

## تأثیر دمای آنیل، نرخ سرمایش و مقدار نورد سرد بر پخت سختی فولاد کم کربن

اشکان نوری<sup>۱\*</sup>، حسین حسن نژاد<sup>۲</sup>، جمال الدین فرشته خصلت<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی مواد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اراک (a-nouri@araku.ac.ir)

۲- استادیار گروه مهندسی مواد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اراک (h-hasannejad@araku.ac.ir)

۳- دانشکده مهندسی متالورژی دانشگاه آزاد اسلامی کرج، شرکت مالیبل سایپا (jamaleddin1976@yahoo.com)

### Effect of the Annealing Temperature, Cooling rate and Cold Rolling Reduction Rate on the Bake Hardening a Low Carbon Steel

A. Nouri<sup>1\*</sup>, H. Hasannejad<sup>2</sup>, J. Fereshtekheslat<sup>3</sup>

1-Assistant professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, (a-nouri@araku.ac.ir)

2- Assistant professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, (h- hasannejad@araku.ac.ir)

3- Islamic Azad University, Karaj Branch; Malleable Saipa Co., (Jamaleddin1976@yahoo.com)

#### چکیده

در این پژوهش اثر شرایط آنیل و نیز میزان نورد سرد بر روی خاصیت پخت سختی یک فولاد کم کربن مطالعه شد. این ویژگی به وسیله اندازه گیری افزایش تنش تسلیم بین مقادیر ۲٪ ازدیاد طول نسبی و استحکام تسلیم بالاتر ناشی از پیر کرنشی بعد از پیر سازی در دمای ۱۷۰°C به مدت ۲۰ دقیقه صورت گرفت. مشخص شد که دمای آنیل دارای اثری مهم در افزایش مقدار کربن محلول و افزایش خاصیت پخت سختی است. برای بررسی نقش نرخ سرمایش از دو الگوی سرمایش آهسته و سریع استفاده شد. مشاهده شد که رژیم سرمایش آهسته، بر میزان پخت سختی تاثیر قابل توجهی ندارد ولی به هر حال افزایش نرخ سرمایش به طور کلی موجب افزایش خاصیت پخت سختی می‌گردد. این امر می‌تواند به سبب جلوگیری از رسوب گذاری مجدد کاربرد و نیز ایجاد کربن فوق اشباع در محلول جامد باشد. از مطالعه اندازه دانه نیز مشخص گردید که افزایش این پارامتر قابلیت پخت سختی را بیشتر می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پخت سختی؛ شرایط آنیل، نرخ سرمایش؛ پیرکرنشی

#### Abstract

In this investigation, effect of annealing conditions as well as cold rolling reduction rate on the bake hardening property of low carbon steel was studied. This characterization is determined by measuring the yield stress increment between the values at 2% elongation and the higher yield strength due to strain aging after aging at 170°C for 20 min. It was found to the annealing temperature has a significant effect in increasing the solute carbon content and enhancing bake hardening property. For the purposing of the role of cooling rate was applied two mode of cooling including slow and rapid cooling. It was observed that the cooling rate has not noticeably effect on the bake hardening value. However, in general, increasing cooling rate was caused increasing bake hardening property. This increasing could be due to prevention of carbide re-precipitation as well as making super saturation of carbon content in solid solution. Study of grain size showed that increasing this factor enhances bake hardenability.

**Keywords:** Bake hardening, Annealing conditions, Cooling rate, Strain aging

(کد: ۹۱۱۰۶۲)

## مقدمه

چگالی نابجایی‌ها و ماهیت ساختار نابجایی‌ها در فریت کنترل شود [۸]. پیر کرنشی صورت گرفته در پخت سختی از نوع پیر کرنشی استاتیکی است. پیرکرنشی استاتیکی ناشی از فعل و انفعال بین اتم‌های بین نشین و نابجایی‌ها بعد از اعمال تغییر شکل پلاستیک است. پیرکرنشی استاتیکی بر اساس تغییرات خواص فلز و در اثر واکنش داخلی عیوب، مثلاً نابجایی‌ها با اتم‌های محلول بین نشین بعد از اعمال تغییر شکل پلاستیک است. چون تغییرات پس از تغییر شکل پلاستیک رخ می‌دهد این فرایند را پیرکرنشی استاتیکی می‌گویند [۹]. این در حالی است که نقش پیر کرنشی دینامیکی بر رفتار پخت سختی فولاد IF نیز مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۰]. تسلیم غیر پیوسته و پدیده نقطه تسلیم که بواسطه اتم‌های کربن و نیتروژن در محلول‌های جامد بین نشین در منحنی تنش - کرنش ایجاد می‌شود پدیده ای فعال شونده با حرارت است به طوری که کربن محلول به سمت نابجایی‌های متحرک مهاجرت می‌کند. در ادامه اتمسفری موسوم به اتمسفر کاترل در پیرامون نابجایی‌ها تشکیل می‌شود که موجب قفل شدن نابجایی‌ها می‌گردد [۱۱]. در حین عملیات پخت رنگ که در دمایی حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰°C و به مدت تقریبی ۲۰ دقیقه انجام می‌شود پیر کرنشی و در نتیجه پخت سختی القا می‌شود [۱۲].

ترکیب شیمیایی فولادها برای انجام عملیات پخت سختی حائز اهمیت است. لازم است این فولادها از نوع کم کربن باشند تا شکل پذیری عالی قبل از پخت و سختی و استحکام بالا پس از پخت سختی و در محصول نهایی داشته باشند. گزارش شده است که وجود کربن در محلول جامد فریت به میزان ۱۵ تا ۲۰ ppm و زنی باعث ایجاد پخت سختی حداقل به میزان ۲۰ MPa می‌گردد [۳]. هدف از انجام این کار، مطالعه اثر شرایط آنیل و اندازه دانه فولاد روی خاصیت پخت سختی است. از این رو مواردی نظیر میزان نورد سرد که باعث ایجاد اندازه دانه‌های متفاوت می‌گردد و نیز دمای آنیل و نرخ سرمایش در دو الگوی آهسته و سریع ارزیابی شده و نتایج مورد بحث قرار گرفتند.

## مواد و روش تحقیق

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد مورد بررسی را نشان می‌دهد. نمونه‌ها از تسمه‌های نورد گرم شده بودند که در ادامه

انتظار براین است موادی که برای ساختن بدنه اتومبیل‌ها استفاده می‌شوند تا حد ممکن قوی و مستحکم ولی در عین حال سبک و کم وزن باشند [۱ و ۲]. این مواد هم به واسطه جنبه‌های مبتنی بر نیازهای مربوط به ایمنی و سلامتی و هم نیازهای جهانی امروزه، هرچه بیشتر و بیشتر مورد توجه هستند. برخی مواد سبک نظیر آلایژهای آلومینیوم، منیزیم و پلاستیک‌ها از این حیث مطرح هستند و به صورت موفقیت آمیزی در برخی قطعات انواع جدید اتومبیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند ولی همچنان موارد متعددی از قبیل قیمت، شکل پذیری، قابلیت اطمینان و قابلیت بازیافت وجود دارد که استفاده از برخی مواد اگرچه سبک را در صنعت اتومبیل با محدودیت مواجه کرده است.

استفاده از ورق‌های فولادی با قابلیت موسوم به پخت سختی<sup>۱</sup> می‌تواند یک گزینه مناسب برای دستیابی به خواص مورد نظر باشد [۳ و ۴]. در واقع استفاده از فولادهای کم کربن پخت سختی شده می‌تواند ترکیب مناسبی از استحکام و شکل پذیری که در ساخت بدنه خارجی اتومبیل مورد نیاز است، فراهم کند. این فولادها استحکام تسلیم پایین و شکل پذیری بالا دارند که از حیث تغییر شکل، ویژگی‌های مثبتی محسوب می‌شوند. از سوی دیگر این فولادها قادرند استحکام نهایی بالایی را پس از فرآیند پخت رنگ بدست آورند [۵ و ۶]. می‌توان افزایش استحکام فولاد در پخت سختی را ناشی از توانایی فولاد به مستحکم شدن در عملیات پخت رنگ دانست. به بیان دیگر این ورق‌ها در شرایط تحویل و پس از رنگ شدن و پخت رنگ مقاومت زیادی در برابر فرو رفتگی و قر شدگی همراه با چقرمگی خوب و مقاومت به ضربه دارند [۴].

مکانیزم پخت سختی نوعی پیرکرنشی است که تحت تاثیر توزیع و جدایش اتم‌های بین نشین کربن و یا نیتروژن در محلول‌های جامد بین نشین و لذا تولید نابجایی‌های متحرک از طریق اعمال شکل دهی پرسی ایجاد می‌گردد [۳ و ۷]. فرآیند پخت سختی می‌تواند به وسیله مقدار کربن در فریت، کسر حجمی و مورفولوژی فازهای موجود در ریزساختار قبل از عملیات و

1 - bake hardening

قابلیت پخت سختی از طریق انجام آزمایش کشش دمای اتاق با نرخ کرنش  $10^{-3} S^{-1}$  و  $3/3 \times$  مطابق با استاندارد ASTM-E8 بررسی شد. شکل ۱ شماتیک این مورد را نشان می‌دهد. نمونه‌ها ابتدا تا ازدیاد طول نسبی ۲٪ بارگذاری شدند و سپس نمونه‌ها بار برداری شدند و برای مدت ۲۰ دقیقه در دمای  $170^{\circ}C$  که معمول شرایط پخت رنگ می‌باشد نگه داری شدند تا پیرکرنشی استاتیکی صورت گیرد. در ادامه نمونه‌ها، به صورت کششی تا مرحله شکست بارگذاری شدند و استحکام تسلیم و افزایش استحکام ناشی از پخت سختی در آنها مطابق با شماتیک شکل ۱ اندازه گیری شدند. اندازه دانه فولادها پس از آنیل در چهار دمای مختلف  $600^{\circ}C$ ،  $650^{\circ}C$ ،  $700^{\circ}C$  و  $750^{\circ}C$  از طریق متالوگرافی نوری تعیین شدند.

### نتایج و بحث

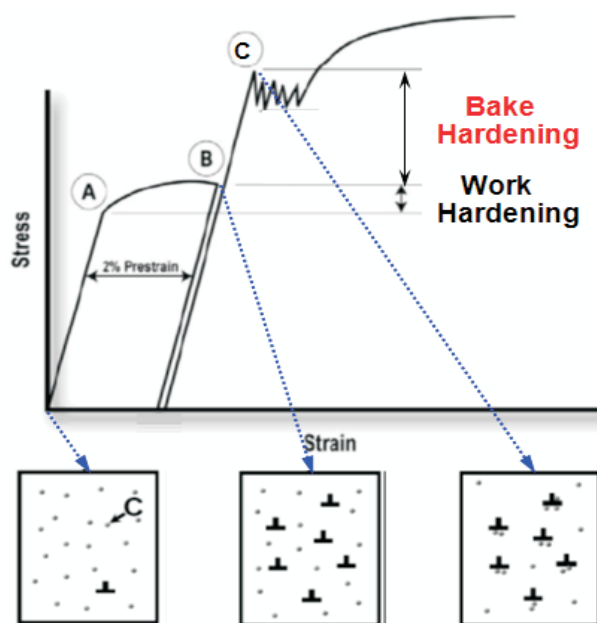
جدول ۲ خواص کششی فولاد را قبل از انجام فرآیند پخت سختی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که فولاد از انعطاف پذیری بالا و استحکام تسلیم پایینی برخوردار است. تاثیر دمای آنیل بر روی فولادی که به میزان ۵۶٪ نورد سرد شده بود بررسی گردید. انجام آنیل در دماهای  $600^{\circ}C$ ،  $650^{\circ}C$  و  $700^{\circ}C$  به مدت ۳۰ دقیقه موجب تبلور مجدد فولادها گردید. در ادامه فولادها به سرعت و تحت دمش هوای فشرده تا دمای اتاق سرد شدند. ریزساختار فولاد پس از آنیل در دماهای مختلف در شکل ۲ دیده می‌شود. همه نمونه‌ها ساختاری تقریباً فریتی و هم محور دارند. مشاهده می‌شود که با افزایش دمای آنیل اندازه دانه‌ها بزرگ تر شده است.

شکل ۳ تاثیر دمای آنیل بر اندازه دانه‌ها را در نمونه‌هایی که ۵۶٪ نورد سرد شده اند نشان می‌دهد. شکل ۴ تاثیر دمای آنیل بر خاصیت پخت سختی فولادها پس از ایجاد پیش کرنش اولیه ۲٪ و در ادامه پیرسازی در دمای  $170^{\circ}C$  به مدت ۲۰ دقیقه را نشان می‌دهد که مطابق با شکل شماتیک ۱ انجام گرفته است. مشاهده شکل ۴ به وضوح نشان می‌دهد که آنیل بر خاصیت پخت سختی موثر است. به طوری که مقدار این خاصیت حدود ۱۵٪ استحکام فولاد بدون انجام پخت سختی است. نکته قابل ذکر دیگر از شکل

تحت تاثیر نورد سرد و کاهش سطح مقطع در دو مقدار ۴۰ و ۵۶٪ ضخامتشان به ترتیب به  $1/5$  و  $1/1$  میلی متر کاهش یافت. به منظور همگنی و ایجاد دانه بندی هم محور نمونه‌ها تحت آنیل قرار گرفتند. با هدف ایجاد تبلور مجدد، نمونه‌ها در چهار دمای  $600^{\circ}C$ ،  $650^{\circ}C$  و  $700^{\circ}C$  که همگی به نوعی زیر دمای یوتکتوئید فولاد بودند، برای ۳۰ دقیقه در یک کوره اتمسفر کنترل شده شامل گاز نیتروژن نگه داری شدند و در ادامه به وسیله دمش هوای فشرده تا دمای اتاق کوئچ شدند. برای بررسی تاثیر نرخ سرمایش در الگوی آهسته از نمونه‌های آنیل شده در  $700^{\circ}C$  که در سه نرخ  $0/5$ ،  $5$  و  $15^{\circ}C/S$  تا دمای اتاق سرد شدند استفاده گردید. برای بررسی الگوی سرمایش سریع نیز نمونه‌ها پس از آنیل در  $700^{\circ}C$  به مدت ۳۰ دقیقه؛ در چهار محیط هوای فشرده، روغن سرد  $25^{\circ}C$ ، روغن داغ  $70^{\circ}C$  و آب با سرعت‌های تقریبی  $100$ ،  $170$ ،  $210$  و  $300^{\circ}C/S$  کوئچ شدند.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد بررسی (درصد وزنی)

C	Mn	Si	Nb	S	P	Fe
۰/۰۶	۰/۲۸	۰/۲۱	۰/۱۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸	مابقی



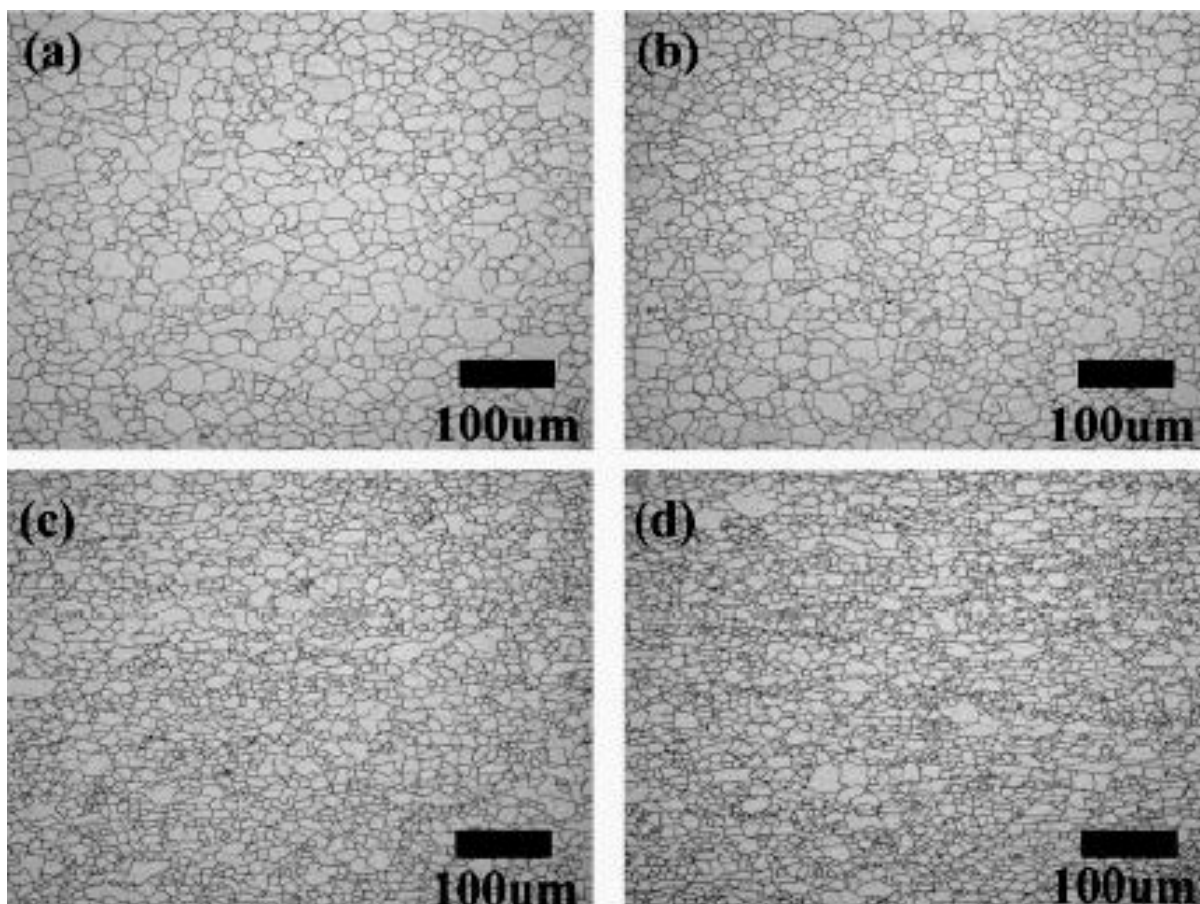
شکل ۱- تصویر شماتیک برای سنجش خاصیت پخت سختی و برخورد اتم‌های کربن محلول و نابجایی‌ها.

در نتیجه این امر آنها به صورت موثری نامتحرک می‌شوند و تنش مورد نیاز برای تغییر شکل پیوسته افزایش می‌یابد [۱۳]. افزایش دمای آنیل نه تنها انحلال کاربیدها را افزایش می‌دهد بلکه با افزایش اندازه دانه‌ها موجب کاهش مساحت مرزهای دانه می‌شود.

جدول ۲- خواص کششی فولاد مورد بررسی قبل از انجام پخت سختی.

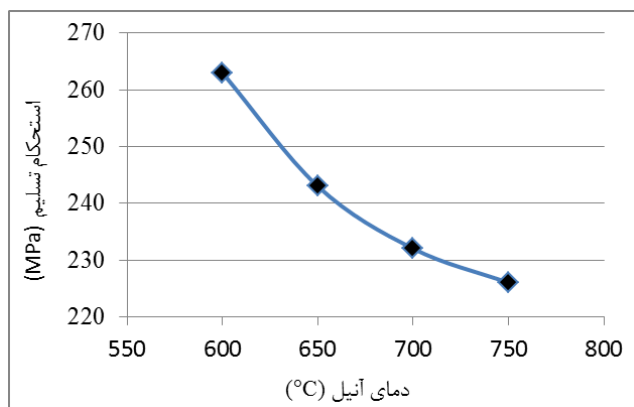
ازدیاد طول کل (%)	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)
۳۹/۵	۳۶۷	۲۲۸

۴ این است که دمای آنیل تاثیر چندانی بر میزان پخت سختی به ویژه در دماهای پایین نداشته است و این ویژگی در دماهای آنیل ۶۰۰، ۶۵۰ و ۷۰۰°C تقریباً مشابه است در حالی که در نمونه‌های آنیل شده در ۷۵۰°C افزایش بیشتری را نشان می‌دهد. بررسی نتیجه فوق و ملاحظه شکل ۳ وجود نوعی ارتباط معنی دار بین اندازه دانه و میزان پخت سختی را نشان می‌دهد. انتظار می‌رود که با افزایش دمای آنیل، همچنین غلظت کربن محلول افزایش یابد که این امر نیز بر افزایش میزان پخت سختی موثر است. در واقع دمای آنیل از آنجایی که بر اندازه دانه و نیز میزان کربن محلول موثر است می‌تواند میزان پخت سختی را تحت تاثیر قرار دهد که این امر در دماهای مختلف متفاوت است. مکانیزم حاکم بر پخت سختی را می‌توان نفوذ کربن به هسته نابجایی‌ها عنوان کرد که



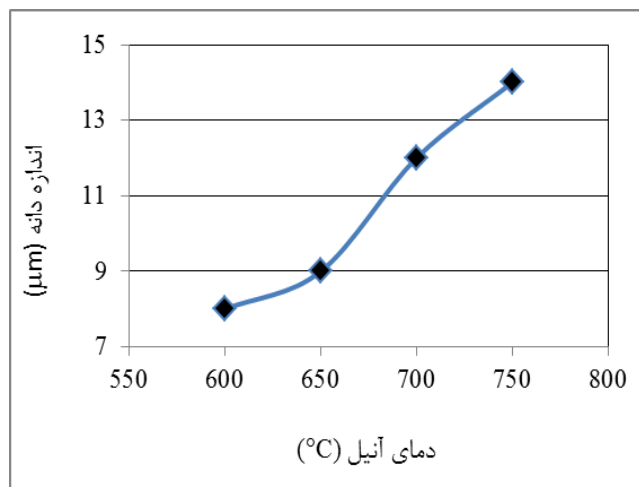
شکل ۲- ریزساختار فولاد بعد از آنیل در دماهای مختلف. (a) ۷۵۰°C، (b) ۷۰۰°C، (c) ۶۵۰°C، (d) ۶۰۰°C.

کاهش می‌دهد. با افزایش زمان نگهداری بیشتر در دمای آنیل این کاهش بیشتر می‌شود زیرا اندازه دانه افزایش یافته و برای نرخ‌های سرمایش بالاتر زمان جدایش محدود می‌گردد [۱۶]. علاوه بر این، این کربن‌های محلول در امتداد مرزهای دانه به وسیله پیرکرنشی دمای اتاق تحت تاثیر قرار نمی‌گیرند. شکل ۵ تغییر استحکام تسلیم فولاد با دمای آنیل را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش دمای آنیل، استحکام تسلیم کاهش می‌یابد. تغییرات ریزساختاری رخ داده ناشی از آنیل در دماهای مختلف و نیز تغییر در میزان تبلور مجدد با دما می‌تواند علت این امر باشد.

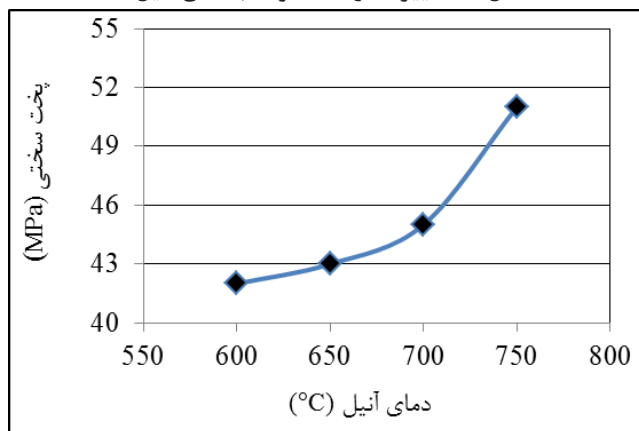


شکل ۵- تغییر استحکام تسلیم با دمای آنیل.

تغییر در خاصیت پخت سختی با نرخ سرمایش در الگوی سرمایش آهسته در این تحقیق مورد مطالعه واقع شد که شکل ۶ نمایان گر این امر می‌باشد. مشاهده می‌شود تاثیر نرخ سرمایش در این رژیم سرمایش بر میزان پخت سختی ناچیز است و تنها افزایش کمی در این ویژگی با افزایش نرخ سرمایش ایجاد می‌گردد. در واقع نقش این متغیر در مقایسه با دمای آنیل کم رنگ تر است. شکل ۷ تغییر استحکام تسلیم را در مقابل نرخ‌های سرمایش آهسته مختلف نشان می‌دهد. بر خلاف دمای آنیل در اینجا دیده می‌شود که با افزایش نرخ سرمایش در رژیم سرمایش آهسته از ۰/۵ به ۱۵ °C / S استحکام تسلیم اندکی افزایش یافته است. این امر در توافق با بهبود کوچک پخت سختی در حین فرآیند سرمایش آهسته است. یافته‌های بالا به هرحال گواه این امر است که تاثیر نرخ سرمایش در رژیم آهسته بر پخت سختی و



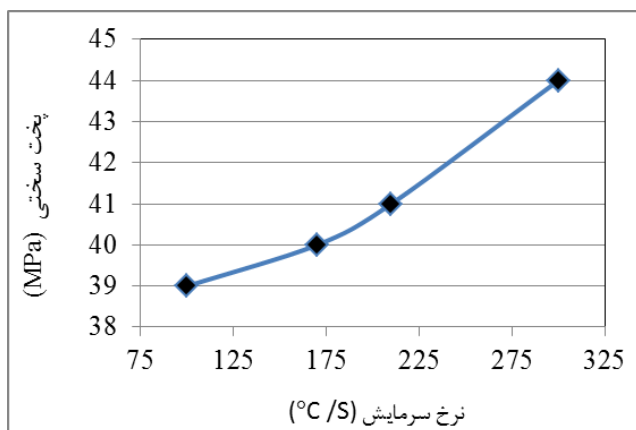
شکل ۳- تغییر اندازه دانه فولاد با دمای آنیل.



شکل ۴- تاثیر دمای آنیل بر میزان خاصیت پخت سختی.

این امکان وجود دارد که در حین فرآیند سرمایش از دمای آنیل مقداری از کربن محلول در مرزهای دانه جدایش کند [۱۴]. این امر به نظر می‌رسد اتم‌های محلول بین نشین که به مرزدانه‌ها با موقعیت‌های با انرژی پایین تر نفوذ می‌کنند مشخصات پیرکرنشی متفاوتی را نسبت به اتم‌هایی که درون دانه‌ها توزیع می‌شوند نشان دهند [۱۴]. اتم‌های کربنی که در امتداد مرزهای دانه جدایش می‌کنند از پایداری بیشتری برخوردار بوده و در مقایسه با اتم‌های موجود در درون دانه‌ها به دماهای بالاتری برای پیرکرنشی نیاز دارند [۱۵]. گزارش شده است که کربن محلول توزیع شده در امتداد مرزهای دانه می‌تواند خاصیت پخت سختی را از طریق پیرکرنشی در دمای ۱۷۰°C تحت تاثیر قرار دهند [۴]. در واقع جدایش کربن در حین آنیل، کربن محلول را در ابتدای پیرکرنشی

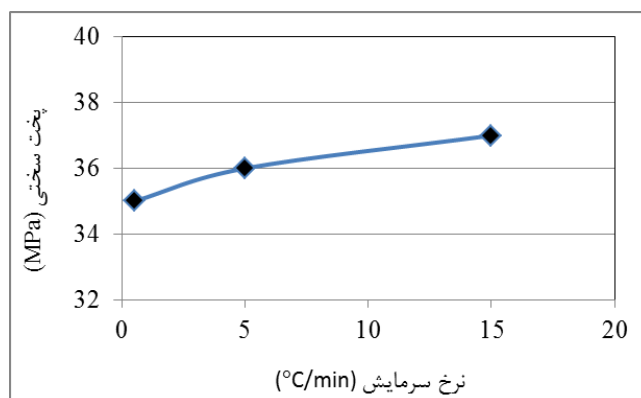
دارد. کربن محلول ناشی از حل شدن کاربیدها در حین گرمایش و نگهداری در دمای بالا تمایل به رسوب گذاری مجدد در حین فرآیند سرمایش دارد [۱۷-۱۹]. سرمایش سریع از رسوب گذاری مجدد کاربیدهای آلیاژی جلوگیری می‌کند زیرا کربن محلول زمان کمتری برای نفوذ دارد. لذا محلول فوق اشباع از کربن در زمینه ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر؛ در نرخ‌های سرمایش آهسته تر، کربن محلول ناشی از حل شدن کاربیدها در حین آنیل، زمان بیشتری برای برگشت به کاربیدهای آلیاژی داشته و لذا رسوب گذاری مجدد می‌کند [۲۰].



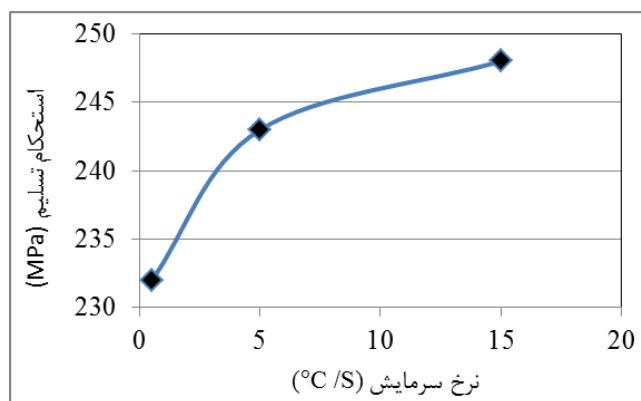
شکل ۸ - تغییر در استحکام تسلیم با نرخ سرمایش در رژیم سریع در نمونه آنیل شده در دمای ۷۰۰°C.

شکل ۹ تغییر قابلیت پخت سختی را برحسب اندازه دانه و در دو میزان نورد سرد ۴۰ و ۵۶٪ در رژیم سرمایش آهسته نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که افزایش اندازه دانه موجب پخت سختی بیشتر می‌گردد که این افزایش اندازه دانه در مقادیر نورد کمتر و سرمایش آهسته تر ایجاد می‌شود. گزارش شده است که در غلظت کربن محلول مشابه، ورق‌های فولادی با دانه بندی ظریف مقادیر پخت سختی کمتری را در مقایسه با آنهایی که دانه‌های درشت دارند نشان می‌دهند [۲۱]. وضعیت در نورد گرم قدری متفاوت است. در مطالعه ای که پیرامون تاثیر نرخ گرمایش بر خاصیت پخت سختی فولادها صورت گرفته است دیده شد، مقدار پخت سختی فولادها با افزایش مقدار نورد و کاهش سطح مقطع افزایش می‌یابد که این به علت افزایش در غلظت کربن

استحکام تسلیم کم است. برای بررسی دقیق تر نرخ سرمایش از رژیم سرمایش سریع نیز استفاده شد. به این منظور از چهار محیط مختلف با نرخ‌های سرمایش متفاوت ولی در عین حال بالا از ۱۰۰ تا ۳۰۰°C/S استفاده شد.



شکل ۶ - تغییر در خاصیت پخت سختی با نرخ سرمایش در رژیم آهسته در نمونه آنیل شده در دمای ۷۰۰°C.



شکل ۷ - تغییر در استحکام تسلیم با نرخ سرمایش در رژیم آهسته در نمونه آنیل شده در دمای ۷۰۰°C.

شکل ۸ تغییر میزان پخت سختی با نرخ سرمایش را در رژیم سرمایش سریع برای نمونه آنیل شده در ۷۰۰°C نشان می‌دهد. در اینجا مشاهده می‌شود علیرغم تغییر پخت سختی ولی ارتباط کاملاً مشخصی بین این ویژگی و نرخ سرمایش وجود ندارد. با مقایسه شکل ۸ و شکل ۶ می‌توان گفت که در هر صورت سرمایش در نرخ‌های سریع، باعث مقدار پخت سختی نسبتاً بیشتری نسبت به سرمایش آهسته می‌شود. نفوذ به شدت به دما و زمان نیاز

تاثیر قرار می‌گیرند.

۲- آنیل انجام شده در محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۷۵۰°C به مدت ۳۰ دقیقه بر میزان پخت سختی فولاد موثر است. افزایش دمای آنیل باعث ترغیب انحلال کربن در محلول جامد شده و قابلیت پخت سختی آن را افزایش می‌دهد.

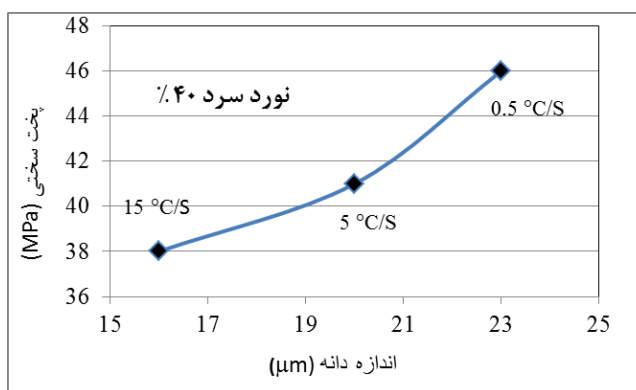
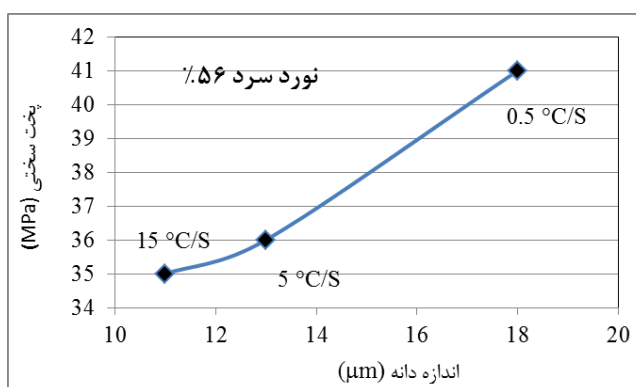
۳- نرخ سرمایش در مقایسه با دمای آنیل تاثیر کمتری بر میزان پخت سختی فولاد دارد. نفوذ کربن محلول برای تشکیل کاربید آلیاژی با افزایش نرخ سرمایش بیشتر شده و در نتیجه میزان پخت سختی افزایش می‌یابد.

۴- بررسی‌ها نشان داد که میزان پخت سختی تحت تاثیر اندازه دانه فولاد است و با افزایش اندازه دانه‌ها این ویژگی افزایش می‌یابد.

### منابع و مراجع

- [1] G. R. Speich, V. A. Demarest, R. L. Miller, "Formation of Austenite during Intercritical Annealing of Dual-Phase Steels" Metall. Trans., 12A, 1981, 419-1428.
- [2] M. S. Rashid, B. V. N. Rao, "Tempering Characteristics of a Vanadium Containing Dual-Phase Steel", Metall. Trans., 13 A1, 1982, 1679-1686.
- [3] T. Senuma, "Physical Metallurgy of Modern High Strength Steel Sheets", ISIJ Int., 41, 2001, 520-532.
- [4] S. Hanai, N. Takemoto, Y. Tokunaga, Y. Mizuyama, "Effect of Grain Size and Solid Solution on the Bake Hardenability of Low Carbon Strengthening Elements Aluminum - Killed Steel", Trans. Iron & Steel Inst. Jap., 24, 1984, 17-23.
- [5] W. C. Jeong, "Effect of Prestrain on Aging and Bake Hardening of Cold-Rolled, Continuously Annealed Steel Sheets", Metall. Trans., 29A, 1998, 463-467.
- [6] V. Ballarin, M. Soler, A. Perlade, X. Lemoine, S. Forest, "Mechanisms and Modeling of Bake - Hardening Steels: Part I Uniaxial Tension", Metall. Trans., 40A, 2009, 1367-1374.
- [7] B. J. Allen, D. K. Matlock, S. Sadagopan, J. G. Speer, "The Effect of Flow Stress on the Dent Performance of Sheet Steels", 40<sup>th</sup> MWSP Conf. Proc., 1998, 83-92.
- [8] I. B. Timokhina, P. D. Hodgson, S. P. Ringer, R. K. Zheng, E. V. Peveloma, "Effect of Bake - Hardening on the Structure - Property Relationship of Multiphase Steels for the Automotive Industry", Steel Res. Int., 80, 2009, 507-514.
- [9] A. K. De, S. Vandeputte, B. C. De Cooman, "Kinetics of Strain Aging in Bake Hardening Ultra Low Carbon Steel", J. Mater. Eng. Perf., 2001, 567-575.
- [10] K. Dehghani, J. J. Jonas, "Dynamic Bake Hardening of Interstitial - Free Steels", Metall. Trans., 31A, 2000, 1375-1384.
- [11] S. Das, S. B. Singh, O. N. Mohanty, H. K. D. H. Bhadeshia, "Understanding the Complexities of Bake Hardening", Mat. Sci. & Tech., 24, 2008, 107-111.
- [12] A. Pichler, H. Spindler, T. Kurz, R. Mandyczewsky, M.

محلول و چگالی نابجاییها است [۲۲]. مرز دانه‌ها می‌توانند به عنوان یک چاه و محل تجمع اتم‌های بین نشین عمل کرده و مقدار کربن محلول را کاهش دهند که این امر در مقدار خاصیت پخت سختی موثر است [۲۳]. به بیان دیگر دانه ریزی و افزایش مرزدانه با کاهش میزان کربن محلول منجر به کاهش مقدار پخت سختی می‌گردد.



شکل ۹- تاثیر میزان نورد سرد، اندازه دانه و نرخ سرمایش آهسته بر میزان پخت سختی.

### نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر شرایط آنیل بر روی رفتار پخت سختی یک فولاد کم کربن مطالعه شده است. نتایج کلی بدست آمده به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

۱- پخت سختی به وسیله مقدار کربن محلول و اندازه دانه‌ها تحت تاثیر واقع می‌شود. مقدار کربن محلول نهایی و اندازه دانه نهایی به وسیله دمای نگهداری و نرخ سرمایش بعدی تحت

- Ratio and Processing Conditions on Aging and BH – Effect of ULC Steels Sheet”, IF Steels Poceedings, Pittsburgh, 2000, 201 -213.
- [19] R. A. Hubert, S. Vandeputte, A. Van Snick, C. Xhoffer, “Towards a Controlled Bake Hardening by Numerical Calculation of the Precipitate Behavior During Continuous Annealing of TiNb and Nb Alloyed IF BH Steels”, Mat. Sci. Forum, 284, 1998, 551 -558.
- [20] K. Lips, X. Yang, K. Mols, “The Effect of Coiling Temperature and Continuous Annealing on the Properties of Bake Hardenable IF Steels”, Steel Res., 67, 1996, 357 -363.
- [21] K. Sakata, S. Satoh, T. Kato, O. Hashimoto, “Metallurgical Principles and their Applications for Producing Extra-Low Carbon IF Steels With Deep Drawability and Bake Hardenability”, Proceedings of the International Forum for Physical Metallurgy of IF Steels, Iron and Steel Inst. Japan, Tokyo, 1994, 279 -288.
- [22] C. F. Kuang, S. G. Zhang, J. Li, J. Wang, P. Li, “Effect of Temper Rolling on the Bake-Hardening Behavior of Low Carbon Steel”, Int. J. Miner. Metall. Mater., 22, 2015, 32 -36.
- [23] A. K. De, K. Blauwe, S. Vandeputte, B. C. De Cooman, “Effect of Dislocation Density on the Low Temperature Aging Behavior of an Ultra Low Carbon Bake Hardening Steel”, J. Alloy Compd., 310, 2000, 405 -410.
- Pimminger, P. Stiaszny, “Hot – Dip Galvanized Bake – Hardening Grades, A Comparison between LC and ULC Concepts”, Proceedings of 39<sup>th</sup> Mechanical Working and Steel Processing Conf., ISS, 1998, 63 – 81.
- [13] L. J. Baker, J. D. Parker, S. R. Daniel, “Mechanism of Bake Hardening in Ultralow Carbon Steel Containing Niobium and Titanium Additions”, Mater. Sci. & Tech., 18, 2002, 541 -547.
- [14] S. Berbenni, V. Favier, X. Lemonie, “A Micromechanical Approach to Model the Bake Hardening Effect for Low Carbon Steels”, Scr. Matter., 51, 2004, 303 – 308.
- [15] W. M. Jun, H. D. Yuan, J. H. Tao, “Effect of Pre-Aging on Microstructure and Properties of 2000 Series Aluminum Alloy for Automative Body Sheets”, Trans. Non Ferrous. Metal. Soc. China., 17, 2007, 262 -265.
- [16] B. Soenen, A. K. De, , S. Vandeputte, B. C. De Cooman, “Competition between Grain Boundary Segregation and Cottrell Atmosphere Formation during Static Strain Aging in Ultra Low Carbon Bake Hardening Steels”, Acta Mater., 52, 2004, 3483 -3492.
- [17] W. C. Jeong, “Relationship between Mechanical Properties and Microstructure in a 1.5% Mn- 0.3% Mo Ultra Low Carbon Steel with Bake Hardening”, Materials Letters, 61, 2007, 2579 – 2583.
- [18] L. Storojeva, C. Escher, R. Bode, K. Hulka, “Effect of Nb/C