

بررسی و مقایسه خواص مکانیکی مس خالص تولید شده به دو روش نورد اتصالی تجمعی (ARB) و آهنگری چند محوره (MAF)

امیرحسین اسلامی^{۱*}، هادی حسینی^۲، افشین کازرونی^۳

۱- مربی گروه ساخت و تولید دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گلپهار مشهد. (amir.hosseini.e@hotmail.com)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد ساخت و تولید دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی. (hoseyni1983@gmail.com)

۳- استادیار گروه ساخت و تولید دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی. (kazerooni@srttu.edu)

Investigation structure and mechanical properties of commercial pure copper produced by Accumulative Roll Bonding (ARB) and Multi Axial Forging process (MAF)

A.H.Eslami¹, H. hosseini², A.Kazeroni

1-Department of Manufacturing and Production, Mashhad Branch, Islamic Azad University, (amir.hosseini.e@hotmail.com)

2- M.Sc Student, Engineering Faculty, Shahid Rajaei Teacher Training University, (hoseyni1983@gmail.com)

3- Assistant Professor, Engineering Faculty, Shahid Rajaei Teacher Training University, (kazerooni@srttu.edu)

چکیده

روش تغییر شکل پلاستیک شدید (Sever Plastic Deformation) به عنوان یکی از روش‌های تولید مواد با اندازه دانه نانومتری مطرح می‌باشد. برای ایجاد یک ساختار با دانه‌های نسبتاً ریز لازم است از طریق اعمال کرنش‌های پلاستیک زیاد دانسته بالایی از ناهم‌جایی‌ها حاصل گردد. فرآیند نورد تجمعی (ARB) و آهنگری چند محوره (MAF) به عنوان روش‌های اعمال تغییر شکل مومسان شدید و دست‌یابی به ساختارهای نانومتری مطرح می‌باشند. در پژوهش حاضر به منظور تکامل ساختار، ایجاد ساختار ریز دانه، بهبود و افزایش استحکام و سختی، مس خالص تجاری، تحت فرایند ARB و MAF قرار گرفت. تعداد هفت مرحله نورد و هفت پاس نیرو پرس تحت شرایط یکسان در دمای محیط بر نمونه‌ها اعمال گردید. پس از تهیه نمونه‌های فرآوری شده با استفاده از دو روش فوق به منظور بررسی خواص آنها، آنالیزهای ساختاری و مکانیکی در مراحل مختلف فرایند انجام شد. خواص مکانیکی نمونه‌های استاندارد تهیه شده به وسیله انجام آزمون‌های سختی و کشش ارزیابی شد. این آزمایش‌ها نشان دادند که سختی، تنش تسلیم و استحکام با افزایش مراحل ARB و MAF بطور چشمگیری افزایش می‌یابند. همچنین نتایج بیانگر آن بود که نمونه‌های فرآوری شده با استفاده از روش MAF از لحاظ مشخصات ریزساختاری و رفتار مکانیکی دارای خواص بهتر و بارزتری نسبت به روش ARB می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: نورد اتصالی تجمعی، آهنگری چند محوره، خواص مکانیکی.

Abstract

Techniques of severe plastic deformation have been of continual interest in the production of novel metallic microstructures. Among these, accumulative roll bonding and multi axial forging have been extensively used in modern industry. Accumulative roll-bonding (ARB) and multi axial forging (MAF) process are severe plastic deformation process capable of developing grains below $1\mu\text{m}$ diameter and to improve mechanical properties. In this study, high strength and high rigidity copper were produce by ARB and MAF methods, using commercial pure copper to seven cycles. Mechanical and structure analyses were conducted on the produce specimen to evaluate their mechanical and structural properties in different ARB and MAF cycles. Hardness, yield stress, UTS and ductility properties of samples were determined by mechanical tests. The results show that hardness, yield strength and UTS of the axial forged and rolled samples are increased whereas the strain hardening decreased by increasing cycles. With increasing strain during ARB and MAF passes strength of these specimen increased but elongation decreased. According to the last analysis results, it can be said that multi axial forging in compare of ARB process can produce ultra-fine grained materials to improve the mechanical properties including tension and hardness.

Keyword: Accumulative roll bonding, Multi axial forging, mechanical properties.

(کد: ۹۱۱۰۶۲)

مقدمه

با توسعه روز افزون صنایع الکترونیک، نیاز به آلیاژهای مس که استحکام و قدرت هدایت الکتریسیته بالا داشته باشند 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 صنعت الکترونیک، استفاده از مس خالص با ساختار ریز دانه که با تغییر شکل مومسان شدید^۱ تولید می‌شوند، توسعه زیادی یافته است [۱]. همچنین، ریز شدن اندازه دانه یکی از روش‌های مهم استحکام‌بخشی مواد است که نسبت به سایر روش‌های استحکام‌بخشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. با این روش می‌توان همزمان به ترکیب مناسبی از استحکام و انعطاف‌پذیری دست یافت. در حالی که در روش‌های دیگر، افزایش استحکام با کاهش انعطاف‌پذیری همراه می‌باشد. بطور کلی رابطه بین استحکام ماده با اندازه دانه از طریق رابطه معروف هال-پچ^۲ و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

که در آن σ_y تنش تسلیم، σ_0 مقاومت شبکه، d اندازه دانه و k ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد. رابطه فوق نشان می‌دهد که استحکام ماده با عکس مجذور اندازه دانه رابطه دارد. به عبارتی با ریز شدن اندازه دانه استحکام ماده افزایش می‌یابد [۲].

بطور کلی روش‌های تولید مواد نانومتری را می‌توان به دو گروه تقسیم‌بندی کرد. روش اول تحت عنوان روش پایین به بالا^۳ و روش دوم با نام روش بالا به پایین^۴ شناخته می‌شود.

در روش‌های پائین - بالا مواد فوق ریز دانه را از کنار هم قرار دادن و چیدمان اتم‌های مجزا و یا تجمع ذرات نانو پودری ایجاد می‌کنند. رسوب‌دهی الکتریکی، آسیاب‌کاری گلوله‌ای و آسیاب‌کاری در دماهای بسیار کم، مثال‌هایی از روش پائین - بالا می‌باشد. مشکل عمده این روش‌ها کوچک بودن ابعاد قطعه‌ی تولیدی است که تنها در ابزارهای الکترونیکی کاربرد دارد. همچنین قطعه‌ی تولید شده دارای مقداری تخلخل و آلودگی است که در حین فرایند ساخت قطعه حاصل می‌شود. در روش‌های بالا - پائین، در ابتدا از یک ماده حجیم با دانه‌بندی درشت استفاده می‌کنند. سپس با انجام فرایندهای خاصی، اندازه دانه آنرا تا حد

کوچکتر از میکرون و یا نانومتر کاهش می‌دهند. این روش‌ها عمدتاً بر پایه ایجاد کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد در ماده استوار و به روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک (SPD^۵) معروف می‌باشند. تغییر شکل‌های شدید پلاستیک SPD ناشی از انواع فرایندهای مکانیکی می‌تواند سبب ایجاد ساختار نانو و مواد با اندازه دانه نانومتری و همچنین سبب تغییر در ساختمان میکروسکوپی گردد [۳-۴].

از انواع فرایندهای SPD می‌توان به اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار^۱ (ECAP)، اکستروژن و فشار سیلیکی^۲ (CEC)، پیچش تحت فشارهای بالا^۳ (HPT)، نورد اتصالی^۴ تجمعی^۵ (ARB) و آهنگری چند محوره^۶ (MAF) اشاره کرد [۴-۶].

یکی از روش‌های موفق SPD، اتصال از طریق نورد اتصالی تجمعی می‌باشد. در این فرایند تغییر شکل 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 چند لایه استفاده شده است [۵].

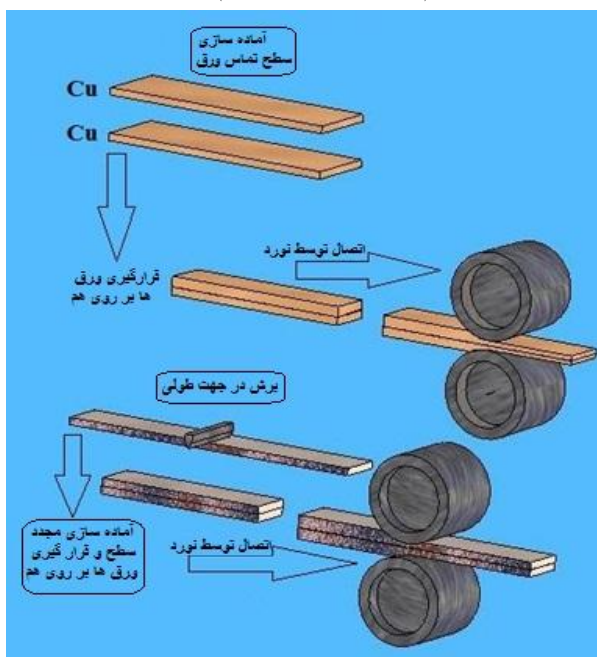
یکی دیگر از فرایندهای تغییر شکل پلاستیک که اخیراً، در صنعت آهنگری مورد توجه قرار گرفته است، آهنگری چند محوره MAF می‌باشد که به عنوان یک گام اولیه قبل از آهنگری شمش‌ها به قطعات نهایی انجام می‌شود. این کار باعث شکسته شدن ساختار درشت ریختگی شده و انعطاف‌پذیری بهتر و همگن شدن خواص اجزا را فراهم می‌آورد. این روش از جمله روش‌هایی است که می‌تواند کرنش‌های زیادی را به ماده اعمال کند و یکی از روش‌های موثر برای تولید مواد فوق ریزدانه می‌باشد [۶-۷].

در این روش مسیر کرنش‌دهی در هر مرحله از فرایند تغییر می‌کند. این عوامل به طور چشمگیری روی ریز ساختار تولید شده و نهایتاً بر روی خواص مکانیکی ماده به خصوص در فلزاتی که ریزساختارهای کامپوزیتی دارند، تاثیر می‌گذارد.

در سالهای اخیر تلاش‌های زیادی برای بهبود خواص مکانیکی، فیزیکی و ایجاد ساختار ریز دانه با استفاده از روش‌های مختلف SPD بر روی مواد مختلف صورت گرفته است اما

انجام فرایند در ابتدا ورق‌های مس در ابعاد مشخص برشکاری شدند. از دو نوار مسی به ضخامت ۱ میلی‌متر و ابعاد ۱۲×۴ سانتی‌متر برای شروع فرایند استفاده شد. روند انجام فرایند ARB بر روی مس خالص تجاری در شکل ۱ نشان داده شده است. جهت ساخت، ابتدا ورق‌ها با استون شسته و چربی زدایی گردید 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 ۰/۴ میلی‌متر استفاده شد.

استفاده از سمباده سیمی بالاترین زبری سطح را ایجاد کرده و سبب ایجاد قوی‌ترین اتصال لایه‌ای بین ورق‌ها می‌شود [۲]. بدین ترتیب دو سطح برسکاری 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 داد (۵۰٪ کاهش ضخامت).



شکل ۱- فرایند ARB مس خالص.

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 آماده سازی مجدد و مهار چهارگوشه آن مجدداً تحت نورد با ۵۰٪ کاهش ضخامت قرار گرفت. این فرایند تا هفت سیکل بدون روانکار و در دمای محیط

تاکنون بررسی و مقایسه خواص ایجاد شده حاصل از این فرایندها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف از تحقیق حاضر بررسی تکامل ساختار، ایجاد ساختار ریز دانه، افزایش استحکام و سختی مس خالص تجاری تحت فرایند نورد اتصالی تجمعی و فرایند آهنگری چند محوره و مقایسه آنها می‌باشد. در هر مرحله با استفاده از میکروسکوپ نوری و آزمون کشش و سختی، بر روی نمونه‌های استاندارد بدست آمده، خواص مکانیکی و ساختاری مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

مواد و روش تحقیق

۱- مواد اولیه

مواد مورد استفاده در این پژوهش ورق‌های مس خالص تجاری و بلوکه‌های مس می‌باشد که ترکیب، ابعاد و ویژگی‌های آن در جداول ۱ و ۲ مشخص شده است. ورق‌هایی که جهت انجام فرایند استفاده شدند، بصورت ورق‌های مستطیلی شکل با ابعاد ۱۲۰×۴۰ میلی‌متر بودند. ضخامت ورق‌ها نیز برای مس بطور یکسان ۱ میلی‌متر انتخاب شدند. همچنین از بلوکه‌های مس خالص تجاری با ابعاد ۱۵×۱۴/۸×۷/۵ میلی‌متر که بطور کامل برای حذف هر گونه عیوب آنیل شده بودند استفاده گردید.

جدول ۱- مشخصات ورق‌های اولیه مورد استفاده

جنس ورق	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)	ابعاد ورق
ورق مس تجاری	۹۸/۴Cu, ۰/۶۸Zn, ۰/۱۸Fe, ۰/۲۲Pb, ۰/۴۸Co, ۰/۰۱۹Sn, ۰/۰۱۲Cd, ۰/۰۰۹Cr	۱۲۰×۴۰×۱ mm
بلوکه مس		۱۵×۱۴/۸×۷/۵m

جدول ۲- خواص مکانیکی فلز مس بکار رفته در تحقیق

فلز	افزایش طول (%)	سختی (HV)	استحکام تسلیم (MPa)
ورق مس	۳۲/۸	۶۲	۸۷/۵
بلوکه مس	۳۰/۵	۶۶	۸۹/۵

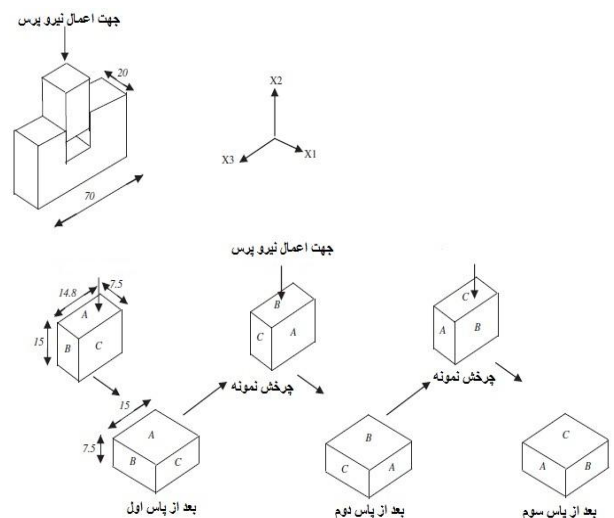
۲- تولید مس فر آوری شده به روش ARB

آزمایش‌ها بر روی ورق مس خالص تجاری صورت گرفت. برای

انجام پذیرفت. پس از هر مرحله‌ی نورد، نمونه‌هایی برای انجام آزمون‌های مختلف تهیه شدند. سطح مقطع کناری ورق‌های جوش خورده پس از سنباده زنی و پولیش با پارچه و خمیر الماسه، با میکروسکوپ نوری بررسی گردید تا نحوه جوش خوردن ورق‌ها مشاهده شود و در نهایت برای مطالعه خواص مکانیکی (استحکام کششی، مقدار افزایش طول و منحنی‌های تنش و کرنش) آزمون استحکام کششی مطابق با استاندارد ASTM-E8M با استفاده از دستگاه Zwick 250 صورت گرفت. در ادامه برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها از دستگاه سختی سنج ویکرز مدل Bohler با بار ۲۵ گرم و زمان توقف ۱۰ ثانیه استفاده شد.

۳- تولید مس ریز ساختار توسط فرایند آهنگری چند محوره

فرایند آهنگری چند محوره بسیار ساده به نظر می‌رسد اما بعد از هر مرحله اعمال فشار سطوح جانبی نمونه بشکته‌ای می‌شوند. برای انجام مرحله بعدی فشار ابتدا باید این سطوح ساییده شوند. اگر دو سطح از چهار سطح جانبی نمونه محدود شوند، نیاز به ساییدن هر چهار سطح نمونه بعد از هر مرحله حذف می‌گردد که این امر درون یک قالب حاصل می‌شود و شرایطی مشابه نورد کرنش صفحه‌ای به وجود می‌آید. شکل ۲ تصویر شماتیک فرایند آهنگری چند محوره را نشان می‌دهد.



شکل ۲- فرایند آهنگری چند محوره MAF

مطابق شکل نمونه درون حفره یا کانال قالب فشرده می‌شود و بعد از خروج از قالب مطابق با روشی که ذکر شد برای فشار در جهت دیگر درون قالب قرار می‌گیرد. به دلیل ثابت بودن حجم نمونه در این فرایند امکان تکرار مراحل تا رسیدن به اندازه دانه‌های فوق ریز وجود دارد.

در این فرایند ارتفاع نمونه در هر مرحله ۵۰٪ کاهش می‌یابد. برای انجام فرایند آهنگری چند محوره در مرحله اول قالب مناسبی با ابعاد مورد نظر طراحی و ساخته شد.

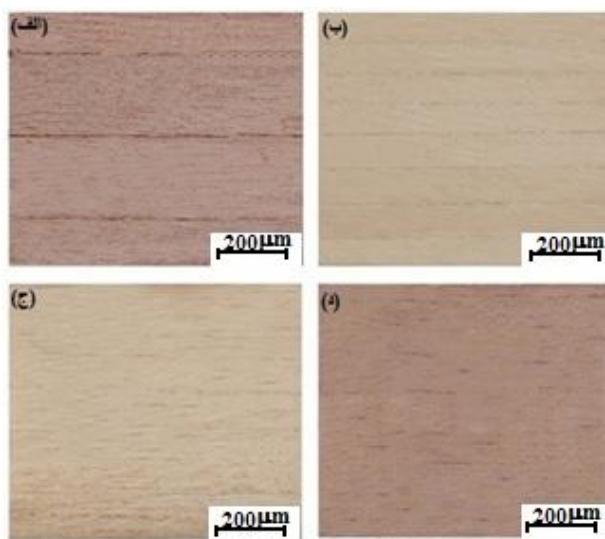
سپس نمونه‌های آماده شده تا هفت مرحله تحت فشار قرار گرفتند. فرایند آهنگری چند محوره در دمای اتاق توسط پرس ۶۰ تنی و با سرعت ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه انجام گرفت. برای ایجاد تغییر شکل یکنواخت در نمونه‌ها از روغن به عنوان روانکار استفاده شد. در این آزمایش ارتفاع نمونه‌ها در درون قالب به نصف کاهش داده شده و از ۱۵ میلی‌متر به ۷/۵ میلی‌متر رسیده است. بعد از هر مرحله اعمال فشار دو سطحی از نمونه که آزاد بوده اند، بدلیل بشکته‌ای شدن سائیده و صاف شدند، سپس نمونه چرخانده شده و از محور دیگر تحت فشار قرار گرفته است، این فرایند تا رسیدن به کرنش‌های بالاتر تکرار شده است. این توالی و تکرار این اطمینان را بوجود می‌آورد که نمونه در سه جهت پرس شده است.

نتایج و بحث

۱- بررسی تحولات ریز ساختاری مس خالص حین فرایند ARB

تحولات ریز ساختاری مس خالص ARB شده توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۳ صفحات جانبی مس خالص تجاری پس از هفت سیکل فرایند نورد تجمعی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ورق‌ها تا سیکل هفتم بدون عیب و پارگی فرایند ARB را پشت سر گذاشتند ولی نمونه‌ها در سیکل هشتم معیوب شدند به همین دلیل نمونه‌های تولید شده تا سیکل هفتم مورد توجه قرار گرفتند. افزایش چگالی نابه‌جایی و کاهش اندازه دانه سبب افزایش کرنش سختی 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 فرایند ARB، تشخیص و رؤیت لایه‌ها دشوار می‌باشد. این بدان معناست که با پیشرفت فرایند ARB، تعداد لایه‌ها بگونه‌ای مداوم افزایش می‌یابد.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری بترتیب الف) پاس اول، ب) پاس سوم، ج) پاس پنجم، د) پاس هفتم بزرگنمایی 200X.

با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند ARB از آنجایی که اندازه تغییر شکل اعمالی به ماده افزایش می‌یابد. در نتیجه جهت کاهش انرژی سیستم مرزهای کم زاویه و سپس با زاویه بزرگ در ساختار حاصل و ماده ریز دانه‌تر می‌شود [۸]. 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. سوچی و همکارانش، مکانیزم تشکیل این دانه‌های بسیار ظریف را در مورد تجمعی به این صورت پیشنهاد دادند: ساختار نورد تجمعی یافته، ساختاری شدیداً فشرده است و ناهمسانی‌های موضعی زیادی دارد که شامل نابه‌جایی‌های وابسته به موقعیت می‌باشند. در این مکان‌های ناهمسانی، کرنش بحرانی مرزهای فرعی کم زاویه را به مرزدانه‌های پر زاویه تبدیل می‌کند و ساختار بسیار ظریف به وجود می‌آورد [۸-۱۰].

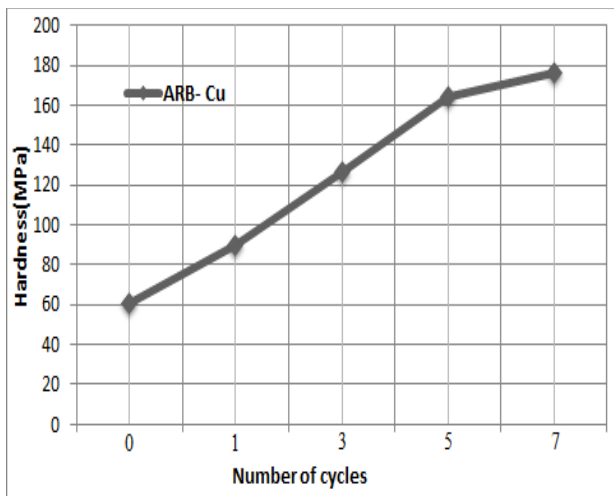
۲- بررسی خواص مکانیکی مس ARB شده

خواص مکانیکی مس خالص تجاری تحت فرایند ARB در مراحل مختلف فرایند مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی خواص مکانیکی آزمون‌های کشش تک محوری و ریزسختی سنجی بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. منحنی تنش-کرنش در سیکل‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود استحکام کششی 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 فرایند ARB حدود ۱/۵ برابر بزرگتر از استحکام اولیه ورق مس می‌باشد. تا سیکل سوم کرنش سختی یا سخت شدن نابه‌جایی‌ها نقش اصلی را در افزایش استحکام بازی می‌کند و تشکیل دانه‌های زیرمیکرونی یا سلول‌های نابه‌جایی سبب افزایش استحکام می‌شود [۱۱-۱۲]. از سیکل چهارم افزایش استحکام با توجه به ساختار دانه و شکل‌گیری دانه‌های فوق‌العاده ریز می‌باشد و تأثیر کرنش سختی کمتر می‌گردد. عوامل مختلفی در افزایش استحکام کامپوزیت‌ها تولید شده به روش ARB تأثیرگذار می‌باشند. بطور کلی عوامل استحکام بخشی در کامپوزیت‌های تولید شده با فرایند ARB را می‌توان بصورت عوامل تأثیرگذار زیر بیان نمود. در گام اول می‌توان به کرنش سختی بدلیل افزایش دانسیته نابه‌جایی حاصل از تغییر شکل 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 ریز دانه و بهبود اندازه دانه تأثیر آن تدریجاً کاهش می‌یابد. در ادامه فرایند ARB، ریز دانه شدن در مراحل نهایی فرایند بسیار تأثیرگذار می‌باشد.

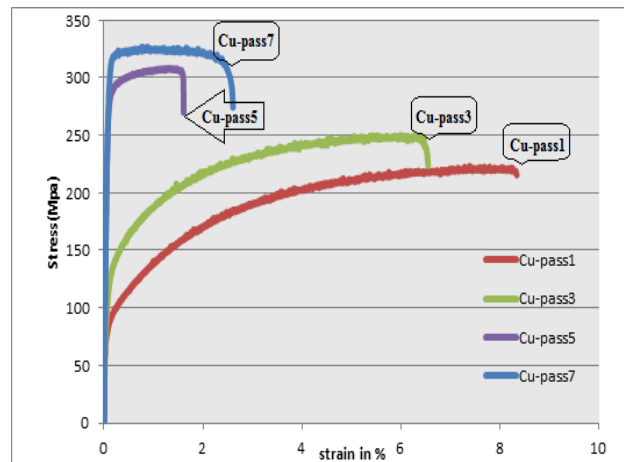
در ساختار فوق ریز، ایجاد مرزهای جدید با توجه به رابطه هال پیچ که قبلاً ذکر شد موجب استحکام بخشی می‌شود. همچنین اثر کرنش برشی ایجاد شده در طی فرایند ARB ناشی از اصطکاک بین غلطک و نمونه و اصطکاک بین خود لایه‌ها سبب افزایش کرنش معادل و افزایش استحکام می‌شود. از دیگر عوامل می‌توان تنش‌های باقیمانده از طریق تأثیر بر حرکت نابه‌جایی‌ها و تعداد لایه‌ها و ضخامت آنها را ذکر کرد. در مراحل اولیه فرایند تغییر

لایه‌ها و در مراحل نهایی تغییر تعداد لایه‌ها زیاد است که در افزایش استحکام تاثیرگذار می‌باشند.

نابجایی‌ها در فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید و آنیل در فرایند اصلاح دینامیکی رخ می‌دهد.



شکل ۵- نتایج ریزسختی سنجی مربوط به لایه‌های مس طی سیکل‌های مختلف فرایند ARB.



شکل ۴- منحنی تنش- کرنش مس در سیکل‌های مختلف فرایند ARB.

با افزایش مراحل ARB ضخامت لایه‌ها کاهش و تعداد آنها بصورت توانی $(2^n - 1)$ افزایش می‌یابد. بطوریکه در سیکل هفتم شامل ۲۵۵ لایه می‌باشد. ضخامت لایه‌ها با تقسیم نمودن ضخامت ورق پس از فرایند نورد در هر پاس به تعداد لایه‌های موجود بدست آمده است. علاوه بر این مطابق شکل ۴ کاهش نرخ کرنش در سیکل‌های بالاتر مشهود می‌باشد. کاهش نرخ کرنش به علت تأثیر کرنش سختی می‌باشد که در طی فرایند ARB تأثیر کرنش سختی به تدریج کاهش می‌یابد [۱۳].

۳- نتایج ریزسختی سنجی مس تحت فرایند ARB

برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها، صفحه جانبی نمونه‌ها در سیکل‌های مختلف فرایند ARB تحت ریزسختی‌سنجی قرار گرفت (شکل ۵).

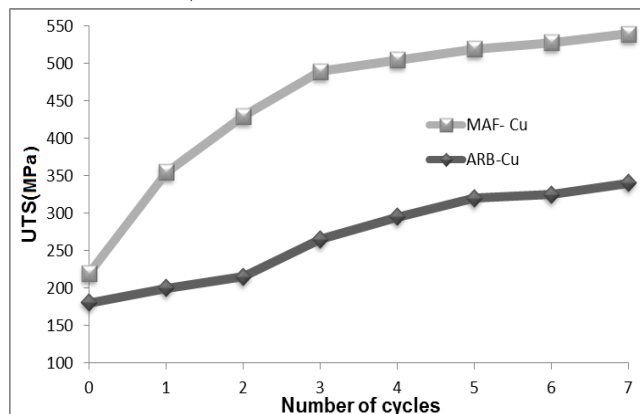
افزایش سریع سختی حدود ۲ برابر نسبت به مس خالص پس از پاس سوم ایجاد گردیده است. افزایش سریع سختی با کاهش نرخ کرنش‌ها می‌تواند به سخت شدن کرنشی مربوط باشد [۱۴]. در سیکل‌های بالای فرایند ARB، سختی به دلیل آن است که مواد به یک دانسیته پایداری از نابجایی‌ها رسیده‌اند. دانسیته پایداری از نابجایی‌ها بوسیله تعادل دینامیکی در طی تولید

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 [۱۶-۱۳]. واقعیت دیگر که تأثیر بسزایی در سختی دارد افزایش نمایی تعداد لایه‌ها با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند ARB می‌باشد طبق فرمول $(2^n - 1)$ (نمونه مس ARB شده در سیکل هفتم شامل ۲۵۵ لایه می‌باشد).

۴- بررسی خواص مکانیکی مس تحت فرایند آهنگری چند محوره (MAF)

منحنی تنش-کرنش نمونه‌های مس در مراحل مختلف فرایند آهنگری چند محوره در شکل ۶ نشان داده شده است برای انجام آزمون فشار سه نمونه برای هر مرحله تهیه شده است. لازم به ذکر است که شرایط انجام آزمون فشار برای هر ۳ نمونه مربوط به یک کرنش خاص یکسان بود. همانطور که در تصاویر مشاهده می‌شود بعد از مراحل اولیه فرایند MAF افزایش شدیدی در استحکام تسلیم نمونه‌ها مشاهده می‌گردد و با پیشرفت فرایند و افزایش سیکل‌های پرس روند صعودی استحکام تسلیم کاهش می‌یابد.

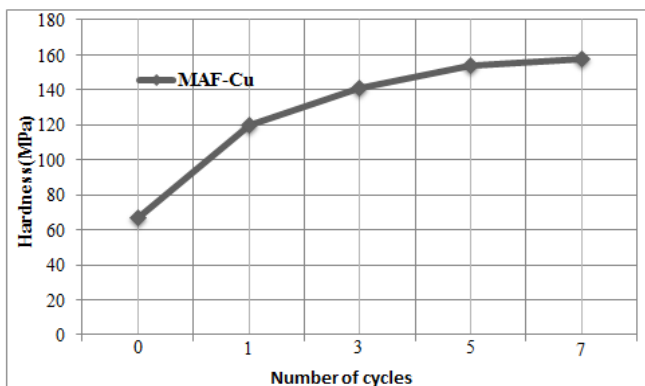
در نتیجه تردی گردید که این امر سبب پارگی ورق‌ها و تردی زیاد نمونه‌های فرایند MAF پس از سیکل هفتم شد.



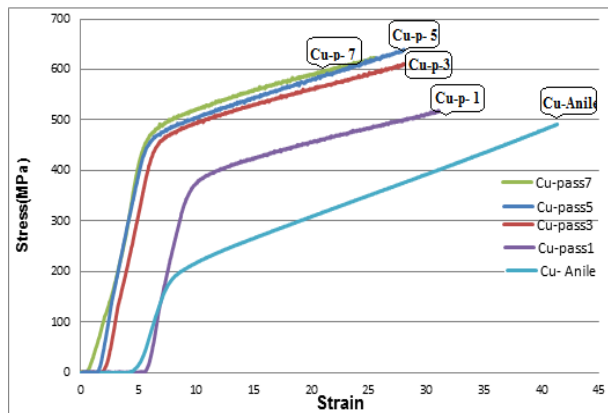
شکل ۷- مقایسه استحکام کششی نهایی در مس فرآوری شده به روش ARB و MAF.

۵- نتایج ریزسختی سنجی مس تحت فرایند آهنگری چند محوره MAF

نتایج آزمون سختی در شکل ۸ نشان داده شده است. داده‌های بدست آمده از این آزمون برحسب تعداد مرحله ترسیم شده اند و مشاهده می‌گردد که در مراحل اولیه تغییرات سختی مشابه با تغییرات استحکام تسلیم بر حسب تعداد مراحل می‌باشد. در ابتدا سختی از ۶۶ مگا پاسکال برای ماده اولیه به تقریباً ۱۲۰ مگا پاسکال برای ماده بعد از مرحله اول افزایش می‌یابد. یعنی سختی ۱/۹ برابر شده است. در ادامه روند افزایش سختی به صورت تدریجی است و نهایتاً در مرحله هفتم به ۱۵۸ مگا پاسکال می‌رسد که در مقایسه با نمونه اولیه ۲/۴ برابر افزایش یافته است.



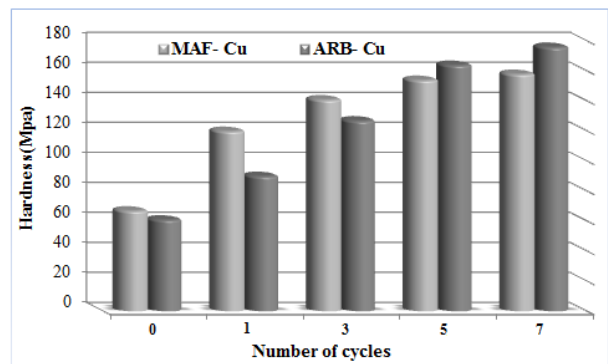
شکل ۸- نتایج ریز سختی سنجی مربوط سیکل‌های مختلف فرایند MAF.



شکل ۶- منحنی تنش- کرنش مس در سیکل‌های مختلف فرایند MAF.

مطابق شکل ۶ استحکام تسلیم و استحکام تسلیم نهایی مس با افزایش سیکل‌های فرایند MAF افزایش می‌یابد. ماکزیمم استحکام تسلیم و استحکام تسلیم نهایی بترتیب ۴۴۰ و ۵۵۰ مگا پاسکال مطابق شکل پس از سیکل هفتم بدست می‌آید. شکل ۷ مقایسه بین استحکام کششی مس ARB شده و مس خالص که تحت فرایند MAF قرار گرفته است را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه‌های تولید شده توسط هر دو فرایند از پاس سوم به بعد رفتار مکانیکی تقریباً مشابهی دارند. در هر دو روش ARB و MAF کرنش سختی توسط ایجاد نابجایی‌ها و بهبود اندازه دانه دو مکانیزم اصلی در افزایش استحکام می‌باشند. اما تحقیقات صورت گرفته نشانگر آن است که ریز شدن اندازه دانه تاثیر بسزایی در افزایش استحکام در فرایند MAF داشته است [۱۷]. به عبارتی دیگر نمونه‌های تولید شده توسط فرایند آهنگری چند محوره دارای اندازه دانه‌های کوچکتری نسبت به فرایند نورد جمعی می‌باشد [۱۷]. به همین دلیل شاهد استحکام بالاتری در نمونه‌های مس MAF شده می‌باشیم که بطور واضحی در نمودار مقایسه‌ای شکل ۷ که بین مس ARB شده و مس تحت فرایند MAF قرار گرفته قابل مشاهده می‌باشد. همچنین نکته قابل توجه دیگر مربوط به کرنش نمونه‌ها می‌باشد همانطور که در نمودار تنش- کرنش هر دو فرایند MAF و ARB مشاهده می‌شود. کرنش و انعطاف پذیری در طی اجرا فرایند در سیکل‌های بالاتر کاهش یافته است. ورق‌ها و نمونه‌ها تا سیکل هفتم بدون عیب فرایند ARB و MAF را پشت سر گذاشتند. اما افزایش چگالی نابجایی و کاهش اندازه دانه سبب افزایش کرنش سختی ماده و

با دقت بیشتر در این شکل مشاهده می‌شود سختی از مرحله ۵ به بعد تقریباً ثابت باقی می‌ماند. همانطور که در شکل ۹ قابل مشاهده است، لایه‌های مس در فرایند ARB در پاس چهارم به بعد دارای سختی بیشتری نسبت به مس MAF شده می‌باشد که دلیل آن را می‌توان به مکانیزمهای بیشتری که سبب افزایش سختی در فرایند ARB می‌شود اشاره نمود. در سیکل‌های بالای فرایند ARB سختی به دلیل آن است که مواد به یک دانسیته پایداری از نا بجایی‌ها رسیده‌اند [۱۸].



شکل ۹- مقایسه ریز سختی سنجی در مس فرآوری شده به روش ARB و MAF.

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 [۱۸]. واقعیت دیگر که تاثیر بسزایی در سختی دارد افزایش نمایی تعداد لایه‌ها با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند ARB می‌باشد طبق فرمول (2^n) (1 نمونه مس ARB شده در سیکل هفتم شامل ۲۵۵ لایه می‌باشد).

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر فرایند نورد تجمعی و آهنگری چند محوره تا هفت مرحله بطور موفقیت آمیز بر روی مس خالص انجام گرفت. تا سیکل هفتم نورد اتصالی تجمعی نمونه‌ها دارای شکل‌پذیری مناسب و قطعاتی بدون عیب ماکروسکوپی بدست آمد. افزون بر این نتایج زیر بدست آمدند:

۱- با بکارگیری کاهش سطح مقطع نوردی ۵۰٪ در هر مرحله از فرایند، 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- همچنین 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 آهنگری چند محوره نیز حاکی از آن است که: بر اساس آزمون فشار بیشترین افزایش استحکام تسلیم در مرحله اول بدست آمد. در این مرحله استحکام تسلیم مس از میزان ۲۱۰ برای ماده اولیه به ۳۵۰ مگاپاسکال افزایش یافت. در نهایت پس از هفت سیکل انجام فرایند MAF استحکام تسلیم به ۵۵۰ مگاپاسکال افزایش یافت.

۴- نتایج آزمون سختی نیز بیشترین افزایش ریزسختی را برای مرحله اول MAF نشان داد و پس از آن روند افزایش ریزسختی کاهش یافت. در مرحله هفتم سختی در حدود ۱۵۷ می‌باشد که این میزان در مقایسه با سختی نمونه اولیه، ۲/۴ برابر افزایش یافت.

بررسی نتایج حاکی از آن بود که روش آهنگری چند محوره در حالت کرنش صفحه‌ای که از جمله روش‌های تغییر شکل شدید مومسان می‌باشد، می‌تواند به منظور تولید نمونه‌های مس خالص تجاری فوق ریزدانه با استحکام بالا و سختی مناسب مورد استفاده قرار گیرد. افزون بر این، نمونه‌های فرآوری شده با این روش از لحاظ مشخصات ریز ساختاری، رفتار مکانیکی همچون استحکام، سختی و انعطاف پذیری دارای خواص بهتر و بارزتری نسبت به روش ARB بود.

پی‌نوشت‌ها

1. Sever plastic deformation
2. Hall-Pitch
3. Bottom-up procedure
4. Top-down Procedure
5. Sever Plastic Deformation
6. (Equal channel angular pressing)
7. (Cyclic extrusion-compression)
8. (High Pressure Torsion)
9. (Accumulative roll bonding)
10. (Multi axial forging)

منابع و مراجع

- Materialia, Vol. 39, pp.1221-1227, 1998.
- [10] J. Young Hwan, K. Sang shik and H. Seung- Zeon, "Tensile Behavior of Commercially Pure Copper Sheet Fabricated by 2- and 3- Layered Accumulative Roll Bonding (ARB) Process", *Metals and Materials International*, Vol. 14, pp. 171-179, 2008.
- [11] Y. S. Kim, S. H. Kang, and D. H. Shin, "Effect of rolling direction on the microstructure and mechanical properties of accumulative roll bonding (ARB) processed commercially pure 1050 aluminum alloy", *Materials Science Forum*, Vol. 503, pp. 681-686, 2006.
- [12] L. Cha-Yong, H. Seung-Zeon and H. L. Seong, "Formation of Nano-Sized Grains in Cu and Cu-Fe-P Alloys by Accumulative Roll Bonding Process", *Metals and Materials International*, Vol.12, pp.225-232, 2006.
- [13] C. Lu, K. Tieu and D. Wexler, "Significant enhancement of bond strength in the accumulative roll bonding", *Composites*, Vol. 26, pp. 145-156, 2008.
- [14] C. P. Heason and P. B. Prangnell, "Texture Evolution and Grain Refinement in Al Deformed to Ultra-High Strains by Accumulative Roll Bonding (ARB)", *Material Science Forum*, Vol. 733, pp. 408-418, 2002.
- [15] N. Hansen, X. Huang, R. Ueji, N. Tsuji, "Structure and strength after large strain deformation", *Mater Sci Eng A*, Vol, 191, pp. 387-389, 2004.
- [16] J. Abenojar., F. Velasco and M. A. Martinez., "Optimization of processing parameters for the Al /10 B4C system obtained by mechanical alloying", *Journal of Materials Processing*, Vol. 328, pp.222-229, 2008.
- [17] K. Gao, M. Liu, F. Zou, X. Pang J. Xie, "Characterization of microstructure evolution after severe plastic deformation of pure copper" *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, pp. 4750-4757, 2010.
- [18] A.L. Costa, A.C. Reis, L. Kestens, MS. Andrade, "Ultra grain refinement and hardening of IF-steel during accumulative roll-bonding", *Mater Sci Eng A* 2005;406:279-85.
- [1] L. Cha-Yong, H. Seung-Zeon and H. L. Seong, "Formation of Nano-Sized Grains in Cu and Cu-Fe-P Alloys by Accumulative Roll Bonding Process", *Metals and Materials International*, Vol. 12, pp. 225-232, 2006.
- [2] N. Tsuji, Y. Ito, Y. Saito and Y. Minamino, "Strength and Ductility of Ultrafine Grained Aluminum and Iron Produced by ARB and Annealing", *Scripta Materialia*, Vol. 47, pp. 893-995, 2002.
- [3] A. P. Zhilyaev, T. G. Langdon, "Using high-pressure torsion for metal processing: fundamentals and applications", *Progress in Materials Science*, Vol.53, Issue 6, pp. 893-979, 2008.
- [4] R.Z. Valiev., and T.G. langdon., "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement", *Progress in Materials Science*, Vol.51, pp. 881-981, 2006.
- [5] A. H. Eslami, S.M. Zebarjad, M.M. Moshksar, "A study on the mechanical and magnetic properties of Cu/Ni multilayer composite fabricated by Accumulative Roll Bonding process (ARB)", *Materials Science and Technology*, Vol. 29, pp. 52-64, 2013.
- [6] N. Ogawa, M. Shiomi, K. Osakada, "Fundamental study on forging of magnesium alloy", in: *Proceedings of Second International Seminar on Precision Forging*, Osaka, 2000, pp. 219-222.
- [7] 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.
- [8] S. A. Hosseini, H. Danesh Manesh, "High-strength, high-conductivity ultra-fine grains commercial pure copper produced by ARB process", *Materials and Design*, Vol 30, pp. 2911-2918, 2009.
- [9] N. Suji, Y. Saito, H. Utsunomiya, T. Sakari, R.G. Hong, "Ultra-fine grained bulk aluminum produced accumulative roll-bonding (ARB) process", *Scripta*