

# بررسی تأثیر نورد پوسته‌ای بر خواص شکل‌پذیری ورق‌های فولاد ساده کربنی

روح اله بصیری<sup>۱\*</sup>، داود آصفی<sup>۲</sup>، حسین مناجاتی‌زاده<sup>۳</sup>، عباس نجفی‌زاده<sup>۴</sup>، علی ناظری<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

۲- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

۴- استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، گروه مواد، اصفهان، ایران

۵- کارشناس واحد نورد سرد، مجتمع فولاد مبارکه، اصفهان، ایران

\* Rooholabasiri@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۰/۰۶/۰۸، تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۱/۲۳)

## چکیده

در این پژوهش به بررسی تأثیر شرایط نورد پوسته‌ای بر میانگین ضریب کار سختی ( $\bar{n}$ ) و نسبت ناهمسانگردی قائم ( $\bar{r}$ ) که منجر به کشش عمیق‌پذیری محصولات مورد استفاده در صنایع اتومبیل‌سازی می‌گردد، پرداخته شده است. این دو پارامتر از شاخص‌های ارزیابی شکل‌پذیری می‌باشند. بر همین اساس سه سری نمونه فولاد ساده کربنی متفاوت، انتخاب شد. سری اول نمونه‌های قبل و بعد از نورد پوسته‌ای می‌باشند. سری دوم نمونه‌هایی هستند که با درصد متفاوت نورد آزمایشگاهی آماده شده‌اند. سری سوم نمونه‌هایی با شرایط یکسان تولیدی و با مقدار متفاوت درصد کشیدگی نورد پوسته‌ای می‌باشند. سپس تأثیر شرایط متفاوت تولیدی هر یک از این سه سری بر خواص شکل‌پذیری نمونه‌ها بررسی شده است. نتایج نشان داد نورد سرد زیر ۰/۴/۸٪ و درصد کشیدگی در نورد پوسته‌ای بر  $\bar{r}$  بی‌تأثیر می‌باشد. با افزایش کارسرد، درصد کشیدگی در نورد پوسته‌ای به شدت کاهش می‌یابد. میزان این کاهش مستقل از درصد کشیدگی در نورد پوسته‌ای و به ریزساختار و شرایط قبل از نورد پوسته‌ای برمی‌گردد.

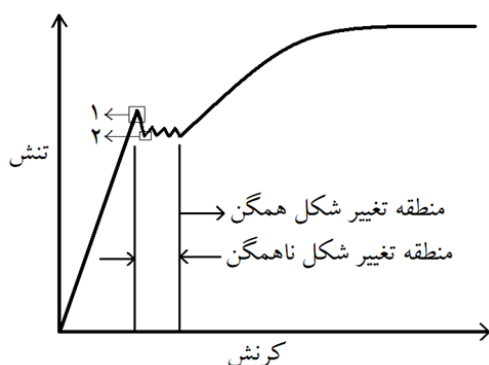
## واژه‌های کلیدی:

فولاد ساده کربنی، شکل‌پذیری، نورد سرد، نورد پوسته‌ای، ضریب کار سختی

## ۱- مقدمه

خودرو را افزایش دهند [۱]. محاسبه شکل‌پذیری ورق‌های فولادی از نتایج آزمون کشش تک محوری و بررسی رفتار

صنایع فولادی با افزایش مقدار شکل‌پذیری محصولات خود در تلاشند تا کیفیت محصولات تولیدی مورد مصرف در صنایع



شکل (۱): تعیین منطقه تغییر شکل همگن و ناهمگن در نمودار تنش-کرنش

به منظور حذف منطقه‌ی تغییر شکل ناهمگن، پس از آنیل ورق بطور مجدد تحت میزان بسیار کمی کرنش قرار می‌گیرد تا نابجایی‌های قفل شده توسط عناصر بین نشین، آزاد شده و لغزش نمایند. این لغزش باعث یک تغییر شکل پلاستیک اندک که بیشتر در سطوح ورق متمرکز است می‌شود. قفل شدن مجدد نابجایی‌ها و بروز مجدد پدیده‌ی افت تسلیم در نمودار مستلزم گذشت زمان و نفوذ اتم‌ها است که در صورتی که این زمان حاصل نشود، منطقه غیریکنواخت در فرایند شکل دهی بعدی ورق حذف می‌شود [۷-۸]. درصد ازدیاد طول (EL) در نورد پوسته‌ای بر حسب عرض و ضخامت متغیر است. تأثیر میزان درصد ازدیاد طول بر خواص شکل‌پذیری فولادهای کشش عمیق‌پذیر تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق تلاش خواهد شد با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی و تغییرات در خط نورد پوسته‌ای به بررسی تأثیر این شاخص بر خواص شکل‌پذیری و مکانیکی پرداخته شود.

## ۲- مواد و روش تحقیق

ضریب کار سختی ( $n$ ) و نسبت کرنش مومسان ( $r$ ) به ترتیب بیانگر مقاومت ورق در مقابل گلوئی شدن و کاهش ضخامت است. ضریب کار سختی از روی داده‌های تنش و کرنش آزمون کشش، با استفاده از معادله هولمن ( $\sigma = K\varepsilon^n$ ) بدست می‌آید. آزمون کشش با نرخ کرنش  $0.004$  (1/s) و طبق استاندارد آلمان

تنش-کرنش نمونه‌ها انجام می‌گیرد که توسط آن دو پارامتر مهم ضریب کار سختی<sup>۱</sup> و ناهمسانگردی قائم<sup>۲</sup> که به ترتیب نشان دهنده مقاومت ماده به گلوئی شدن و مقاومت به نازک شدن می‌باشند، قابل محاسبه است. از این دو پارامتر برای میزان اتساع پذیری و کشش عمیق‌پذیری استفاده می‌شود. برای دستیابی به شکل‌پذیری مناسب باید این دو پارامتر دارای مقادیر بالایی باشند؛ بر خلاف استحکام تسلیم که پایین بودن آن حاکی از خواص مناسب برای شکل‌پذیری است [۲-۳].

در صنایع تولید ورق فولادی محصولات با خاصیت کشش عمیق‌پذیری<sup>۳</sup> به محصولات با شکل‌پذیری بالا اطلاق می‌شود. فولادی کشش عمیق‌پذیر نامیده می‌شود که دارای مقادیر ضریب کار سختی بین  $0.22-0.24$  و ضریب ناهمسانگردی قائم بین  $2-1/6$  باشد [۴]. فولادهای کشش عمیق‌پذیر با ترکیب شیمیایی کربن و نیتروژن بسیار کم به عنوان فولادهای فوق کم کربن و یا فولاد کم کربن شناخته می‌شود. بجز ترکیب شیمیایی شرایط تولید شامل شرایط نورد گرم، نورد سرد، آنیل و شرایط نورد پوسته‌ای<sup>۴</sup> از عوامل مهم تأثیر گذار بر خواص شکل‌پذیری می‌باشند [۵]. تحقیقات زیادی در ارتباط با تأثیر شرایط تولید بر این خواص انجام شده است. سال‌های گذشته تلاش بسیاری انجام شده تا تأثیر این پارامترها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. همچنین از سیستم‌های هوشمند برای بررسی جداگانه این پارامترها استفاده شده است. با این همه، تحقیقات محدودی در ارتباط با تأثیر شرایط نورد پوسته‌ای بر روی شکل‌پذیری انجام گرفته است. نورد پوسته‌ای به منظور حذف موج، بهبود کیفیت سطح و حذف منطقه تغییرشکل غیرهمگن<sup>۵</sup> پس از استحکام تسلیم بکار گرفته می‌شود [۶]. منطقه تغییر شکل ناهمگن در نمودار تنش-کرنش آلیاژهایی که حاوی عناصر بین نشین هستند ظاهر شده و تحت عنوان پدیده‌ی افت تسلیم شناخته می‌شود (شکل ۱). همان‌طور که ملاحظه می‌شود فولاد در ابتدا برای تسلیم به یک تنش تسلیم بالاتر (نقطه ۱) نیاز داشته و پس از آن تنش سیلان به‌طور ناگهانی افت می‌کند (نقطه ۲) و تغییر شکل ناهمگن تا رسیدن به منطقه همگن ادامه می‌یابد.

گردید. سه سری نمونه در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند که ترکیب شیمیایی این سه سری در جدول (۱) نشان داده شده است. سری اول کلاف‌های مجموعه A که قبل و بعد از نورد پوسته‌ای نمونه‌گیری شده و خواص آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نورد پوسته‌ای این مجموعه، با ۰/۷ درصد ازدیاد طول (EL) انجام شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر کاهش سطح مقطع بر خواص شکل‌پذیری، بر روی نمونه‌های سری B آزمون نورد سرد در آزمایشگاه انجام شده است. برای رسیدن به این مهم فولادی پس از عملیات آنیل جعبه‌ای در شرایط صنعتی فولاد مبارکه انتخاب شده و از آن ۵ نمونه ۴۰×۶۰ سانتی‌متر جدا شد. برای اطمینان از ساختار یکسان، هر ۵ نمونه در طول ورق فولادی با ابعاد ۴×۱/۱ متر مطابق شکل (۲) انتخاب شدند. پس از انجام نورد با سرعت خطی (N) ۰/۱۸ متر بر ثانیه و اعمال کاهش سطح مقطع متفاوت بر روی نمونه‌ها، آزمون‌های متالوگرافی و مکانیکی بر روی آن‌ها انجام شد. سری سوم که همگی از شرایط تولیدی یکسانی تا قبل از نورد پوسته‌ای برخوردارند با تغییر شرایط نورد پوسته‌ای تغییرات شکل‌پذیری آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی کلاف

Code	%C	%Si	%Mn	%Al	N(ppm)
A1	۰/۰۴۵	۰/۰۰۹	۰/۲۰۹	۰/۰۴۹	۱۹
A2	۰/۰۴۹	۰/۰۱	۰/۲۰۴	۰/۰۴۷	۳۰
A3	۰/۰۳۹	۰/۰۰۹	۰/۲۰۹	۰/۰۴۹	۱۹
A4	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۲۲۰	۰/۰۵۵	۵۸
A5	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۲۲۰	۰/۰۵۵	۵۸
B	۰/۰۳۶	۰/۰۱۲	۰/۲۷	۰/۰۴۳	۲۵
C	۰/۰۳۴	۰/۰۰۹	۰/۲۱۵	۰/۰۴۵	۳۵

(DIN EN-1000) انجام شد. نسبت کرنش حقیقی در جهت پهنا  $\epsilon_w$  به کرنش حقیقی در جهت ضخامت  $\epsilon_t$  در آزمایش کشش تک محوری را نسبت کرنش مومسان می‌نامند. برای تعیین  $r$  در نمونه، ۲۰٪ افزایش طول ایجاد شد سپس با اندازه‌گیری  $\epsilon_t$  و  $\epsilon_w$ ،  $r$  محاسبه گردید. ناهمسانگردی قائم از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$r = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که اعداد ۰، ۴۵ و ۹۰ نشان دهنده جهت آماده سازی نمونه نسبت به جهت نورد است. برای محاسبه  $n$  نیاز به بدست آوردن چندین نقطه بر روی نمودار تنش-کرنش است. که طبق استاندارد ASTM E646 معمولاً بیش از پنج نقطه انتخاب شده و پس از محاسبه تنش و کرنش حقیقی و قرار دادن در رابطه ۲،  $n$  محاسبه می‌گردد.

رابطه (۲):

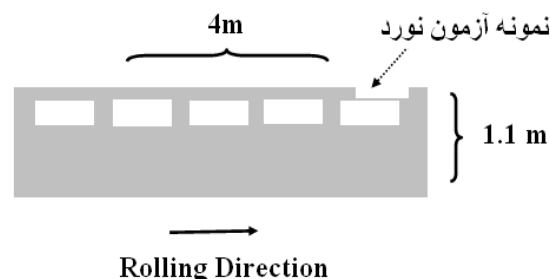
$$n = \frac{N_2 \log_2 \log_2 \sigma_2 - N_1 \log_2 \log_2 \sigma_1}{N_1 \log_2 \log_2 \epsilon_1 - N_2 \log_2 \log_2 \epsilon_2}$$

که  $N$  تعداد جفت داده‌های بدست آمده از نمودار تنش-کرنش است. به همین ترتیب مقادیر  $n$  در سه جهت اندازه‌گیری شده و هم-چون رابطه (۱) مقادیر میانگین آن‌ها محاسبه گردید. نمونه‌ها بوسیله متالوگرافی نوری مورد بررسی ساختاری قرار گرفتند. بررسی‌های ساختاری این نمونه‌ها بیشتر به منظور مقایسه مورفولوژی و اندازه دانه‌ها صورت گرفت. برای این منظور نمونه‌ها از طریق دستورالعمل متداول آزمایشگاه محصول فولاد مبارکه برای فولادهای ساده کربنی آماده سازی و بوسیله نایتال ۵٪ اچ شد و تصاویر آن‌ها بوسیله میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ برابر تهیه گردید. هم‌چنین اندازه متوسط دانه‌ها با استفاده از روش جفری ۶ یا روش تقاطع خطوط طبق استاندارد (ASTM E112) تعیین گردید. برای تعیین اندازه دانه متوسط از تصاویر متالوگرافی نمونه‌ها در جهت نورد استفاده شده و از طریق اندازه‌گیری مجزا در دو جهت افقی و عمودی در تصویر، نسبت کشیدگی دانه‌ها ۷ در جهت نورد نیز تعیین

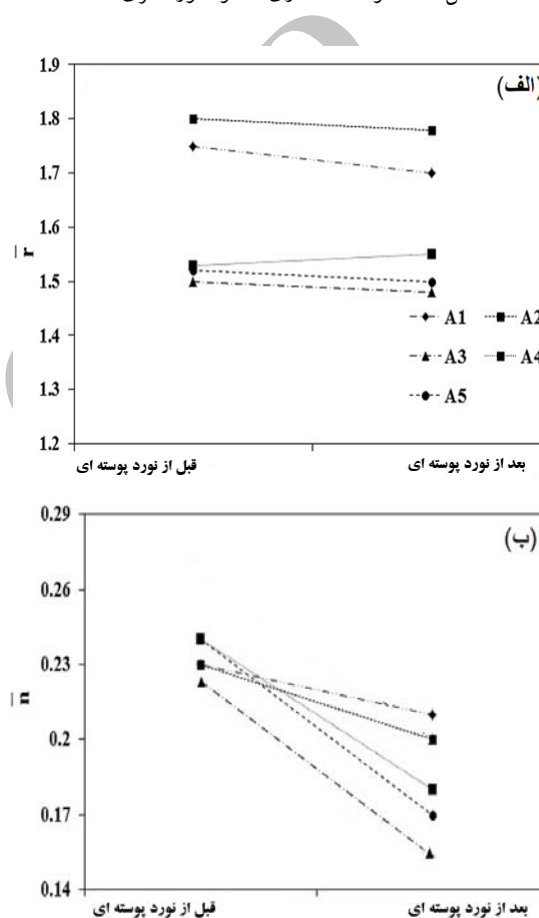
(۳- الف) نورد پوسته‌ای تأثیر چندانی بر روی  $\bar{\Gamma}$  ندارد. ارتباط مستقیم با جهت گیری یا بافت دارد. مهم ترین عامل تغییر بافت فولادساده کربنی شرایط آنیل می‌باشد که با جوانه‌زنی از دانه‌های کار سرد شده، جهت گیری مشخص می‌یابند [۹]. چون کشیدگی حاصل از نورد پوسته‌ای، تغییری در جهت گیری کریستال‌ها ندارد می‌توان گفت نورد پوسته‌ای باعث تغییر بافت و در نتیجه  $\bar{\Gamma}$  نشده است. مطابق شکل (۳-ب)، برای تمام نمونه‌های سری اول (A)، پس از نورد پوسته‌ای،  $\bar{n}$  روند کاهشی نشان می‌دهد. درصد تغییرات ضریب کارسختی پس از نورد پوسته‌ای برای هر یک از نمونه‌های سری A در شکل (۴) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود برای هر یک از نمونه‌ها این کاهش متفاوت است و در بازه ۸/۷ تا ۳۰٪ برای نمونه‌های مختلف تغییر می‌کند. علت این کاهش، از تأثیرپذیری مستقیم ضریب کارسختی با تغییرات ریزساختاری نشأت می‌گیرد. ارتباط ریزساختار و ضریب کارسختی توسط آنتونیو [۹] ارائه شده است (رابطه (۲)).

$$n = 0.450 - 0.001(\sigma_{PA} + \sigma_{SA} + \sigma_{GB} + \sigma_{PCT} + \sigma_{F0.2}) \quad (2)$$

جایی که  $\sigma_{SA}$  تأثیر عناصر محلول،  $\sigma_{PA}$  تأثیر تنش پیرلز،  $\sigma_{PCT}$  جزء ذرات رسوبی،  $\sigma_{GB}$  جزء مرز دانه،  $\sigma_{F0.2}$  جنگل نابجایی است (هر دو پارامتر  $\sigma_{SA}$  و  $\sigma_{PA}$  متأثر از ترکیب شیمیایی است). علت متفاوت بودن درصد کاهش  $\bar{n}$  برای هر نمونه سری A در شکل (۴)، دیگر شاخص‌های ریزساختاری هم چون مقدار رسوبات می‌باشد. نابجایی‌ها منشأ ضریب کارسختی هستند و هر عاملی که بر حرکت آن‌ها تأثیر بگذارد مستقیماً بر ضریب کارسختی تأثیر می‌گذارد. با افزایش موانع سد کننده، حرکت نابجایی‌ها کند شده و در نتیجه ضریب کارسختی کاهش می‌یابد. مسیر حرکت نابجایی ۸ را MFP می‌نامند. هر عاملی که MFP را کاهش دهد باعث خواهد شد که ضریب کارسختی کاهش یابد. با افزایش شاخص ریزساختاری، رسوبات که هم چون موانع سد کننده نابجایی می‌باشد، باعث می‌شود نابجایی‌ها با یکدیگر برخورد کرده و دانسته آن‌ها افزایش و



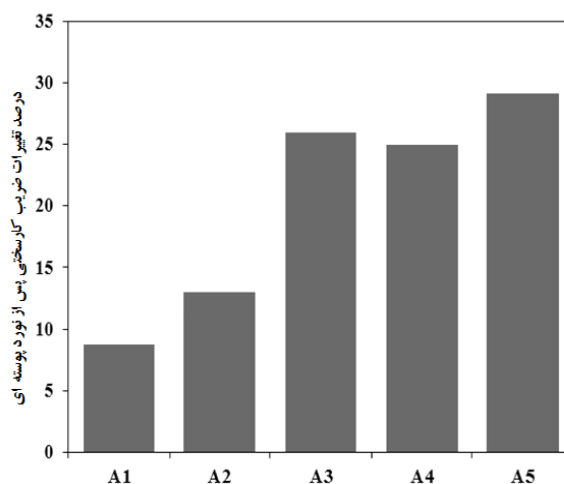
شکل (۲): نحوه آماده سازی ۵ نمونه نورد سری B



شکل (۳): تغییرات (الف)  $\bar{\Gamma}$  و (ب)  $\bar{n}$  برای مجموعه (A) قبل و بعد از نورد پوسته‌ای

ارتباط  $\bar{\Gamma}$  و  $\bar{n}$  برای مجموعه نمونه‌های سری A برای قبل و بعد از نورد پوسته‌ای در شکل (۳) نشان داده شده است. مطابق این تصویر تغییرات  $\bar{n}$  شدید بوده و روند کاهشی از خود نشان می‌دهد.  $\bar{\Gamma}$  قبل و بعد از نورد پوسته‌ای تغییرات چندانی نشان نمی‌دهد و نمودار به صورت صاف می‌باشد. مطابق شکل

ضریب کارسختی کاهش یابد. رابطه‌ی ۲ نیز گویای این مطلب است [۷-۸].



شکل (۴): درصد تغییرات ضریب کارسختی پس از نورد پوسته‌ای برای هر یک از نمونه‌های سری A

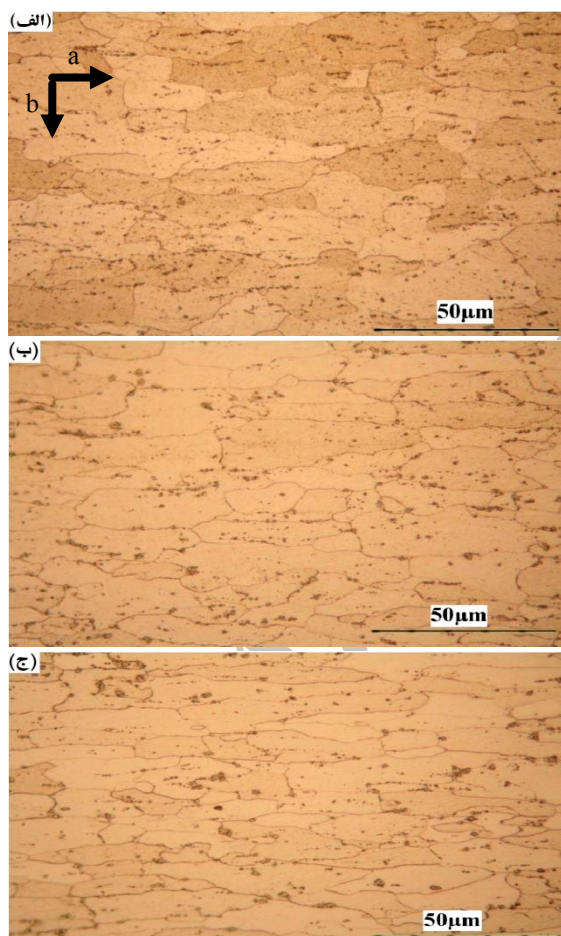
پوسته‌ای این محصولات نشان داد همگی دارای شرایط متفاوت هستند. مهم‌ترین شاخص تولیدی که منجر به تغییر در میزان رسوبات می‌شود دمای کلاف پیچی (CT) می‌باشد. دمای کلاف پیچی این نمونه‌ها در جدول (۱) آورده شده است. مطابق این جدول نمونه‌های A3, A4, 5 از بیشترین دمای کلاف پیچی برخوردار بوده‌اند. دمای بالای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد منجر به رسوبگذاری ذرات AIN شده و در مراحل آنیل و دیگر مراحل بخصوص نهایی تأثیر گذار است [۱۲]. با توجه به این نکته که تمامی این ۵ کلاف دارای شرایط یکسان آنیل می‌باشند، کلاف پیچی در این دما باعث تفاوت در حجم رسوبگذاری شده است و در نتیجه در شرایط یکسان نورد پوسته‌ای افت ضریب کارسختی متفاوت است.

### ۳-۱- تأثیر ریز ساختار بر شکل‌پذیری

مطابق رابطه (۲) ضریب کارسختی با شاخص‌های ریزساختاری هم‌چون عناصر محلول، ذرات رسوبی، مرز دانه و دانسیته نابجایی ارتباط مستقیم دارد. برای نمونه‌های B خواصی که پس از نورد پوسته‌ای به علت تغییر شکل تغییر می‌کند دانسیته نابجایی و خواص دانه شامل شکل و اندازه می‌باشد. زیرا ترکیب شیمیایی و شرایط تولید قبل از نورد پوسته‌ای ثابت بوده و دمای انجام نورد پوسته‌ای در محدوده رسوبگذاری ذرات رسوبی نمی‌باشد. بررسی خواص دانه بندی این نمونه‌ها نشان داده است تغییرات کشیدگی دانه‌ها بسیار کم بوده و تنها عامل ریزساختاری موجود، تغییرات دانسیته نابجایی می‌باشد [۱۰]. مهم‌ترین عامل ریز ساختاری بر ناهمسانگردی قائم  $\bar{\Gamma}$  خواص شکل‌پذیری در فلزات، جهت‌گیری ترجیحی دانه‌ها (یعنی گرایش آماری دانه‌ها به جهت‌های بلورشناختی خاص) است. جهت‌گیری‌های ترجیحی یا بافت‌های بلورشناسی، در نتیجه چرخش شبکه در دانه‌های فلزات کار شده در حین تغییر شکل و بر اثر لغزش یا دوقلویی ایجاد می‌شود. تبلور مجدد در حین آنیل، بافت بلورشناختی و ناهمسانگردی ( $\bar{\Gamma}$ ) را تغییر می‌دهد [۹]. در نتیجه برای نمونه‌های B چون شرایط آنیل قبل از نورد پوسته‌ای یکسان بوده پیش‌بینی می‌شود که این نمونه‌ها دارای ناهمسانگردی

حال می‌توان گفت اگر دو نمونه با حجم رسوبات متفاوت وجود داشته باشد و این دو نمونه با مقدار یکسان کار سرد شوند، در نمونه‌ای که حجم رسوباتش بیشتر است بعد از کار سرد به علت داشتن رسوبات بیشتر، دانسیته نابجایی بیشتری ایجاد شده و در نتیجه کاهش ضریب کارسختی آن بیشتر خواهد بود. این مهم را می‌توان از نتایج حاصل از کار آنتونیو بهتر درک کرد. این محقق نمونه‌هایی با درصد حجمی متفاوت رسوبات و با کرنش یکسان ۰/۰۲ کار سرد شده را مورد بررسی قرار داد و دریافت هرچه حجم رسوبات در نمونه‌ها بیشتر باشد دانسیته نابجایی ایجاد شده توسط کار سرد بیشتر می‌شود و با ایجاد دانسیته نابجایی بیشتر، کاهش ضریب کارسختی بعد از کار سرد بیشتر است [۱۱]. بر همین اساس به علت یکسان بودن شکل و اندازه دانه و نسبت کشیدگی، می‌توان تفاوت در میزان کاهش ضریب کارسختی در نمونه‌های سری A را به تفاوت در حجم رسوبات بوجود آمده در نتیجه شرایط متفاوت تولیدی قبل از نورد پوسته‌ای و عامل ریزساختاری دانسیته نابجایی نسبت داد. البته در این فولادها وجود ذرات AIN مهم و تأثیر گذارند (TiC) در این فولادها وجود ندارد). بررسی شرایط تولیدی قبل از نورد

به همراه کشیدگی در شکل (۷) نشان داده شده است. تغییرات اندازه دانه با افزایش کارسرد چندان قابل توجه نیست، زیرا با افزایش کارسرد، دانه‌ها در جهت نورد (طول نمونه ورق) کشیده شده و در جهت عمودی نورد (ضخامت نمونه ورق) باریک می‌شوند. این امر باعث می‌شود، اندازه دانه در جهت نورد افزایش و در جهت عمودی نورد کاهش یابد. از طرفی چون طبق روش تقاطع خطوط در استاندارد ASTM E112 (برای محاسبه اندازه دانه) اندازه دانه‌ها در دو جهت موازی و عمود تصویر میانگین گیری می‌شود اندازه دانه محاسبه شده‌ی نمونه تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارد.



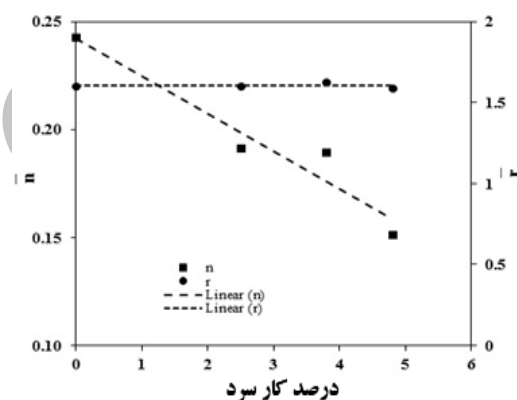
شکل (۶): تصویر (الف) ریز ساختار نمونه بدون نورد B0، تصویر (ب) نمونه نورد B1 و تصویر (ج) نمونه نورد B3

می‌توان نتیجه گرفت با افزایش درصد کارسرد، عامل اصلی ریزساختاری تأثیرگذار، تغییرات دانسیته نابجایی است و باعث

( $\bar{r}$ ) یکسان بوده و نورد پوسته‌ای نباید تأثیری بر ناهمسانگردی ( $\bar{r}$ ) آن‌ها داشته باشد.

### ۳-۲- تأثیر میزان کارسرد بر شکل پذیری

شکل (۵) نشان دهنده تغییرات خواص شکل‌پذیری با درصد کارسرد برای نمونه‌های سری B می‌باشد. مشاهده می‌شود با افزایش کارسرد تغییرات  $\bar{n}$  کاهش می‌باشد به گونه‌ای که برای نمونه بدون کارسرد ۰/۲۵ و برای نمونه با ۴/۸٪ کارسرد این مقدار به ۰/۱۵ کاهش می‌یابد. ارتباط  $\bar{r}$  با درصد کارسرد مطابق شکل (۵) خطی صاف و بدون تغییر است. تغییرات  $\bar{n}$  با درصد کارسرد مطابق توضیحات بخش قبل به تغییر دانسیته نابجایی مربوط است و تغییرات دانه بندی بر این شاخص تأثیر چندانی ندارد.



شکل (۵): ارتباط  $\bar{n}$  و  $\bar{r}$  با درصد کارسرد برای نمونه های سری B

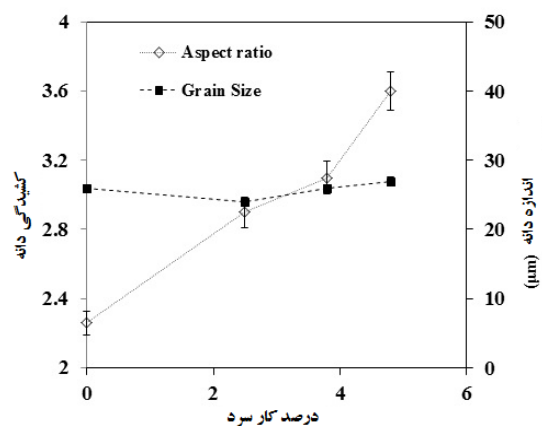
در شکل (۶) ریزساختار نمونه بدون نورد B0 در تصویر (الف)، نمونه نورد B1 با ۲/۵٪ کاهش ضخامت در تصویر (ب) و نمونه نورد B3 با ۴/۸٪ کاهش ضخامت در تصویر (ج) نشان داده شده است. دانه‌های این سه نمونه به ترتیب دارای نسبت کشیدگی ۲/۲۶، ۲/۹ و ۳/۶ می‌باشند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش کارسرد اندازه دانه‌ها در جهت a (موازی نورد) افزایش یافته و در جهت b (عمودی نورد) کاهش یافته است. نسبت اندازه دانه در جهت طولی به اندازه دانه در جهت عرضی را نسبت کشیدگی دانه گویند. بنابر این با افزایش کارسرد نسبت کشیدگی در جهت نورد افزایش یافته است. تغییرات اندازه دانه

کاهش  $\bar{n}$  شده است.

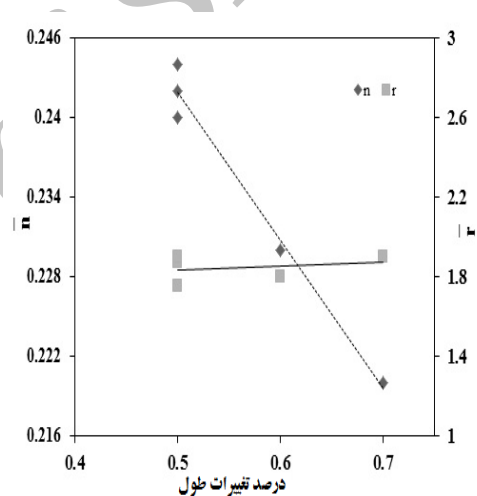
است. تأثیر درصد تغییرات طول نورد پوسته‌ای بر شاخص‌های شکل‌پذیری نمونه‌های این سری در شکل (۸) نشان داده شده است. مطابق این تصویر، تغییرات  $\bar{r}$  و درصد تغییرات طول نورد پوسته‌ای صاف و یا بدون تغییر است. تغییرات  $\bar{n}$  با درصد تغییرات طول نورد پوسته‌ای دارای روند کاهشی است. بگونه‌ای که با افزایش درصد تغییرات طول ضریب کارسختی کاهش می‌یابد. این نتایج با داده‌های بدست آمده در بخش‌های قبل هم‌خوانی دارد و مطابق نتایج بدست آمده از تأثیر کارسرد حاصل از نورد، با افزایش تغییر شکل دانسیته نابجایی افزایش یافته و ضریب کارسختی کاهش می‌یابد.

نکته مهم نوع نیروی تغییر شکل می‌باشد. به‌طور کلی در نورد دو نیرو باعث کاهش ضخامت می‌شود، یکی نیروی فشاری دو غلتک در قفسه نورد که در جهت ضخامت ورق اعمال می‌شود و دیگری نیروی کششی که در جهت طول ورق و بین غلتک‌های دو قفسه نورد اعمال می‌شود. نیروی فشاری دو غلتک در قفسه نورد با تنظیم فاصله‌ی بین دو غلتک کنترل می‌شود و نیروی کششی بین دو قفسه نورد با اعمال اختلاف سرعت نورد بین دو قفسه ایجاد می‌شود، به‌طوری که سرعت نورد قفسه بعدی بیشتر از سرعت قفسه قبلی اعمال می‌شود. در نورد پوسته‌ای بیشترین نیروی اعمالی به نمونه (نیروی غالب که باعث کاهش ضخامت می‌شود)، نیروی کششی بین دو قفسه نورد است که در جهت طول نمونه ورق می‌باشد. در صورتی که کاهش ضخامت حاصل از نورد سرد به دلیل اعمال نیروی فشاری در جهت ضخامت است. از طرفی همان‌گونه که مشخص گردید، نورد پوسته‌ای و نورد سرد، هر دو باعث کاهش ضریب کارسختی می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نوع نیروی اعمالی (کششی یا فشاری) بر کاهش ضریب کارسختی بی تأثیر است [۱۳]. کاهش درصد تغییرات طول نورد پوسته‌ای کمتر از ۵/۰٪، نشان داد منطقه غیر همگن تغییر شکل پس از استحکام تسلیم از بین نمی‌رود [۶].

بر همین اساس مناسب‌ترین حد اعمال درصد تغییرات طول نورد پوسته‌ای ۵/۰٪ برای محصولات مطابق سری C می‌باشد.



شکل (۷): ارتباط درصد کار سرد با اندازه و کشیدگی دانه برای نمونه‌های سری B



شکل (۸): ارتباط درصد تغییرات طول نورد پوسته‌ای بر اساس  $\bar{r}$  و  $\bar{n}$

این افزایش دانسیته نابجایی در محدوده ۴/۸٪ کارسرد بر  $\bar{r}$  تأثیری ندارد. میتوان با استفاده از این داده‌ها نتیجه‌گیری کرد کاهش درصد تغییرات طول برای این محصولات می‌تواند باعث افزایش  $\bar{n}$  شده و باید در محدوده‌ای باشد تا پدیده تغییر شکل غیر یکنواخت از بین رود.

### ۳-۳ تأثیر درصد تغییرات طول بر خواص شکل‌پذیری

نمونه‌های سری C با ترکیب نشان داده شده در جدول (۱) در شرایط یکسان تولید شده‌اند. با تغییر درصد تغییرات طول در مرحله نورد پوسته‌ای خواص آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته

Metall. Mater. Trans. A., vol. 33, pp. 25-31, Jun. 2002.

- [5] H. Monajati, D. Asefi, A. Parsapour, and Sh. Abbasi, "Analysis of the Effects of Processing Parameters on Mechanical Properties and Formability of Cold Rolled Low Carbon Steel Sheets using Neural Networks", *Comput. Mater. Sci.*, Vol. 49, pp. 876-881, 2010.
- [6] H. S. Lin, Y. C. Hsu, C. C. Keh, "Inhomogeneous Deformation and Residual Stress in Skin Pass Axisymmetric Drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, pp.128-132, 2008.
- [7] E. Bayraktar, S. Altintas, "Some problems in Steel Sheet Forming Processes", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 83-89, 1998.
- [8] Z. Fan, H. Mingzhi, S. Deke, "The Relationship Between the Strain Hardening Exponent (n) and the Microstructure of Metals", *Materials Science and Engineering A122*, pp. 211-213, 1989.
- [9] R. Mendozaa, M. Alanis, G. Aramburo, F. Serrania, J. A. Juarez, "Evaluation of Low Carbon Al-killed/Cr-Stabilized Steel to be Used in the Automobile Industry", *Materials Science and Engineering A368*, pp. 249-254, 2004.
- [10] P. Antoine, S. Vandeputte, J. B. Vogt, "Empirical Model Predicting the Value of the Strain Hardening Exponent of a Ti-IF Steel grade", *Materials Science and Engineering A 433*, pp.55-63, 2006.
- [11] P. Antoine, S. Vandeputte, J. B. Vogt, "Effect of Microstructure on Strain Hardening Behaviour of a Ti-IF Steel Grade", *ISIJ International Vol, 45, Issue 3*, pp.399-404, 2005.
- [12] M. Qing-Longl, W. Dong-Cheng, L. Hong-Min, L. Hai-Rning, "Effect of Temper Rolling on Tensile Properties of Low-Si Al-killed Sheet Steel", *Journal of Iron and Steel Research International*, pp.64-67, 2009.
- [13] E. J. Hoggan, R. I. Scott, M. R. Barnettband, P. D. Hodgson, "Mechanical Properties of Tension Levelled and Skin Passed Steels", *Journal of Materials Processing Technology Vol, 125-126*, pp. 155-163, 9 September 2002.

#### ۷- پی نوشت

- 1- Work hardening exponent
- 2- Normal anisotropy
- 3- Deep drawing quality (DDQ)
- 4- Skin pass
- 5- Inhomogeneous deformation
- 6- Jeffries method
- 7- Aspect Ratio
- 8- Mean free path
- 9- Antonio

#### ۴- نتیجه گیری

- ۱- نمونه‌های فولاد ساده کربنی پس از آنیل دارای ضریب کارسختی ( $\bar{n}$ ) بالایی هستند. نورد پوسته‌ای به شدت  $\bar{n}$  را کاهش می‌دهد ولی بر  $\bar{\Gamma}$  بی‌تأثیر است.
- ۲- در شرایط یکسان نورد پوسته‌ای مقدار افت  $\bar{n}$  برای نمونه‌ها با شرایط متفاوت تولید، متفاوت است و مقدار کاهش  $\bar{n}$  به شرایط قبل از نورد پوسته‌ای برمی‌گردد. شرایط تولید منجر به مقدار متفاوت ذرات فوق ریز در فولاد شده و این عامل ریزساختار علت تفاوت افت  $\bar{n}$  می‌باشد.
- ۳- کاهش سطح مقطع با نورد سرد منجر به افت  $\bar{n}$  شده و بر روی  $\bar{\Gamma}$  بی‌تأثیر است. تغییرات ریزساختاری حاصل از نورد سرد در بازه ۵-۲٪ کاهش سطح مقطع، به علت ثابت بودن اندازه دانه فقط دانسیته نابجایی بر  $\bar{n}$  تأثیر گذار است.
- ۴- مناسب‌ترین حد اعمال تغییرات طول نورد پوسته‌ای برای فولاد ساده کربنی ۰/۵٪ می‌باشد تا ورقی با بیشترین  $\bar{n}$  تولید شود.

#### ۵- تشکر و قدر دانی

بدینوسیله از کارشناس نورد سرد مجتمع فولاد مبارکه جناب آقای مهندس حامد هوشنگی به دلیل همکاری صادقانه و صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### ۶- مراجع

- [1] R. K. Ray, J. J. Jonas, and R. E. Hook, "Cold Rolling and Annealing Textures in Low Carbon and Extra Low Carbon Steels" *Int. Mater. Rev.*, Vol. 39, no. 4, pp. 129-171, 1994.
- [2] F. J. Humphreys, M. Hatherly, "Recrystallization and Related Annealing Phenomena", Second Edition, Elsevier Ltd, 2004.
- [3] J. P. Ferrer, T. De Cock, C. Capdevila, F. G. Caballero, and C. Garcia de Andres, "Comparison of the Annealing Behaviour Between Cold and Warm Rolled ELC Steels by Thermoelectric Power Measurements", *Acta. Mater*, vol. 55, pp. 2075-2083, Jun. 2007.
- [4] C. E. Rodriguez Torres, F. H. Sanchez, A. Gonzalez, F. Actis, and R. Herrera, "Study of the Kinetics of the Recrystallization of Cold-Rolled Low-Carbon Steel,"