

## مقایسه ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ ساخته شده توسط فرآیندهای نورد تجمعی (ARB) و آهنگری چند محوره (MAF)

سعید احمدیان<sup>۱</sup>، ابوالفضل رضایی بزاز<sup>۲</sup>، حامد ریحانی<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

در تحقیق حاضر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ ساخته شده توسط فرآیندهای نورد تجمعی (ARB) و آهنگری چند محوره (MAF) مورد بررسی قرار گرفته و با هم مقایسه شده است. ریزساختار مشاهده شده توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری نشان می دهد که دانه های بسیار ریزدانه با اندازه میانگین ۳۰۰-۴۵۰ nm و ۲۰۰-۸۰ به ترتیب در فرآیندهای نورد تجمعی و آهنگری چند محوره تولید شده است. همچنین تنش تسلیم و سختی نیز در آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ پس از ۸ پاس به ۲۱۵MPa و ۶۹/۸VHN در فرآیند ARB و به ۲۶۴MPa و ۸۲/۶VHN در فرآیند MAF افزایش پیدا کرده است. براساس نتایج بدست آمده فرآیند MAF سبب تولید مواد با اندازه دانه های ریزتر و استحکام و سختی بالاتری شده است. می توان دلیل اختلاف خواص ریزساختاری و مکانیکی را در این فرآیندها تحت کرنش یکسان، به تغییر جهت اعمال کرنش بین پاس های فرآیند MAF و انجام فرآیند در دمای محیط مربوط دانست.

واژه های کلیدی: آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰، نورد تجمعی، آهنگری چند محوره، مواد بسیار ریزدانه، ریزساختار، خواص مکانیکی.

<sup>۱</sup> - کارشناس ارشد

<sup>۲</sup> - استادیار

<sup>۳</sup> - کارشناس

## مقايسه ريزساختار و خواص مكانيكي آلياژ آلومينيوم ۱۱۰۰ ساخته شده توسط فرآيند هاي نورد تجمعي (ARB) و آهنگري چند محوره (MAF)

سعید احمدیان<sup>۱</sup>، ابوالفضل رضایی بزازی<sup>۲</sup>، حامد ريحانی<sup>۳</sup>

### چکیده

در تحقيق حاضر ريزساختار و خواص مكانيكي آلياژ آلومينيوم ۱۱۰۰ ساخته شده توسط فرآيند هاي نورد تجمعي (ARB) و آهنگري چند محوره (MAF) مورد بررسي قرار گرفته و با هم مقايسه شده است. ريزساختار مشاهده شده توسط ميكروسكوپ الكتروني عبوري نشان مي دهد كه دانه هاي بسيار ريزدانه با اندازه ميانگين ۴۵۰nm-۳۰۰ و ۲۰۰-۸۰ nm به ترتيب در فرآيند هاي نورد تجمعي و آهنگري چند محوره توليد شده است. همچنين تنش تسليم و سختي نيز در آلياژ آلومينيوم ۱۱۰۰ پس از ۸ پاس به ۲۱۵MPa و ۶۹/۸VHN در فرآيند ARB و به ۲۶۴MPa و ۸۲/۶VHN در فرآيند MAF افزايش پيدا کرده است. براساس نتايج بدست آمده فرآيند MAF سبب توليد مواد با اندازه دانه هاي ريزتر و استحکام و سختي بالاتري شده است. مي توان دليل اختلاف خواص ريزساختاري و مكانيكي را در اين فرآيند ها تحت کرنش يکسان، به تغيير جهت اعمال کرنش بين پاس هاي فرآيند MAF و انجام فرآيند در دماي محيط مربوط دانست.

**واژگان کلیدی:** آلياژ آلومينيوم ۱۱۰۰، نورد تجمعي، آهنگري چند محوره، مواد بسيار ريزدانه، ريزساختار، خواص مكانيكي.

---

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسي مواد، دانشکده مهندسي، دانشگاه فردوسي مشهد (saeed.a6@gmail.com)

۲- استاديار، دانشکده مهندسي مواد، دانشکده مهندسي، دانشگاه فردوسي مشهد

۳- کارشناس، دانشکده مهندسي مواد، دانشکده مهندسي، دانشگاه فردوسي مشهد

**مقدمه:**

در سال های چند دهه اخیر تولید مواد با اندازه دانه های بسیار ریز و نانومتری به دلیل خواص مکانیکی عالی توجه زیادی را در علم مواد به خود جلب کرده است. تنها روش قابل قبول برای تولید این مواد در مقیاس وسیع اعمال تغییر شکل مومسان شدید (Sever Plastic Deformation) می باشد. روش تغییر فرم شدید پلاستیک به عنوان یکی از روشهای تولید مواد با اندازه دانه نانومتری مطرح می باشد [۱]. روش های زیادی مانند فشار در کانال های یکسان زاویه دار (Equal channel angular pressing) [۲ و ۳]، پیچش تحت فشار بالا (High-Pressure Torsion) [۳]، روزنرانی و متراکم سازی متوالی (Cyclic Extrusion and Compression) [۴] و موج دادن و صاف کردن متوالی (Repetitive Corrugation and Straightening) [۵ و ۶] برای اعمال تغییر فرم شدید پلاستیک در مواد فلزی و رسیدن به ساختارهای بسیار ریزدانه پیشنهاد شده اند که در بسیاری موارد با موفقیت همراه بوده اند. ویژگی مشترک و منحصر به فرد این فرآیند، ثابت بودن ابعاد و عدم تغییر شکل ظاهری ماده حین فرآیند می باشد که در نتیجه آن محدودیت در اعمال کرنش از بین می رود و امکان دستیابی به کرنش های بسیار بالا در ماده به راحتی فراهم می شود [۱]. ویژگی دیگر این فرآیندها افزایش استحکام و اصلاح ساختار دانه ها بدون اضافه کردن عناصر آلیاژی می باشد.

فرآیند نورد تجمعی (Accumulative Roll-Bonding) [۷ و ۸] یکی از روشهای جدید اعمال کرنش های مومسان شدید جهت رسیدن به ساختاری با اندازه دانه بسیار ریز در ورق های فلزی، می باشد. این فرآیند شامل مراحل متوالی آماده سازی سطح دو ورق مشابه، قرار دادن آنها روی یکدیگر، نورد همزمان آنها با کاهش ضخامت ۵۰٪ و تولید ورقی با ضخامت اولیه، برش ورق از راستای طولی و انجام مجدد مراحل تا دستیابی به یک کرنش دلخواه است. از آنجایی که ضخامت ورق حین فرآیند ثابت است، محدودیتی در اعمال کرنش وجود ندارد و می توان ورق هایی با اندازه دانه خیلی ریز و استحکام بسیار بالا تولید کرد.

یکی دیگر از روش های تغییر شکل مومسان شدید آهنگری چند محوره (Multi Axial Forging) [۹ و ۱۰] می باشد. در این فرآیند ابتدا نمونه در یک جهت تحت تاثیر نیروی فشاری دچار تغییر شکل مومسان می شود. سپس با تغییر جهت اعمال نیرو این فرآیند تا رسیدن به کرنش های تجمعی بالا تکرار می شود.

هدف از تحقیق حاضر استفاده از فرآیندهای نورد تجمعی و آهنگری چند محوره برای تولید نمونه های آلومینیوم با اندازه دانه زیر میکرونی و مقایسه ویژگی های مواد بسیار ریزدانه از جمله مشخصات ساختاری، خواص مکانیکی در نمونه های تولید شده توسط فرآیند های نورد تجمعی و آهنگری چند محوره می باشد.

## مواد و روش تحقيق

در اين تحقيق از آلومينيوم تجاری خالص (AA1100) به عنوان ماده اوليه استفاده شده است. ماده اوليه به صورت ورق هايی با ابعاد  $200 \times 30 \times 1 \text{ mm}^3$  برای فرآيند نورد تجمعی و شمش هايی با ابعاد  $7/5 \times 14/8 \times 15 \text{ mm}^3$  برای فرآيند آهنگری چند محوره بریده شده اند. نمونه های Al در ابتدا به مدت 1 ساعت در دمای 400-350 درجه سانتیگراد بطور کامل آنیل شده است. آنالیز ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده در این تحقيق در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1. آنالیز ترکیب شیمیایی آلومینیوم خالص تجاری 1100

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ni	Ca
bal.	0.171	0.245	0.055	0.009	0.006	0.025	0.005	0.002	0.011

### فرآیند اتصال نورد تجمعی (ARB)

ورق های آماده شده تحت فرآيند نورد تجمعی قرار گرفتند. برای ایجاد اتصال بين ورق ها، سطح ورق ها توسط استون چربی زدایی شده و توسط برس هايی از جنس فولاد با سیم هايی به قطر  $0/4 \text{ mm}$  برسکاری شدند. سپس ورق ها روی یکدیگر قرار گرفته و با استفاده از سیم های فولادی از دو طرف محکم شدند. ورق های Al پس از آماده سازی سطحی و ثابت شدن به مدت 5 دقیقه در دمای 453 کلوین پیش گرم شده و تحت نورد با 50٪ کاهش سطح مقطع قرار گرفتند. فرآيند نورد تجمعی توسط دستگاه نورد با قطر غلطک  $18 \text{ cm}$  و سرعت  $40 \text{ rpm}$  انجام گرفته است. این فرآيند به تعداد 8 مرحله ( $\mathcal{E} = 6/4$ ) تکرار شده است.

### فرآیند آهنگری چند محوره (MAF)

برای انجام فرآيند آهنگری چند محوره در مرحله اول قالب مناسبی با ابعاد مورد نظر طراحی و ساخته شد. تصویر قالب در شکل 1 نمایش داده شده است. سپس نمونه های آماده شده تا 8 مرحله ( $\mathcal{E} = 6/4$ ) تحت فشار قرار گرفتند. فرآيند آهنگری چند محوره در دمای اتاق و توسط پرس هیدرولیکی  $60 \text{ تنی}$  و با سرعت فک  $25 \text{ mm/s}$  انجام گرفته است. برای ایجاد تغییر شکل یکنواخت در نمونه از روغن به عنوان روانکار استفاده شده است. در این آزمایش ارتفاع نمونه ها درون حفره قالب 50٪ کاهش داده شده و از  $15 \text{ mm}$  به  $7/5 \text{ mm}$  رسیده است. بعد از هر مرحله اعمال فشار دو سطحی از نمونه که آزاد بوده اند، به دلیل بشکه ای شدن، ساییده و صاف

شدند، سپس نمونه چرخانده شده و از محور دیگری تحت فشار قرار گرفته است؛ این فرآیند تا رسیدن به کرنش های بالا تکرار شده است. به این ترتیب اطمینان حاصل می شود که نمونه در هر سه جهت تحت اعمال فشار قرار گرفته است.



شکل ۱. تصویر قالب مورد استفاده در فرآیند آهنگری چند محوره.

## مطالعات ریزساختاری

به منظور بررسی ریزساختار و اندازه دانه ها از میکروسکوپ های نوری و الکترونی عبوری (TEM) استفاده شده است. نمونه های بسیار نازک به صورت دیسک های با قطر ۳mm با استفاده از محلول ۳۳٪ اسید نیتریک و ۶۷٪ متانول در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد و تحت ولتاژ ۲۰۷ الکترو جت پولیش شدند. برای تصویر برداری از میکروسکوپ الکترونی عبوری مدل Leo 912 با ولتاژ ۱۲۰ kv استفاده شده است. الگوی پراش SAD نیز از سطح نمونه تهیه شده است.

## بررسی خواص مکانیکی

به منظور بررسی تغییرات خواص مکانیکی آلومینیوم تحت فرآیندهای نورد تجمعی و آهنگری چند محوره از آزمون های کشش و فشار و سختی سنجی استفاده شده است. آزمون کشش بر روی ورق های نورد تجمعی شده در پاس های مختلف انجام گرفته است. نمونه های آزمون کشش با طول سنجه و پهنای ۵۰ mm و ۱۲/۵ طبق استاندارد ASTM-E-8M از راستای طولی ورق ها تهیه شدند.

به دليل كوچك بودن ابعاد نمونه های توليد شده به روش آهنگری چند محوره امکان انجام آزمون كشش در اين نمونه ها وجود نداشت به همین دليل از آزمون فشار برای اين نمونه ها استفاده شده است. برای اين منظور از درون نمونه های تغيير شكل داده شده تحت کرنش های مختلف نمونه های تست فشار با ابعاد  $10\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  آماده سازی شده اند.

آزمون كشش و فشار به وسيله دستگاه كشش و فشار تک محور Zwick و با آهنگك کرنش اوليه  $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  انجام گرفته است. برای کاهش اصطكاك بين فك دستگاه و نمونه های فشاری از گرافيت به عنوان روانكار استفاده شده است.

## ريز سختی سنجی

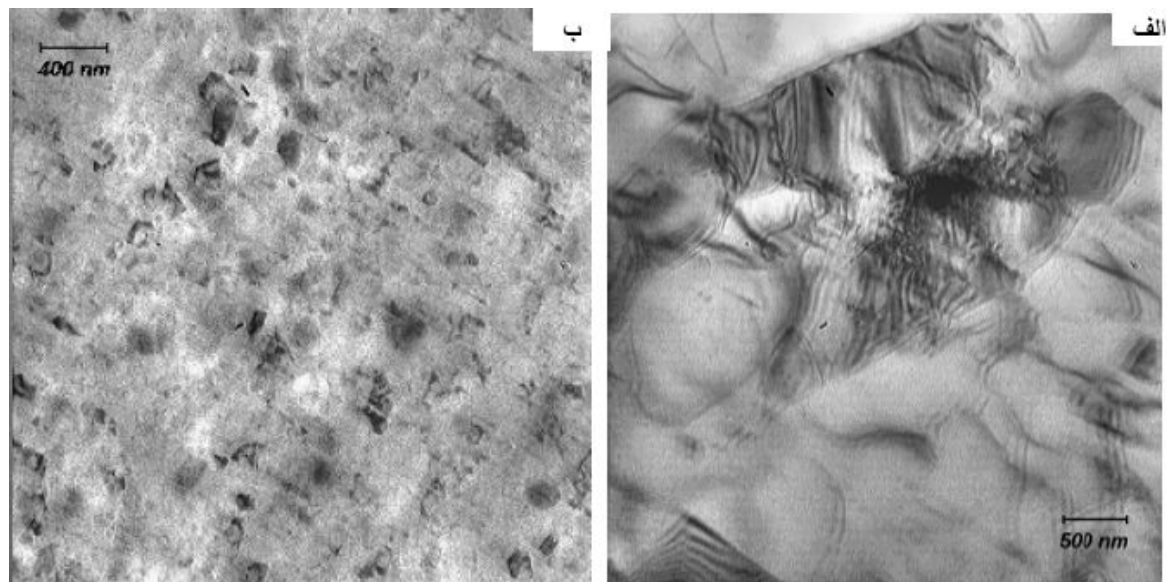
ريز سختی سنجی ويكرز توسط دستگاه Buehler، تحت نیروی ۲۵ گرم و زمان اعمال نیروی ۱۵ ثانيه در راستای عمود بر جهت نورد در نمونه های نورد تجمعی و روی سطح عمود بر آخرين محور اعمال فشار در فرآيند آهنگری چند محوره انجام گرفته است. برای دقت بیشتر سطح هر نمونه به تعداد حداقل ۵ مرتبه از قسمت های مختلف تحت آزمون ريز سختی سنجی قرار گرفته است و ميانگين نتايج بدست آمده به عنوان سختی نمونه گزارش شده است.

## نتايج

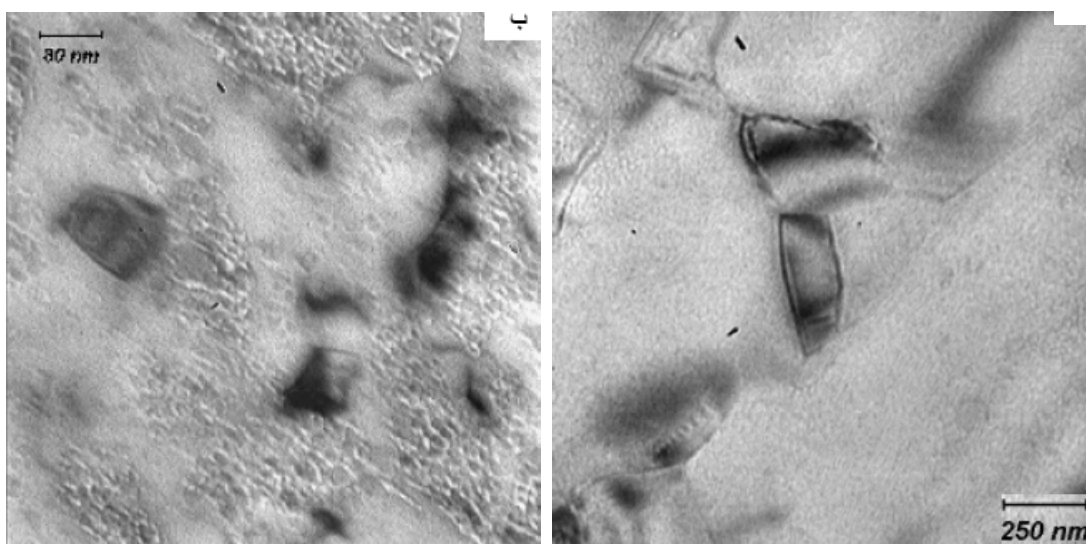
### مشاهدات ريز ساختاری

ريز ساختار TEM بدست آمده از آلياژ آلومينيوم ۱۱۰۰ پس از ۸ پاس فرآيند های نورد تجمعی و آهنگری چند محوره در شكل ۲ نمايش داده شده است. با توجه به شكل ريز ساختار نمونه های آلومينيومی در اثر اين فرآيند ها به شدت اصلاح شده است. همان طور كه مشاهده می شود ريز ساختار نمونه آلومينيومی در فرآيند آهنگری چند محوره دارای اندازه دانه های بسيار كوچكتری نسبت به فرآيند نورد تجمعی می باشد. اندازه متوسط دانه ها و زير دانه های بدست آمده از تصاوير TEM پس از ۸ پاس در فرآيندهای ARB و MAF به ترتيب در حدود  $300\text{--}450\text{ nm}$  و  $80\text{--}150\text{ nm}$  می باشد.

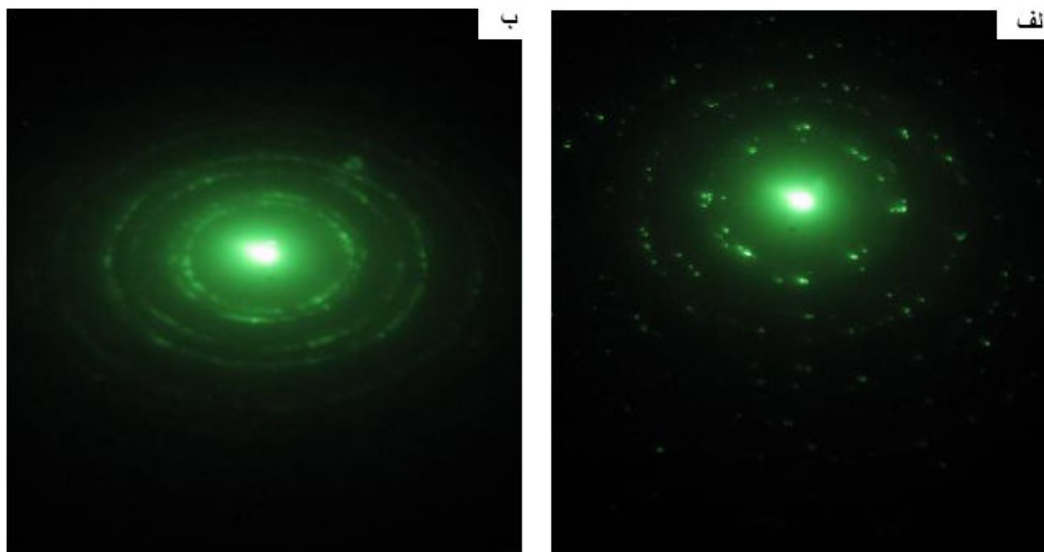
شكل ۳ تصوير بسيار ريز دانه شدن نمونه ها را در بزرگنمایی بیشتر نشان می دهد. همانطور كه مشاهده می شود اندازه دانه ها در حد زيرميكرونی کاهش پيدا کرده اند. همانطور كه در شكل ۳(ب) مشاهده می شود، فرآيند آهنگری چند محوره موفق به ايجاد دانه های با اندازه زير  $100\text{ nm}$  در آلومينيوم ۱۱۰۰ شده است.



شکل ۲. تصویر ریز ساختار TEM آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ پس از ۸ سیکل فرآیند الف) نورد تجمعی (ب) آهنگری چند محوره



شکل ۳. تصویر TEM نمونه که بسیار ریز شدن ساختار را پس از ۸ سیکل فرآیند الف) نورد تجمعی و (ب) آهنگری چند محوره را نشان می دهد.



شکل ۴. الگوی پراش SAD آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ پس از ۸ پاس فرآیند های الف) نورد تجمعی  
ب) آهنگری چند محوره

در شکل ۴ الگوی پراش SAD مربوط به دو فرآیند نورد تجمعی و آهنگری چند محوره نشان داده شده است. الگوهای پراش نیز به خوبی این اصلاح ساختاری را نشان می دهد، حلقه های حاصل از توزیع نقاط تفرق حضور مرزهای با زاویه عدم تطابق بالا و را نشان می دهد. همانطور که در الگوهای پراش نیز مشاهده می شود تاثیر فرآیند آهنگری چند محوره در اصلاح ساختار بیشتر از فرآیند نورد تجمعی بوده است.

### بررسی خواص مکانیکی

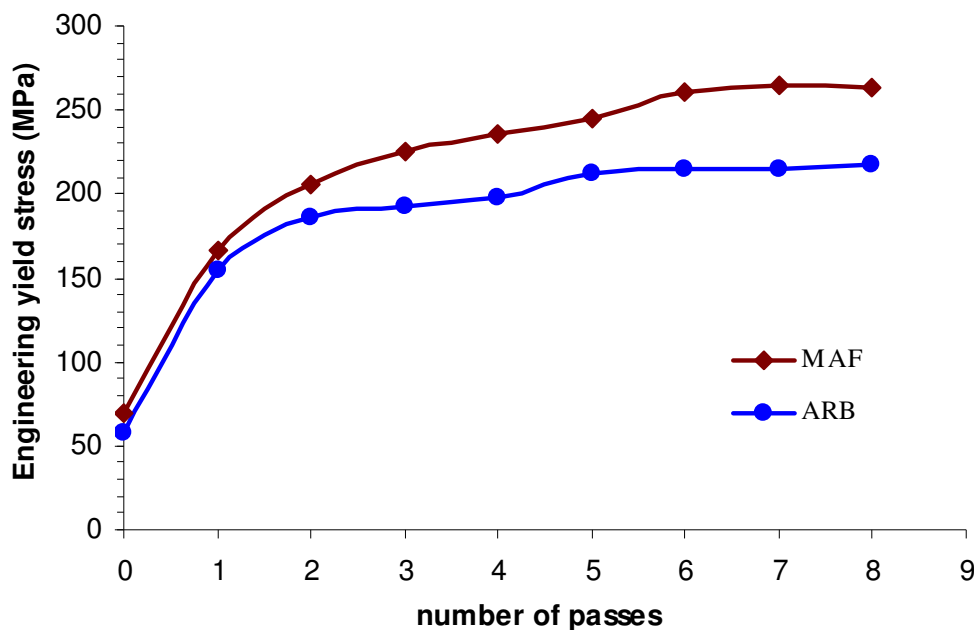
در شکل ۵ نمودارهای تغییرات تنش تسلیم نمونه ها در گام های مختلف برای دو فرآیند نورد تجمعی و آهنگری چند محوره نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود استحکام تسلیم با افزایش کرنش اعمالی به ماده افزایش می یابد. بیشترین تغییرات استحکام در مرحله اول حاصل شده است که در هر دو فرآیند ARB و MAF مقدار استحکام نسبت به استحکام اولیه در حدود ۲/۵ برابر افزایش یافته است. در مراحل بعدی استحکام با افزایش کرنش اعمالی به نمونه، با نرخ کمتری افزایش می یابد. استحکام تسلیم در سیکل ۸ به بیشترین مقدار خود می رسد. مطابق شکل استحکام تسلیم در فرآیند ARB از مقدار اولیه MPa ۵۸ به ۲۱۵ MPa و در فرآیند MAF از مقدار اولیه MPa ۶۸/۸ به ۲۶۴ MPa در سیکل ۸ می رسد؛ که تقریباً ۳/۷ برابر مقدار اولیه آنها می باشد.



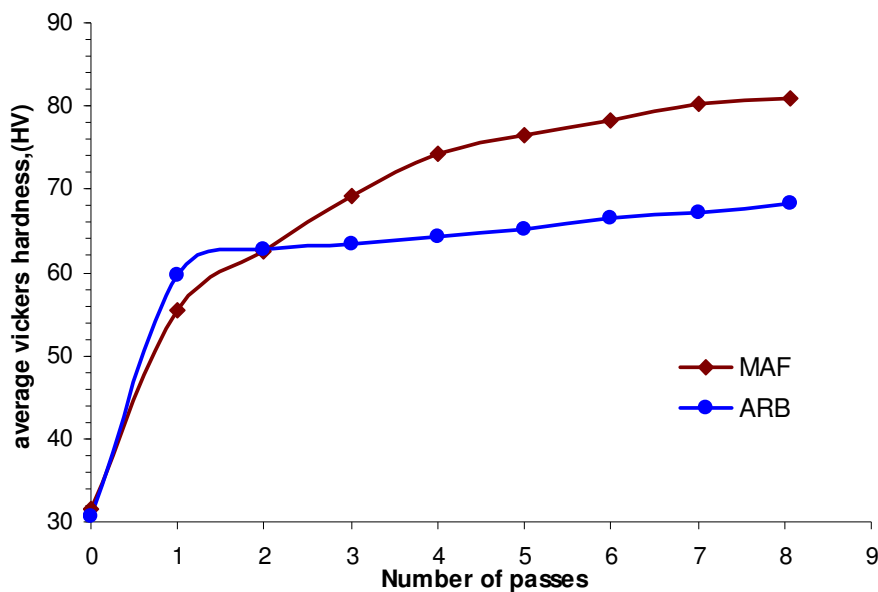
در بررسی خواص مکانیکی نمونه های تولید شده به روش ARB و MAF آزمایش ریز سختی سنجی بر روی نمونه ها انجام گرفته است. برای افزایش دقت عدد سختی از قسمت های مختلف نمونه گرفته شده و میانگین اندازه گیری ها در هر سیکل به عنوان سختی نمونه در شکل ۶ نمایش داده شده است.

همانطور که مشاهده می شود با افزایش تعداد سیکل ها و میزان کرنش اعمالی به نمونه سختی افزایش می یابد. مطابق شکل سختی نمونه ها پس از ۸ پاس از مقدار اولیه  $30/7\text{VHN}$  به  $69/8\text{VHN}$  در فرآیند ARB و از مقدار اولیه  $31,5\text{VHN}$  به  $82/6\text{VHN}$  در فرآیند MAF افزایش یافته است. بیشترین افزایش سختی در نمونه ها مانند استحکام در مرحله اول به وجود آمده است و سختی در سیکل های بعدی با نرخ کمتری افزایش یافته است.

اطلاعات بدست آمده از تنش تسلیم و ریزسختی سنجی نمونه های مربوط به این دو فرآیند نیز به خوبی نتایج بدست آمده در بررسی های ریزساختاری را تایید می کند. با توجه به شکل های ۵ و ۶ تنش تسلیم و سختی در فرآیند MAF نسبت به ARB افزایش بیشتری یافته است که نشان دهنده اصلاح ریزساختاری شدیدتر فرآیند MAF می باشد.



شکل ۵. تغییرات تنش تسلیم بر اساس افزایش کرنش در فرآیند های ARB و MAF در پاس های مختلف.



شکل ۶. تغییرات ریزسختی براساس افزایش کرنش تحت فرآیند های ARB و MAF در پاس های مختلف.

## بحث

بررسی های انجام شده توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری و الگوی پراش نشان دهنده کاهش شدید اندازه دانه های آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ ضمن فرآیند های نورد تجمعی و آهنگری چند محوره می باشد. نتایج به دست آمده از TEM نشان می دهد که فرآیند های نورد تجمعی و آهنگری چند محوره با موفقیت آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ با اندازه دانه های زیر میکرونی را تولید نموده اند.

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، متوسط اندازه دانه های حاصل از فرآیند آهنگری چند محوره کمتر از فرآیند نورد تجمعی می باشد. با توجه به اینکه در هر دو فرآیند از ماده اولیه یکسان، آلومینیوم ۱۱۰۰، استفاده شده است و میزان کرنش اعمالی در هر پاس نیز برای هر دو فرآیند با هم برابر،  $\epsilon = 0.8$ ، است بنابراین باید وجود اختلاف در ریزساختار را در ماهیت این فرآیند ها جستجو نمود. با توجه به مکانیزم های بیان شده توسط محققین [۱۱]، به نظر می رسد که تغییر محور اعمال کرنش بین هر پاس از فرآیند آهنگری چند محوره و فعال شدن سیستم های لغزش در جهت های مختلف و در نتیجه برخورد آنها با یکدیگر، می تواند یکی از دلایل شکل گیری ریزساختار یکنواخت تر و با متوسط اندازه دانه های کمتر نسبت به فرآیند نورد تجمعی باشد.

پارامتر دیگری که در اختلاف ریزساختار حاصل از این دو فرآیند می تواند موثر باشد دمای انجام فرآیند می باشد. به طوریکه برای ایجاد اتصال مناسب بین لایه های آلومینیوم قبل از هر پاس یک مرحله پیش گرم روی ورق ها انجام گرفته است در حالیکه اعمال کرنش های مومسان شدید در فرآیند آهنگری چند محوره در دمای محیط و بدون افزایش دمای نمونه صورت گرفته است. این افزایش دما می تواند سبب مهاجرت دامنه کوتاه مرزدانه ها<sup>۱</sup> حین نورد شود. خواص در مواد بسیار ریزدانه همین مهاجرت دامنه کوتاه مرزها می تواند ریزساختار را به میزان قابل توجهی تغییر دهد. این اثر در ریزساختار مواد بسیار ریزدانه بسیار مهم است زیرا مهاجرت مرزدانه فقط در حد چند صد نانومتر می تواند ریزساختار را شدیداً تغییر دهد [۱۲].

مقایسه الگوی پراش حاصل از نمونه های تغییر شکل مومسان شدید داده شده پس از ۸ پاس فرآیند های نورد تجمعی و آهنگری چند محوره (شکل ۴) نیز به خوبی این اختلاف ریزساختار را نشان می دهد. مطابق شکل الگوی پراش نمونه آهنگری چند محوره پس از ۸ پاس دارای نقاط تفرق بسیار زیادی به صورت حلقه می باشند. وجود چنین الگویی حضور مرزهای با اختلاف جهت بلوری زیاد و ریز شدن شدید اندازه دانه ها را تایید می کند.

در شکل ۵ استحکام تسلیم نمونه های تغییر شکل مومسان شدید داده شده تحت فرآیند های نورد تجمعی و آهنگری چند محوره با هم مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود نمونه های تولید شده به روش آهنگری چند محوره داری استحکام تسلیم بالاتری می باشند. با توجه به ریزساختار حاصل از TEM و الگوی پراش نمونه ها تحت فرآیند های نورد تجمعی و آهنگری چند محوره افزایش استحکام به دلیل ریز دانه تر شدن نمونه ها تحت فرآیند آهنگری چند محوره نسبت به فرآیند نورد تجمعی می باشد.

نتایج حاصل از تغییرات سختی نمونه های آلومینیوم ۱۱۰۰ تحت فرآیند های نورد تجمعی و آهنگری چند محوره در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش کرنش اعمالی تغییرات سختی نمونه ها تحت هر دو فرآیند رفتار مشابهی را نشان می دهد. همانگونه که از مقایسه نتایج حاصل از تغییرات

ريزساختار و استحکام فرآيند های نورد تجمعی و آهنگری چند محوره مشاهده شده است انتظار می رود که سختی نیز در نمونه های توليد شده توسط فرآيند آهنگری چند محوره بیشتر باشد (شکل ۶).

بیشترین افزایش سختی در مرحله اول فرآيند ها مشاهده می شود. در پاس های بعدی نرخ افزایش سختی کاهش می یابد و در پاس های بالاتر سختی تقریباً ثابت باقی می ماند. افزایش سریع سختی در کرنش های نسبتاً پایین به نرخ کارسختی بالای مواد نسبت داده شده است [۱۳]. افزایش چگالی نابجایی ها و تشکیل باندهای لغزشی در کرنش های کم تاثیر قابل توجهی بر سختی خواهد داشت.

تغییرات کم سختی یا به عبارتی ثابت بودن تقریبی آن را در کرنش های بالا می توان به تاثیر فرآيند های بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی در این مراحل نسبت داد. همانطور که بیان شد در کرنش های بالا با افزایش تعداد مرزهای زاویه بزرگ و ریز شدن اندازه دانه سرعت فرآيند بازیابی در مرزدانه ها و گسترش لغزش های مرزدانه ای بیشتر می شود که می تواند دليل عدم مشاهده کارسختی در طی تغییر شکل فلزات بسیار ریز دانه باشد [۱۴]. در واقع در کرنش های بالا یک حالت یکنواخت بین توليد نابجایی ها ضمن تغییر شکل مومسان و حذف آنها در اثر بازیابی دینامیکی وجود دارد [۱۵].

## نتیجه گیری

۱. اعمال کرنش به وسیله فرآيند های تغییر شکل مومسان شدید نورد تجمعی و آهنگری چند محوره در آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ ماده ای با اندازه دانه های بسیار ریز توليد کرده است. در این فرآيند ها با ۵۰٪ کاهش ارتفاع و تکرار اعمال کرنش امکان رسیدن به کرنش های بسیار بالا وجود دارد.

۲. متوسط اندازه دانه ها و زیردانه ها در فرآيند های نورد تجمعی و آهنگری چند محوره به ترتیب حدود ۳۰۰-۴۵۰ nm و ۸۰-۲۰۰ nm بدست آمده است. ریز ساختار توليد شده توسط فرآيند آهنگری چند محوره دارای اندازه دانه های کوچکتری نسبت به فرآيند نورد تجمعی می باشد، دليل این اختلاف را می توان به انجام فرآيند آهنگری چند محوره در دمای محیط و تغییر جهت اعمال کرنش در بین هر گام مربوط دانست.

۳. تصویر TEM ریزساختار نمونه تحت فرآيند آهنگری چند محوره تعداد زیادی دانه های با اندازه زیر ۱۰۰ میکرون را نشان می دهد بنابراین این فرآيند MAF موفق به توليد نانو ساختار در آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ شده است.

۴. استحکام تسلیم و ریزسختی نمونه ها با افزایش تعداد سیکل ها افزایش یافته است. استحکام تسلیم پس از ۸ سیکل به ۲۱۵ Mpa در نورد تجمعی و ۲۶۴Mpa در آهنگری چند محوره رسیده است که بیشتر از ۳/۷ برابر مقدار اولیه آنها می باشد. همچنین سختی نیز به ترتیب به ۶۹/۸VHN و ۸۲/۶ VHN در دو فرآیند رسیده است.

## مراجع

- [1] R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov, "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation", *Progress in Materials Science*, 45, 2000, 103-189.
- [2] T.G. Langdon, "The processing of ultrafine-grained materials through the application of severe plastic deformation", *Material Science*, 42, 2007, 3388-3397.
- [3] R.Z. Valiev, "Recent Progress in Developing Bulk Nanostructured SPD Materials With Unique properties". *Solid State Phenomena*, 101-102, 2005, 3-12.
- [4] J. Richert and M. Richert, "A new method for unlimited deformation of metals and alloys", *Aluminium*, 62, 1986, 604-607.
- [5] J. Huang, Y.T. Zhu, D.J. Alexander, X. Liao, T.C. Lowe, R.J. Asaro, "Development of repetitive corrugation and straightening", *Materials Science and Engineering*, 371, 2004, 35-39.
- [6] K. Peng, L. Su, L.L. Shaw, K.W. Qian, "Grain refinement and crack prevention in constrained groove pressing of two-phase Cu-Zn alloys", *Scripta Materialia*, 56, 2007, 987-990.
- [7] Y. SAITO, H. UTSUNOMIYA, N. TSUJI, T. SAKAI, "novel Ultra-High straining process for bulk materials development of the Accumulative Roll-Bonding (ARB) process", *Acta materialia*. 47, 1999, 579-583.
- [8] X. Huang, N. Tsuji, N. Hansen, Y. Minamino, "Microstructural evolution during accumulative roll-bonding of commercial purity aluminum", *Materials Science and Engineering*, 340, 2003, 265-271.
- [9] B. Cherukuri, T.S. Nedkova, R. Srinivasan, "A comparison of the properties of SPD-processed AA-6061 by equal-channel angular pressing, multi-axial compressions/forgings and accumulative roll bonding", *Materials Science and Engineering*, 410-411, 2005, 394-397.
- [10] A. Kundu, R. Kapoor, R. Tewari and J.K. Chakravarty, "Severe plastic deformation of copper using multiple compression in a channel die", *Scripta Materialia*, 58, 2008, 235-238.
- [11] J. Huang, Z. Xu, "Evolution mechanism of grain refinement based on dynamic recrystallization in multi-axially forged austenite", *Mater. Lett.* 60, 2006, 1854-1858.
- [12] N. Tsuji, T. Toyoda, Y. Minamino, Y. Koizumi, T. Yamane, M. Komatsu, M. Kiritani, "Microstructural change of ultrafine-grained aluminum during highspeed plastic deformation", *Materials Science and Engineering*, 350, 2003, 108-116.
- [13] K.T. Park, H.J. Kwon, W.J. Kim and Y.S. Kim, "Microstructural characteristics and thermal stability of ultra fine grained 6061 Al alloy fabricated by accumulative roll-bonding process", *Materials Science and Engineering*, 316, 2001, 145-152.
- [14] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai and R.G. Hong, "ULTRA-FINE GRAINED BULK ALUMINUM PRODUCED BY ACCUMULATIVE ROLL-BONDING (ARB) PROCESS", *Scripta Materialia*, 39, 1998, 1221-1227.
- [15] J. Gubicza, N. Q. Chinh, T. Csanádi, T. G. Longdon and T. Unár, "Microstructure and strength of severely deformed fcc metals", *Materials Science and Engineering A*, 462, 2007, 86-90.

## Comparison of the Microstructural and Mechanical Properties of 1100 Aluminum Alloy produced by Accumulative Roll-Bonding (ARB) and Multi Axial Forging (MAF)

S. Ahmadian<sup>1</sup>, A.R. Bazaz<sup>2</sup>, H. Reyhani<sup>3</sup>

### Abstract

In this study Microstructural and Mechanical Properties of 1100 Aluminum alloy produced by Accumulative Roll Bonding (ARB) and Multi Axial Forging (MAF) were investigated and compared. TEM investigation and corresponding SAD patterns shows that ultra-fine grained having mean grain size of 300-450nm and 80-200 nm was successfully produced by ARB and MAF processes respectively. The yield stress and hardness of 1100 alloy increase with the number of passes, and after eight cycles they reach the maximum of 215 MPa and 69.8 VHN for ARB process and 264 MPa and 82.6 VHN for MAF process. According the results, the materials produced by MAF process have a finer grains with more straight and hardness in compare with ARB process. Production of MAF samples with Changing the axis of the applied strain at ambient temperature can result of this difference.

**Keywords:** 1100 Aluminum alloy, Accumulative roll-bonding, Multi Axial Forging, Ultra-fine materials, Microstructure, Mechanical properties.

---

1- M. Sc. Student, Material Science and Eng. Dept., School of Eng. , Ferdowsi University of Mashhad. (saeed.a6@gmail.com)

2- Assistant Professor, Material Science and Eng. Dept., School of Eng., Ferdowsi University of Mashhad.

3- B. Student, Material Science and Eng. Dept., School of Eng. , Ferdowsi University of Mashhad.