

Research Paper

Study and Comparison of Simple Shear Extrusion and Accumulative Roll Bonding Processes in Improving the Mechanical and Structural Properties of Copper

Amir Hossein Eslami¹, Mostafa Balali², *Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi³

1- PhD Student, Mechanical Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran.

2- PhD Student, Mechanical Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran.

3- Associate Professor, Mechanical Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran.

Citation: Eslami A. H. Balali M, Seyedkashi S.M.H. Study and Comparison of Simple Shear Extrusion and Accumulative Roll Bonding Processes in Improving the Mechanical and Structural Properties of Copper. *Metallurgical Engineering* 2018; 21(2): 118-128 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.82259.1174>

 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.82259.1174>

ABSTRACT

Techniques of severe plastic deformation have been of continual interest in the production of novel metallic microstructures. Among these, accumulative roll bonding and simple shear extrusion have been extensively used in modern industry. In severe plastic deformations, applied strains have higher values than usual forming methods. Accumulative roll-bonding (ARB) and simple shear extrusion (SSE) processes are two severe plastic deformation processes capable of developing nanostructures. In this research, pure commercial copper was processed with ARB and SSE processes to obtain nanostructure and improve its structure, strength and hardness. Five passes of extrusion and seven passes of rolling were applied on the specimens with the same conditions. After preparing the specimens using both methods, mechanical and structural analyses were performed to evaluate the properties. Mechanical properties were measured using standard tensile and hardness tests. The results show that hardness, yield strength and ultimate tensile strength of the extruded and rolled specimens are increased by increasing the number of cycles. It was concluded that mechanical and structural properties of the specimens produced under ARB conditions appear to be better than SSE process. The layers structures were also studied by optical microscopy.

Keywords: Accumulative roll bonding, Simple shear extrusion, Multilayer copper composite, Mechanical properties.

■ ■

* *Corresponding Author:*

Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi, PhD

Address: Mechanical Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran.

Tel: +98 (9124227972)

E-mail: Seyedkashi@birjand.ac.ir

مطالعه و مقایسه روشهای اکستروژن برشی ساده و اتصال نورد تجمعی در بهبود خواص مکانیکی و ساختاری مس

امیر حسین اسلامی^۱، مصطفی بلالی^۲، سید محمد حسین سیدکاشی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

چکیده

فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید از جمله فرایندهایی هستند که در چند دهه اخیر بسیار مورد توجه محققین واقع شده‌اند. در تغییرشکل‌های پلاستیک شدید کرنش اعمالی مقدار بالاتری نسبت به فرایندهای معمولی تغییرشکل دارد که بسته به نوع تغییرشکل این مقدار متغیر می‌باشد. اکستروژن برشی ساده (SSE) و نورد تجمعی (ARB) از جمله فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید برای دستیابی به ساختارهای نانومتری هستند. در پژوهش حاضر به منظور تکامل ساختار، ایجاد ساختار ریز دانه، بهبود و افزایش استحکام و سختی، مس خالص تجاری تحت فرآیند ARB و SSE قرار گرفت. تعداد پنج پاس نیروی پرس و هفت مرحله نورد تحت شرایط یکسان در دمای محیط بر نمونه‌ها اعمال گردید. پس از تهیه نمونه‌های فرآوری شده با استفاده از دو روش فوق، آنالیز ساختاری و مکانیکی در مراحل مختلف فرایند به منظور بررسی خواص انجام شد. خواص مکانیکی نمونه‌های استاندارد تهیه شده با انجام آزمون‌های سختی و کشش ارزیابی شد. آزمایش‌ها نشان دادند که سختی، تنش تسلیم و استحکام با افزایش مراحل ARB و SSE بطور چشمگیری افزایش می‌یابند. همچنین نتایج بیانگر آن بود که نمونه‌های فرآوری شده با استفاده از روش ARB از لحاظ مشخصات ریزساختاری و رفتار مکانیکی دارای خواص بهتر و بارزتری نسبت به روش SSE می‌باشد. ساختار لایه‌ای نیز با استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی شد.

واژه‌های کلیدی: اتصال نورد تجمعی، اکستروژن برشی ساده، کامپوزیت لایه ای مس، خواص مکانیکی.

۱. مقدمه

صنایع زیربسط در حال گذر از آزمایشگاه به صنعت هستند. فرایندهای ویژه مانند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار (ECAP)^۱، اکستروژن-فشار سیکلی (CEC)^۲، پیچش تحت فشارهای بالا (HPT)^۳، اتصال نورد تجمعی (ARB)^۴، آهنگری چند محوره (MAF)^۵ و اکستروژن برشی ساده^۶ (SSE) نمونه‌هایی از فرایندهای تغییرشکل پلاستیکی شدید شناخته شده می‌باشند [۵-۲]. در دهه اخیر، با توسعه روز افزون صنایع الکترونیک، نیاز به آلیاژهای مس که استحکام و قدرت هدایت الکتریسیته بالا دارند به شدت افزایش یافته است. عموماً، افزایش استحکام مس با عناصر آلیاژی، کاهش هدایت الکتریکی را به دنبال دارد. برای غلبه بر این نقص در

در سالهای اخیر، بررسی روش‌های تولید و خواص مکانیکی مواد با اندازه دانه بسیار ریزدانه (کمتر از یک میکرون) موضوع بسیاری از تحقیقات انجام شده در زمینه علم مواد و علوم پیرامون آن بوده است. روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید برای تولید مواد فوق ریزدانه یا حتی نانو ساختار بدون ناخالصی و تخلخل بسیار مورد علاقه است. اصول فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید شامل افزایش چگالی نابجایی‌ها، تشکیل دیواره نابجایی متراکم و دست یابی به ساختار فوق ریز یا در مقیاس نانو است [۱]. مواد تولید شده به وسیله تغییرشکل پلاستیک شدید از اهمیت زیادی برخوردار هستند، زیرا دارای ساختار غیر متخلخل، خواص مکانیکی مناسب مانند استحکام و چقرمگی بالا و ابعاد مناسب برای آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی می‌باشند. همه روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید با سرعت زیادی در حال گسترش‌اند و بر حسب نیاز بشر و

1. Equal Channel Angular Pressing
2. Cyclic Extrusion-Compression
3. High Pressure Torsion
4. Accumulative Roll Bonding
5. Multi Axial Forging
6. Simple Shear Extrusion

* نویسنده مسئول:

دکتر سید محمد حسین سیدکاشی

نشانی: بیرجند، دانشگاه بیرجند، دانشکده مهندسی.

تلفن: (۹۱۲۴۲۲۷۹۷۲) ۹۸+

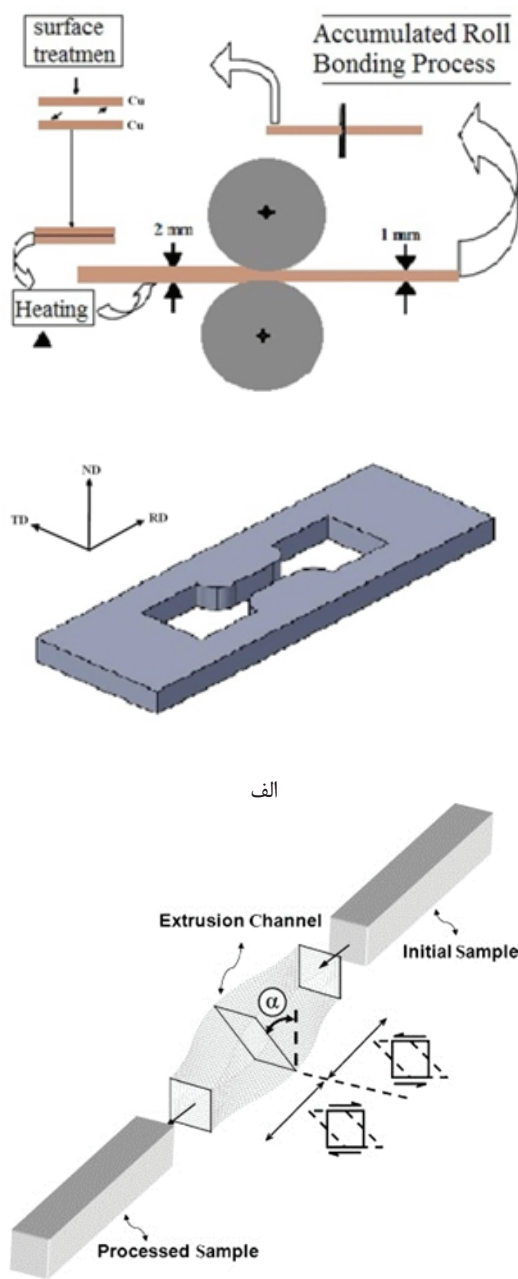
پست الکترونیکی: Seyedkashi@birjand.ac.ir

در دمای بالا ولی زیر دمای تبلور مجدد، انجام می‌شود. معمولاً میزان کاهش ضخامت اعمال شده در این مرحله ۵۰ درصد است که در نتیجه آن ورق حاصل ضخامتی برابر ضخامت ورق اولیه خواهد داشت. عدم تغییر ابعاد نمونه حین اعمال کرنش در تمام فرایندهای تغییرشکل شدید پلاستیکی باعث ایجاد تغییرات ریزساختاری عمده‌ای در نمونه‌ها می‌شود. در بیشتر موارد گزارش شده است که مکانیزم‌های مختلفی در کاهش اندازه دانه‌ها و تغییرات ریزساختاری حین اعمال فرایندهای مذکور مؤثر هستند.

در مورد فرایند ARB دیده شده است که فشرده شدن دانه‌ها به شکل دانه‌های پهن شده در کرنش‌های نسبتاً کم منجر به ایجاد ساختاری لایه‌ای شکل از دانه‌های کشیده شده می‌شود [۷-۸]. تبدیل مرزهای فرعی با زاویه کوچک به مرزهایی با زاویه بزرگتر، مکانیزم حاکم در کرنش‌های متوسط است که یک ساختار لایه‌ای بسیار ریز در نمونه‌ها ایجاد می‌کند. مکانیزم بعدی که در کرنش‌های بالا باعث شکل‌گیری ریزساختاری از دانه‌های نانومتری می‌شود، شکسته شدن دانه‌های کشیده شده و تبدیل آنها به دانه‌های هم محورتر بسیار ریز است. در تمام موارد بعد از اعمال مقدار زیادی کرنش پلاستیک به نمونه فلزی، اندازه دانه‌ها به طرز قابل ملاحظه‌ای تا اندازه‌های نانومتری کاهش می‌یابد. همزمان با کاهش اندازه دانه‌ها در نمونه‌های فلزی، خواص مکانیکی فلز نیز بهبود چشمگیری می‌یابد. استحکام کششی نمونه‌های فلزی مختلف تولید شده به روش ARB تا بیش از سه برابر مقادیر اولیه افزایش یافته است. در مورد ورق‌های آلومینیومی تولید شده به روش ARB، استحکام کششی ورق‌ها از مقدار تقریبی صد مگاپاسگال در حالت کاملاً آنیل شده، تا بیش از سیصد مگاپاسگال بعد از شش سیکل فرایند افزایش یافته است [۱۰]. افزایش قابل ملاحظه استحکام این نمونه‌ها باعث افزایش کاربرد آنها در صنایعی خواهد شد که نیاز مبرم به افزایش استحکام، کاهش وزن قطعات و صرفه‌جویی در مصرف انرژی دارند. مشکل جدی در فرایند ARB بحث شکست مواد می‌باشد. این به علت مقدار زیاد کرنش پلاستیک انباشته شده در ماده همزمان با این واقعیت که نورد نیز یک فرایند هیدرواستاتیک نمی‌باشد، است که منجر به ترک خوردن لبه‌ها در ورق مخصوصاً در سیکل‌های بالاتر می‌شود. در این مورد انجام سیکل‌های بالاتر فرایند غیر ممکن است. به هر حال چندین روش ساده برای پرهیز از چنین ترک‌خوردگی‌هایی وجود دارد، و ورق‌های سالم می‌تواند توسط روش ARB در اغلب مواد فلزی تولید گردد [۱۱].

در سالهای اخیر کامپوزیت‌های فلزی چند لایه به علت خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی برجسته مورد توجه زیادی واقع شده اند [۲-۴]. تحقیقات زیادی روی تولید کامپوزیت‌های مس خالص تجاری، مس-نیکل، مس با ذرات تقویت کننده Al_2O_3 ، Fe_3O_4 و $MoSi_2$ در بهبود خواص

صنعت الکترونیک، استفاده از مس خالص با ساختار ریزدانه که با تغییرشکل مومسان شدید تولید می‌شوند، توسعه زیادی یافته است [۲]. تحقیقات وسیعی به منظور توسعه این روش‌ها به عمل آمده که باعث شده تا فلزات با ساختار بسیار ریز تا حد نانو با خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب انجام پذیرد و روش‌های مختلفی در طول دو دهه گذشته ابداع شده است. یکی از روش‌های موفق، اتصال از طریق نورد تجمعی اتصالی (ARB) می‌باشد. فرایند نورد تجمعی به عنوان یک روش اعمال تغییرشکل شدید پلاستیک و دستیابی به ساختاری با اندازه دانه نانومتری توسط سایتو و همکارانش در سال ۱۹۹۸ میلادی به منظور فراوری ورق‌های با ساختار ریز دانه معرفی شد [۹]. در این فرایند، تغییرشکل پلاستیک زیادی از طریق چند مرحله نورد متوالی انجام می‌گیرد. مزیت این روش توانایی در تولید ورق با ساختار نانو در مقیاس صنعتی می‌باشد، به همین دلیل از این روش اخیراً در تولید کامپوزیت‌های چندلایه استفاده شده است [۳]. تغییرشکل‌های شدید پلاستیک ناشی از انواع فرایندهای مکانیکی می‌تواند سبب ایجاد ساختار نانو و مواد با اندازه دانه نانومتری و همچنین سبب تغییر در ساختمان میکروسکوپی گردد [۴]. تغییرشکل شدید، در واقع مجموعه روش‌هایی است که طی آن می‌توان کار مکانیکی نسبتاً زیادی را به فلز اعمال نمود، بدون اینکه فلز دچار شکست و ترک خوردگی شود. نکته جالب توجه در روش تغییرشکل پلاستیک شدید این است که نه تنها موجب افزایش استحکام فلز می‌شود، بلکه در بسیاری از اوقات افت چقرمگی کم شده و گاهی افزایش نرمی نیز مشاهده می‌شود. این موضوع دقیقاً وجه تمایز این روش با سایر روش‌های تغییرشکل پلاستیک است که علت این ویژگی خاص را باید در ساختار نانو ایجاد شده در فلز توسط روش تغییرشکل پلاستیک شدید جستجو نمود. به این ترتیب در اثر اعمال کرنش، امکان اصلاح ریزساختار، کاهش اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری و بهبود خواص مکانیکی نمونه فلزی فراهم می‌آید، در حالی که شکل نمونه تغییری نکرده است. به طور خلاصه، مزایای روش‌های تغییرشکل شدید پلاستیک عبارتند از: امکان تولید مستقیم قطعات فلزی با ابعاد بزرگ و اندازه دانه‌های نانومتری؛ قابلیت انجام فرایند به وسیله دستگاه‌ها و قالب‌های معمولی؛ امکان اعمال کرنش‌های شدید پلاستیکی بدون تغییر ابعاد نمونه‌ها؛ عدم وجود محدودیت در اعمال کرنش (زیرا از لحاظ نظری تعداد دفعات تکرار فرایند نامحدود است)؛ امکان تهیه نمونه‌های بسیار ریزدانه با ابعاد مناسب برای انجام آزمایش‌های مکانیکی [۵-۶]. شماتیکی از فرایند ARB به عنوان یک روش اعمال تغییرشکل شدید پلاستیک در شکل (۱-الف) مشاهده می‌شود. استفاده از نورد در فرایند ARB نه فقط به عنوان یک روش تغییرشکل بلکه به عنوان عاملی برای ایجاد اتصال بین دو ورق و تولید یک ورق کاملاً یکپارچه است. گاهی نیز برای بهتر شدن اتصال، فرایند نورد



الف

ب

شکل ۱. الف) مراحل انجام فرایند ARB، ب) نمونه اکستروژن شده حاصل از فرایند SSE.

دانشیته نابجایی ۱۴ درصد در مقایسه با وسط پروسه کاهش می‌یابد. این تخریب نابجایی توسط برگشت کرنش برشی و بافت برشی ساده اتفاق افتاده است. سخت‌ترین بافت برشی ساده روی وسط کانال گزارش شده بود [۲۰].

ترک و همکاران [۲۱] به بررسی امکان تغییرشکل پلاستیک منیزیم خالص در دمای اتاق به روش اکستروژن برشی ساده پرداختند. آن‌ها نشان دادند که نمونه‌های پردازش شده توسط اکستروژن با کانال‌های همسان زاویه‌دار و کانال تغییرشکل زاویه‌ای باعث بند بند شدن شدید در

مکانیکی و الکتریکی توسط فرایند ARB صورت گرفته است. نتایج تحقیقات نشانگر آن بود که فرایند نورد اتصالی تجمعی می‌تواند فرایندی بسیار مفید و تاثیرگذار در تولید مواد ریز دانه با استحکام بالا و توزیع و یکنواختی ذرات در ماتریس باشد. همچنین با استفاده از این روش می‌توان خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت‌های مورد نظر را بهبود بخشید [۷-۵].

یکی دیگر از روش‌های جدید برای اعمال کرنش بالا روی مواد حجمی برای اصلاح دانه‌های عالی بدون هیچ‌گونه تغییر قابل توجهی در ابعاد، روش اکستروژن پیچشی (SSE) است. طرحواره‌ای از فرایند SSE به عنوان یک روش اعمال تغییر شکل شدید پلاستیک در شکل (۱-ب) مشاهده می‌شود. اکستروژن پیچشی اولین بار توسط بیگلزیمر در سال ۱۹۹۹ پیشنهاد شد، که ایده اصلی مبتنی بر فشارش یک نمونه شمشه‌ای از میان قالبی که پروفیل آن حاوی دو قسمت شمش‌مانند می‌باشد و با یک پیچش جهت‌دار از هم جدا شده‌اند [۱۲]. نمونه‌ها به صورت طولی از طریق یک کانال مستقیم با یک شکل خاص فشرده می‌شوند. نمونه را از میان کانال عبور داده و در حالیکه سطح مقطع ثابت باقی می‌ماند، به تدریج تغییرشکل پیدا می‌کند. در این فرایند نمونه‌ها با مقطع مربع انتخاب شده‌اند. با عبور از میان کانال اکستروژن، سطح مقطع از مربع در ابتدای کانال به متوازی الاضلاع با زاویه اعوجاج حداکثر در وسط کانال، تغییرشکل پیدا می‌کند سپس به شکل مربع از کانال خارج می‌شود [۱۴-۱۳].

باقرپور و همکاران [۱۶-۱۵] رفتار تغییرشکل و ساختار میکروسکوپی نمونه فولاد TWIP را پس از عبور دادن از محفظه قالب‌های اکستروژن برشی ساده با زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه مورد بررسی قرار دادند. دوقلویی‌های تغییرشکل از یک نرخ کند تر در نیمه دوم کانال برخوردار بوده که برگشت و معکوس کردن کرنش را گزارش می‌دهد. بند بند نشدن فولاد TWIP پس از فرایند اکستروژن برشی ساده موفقیت آمیز بودن فرایند را نشان می‌دهد [۱۷].

همچنین تحقیقاتی روی تغییرات بافتی نمونه مس خالص در طول پروسه اکستروژن برشی ساده انجام شده. پس از اکستروژن شدن نمونه مس خالص و قرار گرفتن در منطقه تغییرشکل، قالب را باز کرده و با بیرون آوردن نمونه از داخل آن توسط پراش توزیع معکوس الکترونی^۷ به بررسی بافت‌های نمونه پرداخته شد. نتایج حاکی از آن بود که هر چه نمونه از آغاز کانال تغییرشکل به اواسط آن نزدیک می‌شود به تدریج بافت برشی ساده روند تکاملی به خود می‌گیرد. سخت‌ترین منطقه گزارش شده در نیم‌پاس یا مرکز نمونه می‌باشد [۱۹-۱۸].

تحقیقات صورت گرفته بیانگر آن است که کرنش برگشتی موجب کم شدن دانشیته نابجایی، سختی و متوسط زاویه نمونه شده در حالی که اندازه دانه‌های آن افزایش می‌یابد. پس از یک پاس کامل از فرایند اکستروژن برشی ساده،

7. Electron Back Scatter Diffraction



شکل ۲. نمایی از قالب و نمونه اکستروژن شده.

سختی زیر بار پرس، چقرمگی خوبی نیز داشته باشد تا با مشکل ترک خوردن بر اثر ترد شدن زیاد مواجه نگردد. مدل قالب به صورت استوانه می‌باشد که از دو قسمت متقارن تشکیل شده. طراحی قالب طوری است که نیاز به یک فیکسچر مطمئن برای اتصال قالب به میز پرس هیدرولیکی می‌باشد تا انجام عملیات اکستروژن صورت پذیرد. به همین دلیل یک غلاف نگهدارنده طراحی و ساخته شد. قطر مقطع کانال ۱۵×۱۵ میلی‌متر می‌باشد. نمایی از قالب و نمونه اکستروژن شده در شکل ۲ نشان داده شده است. زاویه قالبی استفاده شده ۴۵ درجه می‌باشد که سطح مقطع در ابتدای کانال مربع در میانه کانال متوازی الاضلاع و سپس در انتهای کانال به شکل مربع خواهد بود.

نحوه انجام فرایند SSE

جنس نمونه‌ها از مس خالص تجاری است که به منظور کاهش سختی و افزایش شکل پذیری، نمونه‌ها تحت عملیات آنیل قرار گرفت. ابعاد مقطع نمونه‌ها ۱۵×۱۵ میلی‌متر مربع به طول ۶۰ میلی‌متر می‌باشد که این ابعاد چند صدم کمتر از ابعاد کانال قالب در نظر گرفته شده تا انطباق عبوری صورت گیرد. ابعاد سنبه را بر خلاف نمونه‌ها کاملاً مانند ابعاد کانال قالب در نظر

نمونه می‌گردد که این خود موجب کرنش برشی موضعی در سرتاسر صفحه برشی می‌شود. در حالیکه این نمونه‌های پردازش شده توسط اکستروژن برشی ساده عمدتاً بدون بند شدن نمایش داده شده است. همچنین تحقیقات صورت گرفته در خصوص تاثیر فرایند اکستروژن پیچشی بر خواص آلومینیوم ۶۰۶۳ بیانگر آن بود که با افزایش تعداد پاس‌ها میزان استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی نمونه افزایش یافته و میزان ازدیاد طول، یکنواخت و تا شکست نهایی نیز با افزایش تعداد پاس‌ها تا ۸ پاس کاهش یافته و با ادامه فرایند تا پاس‌های بالاتر تغییر زیادی در آنها مشاهده نشد و همچنین با افزایش تعداد پاس‌ها تا ۸ مرحله بر میزان سختی نمونه افزوده شد و با ادامه فرایند تا پاس‌های بالاتر از مقدار سختی آن کاسته شد [۲۲].

در پژوهش حاضر به مطالعه تولید مس خالص تجاری ریز دانه با استفاده از فرایند اکستروژن برشی ساده و اتصال نورد تجمعی پرداخته شده است. نمونه‌هایی از جنس مس خالص تجاری طی چندین پاس مورد عملیات اکستروژن و همچنین اتصال نورد تجمعی قرار گرفت. هدف از تحقیق حاضر بررسی تکامل ساختار، ایجاد ساختار ریز دانه، افزایش استحکام و سختی مس خالص تجاری تحت فرایند اتصال نورد تجمعی و اکستروژن برشی ساده و مقایسه آنها می‌باشد. در هر مرحله با استفاده از میکروسکوپ نوری، آزمون کشش و آزمون سختی، خواص مکانیکی و تغییرات ریزساختاری مورد بررسی قرار گرفت.

۲. مواد و روش تحقیق

مواد اولیه

مواد مورد استفاده در این پژوهش ورق‌های مس و بلوک‌های مس خالص تجاری می‌باشند که ابعاد ویژگی‌های آن در جدول ۱ مشخص شده است. موادی که جهت انجام فرایند اکستروژن برشی ساده استفاده شد بصورت مواد حجم‌دار مربعی شکل با ابعاد ۶۰×۱۵×۱۵ میلی‌متر می‌باشند. همچنین در روش فرایند نورد تجمعی از ورق‌های مستطیلی شکل با ابعاد ۴۰×۱۲۰ میلی‌متر و ضخامت یکسان ۱ میلی‌متر انتخاب شدند.

طراحی و مشخصات قالب اکستروژن برشی ساده

در این پژوهش، به منظور انجام آزمایش‌های تجربی فرایند اکستروژن، از قالب مرجع [۲] استفاده شد که درحین تحمل

جدول ۱. خواص مکانیکی فلز مس بکار رفته در تحقیق.

فلز	افزایش طول (%)	سختی (HV)	استحکام تسلیم (MPa)	ابعاد نمونه‌ها
ورق مس	۳۲/۸	۷۲	۸۷/۵	۱۲۰×۴۰×۱ mm
بلوک مس	۳۰/۵	۷۴	۸۹/۵	۱۵×۱۵×۶۰ mm

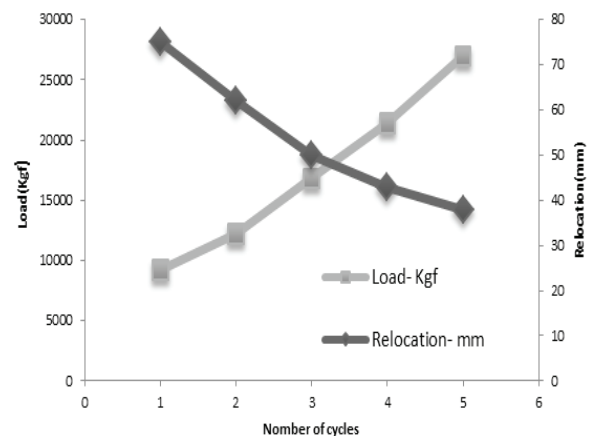
پاس‌های بالا انجام می‌پذیرد. توجه به این امر ضرورت دارد که کرنش در اکستروژن برشی ساده به تدریج اعمال می‌شود در حالیکه روش اکستروژن با کانال‌های همسان زاویه‌دار آنرا در یک ناحیه‌ی متمرکز قرار می‌دهد [۲۳]. پس از اکستروژن نمونه‌های مس در طی پاس‌های مختلف توسط دستگاه پرس ۱۰۰ تنی، نتایج حاصل از اعمال نیرو به صورت نمودار در شکل ۳ نشان داده شده است. بدیهی است که هر چه تعداد پاس‌ها افزایش یابد مقدار فشار لازم پرس برای عبور نمونه از منطقه تغییرشکل بیشتر می‌شود که علت آن ریز شدن دانه‌ها و افزایش استحکام و سختی می‌باشد.

در این مطالعه، برای تست کشش از استاندارد ASTM B557M با سرعت 0.12 mm/min استفاده شده است. در ضمن کرنش اعمالی 0.002 mm می‌باشد. تصویر نمونه‌های آماده‌سازی شده قبل و بعد از فرایند کشش در شکل ۴ مشاهده می‌شود. با تست کشش به عمل آمده از نمونه آنیل و پاس اول و پاس دوم مشاهده می‌شود، هرچه تعداد پاس‌ها افزایش یابد نمونه سخت‌تر شده و منطقه گلوبی شده آن کاهش می‌یابد. همچنین برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌های مس خالص تجاری بعد از هر پاس از تست میکروسختی ویکرز مطابق با استاندارد ASTM E 92-82 استفاده شده است.

نحوه انجام فرایند ARB

آزمایش‌های ARB بر روی ورق مس خالص تجاری صورت گرفت. برای انجام فرایند در ابتدا ورق‌های مس در ابعاد مشخص برشکاری شدند. از دو نوار مسی به ضخامت ۱ میلی‌متر و ابعاد 4×12 سانتی‌متر مربع برای شروع فرایند استفاده شد. برای ساخت کامپوزیت، ابتدا ورق‌ها با استون شسته و چربی‌زدایی گردیدند و سپس برای ایجاد پیوند با استحکام بیشتر از سمباده سیمی دوار که قابلیت بسته شدن بر روی دستگاه دریل را دارد، با اندازه قطر سیم 0.4 میلی‌متر استفاده شد. استفاده از سمباده سیمی بالاترین زبری سطح را ایجاد کرده و سبب ایجاد قویترین اتصال لایه‌ای بین ورق‌ها می‌شود. بدین ترتیب دو سطح برشکاری شده روی هم قرار گرفتند و توسط سیم‌های مسی چهارگوشه آن مقید شد. ضخامت ساندویچ اولیه ۲ میلی‌متر بود که پس از اولین پاس نورد به ۱ میلی‌متر کاهش ضخامت یافت (50% کاهش ضخامت).

دستگاه نورد مورد استفاده دارای غلطک‌هایی به قطر ۱۸۰ میلی‌متر و با سرعت نورد ۴۰ دور بر دقیقه تنظیم شد. نمونه پس از پاس اول از وسط نصف و پس از آماده‌سازی مجدد و مهار چهارگوشه آن مجدداً تحت نورد با 50% کاهش ضخامت قرار گرفت. این فرایند تا هفت سیکل بدون روانکار انجام پذیرفت. پس از هر مرحله‌ی نورد، نمونه‌هایی برای انجام آزمون‌های مختلف تهیه شدند. سطح مقطع کناری ورق‌های جوش‌خورده پس از سنباده‌زنی و پولیش با پارچه و خمیر



شکل ۳. نتایج حاصل از اعمال نیرو و تغییرشکل در طی پاس‌های مختلف مس اکستروژن شده.



شکل ۴. الف) نمونه‌های آماده‌سازی شده قبل از آزمون کشش، ب) نمونه بعد از آزمون کشش.

گرفته تا لقی بین دیواره قالب و سنبه ایجاد نگردد و سبب آسیب رساندن به قالب نشود. برای انجام فرایند، نمونه توسط روغن (های ویس) روانکاری شده و در داخل کانال ورودی قالب قرار می‌گیرد. سپس مجموعه قالب زیر پرس هیدرولیکی قرار گرفته و سنبه توسط غلاف به تویی پرس متصل می‌گردد و با سرعت اولیه 1 mm/s نمونه را به سمت کانال قالب هدایت کرده که سرعت نهایی آن به 3 mm/s تغییر پیدا می‌کند و نهایتاً به تدریج از کانال خارج می‌گردد. توجه به این نکته ضروری است که قرارگیری سنبه طوری باشد که در اثر پرس، سنبه به کانال ورودی برخورد نکند تا موجب خراب شدن قالب نگردد. پس از یک کورس کامل، سنبه توسط دکمه‌ای که در قسمت جانبی پرس تعبیه شده است به بیرون از قالب هدایت شده و نمونه بعدی پشت نمونه قبلی قرار می‌گیرد. در حرکت مجدد سنبه، نمونه به داخل قالب هدایت شده و فشرده می‌شود. ابتدا نمونه تغییرشکل یافته قبلی به طور کلی از منطقه تغییرشکل توسط نمونه جدید خارج شده و نمونه جدید وارد منطقه تغییرشکل می‌شود. این روند تا

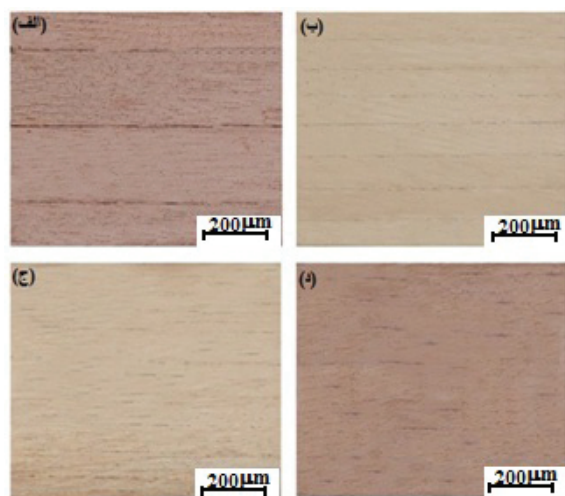
زیاد به همراه کرنش برشی شدید باعث تولید عیوب با چگالی بالا، مخصوصاً نابجایی در شبکه کریستالی می‌گردد. وجود این نابجایی‌ها طی مراحل زیر می‌تواند باعث ریزدانه شدن شود:

۱- نابجایی‌های اولیه که در درون دانه توزیع شده‌اند، بازآرایی کرده و با پیوستن به هم، هسته کوچکی را تشکیل می‌دهند و سطح انرژی را کاهش می‌دهند.

۲- با افزایش میزان تغییرشکل، نابجایی‌های جدید تولید شده و زاویه بین هسته‌ها افزایش یافته و باعث ایجاد مرزدانه‌های فرعی می‌گردد.

۳- این فرایند در داخل این دانه‌ها تکرار شده تا اندازه‌ی آن به حد کافی کوچک شود و باعث چرخش دانه‌های تولید شده شود. با ورود نمونه به داخل قالب و قرار گرفتن در منطقه تغییرشکل، نابجایی‌ها تا مرزبندی سلول شروع به حرکت می‌کنند. با افزایش تعداد پاس‌ها مرزبندی‌های با زاویه کم به طور پیشرونده به داخل مرزبندی‌های زاویه بالا تغییرشکل پیدا می‌کنند که این خود باعث ریز شدن دانه می‌گردد.

همانطور که در شکل ۶ مربوط به صفحات جانبی مس خالص تجاری مشاهده می‌شود ورق‌ها تا سیکل هفتم بدون عیب و پارگی فرآیند ARB را پشت سر گذاشتند. افزایش چگالی نابه‌جایی و کاهش اندازه دانه سبب افزایش کرنش ماده و در نتیجه تردی می‌شود. این امر سبب پارگی ورق‌ها پس از سیکل هفتم ARB شد. همانطور که در تصاویر قابل رؤیت است، اتصال لایه‌های مس با ۵۰٪ کاهش ضخامت به خوبی صورت می‌گیرد. در مراحل بالای ARB لایه‌ها به صورت یکپارچه و منسجم درآمده و به جز مراحل اولیه فرآیند ARB، تشخیص و رؤیت لایه‌ها دشوار می‌باشد. این بدان معناست که با پیشرفت فرآیند ARB تعداد لایه‌ها بگونه‌ای مداوم افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد سیکل‌های فرآیند ARB از آنجایی



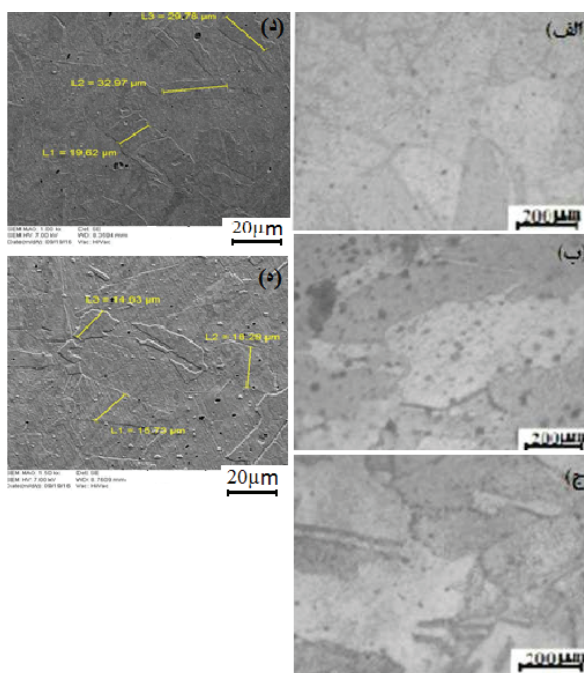
شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ نوری لایه‌های مس تحت فرایند ARB بترتیب (الف) پاس اول، (ب) پاس سوم، (ج) پاس پنجم، (د) پاس هفتم بزرگنمایی 200X.

الماسه، با میکروسکوپ نوری بررسی گردید تا نحوه جوش خوردن ورق‌ها مشاهده شود. در نهایت برای مطالعه خواص مکانیکی (استحکام کششی، مقدار افزایش طول و منحنی‌های تنش و کرنش) آزمون استحکام کششی با استفاده از دستگاه Zwick ۲۵۰ و مطابق با استاندارد کشش ASTM-E8M صورت گرفت. در ادامه برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها از تست میکروسختی ویکرز استفاده شد.

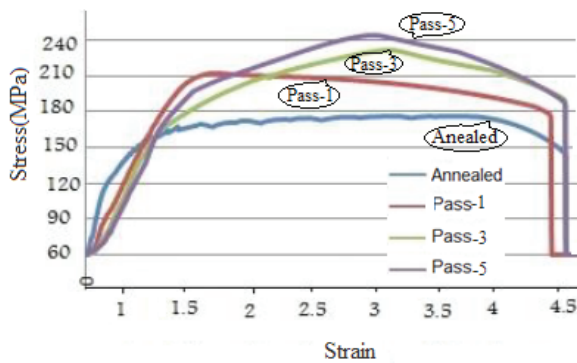
۳. نتایج و بحث

بررسی و مقایسه تحولات ریز ساختاری مس حین فرایند SSE و ARB

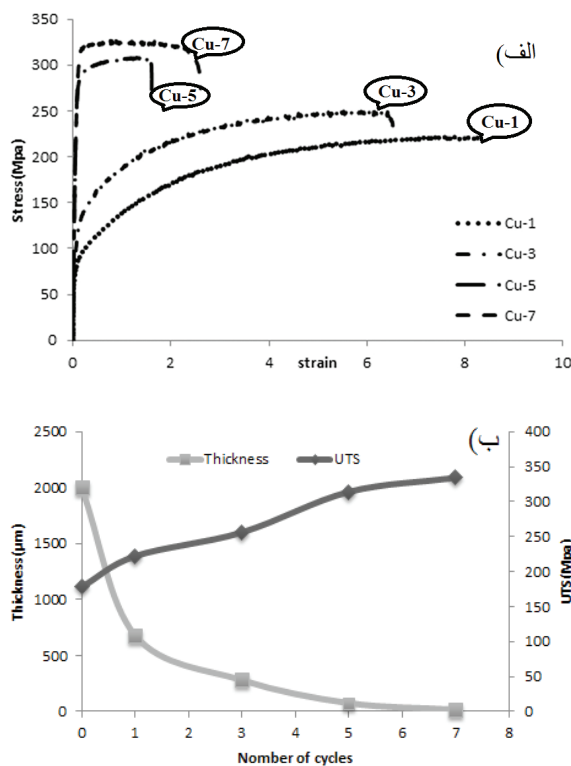
تصویر میکروسکوپی ریز ساختار نمونه مس اولیه در طی فرایند SSE در شکل ۵ نشان داده شده است. ریزساختار اولیه همگن و با اندازه دانه میانگین ۷۰ میکرون می‌باشد. همانطور که می‌توان پیش بینی کرد ریز ساختار نمونه بعد از پاس اول کاملاً متفاوت با ریز ساختار اولیه است. این حالت در روش‌های دیگر تغییرشکل پلاستیک شدید نیز گزارش شده است. دو مکانیزم اصلی تغییرشکل در فلزات لغزش و دو قلوبی می‌باشد. لغزش بر اساس لغزش نابجایی‌های پیچی و لبه‌ای صورت می‌گیرد، حال آنکه مکانیزم دو قلوبی زمانی صورت می‌گیرد که سیستم‌های لغزش محدود باشند یا فلز دارای نقص انباشتگی پایینی باشد. مکانیزم ریز شدن دانه‌ها را می‌توان بصورت زیر تفسیر نمود. وجود فشار هیدرواستاتیکی



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ نوری دانه بندی مس تحت فرایند SSE نمونه (الف) پاس اول، (ب) پاس سوم، (ج) پاس پنجم بزرگنمایی 200X، (د) اندازه دانه پاس اول، (ه) اندازه دانه پاس سوم با بزرگنمایی 2000X.



شکل ۷. نمودار تنش- کرنش مهندسی مس خالص تحت فرایند SSE.



شکل ۸. (الف) نمودار تنش- کرنش مهندسی مس طی پاس‌های مختلف فرایند ARB، (ب) نمودار استحکام کششی نهایی و تغییر ضخامت لایه‌ها طی پاس‌های مختلف فرایند ARB.

فرایند SSE وجود دانه‌ها و مرزهای دوقلویی به عنوان مانعی بر سر حرکت نابجایی‌ها می‌باشد که منجر به افزایش استحکام می‌گردد. شکل ۸ تغییرات استحکام کششی نمونه‌های مسی طی سیکل‌های مختلف فرایند ARB را نشان می‌دهد استحکام کششی نهایی در دو سیکل اولیه فرایند ARB افزایش چشمگیری داشته است و سپس با افزایش کرنش مقدار آن تدریجاً افزایش یافته است. این روند افزایشی تا پاس هفتم فرایند ARB ادامه یافته و پس از هفت سیکل حدود ۱/۵ برابر بزرگتر از استحکام اولیه ورق مس می‌باشد.

که اندازه تغییر شکل اعمالی به ماده افزایش می‌یابد، جهت کاهش انرژی سیستم، مرزهای کم زاویه و سپس با زاویه بزرگ در ساختار حاصل و ماده ریز دانه تر می‌شود [۲۴]. در نتیجه می‌توان ریز شدن ساختار را به تبدیل مرزهای کم زاویه فرعی ناشی از آرایش نابه‌جایی‌ها به مرزهای تصادفی با زاویه بالا نسبت داد. مرزدانه‌های پرزاویه که در اثر تغییر شکل به وجود آمده‌اند، باعث تقسیم و ریز شدن دانه‌های محتوی نابجایی‌های وابسته به موقعیت می‌شوند تا وقتی که بازایی رخ دهد و مرزدانه‌های پایدار تشکیل گردد [۲۵]. در هر دو فرایند ARB و SSE با افزایش پاس‌های فرایند تا پاس پنجم کاهش اندازه دانه قابل توجهی مشاهده شد. در فرایند نورد تجمعی شده دانه‌ها دارای فضای مرزدانه‌ای کمتری هستند. ناهمسانی زاویه‌ای بین دانه‌ها حین نورد تجمعی بیشتر شده و مرزدانه‌هایی با زاویه بزرگتر ایجاد می‌گردد. در نمونه‌های نورد شده ترکیبی از کرنش‌های نوردی و برشی وجود دارد. وجود کرنش برشی در ضخامت نمونه و کرنش ناشی از نیروی نوردی در راستای اعمال نورد که نهایتاً منجر به افزایش شدید موضعی کرنش کل در نمونه‌ها می‌شود. در روش SSE نیز قابلیت ایجاد نمونه‌هایی با کرنش بالا بر مبنای تجمع کرنش در پاس‌های متوالی وجود دارد و نهایتاً می‌توان با اعمال آن روی نمونه‌ها طی چندین پاس متوالی به ماده‌ای با اندازه دانه بسیار ریز دست یافت. همچنین در ریزساختار نمونه‌های فرایند شده به روش SSE به وفور دوقلویی دیده می‌شود که علت آن انرژی نقص انباشتگی کم فلز مس 270 mJ/m می‌باشد. در واقع دوقلویی را مکانیزم اصلی تغییر شکل در فلز مس گزارش کرده‌اند [۲۵]. وجود این دوقلویی‌ها به عنوان مانعی بر سر حرکت نابجایی‌ها عمل می‌کند و باعث کاهش فاصله خطوط لغزش می‌شود.

مقایسه نتایج حاصل از آزمایش کشش در فرایند ARB و SSE

منحنی تنش-کرنش مهندسی نمونه‌های مس در مراحل مختلف اکستروژن برشی ساده در شکل ۷ نشان داده شده است برای انجام آزمون سه نمونه برای هر مرحله تهیه گردید. شرایط انجام آزمون فشار برای هر سه نمونه مربوط به یک کرنش خاص یکسان بود. نتایج نشانگر آن بود که با افزایش تعداد مراحل پرس کاری، استحکام تسلیم و استحکام نهایی نمونه‌ها افزایش می‌یابد، درحالی‌که از قابلیت تغییر طول و انعطاف‌پذیری آنها کاسته می‌شود. البته این افزایش استحکام در سیکل‌های اولیه فرایند بسیار چشمگیرتر بوده و پس از آن روند متعادل‌تری را دنبال می‌کند.

میزان استحکام نهایی از 178 MPa به مقدار 246 MPa رسید. در واقع حدود ۷۳٪ استحکام نهایی در نمونه‌های حاصل از فرایند SSE افزایش یافته است. مکانیزم اصلی در

می‌باشند و ریزساختار آنها نیز نسبت به نمونه‌ی ARB درشت‌تر است. همچنین نکته قابل توجه دیگر مربوط به کرنش نمونه‌ها می‌باشد. همانطور که در نمودار تنش-کرنش هر دو فرایند SSE و ARB مشاهده می‌شود، کرنش و داکتیلیته در طی اجرای فرایند در سیکل‌های بالاتر کاهش یافته است. افزایش چگالی نابه‌جایی و کاهش اندازه دانه سبب افزایش کرنش سختی ماده و در نتیجه تردی گردید که این امر سبب پارگی ورق‌ها در سیکل هفتم و تردی زیاد نمونه‌های فرایند SSE پس از سیکل پنجم شد.

مقایسه نتایج آزمایش سختی سنجی مس خالص تحت فرایند ARB و SSE

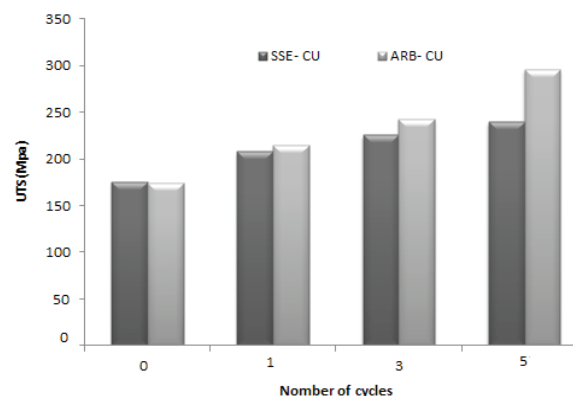
شکل ۱۰ تغییرات سختی ویکرز را بعد از پنج پاس فرایند اکستروژن برشی ساده در سطح مقطع نمونه‌ها نشان می‌دهد. سختی نمونه در پاس‌های اولیه به اندازه قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و در پاس‌های بالا با سرعت کمتری افزایش می‌یابد. مطابق شکل، سختی نمونه تا حدود ۲۸ ویکرز از مقدار اولیه ۷۴ ویکرز در پاس اول افزایش می‌یابد. در پاس سوم مقدار افزایش سختی حدود ۴۲ ویکرز است. سختی در پاس سوم به حالت اشباع می‌رسد و از روند صعودی نمودار کاسته می‌شود بطوریکه در پاس پنجم تنها حدود ۲۲ ویکرز افزایش دارد. این حالت در فرایند ARB نیز مشاهده شده است [۲۶-۲۷]. علت افزایش سختی، کرنش سختی ناشی از فرایند یا به طور کل ریز شدن دانه‌ها می‌باشد که طبق رابطه هال-پیچ این کاهش سایز دانه‌ها باعث افزایش سختی خواهند شد. رفتار نمودار سختی در واقع مانند نمودار حاصله از کشش است که در این مورد نیز توافق خوبی بین آنها برقرار است. برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌های حاصل از فرایند ARB صفحه جانبی نمونه‌ها در طی سیکل‌های مختلف تحت ریز سختی سنجی قرار گرفت. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، افزایش سریع سختی حدود ۱/۵ برابر نسبت به مس خالص پس از پاس سوم را شاهد هستیم. افزایش سریع سختی با کاهش کرنش‌ها می‌تواند به سخت شدن کرنشی مربوط باشد [۲۸].

شکل ۱۰ مقایسه سختی در مراحل مختلف فرایند ARB و SSE را نیز نشان می‌دهد. در سیکل‌های بالای فرایند ARB سختی به دلیل آن است که مواد به یک دانسیته پایداری از نابه‌جایی‌ها رسیده‌اند. دانسیته پایداری از نابه‌جایی‌ها بوسیله تعادل دینامیکی در طی تولید نابه‌جایی‌ها در فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید و آنیل در فرایند اصلاح دینامیکی رخ می‌دهد. همچنین مقادیر بالای سختی در سطح به وسیله کار سختی ناشی از کرنش برشی مازاد که توسط اصطکاک زیاد بین غلطک نورد و نمونه در طی فرایند ARB اتفاق می‌افتد، می‌باشد [۲۸].

بطور کلی عوامل استحکام بخشی در فرایند ARB را می‌توان در ادامه بیان شده است. در گام اول می‌توان به کرنش سختی بدلیل افزایش دانسیته نابه‌جایی حاصل از تغییرشکل اشاره نمود که سبب افزایش استحکام می‌گردد. این عامل در مراحل اولیه فرایند ARB نقش مهمی را ایفا می‌کند، که با افزایش مراحل ARB و ایجاد ساختار ریزدانه و بهبود اندازه دانه تاثیر آن تدریجاً کاهش می‌یابد. در ادامه فرایند ARB، ریزدانه شدن در مراحل نهایی فرایند بسیار تاثیرگذار می‌باشد. همچنین اثر کرنش برشی ایجاد شده در طی فرایند ARB ناشی از اصطکاک بین غلطک و نمونه و اصطکاک بین خود لایه‌ها سبب افزایش کرنش معادل و افزایش استحکام می‌شود. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در مراحل اول فرایند تغییر لایه‌ها و در مراحل نهایی تغییر تعداد لایه‌ها زیاد است که در افزایش استحکام تاثیرگذار می‌باشند. به همین دلیل شاهد استحکام بالاتری در نمونه‌های مس ARB شده می‌باشیم که بطور واضحی در نمودار مقایسه‌ای شکل ۹ که بین استحکام نهایی نمونه فرایند SSE و مس تحت فرایند ARB قرار گرفته قابل مشاهده می‌باشد.

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، نمونه‌های تولید شده توسط هر دو فرایند رفتار مکانیکی تقریباً مشابهی دارند. در هر دو روش ARB و SSE کرنش سختی توسط ایجاد نابه‌جایی‌ها و بهبود اندازه دانه دو مکانیزم اصلی در افزایش استحکام می‌باشند. در نتیجه‌ی انجام کار سرد روی ماده‌ی اولیه، درون ساختار نابه‌جایی تولید می‌شود و این نابه‌جایی‌ها شروع به لغزش می‌کنند. هرچه مقدار کار سرد بیشتر می‌شود چگالی نابه‌جایی‌ها افزایش یافته و برخورد نابه‌جایی‌ها با یکدیگر بیشتر می‌گردد. بنابراین با افزایش تعداد پاس‌های فرایند، مقدار کار سرد انجام شده روی نمونه بیشتر شده و این به نوبه‌ی خود منجر به افزایش استحکام نمونه می‌شود [۲۶].

در روش SSE بدلیل اینکه کرنش اعمالی به تدریج به نمونه وارد می‌شود و نسبت به روش ARB کرنش سختی کمتری دارد، لذا نمونه‌ها ی SSE شده در مقایسه با ARB شده در پاس‌های مشترک دارای استحکام و سختی کمتری



شکل ۹. مقایسه استحکام نهایی نمونه مس تحت فرایند SSE و فرایند ARB

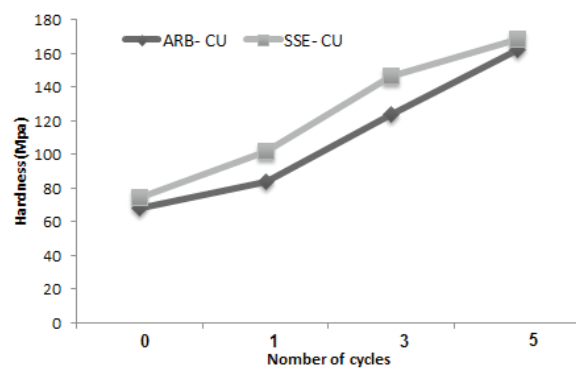
بدست آمد. با بکارگیری کاهش سطح مقطع نوردی ۵۰٪ در هر مرحله از فرآیند، جوش سرد مناسبی بین لایه‌ها ایجاد می‌شود. لذا با افزایش تعداد مراحل نورد، لایه‌ها و شدت بافت کلی افزایش دارد و یک بافت قوی در مراحل پایانی نورد شکل گرفته است.

۲- انجام فرایند ARB بر روی مس خالص تجاری علاوه بر بهبود ساختار، سبب افزایش چشمگیری در استحکام، سختی و کاهش داکتیلیته آن به سبب افزایش کرنش سختی و ریز دانه شدن در طی فرایند ARB می‌گردد.

۳- نتایج حاصل از فرایند اکستروژن برشی ساده نیز حاکی از آن است که با ریز شدن دانه‌ها استحکام و چقرمگی شکست به طور همزمان افزایش می‌یابد. استحکام نهایی از MPa178 در نمونه آنیل شده بعد از ۵ پاس به MPa246 رسید. میانگین سختی از HV74 در نمونه آنیل شده بعد از ۵ پاس به HV168 ارتقا یافت. همچنین نمونه‌های بدست آمده بدون تغییر در سطح مقطع آن‌ها با کمترین دور ریز نسبت به سایر روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید حاصل شد.

۴- در روش SSE بدلیل اینکه کرنش اعمالی به تدریج به نمونه وارد می‌شود و نسبت به روش ARB کرنش سختی کمتری دارد، نمونه‌های SSE شده در مقایسه با ARB در پاس‌های مشترک دارای استحکام و سختی کمتری می‌باشند و ریزساختار آن‌ها نسبت به نمونه‌ی ARB نیز درشت‌تر است.

۵- در روش ARB، اعمال کرنش‌های شدید به نمونه سبب می‌شود نمونه‌ها از پاس چهارم به بعد به حالت اشباع رسیده و تغییرات در نمونه چشمگیر نباشد، ولی در نمونه‌های SSE عکس آن اتفاق افتاده و بهبود ساختار و ریز دانه شدن حتی تا پاس هشتم نیز گزارش شده است.



شکل ۱۰. مقایسه میکرو سختی سنجی در مس فرآوری شده به روش ARB و SSE.

واقعیت دیگر که تاثیر بسزایی در سختی دارد افزایش نمایی تعداد لایه‌ها با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند ARB است. طبق فرمول (۲n-۱) نمونه مس ARB شده در سیکل هفتم شامل ۲۵۵ لایه می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است، داده‌های بدست آمده از این آزمون برحسب تعداد مرحله ترسیم شده‌اند و مشاهده می‌گردد که در مراحل اولیه تغییرات سختی مشابه با تغییرات استحکام تسلیم برحسب تعداد مراحل است. لایه‌های مس در فرایند ARB در پاس‌های اولیه دارای سختی بیشتری نسبت به مس SSE شده هستند که دلیل آن را می‌توان به مکانیزم‌های بیشتر متاثر در کرنش سختی در فرایند ARB اشاره نمود. در سیکل‌های بالای فرایند ARB شاهد کاهش روند افزایش سختی می‌باشیم که به دلیل آن است که مواد به یک دانسیته پایداری از نایجایی‌ها رسیده‌اند. اما مطابق شکل ۱۰ افزایش سختی در پاس‌های بالای فرایند SSE مشاهده شد زیرا در پاس‌های بالا شکست دوقلویی نمونه افزایش و فاصله دوقلویی کاهش یافته در نتیجه کرنش متراکم ظاهر می‌شود. دوقلویی‌های تغییرشکل در نیمه دوم کانال سبب برگشت و معکوس کردن کرنش می‌شود که این رفتار سبب می‌گردد سختی نمونه سیر صعودی پیدا کرده و به بیشترین مقدار خود برسد. لازم به ذکر است که پس از افزایش سختی، دانسیته نایجایی نیز افزایش می‌یابد [۲۹].

۴. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر دو فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید به نام‌های اکستروژن برشی ساده و اتصال تجمعی نورد برای تولید مواد فوق ریزدانه و نانوساختار مورد بررسی قرار گرفته است. سپس نمونه‌هایی از جنس مس خالص تجاری بطور موفقیت آمیز تحت عملیات اکستروژن برشی ساده و اتصال تجمعی نورد قرار گرفتند و نتایج حاصل از دو فرایند با هم مقایسه گردید. نتایج زیر بدست آمد:

۱- تا سیکل هفتم اتصال تجمعی نورد، نمونه‌ها دارای شکل‌پذیری مناسب و قطعاتی بدون عیب ماکروسکوپی

References

- [1] اسلامی، امیرحسین، مشکسار، محمدمحسن، زبرجد، سید مجتبی. "بررسی خواص مکانیکی و مغناطیسی کامپوزیت لایه ای مس- نیکل تولید شده به روش اتصال نورد تجمعی (ARB)". *فصلنامه علمی - پژوهشی مواد نوین*، ۱۳۹۲؛ ۴(۳): ۸۹-۱۰۳.
- [2] اسلامی، امیرحسین، زبرجد، سید مجتبی، مشکسار، محمدمحسن. "بررسی رفتار ساختاری، مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت لایه ای مس تولید شده به روش اتصال نورد تجمعی (ARB)". *فراآیندهای نوین در مهندسی مواد*، ۱۳۹۴؛ ۱(۱): ۷-۱.
- [3] اسلامی، امیر حسین، زبرجد، سید مجتبی، مشکسار، محمدمحسن. "بررسی خواص مکانیکی و مغناطیسی ماده‌ی مرکب لایه‌ای Cu/Ni/Fe₃O₄ تولید شده به روش اتصال نورد تجمعی (ARB)". *مهندسی متالورژی و مواد*، ۱۳۹۴؛ ۲۵(۲): ۱۳-۲۶.
- [4] اسلامی، امیرحسین، مشکسار، محمدمحسن، زبرجد، سید مجتبی. "بررسی اثرات ذرات تقویت کننده اکسید آهن (Fe₃O₄) بر رفتار مکانیکی و مغناطیسی ماده مرکب زمینه مس تولید شده به روش اتصال تجمعی نورد". *فراآیندهای نوین در مهندسی مواد*، ۱۳۹۳؛ ۱(۱): ۵۱-۶۰.
- [5] اسلامی، امیرحسین، مشکسار، محمدمحسن، زبرجد، سید مجتبی. "بررسی اثرات ذرات دی سیلیساید مولیبدن (MoSi₂) بر رفتار مکانیکی و الکتریکی ماده مرکب زمینه مس تولید شده به روش اتصال نوردی تجمعی (ARB)". *فصلنامه علمی - پژوهشی مواد نوین*، ۱۳۹۲؛ ۱(۴): ۵۷-۶۸.
- [6] اسلامی، امیرحسین، حسینی، سید هادی، کارزونی، افشین. «بررسی و مقایسه خواص مکانیکی مس خالص تولید شده به دو روش اتصال نورد تجمعی (ARB) و آهنگری چند محوره (MAF)». *مهندسی متالورژی*، ۱۳۹۴؛ ۱۸(۵۷): ۵۴-۶۲.
- [7] خودچی، سهیل، محمودی، محمد، شکوه فر، علی. «یک فرآیند جدید تغییرشکل پلاستیک شدید بر مبنای برش ساده و برش خالص». *مهندسی مکانیک مدرس*، ۱۳۹۵؛ ۱۶(۴): ۱۴۵-۱۵۴.
- [8] Eslami AH, Zabarjad SM, Moshksar MM. "A study on the mechanical and magnetic properties of Cu/Ni multilayer composite fabricated by Accumulative Roll Bonding process (ARB)". *Materials Science and Technology*. 2013; 29(8): 52-64.
- [9] Tsuji N, Saito Y, Utsunomiya H, Tanigawa S. "Ultra-fine grained bulk aluminum produced accumulative roll-bonding (ARB) process". *Scripta Materialia*. 1999; 40(7): 795-800.
- [10] Tsuji N, Ito Y, Saito Y, Minamino Y. "Strength and ductility of ultrafine grained aluminum and iron produced by ARB and annealing". *Scripta Materialia*. 2002; 47(12): 893-995.
- [11] Ghalandari L, Moshksar MM. "High strength and high conductive Cu/Ag multilayer produced by ARB". *Journal of Alloys and Compounds*. 2010; 506(1): 172-178.
- [12] Beygelzimer Y, Orlov D, Korshunov A, Synkov S, Varyukhin V, Vedernikova I, Reshetov A, Synkov A, Polyakov L, Korotchenkova I. "Features of twist extrusion: method, structures & material properties". *Solid State Phenomena*. 2006; 114: 69-78.
- [13] Zhilyaev AP, Langdon TG. "Using high-pressure torsion for metal processing: fundamentals and applications". *Progress in Materials Science*. 2008; 53(6): 893-979.
- [14] Valiev RZ, Langdon TG. "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement". *Progress in Materials Science*. 2006; 51(7): 881-981.
- [15] Bagherpour E, Qods F, Ebrahimi R, Miyamoto H. "Micro-structure quantification of ultrafine grained pure copper fabricated by simple shear extrusion (SSE) technique". *Materials Science and Engineering: A*. 2016; 674: 221-231.
- [16] Bagherpour E, Reihanian M, Ebrahimi R. "On the capability of severe plastic deformation of twinning induced plasticity (TWIP) steel". *Materials & Design*. 2012; 36: 391-395.
- [17] Bagherpour E, Ebrahimi R, Qods F. "An analytical approach for simple shear extrusion process with a linear die profile". *Materials & Design*. 2015; 83: 368-376.
- [18] Pardis N, Ebrahimi R. "Different processing routes for deformation via simple shear extrusion (SSE)". *Materials Science and Engineering: A*. 2010; 527(23): 6153-6156.
- [19] Bagherpour E, Qods F, Ebrahimi R. "Effect of geometric parameters on deformation behavior of simple shear extrusion". In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2014; 63(1).
- [20] Orlov D, Beygelzimer Y, Synkov S, Varyukhin V, Horita Z. "Evolution of microstructure and hardness in pure Al by twist extrusion". *Materials Transactions*. 2008; 49(1): 2-6.
- [21] Tork NB, Pardis N, Ebrahimi R. "Investigation on the feasibility of room temperature plastic deformation of pure magnesium by simple shear extrusion process". *Materials Science and Engineering: A*. 2013; 560: 34-39.
- [22] Richert M, Stuwe HP, Zehetbauer MJ. "Work hardening and microstructure of Al-Mg after 5 severe plastic deformation by cyclic extrusion and compression". *Materials Science and Engineering A*. 2003; 355(1-2): 180-185.
- [23] Valiev RZ, Langdon TG. "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement". *Progress in Materials Science*. 2006; 51(7): 881-981.
- [24] Salishchev G, Zaripova R, Galeev R, Valiakhmetov O. "Nanocrystalline structure formation during severe plastic deformation in metals and their deformation behavior". *Nanostructured Materials*. 1995; 6(5-8): 913-916.
- [25] Hosseini SA, Manesh HD. "High-strength, high-conductivity ultra-fine grains commercial pure copper produced by ARB process". *Materials & Design*. 2009; 30(8): 2911-2918.
- [26] Lu C, Tieu K, Wexler D. "Significant enhancement of bond strength in the accumulative roll bonding process using nano-sized SiO₂ particles". *Journal of Materials Processing Technology*. 2009; 209(10): 4830-4834.
- [27] Abenojar J, Velasco F, Martinez MA. "Optimization of processing parameters for the Al + %10 B4C system obtained by mechanical alloying". *Journal of Materials Processing technology*. 2008; 184(1-3): 441-446.
- [28] Jang Y, Kim S, Lim HC, Goto M. "Tensile behavior of commercially pure copper sheet fabricated by 2-and 3-layered accumulative roll bonding (ARB) process". *Metals and Materials International*. 2008; 14: 171-179.
- [29] Shahbaz M, Pardis N, Ebrahimi R, Talebanpour B. "A novel single pass severe plastic deformation technique: Vortex extrusion". *Materials Science and Engineering: A*. 2011; 530: 469-472.