

نقش متغیرهای فرآیند تبلور مجدد در رفتار ناهمسانگردی ورق فولاد نورد شده St52 *

سید عبدالکریم سجادی^(۱)سید مجتبی زبرجد^(۲)

چکیده نورد سرد یکی از مهمترین روش‌های شکلدهی ورق‌های فولادی است. این فرآیند موجب جهت‌دار شدن ریزساختار و در نتیجه خواص مکانیکی ورق می‌شود. جهت دار بودن خواص مکانیکی اصطلاحاً ناهمسانگردی (Anisotropy) نامیده می‌شود که یکی از روش‌های تعیین میزان آن استفاده از پارامتر R می‌باشد. یکی از راه‌های کنترل و بهینه کردن ناهمسانگردی، انجام عملیات حرارتی تابکاری (آنیل) تبلور مجدد می‌باشد. در پژوهش حاضر تأثیر جهت دار شدن ریز ساختار بر خواص کششی ورق St52 نورد شده و نیز، تأثیر متغیرهای آنیل تبلور مجدد بر رفتار ناهمسانگردی آن بررسی شده است. مقادیر R با استفاده از نتایج آزمون کشش روی نمونه‌های مختلف در سه جهت با زوایای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به امتداد نورد، تعیین شد. با استفاده از مقادیر R مقادیر متوسط آنها یعنی R_m برای جهت‌های یاد شده به دست آمد. همچنین، با تغییر متغیرهای دما، زمان و درصد کار سرد، میزان ناهمسانگردی فولاد مذکور اندازه‌گیری گردید. مشخص شد که در زمان ثابت، افزایش دمای تبلور مجدد باعث کاهش ناهمسانگردی فولاد نورد شده می‌گردد و این کاهش با افزایش درصد کار سرد تشدید می‌شود. همچنین مشخص گردید که در دمای ثابت، افزایش زمان تبلور مجدد تا قبل از رسیدن به مرحله رشد دانه، سبب کاهش R_m می‌شود ولی پس از آن مرحله افزایش R_m را به دنبال دارد.

واژه‌های کلیدی نورد سرد، ناهمسانگردی، مقدار R ، تبلور مجدد، ورق فولادی St52.

Role of Recrystallization Parameters on the Anisotropy

Behavior of Rolled St52 Sheet Steel

S. A. Sajjadi

S. M. Zabarjad

Abstract Cold rolling which is one of the most important technique in sheet steel forming causes stretching of microstructure and thus directionality of mechanical properties. This kind of directionality of mechanical properties is known as anisotropy which is, frequently, determined by R-value. One of the ways by which the phenomenon is controlled and optimized is recrystallization heat treatment. In this research the effect of microstructure directionality on the tensile properties of rolled sheet steel and also the influence of heat treatment parameters on the anisotropy behavior of St52 steel were investigated. Tensile tests on the specimens at different directions, 0, 45 and 90 degree respect to the rolling direction were performed to determine R-value. Using the data average R-value, R_m , was obtained. The amount of anisotropy of the steel was measured by changing parameters such as time, temperature and cold work. It was determined that at constant time, increasing of recrystallization temperature causes reducing of anisotropy and this reduction would be promoted with increasing cold work. Also, it was demonstrated that at constant temperature, increasing of recrystallization time before grain growth causes reduction of R_m and after grain growth causes increasing of R_m .

Key Words Cold Rolling, Anisotropy, R-value, Recrystallization, St52 Sheet Steel.

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۳/۴/۳ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۵/۳/۶ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) و (۲) استادیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه متالورژی و مواد

مقدمه

ماده در جهت ضخامت بیشتر از استحکام تسلیم آن در جهت پهنای ورق است. برای ورق‌های نورد گرم شده مقدار R_m تقریباً برابر یک است چرا که بافت به وجود آمده در جهت‌های مختلف گسترش یافته است. مقدار R_m به عواملی مانند ترکیب شیمیایی آلیاژ، مدول یانگ، اندازه دانه اولیه، مقدار کرنش انجام شده و زاویه آن نسبت به امتداد نورد بستگی دارد [2]. نوع دیگری از ناهمسانگردی نیز در ورق‌های نورد شده مشاهده می‌شود که به نام ناهمسانگردی صفحه‌ای (Planar Anisotropy) (ΔR) معروف است. برای یک ورق کاملاً همسان $\Delta R=0$ و $R_m=1$ می‌باشند. هدف این پژوهش تعیین تأثیر متغیرهای آیل تبلور مجدد بر مقدار R_m بوده و به این دلیل به ناهمسانگردی صفحه‌ای و یا تأثیر آنها بر قابلیت شکل‌پذیری فولادها پرداخته نشده است.

در برخی موارد جهت‌دار شدن خواص مکانیکی نامطلوب است که بایستی به طریقی کنترل گردد. به عنوان مثال، می‌توان به تأثیر ناهمسانگردی در کشش عمیق و فرآیند خم‌کاری اشاره کرد. به طوری که در فرآیند کشش عمیق علیرغم اعمال نیروهای متقارن لبه‌های فنجان ایجاد شده ناصاف می‌گردند. این نوع تغییر شکل ناهمگن ناشی از ناهمسانگردی صفحه‌ای ورق می‌باشد. نشان داده شده است هنگامی که $\Delta R < 0$ باشد گوشواره‌های ایجاد شده در زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت نورد تشکیل می‌شوند. هنگامی که $\Delta R > 0$ باشد گوشواره‌ها در زوایای ۰ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد ایجاد می‌شوند. تأثیر مثبت ناهمسانگردی عمودی وقتی ظاهر می‌شود که با ازدیاد مقدار R حد نسبت کشش (Limiting Drawing Ratio) افزایش یابد. این اثر مثبت می‌تواند به کمک منحنی مکان هندسی سیلان برای مقادیر مختلف R طبق روش هیل (Hill) توصیف شود [1,3]. از طرفی در فرآیند خم کاری با افزایش پارامتر R_m میزان برگشت فنری

فولاد St52 از جمله فولادهای مورد استفاده در صنعت خودروسازی است که بیشتر به صورت ورق از آن استفاده می‌شود. این فولاد، یک فولاد ساده کربنی است که معمولاً به طریقه نورد شکل‌دهی می‌شود. فرآیند نورد متداولترین و پر رونق‌ترین روش تولید فرآورده‌های فلزی به ویژه فولادهاست؛ به گونه‌ای که بیش از ۸۰٪ از فرآورده‌های فلزی با این روش تولید می‌شود. نورد سرد موجب جهت‌دار شدن ریزساختار در امتداد تغییر شکل می‌شود. دانه‌های فلز در جهت نورد کشیده می‌شوند و برخی فازهای رسوبی نیز در آن جهت به صورت کشیده در می‌آیند. افزون بر این، تغییر شکل زیاد موجب همسان شدن آرایش کریستالوگرافی دانه‌های مجاور و تشکیل بافت (Texture) می‌گردد [1,2]. جهت‌دار شدن ریزساختار، موجب جهت‌دار شدن خواص مکانیکی یا ناهمسانگردی می‌شود. مقدار R (R-value) که نسبت کرنش (Strain Ratio) یا ناهمسانگردی پلاستیکی (Plastic Anisotropy) نیز خوانده می‌شود، یکی از پارامترهایی است که با آن می‌توان میزان ناهمسانگردی فلز تغییر شکل داده را در جهت‌های مختلف تعیین نمود. مقدار متوسط R در جهت‌های مختلف، R_m ، که ناهمسانگردی عمودی (Normal Anisotropy) نامیده می‌شود، برای ماده کاملاً همسان مساوی یک است. مقدار یک نشان می‌دهد که کرنش در جهت ضخامت و کرنش در جهت پهنای ورق با یکدیگر برابرند. از طرف دیگر استحکام، تسلیم ماده در جهت‌های ضخامت و پهنای ورق یکسان هستند. به طور مشابه می‌توان گفت مقدار R_m بزرگتر از یک نشان می‌دهد که کرنش در جهت ضخامت و کرنش در جهت پهنای ورق با یکدیگر برابر نیستند و ماده همسانگرد نمی‌باشد. به دیگر عبارت، استحکام تسلیم

نگهداری در دمای بالا (در محدوده آنیل تبلور مجدد) موجب رشد دانه می‌گردد که می‌تواند با تغییر بافت همراه باشد. انرژی محرکه این مرحله، کاهش مرزدانه یا انرژی سطحی است [7].

بنابراین، با آنیل تبلور مجدد افزون بر کنترل پدیده ناهمسانگردی، می‌توان تغییر شکل پذیری آلیاژ را که در اثر کار سرد کاهش پیدا کرده است، به حالت پیش از تغییر فرم برگرداند. عواملی مانند میزان کرنش در حین کار سرد، دما و زمان آنیل تبلور مجدد، روی میزان بازگشت ریزساختار و ناهمسانگردی و خواص مکانیکی به حالت اولیه تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق تأثیر این پارامترها روی مقدار R و ناهمسانگردی در فولاد نورد شده St52 مورد بررسی قرار گرفته است.

روش تحقیق

ورق‌های فولاد St52 پس از آنالیز شیمیایی با روش کوانتومتری، تحت عملیات نورد سرد با درصد‌های مختلف کرنش قرار گرفتند. سپس، نمونه‌های استاندارد کششی از ورق‌های نورد شده در سه جهت طولی، عرضی و 45° نسبت به جهت نورد تهیه گردید. با انجام آزمایش کشش روی این نمونه‌ها، برخی مشخصات فولاد مانند: مقادیر توان کرنش سختی (n)، ضریب استحکام کششی (K)، استحکام تسلیم و استحکام نهائی در جهت‌های مختلف به دست آمد. برای هر یک از شرایط یاد شده تعداد حداقل سه نمونه مورد آزمایش کشش قرار گرفت تا تکرارپذیری و میزان انحراف از معیار استاندارد آنها مشخص شود. خاطر نشان می‌سازد که توان n که میزان تمایل به کرنش سختی را نشان می‌دهد، بر اساس رابطه: $\log \sigma = \log K + n \log \epsilon$ و رسم منحنی $\log \sigma - \log \epsilon$ محاسبه شد. همچنین، مقادیر R در جهت‌های مختلف، پس از رسیدن به کرنش طولی 15 درصد، تعیین گردید. بررسی میکروسکوپی پدیده ناهمسانگردی روی نمونه‌های نورد شده نیز انجام شد.

(Spring Back) ورق‌های فلزی افزایش می‌یابد [4] که بحث در این زمینه از حوصله تحقیق حاضر خارج است.

یکی از راه‌های کاهش مقدار R_m و کنترل پدیده ناهمسانگردی انجام عملیات حرارتی آنیل تبلور مجدد می‌باشد. عملیات حرارتی تبلور مجدد یا آنیل فرآیند (Process Annealing) در زیر دمای A_1 و به منظور بازگرداندن میزان قابلیت تغییر شکل به قطعات کار سرد شده اعمال می‌شود. چون این سیکل‌ها در محدوده دو فازی فریت و سمیتیت در دماهای $650^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$ انجام می‌گیرند، استحاله فازی اتفاق نمی‌افتد [5]. به طور معمول، ریزساختار فولادهای کم کربن و کربن متوسط قبل از کار سرد، به صورت کروی شده و یا به صورت فریتی با مقدار کم پرلایت می‌باشد. هر دوی این ریزساختارها قابلیت تغییر شکل بالایی دارند. فریت در این ریزساختارها هم محور و بدون کرنش است. انجام کار سرد موجب تغییر شکل یا کارسخت شدن فریت و کشیده شدن دانه‌های فریتی (Pancake) در جهت تغییر شکل و ایجاد عیوب شبکه‌ای مانند جنگل‌های نابجایی، حفره‌ها و جاهای خالی اتمی در دانه‌ها می‌شود [6]. در اثر گرم کردن، انرژی کرنشی زیاد فریت تغییر شکل داده شده، در ابتدا موجب بازیابی (Recovery) (مکانیزی می‌که به وسیله آن مقداری از عیوب کریستالی حذف یا به صورتی دیگر در می‌آیند) می‌گردد. سپس تبلور مجدد (Recrystallization) (فرآیندی که طی آن دانه‌های جدید هم‌محور بدون کرنش جوانه‌زنی و رشد می‌کنند، به طوری که این دانه‌ها کاملاً جایگزین دانه‌های فریتی تغییر شکل داده شده می‌شوند) اتفاق می‌افتد. بنابراین، نتیجه نهایی فرآیند تبلور مجدد، بازیابی میزان قابلیت تغییر شکل و ریزساختار هم‌محور شده فولاد، به طوری که قابلیت مجدد کار سرد شدن را به دست آورد، می‌باشد [7].

مرحله سوم عملیات حرارتی آنیل تبلور مجدد، رشد دانه (Grain Growth) می‌باشد. زمان طولانی

بحث و نتایج

ترکیب شیمیایی فولاد St52 در جدول (۱) آورده شده است. انجام کار سرد موجب تغییر ریز ساختار فولاد می‌گردد. کشیده شدن دانه‌ها در جهت نورد، کشیده شدن فازهای رسوبی و ساختارهای فریت و پرلیت و تشکیل باندینگ (Banding)، همسان شدن آرایش کریستالوگرافی دانه‌های مجاور و تشکیل بافت (Texture) و جهت‌دار شدن خواص مکانیکی (ناهمسانگردی) از جمله اثرات اعمال کار سرد می‌باشند. شکل‌های (۱-الف تا د) ریزساختار نمونه‌های نورد شده با درصد‌های مختلف کار سرد (۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد) را نشان می‌دهد. در همه نمونه‌ها ساختار کشیده‌ای از نوارهای فریتی و پرلیتی مشاهده می‌شود. دیده می‌شود که با افزایش درصد کار سرد میزان کشیدگی این لایه‌ها محسوس‌تر می‌شود که خود می‌تواند موجب غیریکنواختی بیشتر ساختار و افزایش میزان ناهمسانگردی گردد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد St52 برحسب درصد وزنی.

شماره استاندارد	مشخصه	C	Si	Mn	P	S
1.5421	St52	۰/۲۱	۰/۴۵	۱/۴۰	۰/۰۶	۰/۰۳

نتایج آزمون کشش بر روی نمونه‌های تهیه شده در زوایای مختلف (۰، ۴۵ و ۹۰ درجه) نسبت به جهت نورد، در شکل (۲) آورده شده‌اند. ملاحظه می‌شود بیشترین مقادیر استحکام تسلیم و نهائی مربوط به نمونه‌هایی است که عمود بر امتداد نورد می‌باشند. البته همان‌طور که مشاهده می‌شود حساسیت استحکام تسلیم به جهت نورد بیشتر از حساسیت

به منظور مشخص نمودن میزان تأثیر دما و زمان تبلور مجدد بر ناهمسانگردی نمونه‌هایی که دچار مقادیر مختلف کرنش در جهت‌های مختلف شده‌اند، عملیات حرارتی تبلور مجدد در شرایط مختلف دمائی و زمانی روی نمونه‌های نورد شده انجام شد. سپس این نمونه‌ها تحت آزمایش کشش و بررسی ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری قرار گرفتند. همچنین برای تعیین تأثیر اندازه دانه روی میزان ناهمسانگردی با میزان کار سرد ثابت، با اعمال عملیات حرارتی رشد دانه پس از تبلور مجدد در شرایط مختلف دمایی (۵۰۰، ۵۸۰ و ۶۷۵ درجه سانتیگراد) و زمانی (۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۲۰ دقیقه) ساختارهایی با دانه‌بندی متفاوت به دست آمد که با انجام آزمون کشش در جهت‌های مختلف، مقادیر R برای آنها محاسبه گردید.

میزان ناهمسانگردی یا مقدار R با استفاده از روش اندازه‌گیری زیر تعیین گردید [1].

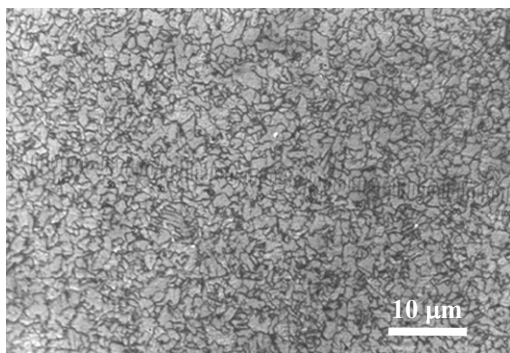
$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(t/t_0)} \quad (1)$$

که در آن، w_0 ، d_0 و t_0 ابعاد اولیه نمونه و w ، d و t ابعاد نهائی نمونه کششی می‌باشند. اما از آنجا که اندازه‌گیری دقیق ضخامت به ویژه در ورق‌های نازک امکان‌پذیر نمی‌باشد، با توجه به قانون ثابت بودن حجم در هنگام تغییر شکل پلاستیک می‌توان مقدار R را از رابطه زیر نیز به دست آورد [1]:

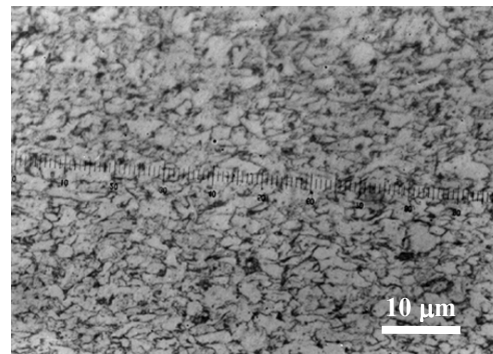
$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = -\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_w + \varepsilon_l} = -\frac{\ln(w/w_0)}{\ln(w/w_0) + \ln(l/l_0)} \quad (2)$$

برای تعیین R متوسط یا R_m نیز از رابطه زیر استفاده شد [1]:

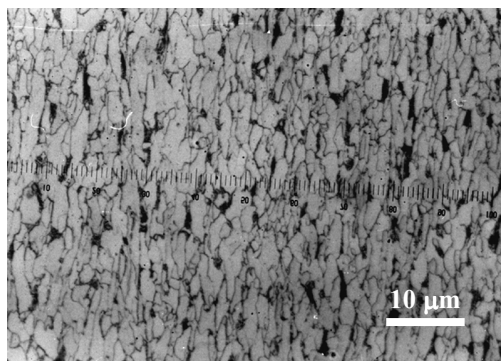
$$R_m = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (3)$$



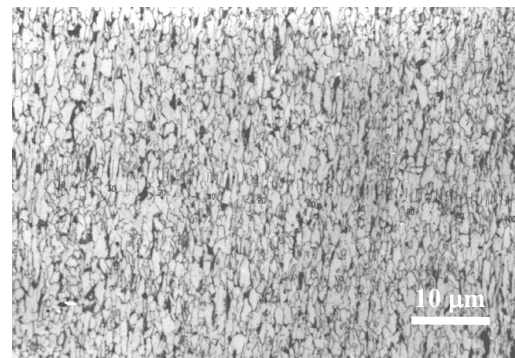
(ب)



(الف)



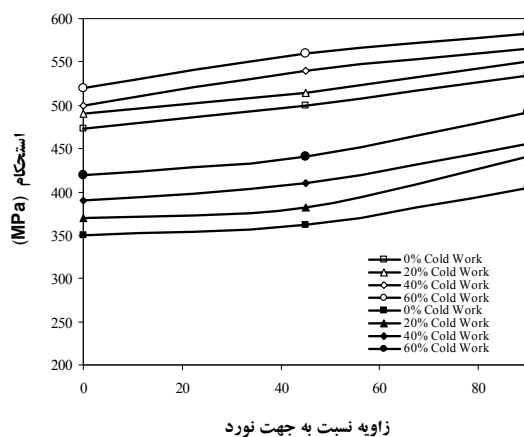
(د)



(ج)

شکل ۱ ریزساختار فولاد St52 نورد شده با: الف) ۰٪ کار سرد، ب) ۲۰٪ کار سرد، ج) ۴۰٪ کار سرد و د) ۶۰٪ کار سرد

تسلیم در هر دو جهت (طولی و عرضی) یکسان می باشد [9].



شکل ۲ تغییرات خواص کششی بر حسب زاویه نسبت به جهت نورد (علامت‌های توخالی استحکام نهایی و علامت‌های توپر استحکام تسلیم را نمایش می‌دهند)

استحکام نهایی می‌باشد. این نکته نشان می‌دهد که اثر بافت بر پلاستیسیته و تعیین مکانیزم تسلیم موثرتر از اثر آن بر شرایط کارسختی و ادامه تغییر فرم پلاستیک می‌باشد. افزایش بیشتر استحکام را می‌توان به میزان ناهمسانگردی ورق‌ها در جهت عمود بر امتداد نورد نسبت داد. اگر چه بدون شک افزایش ناهمسانگردی عمدتاً به بافت و مورفولوژی دانه‌های فولاد مرتبط می‌گردد [2,8]، بعضی از محققان بر این باورند که اختلاف استحکام تسلیم در امتداد نورد و امتداد عمود بر آن افزون بر وابستگی به درصد کار سرد اعمال شده، تابعی از ضخامت ورق نیز می‌باشد؛ به طوری که در ضخامت‌های بالاتر از ۱۰۰ میلیمتر عملاً تأثیر ناهمسانگردی صفحه‌ای بسیار ناچیز می‌باشد و استحکام

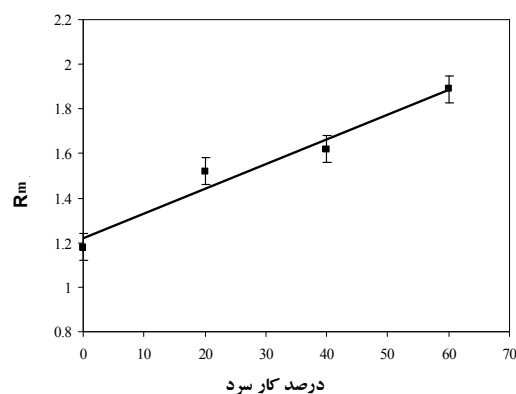
جدول ۲ تغییرات توان کارسختی (n) و ضریب استحکام (K) نسبت به جهت نورد

درصد کارسرد	زاویه جهت طولی نمونه نسبت به امتداد نورد											
	۹۰				۴۵				۰			
	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۰	۲۰	۴۰	۶۰
n	۰/۲۹	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۴	۰/۳	۰/۲۹	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۳۰	۰/۲۹
K (MPa)	۸۲۰	۸۲۵	۸۳۵	۸۵۸	۸۰۵	۸۲۰	۸۴۰	۸۵۵	۸۰۰	۸۱۰	۸۳۰	۸۴۵

مقدار متوسط R برای ورق نورد شده با کرنش‌های مختلف در شکل (۳) آورده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش درصد کارسرد، مقدار R_m که شاخص میزان ناهمسانگردی عمودی می‌باشد، افزایش یافته است که دلیل آن را به تغییرات شدیدتر مورفولوژی دانه‌های فریتی و پرلیتی بر اثر نورد می‌توان نسبت داد. مقایسه نتایج شکل (۳) و تصاویر میکروسکوپی ارائه شده در شکل (۱) دلیل واضحی بر این مدعا می‌باشد.

برای بازگشت خواص و کنترل و بهینه کردن اثر ناهمسانگردی، فرآیند تبلور مجدد توصیه شده است. سه عامل دما، زمان تبلور مجدد و درصد کارسرد نمونه‌های نورد شده، روی میزان تأثیر فرآیند تبلور مجدد در بازیابی خواص نمونه‌ها موثر می‌باشند. برای مشخص کردن تأثیر پارامترهای عملیات حرارتی تبلور مجدد روی کاهش یا حذف ناهمسانگردی، این عملیات در شرایط مختلف از نظر دما و زمان روی نمونه‌های نورد شده با درصدهای مختلف کارسرد انجام گرفت. شکل (۴) تغییرات مقدار R_m برحسب دمای تبلور مجدد در زمان ثابت ۴۰ دقیقه را به صورت تابعی از درصد کارسرد نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش دمای تبلور مجدد، در یک زمان ثابت، مقدار R_m کاهش می‌یابد و این کاهش با افزایش درصد کارسرد محسوس‌تر می‌باشد. گزارش شده است که نیروی محرکه لازم برای جوانه‌زنی دانه‌های جدید با افزایش

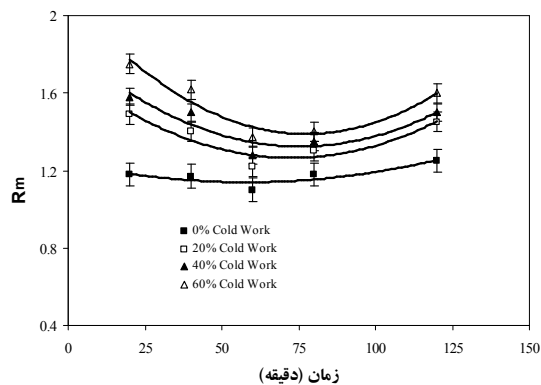
نمونه‌های کششی تهیه شده در جهت عمود بر امتداد نورد، حداقل مقدار درصد افزایش طول و کمترین مقدار توان کارسختی n را دارند. نتایج ارائه شده در جدول (۲) نشان می‌دهد که استحکام با توان کار سختی رابطه عکس دارد. همان‌گونه که مشخص است افزایش زاویه نسبت به جهت نورد باعث کاهش n و افزایش K می‌شود که دلیل آن به افزایش استحکام ناشی از ناهمسانگردی مربوط می‌شود.



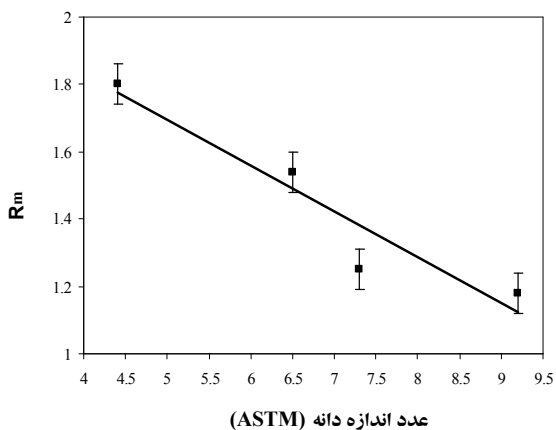
شکل ۳ نمودار تغییرات پارامتر ناهمسانگردی (R_m) بر حسب درصد کارسرد

فرآیند نورد موجب ایجاد ناهمسانگردی در جهت‌های مختلف می‌شود بنابراین، طبیعی است که برای قطعه نورد شده نیاز به محاسبه مقدار متوسط R_m می‌باشد؛ چرا که مقدار R وابسته به زاویه محور طولی نمونه کششی و جهت نورد است. نتایج محاسبه

یعنی گرم کردن فولاد تا بالای دمای A_3 انجام شود.



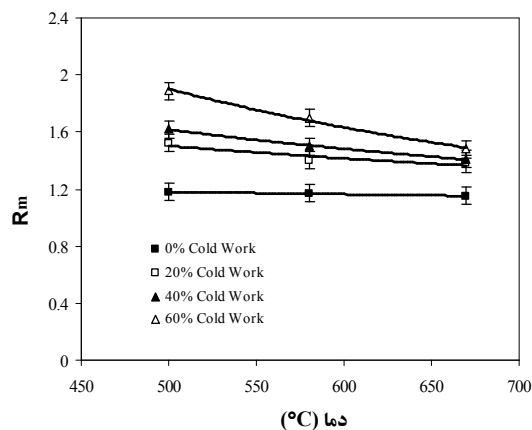
شکل ۵ پارامتر ناهمسانگردی R_m بر حسب زمان در دمای ثابت $580^\circ C$ به صورت تابعی از درصد کارسرد



شکل ۶ نمایش وابستگی پارامتر ناهمسانگردی به اندازه دانه در درصد کار سرد ثابت

در این تحقیق با اعمال عملیات حرارتی رشد دانه، پس از تبلور مجدد، در شرایط مختلف دمایی (۵۰۰، ۵۸۰ و $675^\circ C$ درجه سانتیگراد) و زمانی (۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۲۰ دقیقه) ساختارهایی با دانه‌بندی متفاوت به دست آمد که با انجام آزمایش کشش در جهت‌های مختلف، مقادیر R_m آنها محاسبه گردید. نتایج به دست آمده که در شکل (۶) ارائه شده است، نشان می‌دهد که اندازه دانه نیز بر مقدار R_m و در نتیجه بر میزان ناهمسانگردی تأثیر می‌گذارد. ملاحظه می‌گردد ریز

ناهمسانگردی بیشتر می‌شود و همین امر می‌تواند دلیلی بر افزایش شیب تغییرات R_m بر حسب دما با افزایش کارسرد باشد [10,11].



شکل ۴ نمودار تغییرات پارامتر ناهمسانگردی بر حسب دما در زمان ثابت ۴۰ دقیقه به صورت تابعی از درصد کارسرد

شکل (۵) تغییرات مقدار R_m بر حسب زمان تبلور مجدد در دمای ثابت $580^\circ C$ را به صورت تابعی از درصد کارسرد نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش زمان تبلور مجدد در یک دمای ثابت، ابتدا مقدار R_m کاهش و سپس افزایش می‌یابد. دلیل کاهش مقدار R_m ، جوانه‌زنی دانه‌های جدید بدون تنش و هم‌محور با گذشت زمان و کامل شدن وقوع پدیده تبلور مجدد است. این روند تا مرحله رشد دانه ادامه می‌یابد ولی پس از آن، رشد غیر همگن دانه‌ها و درشت شدن آنها باعث افزایش میزان ناهمسانگردی می‌شود. بنابراین پارامتر ناهمسانگردی R_m علاوه بر اینکه تابعی از درصد کارسرد می‌باشد می‌تواند به اندازه دانه نیز وابسته باشد. نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند که آنیل تبلور مجدد حتی تا دمای $675^\circ C$ و مدت‌های طولانی قادر به حذف کامل ناهمسانگردی نیست، اگرچه می‌تواند قابلیت شکل‌پذیری فولاد را برگرداند. برای حذف کامل ناهمسانگردی لازم است آنیل کامل

ناهمسانگردی عمودی نمونه‌هایی که با درصد کارسرد بیشتری نورد شده بودند، چشمگیرتر می‌باشد به طوری که در مدت زمان ۴۰ دقیقه با افزایش دما از ۵۰۰ درجه سانتیگراد به ۶۸۰ درجه، کاهش ناهمسانگردی در نمونه‌ی ۶۰ درصد کار سرد شده حدود ۲۱ درصد است درحالی که در نمونه‌ی بدون کار سرد حدود ۲ درصد می‌باشد.

- تأثیر زمان تبلور مجدد در دمای ثابت روی کاهش ناهمسانگردی نمونه‌هایی که با درصد کارسرد بیشتری نورد شده بودند، بیشتر می‌باشد؛ به طوری که در دمای ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش زمان از ۰ تا ۶۰ دقیقه، کاهش ناهمسانگردی در نمونه‌ی ۶۰ درصد کار سرد شده حدود ۲۲ درصد است در حالی که در نمونه بدون کار سرد حدود ۷ درصد می‌باشد.

- برای همه نمونه‌های آنیل شده تحت شرایط مختلف، افزایش اندازه دانه با افزایش مقدار R_m ، همراه است به طوری که افزایش اندازه دانه از مقدار ۹/۲ به ۴/۴ (بر مبنای ASTM No.) موجب افزایش ناهمسانگردی به میزان ۶۲ درصد می‌شود.

شدن دانه (افزایش عدد اندازه دانه) موجب یکنواختی بیشتر خواص مکانیکی و کاهش مقدار R_m می‌شود. بر عکس، افزایش اندازه دانه از مقدار ۹/۲ به ۴/۴ (بر مبنای ASTM No.) موجب افزایش ناهمسانگردی به میزان ۶۲ درصد می‌شود.

نتیجه گیری

در این پژوهش اثر متغیرهای زمان، دما و مقدار کارسرد در فرآیند تبلور مجدد بر رفتار ناهمسانگردی فولاد نورد شده St52 مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با استفاده از نتایج آزمون کشش بر روی نمونه‌های مختلف که در سه جهت با زوایای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به امتداد نوردتهیه شده بودند، مقادیر R تعیین و وابستگی آن به پارامترهای مختلف بررسی شد. نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

- حساسیت استحکام تسلیم در صفحه ورق نسبت به جهت نورد بیشتر از حساسیت استحکام نهایی می‌باشد.
- تأثیر دمای تبلور مجدد در زمان ثابت روی کاهش

مراجع

- Hosford, W. F, Caddell, R. M, "Metal Forming- Mechanics and Metallurgy" Prentice Hall, (1983).
- Ray, R. K, Jonas, J. J, and Hook, R. E. "Cold rolling and Annealing Textures in Low-Carbon and Extra Low-Carbon Steels", International Materials Reviews, vol. 39, No. 4, pp. 129-172, (1994).
- Mishra, S. and Darmann, C. "Role and Control of Texture in Deep-Drawing Steels", International Metals Reviews, vol. 27, No. 6, pp. 307-320 (1982).
- گنجی، محمدرضا، حبیبی پارسا، محمد و موسوی مشهدی، محمود، "پیش بینی برگشت فتری ورق‌های فلزی غیر ایزوتروپیک با دو انحنای اصلی"، مجموعه مقالات، دومین کنگره انجمن مهندسين متالورژی ایران، دانشگاه صنعتی شریف، ۴۳۶-۴۲۷، مهر (۱۳۷۷).
- Paul, M., "Unterweiser Heat Treater's Guide", American, Society for Metals, (1995).
- Avner, S. H., "Introduction to Physical Metallurgy", McGraw-Hill Book, New York, (1988).
- Callister, W. D., "Fundamentals of Materials Science and Engineering", John Wiley & Sons, New York, (1985).
- اکبرزاده، عباس، "بررسی بافت و ان ایزوتروپی استحکام تسلیم در ورق‌های نورد گرم شده یک فولاد کم آلیاژ نایوبوم دار"، مجموعه مقالات، دومین کنگره انجمن مهندسين متالورژی ایران، دانشگاه صنعتی شریف، ۳۰۷-۳۱۹، مهر (۱۳۷۷).

9. Hutchinson, W.B. Ushioda, K., and Runnsjö, G. "Anisotropy of Tensile Behavior in Duplex Stainless Steel Sheet", *Materials Science & Technology*, No. 1, pp. 728-731, (1985).
10. Rohrer Gregory S., "Influence of Interface Anisotropy on Grain Growth and Coarsening", *Annual Review of Materials Research*, Vol. 35, pp. 99-126 (2005).
11. Panigrahi, B. K., "Processing of Low-Carbon Steel Plate and Hot Strip – an Overview", *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 24, No. 4, pp. 361-371, (2001).