

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Fabrication of nanostructured IF steel via accumulative roll bonding process

Abstract

In this study, fabrication of the nanostructured interstitial free (IF) steel was investigated. Four-layer accumulative roll bonding (ARB) process at room temperature was used. Microstructural observations was performed by scanning transmission electron microscopy (STEM). In order to evaluation of mechanical properties, tensile and hardness tests was done. The results showed that the microstructure of the final sample consisted of equiaxed grains with an average grain size 100 nm. To date, this grain size has not been achieved for the IF steel. The four-layer accumulative roll bonding (ARB) process at room temperature can be prevented extensive recovery in the IF steel and a lot of energy stored up in the material. This leads to occurrence of continuous recrystallization and nanostructure formation in the steel. The findings revealed that with increasing the number of ARB cycles, the tensile strength of the ARB-processed IF steel was improved, so that the tensile strength of the final sample was 4.5 times (980 MPa) higher than the same value was obtained for annealed IF steel. Elongation was decreased at first cycle (from 50.9% to 8.1%) and then was increased to 12%. In addition, the ARB-processed IF steel was exhibited a higher hardness than the annealed IF steel so that the hardness values of the ARB-processed steel was 2.6 times higher than that of the annealed IF steel.

Keywords: Interstitial free steel, Nanostructured materials, Accumulative roll bonding

ساخت فولاد IF نانوساختار توسط فرایند نورد تجمعی

چکیده

در این پژوهش به بررسی ساخت فولاد عاری از عناصر بین‌نشین (IF) با ساختار نانو پرداخته شده است. بدین منظور از فرایند نورد تجمعی (ARB) چهارلایه در دمای محیط استفاده گردید. ارزیابی ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی (STEM) انجام شد. به منظور ارزیابی خواص مکانیکی از آزمون‌های کشش و سختی‌سنجی استفاده گردید. نتایج نشان داد که ریزساختار نمونه‌ی نهایی شامل دانه‌های اصلی و هم‌محور با میانگین اندازه‌ی دانه‌ی ۱۰۰ nm است. چنین اندازه دانه‌ای تابحال برای فولاد IF به دست نیامده بود. نورد تجمعی چهار لایه در دمای محیط می‌تواند مانع از وقوع بازیابی گسترده در فولاد IF (که بسیار مستعد به بازیابی است) شود و انرژی زیادی را در ماده ذخیره کند تا مکانیزم تبلور مجدد پیوسته رخ دهد و منجر به نانوساختار شدن این فولاد گردد. با افزایش تعداد سیکل، مقدار استحکام کششی به طور پی‌درپی افزایش یافت به طوری که پس از سیکل نهایی، استحکام کششی حدود ۴/۵ برابر (۹۸۰ MPa) مقدار اولیه بود. پس از سیکل اول مقدار ازدیاد طول از ۵۰/۹٪ برای نمونه‌ی اولیه به ۸/۱٪ کاهش یافت در حالی که اعمال سیکل‌های بیش‌تر موجب افزایش مقدار ازدیاد طول به ۱۲٪ گردید. همچنین پس از سیکل اول، افزایش شدیدی در مقدار سختی مشاهده شد که تقریباً ۲/۶ برابر سختی اولیه بود. مقدار سختی در دو سیکل اول به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت و سپس اثر تعداد سیکل روی مقدار سختی کم و کم‌تر شد به طوری که در سیکل‌های بالا، مقدار سختی به حالت اشباع رسید.

واژه‌های کلیدی: فولاد IF، مواد نانوساختار، نورد تجمعی

مقدمه

امروزه مواد نانوساختار به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان توجه بسیار زیادی را به خود جلب کرده‌اند. مواد نانوساختار دارای کسر حجمی بالایی از مرزدانه‌ها می‌باشند که همین امر منجر به تغییر چشمگیر خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آن‌ها نسبت به مواد پلی کریستال درشت‌دانه می‌شود. مواد نانوساختار در مقایسه با مواد پلی کریستال معمولی دارای استحکام و سختی بالا، چقرمگی زیاد، نفوذپذیری بالا، گرمای ویژه زیاد، ضریب انبساط حرارتی بالا و خواص مغناطیسی نرم عالی می‌باشند (گلپتر، ۲۰۰۰؛ ولیف، اسلامگالیف، الکساندرف، ۲۰۰۰؛ ولیف و لانگدن، ۲۰۰۶). تاکنون روش‌های مختلفی برای ساخت این مواد ابداع شده است. یکی از مهم‌ترین روش‌ها به منظور ساخت مواد نانوساختار، تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد. تغییر شکل پلاستیک شدید به فرایندهایی گفته می‌شود که با اعمال کرنش پلاستیک شدید به ماده، منجر به ساخت مواد نانوساختار/فوق ریزدانه می‌گردد. ویژگی برجسته‌ی فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، ثابت ماندن ابعاد نمونه حین فرایند است که در نتیجه‌ی آن اعمال کرنش‌های بسیار زیاد بر ماده امکان پذیر می‌شود. تاکنون فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید عموماً روی فلزات و آلیاژهای غیر آهنی اعمال شده است و تعداد مطالعات تغییر شکل پلاستیک شدید روی فلزات آهنی، محدود می‌باشد (ولیف؛ ولیف و لانگدن). در میان روش‌های مختلف تغییر شکل پلاستیک شدید، فرایند نورد تجمعی توانایی بالایی برای تولید پیوسته‌ی مواد دارد. این روش تنها فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید است که در آن از تغییر شکل توسط نورد به تنهایی استفاده می‌شود و نورد مفیدترین فرایند فلزکاری برای تولید پیوسته‌ی صفحات، ورق‌ها و شمش‌ها می‌باشد (سایتو، اتسونومیا، سوچی، ساکایی، ۱۹۹۹؛ سوچی، سایتو، اتسونومیا، تانیگاوا، ۱۹۹۹؛ ولیف و همکاران، ۲۰۰۰).

فولادهای عاری از عناصر بین‌نشین (IF) فولادهایی هستند که دارای مقدار کربن و نیتروژن بسیار کمی می‌باشند. فولادهای IF در شرایط درشت‌دانه دارای انعطاف‌پذیری بالایی هستند اما استحکام تسلیم آن‌ها به علت کاهش یافتن اثر استحکام‌دهی محلول جامد و اثر اندازه دانه، پایین است. تاکنون تلاش‌های بسیاری به منظور دستیابی به ساختار نانو در فولاد IF انجام شده است اما تا به حال هیچ یک از پژوهشگران موفق نشده‌اند تا ساختار نانو را در فولاد IF به وجود آورند (سوچی و همکاران، ۱۹۹۹؛ سوچی، یویچی، مینامینو، ۲۰۰۲؛ کرایکز و لنارد، ۲۰۰۴؛ کاستا، ریس، کزنس، آندرا، ۲۰۰۵؛ کامیکاوا، ساکایی، سوچی، ۲۰۰۷؛ تعمیمی، کتاچی، پروین، ۲۰۰۹؛ سارای، پورسک، کارامن، نیندورف، مایر ۲۰۱۱).

در سال ۱۹۹۹ برای اولین بار، سوچی و همکارانش روی فولاد IF فرایند نورد تجمعی در دمای بالا (۷۷۳ K) را انجام دادند. این محققان توانستند اندازه دانه‌ی فولاد IF را تا حدود ۴۲۰ nm کاهش دهند. بررسی این محققان روی مقطع جهت نورد-جهت عرضی (RD-TD) ورق‌ها متمرکز بود. بار دیگر سوچی و همکارانش در سال ۲۰۰۲ روی فولاد IF فرایند نورد تجمعی در دمای ۷۷۳ K را انجام دادند. اما این بار این محققان روی مقطع جهت نورد-عمود بر جهت نورد (RD-ND) ورق‌ها بررسی خود را انجام دادند و موفق شدند اندازه دانه‌ی فولاد IF را در عرض و طول به ترتیب تا حدود ۳۵۰ nm کاهش دهند. تعمیمی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ روی فولاد IF فرایند نورد تجمعی را در دمای ۸۲۳ K انجام دادند. این پژوهشگران توانستند اندازه دانه‌ی فولاد IF را تا حدود ۳۰۰ nm کاهش دهند. بررسی این محققان روی هر دو مقطع RD-TD و RD-ND ورق‌ها انجام گرفت. در نهایت در سال ۲۰۱۱، سارای و همکارانش فرایند فشار تحت کانال زاویه‌ای با مقطع یکسان را روی فولاد IF اعمال نمودند که نهایتاً به اندازه دانه‌ی ۳۰۰ nm دست پیدا کردند.

همان طور که بیان گردید، تغییر شکل پلاستیک شدید فولادهای IF تا به حال توسط دو روش فشار تحت کانال زاویه‌ای با مقطع یکسان و نورد تجمعی به منظور ساخت فولاد IF نانوساختار انجام شده است. اما حداقل اندازه دانه‌ای که محققان مختلف با اعمال روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید روی فولاد IF به دست آورده‌اند در حدود ۳۰۰ nm بوده است و هیچ گونه توفیقی در دستیابی به ساختار نانو در این فولاد وجود نداشته است. سوال بسیار مهمی که می‌توان مطرح کرد این است که چرا اندازه دانه‌ی فولاد IF را نمی‌توان به

کمتر از ۳۰۰ nm رساند؟ با توجه به مطالعات متعدد محققان حاضر در این مورد، مشخص شد که مقدار انرژی نقص چیدن نقش بسیار مهمی روی اندازه دانه‌ی نهایی موادی که تحت فرایند نورد تجمعی قرار می‌گیرند دارد (جماعتی، طرقي‌نژاد، ادریس، ۲۰۱۳؛ جماعتی و طرقي‌نژاد، ۲۰۱۴؛ جماعتی و طرقي‌نژاد، ۲۰۱۴). از آن جایی که مقدار انرژی نقص چیدن فولاد IF به دلیل دارا بودن ساختار تک‌فاز فریتی، بسیار زیاد (حدود 200 mJ/m^2) است لذا بازیابی استاتیکی و دینامیکی می‌تواند به راحتی در این فولاد رخ دهد و از انباشته شدن نابجایی‌ها جلوگیری کند. در نتیجه منابع جوانه‌زنی برای تبلور مجدد پیوسته و ناپیوسته در ماده کاهش می‌یابد. به همین سبب محققان مختلف تنها توانستند اندازه دانه‌ی این فولاد را تا حدود ۳۰۰ nm کاهش دهند. اما برای دستیابی به ساختار نانو توسط فرایند نورد تجمعی در فلزات و آلیاژهایی که دارای انرژی نقص چیدن زیادی هستند چه باید کرد؟ یکی از راه‌کارهایی که می‌تواند موثر باشد این است که از حرکت آسان نابجایی‌ها و وقوع بازیابی توسط انجام فرایند نورد تجمعی در دماهای پایین جلوگیری شود.

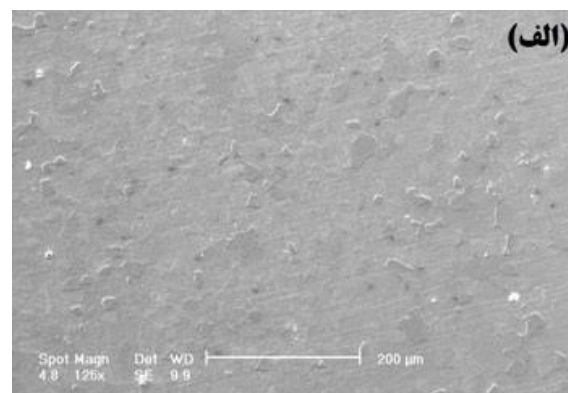
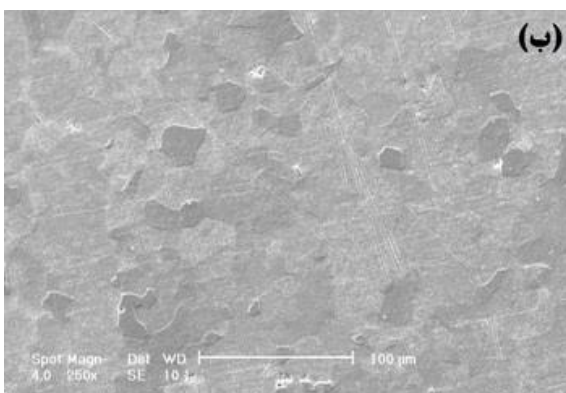
گسترده‌ی استفاده از فولاد در صنعت و مزایای بسیار زیاد مواد نانو ساختار که در ابتدای این قسمت بدان اشاره شد و نیز عدم دستیابی به ساختار نانو در فولاد IF تاکنون، پژوهشگران حاضر را بر آن داشت تا به تلاشی در این زمینه اقدام نمایند. بنابراین هدف از این پژوهش، ساخت فولاد IF نانو ساختار توسط فرایند نورد تجمعی و ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی آن می‌باشد.

مواد و روش انجام آزمایش

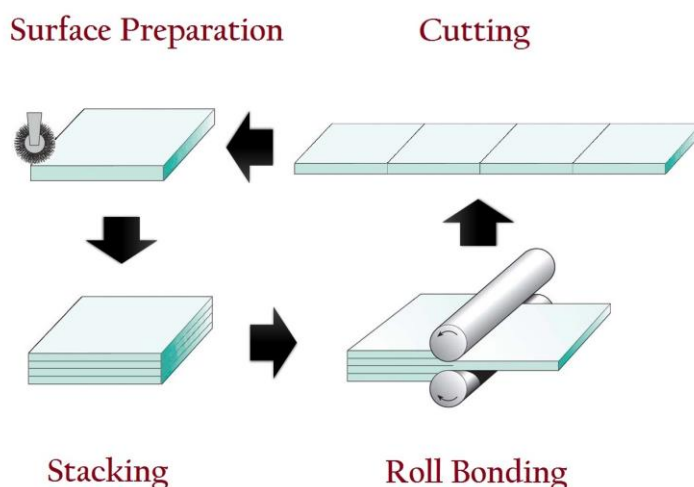
در این پژوهش از فولاد عاری از عناصر بین‌نشین استفاده شد. ریزساختار اولیه‌ی فولاد و ترکیب شیمیایی آن به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ آورده شده است. شکل نمایشی فرایند نورد تجمعی در دمای محیط برای ساخت فولاد IF نانو ساختار در شکل ۲ نشان داده شده است. از ورق‌های فولاد اولیه به ابعاد $150 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$ استفاده گردید. برای تولید پیوند مناسب توسط فرایند نورد تجمعی، برطرف کردن هرگونه آلودگی که ممکن است روی سطح نمونه وجود داشته باشد، ضروری به نظر می‌رسد. سطوح ممکن است دارای آلودگی‌هایی نظیر اکسیدها، یون‌های جذب شده، چربی، رطوبت و ذرات گرد و غبار باشند. بنابراین نمونه‌ها ابتدا توسط استن، چربی‌زدایی شدند و سپس سطح آن‌ها توسط برس فولادی با قطر سیم 0.26 mm زبر گردید. نکته‌ی بسیار مهمی که باید به آن توجه شود این است که باید از لمس کردن سطوح آماده شده پرهیز کرد، چون چربی‌ها مانع از تشکیل پیوندی قوی خواهند شد. پس از فرایند آماده‌سازی سطح، برای به حداقل رساندن تشکیل دوباره‌ی اکسیدها در سطوح برس زده شده، فرایند نورد می‌بایست به سرعت انجام گیرد. پس از آماده‌سازی سطح، نمونه‌ها روی هم قرار گرفتند و به سرعت نورد شدند. لازم به ذکر است که زمان بین آماده‌سازی سطح و فرایند نورد کمتر از ۵ دقیقه بود. عملیات با استفاده از یک دستگاه نورد با قطر غلتک 220 mm و سرعتی برابر با 4 m/min بدون حضور روان کار انجام شد. کاهش ضخامت اعمال شده بر نمونه‌ها ۷۵ درصد در هر سیکل بود. این فرایند تا ۴ سیکل روی نمونه‌ها انجام گرفت.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این پژوهش

ماده	ترکیب شیمیایی (wt.%)
فولاد IF	C ۰.۰۰۲، N ۰.۰۰۴، Ti ۰.۰۵۵، Mn ۰.۱۴، Ni ۰.۰۱۸، Cu ۰.۰۱، Si ۰.۰۱، Fe مابقی



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار اولیه فولاد.



شکل ۲- شکل نمایشی فرایند نورد تجمعی بدون حضور ذرات کاربید سیلیسیم.

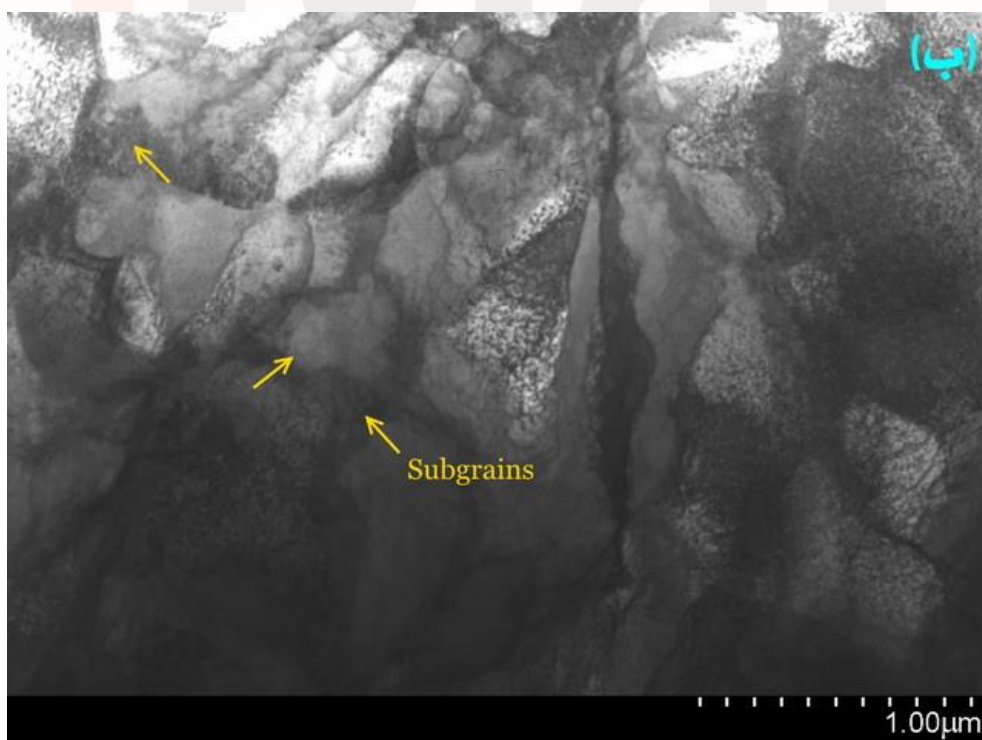
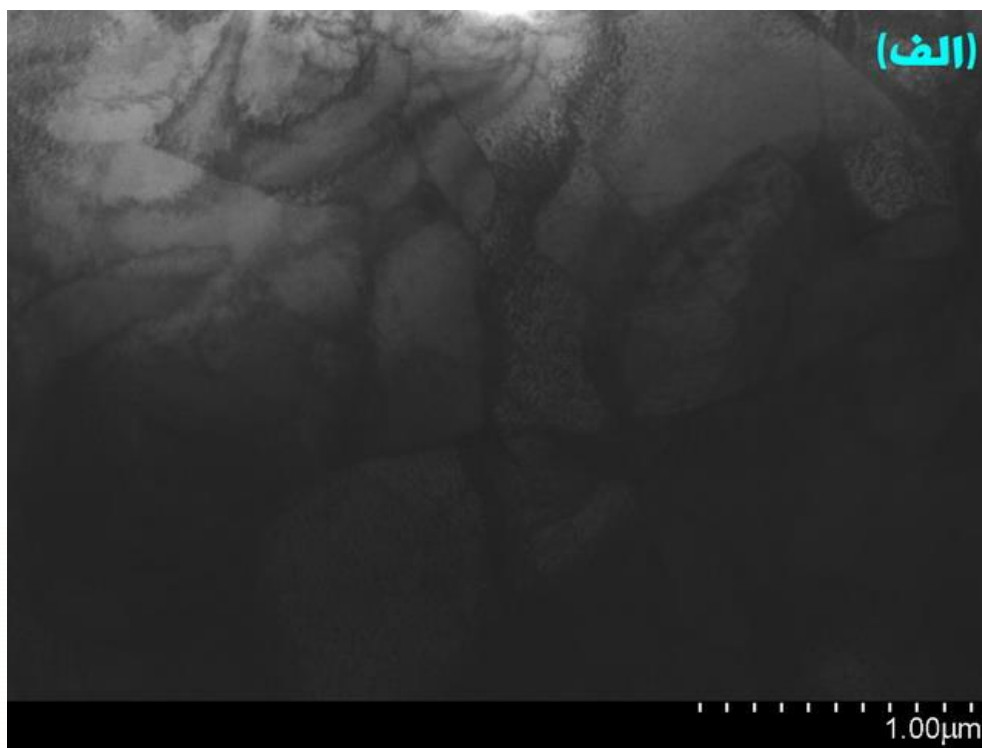
به منظور ارزیابی ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی (STEM) نمونه‌ها تحت آماده‌سازی قرار گرفتند. برای آماده‌سازی، ابتدا ضخامت نمونه‌ها توسط عملیات سنباده‌زنی کاسته شد و به حدود $100\ \mu\text{m}$ رسید. سپس فویل‌ها در محلول ۵ درصد اسید پرکلریک + ۹۵ درصد متانول در دمای 30°C با ولتاژ $60\ \text{V}$ تحت عملیات الکتروپولیش قرار گرفتند. پس از آن دیسک‌هایی به قطر $3\ \text{mm}$ از فویل‌ها جدا گردید. سپس با دستگاه Low Angle Ion Milling System from Fischione Model 1010 در ولتاژ $5\ \text{kV}$ ، جریان $5\ \text{mA}$ ، مدت زمان $2/5\ \text{h}$ ، حداقل دمای 40°C و زاویه‌ی 10° درجه تحت عملیات یون میلینگ قرار گرفتند. نمونه‌ها توسط Hitachi S-4800 Field Emission Scanning Electron Microscope و با روش STEM تحت ارزیابی ریزساختاری قرار گرفتند. به منظور پردازش تصاویر و به دست آوردن مقدار اندازه‌ی دانه برای نمونه‌های مختلف از نرم‌افزار Microstructural Image Processing (MIP) استفاده گردید.

نمونه‌های کشش بر اساس استاندارد ASTM: E8M و موازی با جهت نورد از ورق‌های مختلف تهیه شد. طول و عرض سنجی نمونه‌های کشش به ترتیب برابر با $25\ \text{mm}$ و $6\ \text{mm}$ بود. سپس نمونه‌ها توسط دستگاه کشش Hounsfield H50KS با نرخ کرنش اولیه‌ی

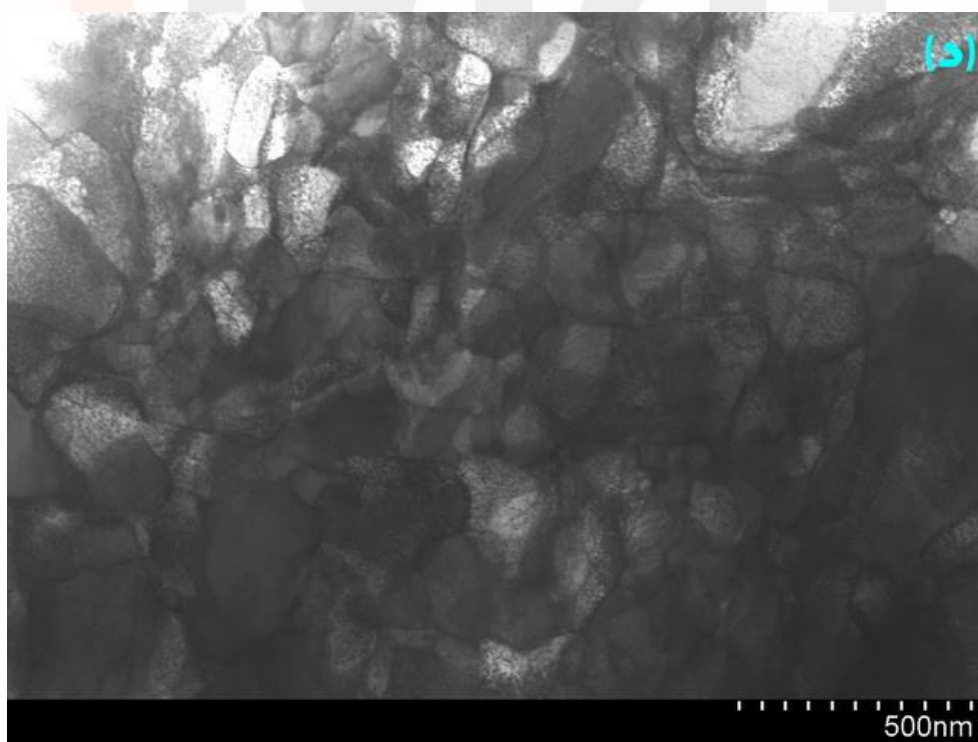
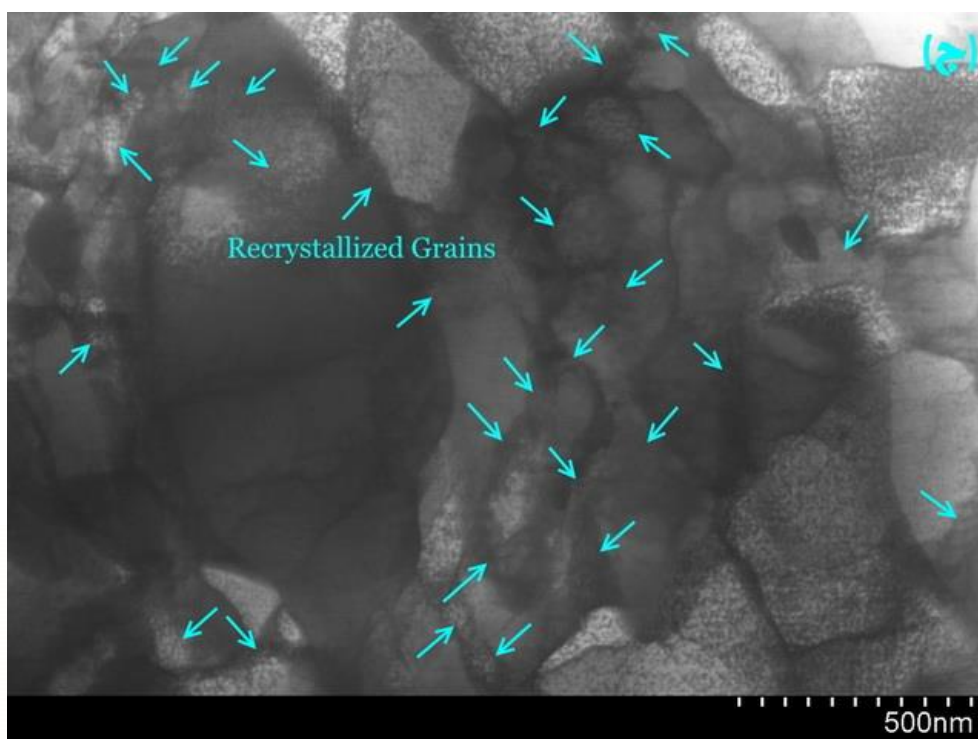
$S^{-1} \times 10^{-4} \times 1/67$ مورد آزمایش قرار گرفتند. ازدیاد طول کل نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری اختلاف بین طول سنج قبل و بعد از آزمون کشش به دست آمد. پس از انجام آزمایش کشش، منحنی‌های تنش مهندسی - کرنش مهندسی برای نمونه‌های ARB شده بعد از سیکل‌های مختلف رسم شد. به منظور ارزیابی سطوح شکست پس از آزمون کشش از میکروسکوپ الکترونی روبشی PHILIPS XL30 استفاده شد. سختی نمونه‌ها بر حسب ویکرز و در بار 30 kg اندازه‌گیری شد. ابتدا مقادیر سختی در ده نقطه‌ی تصادفی از نمونه به دست آمد، سپس از مقادیر حداکثر و حداقل صرف‌نظر شد و در نهایت میانگین مقدار سختی با استفاده از ۸ مقدار دیگر محاسبه گردید.

نتایج و بحث

ریزساختار نمونه‌ها پس از سیکل‌های مختلف فرایند نورد تجمعی در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳(الف) نشان می‌دهد که نمونه پس از سیکل اول دارای تجمع نابجایی شدیدی در قسمت‌های مختلف می‌باشد و سلول‌های نابجایی در جای‌جای ریزساختار دیده می‌شوند. شاید تجمع شدید نابجایی‌ها با توجه به انرژی نقص چیدن بسیار زیادی که فولاد IF دارد (حدود 200 mJ/m^2) کمی عجیب به نظر برسد، اما عوامل بسیار مهمی که در ادامه توضیح داده خواهند شد می‌توانند موجب تولید نابجایی‌های بیش‌تر و تجمع شدیدتر آن‌ها در فولاد IF حین فرایند نورد تجمعی شوند. اصولاً تجمع نابجایی‌ها در فرایند نورد تجمعی نسبت به فرایندهای دیگر تغییرشکل پلاستیک شدید، بیش‌تر است. در فرایند نورد تجمعی سطوحی از دو ورق که با یکدیگر پیوندی تشکیل نمی‌دهند جزایر ایزوله‌ای را به وجود می‌آورند که متشکل از اکسیدها می‌باشند. این مناطق به عنوان موانعی در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل می‌کند و منجر به تجمع بیش‌تر نابجایی‌ها در نمونه‌هایی می‌شود که تحت فرایند نورد تجمعی قرار گرفته‌اند. در حالی که در دیگر فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید، نمونه‌ی اولیه به صورت یکپارچه باقی می‌ماند و ذرات اکسیدی نمی‌توانند در داخل نمونه به وجود آیند. با مقایسه‌ی نتایج این پژوهش و مقالات دیگری که در رابطه با اعمال فرایند نورد تجمعی روی فولاد IF می‌باشد (سوجی و همکاران، ۱۹۹۹؛ سوجی و همکاران، ۲۰۰۲؛ کرایکز و لنارد، ۲۰۰۴؛ تعمیمی و همکاران، ۲۰۰۹) می‌توان فهمید که تجمع نابجایی در پژوهش حاضر نسبت به تحقیقات دیگر، بیش‌تر است. از آنجایی که همانند پژوهش حاضر در دیگر مقالات ذکر شده نیز از فرایند نورد تجمعی استفاده شده است باید عوامل اثرگذار دیگری نیز وجود داشته باشند که چنین تفاوتی را رقم زده است. یکی از این عوامل که باید بدان اشاره کرد این است که در پژوهش حاضر، فرایند نورد تجمعی در دمای محیط انجام شده است در حالی که در دیگر پژوهش‌ها، این فرایند در دماهای بالاتر از 750 K اعمال شده است. انجام فرایند نورد تجمعی در دمای محیط می‌تواند موجب کاسته شدن حرکت نابجایی‌ها و کم‌تر شدن وقوع بازیابی شود و در نتیجه تجمع نابجایی‌ها افزایش می‌یابد. عامل مهم دیگر این است که در این پژوهش از فرایند نورد تجمعی چهارلایه استفاده شده است، به طوری که در هر سیکل، ۷۵ درصد کاهش ضخامت به ماده اعمال می‌شود در حالی که در پژوهش‌های دیگر انجام شده روی فولاد IF، از نورد تجمعی متداول با ۵۰ درصد کاهش ضخامت استفاده شده بود. بدین ترتیب، عوامل یاد شده باعث می‌شود که در این نمونه شاهد تجمع نابجایی شدیدی باشیم. حداقل اندازه‌ی دانه در این نمونه حدود 600 nm است، هر چند دانه‌هایی بزرگ‌تر از $2 \text{ }\mu\text{m}$ نیز در ریزساختار دیده می‌شوند. این نتیجه نشان می‌دهد که اندازه‌ی دانه‌ها در ریزساختار پس از سیکل اول، یکنواخت نیست. با توجه به شکل ۳(الف) نیز این موضوع کاملاً مشخص می‌باشد. پس از سیکل دوم، همان‌طور که در شکل ۳(ب) دیده می‌شود، چگالی نابجایی‌ها دوباره افزایش پیدا می‌کند و ساختار سلولی گسترش می‌یابد. حداقل و حداکثر اندازه‌ی دانه در نمونه‌ی به دست آمده بعد از دو سیکل به ترتیب 100 nm و $1 \text{ }\mu\text{m}$ می‌باشد. نکته‌ی بسیار مهم این است که در این نمونه، مناطقی با دانه‌های فوق‌ریز و نانو نیز وجود دارند که با پیکان‌های زرد رنگ نشان داده شده‌اند؛ اگر چه تعداد آن‌ها در ریزساختار بسیار کم می‌باشد. این دانه‌ها توسط مکانیزم تبلور مجدد پیوسته تشکیل شده‌اند. در واقع در این نمونه، تبلور مجدد پیوسته‌ی جزئی اتفاق افتاده است که از طریق آن دانه‌های فوق‌ریز و نانو به وجود آمده‌اند.

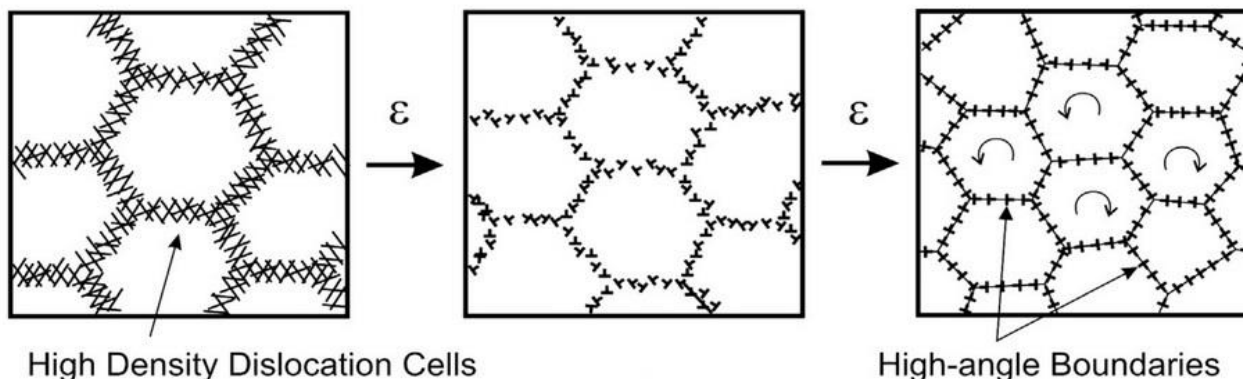


شکل ۳- ریز ساختار نمونه‌ها پس از سیکل‌های: (الف) اول، (ب) دوم، (ج) سوم و (د) چهارم.



شکل ۳- ادامه.

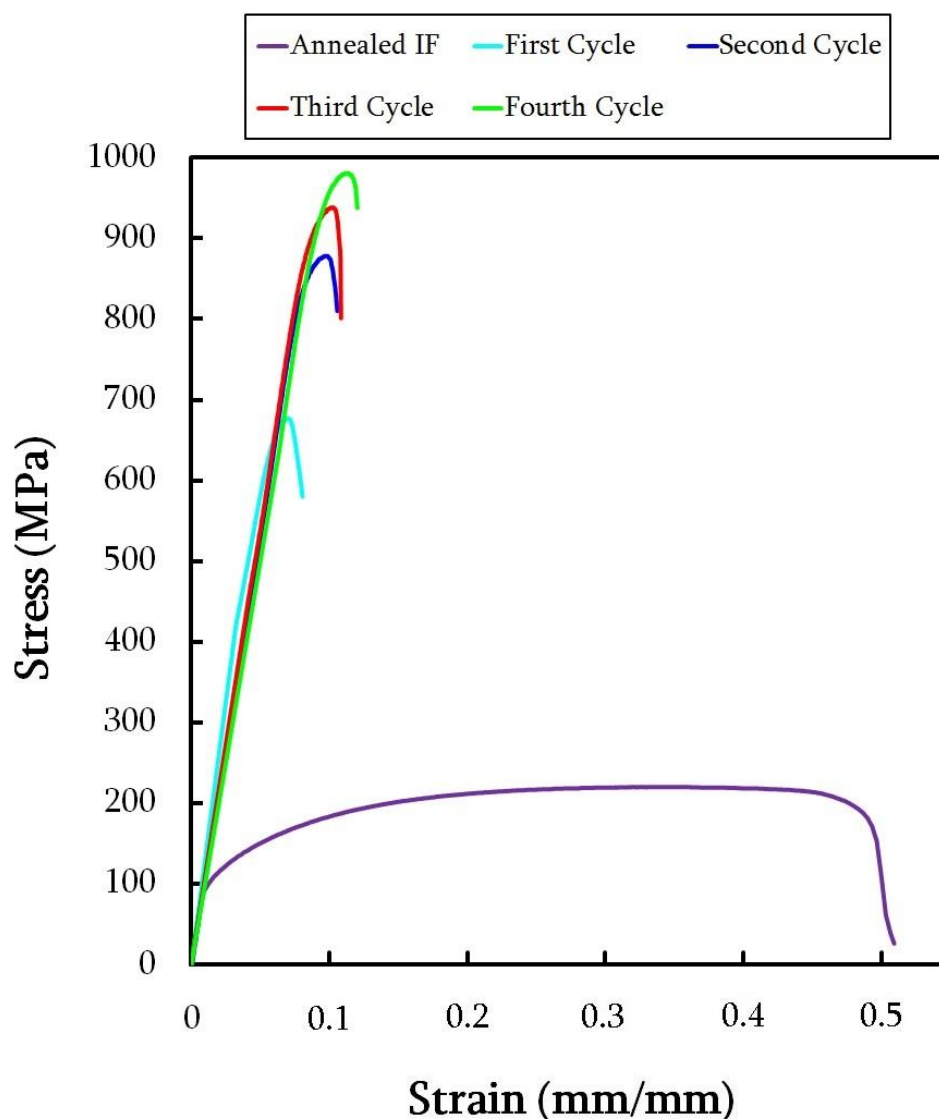
نمایشی از تشکیل دانه‌های فوق‌ریز و نانو توسط مکانیزم تبلور مجدد پیوسته در شکل ۴ قابل مشاهده است. همان گونه که در این شکل مشخص است ابتدا ساختار سلولی نابجایی‌ها در سیکل‌های اولیه (کرنش‌های کم) به وجود می‌آید. سپس با اعمال کرنش‌های بیش‌تر، به علت حرکت کردن نابجایی‌ها و وقوع بازبایی در ریزساختار، نابجایی‌های مثبت و منفی یکدیگر را خنثی کرده و نابجایی‌های هم‌علامت در یک ردیف قرار گرفته و مرزهای فرعی را که زاویه‌ی عدم تطابق آن‌ها بین ۲ تا ۱۵ درجه است، به وجود می‌آورند. در کرنش‌های بالا، با چرخش دانه‌های فرعی و در نتیجه افزایش زاویه‌ی عدم تطابق میان مرزها، مرزهای فرعی تبدیل به مرزهای اصلی (که دارای زاویه‌ی عدم تطابق بزرگ‌تر از ۱۵ درجه هستند) شده و دانه‌های اصلی را به وجود می‌آورند (ساکای، بلیاکوف، کایبیشف، میورا، جوناس، ۲۰۱۴). همان طور که دیده می‌شود، تبلور مجدد پیوسته دارای مرحله‌ی جوانه‌زنی نمی‌باشد و در این نوع تبلور مجدد، دانه‌های فرعی تبدیل به دانه‌های اصلی می‌شوند. در واقع، وقوع تبلور مجدد پیوسته موجب تقسیم شدن یک دانه‌ی درشت به دانه‌های ریز می‌شود (هامفریز، هاسرلی، ۱۹۹۵). شکل ۳(ب) نشان می‌دهد که این مکانیزم به طور جزئی در برخی از قسمت‌ها رخ داده است (پیکان‌های زرد رنگ). در واقع هنوز دانه‌های نانو و فوق‌ریز تشکیل شده در این نمونه مرزهای کاملاً واضحی ندارند و مرحله‌ی آخر در شکل ۴ به طور کامل انجام نشده است و این دانه‌ها همچنان به عنوان دانه‌های فرعی در ریزساختار حضور دارند. با اعمال کرنش‌های بیش‌تر، این دانه‌های فرعی تبدیل به دانه‌های اصلی خواهند شد و تبلور مجدد پیوسته به طور کامل رخ می‌دهد. این موضوع در شکل ۳(ج) به خوبی دیده می‌شود. در این نمونه که مربوط به سیکل سوم فرایند نورد تجمعی می‌باشد، تبلور مجدد پیوسته در قسمت‌های وسیعی از ریزساختار رخ داده است؛ هر چند در برخی از قسمت‌ها تنها دانه‌های فرعی وجود دارد و هنوز تبلور مجدد پیوسته، کامل نشده است. لذا می‌توان اظهار داشت که مکانیزم تبلور مجدد پیوسته در سیکل سوم فرایند نورد تجمعی رخ می‌دهد. پس از سیکل چهارم، همان گونه که در شکل ۳(د) مشاهده می‌شود، ریزساختار به طور کامل شامل دانه‌های اصلی و هم‌محور می‌باشد. میانگین اندازه‌ی دانه در این نمونه حدود ۱۰۰ nm است و ریزساختار یکنواختی را شاهد هستیم. این نتیجه نشان می‌دهد که با انجام فرایند نورد تجمعی چهارلایه در دمای محیط می‌توان به ریزساختار نانو در فولاد IF دست پیدا کرد. در واقع نورد تجمعی چهار لایه در دمای محیط می‌تواند مانع از وقوع بازبایی گسترده در فولاد IF (که بسیار مستعد به بازبایی است) شود و انرژی زیادی را در ماده ذخیره کند تا مکانیزم تبلور مجدد پیوسته رخ دهد و منجر به نانو ساختار شدن فولاد IF شود.



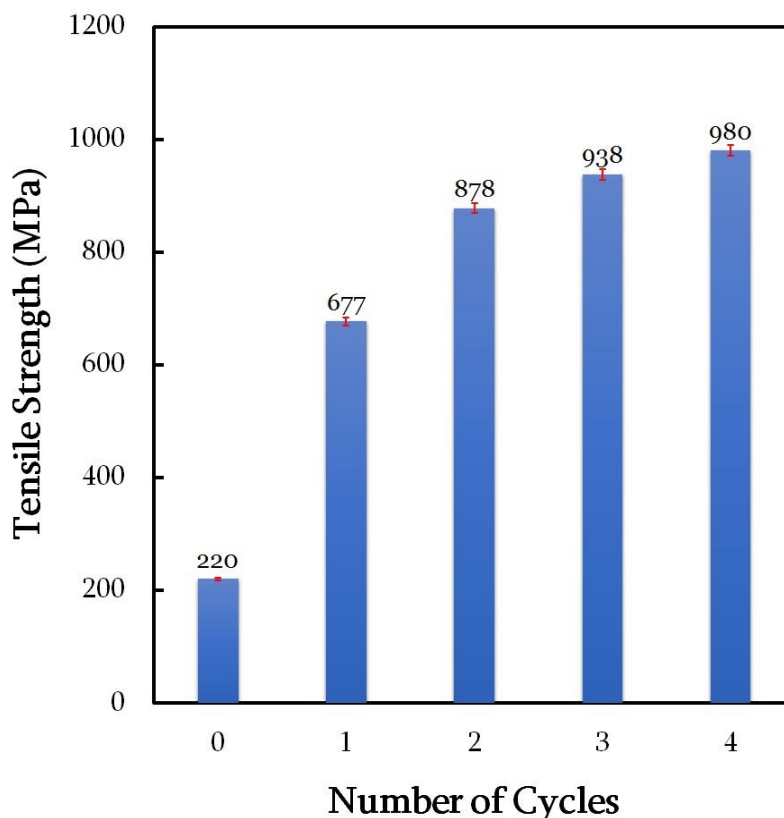
شکل ۴- نمایشی از تشکیل دانه‌های فوق‌ریز و نانو توسط مکانیزم تبلور مجدد پیوسته (ساکای و همکاران، ۲۰۱۴).

نمودارهای تنش مهندسی - کرنش مهندسی برای نمونه‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین مقادیر مربوط به استحکام کششی و ازدیاد طول به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است. با توجه به این شکل‌ها واضح است که با افزایش تعداد

سیکل، مقادیر استحکام کششی و استحکام تسلیم به طور پیوسته افزایش می‌یابد. پس از سیکل نخست، استحکام کششی از مقدار ۲۲۰ MPa (برای نمونه‌ی اولیه) به ۶۷۷ MPa افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی ۲۰۸٪ بهبود در مقدار استحکام کششی می‌باشد. مشابه با نتایج به دست آمده در پژوهش‌های قبل (سوجی و همکاران، ۱۹۹۹؛ سوجی و همکاران، ۲۰۰۲؛ کرالیکز و لنارد، ۲۰۰۴؛ تعمیمی و همکاران، ۲۰۰۹)، سیکل اول دارای تاثیر بسیار زیادی روی استحکام کششی است. با افزایش تعداد سیکل، مقدار استحکام کششی به طور پی‌درپی افزایش می‌یابد به طوری که پس از سیکل چهارم، استحکام کششی حدود ۴/۵ برابر (۹۸۰ MPa) مقدار استحکام کششی نمونه‌ی اولیه است.

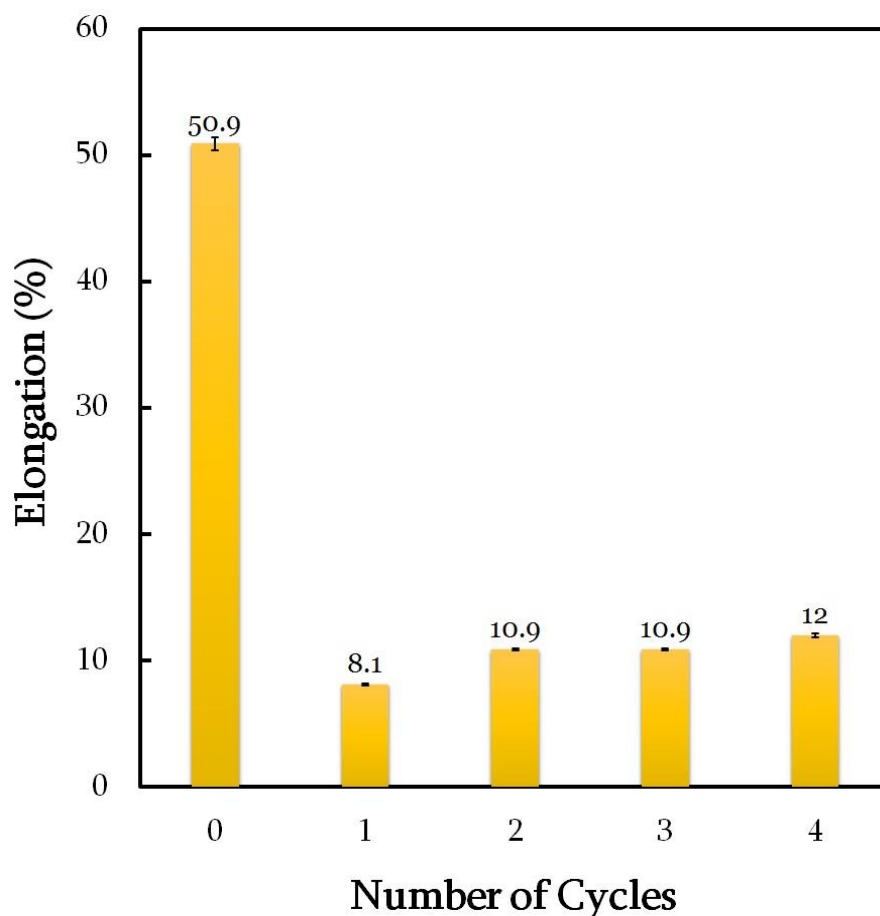


شکل ۵- نمودارهای تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های مختلف.



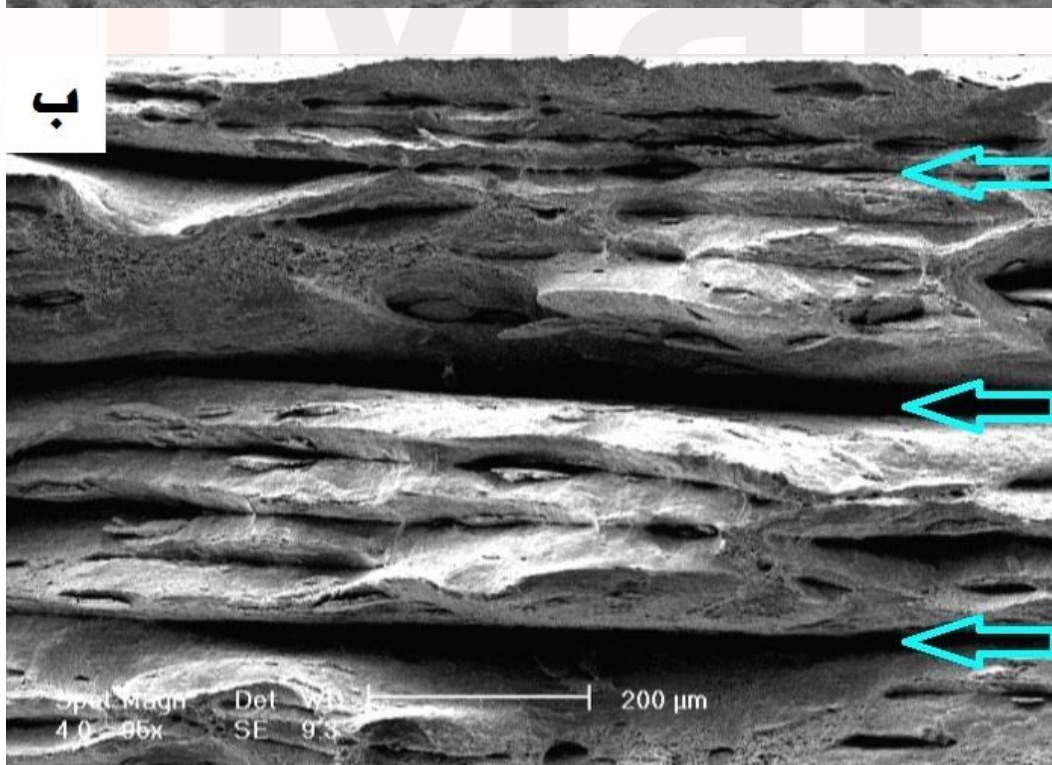
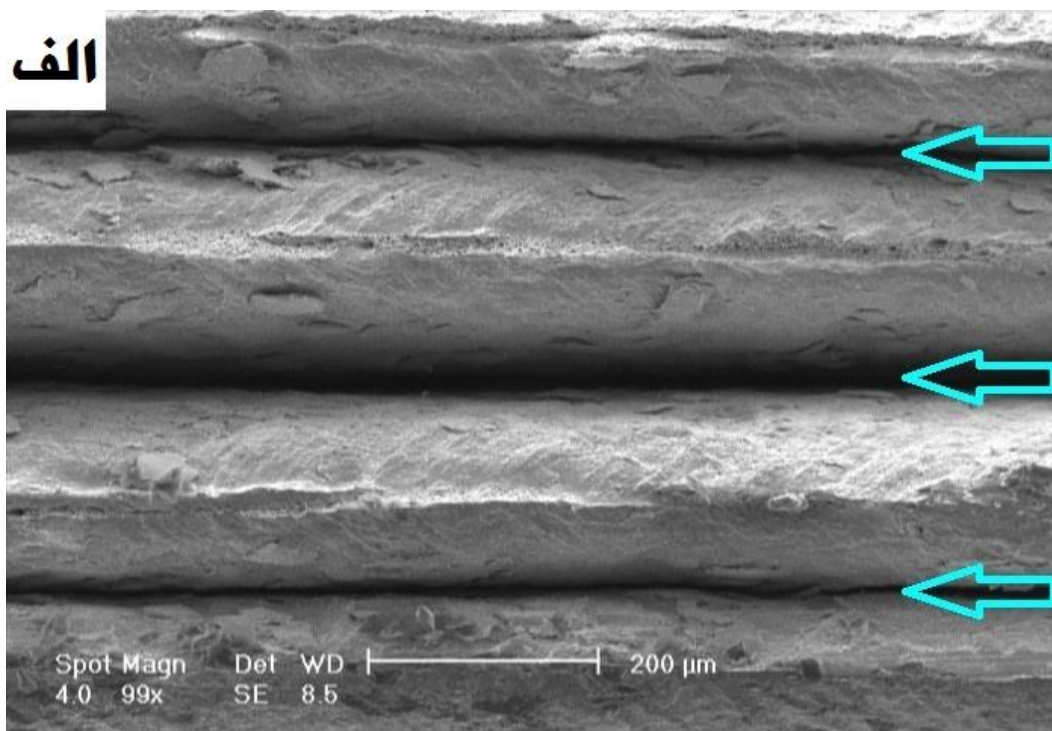
شکل ۶- تغییرات استحکام کششی برای نمونه‌های مختلف.

تغییرات استحکام کششی مواد ساخته شده توسط فرایند نورد تجمعی به علت کرنش‌سختی (استحکام‌دهی توسط نابجایی) و توسعه‌ی ساختار دانه‌ای و تشکیل دانه‌های نانو/فوق‌ریز (استحکام‌دهی توسط مرزدانه) می‌باشد. در سیکل‌های اولیه‌ی فرایند نورد تجمعی، کرنش‌سختی نقش اصلی را در افزایش استحکام ایفا می‌کند در حالی که در سیکل‌های بالاتر، استحکام بیش‌تر در نتیجه‌ی ریزدانه شدن می‌باشد. به بیانی دیگر، با افزایش تعداد سیکل‌ها اثر کرنش‌سختی کاهش یافته و توسعه‌ی شدید دانه‌های نانو/فوق‌ریز نقش اصلی را در استحکام‌دهی ایفا می‌کند. با توجه به شکل ۷، پس از سیکل اول مقدار ازدیاد طول از ۵۰/۹٪ برای نمونه‌ی اولیه به ۸/۱٪ کاهش می‌یابد که ۸۴٪ کاهش را نشان می‌دهد. این کاهش چشمگیر در مرحله‌ی اول مربوط به مکانیزم کرنش‌سختی و نیز تشکیل فصل‌مشترک‌های میان لایه‌های فولاد می‌باشد (شکل ۸). از سوی دیگر، با توجه به شکل ۷ واضح است که از سیکل اول به بعد، با افزایش تعداد سیکل مقدار ازدیاد طول بهبود می‌یابد به طوری که مقدار ازدیاد طول از ۸/۱٪ به ۱۲٪ افزایش یافته که نشان‌دهنده‌ی ۴۸٪ بهبود است. افزایش مقدار ازدیاد طول نمونه‌ها در مرحله‌ی دوم مربوط به بهبود کیفیت پیوند فصل‌مشترک می‌باشد. سطوح شکست ماکروسکوپی نمونه‌ها پس از سیکل‌های مختلف فرایند نورد تجمعی در شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به این شکل‌ها، گسستگی و لایه‌ای شدن میان لایه‌های فولاد به وضوح مشاهده می‌شود. نمونه پس از سیکل اول (شکل ۸الف) نشان‌دهنده‌ی سه گسستگی و لایه‌ای شدن همراه با تغییر شکل پلاستیک لایه‌ها می‌باشد. با افزایش تعداد سیکل، تعداد لایه‌ها نیز افزایش می‌یابد. پس از سیکل نخست، تعداد لایه‌ها و فصل‌مشترک‌ها به ترتیب برابر با ۴ و ۳ می‌باشد. در حالی که بعد از سیکل چهارم، تعداد آن‌ها به ترتیب به ۲۵۶ و ۸۱ افزایش پیدا می‌کند (شکل ۸د). لذا دانستن ماهیت پیوند میان لایه‌ها در فرایند نورد تجمعی دارای اهمیت بیش‌تری می‌شود.

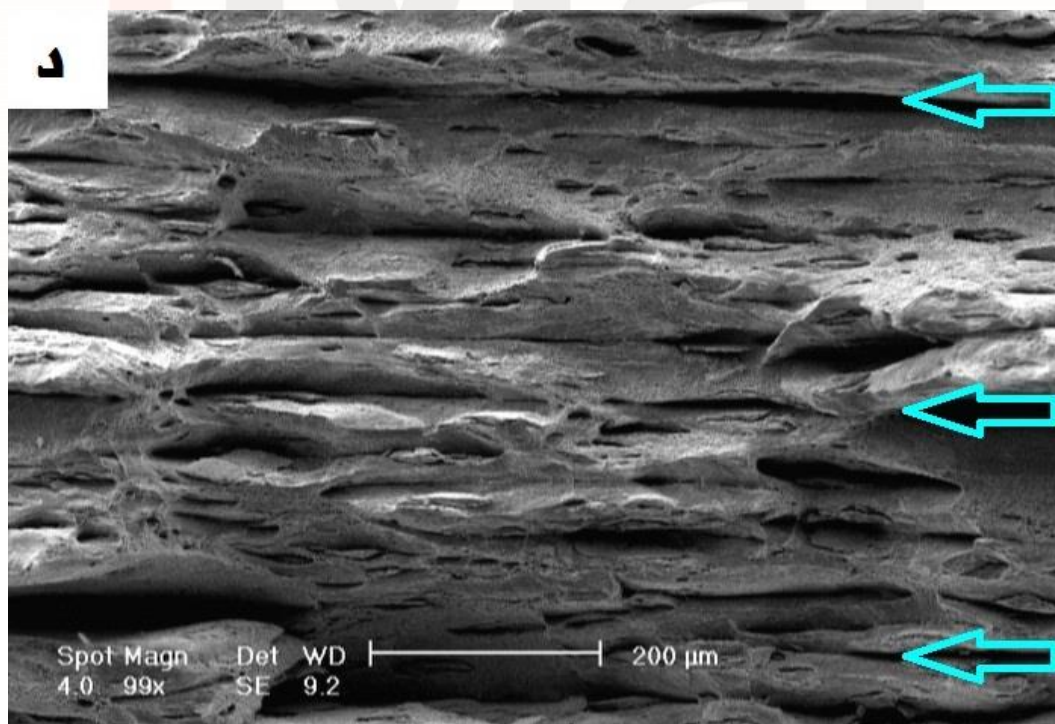
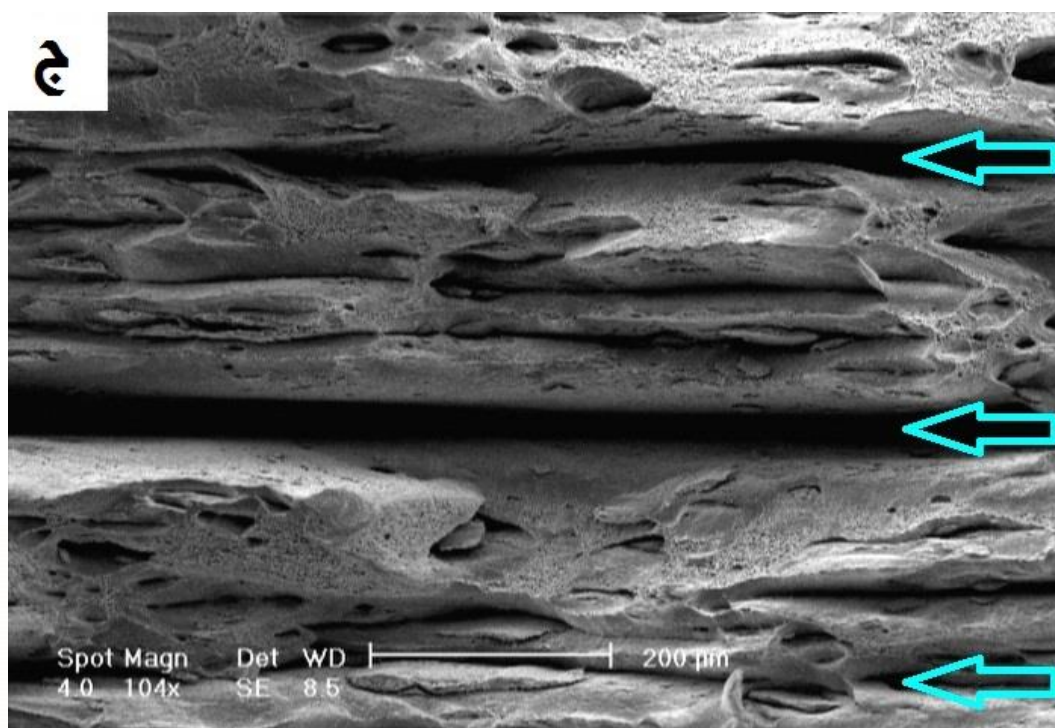


شکل ۷- تغییرات ازدیاد طول برای نمونه‌های مختلف.

همان طور که بدان اشاره شد در فصل مشترک‌های میان لایه‌هایی که در اثر اعمال فرایند نورد تجمعی به هم پیوند خورده‌اند مناطق پیوندنیافته‌ای متشکل از لایه‌ی سطحی شکننده وجود دارد که به جزایر ایزوله مشهور است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فصل مشترک‌های به وجود آمده در فرایند نورد تجمعی به دلیل حضور این جزایر ایزوله‌ی کوچک مکان‌های مناسبی برای جوانه‌زنی ترک حین آزمون کشش می‌باشند. همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود فصل مشترک‌ها قابل مشاهده هستند مخصوصاً فصل مشترک‌های نهایی تولید شده در هر نمونه که با پیکان‌هایی نمایش داده شده‌اند. استحکام پیوند فصل مشترک‌های نهایی در هر سیکل از فرایند نورد تجمعی، قوی نمی‌باشد زیرا تعداد و سطح جزایر ایزوله در فصل مشترک‌های نهایی نسبت به فصل مشترک‌های دیگر بیش‌تر است. به هر صورت، سیکل بعدی فرایند به دلیل فشار نورد موجب بهبود پیوند فصل مشترک‌هایی که در سیکل‌های قبلی به وجود آمده‌اند می‌شود. بنابراین استحکام پیوند افزایش می‌یابد و لایه‌ای شدن شدید فصل مشترک‌های نهایی در سیکل قبلی تبدیل به لایه‌ای شدن خفیف همان فصل مشترک‌ها در سیکل بعدی می‌شود. با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند نورد تجمعی، استحکام پیوند تمامی فصل مشترک‌ها بهبود می‌یابد و مناطق پیوندنیافته در فصل مشترک کاهش پیدا می‌کند و این امر منجر به بهبود انعطاف‌پذیری نمونه‌ها می‌شود.

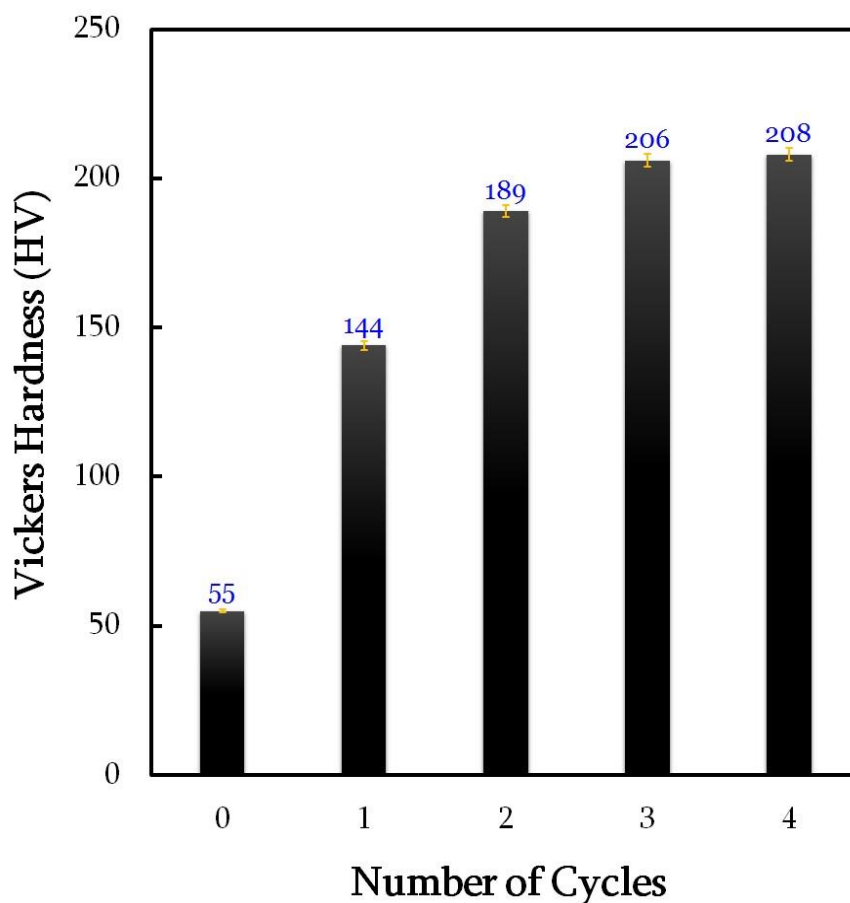


شکل ۸- سطوح شکست نمونه‌های مختلف پس از آزمون کشش.



شکل ۸- ادامه.

شکل ۹ تغییرات سختی نسبت به تعداد سیکل برای نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. پس از سیکل اول، افزایش چشمگیری در مقادیر سختی مشاهده می‌شود که تقریباً ۲/۶ برابر سختی نمونه‌ی اولیه‌ی آنیل شده می‌باشد. افزایش قابل توجه در مقدار سختی در کرنش‌های نسبتاً پایین می‌تواند به کرنش سختی یعنی افزایش در دانسیته‌ی نابجایی‌ها و برهم‌کنش‌های آن‌ها مربوط باشد. همان‌طور که در شکل ۹ قابل مشاهده است، مقدار سختی در دو سیکل اول به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و سپس اثر تعداد سیکل روی مقدار سختی کم و کمتر می‌شود به طوری که در سیکل‌های بالا، مقدار سختی به حالت اشباع می‌رسد. این حالت بدین خاطر رخ می‌دهد که ماده به دانسیته‌ی تقریباً ثابتی از نابجایی‌ها می‌رسد که توسط تعادل میان تولید نابجایی حین تغییر شکل پلاستیک و از بین رفتن آن توسط بازجایی به دست می‌آید. این نتیجه با نتایج گزارش شده‌ی قبلی در مورد اعمال فرایند نورد تجمعی روی فولاد IF (کرالیکز و لنارد، ۲۰۰۴؛ تعمیمی و همکاران، ۲۰۰۹) مطابقت دارد.



شکل ۹- تغییرات سختی برای نمونه‌های مختلف.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور ساخت فولاد عاری از عناصر بین‌نشین (IF) با ساختار نانو از فرایند نورد تجمعی چهارلایه در دمای محیط استفاده گردید. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش عبارت‌اند از:

- (۱) ریزساختار نمونه‌ی نهایی به طور کامل شامل دانه‌های اصلی و هم‌محور با میانگین اندازه‌ی دانه‌ی حدود ۱۰۰ nm بود و ریزساختار یکنواختی را شاهد بودیم. این نتیجه نشان می‌دهد که با انجام فرایند نورد تجمعی چهارلایه در دمای محیط می‌توان به ریزساختار نانو در فولاد IF دست پیدا کرد. در واقع نورد تجمعی چهار لایه در دمای محیط می‌تواند مانع از وقوع بازایی گسترده در فولاد IF (که بسیار مستعد به بازایی است) شود و انرژی زیادی را در ماده ذخیره کند تا مکانیزم تبلور مجدد پیوسته رخ دهد و منجر به نانساختار شدن فولاد IF شود.
- (۲) با افزایش تعداد سیکل، مقدار استحکام کششی به طور پی‌درپی افزایش یافت به طوری که پس از سیکل نهایی، استحکام کششی حدود ۴/۵ برابر (۹۸۰ MPa) مقدار اولیه بود.
- (۳) پس از سیکل اول مقدار ازدیاد طول از ۵۰/۹٪ برای نمونه‌ی اولیه به ۸/۱٪ کاهش یافت در حالی که اعمال سیکل‌های بیش‌تر موجب افزایش مقدار ازدیاد طول به ۱۲٪ گردید.
- (۴) با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند نورد تجمعی، استحکام پیوند تمامی فصل مشترک‌ها بهبود یافت و مناطق پیوندنیافته در فصل مشترک کاهش پیدا کرد و این امر منجر به بهبود انعطاف‌پذیری نمونه‌ها شد.
- (۵) پس از سیکل اول، افزایش شدیدی در مقدار سختی مشاهده شد که تقریباً ۲/۶ برابر سختی اولیه بود. مقدار سختی در دو سیکل اول به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت و سپس اثر تعداد سیکل روی مقدار سختی کم و کم‌تر شد به طوری که در سیکل‌های بالا، مقدار سختی به حالت اشباع رسید.

مراجع

- Costa, A. L. M., Reis, A. C. C., Kestens, L., & Andrade, M. S. (2005). "Ultra grain refinement and hardening of IF-steel during accumulative roll-bonding". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 406, Pp. 279–285.
- Gleiter, H. (2000). "Nanostructured materials: basic concepts and microstructure". *Acta Materialia*, Vol. 48, Pp. 1–29.
- Humphreys, F. J., & Hatherly, M. (1995). "Recrystallization and related annealing phenomena". Elsevier, London.
- Jamaati, R., Toroghinejad, M. R., & Edris, H. (2013). "Effect of stacking fault energy on nanostructure formation under accumulative roll bonding (ARB) process". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 578, Pp. 191–196.
- Jamaati, R., & Toroghinejad, M. R. (2014). "Effect of alloy composition, stacking fault energy, second phase particles, initial thickness, and measurement position on deformation texture". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 598, Pp. 77–97.
- Jamaati, R., & Toroghinejad, M. R. (2014). "Effect of stacking fault energy on deformation texture development of nanostructured materials produced by the ARB process". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 598, Pp. 263–276.
- Jamaati, R., & Toroghinejad, M. R. (2014). "Effect of stacking fault energy on mechanical properties of nanostructured FCC materials processed by the ARB process". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 606, Pp. 443–450.
- Kamikawa, N., Sakai, T., & Tsuji, N. (2007). "Effect of redundant shear strain on microstructure and texture evolution during accumulative roll-bonding in ultralow carbon IF steel". *Acta Materialia*, Vol. 55, Pp. 5873–5888.
- Kralics, G., & Lenard, J.G. (2004). "An examination of the accumulative roll bonding process". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 152, Pp. 154–161.
- Saito, Y., Utsunomiya, H., Tsuji, N., & Sakai, T. (1999). "Novel ultra-high straining process for bulk materials-development of the accumulative roll-bonding (ARB) process". *Acta Materialia*, Vol. 47, Pp. 579–583.
- Sakai, T., Belyakov, A., Kaibyshev, R., Miura, H., & Jonas, J.J. (2014). "Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions". *Progress in Materials Science*, Vol. 60, Pp. 130–207.
- Saray, O., Purcek, G., Karaman, I., Neindorf, T., & Maier, H. J. (2011). "Equal-channel angular sheet extrusion of interstitial-free (IF) steel: Microstructural evolution and mechanical properties". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, Pp. 6573–6583.

- Tamimi, S., Ketabchi, M., & Parvin, N.. (2009). "Microstructural evolution and mechanical properties of accumulative roll bonded interstitial free steel". *Materials and Design*, Vol. 30, Pp. 2556–2562.
- Tsuji, N., Saito, Y., Utsunomiya, H., & Tanigawa, S. (1999). "Ultra-fine grained bulk steel produced by accumulative roll-bonding (ARB) process". *Scripta Materialia*, Vol. 40, Pp. 795–800.
- Tsuji, N., Ueji, R., & Minamino, Y. (2002). "Nanoscale crystallographic analysis of ultrafine grained IF steel fabricated by ARB process". *Scripta Materialia*, Vol. 47, Pp. 69–76.
- Valiev, R. Z., Islamgaliev, R. K., & Alexandrov, I. V. (2000). "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation". *Progress in Materials Science*, Vol. 45, Pp. 103–189.
- Valiev, R. Z., & Langdon, T. G. (2006). "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement". *Progress in Materials Science*, Vol. 51, Pp. 881–981.

iMat
Conference 2014