

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



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

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 μ 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, structure and mechanical properties.

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

چکیده

روش تغییر شکل پلاستیک شدید (¹SPD) 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 دانسیته بالایی از ناهمبایی‌ها حاصل گردد. فرآیند نورد تجمعی ²ARB و آهنگری چند محوره ³MAF به عنوان روش‌های اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید و دستیابی به ساختارهای نانومتری مطرح می‌باشد. در پژوهش حاضر به منظور تکامل ساختار، ایجاد ساختار ریز دانه، بهبود و افزایش استحکام و سختی مس خالص تجاری، تحت فرآیند 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. با انجام آزمایش‌های مکانیکی، سختی، تنش تسلیم، استحکام و چکش خواری بررسی گردید. این آزمایش‌ها نشان دادند که سختی، تنش تسلیم و استحکام با افزایش مراحل ARB و MAF بطور چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین نتایج بیانگر آن بود که نمونه‌های فرآوری شده با استفاده از روش MAF از لحاظ مشخصات ریزساختاری، رفتار مکانیکی دارای خواص بهتر و بارزتری نسبت به روش ARB می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اتصال نورد تجمعی، آهنگری چند محوره، خواص مکانیکی (تنش تسلیم، استحکام و چکش خواری).

¹ Sever plastic deformation

² Accumulated Roll Bonding

³ Multi Axial Forging

مقدمه

پیشرفتهای اخیر در صنایع نظامی، برق و الکترونیک، اتومبیل سازی، قطارهای برقی، ابزارهای مغناطیسی در صنایع پزشکی و ایجاد میدان های مغناطیسی بسیار بالا مستلزم استفاده از رساناهایی بالا، خواص مغناطیسی خوب و هزینه مناسب می باشد. به همین منظور تحقیقات زیادی درباره مواد مرکب و آلیاژهای مس با نیوبیوم، نیکل، آهن، کرم، نقره صورت گرفته است [۱]. ریز شدن اندازه دانه یکی از روشهای مهم استحکام بخشی مواد است که نسبت به سایر روشهای استحکام بخشی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. با این روش می توان همزمان به ترکیب مناسبی از استحکام و چکش خواری دست یافت. در حالیکه در روشهای دیگر، افزایش استحکام با کاهش چکش خواری همراه می باشد. بطور کلی رابطه بین استحکام ماده با اندازه دانه از طریق رابطه معروف هال-پیچ^۴ و بصورت زیر بیان می شود:

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

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 می دهد که استحکام ماده با عکس مجذور اندازه دانه رابطه دارد. به عبارتی با ریز شدن اندازه دانه استحکام ماده افزایش می یابد [۱]. یکی از روشهایی که ریز شدن اندازه دانه را به همراه دارد تغییر شکل بسیار زیاد و یا شدید (SPD) می باشد. در حقیقت این روش بر پایه ایجاد کرنشهای پلاستیک بسیار زیاد در ماده استوار و به روشهای تغییر شکل بسیار زیاد معروف می باشند. تغییر شکل های شدید پلاستیک ناشی از انواع فرآیندهای مکانیکی می تواند سبب ایجاد ساختار نانو و در مواردی تغییر ترکیب شیمیایی گردد [۲-۴]. یکی از روشهای موفق SPD، اتصال از طریق نورد تجمعی اتصالی^۵ (ARB) می باشد فرایند اتصال نورد تجمعی ARB یکی از فرآیندهای تغییر شکل شدید پلاستیک می باشد که توسط تسوجی وسیتو در سال ۱۹۹۸ برای ساخت مواد حجیم ابداع شد [۳]. در این فرایند تغییر شکل پلاستیک زیادی از طریق چند مرحله نورد متوالی انجام می گیرد. مزیت این روش توانایی در تولید ورق با ساختار نانو در مقیاس صنعتی می باشد به همین دلیل از این روش اخیرا در تولید کامپوزیت های چند لایه استفاده شده است [۵]. در صنعت آهنگری، آهنگری چند محوره به عنوان یک گام اولیه قبل از آهنگری شمش ها به قطعات نهایی انجام می شود. این کار باعث شکسته شدن ساختار درشت ریختگی شده و داکتیلیتی بهتر و همگن شدن خواص اجزا را فراهم می آورد. این روش از جمله روش هایی است که می تواند کرنش های زیادی را به ماده اعمال کند و یکی از روش های موثر برای تولید مواد فوق ریزدانه می باشد [۵].

با نرخ های تغییر شکل زیاد برای تولید نمونه های بزرگ و حجمی کاربرد دارد. در این روش مسیر کرنش دهی در هر مرحله از فرآیند تغییر می کند. این عوامل به طور چشمگیری روی ریز ساختار تولید شده، به خصوص در فلزاتی که ریزساختارهای کامپوزیتی دارند، تاثیر می گذارد. روند عملیاتی این فرآیند به این صورت است که ابتدا نمونه با ابعاد مشخص در یک جهت تحت تغییر شکل تک (ND) و دیگری حول محور فشار (RD) محوری فشار قرار می گیرد سپس با دو چرخش ۹۰ درجه یکی حول کانال نمونه را در قالب گذاشته و از جهت دیگر آن را تحت اعمال فشار قرار می دهند و این عمل در مراحل دیگر نیز تکرار می شود تا کرنش های تجمعی زیاد در نمونه ایجاد شود. روش های ذکر شده در واقع نوعی از فرایندهای ایجاد تغییر شکل پلاستیک در ماده می باشد که به کمک آنها می توان بدون تغییر قابل ملاحظه در ابعاد قطعه، کرنشهای پلاستیک بسیار زیادی در ماده ایجاد نمود. در این تحقیق به منظور تکامل ساختار، ایجاد ساختار ریز دانه، افزایش استحکام و سختی، مس خالص تجاری تحت فرآیند

⁴ Hall-Petch¹ Accumulated Roll Bonding

ARB و فرایند آهنگری چند محوره قرار گرفت و در هر مرحله ساختار، خواص مکانیکی شامل استحکام کششی نهایی، کرنش و سختی آن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

روش پژوهش

- مواد اولیه

مواد مورد استفاده در این پژوهش ورقهای مس خالص تجاری و بلوکه های مس می باشد که ترکیب، ابعاد ویژگی های آن در جدول ۱ و ۲ مشخص شده است. ورق هایی که جهت انجام فرایند استفاده شدند، بصورت ورق های مستطیلی شکل با ابعاد ۱۲۰×۴۰ میلیمتر بودند. ضخامت ورقها نیز برای مس بطور یکسان ۱ میلیمتر انتخاب شدند. همچنین از بلوکه های 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 ورق های اولیه مورد استفاده

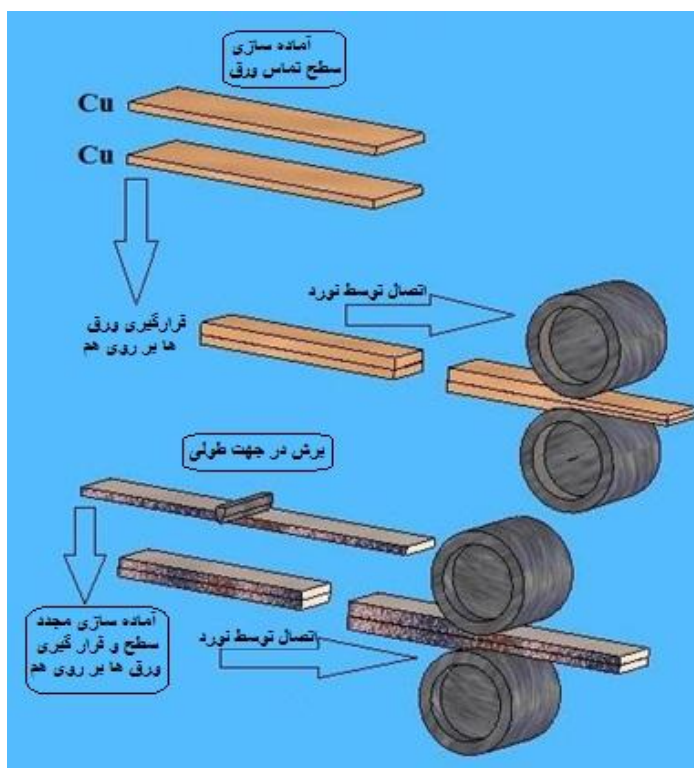
ابعاد ورق	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)	جنس ورق
۱۲۰×۵۰×۱ mm	۹۸/۴Cu, ۰/۶۸Zn, ۰/۱۸Fe,	ورق مس
۱۵×۱۴,۸×۷,۵mm	۰/۲۲Pb, ۰/۴۸Co, ۰/۰۱۹Sn, ۰/۰۱۲Cd, ۰/۰۰۹Cr	تجاری بلوکه مس

جدول ۲- خواص مکانیکی فلز مس بکار رفته در تحقیق

استحکام تسلیم (MPa)	سختی (HV)	افزایش طول (%)	فلز
۸۷/۵	۸۰	۳۲/۸	ورق مس
۸۹/۵	۸۴	۳۰/۵	بلوکه مس

-تولید کامپوزیت لایه ای مس به روش ARB

آزمایشات بر روی ورق مس خالص تجاری صورت گرفته شد. برای انجام فرآیند در ابتدا ورق‌های مس در ابعاد مشخص برشکاری شدند. از دو نوار مسی به ضخامت ۱ میلی متر و ابعاد ۵×۱۲ سانتی متر برای شروع فرآیند استفاده شد. جهت ساخت کامپوزیت 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. بدین ترتیب دو سطح برشکاری شده روی هم قرار گرفتند و توسط سیم‌های مسی چهارگوشه آن مقید شد ضخامت ساندویچ اولیه ۲ میلی متر بود که پس از پاس صفرم به ۱ میلی متر کاهش ضخامت داد (۵۰٪ کاهش ضخامت).

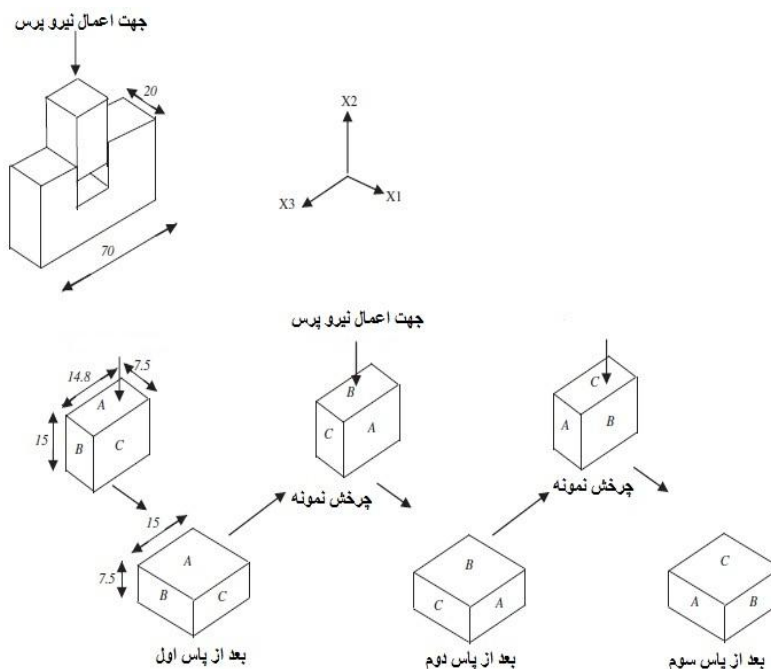


شکل ۱- فرایند ARB مس خالص.

دستگاه نورد مورد استفاده دارای غلطک‌هایی به قطر ۱۸۰ میلیمتر و با سرعت نورد ۴۰ دور بر دقیقه تنظیم شد. نمونه پس از پاس صفرم از وسط نصف و پس از آماده سازی مجدد و مهار چهارگوشه آن مجدداً تحت نورد با ۵۰٪ کاهش ضخامت قرار گرفت. این فرآیند تا هفت سیکل بدون روانکار انجام پذیرفت. پس از هر مرحله نورد نمونه‌هایی جهت انجام آزمایشات تهیه گردید. 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.

- تولید مس ریز ساختار توسط فرایند آهنگری چند محوره

فرآیند آهنگری چند محوره بسیار ساده به نظر می رسد اما بعد از هر مرحله اعمال فشار سطوح جانبی نمونه بشکاف می شوند. 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 می گردد که این امر درون یک قالب حاصل می شود و شرایطی مشابه نورد کرنش صفحه ای به وجود می آید. شکل ۲ تصویر شماتیک فرآیند آهنگری چند محوره را نشان می دهد. مطابق شکل نمونه درون حفره یا کانال قالب فشرده می شود و بعد از خروج از قالب مطابق با روشی که ذکر شد برای فشار در جهت دیگر درون قالب قرار می گیرد. به دلیل ثابت بودن حجم نمونه در این فرآیند امکان تکرار مراحل تا رسیدن به اندازه دانه های فوق ریز وجود دارد. در این فرآیند ارتفاع نمونه در هر مرحله ۵۰٪ کاهش می یابد.



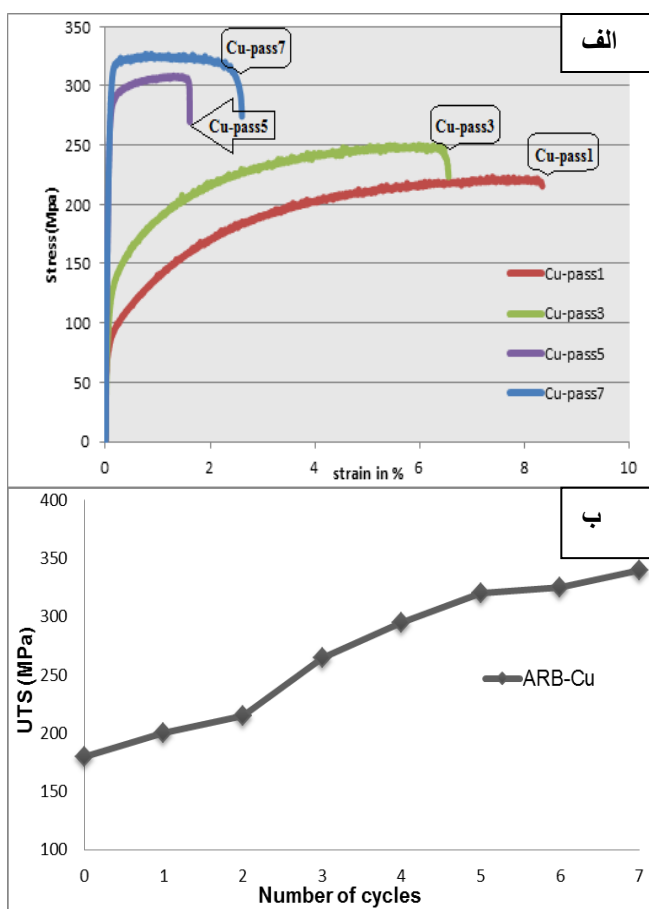
شکل ۲- فرایند آهنگری چند محوره MAF

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

- نتایج و بحث

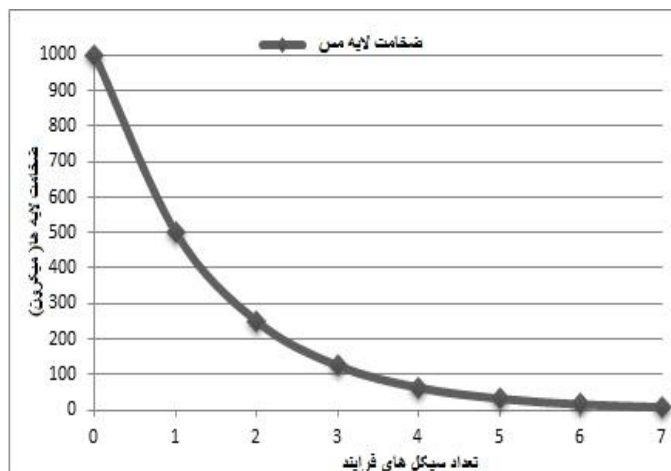
- بررسی خواص مکانیکی مس ARB شده

خواص مکانیکی مس خالص تجاری تحت فرآیند ARB در مراحل مختلف فرآیند 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 ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ 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 فرآیند ARB ادامه یافته و پس از هفت سیکل فرایند ARB حدود ۱,۵ برابر بزرگتر از استحکام اولیه ورق مس می‌باشد. افزایش استحکام مس خالص تحت فرآیند ARB قرار گرفته به سبب کرنش سختی یا تقویت ناب‌جایی‌ها (σ_p) و بهبود اندازه دانه و استحکام مرزها (σ_b) می‌باشد [۸-۹].



شکل ۳- منحنی تنش- کرنش مس در سیکل‌های مختلف فرایند ARB: (الف) منحنی تنش-کرنش، (ب) منحنی استحکام کششی نهایی.

σ_p براساس فرضیه سخت شدن نابه‌جایی به صورت $(\sigma_p \propto \rho^{1/2})$ محاسبه می‌شود و σ_b نیز براساس فرضیه استحکام هال - پیچ $\sigma_b \propto d^{1/2}$ محاسبه شده که d فاصله میان مرزهای غیرقابل نفوذ می‌باشد [۱۰-۱۲].
تا سیکل سوم کرنش سختی با سخت شدن نابه‌جایی‌ها نقش اصلی را در افزایش استحکام بازی می‌کند و تشکیل دانه‌های زیرمیکرونی یا سلول‌های نابه‌جایی سبب افزایش استحکام می‌شود [۱۱].



شکل ۴- منحنی تغییرات ضخامت لایه های مس در طی فرایند ARB.

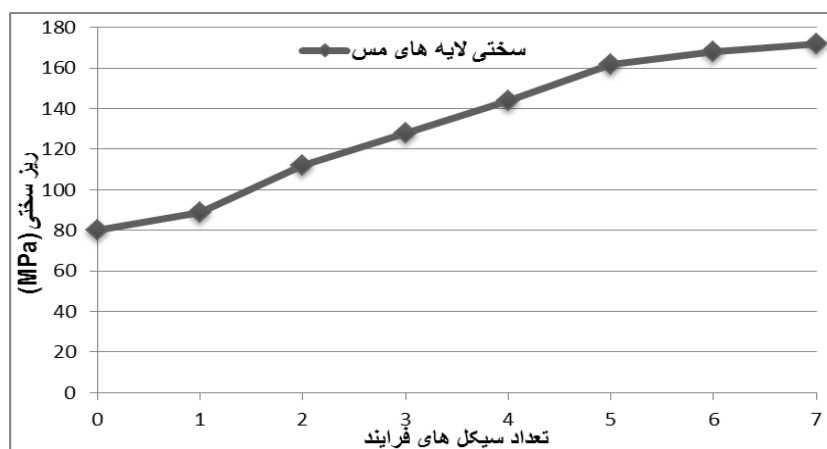
از سیکل چهارم افزایش استحکام با توجه به ساختار دانه و شکل‌گیری دانه‌های فوق‌العاده ریز می‌باشد و تأثیر کرنش سختی کمتر می‌گردد. عوامل مختلفی در افزایش استحکام کامپوزیت‌ها تولید شده به روش ARB تأثیرگذار می‌باشند.
بطور کلی عوامل استحکام بخشی در کامپوزیت‌های تولید شده با فرایند ARB را می‌توان بصورت عوامل 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 همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در مراحل اول فرایند تغییر لایه‌ها و در مراحل نهایی تغییر تعداد لایه‌ها زیاد است که در افزایش استحکام تأثیرگذار می‌باشند.

با افزایش مراحل ARB ضخامت لایه‌ها کاهش و تعداد آنها بصورت توانی (2^n) افزایش می‌یابد. بطوریکه در سیکل هفتم شامل ۲۵۵ لایه می‌باشد. اندازه 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 ۳ کاهش کرنش در سیکل‌های بالاتر مشهود می‌باشد. کاهش کرنش به علت تأثیر کرنش سختی می‌باشد که در طی فرایند ARB تأثیر کرنش سختی به تدریج کاهش می‌یابد.

۳-۳ 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 ۱،۵ برابر نسبت به مس خالص پس از پاس سوم ایجاد گردیده است. افزایش سریع سختی با کاهش کرنش‌ها می‌تواند به سخت شدن کرنشی مربوط باشد [۱۴].

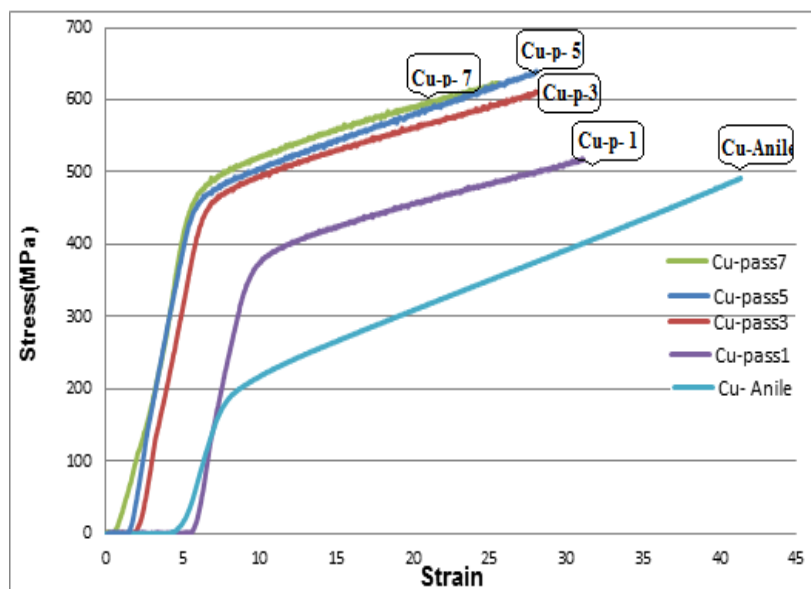


شکل ۵- نتایج ریزسختی سنجی مربوط به لایه‌های مس طی سیکل‌های مختلف فرایند ARB.

در سیکل‌های بالای فرایند ARB سختی به دلیل آن است که مواد به یک دانسیته پایداری از نابعایی‌ها رسیده‌اند. دانسیته پایداری از نابعایی‌ها بوسیله تعادل دینامیکی در طی تولید نابعایی‌ها در فرایند تغییر شکل 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 غلطک‌نورد و نمونه در طی فرایند ARB اتفاق می‌افتد، می‌باشد [۱۱-۱۵]. 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.

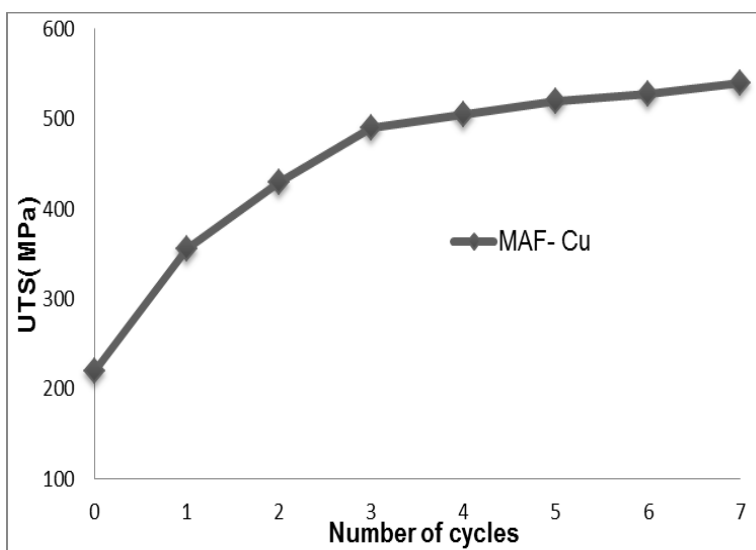
۳-۴ بررسی خواص مکانیکی مس تحت فرایند آهنگری چند محوره (MAF)

منحنی تنش-کرنش نمونه‌های مس در مراحل مختلف فرایند آهنگری چند محوره در شکل ۷ 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 (شکل ۷). مطابق شکل ۶ استحکام تسلیم و استحکام تسلیم نهایی مس با افزایش سیکل‌های فرایند MAF افزایش می‌یابد. ماکزیمم استحکام تسلیم و استحکام تسلیم نهایی به ترتیب ۴۴۰ و ۵۵۰ مگاپاسکال مطابق شکل پس از سیکل هفتم بدست می‌آید.

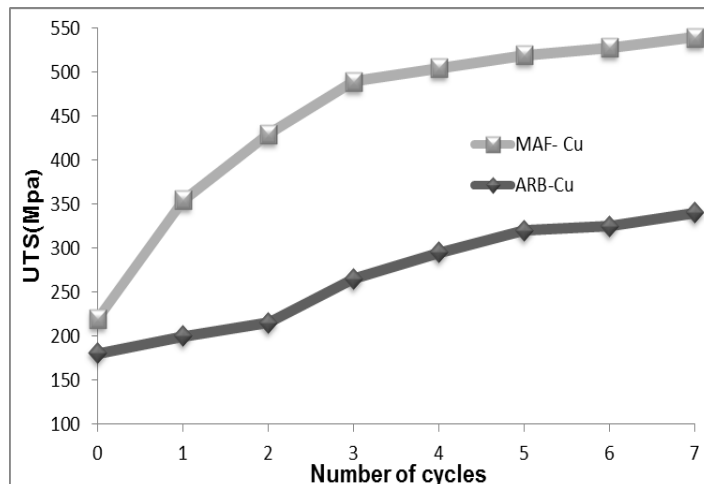


شکل ۶- منحنی تنش- کرنش مس در سیکل های مختلف فرایند MAF

شکل ۸ مقایسه بین استحکام کششی مس ARB شده و مس خالص که تحت فرایند MAF قرار گرفته است را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود نمونه های تولید شده توسط هر دو فرایند رفتار مکانیکی تقریباً مشابهی دارند. در هر دو روش MAF و ARB کرنش سختی توسط ایجاد نابجایی ها و بهبود اندازه دانه دو مکانیزم اصلی در افزایش استحکام می باشند. اما تحقیقات صورت گرفته نشانگر آن است که ریز شدن اندازه دانه تاثیر بسزایی در افزایش استحکام در فرایند MAF داشته است [۱۶]. به عبارتی دیگر نمونه های تولید شده توسط فرایند آهنگری چند محوره دارای اندازه دانه های کوچکتری نسبت به فرایند نورد تجمعی می باشد [۱۶].



شکل ۷- منحنی استحکام کششی نهایی در سیکل های مختلف فرایند MAF.



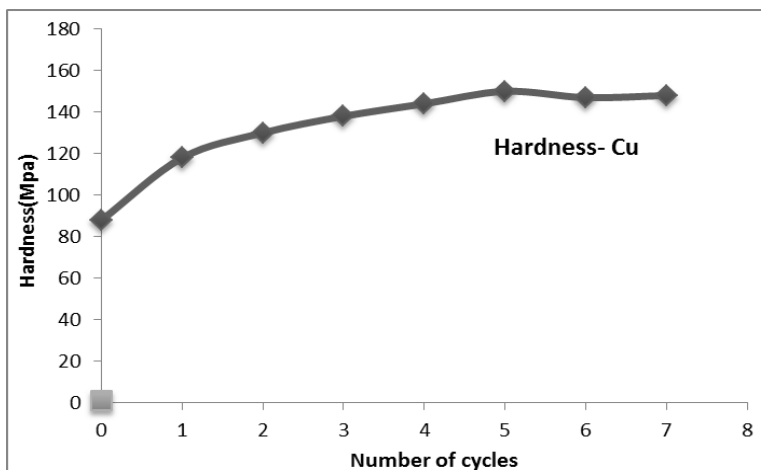
شکل ۸- مقایسه استحکام کششی نهایی در مس فرآوری شده به روش ARB و MAF.

به همین دلیل شاهد استحکام بالاتری در نمونه های مس MAF شده می باشیم که بطور واضحی در نمودار مقایسه ای شکل ۸ که بین مس ARB شده و مس تحت فرایند MAF قرار گرفته قابل مشاهده می باشد. همچنین نکته قابل توجه دیگر مربوط به کرنش نمونه ها می باشد همانطور که در نمودار تنش- کرنش هر دو فرایند MAF و ARB مشاهده می شود. کرنش و داکتیلیته در طی اجرا فرایند در سیکل های بالاتر کاهش یافته است. ورق ها و نمونه ها تا سیکل هفتم بدون عیب فرایند ARB و MAF را پشت سر گذاشتند. اما افزایش چگالی نابه جایی و کاهش اندازه دانه سبب افزایش کرنش ماده و در نتیجه تردی گردید که این امر سبب پارگی ورق ها و تردی زیاد نمونه های فرایند MAF پس از سیکل هفتم شد.

۳-۵ نتایج ریزسختی سنجی مس تحت فرایند آهنگری چند محوره MAF

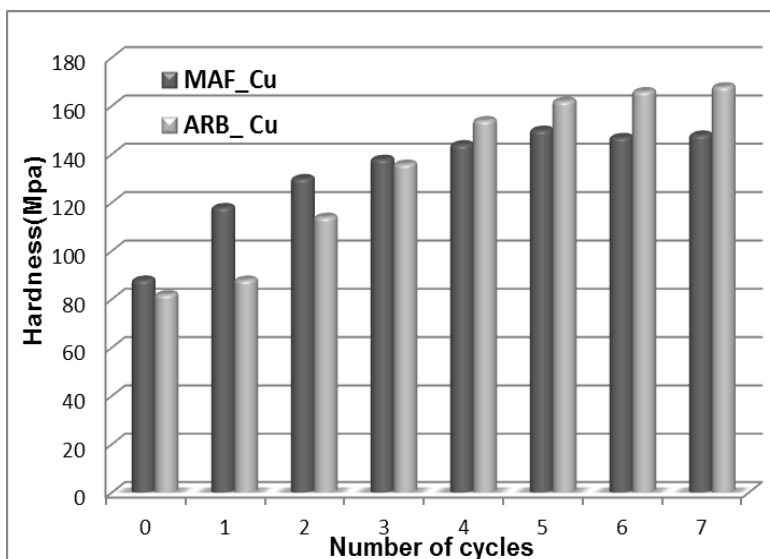
نتایج آزمون سختی در شکل ۹ نشان داده شده است. داده های بدست آمده از این آزمون برحسب تعداد مرحله ترسیم شده اند و مشاهده می گردد که در مراحل اولیه تغییرات سختی مشابه با تغییرات استحکام تسلیم بر حسب تعداد مراحل می باشد. در ابتدا سختی از ۸۴ مگا پاسکال برای ماده اولیه به تقریباً ۱۲۰ مگا پاسکال برای ماده بعد از مرحله اول افزایش می یابد. یعنی سختی ۱/۳۳ برابر شده است. در ادامه روند افزایش سختی به صورت تدریجی است و نهایتاً در مرحله هفتم به ۱۵۵ مگا پاسکال می رسد که در مقایسه با نمونه اولیه ۱/۷۲ برابر افزایش یافته است.

با دقت بیشتر در این شکل مشاهده می شود سختی از مرحله ۵ به بعد تقریباً ثابت باقی می ماند. همانطور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است، لایه های مس در فرایند ARB در پاس پنجم به بعد دارای سختی بیشتری نسبت به مس MAF شده می باشد که دلیل آن را می توان به مکانیزمهای بیشتری که سبب افزایش سختی در فرایند ARB می شود اشاره نمود. در سیکل های بالای فرایند ARB سختی به دلیل آن است که مواد به یک دانسیته پایداری از نا بجایی ها رسیده اند.



شکل ۹- نتایج میکروسختی سنجی مربوط سیکل های مختلف فرایند MAF مس.

دانشیته پایداری از نا بجایی ها بوسیله تعادل دینامیکی در طی تولید نابجایی ها در فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید و آنیل در فرایند اصلاح دینامیکی رخ می دهد [۱۶]. 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 می افتد، می باشد [۵۶]. واقعیت دیگر که تاثیر بسزایی در سختی دارد افزایش نمایی تعداد لایه ها با افزایش تعداد سیکل های فرایند ARB می باشد طبق فرمول $(2^n - 1)$ نمونه مس ARB شده در سیکل هفتم شامل ۲۵۵ لایه می باشد.



شکل ۱۰- مقایسه میکروسختی سنجی در مس فرآوری شده به روش ARB و MAF.

مراجع

- [۱] امیرحسین اسلامی، "بررسی اثرات ذرات دی سیلیساید مولیبدن (MoSi_2) بر رفتار مکانیکی و الکتریکی ماده مرکب زمینه مس تولید شده به روش اتصال نوردی تجمعی (ARB)"، نشریه مواد نوین، دوره ۴، شماره ۱۳، ص ۵۷-۶۸، پاییز ۱۳۹۲.
- [۲] امیرحسین اسلامی، "بررسی اثرات ذرات تقویت کننده اکسید آهن (Fe_3O_4) بر رفتار مکانیکی و مغناطیسی ماده مرکب زمینه مس تولید شده به روش اتصال تجمعی نورد"، نشریه فرایند های نوین در مهندسی مواد، سال ۸، شماره ۱، ص ۵۱-۶۰، بهار ۱۳۹۳.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakari, R.G. Hong, "Ultra-fine grained bulk aluminum produced accumulative roll-bonding (ARB) process", Scripta Materialia, Vol. 39, pp.1221-1227, 1998.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] B.A. Movchan, F.D. Lemkey, "Mechanical properties of fine-crystalline two-phase materials", Material Science and Engineering. A, Vol.45, pp. 224:136-145, 1997.
- [10] 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.
- [11] H. Sekine and R. Chen, "A combined microstructure strengthening analysis of SiCp/Al metal matrix composites", Composites, Vol. 26, pp.183-188, 1995.
- [12] C. Lu, K. Tieu and D. Wexler, "Significant enhancement of bond strength in the accumulative roll bonding", Composites, Vol. 26, pp. 145-156, 2008.

- [13] 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.
- [14] N. Hansen, X. Huang, R. Ueki, N. Tsuji, "Structure and strength after large strain deformation", Mater Sci Eng A, Vol, 191, pp. 387-389, 2004.
- [15] 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.
- [16] K. Gao, M. Liu, F. Zou, X. Pang J. Xie, " Characterization of microstructure evolution after sever plastic deformation of pure copper "Materials Science and Engineering A, vol. 528, pp. 4750-4757, 2010.
- [17] 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.