مقاطع ضخیم افت کرده و این اختلاف دمایی زیاد تنش های حرارتی بالایی را منجر می شوند که اغلب منتهی به تغییر شکل می شود. تنها راه حل در این حالت، کاهش ضریب انتقال حرارت و در نتیجه کاهش اختلاف دمایی است. ضریب انتقال حرارتی تا حد امکان باید کم باشد اما از سوی دیگر نرخ سردایش بایستی بقدری بالا باشد که بتوان به ریزساختار، سختی و استحکام مورد نظر دست یافت.

سختی و سختی پذیری فولاد:

سختی پذیری فولاد به قابلیت دگرگونی بخشی از ریزساختار یا کل آن به مارتنزیت در هنگام سردایش در شرایط معین اطلاق می شود. این تعریف ماهیت سختی پذیری فولاد را نشان می دهد و آزمایشات زیادی برای تعیین آن برای فولادهای مختلف انجام شده است.

مارتنزیت معمولاً ریزساختار مطلوب در فولادهای کربنی و آلیاژی کوئنچ شده است. نرخ سردایش باید آنقدر سریع باشد تا منحنی سردایش دماغه منحنی TTT را قطع نکند. این حالت در نقطه A در شکل ۲۹ نشان داده شده است. اگر نرخ سردایش کم باشد، منحنی سردایش دماغه TTT را قطع کرده و (منحنی B, C, D در شکل ۲۹) فازهای فریت، پرلیت و بینیت در ریزساختار تشکیل می شود و بالتبع درصد مارتنزیت در ریزساختار کاهش یافته و در نتیجه سختی بعد از کوئنچ کاهش خواهد یافت.

نرخ سردایش بایستی سریع باشد تا درصد زیادی مارتنزیت در محل های بحرانی قطعه تشکیل شود. حضور درصد زیاد مارتنزیت سبب افزایش استحکام خستگی و ضربه ای فولاد بعد از تمبر می شود.

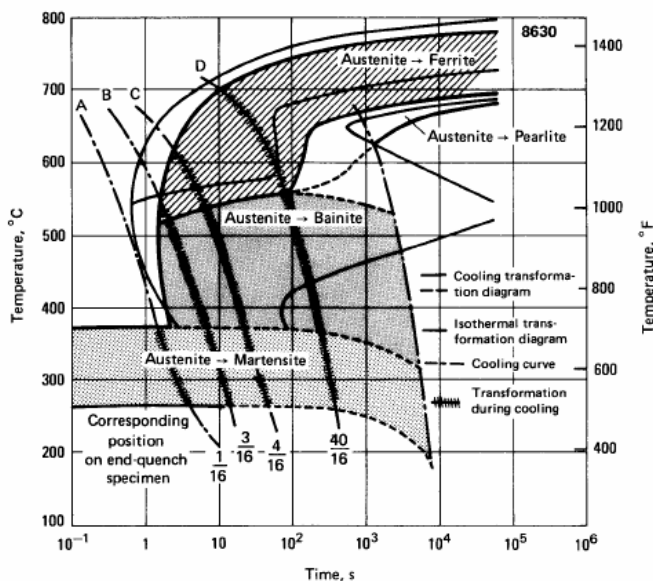


Fig 29 Transformation diagrams and cooling curves for 8630 steel, indicating the transformation of austenite to other constituents as a function of cooling rate

بیشترین سختی بدست آمده در یک فولاد بستگی به درصد کربن آن فولاد دارد. رابطه درصد کربن و مارتنزیت تشکیل شده با سختی بعد از کوئنچ در جدول ۷ و شکل ۳۰ نشان داده شده است.

قطر بحرانی ایده آل

سختی پذیری فاکتوری است که توسط پارامتری بنام قطر بحرانی ایده آل D_I تعیین می شود. در فرمول محاسبه این فاکتور از ضرایب افزاینده استفاده می شود. این ضرایب به فاکتوری بنام قطر ایده آل پایه D_{Ibase} ضرب می شوند. قطر ایده آل پایه براساس درصد کربن و اندازه دانه آستنیت تعیین می شود. سپس این قطر به ضرایبی که تاثیرات عناصر آلیاژی را نشان می دهند، ضرب خواهد شد. فرمول زیر برای محاسبه قطر بحرانی ایده آل استفاده می شود:

$$D_I = D_{Ibase} \cdot f_{Mn} \cdot f_{Si} \cdot f_{Cr} \cdot f_{Mo} \cdot f_v \cdot f_{Cu} \quad (Eq 14)$$

در جدول ۸ مجموعه ای از مقادیر D_I و ضرایب آلیاژی آورده شده اند. این ضرایب براساس داده های حاصل از آزمایش بر روی فولادهای کربنی متوسط با سختی پذیری متوسط بدست آمده اند. یک چنین مجموعه ای نیز برای فولادهای کم کربنی آماده شده است.

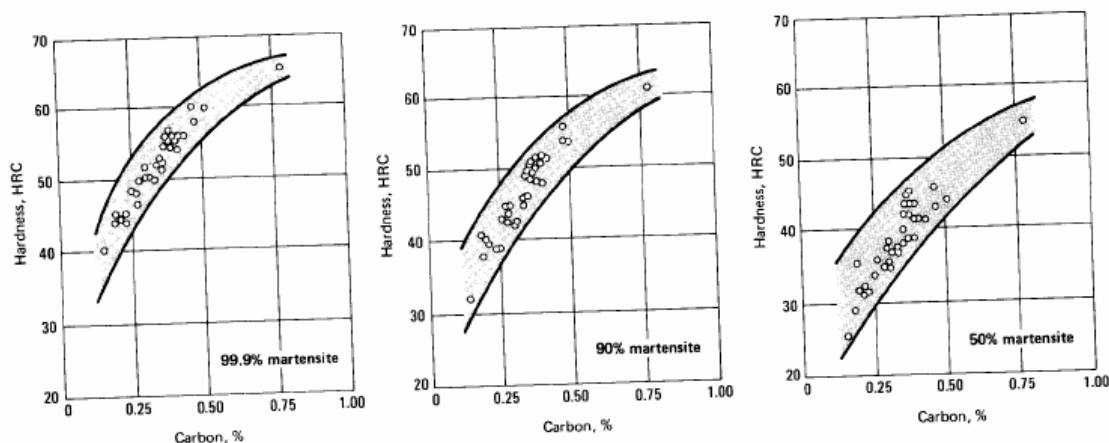


Fig 30 Relation of carbon content and percentage martensite to HRC hardness

مراحل تعیین سختی پذیری یک فولاد براساس ترکیب شیمیایی آن بطور خلاصه در زیر آمده است:

- مرحله ۱: تعیین اندازه دانه ASTM
- مرحله ۲: تعیین ترکیب شیمیایی
- مرحله ۳: تعیین D_I براساس کربن و اندازه دانه (جدول ۸)
- مرحله ۴: تعیین ضرایب آلیاژی (جدول ۸)

- مرحله ۵: ضرب کردن D_1 در ضرایب آلیاژی مطابق فرمول بالا برای محاسبه قطر بحرانی ایده آل

Table 9 Typical cooling rates at 705 °C (1300 °F) in a Jominy specimen as a function of distance from the quenched end

Distance from water quenched end, 1/16 in.	Cooling rate	
	*C/s	*F/s
1	270	490
2	170	305
3	110	195
4	70	125
5	43	77
6	31	56
7	23	42
8	18	33
9	14	26
10	11.9	21.4
12	9.1	16.3
14	6.9	12.4
16	5.6	10.0
18	4.6	8.3
20	3.9	7.0

Table 8 Tabulated hardenability factors of steels as a function of carbon content, carbon grain size, and selected alloying elements

Carbon, %	Base ideal diameter, D_{base} , at following carbon grain size			Alloying factor, f_x , where element, X, is				
	No. 6	No. 7	No. 8	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
				1.67	1.035	1.018	1.1080	1.15
0.05	0.0814	0.0750	0.0697	1.333	1.070	1.036	1.2160	1.30
0.10	0.1153	0.1065	0.0995	1.500	1.105	1.055	1.3240	1.45
0.15	0.1413	0.1315	0.1212	1.667	1.140	1.073	1.4320	1.60
0.20	0.1623	0.1509	0.1400	1.833	1.175	1.091	1.54	1.75
0.25	0.1820	0.1678	0.1560	2.000	1.210	1.109	1.6480	1.90
0.30	0.1991	0.1849	0.1700	2.167	1.245	1.128	1.7560	2.05
0.35	0.2154	0.2000	0.1842	2.333	1.280	1.146	1.8640	2.20
0.40	0.2300	0.2130	0.1976	2.500	1.315	1.164	1.9720	2.35
0.45	0.2440	0.2280	0.2090	2.667	1.350	1.182	2.0800	2.50
0.50	0.2580	0.2380	0.2200	2.833	1.385	1.201	2.1880	2.65
0.55	0.273	0.251	0.231	3.000	1.420	1.219	2.2960	2.80
0.60	0.284	0.262	0.241	3.167	1.455	1.237	2.4040	2.95
0.65	0.295	0.273	0.251	3.333	1.490	1.255	2.5120	3.10
0.70	0.306	0.283	0.260	3.500	1.525	1.273	2.62	3.25
0.75	0.316	0.293	0.270	3.667	1.560	1.291	2.7280	3.40
0.80	0.326	0.303	0.278	3.833	1.595	1.309	2.8360	3.55
0.85	0.336	0.312	0.287	4.000	1.630	1.321	2.9440	3.70
0.90	0.346	0.321	0.296	4.167	1.665	1.345	3.0520	...
0.95	...	...	...	4.333	1.700	1.364	3.1600	...
1.00	...	...	...	...	...	...	...	...

سختی پذیری جومینی

روش بسیار مشهور و رایج برای تعیین سختی پذیری آزمایش انتهایی کوئنچ جومینی است. (استاندارد ASTM A255) در این آزمایش، یک میلگرد با قطر 25 mm و طول 100 mm تا دمای آستینیت داده شده و سپس داخل یک فیکسچر مناسب با آب 27 °C از یک طرف کوئنچ می شود. این آزمایش، منحنی های سردایش مختلفی را تشکیل می دهد که نرخ سردایش آنها با دور شدن از انتهایی کوئنچ شده کاهش می یابد. بعد از سرد شدن تا دمای اتاق، سطوح موازی در سمت های مقابل با فواصل 1.6 mm سنگ زنی شده و سختی سنجی در آن محل ها انجام می گیرد. در این آزمایش، سختی های مختلف در نقاطی که نرخ های سردایش مختلفی دارند، بدست می آیند.

اطلاعات و داده های حاصل از آزمایش جومینی برای فولادهایی بیشتر مفیدند که قطر ایده آل آنها در محدوده 150-25 mm باشند البته قطر ایده آل می تواند کمتر از 25 mm باشد ولی در اینصورت باید از روش سختی ویکرز استفاده شود که باید محل های سختی سنجی بهم نزدیکتر از سختی راکول باشند.

داده های جومینی برای فولاد ۴۱۳۰ که از دمای 855 °C آستینیت و کوئنچ شده است در شکل ۳۱ نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی این فولاد در زیر آمده است که قطر بحرانی ایده آل آن 63.8 mm محاسبه شده است $0.15\%Cu, 0.15\%Mo, 1.02\%Cr, 0.16\%Ni, 0.55\%Mn, 0.25\%Si, 0.05\%C$. قطر ایده آل بحرانی D_1 قطری از میلگرد است که در مرکز آن 50% مارتنزیت تشکیل شده باشد. در این حال نرخ سردایش آنقدر بالاست که نرخ انتقال حرارت توسط دیفوزیون حرارتی فلز کنترل می شود و ضریب انتقال حرارت سطحی نقشی در این میان ندارد.

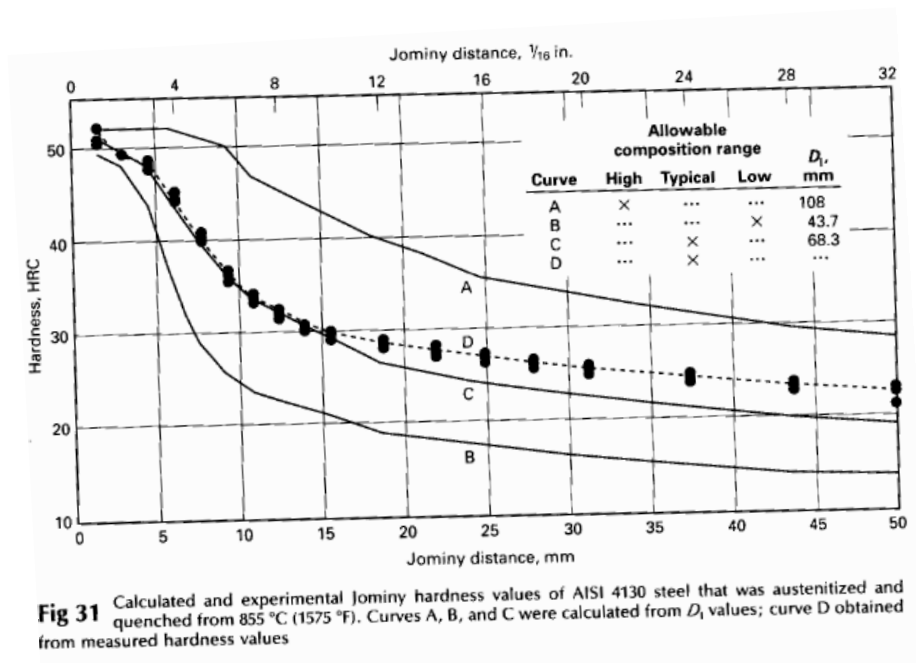


Fig 31 Calculated and experimental Jominy hardness values of AISI 4130 steel that was austenitized and quenched from 855 °C (1575 °F). Curves A, B, and C were calculated from D_1 values; curve D obtained from measured hardness values

منحنی های با خط پر توزیع سختی های بدست آمده در آزمایش جومینی را نشان می دهند. منحنی توپر پایینی برای فولاد ۴۱۳۰ بدست آمده است که عناصر آلیاژی آن همگی در مقادیر پایین محدوده مجاز قرار دارند اما منحنی بالا توپر برای همان فولاد در حالتی است که عناصر آلیاژی در مقادیر بالاتر محدوده مجاز قرار دارند. منحنی های وسطی مقادیر متوسط عناصر آلیاژی در فولاد را نشان می دهند. دوائر متناظر با سختی های اندازه گیری شده بر روی نمونه می باشند. این نوع نگرش به آزمایش جومینی، سختی را بصورت تابعی از فاصله از انتهای میلگردی بیان می کند که کوئنچ شده است و مربوط به نرخ سردایش و سختی پذیری آلیاژ می باشد. سختی در انتهای کوئنچ شده میلگرد که با آب برخورد داشته است، لزوماً بیشترین مقدار سختی است که آن فولاد با درصد کربن معین می تواند داشته باشد. فولادهای با سختی پذیری کم افت قابل ملاحظه ای در سختی در طول میلگرد از خود نشان می دهند اما فولادهای با سختی پذیری بالا این چنین افت سریعی از خود نشان نمی دهند چرا که بالا بودن سختی پذیری به معنای این است که توانایی حفظ سختی در فولاد بالاتر است.

به عنوان مثال، در فاصله 1.6 mm از انتهای کوئنچ نرخ سردایش از دمای 700 C برابر 270 C/s است که معادل با سختی 52 HRC برای این فولاد است. در حالیکه در فواصل 4.75 mm، 7.9 mm از انتهای کوئنچ نرخ سردایش به ترتیب

110 C/s و 43 C/s می باشند که سختی متناظر با آنها 49 و 42 HRC می باشند. مقادیر تقریبی برای این فولاد در جدول ۹ آورده شده اند.

نرخ سردایش که تابعی از فاصله از انتهای کوئنچ است، مقدار تقریبی بوده و بسته به هدایت حرارتی و محصولات استحاله ای در کوئنچ می تواند تغییر کند. نرخ های سردایش در دمای 705 C را نمی توان برای پیش بینی سختی پذیری فولادهای کم آلیاژی و کربنی استفاده کرد زیرا دماهای بحرانی آنها با تغییر عناصر آلیاژی در ترکیب شیمیایی شان تغییر می کنند.

معادل جومپنی

بعد از اینکه منحنی جومپنی ترسیم شد، لازم است نرخ سردایش در نکات مهم قطعه شناسایی شوند. بهترین راه برای اینکار استفاده از معادل جومپنی (J_{eq}) است که روش یاد شده در شکل ۳۲ آورده شده است.

نرخ سردایش را می توان براساس اطلاعات موجود در باره محیط کوئنچ و سطح مقطع قطعه محاسبه و تعیین کرد. نرخ سردایش تقریبی از دمای 705 C برای میلگردهای با قطر 13-100 mm در شکل های 33a,b نشان داده شده است. نرخ های سردایش در سطح، سه چهارم شعاع، نصف شعاع و مرکز میلگرد با نرخ سردایش روی نقاط معادل در میلگرد تست جومپنی ارتباط داده شده اند. بنابراین نرخ سردایش در مرکز نمونه ای با قطر ۵۰ میلیمتر معادل با نرخ سردایش در فاصله 6/16 in از انتهای کوئنچ شده نمونه جومپنی است. هم چنین نرخ سردایش در مرکز همان میلگرد که در روغن کوئنچ شده است، معادل نرخ سردایش در فاصله 10/16 in از انتهای کوئنچ شده نمونه جومپنی است که در آب کوئنچ شده است.

روابط بین قطر میلگرد و سایر موارد مربوط به هندسه ساده قطعه در شکل ۳۴ برای ورق ها و میلگردها و چهارگوش ها آورده شده اند. اصولاً برای استفاده از معادل جومپنی موارد زیر لازم هستند:

(۱) انتخاب قطر میلگرد معادل براساس نرخ سردایش در شکل ۳۴

(۲) استفاده از قطر معادل برای تعیین J_{eq} برای محیط آب (شکل 33a) و محیط روغن (شکل 33b)

نمودارهای CCT و TTT

نرخ های سردایشی که برای رسیدن به ریزساختار و خواص مورد نیاز لازمند، به کمک نمودارهای CCT و TTT محاسبه می شوند.

نمودارهای TTT . برای ترسیم این منحنی ها، نمونه های کوچکی از آلیاژ مورد نظر در دمای مناسبی آستنیته شده و سپس با غوطه وری در حمام نمک و یا سرب مذاب، استحاله سریع انجام شده و بعد نگهداری بمدت مشخصی در این محیط، در آب کوئنچ می شوند. بعد از اتمام عملیات حرارتی، ریزساختار هر نمونه مورد بررسی قرار می گیرد تا بتوان دمایی که در آن استحاله فریتی، پرلیتی و بینیتی آغاز شده است و نیز نرخ سردایشی که به ازای آن با افزایش زمان نگهداری ایزوترمال، استحاله گسترش می یابد، تعیین و محاسبه گردد. نقطه شروع استحاله حالتی است که در زمان نگهداری در دمای آستنیته 1% استحاله انجام شده باشد.

نمودار TTT برای فولاد 4130 (شکل ۳۵) نشان می دهد که فولاد باید تا دمای 540 C سرد شود و آغاز استحاله مارتنزیتی در زمان 1.5 s سبب سخت گردانی کامل فولاد شده و اگر زمان سردایش 10 s طول بکشد، فقط 50 % سختی گردانی می شود. از طرفی نرخ سردایش کمتر سبب کاهش میزان سختی پذیری می شود.

نمودارهای CCT این نمودارها با سرد کردن نمونه ها با نرخ های متفاوت و آزمایش ریزساختارهای حاصله متناظر با هر کدام از آنها ترسیم می شوند.

نمودار CCT برای فولاد AISI 4130 در شکل ۳۶ نشان داده شده است. براساس این نمودار، برای رسیدن به ریزساختار کاملاً مارتنزیتی باید نرخ سردایش در دمای 705 C به 170 C/h برسد. نرخ سردایش در این دما به اندازه 65 C/h سبب می شود در ریزساختار 50 % مارتنزیت تشکیل شود.

تمامی نمودارهای آماده شده فقط قادر هستند که نرخ های تقریبی سردایش را پیش بینی کنند تا بتوان به ریزساختار و خواص مطلوب دست یافت. نرخ واقعی سردایش بستگی به ترکیب فولاد دارد. امکانات مورد نیاز برای کوئنچ بستگی به محیط کوئنچ، ترکیب فولاد و نرخ سردایش قابل دسترسی برای سختی مورد نیاز در مقاطع مهم قطعه بدون برداشتن ترک دارد.

آنالیز فاکتور کوئنچ

منحنی های جومینی، TTT و CCT برای مشخص نمودن سختی پذیری فولاد استفاده می شوند. فاکتوری که اینک بیشتر استفاده می شود، فاکتور آنالیز کوئنچ است.

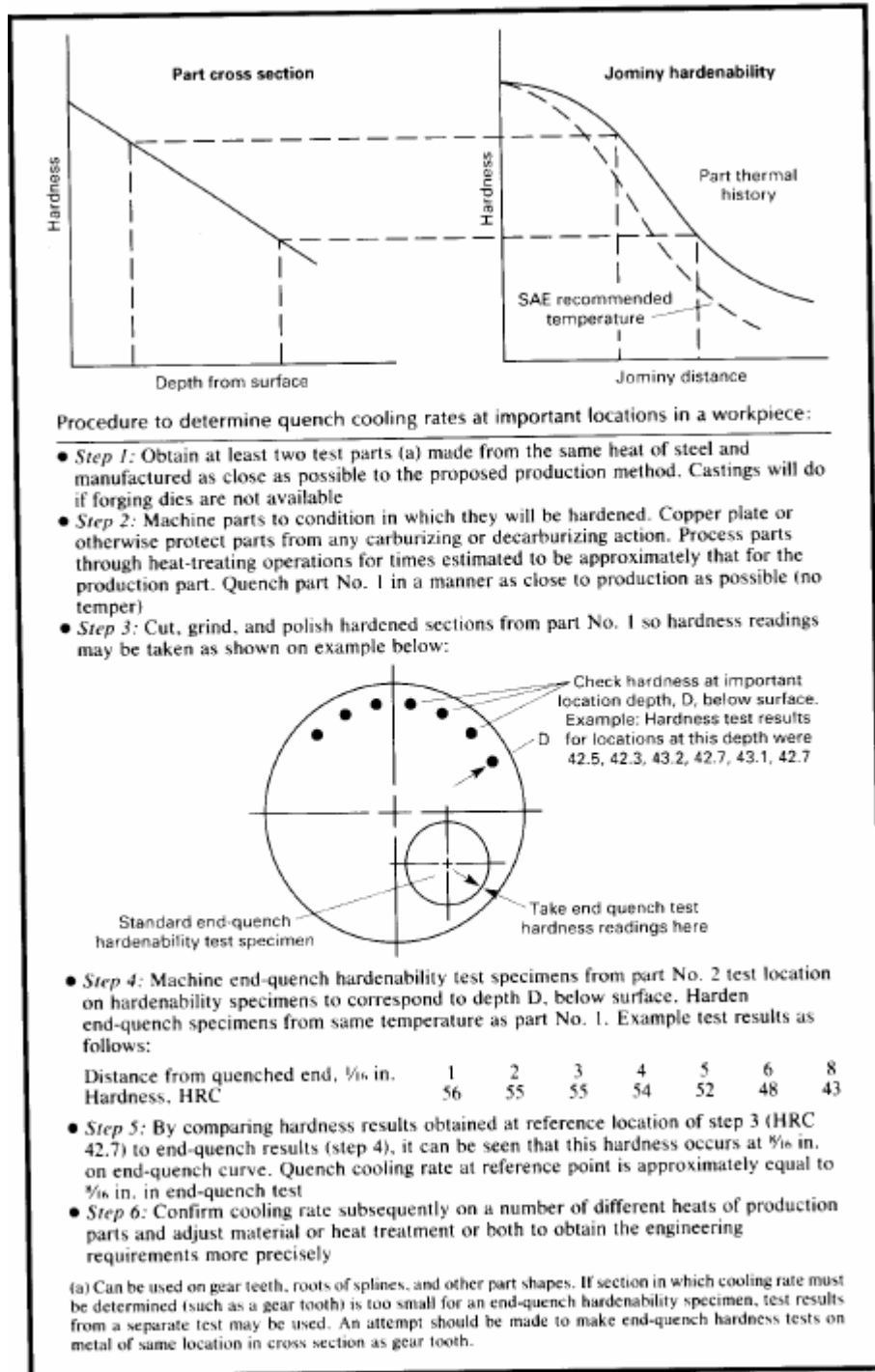


Fig 32 Determination of Jominy equivalent condition (J_{eq}). Source: Ref 31

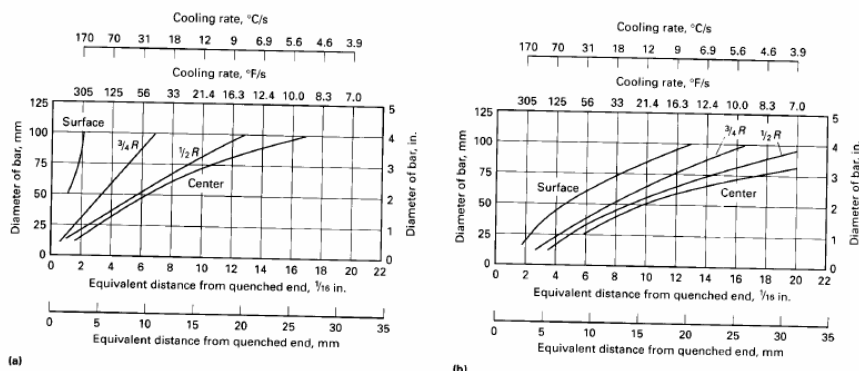


Fig 33 Equivalent cooling rates at 705 °C (1300 °F) for round bars quenched in (a) water and (b) oil. Fluid viscosity is 1.0 m/s (200 ft/min). Correlation of equivalent cooling rates in the end-quenched hardenability specimen and quenched round bars free from scale. Data for surface hardness are for mild agitation.

Table 10 Comparison of actual chemical composition with chemical composition limits of AISI 4130 steel

Steel designation	Composition, wt%						
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu
Low specification	0.280	0.150	0.400	0.160	0.800	0.150	0.150
Actual composition	0.290	0.240	0.550	0.160	1.020	0.150	0.150
High specification	0.330	0.300	0.600	0.160	1.100	0.250	0.150

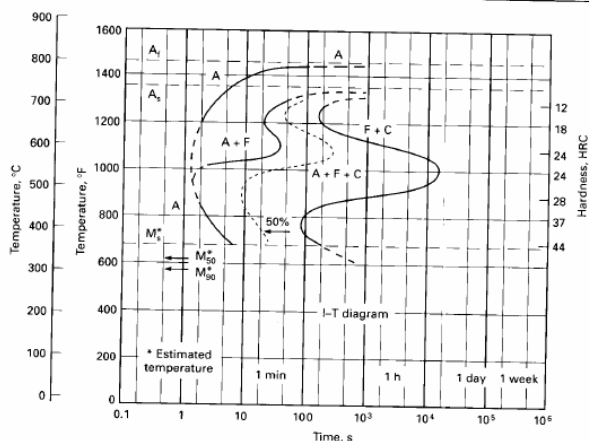


Fig 35 TTT diagram for 4130 low-alloy steel

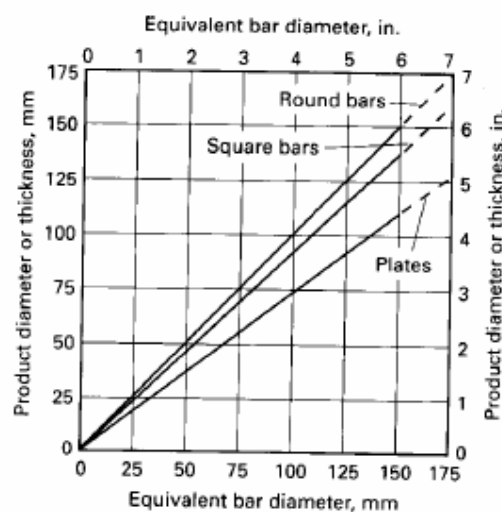


Fig 34 Relation between through-quenched bar diameter and the through-quenched thickness of plates and square bars

روابط بین قطر میلگرد، سختی پذیری ذاتی و مقدار H در شکل ۴۰ ترسیم شده است که به نمودار گراسمن مشهور است. در این نمودار مقدار H به روش زیر مورد استفاده قرار می گیرد: اگر قطعه ای با قطر 25 mm در روغن با تلاطم خوب (H=0.5) کوئنچ شود، در اینصورت مقدار بدست آمده از جدول فوق 8 mm است به عبارتی سختی حاصل از کوئنچ در روغن در مرکز این میلگرد متناظر با سختی روی نمونه تست سختی پذیری با فاصله 8 mm از انتهای کوئنچ شده است. از سوی دیگر، توان کوئنچ را نیز می توان در هر شرایط بارگیری با کمک شکل ۴۰ تعیین کرد. به عنوان مثال، اگر در فاصله 8 mm از انتهای کوئنچ نمونه سختی پذیری سختی 45 HRC باشد و میلگردی با همان جنس در مرکزش سختی 45 HRC را داشته باشد، در اینصورت با کمک از نمودار فوق مقدار 0.5 برای شدت کوئنچ بدست می آید.

در صورتیکه سختی مرکز میلگرد با قطر 25 mm برابر 48 HRC باشد و منحنی های سختی پذیری برای این فولاد مقدار 48 HRC را در فاصله 6 mm نشان دهند، در این صورت تقاطع دو خط 6mm و 25 mm در نقطه 0.70 بوده و به عبارتی شدت کوئچ لازم 0.70 خواهد بود.

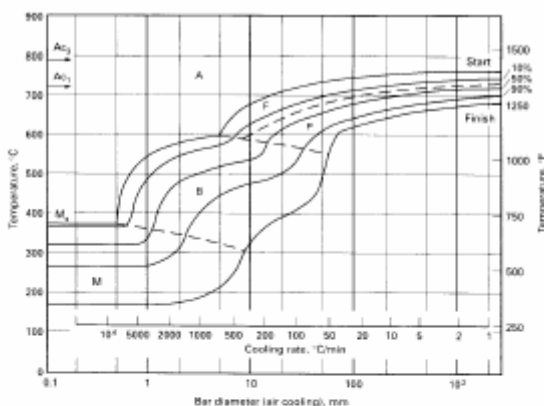


Fig 36 CCT diagram for 4130 low-alloy steel with 0.30C-0.25Si-0.50Mn-0.020P-0.0026-1.00Cr-0.28Ni composition tested at 750 °C (1380 °F). Calculated critical cooling rate is 141 °C/s (258 °F/s).

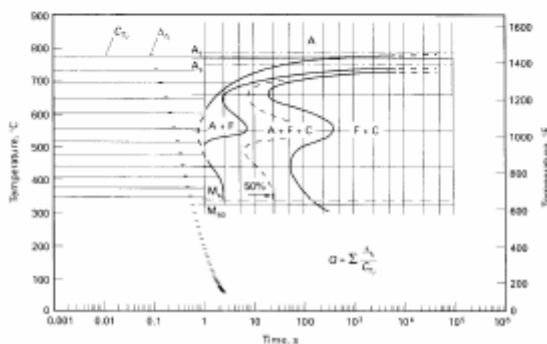


Fig 37 Schematic illustration showing method for calculating a quench factor

Table 11 Measured and predicted hardness at 17 positions in a water quenched 4130 low-alloy steel casting

Casting position	Cooling rate at 705 °C (1300 °F)		Quench factor, <i>Q</i>	Hardness, HRC	
	°C/s	°F/s		Predicted	Measured
1	114.2	205.4	7.2	51.8	52
2	67.7	121.7	12.4	50.9	51
3	40.1	72.1	18.5	49.9	50
4	29.4	52.9	25.6	48.8	50
5	21.6	38.8	33.1	47.7	49
6	17.4	31.3	41.5	46.4	47
7	13.2	23.8	50.1	45.2	45
8	11.1	19.9	58.7	44.1	42
9	9.5	17.0	67.3	43.0	42
10	7.1	12.7	86.8	40.7	39
11	5.4	9.8	103.1	38.9	38
12	4.5	8.1	119.1	37.3	36
13	3.8	6.8	134.8	35.8	35
14	3.3	5.9	150.1	34.5	34
15	2.6	4.6	175.3	32.5	33
16	2.2	3.9	197.6	31.0	31
17	1.8	3.3	215.6	29.9	30

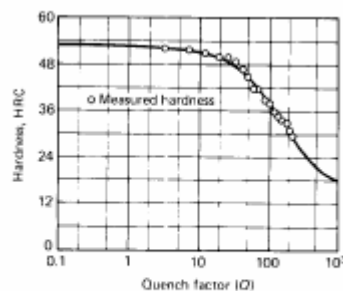


Fig 39 Correlation between predicted hardness, H_c , and measured hardness at 18 locations in a quenched 4130 low-alloy steel casting

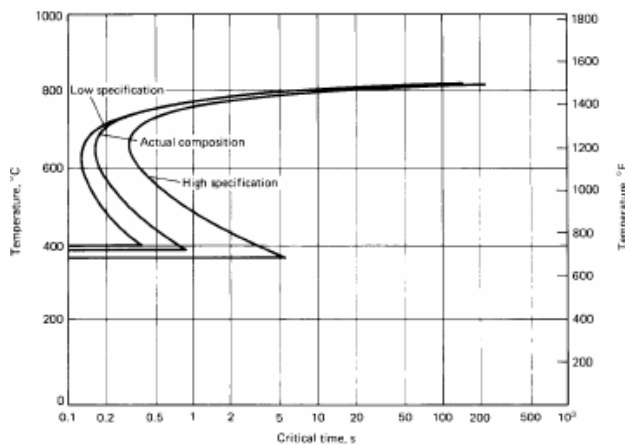


Fig 38 Approximate TTP curves for 4130 low-alloy steel compositions in Table 10

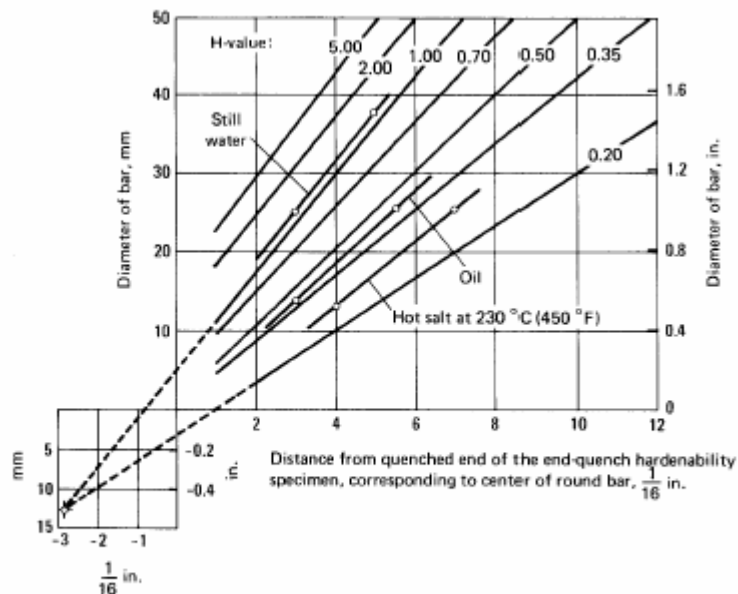


Fig 40 Grossmann chart relating bar diameter, hardenability of steel, and severity of quench. H-value (severity of quench): 5.00, strong brine quench, violent agitation; 2.00, poor brine quench, no agitation; 1.00, poor water quench, no agitation; 0.70, strong oil quench, good agitation; 0.50, good oil quench, good agitation; 0.35, good oil quench, moderate agitation; and 0.20, poor oil quench, no agitation

محیط های کوئنچ

برای کوئنچ از محیط های مختلفی استفاده می کنند که اهم آنها عبارتند از:

- آب
- محلولهای آبی برین
- محلولهای آبی بازی
- محلولهای آبی پلیمری
- روغن ها
- محلولهای آبی پلیمری
- نمک های مذاب
- فلزات مذاب
- مه
- گازها
- اسپری
- قالب خشک

آب

نرخ های مختلف کوئنچ را می توان با آب همراه با ایجاد تلاطم در آن بدست آورد که در نهایت می تواند به بیشترین سختی ممکن منجر شود. آب ارزان بوده و در همه جا است و در صورتیکه آلوده نباشد، کمترین آلودگی زیست محیطی را ایجاد میکند. از طرفی توانایی این را دارد که پوسته های اکسیدی حاصل از حرارت دهی در اتمسفر محافظت نشده را شکسته و سطح را تمیز نماید.

بنابراین با توجه به موارد بالا، آب بطور وسیع در مواردی استفاده می شود که از احتمال ترک برداری و اعوجاج کمتری برخوردار باشد. هم چنین در عملیات حرارتی بیشتر آلیاژهای غیر آهنی، فولادهای زنگ نزن کاربرد وسیعی دارد.

یکی از معایب کوئنچ در آب، نرخ بالای سردایش در دماهای پایین است که بالاترین درصد اعوجاج و ترک برداری را داراست. فلذا آب فقط در کوئنچ قطعات ساده، متقارن و با سختی پذیری کمتر استفاده می شود. از معایب دیگر آب، تشکیل فاز بخار در اطراف آن در داخل آب است. در کوئنچ قطعات پیچیده ممکن است که گازها در مناطقی از آن گیر بیفتند و فلذا در نقاطی سختی کم می شود (نقاط نرم) و توزیع تنش ها در قطعه بصورت یکنواخت انجام نمی شود. قطعاتی که در آب کوئنچ می شوند؛ در صورتیکه از خودرنگی محافظت نشده باشند، ممکن است خورده شوند.

تسهیل کارکرد. برای دستیابی به خواص مکانیکی و نتایج بهتر از جمله سختی، باید دمای آب، میزان آلودگی و تلاطم آن کنترل شود. معمولا در دمای آب 15-25 C و تلاطم بالاتر از 0.25 m/s می توان به بهترین نتایج مورد انتظار دست یافت.

تاثیر دمای آب بر منحنی سردایش و منحنی نرخ سردایش برای پروب اینکونل ۶۰۰ در شکل های (a), (b) 42 نشان داده شده اند. منحنی های دیگری نیز برای سردایش و نرخ سردایش در شرایط دمایی 50 C و نرخ های 0-0.75 m/s ترسیم شده اند که در شکل ۴۳ مشاهده می شوند.

با توجه به اینکه افزایش دمای آب بر نرخ سردایش در مرحله C تاثیر قابل توجهی نداشته و از طرفی هدف اصلی از افزایش دمای آب، کاهش تمایل به ترک و اعوجاج است، فلذا افزایش دمای آب راه حل مناسبی برای اینکار نمی باشد. ترک و اعوجاج بیشتر در مرحله سردایش C اتفاق می افتند. برای توضیح علت استفاده از محیط های کوئنچ دیگر نظیر روغن برای

مثال بالا نیز از این نمودارها می توان استفاده کرد. علت دیگر استفاده از محیط های کوئنچ دیگر به عنوان جانشین آب گرم، توانایی بالای آنها در خیس کردن سطح فلزات است. که شاید یکی از مهمترین فاکتورها در مورد قطعاتی باشد که ترک ها و اعوجاجهای سطحی و موضعی در آنها رخ می دهند.

در مواقعی لازم است که نرخ سردایش افزایش یابد بدون اینکه از محلولهای برین و بازی استفاده شود. در این صورت بهترین راه حل، استفاده از تلاطم برای افزایش نرخ سردایش است. داده های موجود در جدول ۳ و شکل ۴۳ نشان می دهند که افزایش تلاطم سبب بیشتر شدن نرخ سردایش می شود. البته برای یکنواخت سازی و همگن کردن شرایط سردایش قطعه پیشنهاد میشود که تلاطم حتی به میزان کم نیز در سیستم برقرار باشد. با افزایش دمای آب، توان کوئنچ آب نیز کاهش می یابد که در شکل ۴۴ نشان داده شده است. تلاطم برای پراکنده ساختن حباب های هوا در داخل آب و تماس مستقیم آب با سطح قطعه فاکتور بسیار مهمی بشمار می رود.

تأثیر آلودگی ها. آلوده شدن محیط کوئنچ با نمک های عملیات حرارتی بدلیل کاهش زمان تشکیل بخار در فرآیند سردایش، نرخ سردایش را می افزاید. نمک های نامحلول که از طریق حمام نمک فعال وارد مخزن آب می شود، راندمان سیستم پمپاژ را می کاهش دهد و حجم مفید مخزن آب را کمتر میکند. البته پیشنهاد می شود که در دوره های زمانی مشخصی آب را تخلیه کرده و از آب جدیدتری استفاده نمود. آلودگی هایی مثل صابون، لجن امولوسیون سازهای با تشکیل فیلم بخار پیرامون قطعه از انتقال حرارت و تماس مستقیم قطعه با محیط کوئنچ جلوگیری می نمایند.

محلولهای آب نمک (Brine)

به محلول آبی نمک های سدیم و یا کلرید کلسیم، محلول برین اطلاق می شود و در شرایط مشابه با آب و تلاطم یکسان می توان به نرخ سرداش بالاتری دست یافت و یا اینکه برای دستیابی به نرخ سردایش معین؛ نیاز به تلاطم کمتری است. با وجود اینکه نرخ بالای سردایش سبب حذف نقاط نرم در روی قطعه می شود، ولی از طرف دیگر احتمال ترک برداری و اعوجاج را می افزاید. استفاده از فن و یا پروانه برای ایجاد تلاطم در هنگام استفاده از محیط آب و یا روغن الزامی است ولی برای محیط های آب نمک به غیر از فولادهای با سختی پذیری پایین الزامی نیست.

تنها موقعی می توان از این محیط استفاده کرد که محیط های آب و روغن قادر به تامین نرخ سردایش مورد نیاز نباشند، استفاده خواهد شد. از معایب این محیط خورنده بودن آن است که این الزام را ایجاد می نماید که تمام قطعاتی که در تماس با این محیط هستند، از خوردگی محافظت شوند به عبارتی با پوشش دهی مناسب و یا تولید از جنس آلیاژهای پایه مس مقاومت خوردگی را افزایش داد. از معایب دیگر استفاده از این محیط این است که باید در کارگاه از تهویه مناسب استفاده نمود تا بتواند دودهای حاصل را از کارگاه خارج ساخته و از خوردگی دستگاههای مجاور ممانعت بعمل آورد. فلذا هزینه نصب و استفاده از این محیط در مقایسه با آب و روغن بالا خواهد بود.

اثر غلظت. تاثیر غلظت محلول نمک را می توان به روش های گوناگونی بررسی و نشان داد. جدول (۱۳) با وجود اینکه محلول آب نمک با ۲۴ درصد غلظت مرحله بخار را تا حد بسیار زیادی می کاهد اما عملا این کار امکان پذیر نیست.

Table 12 Effect of end-quench distance and Grossmann quench severity, H , on the equivalent bar diameter of 1141 resulfurized carbon steel

Distance from end in end-quench test		Equivalent bar diameter when quenched(a)						Infinite or idealized quench, $H = \infty$
		Oil		Water				
		Still, $H = 0.25$	Circulated, $H = 0.45$	Still, $H = 1.0$	Circulated, $H = 1.5$	Still brine, $H = 2.0$		
mm	1/8 in.	in.						
1.5	1/16	...	0.1	0.15	0.3	0.35	0.4	0.7
3	3/16	...	0.2	0.3	0.5	0.65	0.75	1.15
...	3/16	...	0.35	0.55	0.85	1.0	1.25	1.6
6	1/4	...	0.5	0.80	1.15	1.3	1.5	1.9
...	1/4	...	0.6	0.95	1.4	1.6	1.75	2.2
10	5/16	...	0.8	1.2	1.6	1.8	2.0	2.4
...	5/16	...	1.0	1.4	1.8	2.0	2.3	2.7
13	3/8	...	1.1	1.5	2.1	2.3	2.5	2.9
...	3/8	...	1.3	1.7	2.3	2.5	2.7	3.2
16	7/16	...	1.4	1.9	2.5	2.7	2.9	3.4
...	7/16	...	1.6	2.1	2.8	3.0	3.2	3.6
19	1/2	...	1.7	2.2	3.0	3.2	3.4	3.8
...	1/2	...	1.9	2.4	3.2	3.4	3.5	4.0
22	9/16	...	2.0	2.5	3.3	3.5	3.7	4.2
...	9/16	...	2.1	2.7	3.5	3.7	3.9	4.4
25	5/8	...	2.3	2.8	3.7	3.9	4.1	4.6
...	5/8	...	2.4	3.0	3.9	4.1	4.2	4.7
29	11/16	...	2.5	3.1	4.0	4.2	4.4	4.9
...	11/16	...	2.6	3.3	4.1	4.4	4.5	5.0
32	3/4	...	2.7	3.4	4.3	4.5	4.7	5.1
...	3/4	...	2.8	3.5	4.4	4.7	4.8	5.3
35	13/16	...	2.9	3.6	4.5	4.8	4.9	5.4
...	13/16	...	3.0	3.7	4.7	5.0	5.1	5.5
38	7/8	...	3.1	3.8	4.8	5.1	5.2	5.6
...	7/8	...	3.2	4.0	4.9	5.2	5.3	5.8
41	15/16	...	3.3	4.0	5.0	5.3	5.4	5.9
...	15/16	...	3.4	4.1	5.1	5.4	5.5	6.0
44	1 1/16	...	3.5	4.2	5.2	5.5	5.6	6.1
...	1 1/16	...	3.6	4.3	5.3	5.6	5.6	6.2
48	1 1/8	...	3.6	4.4	5.4	5.7	5.7	6.2
...	1 1/8	...	3.7	4.5	5.5	5.8	5.8	6.3
51	1 1/4	...	3.8	4.5	5.5	5.8	5.9	6.4

(a) When the end-quench hardness curve of a steel has been found, this table enables the user to estimate the hardnesses that would be obtained at the centers of quenched round bars of different diameters, when that same steel is quenched with various severities of quench. For each successive 1/16 in. position, the hardness obtained in the end-quench test would be found at the center of the bar size shown.

Table 13 Relation of brine density to brine concentration

Salt, %	Specific gravity		Salt concentration	
	Direct reading hydrometer	*Bé(a)	g/L	lb/gal
NaCl solutions				
4	1.0268	3.8	41.1	0.343
6	1.0413	5.8	62.4	0.521
8	1.0559	7.7	84.5	0.705
9	1.0633	8.7	95.9	0.800
10	1.0707	9.6	107.1	0.894
12	1.0857	11.5	130.3	1.087
NaOH solutions				
1	1.0095	1.4	10.1	0.0842
2	1.0207	2.9	20.4	0.1704
3	1.0318	4.5	31.0	0.2583
4	1.0428	6.0	41.7	0.3481
5	1.0538	7.4	52.7	0.4397

(a)*Bé, Baumé; specific gravity for liquids heavier than water is $145/(145 - n)$, where n is reading on Bé scale in *Bé

در کوئنچ عادی، در صد غلظت ۱۰٪ NaCl بهترین پاسخ را از خود نشان می دهد. این مقدار در محلول کوئنچ سبب افزایش ماکزیمم سختی بعد از کوئنچ معمولی خواهد شد. که در شکل ۴۵ نشان داده شده است.

تحقیقات کوباسکو که در راستای تعیین مقدار بهینه غلظت نمک و سود (هیدروکسید سدیم) انجام شد، نشان داد که برای هر دو مورد غلظت ۱۰٪ بهترین مقدار است که در شکل ۴۶ نشان داده شده است.

اثر دما. اثر آب نمک در قدرت کوئنچ محلول چندان تحت تاثیر افزایش کم دمای محلول نمی باشد. اگر چه این درصد از نمک را می توان در دمای جوش آب بدان افزود، اما بهترین تاثیرشان بر نرخ کوئنچ در دمای ۲۰ C می باشد. اثر نسبتا کم تغییر دما بر توانایی کوئنچ با آب و آب نمک در شکل ۴۷ نشان داده شده است.

اثر آلاینده ها. در هر دوره زمانی مشخصی باید لجن ها و اکسیدها از وان خارج شوند چرا که کارآیی سیستم پمپاژ و سیستم چرخشی وان را مختل می کنند و حجم آب مفید و نرخ سردایش لازم را کم میکنند.

محلولهای بازی Caustic Solutions

این محلولها شامل ۵-۱۰٪ هیدروکسید سدیم (NaOH) هستند که مزایایی همچون محلول های آب نمک در هنگام کوئنچ از خود نشان می دهند. اما بزرگترین و اصلی ترین مشکلی که سبب می شود، درصد بالای بازیسته آن است که برای سلامتی انسان بسیار مضر است.

منحنی های سردایش نشان می دهند که در دمای 20 C و سرعت 0.9 m/s، محلول با 5% NaOH می تواند سطح یک استوانه با قطر 12.5 mm و طول 50 mm را از دمای 870C تا 200C در زمانی معادل 0.31 s سرد کند. در حالیکه در این شرایط، محلول 5% NaCl به 0.48 s زمان نیاز دارد. آب معمولی در زمان 1.2 s می تواند این رفتار را از خود نشان دهد. با این وجود محلول کلرید سدیم از لحاظ ایمنی در مقایسه با هیدروکسید سدیم ایمن تر است و هزینه کمتری داشته و حمل و نقل آن نیز آسان تر است.

روغن ها Oils

روغن های کوئنچ بر اساس دمای کاری، نوع افزودنیها و ترکیب آنها طبقه بندی می شوند.

طبقه بندی. روغن های کوئنچ به گروه های روغن های آرام، معمولی، سریع و روغن های آستمپرینگ یا کوئنچ گرم طبقه بندی می شوند. البته گروه دیگری نیز بنام روغن های امولسیون روغن در آب وجود دارند که کاربرد محدودی دارند زیرا نمی توان رفتار کوئنچ آنها را پیش بینی کرد.

روغن های پایه معدنی بر اساس شدت کوئنچ و مطابق با آزمایش کوئنچ متر GM طبقه بندی می شوند. (ASTM A235) در این تست، یک ساچمه نیکلی در روغن 25 C کوئنچ می شود و مقدار زمانی که در این محیط طول می کشد تا به دمای کوری برسد؛ ثبت می شود. هرچه قدر این زمان کوتاهتر باشد، بدیهی است که شدت کوئنچ بیشتر است. طبقه بندی روغن ها در جدول ۱۴ ارایه شده است.

تمام روغن های کوئنچ پیشرفته پایه معدنی بوده بالاخص پایه پارافینی هستند و شامل روغنهای چربی نیستند. روغن های معدنی از پایداری خوبی برخوردارند و روغن های چربی دار که سابقا استفاده می شدند، دیگر در دسترس نمی باشند. واردات روغن های ماهی که در کوئنچ قطعات کوچک بخوبی استفاده می شدند؛ در ایالات متحده ممنوع شد دیگر استفاده نمی شود.

روغن های آرام و معمولی Slow and Conventional Oils. این روغن ها عاری از هرگونه آنتی اکسیدانها هستند. ویسکوزیته این روغن ها در دمای 40 C برابر 100-110 SUS بوده که تا 200 SUS در این دما نیز قابل افزایش است.

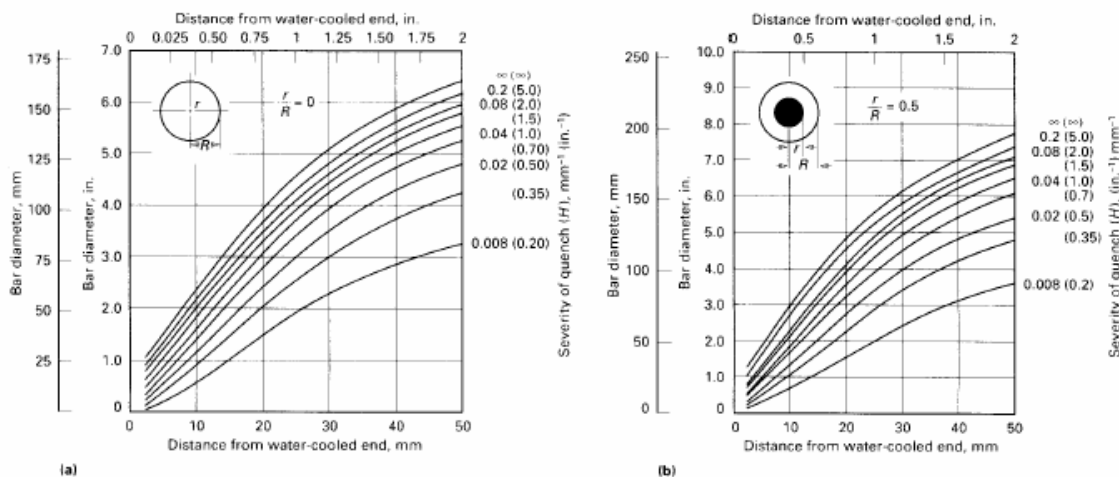


Fig 41 Location in end-quenched Jominy hardenability round bar specimen corresponding to (a) center position and (b) half-radius position. Source: Ref 30, 50

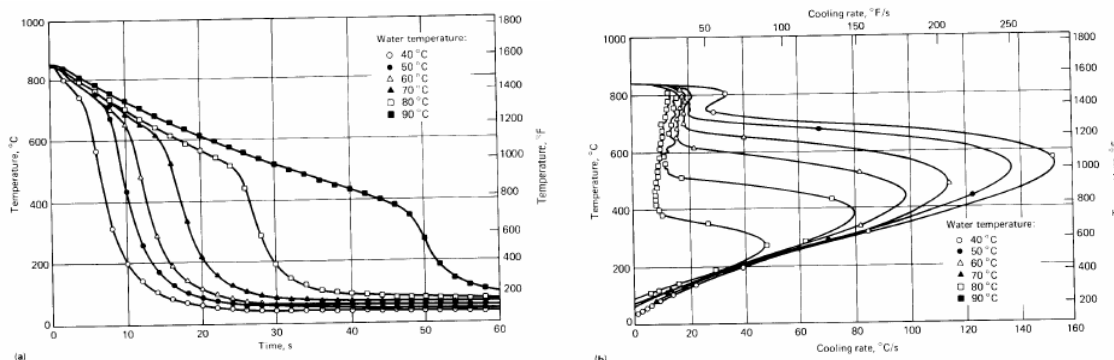


Fig 42 Effect of bath temperature on heat removal in a Wolfson probe. (a) Cooling curves. (b) Cooling rate curves. Quenchant is water having 0.25 m/s (50 ft/min) velocity.

روغن های کوئنچ سریع **Fast quenching Oils**. این روغن های معدنی از ویسکوزیته 50-110 SUS در دمای

40 C برخوردارند اما معمولی ترین و متداول ترین مقدار 85-105 SUS می باشد. این روغن ها حاوی افزودنیهای مورد نیاز

برای افزایش شدت کوئنچ و نیز عوامل افزایشنده قابلیت خیس کنندگی محیط می باشند.

روغن های مارتمپرینگ یا کوئنچ گرم **Mar tempering or Hot quenching Oils**. این روغن ها از

نوع روغن های معدنی پایه پارافینی هستند که حلال آنها تصفیه شده است و از پایداری خوبی در دمای بالا و مقاومت

اکسیداسیون خوبی برخوردارند. این روغن ها در دمای 90-230 C کاربرد دارند. (برای فلزات آهنی) از طرفی روغن های

مارتمپرینگ دارای آنتی اکسیدانهایی هستند که قادر هستند پایداری روغن ها در زمان مصرف بیشتر را افزایش دهند. این

روغن‌ها در دماهای بالا نیز اثر کوئنچ بالایی از خود نشان می‌دهند. هم‌چنین بالا بودن ویسکوزیته آنها سبب می‌شود که زمان تشکیل فاز بخار در سیکل سردایش کاهش یابد.

امولسیون‌های روغن‌های محلول Emulsions of Soluble Oils. از این امولسیون‌ها معمولاً به عنوان

کوئنچ کننده در فرآیندهای شکل‌دهی همچون سنگ‌زنی، برشکاری و گاهی اوقات در فرآیندهای شکل‌دهی نیز استفاده می‌شوند. در این حالت غلظت‌های معمول برای این محلولها 3-15% می‌باشد. رفتار این محلولها مشابه با آب است. البته یادآوری می‌شود که تعیین یک مقدار ثابت برای شدت کوئنچ این محلولها غیر ممکن است چرا که در شرایط کوئنچ کاملاً ناپایدارند.

برخی از خواص فیزیکی و شیمیایی روغن‌های کوئنچ در جدول ۱۵ آورده شده‌اند. در این جدول روشهای تست استاندارد ASTM برای تعیین خواص شیمیایی روغن‌ها نیز آمده‌اند.

خصوصیات سردایشی. محلول کوئنچ ایده‌آل محلولی است که از دمای انحلال تا دمای A_3 آرام سرد کند و در محدوده A_3-A_1 بالاترین نرخ و از دمای A_1 تا دمای اتاق دوباره با کمترین نرخ سرد نماید. آب و محلولهای آبی که حاوی نمک‌های معدنی هستند، در محدوده A_3-A_1 بالاترین نرخ را فراهم می‌آورند ولی در دمای پایین‌ترین نرخ کوئنچ بالایی دارند. بنابراین این محلولها فقط برای کوئنچ قطعات با اشکال ساده و با سختی پذیری کم استفاده می‌شوند. کوئنچ با آب و آب نمک برای قطعات با اشکال پیچیده منجر به تاب برداری، اعوجاج و ترک برداری می‌شود.

همه روغن‌ها نرخ انتقال حرارت کمتری در مقایسه با آب و آب نمک دارند. و انتقال حرارت در آنها یکنواخت است. در نتیجه احتمال تاب برداری و اعوجاج در کوئنچ با روغن از آب کمتر است.

زمان سردایش در مرحله A در روغنهای آرام و معمولی بطور قابل توجهی طولانی است. نرخ سردایش در مرحله B زیاد شده و سپس در مرحله C دوباره کاهش می‌یابد. شدت کوئنچ این روغن‌ها از آب و آب نمک کمتر است بنابراین محیط مناسبی برای کوئنچ فولادهای با سختی پذیری کم نمی‌باشند.

اثر دمای وان، سرعت تلاطم و اندازه مقطع بر ماکزیم نرخ کوئچ در روغن آرام در دمای C 345 در شکل ۴۸ نشان داده شده است. داده های نشان می دهند که ماکزیم نرخ سردایش و نیز نرخ سردایش در دمای C 345 با افزایش سرعت چرخش روغن و کاهش اندازه مقطع افزایش می یابد. همانطوریکه انتظار می رفت، هر دو فاکتور مستقل از دمای وان هستند.

تاثیر قطر پروب و سرعت چرخش بر ماکزیم نرخ سردایش و نیز نرخ سردایش در دمای C 345 و همچنین سختی پیش بینی شده برای فولاد 1045 و 4140 و عدد گراسمن در شکل ۴۹ نشان داده شده اند. این داده ها نیز نشان دهنده مستقل بودن

کارآیی کوئچ از دمای روغن هستند.

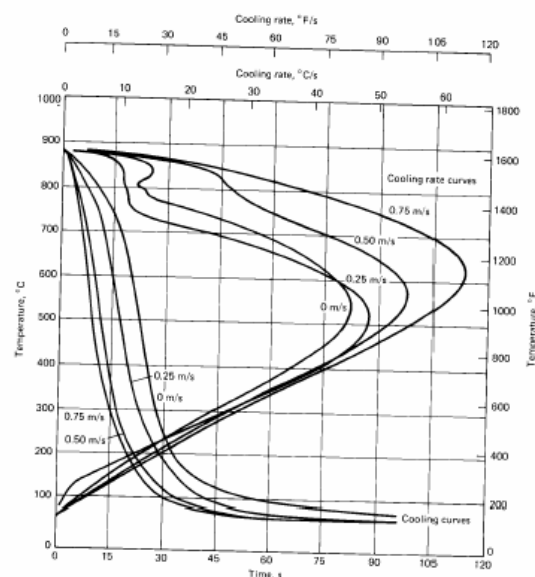


Fig 43 Cooling curves and cooling rate curves for a 25 mm (1 in.) diameter stainless steel probe quenched in 53 °C (130 °F) water that is flowing at selected velocities from 0 to 0.75 m/s @ to 150 ft/min

Table 14 Oil classification by the magnetic quencher test per ASTM D 3520

Oil classification	Cooling time, s
Fast	8-10
Medium	11-14
Slow	15-20

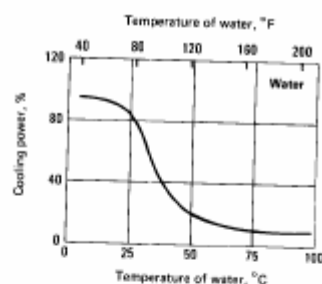


Fig 44 Relation of the surface cooling power of moderately agitated water to water temperature

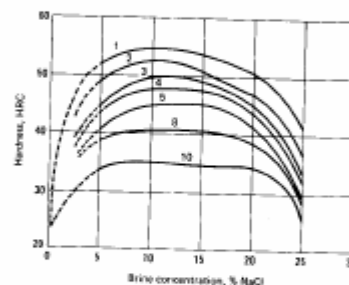


Fig 45 Relation of hardness to brine concentration when still-quenching end-quench specimens in a 99 °C (210 °F) brine solution. Numbers above curves indicate distance from quenched end in units of 1/8 in.

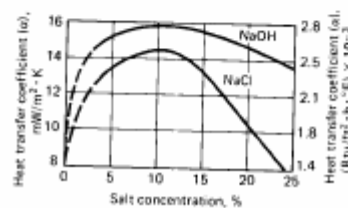


Fig 46 Effect of salt concentration on the heat transfer coefficient of sodium hydroxide and sodium chloride brine solutions

روغن های سریع شدت کوئنچ بالایی در مرحله سردایش A دارند حتی گاهی اوقات این مقدار به نرخ کوئنچ آب نیز می رسد. این روغن ها در مرحله سردایش جوانه زنی جوش نرخ سردایش نسبتا بالایی دارند. نرخ سرایش در مرحله C تقریبا مشابه را روغن های معمولی بوده ولی کمتر از آب است. البته برخی از روغن های سریع دارای افزودنی هایی هستند که قابلیت و کارآیی این روغن ها در سختی پذیری حجمی را افزایش می دهد که در شکل (C) 50 نشان داده شده است. ویژگی های روغن های بالاخص روغن های سریع بستگی به غلظت افزودنی ها دارد. بنا بر این لازم است در طول زمانی مشخصی مقدار این افزودنی ها تعیین شود.

داده های شکل ۵۱ موبد این مطلب هستند که شدت کوئنچ روغن های سریع با گذشت زمان کاهش می یابد. علت این کاهش می تواند رسوب برخی افزودنی ها در روغن باشد که در اینصورت این نوع روغن شبیه روغن های معمولی و آرام می شود.

اگر روغن های کوئنچ را بازیابی کرده و دوباره وارد سیستم کوئنچ شود، باید دقت کرد که مایعات دیگر مجددا وارد سیستم کوئنچ نشوند.

تغییر شدت کوئنچ هشت نوع روغن سریع (افزودنی های اصلاح کننده سرعت) نسبت به روغن معمولی پایه معدنی بدون هر نوع افزودنی با ویسکوزیته 100 sus در دمای C 40 در شکل ۵۲ نشان داده شده است. این منحنی ها اختلاف شدت کوئنچ در روغن های ذکر شده را نشان می دهند. این مقادیر در شرایط بدون تلاطم و با پروب فولاد زنگ نزن آستیتی با قطر 13mm و طول 64 mm بدست آمده اند که یک ترموکوپل در مرکز هندسی آن قرار دارد. دمای روغن C 50 بود.

نتایج حاصل از روش آزمایش کوئنچ متر مغناطیسی در جدول ۵ آمده است و اختلاف اثر کوئنچ بین روغن معمولی و سریع را در دماهای معمولی نشان می دهد. هم چنین در این جدول به روغن مارتمپرینگی برخورد می کنیم که حاوی اصلاح سازهای سرعت بوده و در دمای C 120 شدت کوئنچی معادل مقدار حداکثر شدت کوئنچ روغن سریع دارد.

اثر دما. همانطوریکه از داده های جدول ۶ دیده می شود، تغییرات دمایی متوسط بر شدت کوئنچ روغن تاثیر آن چنانی ندارد. افت قابل ملاحظه در شدت کوئنچ روغن در دمای C 150 رخ می دهد که در این محدوده دمایی بهتر است از روغن های مارتمپر استفاده شود.

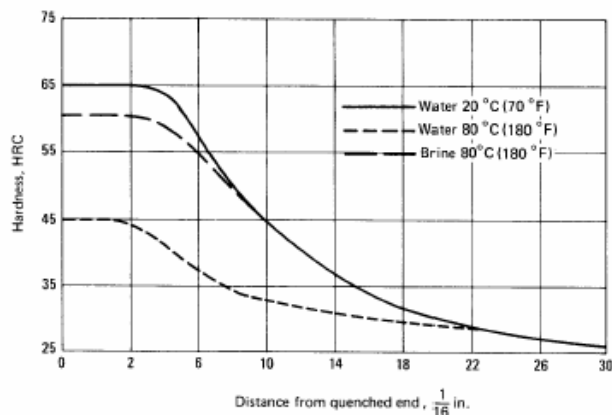


Fig 47 Relation of hardness to the distance from quenched end of specimens quenched in water and brine. Cooling power of brine is greater than water at 80 °C (180 °F).

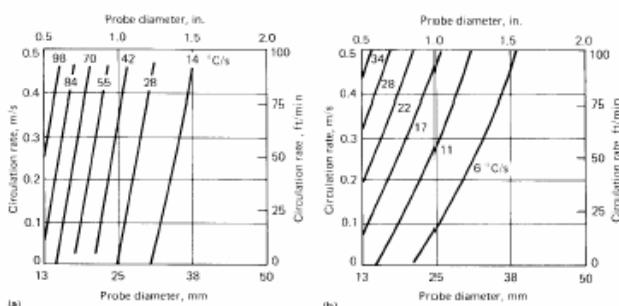


Fig 48 Contour plots that show quenching properties of a typical slow quench oil. (a) Maximum cooling rate. (b) Cooling rate at 345 °C (650 °F). Data are independent of bath temperature.

منحنی های سردایش در شکل ۵۰ نیز نشان می دهند که خصوصیات سردایش محیط های سردایش در محدوده دمای کاری متوسط تغییری نمی یابند. تنها اختلاف آنها موقعی است که دمای قطعه کار به دمای روغن می رسد. (در مرحله آخر سردایش) در طی این مرحله در دمای بالای روغن، نرخ سردایش کاهش می یابد. نرخ های پایین سردایش باعث کاهش گرادیان حرارتی بین سطح و مرکز شده و در نتیجه قطعه از تنش های داخلی کمتری برخوردار خواهد بود.

Table 15 Typical properties of commercially available quenching and martempering oils

Type of quenching oil	No.	API gravity(a)	Flash point(b)		Pour point(c)		Viscosity at 40 °C (100 °F), SUS(d)	Saponification(e)	Ash(f), %	Water(g), %
			°C	°F	°C	°F				
Conventional, no additives	1	33	155	315	-12	10	107	0.0	0.01	0.0
	2	27	185	365	-9	15	111	0.0	0.03	0.0
Fast, with speed improvers	3	33.5	190	370	-12	10	95	0.0	0.05	0.0
	4	35	160	320	-4	25	60	0.0	0.20	0.0
Martempering, without speed improvers	5	31.1	235	455	-9	15	329	0.0	0.02	0.0
	6	28.4	245	475	-9	15	719	0.0	0.05	0.0
	7	26.6	300	575	-7	20	2550	0.0	0.10	0.0
Martempering, with speed improvers	8	28.4	230	450	-9	15	337	2.0	1.1	0.0
	9	27.8	245	475	-9	15	713	2.2	1.1	0.0
	10	25.5	300	570	-7	20	2450	2.5	1.4	0.0

ASTM specifications: (a) D 287, (b) D 92, (c) D 97, (d) D 445, D 2161, (e) D 94, (f) D 482, (g) D 95, D 1533

منحنی های شکل ۵۳ مویده این مطلب هستند که امولوسیون روغن محلول و آب از خصوصیات کوئنچ ضعیفی برخوردار است. منحنی وسطی حالتی را نشان می دهد که امولوسیون شامل ۱۰ درصد روغن و ۹۰ درصد آب در دمای 10 C و

20C است. در این حالت فیلم پایداری از بخار آب در مرحله آغاز کوئنچ پیرامون قطعه تشکیل می شود. بنابراین در دمای بالای روغن، شدت کوئنچ این محلول از روغن معمولی نیز کمتر است. با ادامه کوئنچ، شدت کوئنچ به مقدار آب معمولی می رسد.

از طرفی امولسیون آب در روغن که شامل ۱۰ درصد آب و ۹۰ درصد روغن است، از شدت کوئنچ کمتری برخوردار است و معمولاً محیط مناسبی بشمار نمی آید. البته برخی مواقع برای کوئنچ در روش های القایی استفاده می شود با این وجود برای این موارد نیز محلول های پلیمری مناسب ترند.

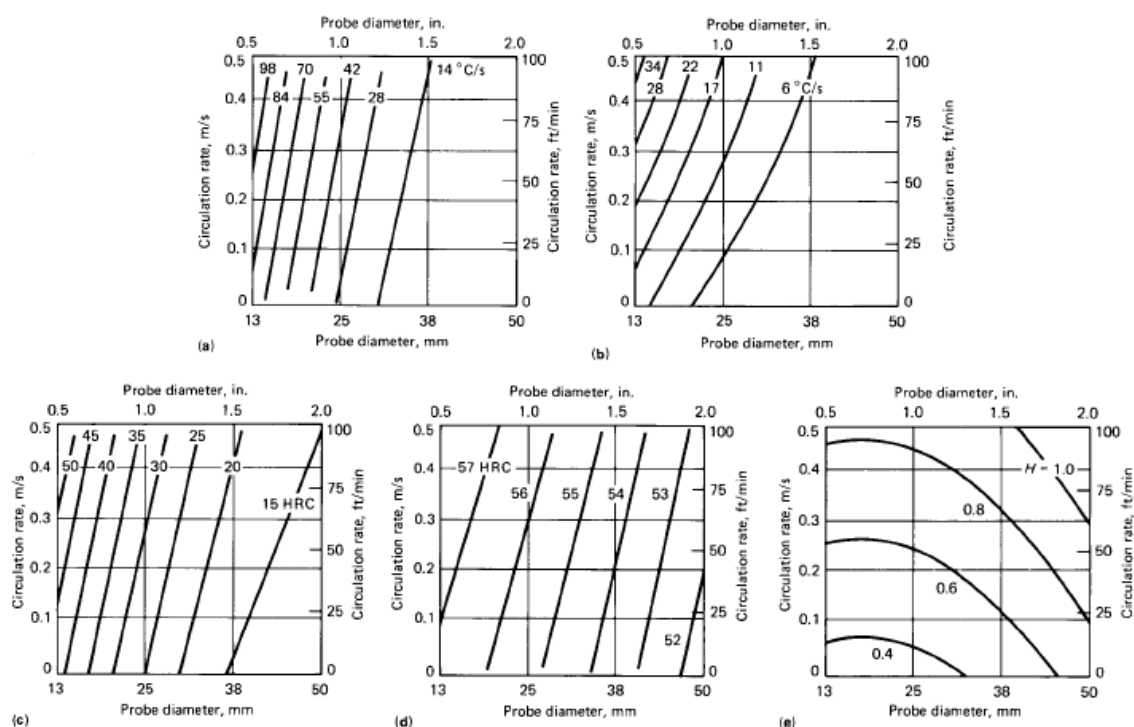


Fig 49 Plots of probe size versus circulation rate for a conventional mineral oil. (a) Maximum cooling rate. (b) Cooling rate at 345 °C (650 °F). (c) Predicted hardness for 1045 steel. (d) Predicted hardness for 4140 steel. (e) Grossmann H' factor values. Data are independent of bath temperature.

امولسیون های روغن در آب معمولاً به عنوان محیط کوئنچ نهایی برای قطعات تمپر شده استفاده می شود تا یک سطح سیاه و مقاوم به خوردگی بر روی قطعات تشکیل شود. این امولسیون ها دارای ۳ تا ۱۰ درصد روغن بوده در دمای ۳ تا ۱۰ درصد روغن بوده در دمای 30-80 C کار می کنند. در این روش بدون اینکه خواص متالورژیکی فلز تغییری نماید، رنگ سیاه بر روی قطعه تشکیل می شود.

مزایای استفاده از روغن های با گرانروی کم در شکل ۵۴ نشان داده شده است. گرانروی روغن با افزایش دما، کاهش می یابد. بنابراین اگر قطعه داغی وارد روغن با گرانروی کم شود، حتی اگر نقطه اشتعال آن کم نیز باشد، خطر آتش سوزی بشدت کاهش می یابد. علت این امر انتقال سریع حرارت قطعه در روغن از طریق اثر ترموسیفون است. (جریانهای رسانایی در روغن) روغن های با گرانروی زیاد خیلی کند می توانند گرما را انتقال دهند. در این روغن ها، یک لایه نسبتاً نازک پیرامون قطعه تشکیل می شود که فرورفتن قطعه در آن، گرمتر می شود. دمای روغن در فصل مشترک هوا-روغن می تواند از دمای خود تلاطمی روغن بیشتر شود و موجب آتش سوزی شود.

در یک آزمایش دونمونه مشابه با وزن 80 kg از دمای 870 C در دو مخزن جداگانه از روغن با وزن 180 Kg و دمای 20 C سریعاً کوئنچ شده اند. روغن یکی از مخازن ها دارای نقطه اشتعال 205 C با گرانروی 120 SUS در دمای 50 C بوده که همراه با تلاطم بوده و روغن مخزن دومی دارای نقطه اشتعال کمتر 120 C با گرانروی 46 SUS در دمای 50 C بوده که 20 s طول کشید تا متلاطم شود.

از این آزمایش دو نکته حاصل شد: نخست اینکه لازم است روغنهای سرد ویسکوز باید پیش گرم شوند تا گرانرویشان کاهش یابد و دوم اینکه روغن های با نقطه اشتعال بالا مناسب ترند. روغن های معمولی و سریع عموماً دارای نقطه اشتعال 125 C بوده که متوسط آنها 175 C است.

روغن های مارتمپر برای استفاده در دماهای بالا طراحی شده اند که در جدول ۱۶ آورده شده اند. این روغن ها در صورتی که در یک اتمسفر خنثی و یا احیا کننده استفاده می شوند، در برابر اکسیداسیون توسط هوا کاملاً محافظ بوده و حتی می توان تا نزدیک دمای اشتعال از آن استفاده کرد.

محیط های کوئنچ روغن نباید با مس و آلیاژ های مس در تماس باشند. چرا که مس در این محیط ها مانند یک کاتالیست عمل کرده و باعث خوردگی و پلیمره شده روغن های معدنی می شود. در این گونه موارد پیشنهاد بر این است که از فولاد، فولاد زنگ نزن، مواد با روکش نیکل و قلع استفاده شود. مواد مسی و برنجی باید با قلع پوشش داده شوند.

آلودگی با آب. آلودگی روغن با آب اثرات منفی بر قابلیت کوئنچ روغن بالاخص روغن های مارتمپر خواهد داشت. در

این روغنها، آب علاوه بر اینکه می تواند سبب غیر یکنواخت شدن سختی در سطح قطعه شود، می تواند باعث آتش سوزی

روغن نیز شود.

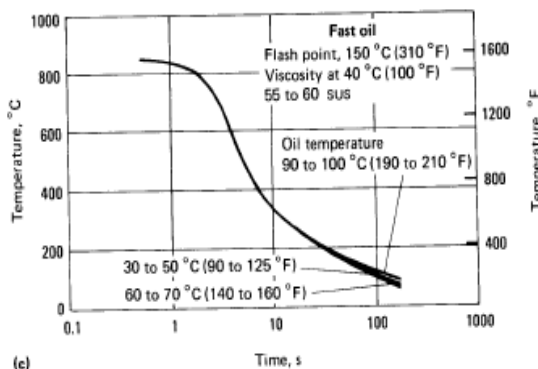
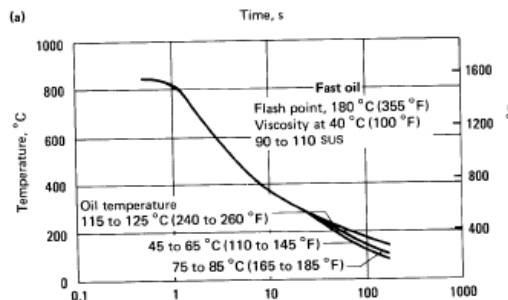
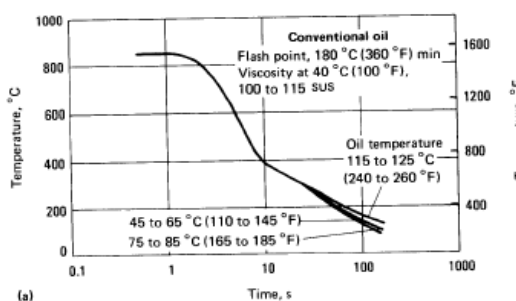


Fig 50 Effect of oil type and oil temperature on center cooling curves for type 304 stainless steel specimens still quenched in a conventional oil and in two fast oils. Thermocouples were placed at geometric centers of specimens, which were 13 mm (0.5 in.) in diameter and 100 mm (4 in.) long. See text for discussion of significance of these data.

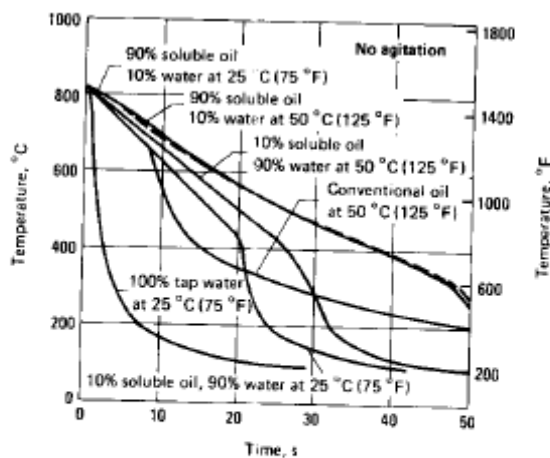


Fig 53 Comparison of center cooling curves for still-quenched 18-8 stainless steel treated in water, oil, and emulsions of water and soluble oil at temperatures of 25 and 50 °C (75 and 125 °F). Specimen dimensions were 13 mm (0.5 in.) in diameter by 64 mm (2.5 in.) long.

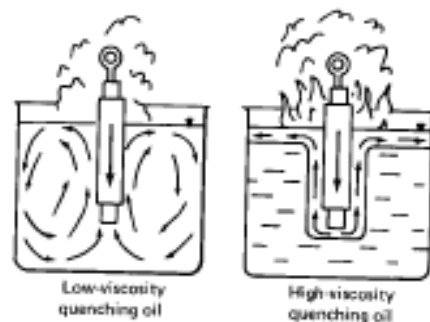


Fig 54 Advantage of low-viscosity quenching oil over high-viscosity oil. See text for discussion.

روش های مختلفی برای حذف آب از روغن وجود دارد(الف) بالابردن دمای محیط تا بالاتر از دمای جوش آب (ب) اجازه

دادن به محیط جهت ته نشین شدن آب و بیرون کشیدن آن و (ج) گذراندن محیط از دستگاه سانتریفوژ.

سیستم های کوئنچ.

دستگاه های مورد نیاز برای عملیات حرارتی متنوع هستند. در کارگاه های عملیات حرارتی کوچک که قطعات خودرو عملیات حرارتی می شوند، شاید نیاز باشد که از سیستم ساده استفاده شود. برای این سیستم، یک وان آب به همراه خط تامین و خط تخلیه آب نیاز است. برای حمل و نقل نیز از یک جفت انبر می توان استفاده کرد. وقتی پیچیدگی و تعداد قطعات بیشتر می شود، ممکن است که تجهیزات دیگری نیز به خط اضافه شود.

برای یک خط عملیات حرارتی کامل، تجهیزات زیر باید تامین و نصب شوند:

- ۱- کوره ها
- ۲- مخزن کوئنچ
- ۳- تجهیزات مربوط به حمل و نقل قطعات کوئنچ
- ۴- محیط کوئنچ
- ۵- تجهیزات مربوط به ایجاد تلاطم
- ۶- سرد کننده ها Coolers
- ۷- گرم کننده Heaters
- ۸- پمپ ها و فیلترها
- ۹- مخزن تامین محیط کوئنچ
- ۱۰- تجهیزات مربوط به تهویه و خطرات آتش سوزی
- ۱۱- تجهیزات مربوط به تخلیه اکسیدها از مخزن

متغیرهای فرآیند کوئنچ

وظیفه اصلی و اولیه محیط کوئنچ انتقال حرارت از فلز گرم به محیط کوئنچ سردتر است. در درک فرآیند کوئنچ باید به سه نکته زیر دقت نمود:

- ۱- ماهیت و خواص حرارتی فلز
- ۲- ویژگی های فیلم تشکیل شده بر روی قطعه گرم

۳- خواص کلی محیط کوئنچ

خواص انتقال حرارت در فصل مشترک فلز/محیط کوئنچ را می توان از طریق معادله گراسمن براساس شدت کوئنچ (H) از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$H = \frac{h}{2k}$$

h ضریب فیلم و k هدایت حرارتی فلز است.

مقدار گراسمن بوسیله محیط کوئنچ کنترل می شود. ضریب هدایت حرارتی k خاصیت فلز بوده و h نرخ انتقال حرارت از فلز به محیط کوئنچ را تعیین می کند. هدایت حرارتی با نوع فلز تغییر کرده و وابسته به دما می باشد. انتقال حرارت از سطح فلز گرم به محیط کوئنچ از رابطه زیر بدست می آید:

$$q = h \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{Eq 21})$$

در این فرمول q مقدار گرمای انتقال یافته، A سطح فلز، h ضریب انتقال حرارت، T_1 دمای اولیه فلز گرم و T_2 دمای حمام می باشند. با توجه به فرمول بالا، می توان گفت که با افزایش $T_1 - T_2$ میزان جریان انتقال یافته نیز بیشتر می شود. بنابراین، این انتظار بجاست که با افزایش دمای اولیه فلز و یا کاهش دمای محیط، نرخ انتقال حرارت نیز بیشتر شود. مقدار گرمای خارج شده از قطعه هنگام کوئنچ را می توان از فرمول زیر نیز محاسبه کرد:

$$Q = C_p \cdot W_m \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{Eq 22})$$

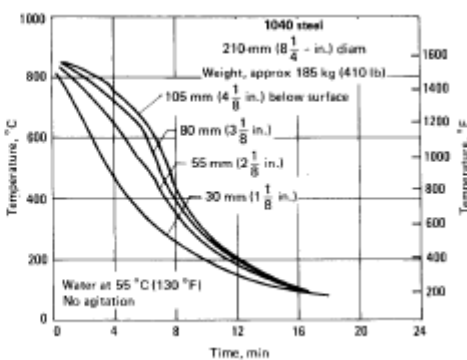
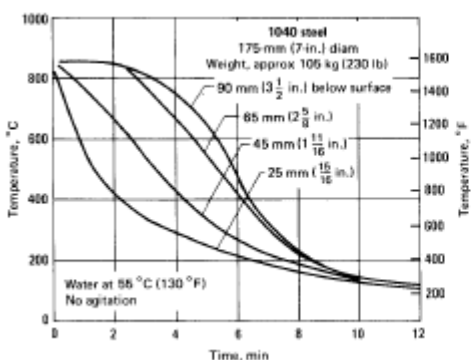
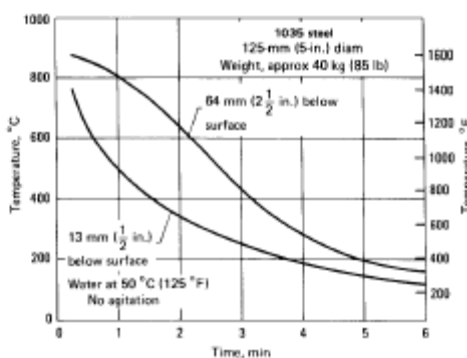
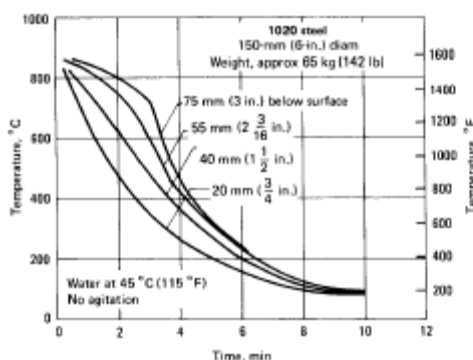
در این فرمول، C_p گرمای ویژه فلز بوده (که برای فولاد تقریباً 0.166 Btu/ib.F است)، W_m وزن محیط کوئنچ بر حسب Btu بوده و T_1 دمای اولیه فلز و T_2 دمای ثانویه فلز است. Q گرمای خروجی از فلز و ورودی به محیط کوئنچ بر حسب Btu است.

با وجود اینکه ظرفیت گرمایی فلز بستگی به دما دارد، ولی این معادله ابزار مناسبی برای پیش بینی مقدار گرمای خروجی از فلز میباشد. البته در این فرمول فرض بر این است که هیچگونه انتقال حرارتی به سمت محیط بیرون انجام نمی شود. معادله دیگری که می توان برای محاسبه مقدار افزایش دمای محیط از آن استفاده کرد.

یاد آور می شود که نرخ انتقال حرارت از سطح فلز به محیط کوئنچ تحت تاثیر میزان اکسید در سطح آن است. مقدار اکسید به مقدار کم در سطح باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می شود ولی اگر مقدارش بیشتر باشد، سبب کاهش آن خواهد شد. گاهی اوقات آبکارها قطعات را در داخل سبد و با فاصله نزدیک بهم آبکاری می کنند که می تواند سبب بیش گرم شدن محیط کوئنچ و نیز کاهش سختی در قطعات داخلی تر شود. با وجود اینکه کوئنچ درست انجام شده است. محیط های کوئنچ دارای ویژگیهای متفاوت در تشکیل فیلم می باشند. ضخامت فیلم و پایداری آن فاکتور های مهمی هستند. تلاطم، دمای حمام و غلظت بر آن موثر هستند.

اثر وزن و اندازه مقطع:

منحنی های شکل های ۷۹ و ۸۰ تاثیر وزن و اندازه قطعه بر سردایش فولاد کربنی در محیط های آب و روغن را نشان می دهند. در شکل ۸۱ نیز این اطلاعات جمع آوری شده اند. در شکل های ۸۲ تا ۸۴ تاثیر ترکیبی وزن و محیط کوئنچ نشان داده شده اند.



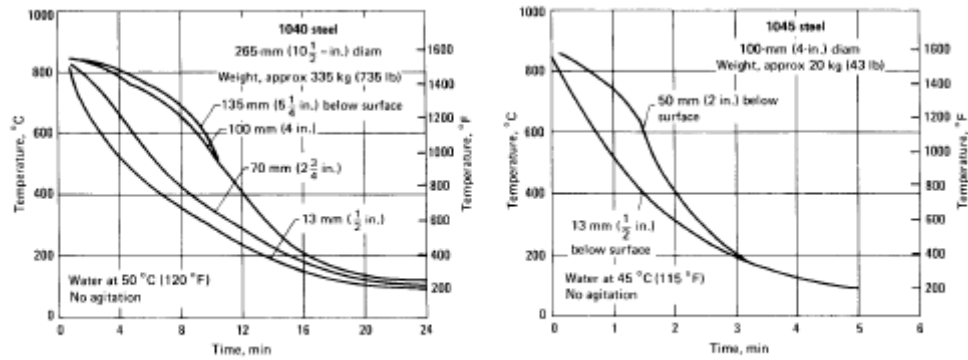
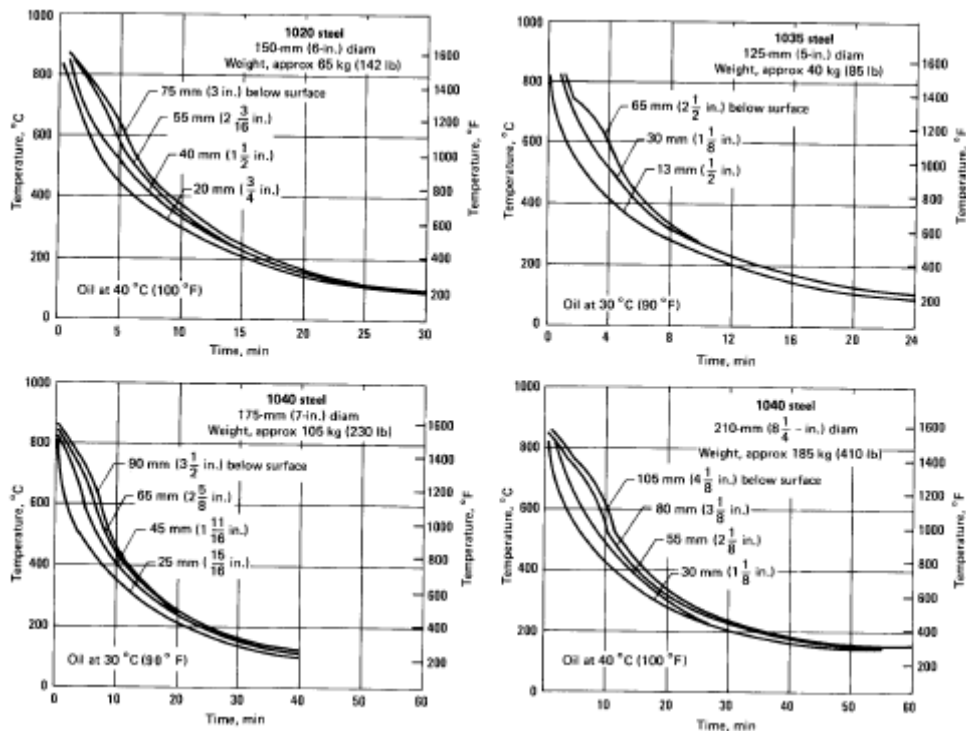


Fig 79 Effect of mass and section size on cooling curves obtained for the water quenching of plain carbon steels



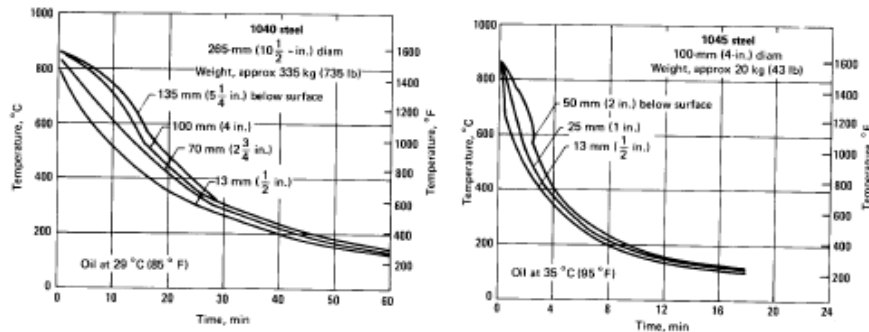


Fig 80 Effect of mass and section size on cooling curves obtained for the oil quenching of plain carbon steels

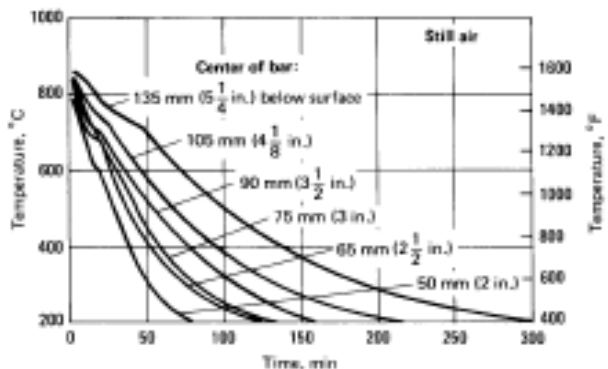
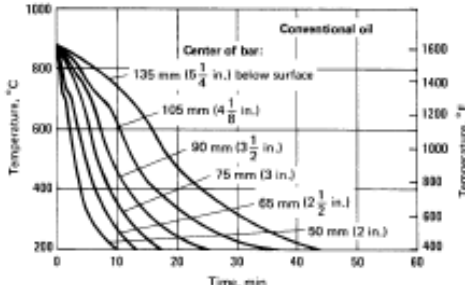
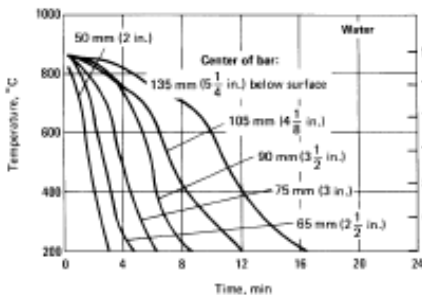


Fig 81 Summary of cooling curve data on water quenching (see Fig 79) and conventional oil quenching (see Fig 80) compared to still air quenching at the center of plain carbon steel bars

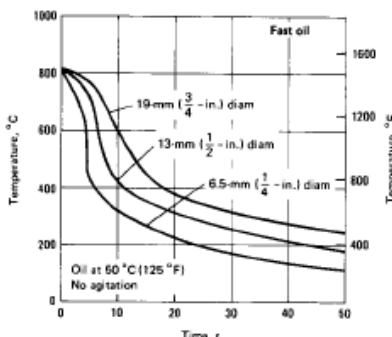
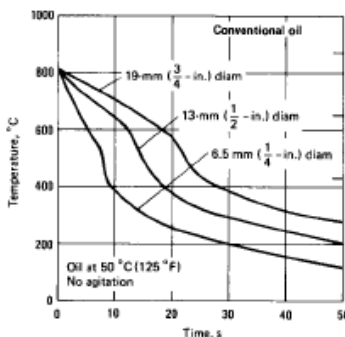


Fig 82 Cooling curves for 64 mm (2½ in.) long austenitic stainless steel specimens of various diameters quenched in conventional oil and fast oil

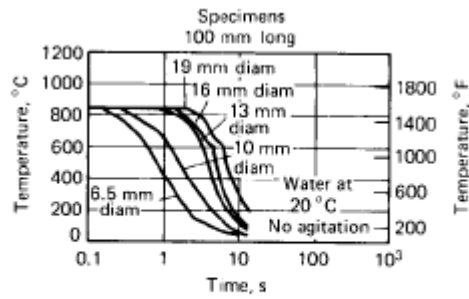


Fig 83 Cooling curves for 100 mm (4 in.) long drill rod cylinders of various diameters quenched in water

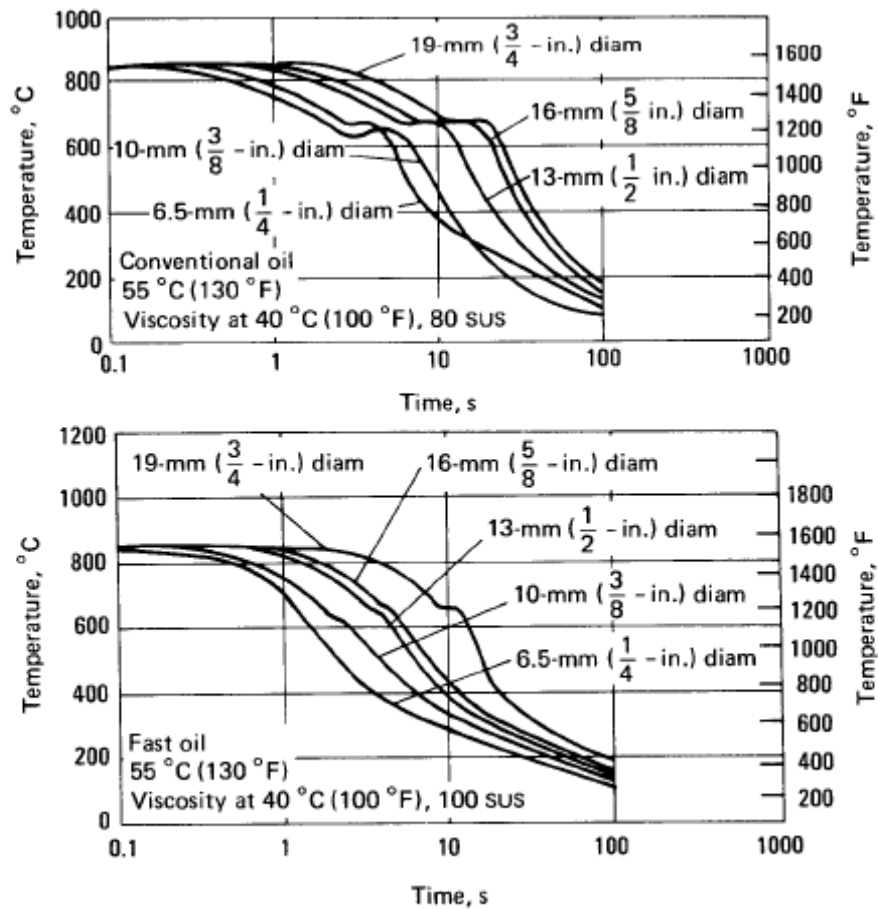


Fig 84 Effect of mass and section size on center cooling curves in still quenching 100 mm (4 in.) long commercial drill rod cylinders of various diameters in a conventional oil and fast oil

طراحی مخازن کوئنچ:

- وزن فولادیکه در هر ساعت کوئنچ می شود، شکل فولاد و اندازه قطعه، ضخامت فولاد و خواص مکانیکی مورد نیاز بر طراحی مخازن موثر هستند. برخی از پیشنهادات مهم برای اینگونه طراحی عبارتند از:
- ۱- مدت زمانی که لازم است قطعه باید سرد شود و زمانیکه لازم است قطعه در داخل آن نگهداشته شود، باید مشخص شود. سپس باید حجم آن را مشخص نمود. تا اندازه مخزن و مبرد cooler محاسبه گردد.
 - ۲- باید فاصله مناسبی بین قطعه و چهارچوب مخزن در نظر گرفته شود تا انتقال حرارت خوب انجام شود.
 - ۳- قطعات گرم و داغ نباید با کنویر برخورد کنند.
 - ۴- مخزن باید قابلیت دسترسی و تمیز کردن را داشته باشد.
 - ۵- باید این امکان را فراهم آورد که اکسیدها از مخزن بیرون روند.
 - ۶- باید سیستم از تهویه مناسب برخوردار باشد.
 - ۷- برای روغن ها باید از سیستم جلوگیری از آتش سوزی استفاده کرد.
 - ۸- وقتی از محلول های بازی و نمک استفاده می شود، لازم است که از مواد ویژه استفاده شود.
 - ۹- برای محیط کوئنچ روغن می توان از فولاد های $25Cr-12Ni$ و یا $35Ni-15Cr$ استفاده کرد اما اینها برای آب و یا سایر محیط ها مناسب نمی باشند.

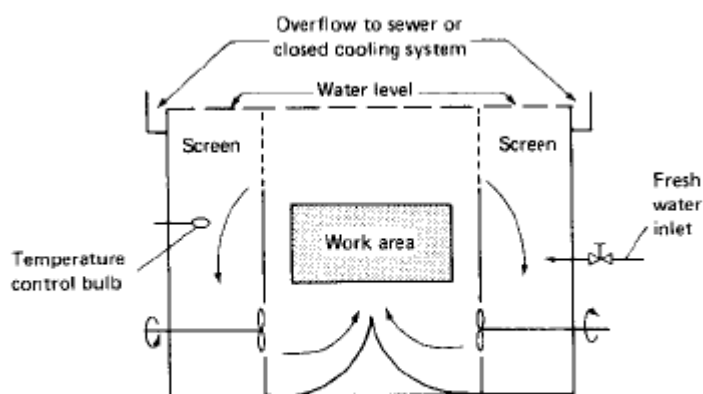


Fig 86 Temperature-controlled overflow tank used for water quenching applications

فیکسچر: Fixtures

ابزار مفیدی برای جلوگیری از تاب برداشتن و اعوجاج قطعات در محیط کوئنچ می باشند و می توانند از شکل های ساده تا شکل های پیچیده برای قطعات مختلف طراحی و ساخته شوند. به عنوان مثال در صورتیکه شفت ها به صورت عمودی و با نگره داشتن توسط فیکسچر کوئنچ شوند، میزان تاب تا حد بسیار زیادی کاهش می یابد. قطعات مدور مثل رینگ ها که با فیکسچر بطور افقی حرارت دیده اند اما همراه با آن بطور عمودی کوئنچ شده اند، ممکن است دارای توزیع غیر یکنواخت سختی در سطح قطعه باشند زیرا جریان محیط کوئنچ توسط فیکسچر محدود می شود.

سیستم های سردایش:

با ادامه روند کوئنچ قطعه در محیط کوئنچ، گرمای فلز وارد محیط کوئنچ شده و دمای آن افزایش می یابد. برای حصول به نتایج یکسان در هنگام کوئنچ لازم است که دمای محیط کوئنچ کنترل شود. فلذا برای اینکار از سیستم سردایشی کنترل دما استفاده می شود.

مبدل های حرارتی که برای اینکار استفاده می شود، دارای مزایای خاص خودشان را دارند. نرخ انتقال حرارت در هنگام عبور از مبدل بستگی به سرعت دستگاه سردکننده ای دارد که بکار گرفته شده است. با افزایش سرعت حرکت دستگاه سرد کننده، نرخ انتقال حرارت به بالاترین مقدار خود با توجه به توانایی مبدل می رسد. بنابراین راندمان سیستم سردایش به قدرت پمپی که استفاده می شود، بستگی دارد.