

بررسی ریزساختار، خواص مکانیکی و ناهمگنی خواص آلومینیوم خالص تجاری تحت فرآیند نورد تجمعی

مجتبی دهقان

دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان

فتح‌اله قدس

دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان

چکیده

در این تحقیق ۱۳ گذر فرآیند نورد تجمعی (ARB)، بر ورق آلومینیوم AA1050 انجام و تغییرات ریزساختار ورق تا دستیابی به دانه‌های نانومتری بررسی شده است. همچنین با انجام آزمون کشش تک‌محوری در جهت نورد (RD)، جهت عرضی (TD) و زاویه‌ی 45° نسبت به جهت نورد، تغییرات استحکام و میزان ازدیاد طول ورق طی گذرهای مختلف فرآیند اندازه‌گیری و میزان ناهمگنی خواص در این سه جهت مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش گذرهای فرآیند استحکام کششی ورق افزایش می‌یابد، اما ازدیاد طول قطعه پس از یک کاهش سریع در گذر اول، در گذرهای بعدی با نرخ بسیار کمی افزایش می‌یابد. همچنین با انجام فرآیند نورد تجمعی میزان ناهمگنی خواص مکانیکی در قطعه افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: فرآیند نورد تجمعی (ARB)، آلومینیوم خالص تجاری، نانو ساختار، استحکام، درصد ازدیاد طول، ناهمگنی خواص

Investigation of Microstructure, Mechanical Properties and Inhomogeneity in Commercial Purity Aluminium in the ARB Process

M. Dehghan

Ph. D Student, Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Semnan University
Associate Professor, Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Semnan University

F. Qods

Abstract

In this research, 13 passes of accumulative roll bonding (ARB) process is performed on AA1050 sheets. The microstructural evolution to access of grains with nanometer size during ARB process is investigated. Moreover the change in strength and elongation of the sheets during the cycles of process is studied by uniaxial tensile test in 3 directions (rolling direction (RD), transverse direction (TD) and at an angle of 45° with respect to RD); and then the inhomogeneity of mechanical properties in these directions is investigated. The tensile strength of sheet is increased by increasing the number of ARB cycles. The elongation of specimen is decreased rapidly at the first cycle of ARB; and it is subsequently increased gradually. The inhomogeneity of mechanical properties of specimen is increased by performing the ARB process.

Keywords: Accumulative roll bonding (ARB) process, Commercial purity Aluminium, Nanostructure, Strength, Elongation, Properties inhomogeneity

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، بررسی روش‌های تولید و خواص مکانیکی مواد با ساختار فوق‌العاده ریزدانه^۱ (UFG) موضوع بسیاری از تحقیقات انجام شده در زمینه علم مواد و علوم مرتبط با آن بوده است. این مواد خواص بی‌نظیری همچون استحکام زیاد در دمای محیط، خاصیت سوپر پلاستیک در دمای بالا و نرخ کرنش کم، مقاومت در برابر سایش، استحکام خستگی بالا و مقاومت عالی در برابر خوردگی از خود نشان می‌دهند [۱-۴].

فرآیندهای تغییر شکل شدید پلاستیک^۲ (SPD) به عنوان یکی از روش‌های تولید مواد با اندازه دانه‌ی نانومتری مطرح می‌باشد. مبنای این فرآیندها کاهش اندازه‌ی دانه‌ها در نمونه‌های فلزی با ابعاد بزرگ از طریق اعمال کرنش‌های شدید بدون ایجاد تغییرات ابعادی در نمونه است [۵] و [۶]. در این فرآیندها با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه، اندازه‌ی دانه‌ها تا مقیاس میکرو و حتی نانومتری کاهش یافته و در مقابل خواص مکانیکی فلز بهبود چشم‌گیری می‌یابد. با توجه به کاهش اندازه‌ی دانه‌ها و افزایش استحکام نمونه‌های تولید شده با روش‌های مذکور، به نظر می‌رسد، فرآیندهای SPD یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای تولید مواد فلزی با اندازه دانه‌ی میکرومتر و نانومتری در مقیاس صنعتی باشد [۷] و [۸]. در صورتی که فرآیندهای SPD این قابلیت را داشته باشند که به صورت پیوسته انجام شوند، می‌توان این فرآیندها را صنعتی کرد [۹].

فرآیند نورد تجمعی^۳ (ARB) به عنوان یک روش اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید و به منظور دستیابی به ساختاری با اندازه دانه‌ی نانومتری ابداع شد [۱۰-۱۲]. مهم‌ترین برتری فرآیند نورد تجمعی نسبت به دیگر فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، قابلیت تولید پیوسته‌ی ورق‌های فلزی فوق‌العاده ریزدانه و در نتیجه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بودن آن است [۱۳]. در فرآیند نورد تجمعی، ورق‌هایی که توسط فرآیند نورد ۵۰٪ کاهش ضخامت داده شده است، به دو قسمت بریده می‌شود و سپس این دو ورق روی هم قرار داده شده و نورد می‌شوند [۱۴-۱۶]. از آنجا که در این فرآیند روند ذکر شده در بالا را بدون محدودیت می‌توان تکرار کرد، در نتیجه قابلیت اعمال کرنش پلاستیک خیلی بزرگی بر ماده وجود دارد [۳]، [۱۴] و [۱۷]. این فرآیند به دلیل تولید پیوسته‌ی ورق‌های بزرگ با ساختار فوق‌العاده ریزدانه قابلیت صنعتی شدن را نیز دارد [۱۸] و [۱۹].

هدف از انجام این تحقیق، بررسی تغییرات ریزساختار،

خواص مکانیکی و ناهمگنی خواص آلومینیوم خالص تجاری (AA1050) طی گذرهای مختلف فرآیند نورد تجمعی است. مطالعات ریزساختاری در این تحقیق توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ (SEM) انجام شده است. بررسی جدید صورت گرفته در این تحقیق، اندازه‌گیری ناهمگنی خواص مکانیکی ورق نورد تجمعی شده در سه جهت نورد^۵ (RD)، جهت عرضی^۶ (TD) و زاویه‌ی ۴۵° نسبت به جهت نورد است. بدین منظور ورق‌ها پس از گذرهای مختلف فرآیند، در این سه جهت تحت آزمون کشش تک‌محور قرار گرفته و استحکام کششی و میزان ازدیاد طول آنها اندازه‌گیری شده است. در ادامه میزان ناهمگنی خواص در این سه جهت اندازه‌گیری شده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در پایان میکروسختی ورق‌های نورد تجمعی شده در طول ضخامت آنها اندازه‌گیری شده و تغییرات میکروسختی در طول ضخامت و در طی گذرهای مختلف فرآیند بررسی شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

قطعه‌ی اولیه‌ی مورد استفاده ورق آلومینیوم AA1050^{۱۰۵۰} است. نتایج مربوط به ترکیب شیمیایی قطعه، حاصل از آنالیز کوانتومتری در جدول ۱ ارائه شده است. ابتدا ورق فلزی با ضخامت ۴mm توسط فرآیند نورد سرد تا ۱mm کاهش ضخامت داده شد و سپس به منظور دستیابی به ساختار کاملاً هم‌محور به مدت ۱ ساعت در دمای ۴۳۰°C تحت فرآیند تابکاری قرار گرفت. دو قطعه از این ورق با ضخامت ۱mm، پهنای ۱۰۰mm و طول ۱۵۰mm با استفاده از استون چربی-زدایی و توسط برس فولادی خراشیده و زبر شدند. سپس دو قطعه روی هم قرار داده شده و البته به منظور جلوگیری از لغزش آنها بر روی هم، توسط سیم مسی به هم محکم شدند. عملیات اتصال نوردی توسط دستگاه نورد با قطر غلتک ۱۱cm و سرعت دوران ۶۹mmmin^{-۱} تحت کاهش ضخامت ۵۰٪ انجام شد. ورق‌های چسبیده شده از جهت طولی به دو نیم تقسیم شده و روند ذکر شده در بالا تا ۱۳ گذر تکرار شد. در بین گذرهای فرآیند هیچ‌گونه عملیات حرارتی بین‌گذری انجام نشد.

به منظور بررسی تغییرات ریزساختار قطعه طی فرآیند نورد تجمعی، سطح مقطع RD-ND^۷ ورق‌ها توسط پولیش مکانیکی آماده‌سازی و در محلول اچ طبق مشخصات ذکر شده در جدول ۲ به مدت ۴ دقیقه اچ شد. در ادامه ریزساختار قطعات

4. Scanning Electron Microscope

5. Rolling Direction

6. Transverse Direction

7. Rolling Direction-Normal Direction

1. Ultra-Fine Grain

2. Severe Plastic Deformation

3. Accumulative Roll Bonding

نورد تجمعی شده دارای ۸۱۹۲ لایه است و ضخامت هر لایه‌ی آن ۱۲۲nm است. این نتایج برای پاس‌های مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است.

به منظور افزایش چسبندگی لایه‌ها این فرآیند در شرایط بدون روانکار انجام شد و در نتیجه تغییر شکل برشی شدیدی بر نمونه‌ها اعمال گردید. در نتیجه کرنش اعمال شده به قطعه‌ی ۱۳ گذر نورد تجمعی شده، به دلیل کرنش برشی اضافی، بزرگتر از کرنش اسمی ۱۰/۴ محاسبه شده در بالا است.

۳-۱- تغییرات ریزساختاری

در شکل ۲ ریزساختار سطح مقطع RD-ND قطعات پس از گذرهای مختلف فرآیند نورد تجمعی ارائه شده است. با افزایش تعداد گذرهای فرآیند از طول و ضخامت دانه‌ها کاسته می‌شود. البته نرخ کاهش اندازه‌ی دانه در جهت ضخامت بیشتر از جهت طولی نورد است و دانه‌ها به صورت کشیده شده در جهت نورد در می‌آیند. محاسبه‌ی اندازه‌ی دانه‌ها با روش خطی انجام شد.

توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی با ولتاژ ۲۰kV بررسی و اندازه‌ی دانه با روش خطی محاسبه شد. در این پژوهش به منظور بررسی تغییرات استحکام و شکل‌پذیری ورق، از آزمون کشش تک‌محور با نرخ کرنش $1 \times 10^{-4} s^{-1}$ استفاده شد. نمونه‌های آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM B 557M با سنجه‌ای به طول ۳۲mm و پهنا ۶mm آماده شد. به منظور بررسی ناهمگنی خواص مکانیکی در جهات مختلف، آزمون کشش در سه جهت نورد، جهت عرضی و زاویه‌ی ۴۵° نسبت به جهت نورد انجام شد. همچنین به منظور بررسی توزیع میکروسختی در طول ضخامت ورق‌ها، آزمون میکروسختی در طول ضخامت ورق‌ها به فواصل ۱۰۰ μm انجام شد.

۳- نتایج و بحث

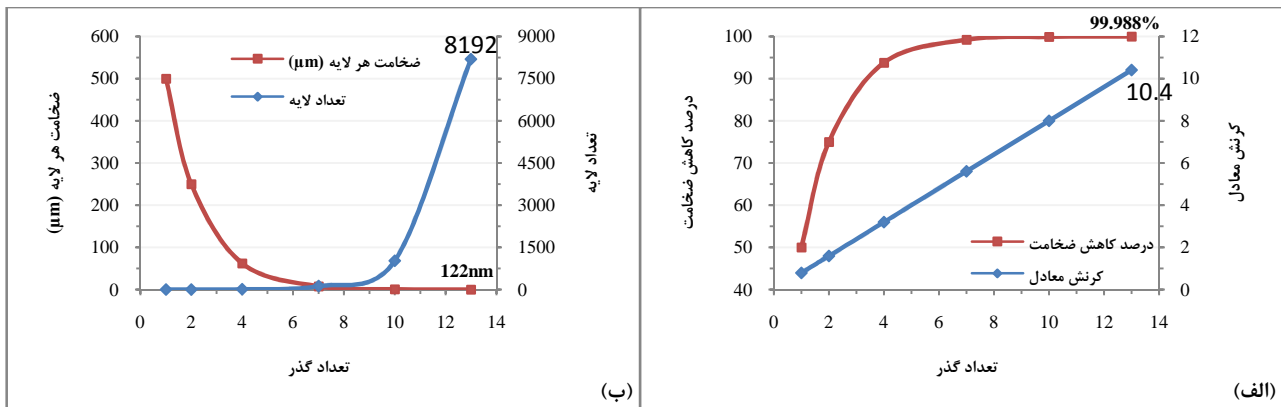
کرنش معادل هر گذر انجام فرآیند نورد تجمعی ۰/۸ است. در نتیجه ورق ۱۳ گذر نورد تجمعی شده تحت کرنش معادل ۱۰/۴ قرار گرفته و کاهش ضخامت کل آن نیز ۹۹/۹۸۸٪ است. تعداد لایه‌های ورق نورد تجمعی شده از رابطه‌ی ۳ⁿ به دست می‌آید (n تعداد گذرهای فرآیند است). در نتیجه ورق ۱۳ گذر

جدول ۱- نتیجه‌ی آنالیز کوانتومتری آلومینیوم استفاده شده در این تحقیق (درصد وزنی عناصر)

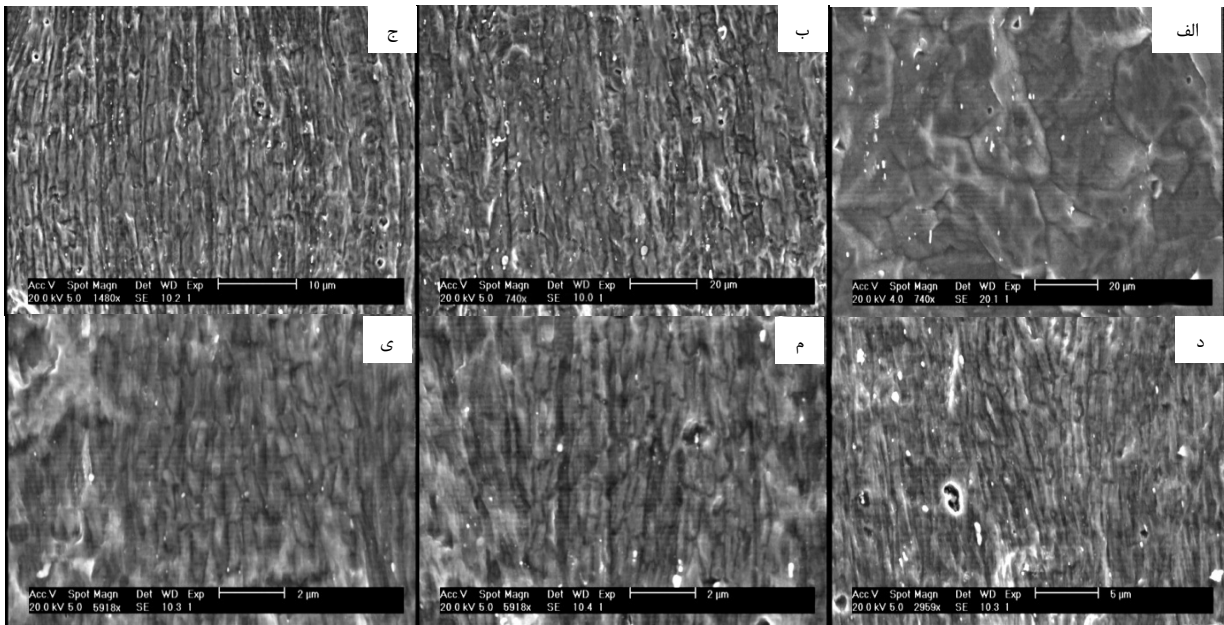
آلیاژ	Al	Si	Fe	Mn	Cr	Ni	Sn	Ti	Pb	Sr	V	Zr
Al 1050	۹۹.۵۴	۰.۱۷۲	۰.۱۵۷	۰.۰۱۰	۰.۰۰۶۶	۰.۰۰۱۹	۰.۰۰۹۳	۰.۰۰۴۴	۰.۰۴۴۷	۰.۰۰۰۲	۰.۰۱۶۴	۰.۰۳۷۱

جدول ۲- ترکیب محلول اچ مورد استفاده در مطالعه‌ی ریزساختاری

عنوان	ترکیب محلول
محلول اچ	۵۰ ml Poulton's reagent + ۲۵ ml HNO ₃ + ۱۲ gr CrO ₃ + ۴۰ ml H ₂ O
واکنشگر Poulton's	۱۲ ml HCl + ۶ ml HNO ₃ + ۱ ml HF + ۱ ml H ₂ O



شکل ۱- نتایج مربوط به (الف) درصد کاهش ضخامت و کرنش معادل و (ب) ضخامت هر لایه و تعداد لایه‌های ورق پس از گذرهای مختلف فرآیند نورد تجمعی



شکل ۲- ریزساختار SEM سطح مقطع RD-ND قطعات پس از (الف) تابکاری، (ب) ۲، (ج) ۴، (د) ۷، (م) ۱۰ و (ی) ۱۳ گذر فرآیند نورد
تجمعی

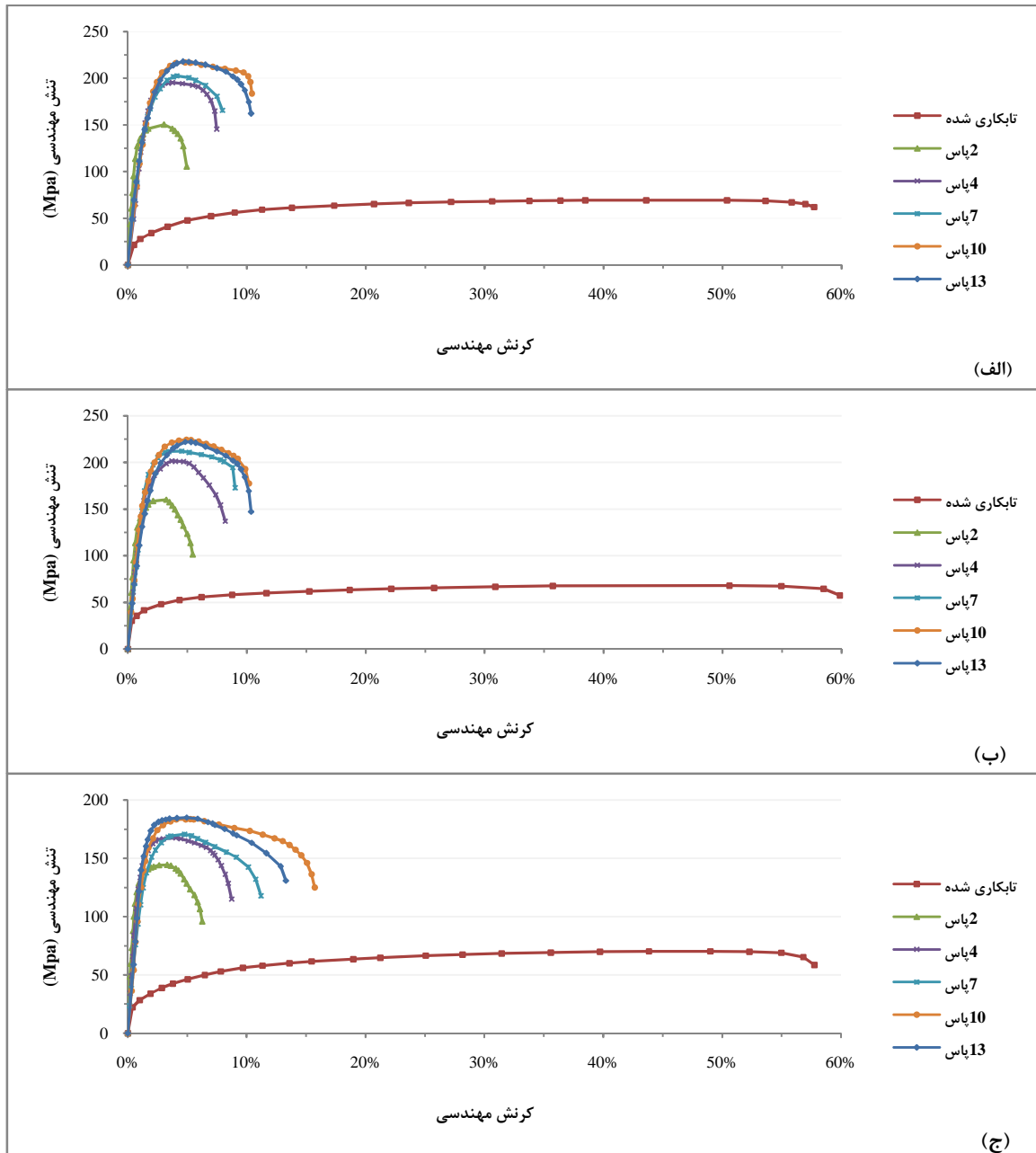
۳-۲- خواص مکانیکی

در شکل ۳ منحنی تنش - کرنش مهندسی قطعات گذرهای مختلف فرآیند نورد تجمعی ارائه شده است. مطابق شکل ۳، نمای کلی منحنی تنش-کرنش در گذرهای مختلف فرآیند مشابه یکدیگر است. در همه‌ی منحنی‌ها تنش به سرعت به حداکثر مقدار خود می‌رسد، سپس گلوبی شدن رخ می‌دهد؛ میزان ازدیاد طول یکنواخت به کمتر از ۰.۶٪ محدود است. در پایان، شکست در ازدیاد طول کمتر از ۰.۱۵٪ به وقوع می‌پیوندد.

ضخامت و طول متوسط دانه‌ها در جدول ۳ آورده شده است. مکانیزم ریز شدن فلز طی فرآیند نورد تجمعی شکل‌گیری نابجایی‌ها در درون دانه‌ها و در ادامه تشکیل دانه‌های فرعی است [۵] و [۱۷]. با افزایش گذرهای فرآیند کم‌کم دانه‌های بسیار ریز کشیده شده در جهت نورد ایجاد شده و بدین ترتیب ساختار ریزدانه شکل می‌گیرد. در گذرهای پایانی ساختار فوق‌العاده ریزدانه با دانه‌هایی با ضخامت نانومتری فلز را فرا می‌گیرد، به طوری که ضخامت میانگین دانه‌ها در گذرسیزدهم به ۴۳۰ nm می‌رسد.

جدول ۳- ضخامت و طول دانه قطعات نورد تجمعی شده

قطعه	تابکاری شده	گذر ۲	گذر ۴	گذر ۷	گذر ۱۰	گذر ۱۳
ضخامت دانه (μm)	۳۵	۴۵	۱٫۸	۱٫۱	۵۰۰ nm	۴۳۰ nm
طول دانه (μm)	۳۳	۱۴	۶٫۱	۳٫۲	۱٫۳	۱٫۱



شکل ۳- منحنی تنش - کرنش مهندسی ورق‌های نورد تجمعی شده: (الف) جهت نورد، (ب) جهت عرضی و (ج) زاویه‌ی ۴۵° نسبت به جهت نورد

در شکل ۴ تغییرات خواص مکانیکی قطعات طی گذرهای مختلف فرآیند نشان داده شده است. در هر سه جهت انجام آزمون کشش، استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم ورق با افزایش گذرهای فرآیند افزایش می‌یابد. سرعت افزایش استحکام در گذرهای اولیه‌ی فرآیند زیاد است. این به دلیل کارسختی ایجاد شده ناشی از افزایش چگالی نابجایی‌ها و تشکیل دانه‌های فرعی نانومتری طی این مراحل است [۲]. نرخ افزایش استحکام در گذرهای میانی کاهش می‌یابد. در این مرحله، تأثیر کرنش-سختی در افزایش استحکام کمتر شده و عمدتاً تکامل تدریجی ریزساختار و شکل‌گیری ساختار فوق‌العاده ریزدانه با ابعاد نانومتری نقش اساسی را در افزایش استحکام دارند [۱] و [۱۷].

در گذرهای پایانی نیز به دلیل وقوع بازبازی و تبلور مجدد دینامیکی و متعاقب آن رشد دانه به دلیل گرم شدن ورق حین فرآیند نورد تجمعی، استحکام قطعه کمی کاهش می‌یابد (بخش ۳-۵). با انجام اولین گذر فرآیند، به دلیل وقوع شرایط ناپایدار پلاستیک ناشی از ساختار ریزدانه‌ی شکل گرفته، میزان ازدیاد طول قطعه به شدت کاهش می‌یابد [۱] و [۲۰]. در ادامه با افزایش گذرهای فرآیند، درصد ازدیاد طول با شیب بسیار کمی افزایش یافته و در گذرهای پایانی تقریباً ثابت می‌ماند.

در هر سه جهت انجام آزمون کشش، استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم ورق با افزایش گذرهای فرآیند افزایش می‌یابد. سرعت افزایش استحکام در گذرهای اولیه‌ی فرآیند زیاد است. این به دلیل کارسختی ایجاد شده ناشی از افزایش چگالی نابجایی‌ها و تشکیل دانه‌های فرعی نانومتری طی این مراحل است [۲]. نرخ افزایش استحکام در گذرهای میانی کاهش می‌یابد. در این مرحله، تأثیر کرنش-سختی در افزایش استحکام کمتر شده و عمدتاً تکامل تدریجی ریزساختار و شکل‌گیری ساختار فوق‌العاده ریزدانه با ابعاد

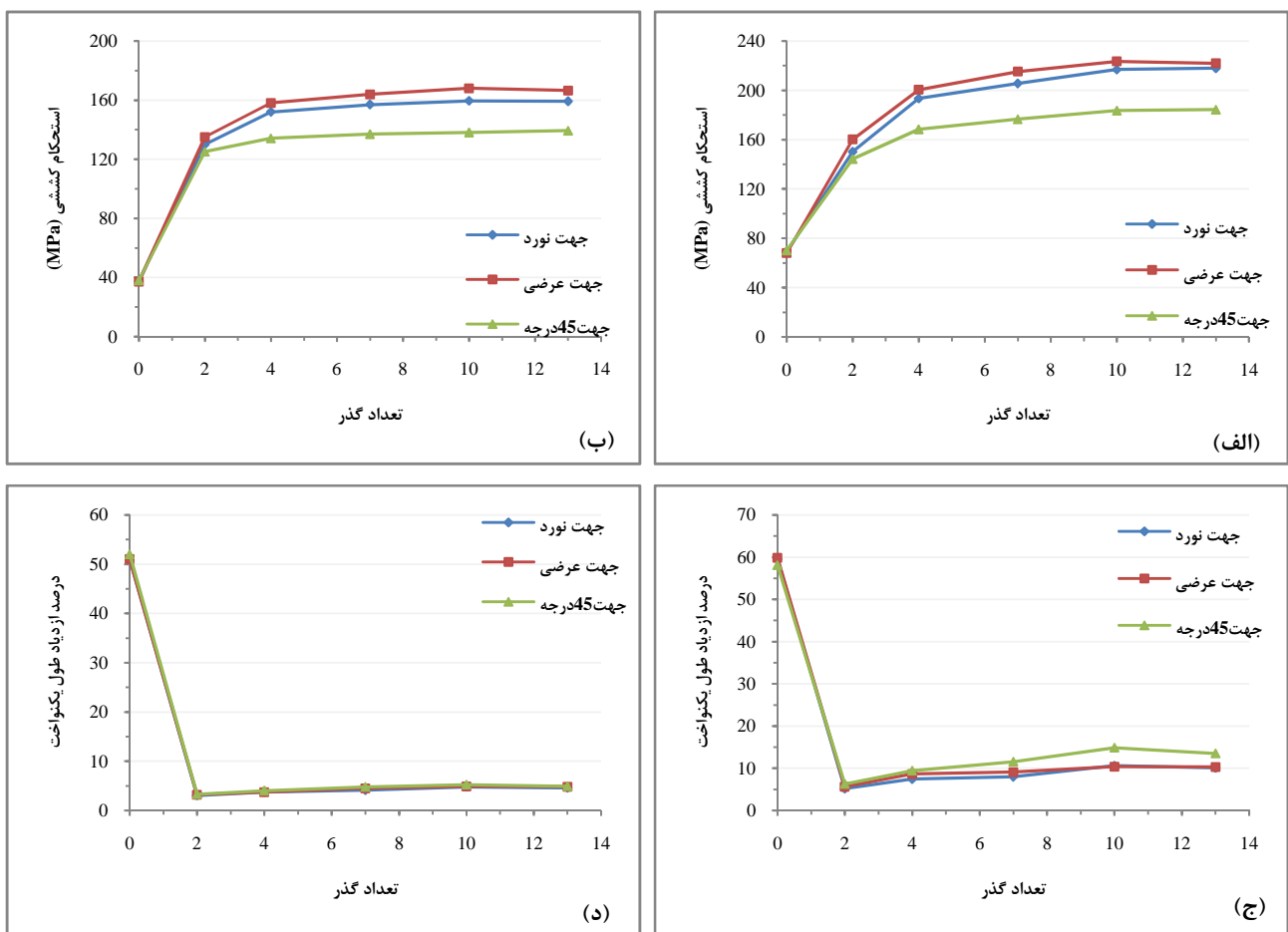
۳-۳- ناهمگنی خواص مکانیکی

به منظور مطالعه‌ی ناهمسانگردی خواص مکانیکی در ورق-های نورد تجمعی شده، آزمون کشش در جهت نورد، جهت عرضی و زاویه‌ی ۴۵° نسبت به جهت نورد انجام گردید. با توجه به شکل ۴ استحکام کششی و تسلیم قطعات در جهت عرضی بیش از جهت نورد است و البته کمترین استحکام مربوط به زاویه‌ی ۴۵° نسبت به جهت نورد است. با انجام فرآیند نورد تجمعی دانه‌ها در جهت نورد کشیده می‌شوند؛ به عبارت دیگر ضخامت دانه‌ها بسیار کمتر از طول دانه است. به همین دلیل استحکام قطعات در جهت عرضی بیش از جهت نورد است.

مطابق شکل ۴ میزان افزایش طول در این سه جهت تفاوت چندانی با هم ندارند؛ فقط در گذرهای بالای فرآیند ازدیاد طول کل در جهت زاویه‌ی ۴۵° بیش از دو جهت دیگر است.

به منظور تعیین میزان ناهمگنی خواص در این سه جهت، از شاخص متغیر (V) که به عنوان نسبت انحراف استاندارد (SD)^۱ به مقدار میانگین پارامتر (X̄) تعریف می‌شود، استفاده شده است.

$$V = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1)$$



شکل ۴- تغییرات (الف) استحکام کششی نهایی، (ب) استحکام تسلیم، (ج) درصد ازدیاد طول کل و (د) ازدیاد طول یکنواخت قطعات حین فرآیند نورد تجمعی

^۱. Standard Deviation

که نشانه‌ای بر ساختار بازبایی شده است. ساختار قطعه در گذر-های پایانی فرآیند شامل مرزهای با زاویه‌ی بزرگ است، اما کسر قابل توجهی از مرزهای با زاویه‌ی کوچک نیز در ساختار موجود می‌باشد. توزیع زوایای ناهم‌جهتی مرزی در ریزساختار ایجاد شده توسط فرآیند نورد تجمعی، توزیع دو نمایی با یک پیک در محل آغازین با مرزهای با زاویه‌ی کوچک و در محل دیگر واقع در انتها با مرزهای زاویه‌ی بزرگ می‌باشد [۲۰]. این توزیع دوگانه به طور واضح اختلاف بین ساختار به وجود آمده در تغییر شکل‌های شدید و ساختار تبلور مجدد یافته را بیان می‌کند. وجود این مقدار از مرزهای با زاویه‌ی کوچک در ساختار به وقوع بازبایی در مراحل پایانی فرآیند نسبت داده می‌شود. کسر بالای مرز دانه با زاویه‌ی کوچک یکی از ویژگی‌های مواد تولید شده با فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید است.

توجه به این نکته ضروری است، که هر چه مقدار تغییر شکل قبلی بیشتر باشد، دمای شروع بازبایی و تبلور مجدد کاهش می‌یابد. از آنجا که در فرآیند نورد تجمعی کرنش و تغییر شکل شدیدی بر نمونه اعمال می‌شود و با توجه به خلوص نسبتاً بالای آلومینیوم استفاده شده در این پژوهش و انرژی نقص چیدمان بالای فلز، امکان وقوع بازبایی و تبلور مجدد دینامیکی حین گذرهای پایانی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر در گذرهای پایانی فرآیند، تعداد سطوح مشترک اتصالی ورق بسیار زیاد می‌شود و در نتیجه ذرات ناخالصی اکسیدی بسیار ریز موجود در این سطوح تمام قطعه را فرا می‌گیرد. این ذرات بسیار ریز ناخالصی مکان مناسبی برای جوانه‌زنی و رشد دانه‌های جدید ناشی از تبلور مجدد حین انجام گذرهای پایانی فرآیند است. نتایج مربوط به آزمون کشش تک‌محور و سختی‌سنجی در شکل ۴ و شکل ۶ در این پژوهش نشان می‌دهد، که استحکام کششی و سختی ورق در گذرهای ابتدایی به سرعت افزایش می‌یابد و در گذرهای میانی تقریباً ثابت است. نکته‌ی مهم و قابل توجه این است که استحکام کششی و سختی ورق پس از ۱۳ گذرنورد تجمعی کمتر از استحکام کششی و سختی قطعه پس از ۱۰ گذرانجام فرآیند است، که این موضوع مؤید وقوع تبلور مجدد دینامیک و متعاقب آن رشد دانه به دلیل گرم شدن ورق در حین فرآیند در گذرهای پایانی است.

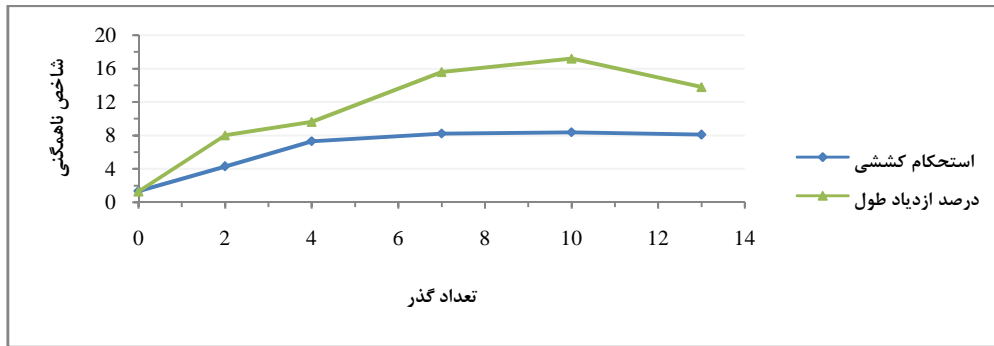
شاخص ناهمگنی استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول کل برای گذرهای مختلف فرآیند اندازه‌گیری و در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، کمترین میزان ناهمگنی مربوط به قطعه‌ی اولیه‌ی تابکاری شده است. با انجام فرآیند نورد تجمعی، درصد ناهمگنی خواص در این سه جهت افزایش می‌یابد. بدین صورت که در گذرهای ابتدایی ناهمگنی خواص مکانیکی در قطعه افزایش می‌یابد، تا در گذر دهم به بیشینه مقدار خود می‌رسد. دلیل این امر افزایش ناهمسانگردی ورق به دلیل تغییرات ریزساختاری حین فرآیند نورد تجمعی است. از گذر دهم تا سیزدهم خواص به سمت همگن شدن پیش می‌رود و از میزان ناهمسانگردی ورق کمی کاسته می‌شود، که به دلیل وقوع تبلور مجدد دینامیکی و جوانه‌زنی و رشد دانه‌های هم‌محور در گذرهای پایانی فرآیند است (بخش ۳-۵). مطابق شکل ۵ میزان ناهمگنی درصد ازدیاد طول قطعات بیش از ناهمگنی استحکام کششی نهایی آنها است.

۳-۴- میکروسختی‌سنجی

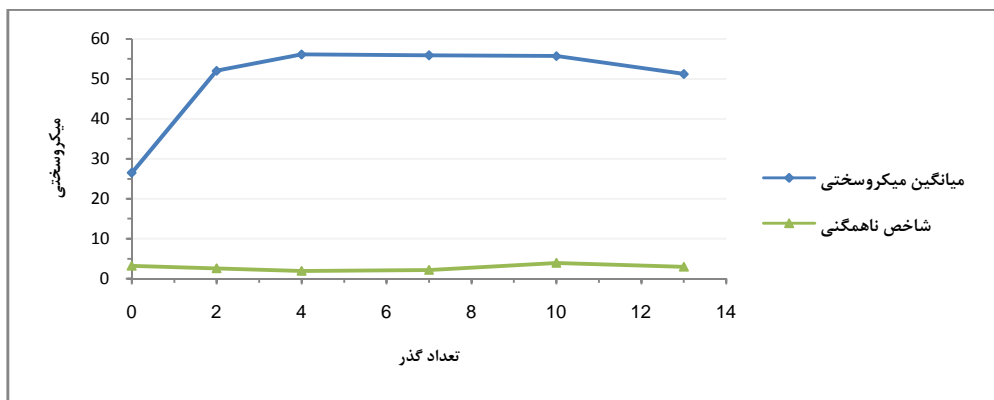
به منظور بررسی موضعی توزیع استحکام در قطعات نورد تجمعی شده، میکروسختی ویکرز در طول ضخامت ورق‌ها اندازه‌گیری شد. میانگین سختی قطعات در طول ضخامت ورق پس از گذرهای مختلف فرآیند در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در گذرهای ابتدایی فرآیند سختی افزایش می‌یابد، اما از گذر چهارم تا دهم تقریباً ثابت است و از آن پس کم‌کم کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل توزیع پیچیده‌ی کرنش برشی و اشباع شدن باندهای برشی در گذرهای بالای فرآیند است. در شکل ۶ درصد شاخص ناهمگنی سختی در امتداد ضخامت ورق نشان داده شده است؛ در همه‌ی گذرهای فرآیند شاخص ناهمگنی سختی کمتر از ۴٪ است، که نشان‌دهنده‌ی یکنواختی توزیع میکروسختی در طول ضخامت ورق است.

۳-۵- بررسی وقوع بازبایی و تبلور مجدد دینامیک

تحقیقات پژوهشگران نشان می‌دهد که در گذرهای پایانی فرآیند نورد تجمعی، نابجایی‌های درون دانه‌ها و دانه‌های فرعی نسبت به گذرهای میانی تقریباً بدون تغییر و ثابت می‌ماند [۲۱]،



شکل ۵- درصد ناهمگنی خواص مکانیکی قطعات نورد تجمعی شده در جهت نورد، جهت عرضی و زاویه‌ی 45° نسبت به جهت نورد



شکل ۶- درصد ناهمگنی و میانگین سختی در امتداد ضخامت ورق پس از گذرهای مختلف فرآیند نورد تجمعی

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ریز ساختار، خواص مکانیکی و ناهمگنی خواص در جهات مختلف آلومینیوم خالص تجاری (AA1050) طی فرآیند نورد تجمعی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر به دست آمده است:

۱. با افزایش تعداد گذرهای فرآیند نورد تجمعی از طول و ضخامت دانه‌ها کاسته می‌شود، به طوری که در گذرهای پایانی فرآیند ساختار فوق‌العاده ریزدانه با دانه‌هایی با ضخامت میانگین نانومتری حاصل می‌شود.

۲. با افزایش گذرهای فرآیند نورد تجمعی استحکام کششی قطعات افزایش می‌یابد. این افزایش در گذرهای اولیه سرعت زیادی دارد، در ادامه با افزایش گذرهای فرآیند نرخ افزایش استحکام کاهش می‌یابد. در گذرهای پایانی نیز استحکام قطعه کمی کاهش می‌یابد. استحکام قطعات کشیده شده در جهت نورد کمتر از استحکام قطعات کشیده شده در جهت عرضی است.

۳. با انجام اولین گذر فرآیند نورد تجمعی، میزان ازدیاد طول قطعه دچار سقوط ناگهانی می‌شود. سپس با افزایش گذرهای فرآیند میزان ازدیاد طول با آهنگ کمی افزایش یافته و در گذر-های پایانی تقریباً ثابت می‌ماند.

۴. با انجام فرآیند نورد تجمعی خواص مکانیکی در قطعه افزایش می‌یابد. همچنین میزان ناهمگنی ازدیاد طول ورق‌های نورد تجمعی شده بیش از ناهمگنی استحکام آنها است.

۵. سختی قطعات در گذرهای ابتدایی فرآیند با سرعت افزایش می‌یابد، در ادامه در گذرهای میانی نرخ افزایش سختی کم می‌شود. در گذرهای پایانی نیز سختی کمی کاهش می‌یابد. همچنین کوچک بودن شاخص ناهمگنی میکروسختی در امتداد ضخامت ورق‌های نورد تجمعی شده، نشان‌دهنده توزیع یکنواخت میکروسختی در طول ضخامت آنها است.

۶. با توجه به تغییر شکل شدید اعمالی بر نمونه و خلوص نسبتاً بالای آلومینیوم مورد استفاده و انرژی نقص چیدمان بالای فلز آلومینیوم، امکان وقوع بازیابی و تبلور مجدد دینامیک حین انجام گذرهای پایانی افزایش می‌یابد. کاهش استحکام و سختی قطعه در گذرهای پایانی مؤید وقوع تبلور مجدد دینامیک و متعاقب آن رشد دانه به دلیل گرم شدن ورق حین فرآیند نورد تجمعی است. ذرات بسیار ریز ناخالصی واقع شده در سطوح مشترک اتصالی، مکان مناسبی برای جوانه‌زنی دانه‌های جدید ناشی از تبلور مجدد حین گذرهای پایانی فرآیند است.

Engineering A, Vol. 530, pp. 63-72, 2011.

[11] Eizadjou, M., KazemiTalachi, A., Danesh Manesh, H., Shakur Shahabi, H., Janghorban, K. "Investigation of structure and mechanical properties of multi-layered Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding (ARB) process", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, pp. 2003-09, 2008.

[12] Chowdhury, S. G., Srivastava, V.C., Ravikumar, B., Soren, S. "Evolution of texture during accumulative roll bonding (ARB) and its comparison with normal cold rolled aluminium-manganese alloy", *Scripta Materialia*, Vol. 54, pp. 1691-96, 2006.

[13] Pasebani, S., Toroghinejad, M.R., Hosseini, M., Szpunar, J., "Textural evolution of nanogained 70/30 brass produced by accumulative roll-bonding", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 2050-56, 2010.

[14] Pasebani, S., Toroghinejad, M.R. "Nano-grained 70/30 brass strip produced by accumulative roll-bonding (ARB) process", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 491-97, 2010.

[15] Wu, K., Chang, H., Maawad, E., Gan, W. M., Brokmeier, H.G., Zheng, M.Y. "Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al laminated composite fabricated by accumulative roll bonding (ARB)", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 3073-78, 2010.

[16] Kolahi, A., Akbarzadeh, A., Barnett, M.R. "Electron back scattered diffraction (EBSD) characterization of warm rolled and accumulative roll bonding (ARB) processed ferrite", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 1436-44, 2009.

[17] Hosseini, S. A., Danesh Manesh, H. "High-strength, high-conductivity ultra-fine grains commercial pure copper produced by ARB process", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 2911-18, 2009.

[18] Tsuji, N., Ito, Y., Saito, Y., Minamino, Y. "Strength and Ductility of Ultrafine Grained Aluminum and Iron Produced by ARB and Annealing", *Scripta Materialia*, Vol. 47, pp. 893-99, 2002.

[19] Roostaei, A. A., Zarei-Hanzaki, A., Abedi, H. R., Rokni, M.R. "An Investigation into the Mechanical Behavior and Microstructural Evolution of the Accumulative Roll Bonded AZ31 Mg Alloy upon Annealing", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 2963-68, 2011.

[20] Kim, H. W., Kang, S. B., Tsuji, N., Minamino, Y. "Elongation increase in ultra-fine grained Al-Fe-Si alloy sheets", *Acta Materialia*, Vol. 53, pp. 1737-49, 2005.

[21] Karlik, M., Homola, P., Slamova, M. "Accumulative roll-bonding: first experience with a twin-roll cast AA8006 alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 378, pp. 322-25, 2004.

۵-سیاسگزاری

مجتبی دهقان از شرکت تولیدی آدا به دلیل همکاری در انجام آزمون‌های کشش تشکر می‌کند. همچنین از حمایت دفتر استعداد درخشان دانشگاه سمنان تقدیر به عمل می‌آورد.

مراجع

[1] Eizadjou, M., Danesh Manesh, H., Janghorban, K. "Microstructure and mechanical properties of ultra-fine grains (UFGs) aluminum strips produced by ARB process", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 474, pp. 406-15, 2009.

[2] Pirgazi, H., Akbarzadeh, A., Petrov, R., Kestens, L. "Microstructure evolution and mechanical properties of AA1100 aluminum sheet processed by accumulative roll bonding", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 497, pp. 132-38, 2008.

[3] Dehghan, M., Qods, F., Gerdooei, M. "Investigation of Microstructure of the Commercial Pure Aluminium in the ARB Process", *Materials Science Forum*, Vol. 702-703, pp. 147-150, 2012.

[4] Kamikawa, N., Huang, X., Tsuji, N., Hansen, N. "Strengthening mechanisms in nanostructured high-purity aluminium deformed to high strain and annealed", *Acta Materialia*, Vol. 57, pp. 4198-4208, 2009.

[5] Lee, S. H., Saito, Y., Sakai, T., Utsunomiya, H. "Microstructures and Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy Processed by Accumulative Roll-Bonding", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 325, pp. 228-35, 2002.

[6] Chung, Y. H., Park, J. W., Lee, K.H. "An Analysis of Accumulated Deformation in the Equal Channel Angular Rolling (ECAR) Process", *Metals and Materials International*, Vol. 4, pp. 289-92, 2006.

[7] Hanazaki, K., Shigeiri, N., Tsuji, N. "Change in Microstructures and Mechanical Properties during Deep Wire Drawing of Copper", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 5699-5707, 2010.

[8] Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D. Y., Micari, F., Lahoti, G. D., Groche, P., Yanagimoto, J., Tsuji, N., Rosochowski, A., Yanagida, A., "Severe Plastic Deformation (SPD) Processes for Metals", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 57, pp. 716-35, 2008.

[9] Utsunomiya, H., Hatsuda, K., Sakai, T., Saito, Y. "Continuous Grain Refinement of Aluminum Strip by Conshearing", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 372, pp. 199-206, 2004.

[10] Nasiri Dehsorkhi, R., Qods, F., Tajally, M. "Investigation on microstructure and mechanical properties of Al-Zn composite during accumulative roll bonding (ARB) process", *Materials Science and*