

## بررسی اثر دمای تبلور دوباره بر خواص پخت سختی فولادهای فوق کم کربن

افشین قناعی<sup>۱\*</sup>، حسین ادريس<sup>۲</sup>، حسین مناجاتی زاده<sup>۳</sup> و محمد حسین حسن نیا<sup>۴</sup>

### چکیده

امروزه استفاده از فولادهای پخت سخت‌شونده در صنعت خودروسازی، بمنظور کاهش وزن بدنه اتومبیل در راستای کاهش مصرف سوخت گسترشی چشمگیر یافته است. این فولادها، پیش از فرایند شکل‌دهی دارای تنش تسلیم پایین و انعطاف پذیری بالا بوده و پس از مرحله شکل‌دهی طی فرایند پخت رنگ استحکام و در نتیجه، مقاومت در برابر تورفتگی در آن‌ها افزایش می‌یابد. فرایند پخت رنگ، نوعی عملیات حرارتی است که در دمای  $180^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳۰ دقیقه بر شکل نهایی قطعه در مرحله پخت رنگ قطعه اعمال می‌شود. در این پژوهش، تاثیر افزایش دمای آنیل بر خواص پخت سختی فولادهای فوق کم کربن بکار رفته در صنعت خودروسازی مورد بررسی قرار گرفت. پس از عملیات ریخته‌گری و انجام عملیات چکش کاری، نورد گرم، نورد سرد، عملیات آنیل در دو دمای  $750^{\circ}\text{C}$  و  $800^{\circ}\text{C}$  انجام گرفت. سپس نمونه‌ها مورد عملیات کرنش اولیه در درصدهای ۸ و ۱۲ درصد قرار گرفته و در ادامه، نمونه‌ها مورد عملیات پخت رنگ پیر شدند. نمونه‌ها تحت آزمون کشش قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که با افزایش دمای آنیل، با وجود افزایش اندازه دانه، مقدار پخت سختی افزایش یافته است.

**واژه‌های کلیدی:** پخت سختی، کرنش اولیه، نورد گرم، تنش تسلیم، آنیل تبلور دوباره.

۱- دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد- اصفهان- ایران.

۲- استاد دانشکده مواد- دانشگاه صنعتی اصفهان- ایران.

۳- استادیار دانشکده مواد- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد- اصفهان- ایران.

۴- کارشناس ارشد مهندسی مواد، مرکز تحقیقات مواد شرکت ساپکو.

\* نویسنده مسئول مقاله: afshinghanaie@yahoo.com

## پیشگفتار

با توجه به مسئله مصرف انرژی و سوخت، کارخانه‌های تولید خودرو به سمت تولید وسایل با مصرف سوخت پایین، گام برداشتند. هرچه اتومبیل سنگین‌تر باشد، مصرف سوخت آن بیش‌تر است. پس سبک‌بودن خودرو ساخته شده، مسئله‌ای مهم بین کارخانه‌های تولید خودرو می‌باشد. بنابراین، تولیدکنندگان خودرو در جهان، به این فکر بودند که خودروهایی تولید کنند که ورق فولادی بکار رفته در بدنه آن هم از نظر استحکام و هم از نظر سبک بودن بهینه باشد. استحکام این فولادها که در خانواده فولادهای پر استحکام کم آلیاژ هستند، ۳۰۰ تا ۴۰۰ مگاپاسکال بوده و پیش از فرایند شکل‌دهی دارای تنش تسلیم پایین و انعطاف پذیری بالا می‌باشند، اما فولادهای سخت‌شونده در اثر پخت فولادهایی هستند که در حین فرایند شکل‌دهی استحکام تسلیم پایین و در نتیجه، شکل‌پذیری بالایی دارند و پس از مرحله شکل‌دهی در اثر فرایند پخت رنگ استحکام آن‌ها افزایش می‌یابد. پخت رنگ، نوعی عملیات حرارتی معمول در صنعت خودروسازی است که پس از اتمام شکل‌دهی روی قطعه نهایی رنگ شده، در دمای ۱۷۰ تا ۱۸۰°C و به مدت ۲۰ تا ۳۰ دقیقه انجام می‌گیرد و طی آن استحکام فولاد و در نتیجه، مقاومت در برابر تورفتگی در آن‌ها افزایش می‌یابد. این مکانیزم افزایش استحکام، نوعی پیرکرنشی استاتیکی است که از اندرکنش بین اتم‌های محلول بین نشین و نابه‌جایی‌های موجود آمده در حین عملیات شکل‌دهی ناشی می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت فولاد BH<sup>۱</sup> فولادی است که قابلیت افزایش استحکام در اثر ترکیب دو فرایند کارسختی که در حین عملیات شکل‌دهی پدید می‌آید و هم‌چنین، پیرکرنشی که در حین عملیات پخت رنگ انجام می‌گیرد را داشته باشد [۱ و ۳]. با توجه به مکانیزم افزایش استحکام که ناشی از پدیده قفل شونده نابه‌جایی‌ها به وسیله عناصر بین نشین بوده لذا، مقدار نابه‌جایی که در طول عملیات تغییر شکل حاصل شده است، با مقدار عناصر بین نشین موجود رابطه مستقیم داشته است. منظور از عملیات پیرکرنشی رفتاری است که معمولاً با پدیده نقطه تسلیم همراه بوده و در نتیجه آن، به واسطه

حرارت دادن در درجه حرارت‌های نسبتاً کم، استحکام فلز افزایش یافته و شکل‌پذیری آن کاهش می‌یابد. بنابراین، پیرکرنشی در نتیجه برهم‌کنش عیوب نقطه‌ای (عمدتاً اتم‌های محلول بین نشین) و نابه‌جایی‌ها، در حین تغییر شکل پلاستیک (پیرکرنشی دینامیکی) و یا پس از تغییر شکل پلاستیک (پیرکرنشی استاتیکی) ایجاد می‌شود و باعث تغییر خواص ماده می‌گردد [۳]. افزایش استحکام تسلیم پس از فرایند پخت رنگ یا مقدار BH شامل اختلاف بین تنش تسلیم پایینی پس از فرایند پخت با تنش سیلان<sup>۲</sup> پس از اعمال کرنش اولیه معین می‌باشد [۴]. فولادهای BH به دو صورت پیوسته و ناپیوسته آنیل می‌شوند. در فولادهای کم‌کربن که به صورت پیوسته آنیل می‌شوند، کنترل ترکیب شیمیایی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که مقدار کربن جهت دستیابی به مقدار BH قابل قبول، کافی باشد. اگر مقدار کربن بیش از حد لازم باشد، رسوب کاربیدها تسریع شده و مقدار اتم‌های کربن محلول کاهش می‌یابد. چنانچه مقدار کربن کم‌تر از حد لازم باشد نیز مقادیر BH کم‌تر از حد معمول خواهد بود. با انتخاب دمای مناسب در فرایند آنیل و هم‌چنین، سرعت سردشدن بالا می‌توان مقدار کربن محلول را به گونه‌ای تغییر داد که بیش‌ترین افزایش در تنش تسلیم در حین فرایند پخت رنگ ایجاد شود [۴]. پایین‌بودن مقدار کربن در فولادهای سخت‌شونده باعث بهبود قابلیت جوشکاری و بالا بودن استحکام تسلیم پس از شکل‌دهی و عملیات پیرسختی باعث افزایش مقاومت در برابر خستگی شده است [۵]. این فولادها عموماً به وسیله آلومینیم اکسیژن‌زدایی می‌شوند تا اثرات زیان‌آور نیتروژن به صورت اتم‌های محلول بین نشین که منجر به پدیده پیر شدن در دمای محیط و ایجاد باندهای لودرز یا کرنش‌های پیش‌رونده می‌گردد، از راه تشکیل ترکیب AlN از بین برود [۶ و ۱]. هدف از تعریف این تحقیق این است که با توجه به مساله بهینه‌سازی مصرف سوخت و انرژی که امروزه در کشور مطرح شده نیاز به تولید ورق‌های فولادی با استحکام بالا و ضخامت کم بوده که با به کارگیری این ورق‌ها در صنعت خودروسازی می‌توان خودروهایی با وزن کم‌تر تولید کرده که به توان در مصرف سوخت

<sup>۱</sup> - Bake Hardening<sup>۲</sup> -Flow Stress

نمونه‌ها تحت عملیات ماشین‌کاری قرار گرفتند. به دلیل تشکیل پوسته‌های ضخیم اکسیدی روی سطح بلوک‌های ریخته شده، عملیات ماشین‌کاری روی تمام بلوک‌های ریخته شده انجام گرفت. این عملیات روی سطح بلوک و به عمق ۱ میلی‌متر انجام گردید. از آنجا که عملیات نورد گرم در تولید ورق‌های فولادی مورد استفاده در صنایع خودروسازی بویژه در تولید فولادهای BH یکی از مراحل اصلی بشمار می‌رود، نمونه‌ها پس از چکش‌کاری بمنظور کاهش ضخامت بیش‌تر و دستیابی به ضخامت اولیه مناسب جهت مرحله نورد سرد و هم‌چنین، ایجاد یکنواختی بیش‌تر در ترکیب شیمیایی نمونه، تحت عملیات نورد گرم قرار گرفتند. انتخاب دمای ورودی به نورد نهایی و محدوده دمایی که ورق وارد نورد نهایی می‌شود، از جمله موثرترین پارامترها بر ریزساختار است [۷]. به دلیل وجود عناصر میکروآلیاژی نیوبیوم و وانادیوم در فولاد و تشکیل رسوبات VC و NbC، دمای انحلال رسوبات تشکیل شده در فولاد با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه شده است [۸].

$$\log[V][C] = \frac{672}{T} - 9500 \quad (1)$$

$$\log[Nb][C] = \frac{2726}{T} - 6775 \quad (2)$$

دمای انحلال بدست آمده برای رسوبات VC، ۸۸۰ تا ۹۶۰°C و دمای انحلال NbC، ۹۹۴ تا ۱۱۰۰°C محاسبه شده است. توجه به این نکته قابل توجه است که انجام عملیات آنیل در دماهای ۵۵۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد، گرچه در انجام عملیات نورد ترمومکانیکال در محدوده دمایی یاد شده، مانع از تشکیل دوباره رسوبات شده، ولی باعث باقی‌ماندن کربن محلول در سیستم می‌گردد. ضخامت نمونه‌ها پس از عملیات نورد گرم و انجام ۲ پاس نورد گرم به حدود ۷/۵ mm رسید. بنابراین، ابتدا نمونه‌ها در دمای ۱۲۰۰°C برای مدت زمان ۳۰ دقیقه در کوره موفلی CARBOLITE مدل LMF پیش‌گرم شدند. سپس طی دو پاس و در هر پاس به مقدار ۲۵٪ کاهش ضخامت روی نمونه‌ها اعمال شد. تعداد پاس‌ها و مقدار اعمال بار به گونه‌ای انتخاب شد که دمای نهایی نورد از ۹۷۰°C کمتر نشود. هم‌چنین، برای جلوگیری از تشکیل رسوبات نمونه‌ها از دمای ۹۷۰°C به سرعت در آب سرد کوئنچ شدند. در مرحله بعد، نمونه‌ها با

صرفه‌جویی کرد. با توجه به اهمیت تاثیر افزایش دمای آنیل و تاثیر مستقیم آن بر مقدار کربن محلول، مورد پژوهش قرار گرفته است. انتخاب دمای مناسب در فرایند آنیل و هم‌چنین، مدت زمان نگهداری در این دما از پارامترهای مهم و کنترل‌پذیر بمنظور دستیابی به بیش‌ترین کربن محلول می‌باشند. انحلال رسوبات کاربیدی در فرایند آنیل باعث افزایش کربن حل شده می‌گردد. پژوهش‌های اخیر انجام گرفته در این زمینه نشان داده است که با افزایش مقدار دمای آنیل، مقدار کربن محلول افزایش یافته است [۴-۶]. ورق‌های معمول بکار رفته در صنعت خودروسازی دارای تیتانیوم بوده و چون دمای انحلال کاربیدهای تیتانیوم نسبت به انحلال کاربیدهای وانادیم و نیوبیوم بیش‌تر است، لذا، در این پژوهش از ورق فولادی حاوی عناصر میکروآلیاژی نیوبیوم و وانادیم استفاده شده است.

### مواد و روش پژوهش

فولاد اولیه مورد پژوهش از شرکت مهندسی ساپکو تهیه شد. این فولاد به وسیله شرکت فولادسازی POSCO کره جنوبی تولید شده و در اختیار شرکت ایران خودرو قرار گرفته است. شرکت ایران خودرو این نوع فولاد را برای تولید بدنه‌های خودرو پژو ۲۰۶ استفاده می‌کند. فولاد مورد نظر در کوره القایی بدون هسته با فرکانس متوسط و ظرفیت ۳۰ Kg و ساخت شرکت آلمانی VEB INDUCED GOLLINGEN، ذوب گردید. برای جلوگیری از اکسید شدن عناصر میکروآلیاژی از اتمسفر محافظ شده استفاده شد. این کار با کمک یک کلاهک که روی سطح کوره تعبیه شده، انجام گرفت. ترکیب شیمیایی فولاد مورد پژوهش در جدول ۱ آورده شده است. پس از عملیات ریخته‌گری بمنظور کاهش ضخامت شمش‌ها و بهبود ساختار میکروسکوپی عملیات چکش‌کاری در دمای حدود ۱۱۰۰°C انجام شد. این عملیات هم‌چنین، باعث از بین رفتن مک‌های احتمالی در قطعه گردید. دمای بالای عملیات و تماس مستقیم شمش‌ها با هوا منجر به تشکیل پوسته‌های ضخیم اکسیدی پس از عملیات چکش‌کاری روی سطح شد. بمنظور حذف پوسته‌های اکسیدی پس از چکش‌کاری،

حرارتی بالا و قابلیت افزایش دما تا دمای  $200^{\circ}\text{C}$  بدون تبخیر شدن، در انجام آزمون آزمایشگاهی مرسوم می‌باشد. پس از انجام عملیات BH، از سطح مقطع نمونه‌ها (موازی با جهت نورد) برش زده شد. سپس از نمونه‌ها مانع سرد تهیه گردید و عملیات آماده‌سازی و اچ انجام شد. برای مشاهده ساختار میکروسکوپی نمونه‌ها و تعیین آنالیز شیمیایی نمونه از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO 435 VP استفاده گردید.

### نتایج و بحث

پس از انجام مراحل گوناگون از جمله چکش کاری، نورد گرم، نورد سرد و آنیل تبلور دوباره نمونه‌هایی تهیه شد و پس از مانع سرد به روش استاندارد، برای بررسی ریز ساختار آماده گردید. انجام متالوگرافی روی نمونه‌ها پس از انجام عملیات آنیل بوده و هدف بررسی ریزساختار و اندازه دانه‌ها بوده است. برای مشاهده ریزساختار نمونه پس از اعمال کرنش اولیه چون نابه‌جایی‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی قابل مشاهده نبوده و نیاز به میکروسکوپ الکترونی عبوری بوده و با توجه به نبود میکروسکوپ الکترونی عبوری برای انجام این پژوهش، مشاهده ریزساختار نمونه پس از اعمال کرنش اولیه مقدور نبود. با ازعان به این موضوع، ساختار متالوگرافی نمونه‌ها پیش از اعمال کرنش اولیه مد نظر بوده و همچنین، با توجه به پژوهش‌های پیشین پژوهشگران، اعمال این مقدار کرنش اولیه تاثیری بر اندازه دانه‌ها و تغییر شکل دانه‌ها نداشته است [۴۵]. شکل ۱ ریزساختار نمونه آنیل شده در چهار دمای  $800, 650, 750, 850^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳۰ دقیقه نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در دمای  $650^{\circ}\text{C}$  دانه‌ها در جهت نورد کشیده شده‌اند و تبلور دوباره به گونه کامل انجام نشده است. در دمای  $750^{\circ}\text{C}$  دانه‌ها تقریباً به گونه کامل تبلور دوباره یافته است. در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  نمونه‌ها در آستانه مرحله رشد قرار دارند. در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  دانه رشد کرده است. برای بررسی سختی نمونه‌های مورد نظر در دماهای گوناگون آنیل، مورد آزمون میکرو سختی سنتی قرار گرفت. این نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است. علت بررسی خواص پخت سختی نمونه در دو دمای  $750$  و  $800$  درجه سانتی‌گراد

سطوح تمیز و ضخامت یکسان مورد عملیات نورد سرد، قرار گرفتند. مقدار کاهش ضخامت طی این عملیات به مقدار ۷۵ تا ۸۰٪ بود. به دلیل نایکنواخت بودن کرنش در لبه ورق‌ها، نمونه‌های کشش از وسط ورق‌ها و در جهت نورد بر اساس استاندارد ASTM E8 تهیه شد. پس از آن بمنظور حذف اثرات ناشی از تغییر شکل پلاستیک زیاد در حین نورد سرد، نمونه‌های کشش در دماهای  $550$  تا  $850^{\circ}\text{C}$  در کوره موفلی و تحت اتمسفر گاز آرگون آنیل شدند. علت بررسی دمای تبلور دوباره در رنج یاد شده این است که افزون بر مطالعه ریزساختار، بررسی میکروسختی نمونه‌ها در دماهای یاد شده بوده است. برای جلوگیری از تشکیل رسوبات سمنتیت و حفظ کربن محلول فولاد، نمونه‌ها به سرعت در مخلوط آب نمک و یخ کوئچ شدند. محلول اچ مورد استفاده در تمام موارد محلول نایتال ۲٪ و محلول مارشال بود. به دلیل این‌که فولاد مورد بررسی، دارای کربن خیلی کم بود، برای مشاهده مرز دانه‌ها از محلول مارشال استفاده شد. محلول مارشال شامل نسبت مساوی از محلول‌های پیش‌ساخته الف (۸ گرم اسید اگزالیک و ۵ سی‌سی اسید سولفوریک ۹۸٪ و ۱۰۰ سی‌سی آب مقطر) و محلول ب (آب اکسیژنه ۳۰ درصد) می‌باشد. محلول‌های الف و ب به نسبت یکسان مخلوط شده و بلافاصله استفاده شد. مزیت استفاده از محلول مارشال این است که مرز دانه‌های فریت به گونه یکنواخت اچ می‌شوند. برای جلوگیری از حفره دار شدن، نمونه‌ها به گونه مورب در داخل محلول قرار گرفت. پس از این‌که نمونه‌ها در شرایط گوناگون آنیل شدند، کرنش‌های اولیه‌کششی در مقادیر ۸ و ۱۲ درصد و با نرخ کرنش  $10 \times 0.4$  بر ثانیه، بر روی آن‌ها اعمال شد. با توجه به مطالعات انجام شده در مورد مقدار بهینه اعمال کرنش اولیه، مقادیر ۸ و ۱۲ درصد انتخاب و اعمال گردید [۵-۳]. پس از اعمال مقدار معینی کرنش اولیه نیرو قطع شده مقدار تنش سیلان در مقدار کرنش اولیه اعمالی مشخص شده و نمونه‌ها در مرحله بعد، مورد آزمون BH قرار گرفتند. پس از اعمال کرنش‌های اولیه، بمنظور انجام آزمون BH نمونه‌ها در حمام روغن سیلیکن با دمای  $180^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳۰ دقیقه پیر شدند. این روغن شفاف بوده و با مواد دیگر واکنش ناپذیر بوده و به دلیل هدایت

نتیجه افزایش دانسیته نابه‌جایی پدیده قفل شوندگی نابه‌جایی‌ها افزایش یافته و در نتیجه، مقدار BH افزایش یافته است. تبلور دوباره در منطقه تک فاز فریت و یا منطقه دوفازی فریت و سمنتیت انجام می‌شود. فولادهای BH اغلب فولادهای عاری از عناصر بین نشین هستند که تبلور دوباره در آنها تحت فرایند آنیل مداوم انجام می‌گیرد. افزایش دمای آنیل در این فولادها که ساختار تک‌فاز فریتی دارند، موجب افزایش انحلال کاربیدهایی همچون کاربید نیوبیوم و تیتانیوم شده و در نتیجه، مقدار کربن محلول افزایش می‌یابد [۱۰]. در مورد فولادهای کم‌کربن با قابلیت BH که معمولاً ساختار دوفازی فریت و پرلیت دارند، انتخاب دمای آنیل باید به گونه‌ای صورت گیرد که از استحاله یوتکتویدی و تشکیل آستنیت جلوگیری شود. به بیان دیگر، دمای آنیل زیر دمای بحرانی  $A_{c1}$  می‌باشد. انتخاب دمای مناسب در فرایند آنیل و همچنین، مدت زمان نگهداری در این دما از پارامترهای مهم و کنترل‌پذیر بمنظور دستیابی به بیش‌ترین کربن محلول می‌باشند. انحلال رسوبات کاربیدی در فرایند آنیل باعث افزایش کربن حل‌شده می‌گردد. پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه نشان می‌دهد که با افزایش مقدار دمای آنیل مقدار کربن محلول افزایش می‌یابد [۹ و ۲]. برای انتخاب دمای آنیل، توجه به نوع عناصر آلیاژی تشکیل‌دهنده رسوب اهمیت بسزایی دارد. برای مثال، افزایش نسبت Nb/C دمای لازم برای آنیل را افزایش می‌دهد [۸]. همچنین، در فولادهای فوق کم‌کربن هر چه مقدار تیتانیوم بیشتر باشد، انحلال رسوبات سخت‌تر می‌شود [۸]. افزایش دمای آنیل، باعث حل شدن بیشتر کاربیدها و در نتیجه افزایش کربن محلول سیستم شده و در نتیجه، باعث قفل شدن نابه‌جایی‌های ایجاد شده می‌گردد. در صورتی که میزان اتم‌های کربن محلول کافی باشد، با افزایش کرنش اولیه مکانیزم رسوب‌گذاری نیز فعال شده و به همراه اتمسفر کاترل نقش قابل توجهی را در افزایش تنش تسلیم ایفا می‌کند. افزایش غلظت اتم‌های حل‌شونده در اطراف نابه‌جایی را اتمسفر ناخالصی یا اتمسفر کاترل می‌نامند. با افزایش دمای آنیل، مقدار کرنش لودرز کاهش یافته است. علت این است که با توجه به افزایش اندازه دانه در نمونه مورد پژوهش، به دلیل

این است که با توجه به نمودار شکل ۲ و تصاویر بدست آمده از متالوگرافی نمونه در دماهای گوناگون آنیل، کم‌ترین سختی بدست آمده در دمای  $750^{\circ}\text{C}$  و  $800^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد مشاهده شده است. همچنین، ساختار دانه‌ها در دو دمای ذکر شده بیانگر بیش‌ترین مقدار تبلور دوباره بوده است. بنابراین، دماهای  $750^{\circ}\text{C}$  و  $800^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد برای مقایسه خواص مکانیکی و پخت سختی انتخاب شده است. جداول ۲ و ۳ مقایسه خواص مکانیکی فولاد مورد پژوهش در دو دمای  $750^{\circ}\text{C}$  و  $800^{\circ}\text{C}$  را نشان داده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش دمای آنیل تبلور دوباره در فولادهای فوق کم‌کربن باعث افزایش میزان کربن محلول شده و به عنوان یکی از پارامترهای موثر در افزایش میزان BH مورد توجه قرار می‌گیرد. همان گونه که از جداول ۲ و ۳ مشاهده شده است با افزایش دمای آنیل مقدار پخت سختی در کرنش اولیه ۸ و ۱۲ درصد افزایش قابل‌توجهی داشته است. بنابراین، افزایش دمای آنیل افزون بر افزایش اندازه دانه باعث افزایش میزان اتم‌های کربن محلول نیز شده است. این مطلب با اندازه گیری اصطکاک داخلی که یکی از روش‌های اندازه‌گیری میزان اتم‌های محلول بین‌نشین می‌باشد، اثبات شده است [۹]. تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در اثر اعمال کار سرد روی فلزات باعث افزایش ممتد عیوب بلوری از جمله نابه‌جایی‌ها می‌شود که نتیجه آن افزایش سختی و استحکام و کاهش انعطاف‌پذیری یا قابلیت تغییر شکل فلز می‌باشد. تغییر شکل دانه‌ها در جهت اعمال نیرو و ایجاد ساختار سلولی نابه‌جایی در اثر اعمال کار سرد انرژی داخلی فلز را افزایش داده و موجب ناپایداری ساختار از نظر ترمودینامیکی می‌گردد.

شکل ۳ و ۴ نمودارهای تنش - کرنش مهندسی را برای نمونه مورد پژوهش در کرنش‌های اولیه ۸ و ۱۲ درصد نشان می‌دهد. با وجود افزایش دمای آنیل و افزایش اندازه دانه، مقادیر BH افزایش یافته است. در کرنش اولیه ۸٪ برای هر دو نمونه آنیل شده مقادیر BH تقریباً یکسان بوده است، ولی با افزایش کرنش اولیه به مقدار ۱۲٪، مقدار BH برای نمونه آنیل شده در دمای  $750^{\circ}\text{C}$ ، افزایش یافته است. علت این است که مقدار کربن محلول در سیستم وجود داشته و با افزایش کرنش اولیه و در

تیتانیوم و نیوبیوم جلوگیری می‌کند و به آن‌ها اجازه رشد می‌دهد.

### نتیجه گیری

۱- فولاد تولید شده با ۰.۰۴٪ کربن، و ترکیبات گوناگون نیوبیوم و وانادیم قابلیت افزایش تنش تسلیم در اثر فرایند BH را دارا بود.

۲- با وجود نبودن دستگاه اندازه‌گیری اصطکاک داخلی برای تعیین مقدار کربن محلول سیستم، با توجه به پژوهش‌های پیشین پژوهشگران روی فولادهای کربن متوسط، افزایش دمای تبلور دوباره از ۷۵۰ تا ۸۰۰°C با وجود افزایش اندازه دانه باعث افزایش میزان اتم‌های کربن محلول شده و مقدار BH افزایش یافته است.

۳- انتخاب دمای مناسب در فرایند آنیل و همچنین، زمان نگهداری در این دما از پارامترهای مهم و کنترل‌پذیر بمنظور دستیابی به بیش‌ترین کربن محلول می‌باشند. از سوی دیگر، با افزایش بیش از اندازه کربن محلول، مقاومت در برابر پیر شدن در دمای محیط کاهش می‌یابد.

۴- تغییر خواص BH با تغییر کرنش اولیه به نوع و شدت عملکرد منابع تولید نابه‌جایی و همچنین، مقدار قفل شوندگی نابه‌جایی‌ها باز می‌گردد.

۵- با وجود رسوبات درشت در نمونه، خواص مکانیکی بدست آمده در مقایسه با پژوهش‌های مشابه پژوهشگران حاکی از افزایش خواص پخت سختی بدست آمده در این نمونه (۵۵ مگاپاسکال) نسبت به نمونه‌های مشابه دیگر پژوهشگران بوده است.

### تشکر و قدر دانی

نویسنده مقاله بر خود لازم می‌داند که از مدیریت تحقیقات مواد شرکت مهندسی ساپکو به خاطر فراهم آوردن فولاد اولیه مورد پژوهش و همچنین، سرکار خانم مهندس الهام رحیمی که کمک شایانی در انجام این پژوهش انجام دادند، تشکر کند.

افزایش دمای آنیل تبلور دوباره و در نتیجه، کاهش مساحت کلی مرزخانه‌ها کرنش لودرز کاهش می‌یابد زیرا مرز دانه‌ها به عنوان موانعی که تغییر موقعیت دانه را در ضمن تغییر شکل تسهیل می‌کنند، تمایل برای ایجاد باندهای تغییر شکل از جمله باندهای لودرز را افزایش می‌دهند [۱۰].

ریزساختار نمونه آنیل‌شده در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد به همراه نمودار آنالیز کلی نمونه در شکل ۵ نشان داده شده است. اندازه رسوبات اندازه‌گیری شده به طور میانگین ۳/۳ میکرومتر بوده است. با توجه به پژوهش‌های پیشین پژوهشگران در این زمینه، اندازه رسوبات VC و NbC در حدود ۱۰ تا ۲۰ نانومتر بوده است. رسوبات مشاهده‌شده در این فولاد، به احتمال زیاد، کاربیدهایی بوده که در مرحله همگن‌سازی به دلیل کافی نبودن دمای همگن‌سازی و یا نداشتن زمان کافی، به گونه کامل حل نشده‌اند. رسوبات ایجاد شده در فولادهای BH فقط با میکروسکوپ‌های الکترونی عبوری مشاهده می‌شوند که متأسفانه در این پژوهش به دلیل عدم دسترسی انجام نشده است. این رسوبات درشت همان گونه که پیش‌تر گفته شد، به دلیل زمان یا دمای کم در هنگام همگن‌کردن بوده است که کاربیدهایی تشکیل شده، به گونه کامل حل نشده است. وجود این رسوبات در زمینه فولاد باعث کاهش خواص مکانیکی لازم بوده و محل‌های مستعد برای تمرکز تنش بوده است. با وجود رسوبات درشت در نمونه خواص مکانیکی بدست آمده در مقایسه با پژوهش‌های مشابه پژوهشگران حاکی از افزایش خواص پخت سختی بدست آمده در این نمونه (۵۵ مگاپاسکال) نسبت به نمونه‌های مشابه دیگر پژوهشگران بوده است [۴]. این افزایش استحکام در نمونه آنیل شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد و با کرنش اولیه ۱۲ درصد تامل پذیر است. در فولادهای Ti-IF پایین‌بودن دمای پیش‌گرم مزیتی مهم برای حذف کربن به صورت رسوبات درشت است. دمای کم‌تر پیش‌گرم از انحلال کامل رسوبات

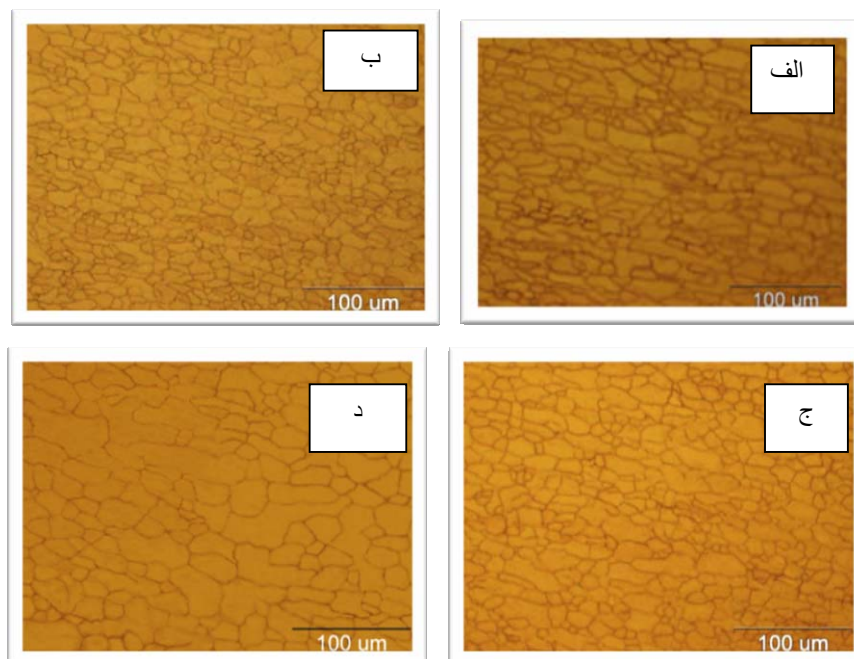
**References**

- 1- R. Trimberger; E. Fleischman and P. Salmon, "New Ultra Low Carbon High Strength Steels with Improved Bake Hardenability for Enhanced Stretch Formability and Dent Resistance", Final Report, Thesis University of Pittsburgh, pp. 1-4 2003.
- 2- T. Kvackaj and I. Mamuzic, "Development of Bake Hardening Effect by Plastic Deformation and Annealing Condition", *Metalurgyja.*, Vol. 45, No. 1, pp.51-55, 2006.
- 3- Z.C. Wang ; S.J. Kim ; C.G. Lee and T.H. Lee "Bake-hardening Behavior of Cold-Rolled CMnSi and CMnSiCu TRIP-Aided Steel Sheets", *Journal of Materials Processing Technology.*, Vol. 151, pp.141-145, 2004.
- 4- K. Dehghani and J.J. Jonas, " Daynamic Bake Hardening of Interstitial-Free Steels", *Metallurgical and Materials Transactions A.*, Vol. 31, pp.1375-1384, 2000.
- 5- A. Keith, J. Taylor, and G. Speer, "Bake hardenable vanadium containing steel and method thereof", U.S. Patent, No. 5,656,102, 1997.
- 6- F. Takahiro; G.E. Dongsheng and O.H. Jewheon, "Competition and Co-Operation in Automotive Steel Sheet Production in East Asia", *Manufacturing Management Research Center Discussion Paper.*, No. 73, 21COE University of Tokyo, 2006.
- ۷-ح. مناجاتی زاده، د. آصفی، ا. قدمیاری، م. عقیده و ا. انصاری. "بررسی و شرایط تولید بر مقاومت به ضربه فولادهای میکروآلیاژی مورد استفاده در لوله سازی با استفاده از شبکه عصبی" *مجله علمی پژوهشی مواد نوین*، جلد ۲، شماره ۳، ص ۱۰-۱، بهار ۱۳۹۱.
- 8- S.F. Medina, and M. Gomez, "Effect of V and Nb on static recrystallization of austenite and precipitate size in microalloyed steels", *J. Mater Sci.*, pp. 5553-5557, 2010.
- 9- B. Soenon; A.K. De ; S. Vandeputte and B.C. De Cooman, "Competition Between Grain Boundry Segregation and Cottrell Atmosphere Formation During Static Strain Aging in Ultra-Low Carbon Bake Hardening Steels" , *Acta Materialia.*, Vol.52, pp.3483-3492, 2004.
- 10- G.E. Dieter, "Mechanical Metallurgy", 3<sup>RD</sup> Edition, McGraw-Hill, New York, 1967.

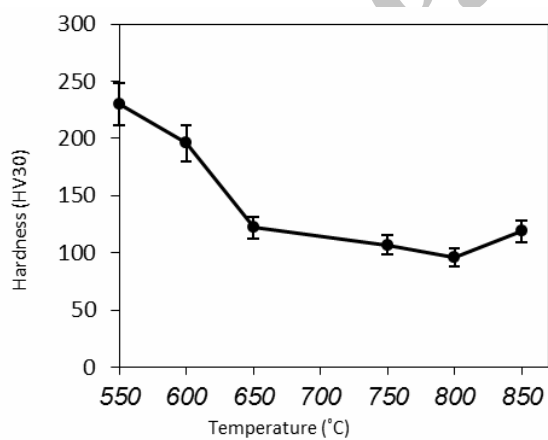
**پیوستها**

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد پژوهش.

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Ni%	Mo%	Cu%	V%	Nb%	Ti%	Cr%	Fe%
۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳۴	۰/۰۱۷	None	۰/۰۰۳	Base



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار نمونه‌ی آنیل شده به مدت ۳۰ دقیقه در دماهای الف)  $650^{\circ}\text{C}$ ، ب)  $750^{\circ}\text{C}$ ، ج)  $800^{\circ}\text{C}$ ، د)  $850^{\circ}\text{C}$ .



شکل ۲- تغییرات سختی بر حسب دماهای گوناگون آنیل روی نمونه مورد پژوهش.

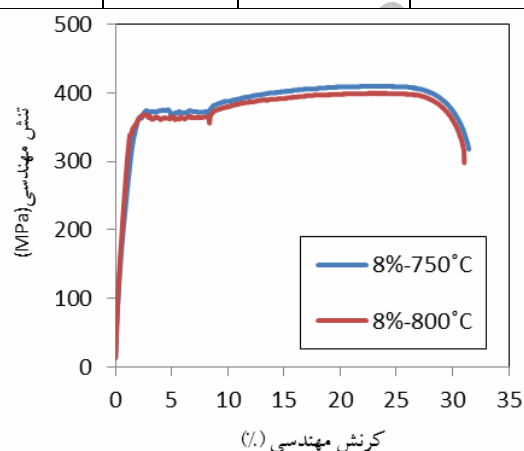


جدول ۲- نتایج ناشی از آزمون کشش پس از فرایند BH روی نمونه مورد پژوهش آنیل در دمای ۷۵۰°C.

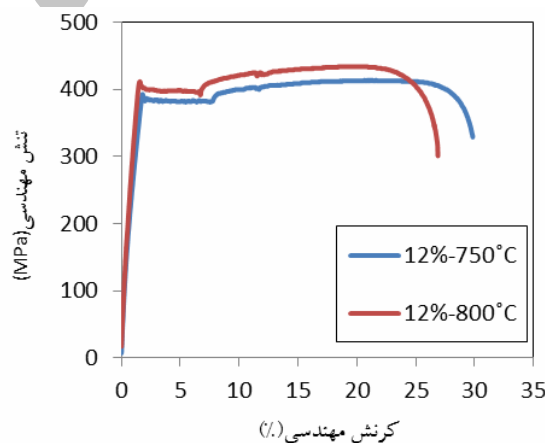
مقادیر BH (مگاپاسکال)	کرنش لودرز (%)	کرنش یکنواخت (%)	از دیاد طول کلی (%)	استحکام کششی نهایی پس از BH (مگاپاسکال)	تنش تسلیم پایینی پس از فرایند BH (مگاپاسکال)	تنش سیلان پس از اعمال کرنش اولیه (مگاپاسکال)	کرنش اولیه (%)
۷۳	۶	۲۱/۵	۳۱/۳۶	۴۰۹/۸	۳۶۳	۲۸۸	۸
۸۴	۶	۱۹	۲۹	۴۱۳/۷	۳۸۳	۲۹۹	۱۲

جدول ۳- نتایج بدست آمده از آزمون کشش پس از فرایند BH روی نمونه مورد پژوهش در دمای آنیل ۸۰۰°C.

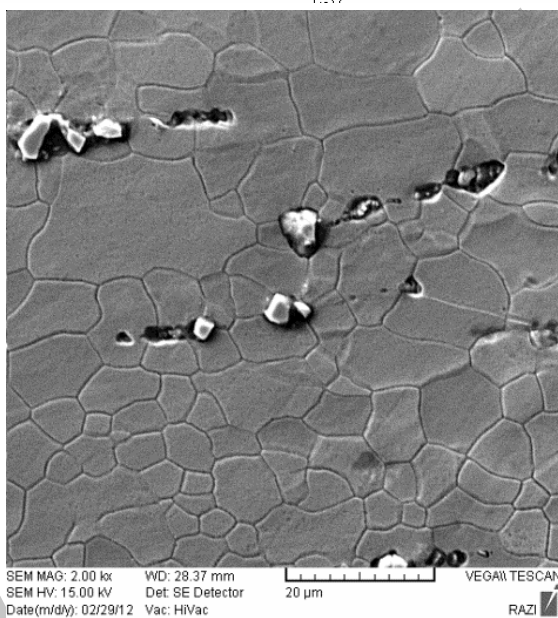
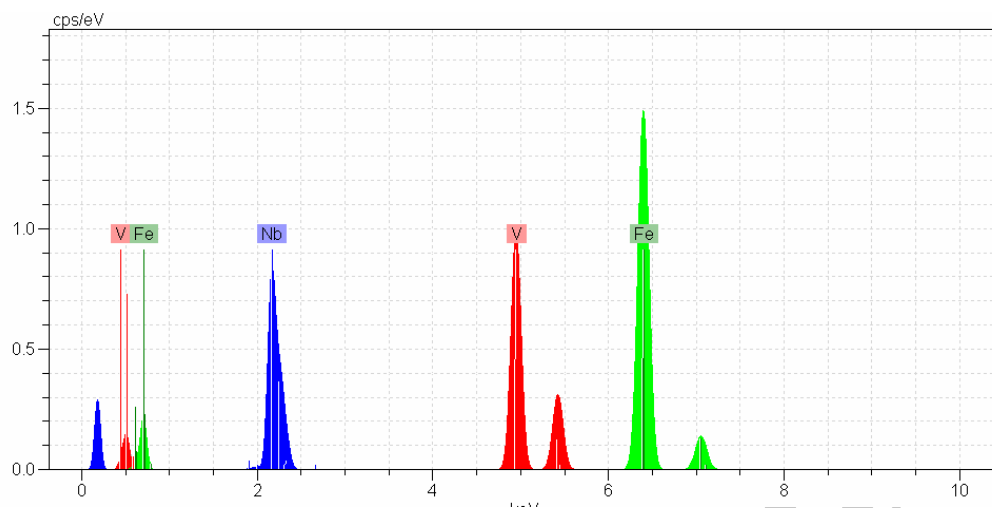
مقادیر BH (مگاپاسکال)	کرنش لودرز (%)	کرنش یکنواخت (%)	از دیاد طول کلی (%)	استحکام کششی نهایی پس از BH (مگاپاسکال)	تنش تسلیم پایینی پس از فرایند BH (مگاپاسکال)	تنش سیلان پس از اعمال کرنش اولیه (مگاپاسکال)	کرنش اولیه (%)
۸۴	۵/۶	۲۲/۴	۳۰/۱۶	۳۹۹/۸	۳۶۵	۲۸۱	۸
۱۰۴	۵/۴	۱۹/۵	۲۵	۴۳۴/۲	۴۰۰	۲۹۶	۱۲



شکل ۳- مقایسه نمودارهای تنش-کرنش مهندسی نمونه مورد پژوهش در مقدار کرنش اولیه ۸٪.



شکل ۴- مقایسه نمودارهای تنش-کرنش مهندسی نمونه مورد پژوهش در مقدار کرنش اولیه ۱۲٪.



شکل ۵- نمودار آنالیز کلی از توزیع عناصر آلیاژی نمونه .