

Investigation mechanical properties of commercial pure copper produced by 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, multi axial forging have been extensively used in modern industry. Accumulative 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 MAF methods, using commercial pure copper to seven cycles. Mechanical analyses were conducted on the produce specimen to evaluate their mechanical properties in different MAF cycles. Hardness, yield stress, UTS and ductility properties of samples were determined by mechanical tests. The results shows that hardness, yield strength and UTS of the axial forged are increased whereas the strain hardening decreased by increasing cycles. With increasing strain during MAF passes strength of these specimen increased but elongation decreased.

Keywords: Accumulative roll bonding, Multi axial forging, structure and mechanical properties.

بررسی بهبود رفتار مکانیکی مس خالص با اعمال فرایند آهنگری چند محوره MAF

چکیده:

روش تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD^1) 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 نابه‌جایی‌ها حاصل گردد. فرآیند آهنگری چند محوره MAF^2 به عنوان روش 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 MAF قرار گرفت. تعداد هفت پاس نیرو پرس تحت شرایط یکسان در دمای محیط بر نمونه‌ها اعمال گردید. پس از تهیه نمونه‌های فرآوری شده با استفاده از روش فوق به منظور بررسی خواص آنها، آنالیزهای 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 MAF بطور چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین نتایج بیانگر آن بود که استفاده از روش MAF سبب بهبود چشمگیری در رفتار مکانیکی همچون استحکام تسلیم و سختی می‌گردد.

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

¹ (Sever plastic deformation)

² (Multi axial forging)

۱-مقدمه:

پیشرفت‌های دهه‌های اخیر سبب شده است که در صنایع مختلف نیاز به وجود و ساخت مواد جدید با خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب احساس شود. اصولاً به اثبات رسیده است که فلزات و مواد فوق ریزدانه با اندازه کمتر از ۱ میکرون خواص فیزیکی و مکانیکی مناسبی را نسبت به مواد با اندازه دانه معمولی برای ما حاصل می‌کند. از روشهای جدید تولید مواد با اندازه دانه نانو متری، روش تغییر شدید پلاستیک است. امروزه با اعمال کرنش‌های بسیار بزرگ با استفاده از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید، ریزساختارهایی با دانه‌های بسیار ریز در مواد ایجاد می‌کنند. فرآیندهای ویژه‌ای مانند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار (ECAP^۳)، اکستروژن و فشار سیکلی (CEC^۴)، پیچش تحت فشارهای بالا (HPT^۵)، اتصال نورد تجمعی (ARB^۶) و آهنگری چند محوره (MAF^۷) نمونه‌هایی از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید شناخته شده می‌باشند [۱-۲]. ویژگی مشترک همه این فرآیندها ثابت ماندن ابعاد قطعه کار حین فرآیند شکل دهی می‌باشد. با این روشها می‌توان همزمان به ترکیب مناسبی از استحکام و چکش‌خواری دست یافت. در حالیکه در روشهای دیگر، افزایش استحکام با کاهش چکش‌خواری همراه می‌باشد. بطور کلی رابطه بین استحکام ماده با اندازه دانه از طریق رابطه معروف هال-پیچ^۸ و بصورت زیر بیان می‌شود:

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

که در آن σ 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 [۴].

در سال‌های اخیر، مواد حجمی نانو ساختار که به روش‌های تغییر شکل شدید مومسان فرآوری می‌شوند توجه زیادی را در بین مهندسين به خود معطوف کرده‌اند. تغییر شکل شدید مومسان از فرآیندهای شکل دهی فلزات است که در آنها کرنش‌های خیلی زیادی به ماده فلزی اعمال می‌شود و نهایتاً منجر به تولید مواد فوق ریزدانه و یا حتی نانو ساختار می‌گردد.

با استفاده از این روش‌ها می‌توان مواد را تا کرنش‌های خیلی زیاد تغییر شکل داد و به این طریق خواص فیزیکی (مقاومت الکتریکی) و مکانیکی (استحکام تسلیم، سختی، خستگی سیکل بالا) مواد را بهبود بخشید، زیرا در مواد فوق ریزدانه تولید شده توسط این روش‌ها ساخت مرز دانه‌ها افزایش یافته است.

از روش‌هایی که کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است فرآیند آهنگری چند محوره می‌باشد. در صنعت آهنگری، آهنگری چند محوره به عنوان یک گام اولیه قبل از آهنگری شمش‌ها به قطعات نهایی انجام می‌شود. این کار باعث شکسته شدن ساختار درشت ریختگی شده و داکتیلیتی 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 [۳].

³ (Equal channel angular pressing)

⁴ (Cyclic extrusion-compression)

⁵ (High Pressure Torsion)

⁶ (Accumulative roll bonding)

⁷ (Multi axial forging)

⁸ Hall-Petch

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 [۴-۵].

در این تحقیق به منظور تکامل ساختار، ایجاد ساختار ریز دانه، افزایش استحکام و سختی، مس خالص تجاری تحت فرآیند فرایند آهنگری چند محوره قرارگرفت و در هر مرحله خواص مکانیکی شامل استحکام کششی نهایی، کرنش و سختی آن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

روش تحقیق

- تهیه مواد

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش بلوکه های مس خالص تجاری با ترکیب عناصر آلیاژی که در جدول ۱ و ۲ آورده شده است، تهیه شدند. از بلوکه های مس خالص تجاری با ابعاد ۱۵×۱۴.۸×۷.۵ میلیمتر که کاملاً در دمای ۷۳۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱.۵ ساعت برای حذف هر گونه عیوب آنیل شده بودند استفاده گردید.

جدول ۱- مشخصات ورق های اولیه مورد استفاده

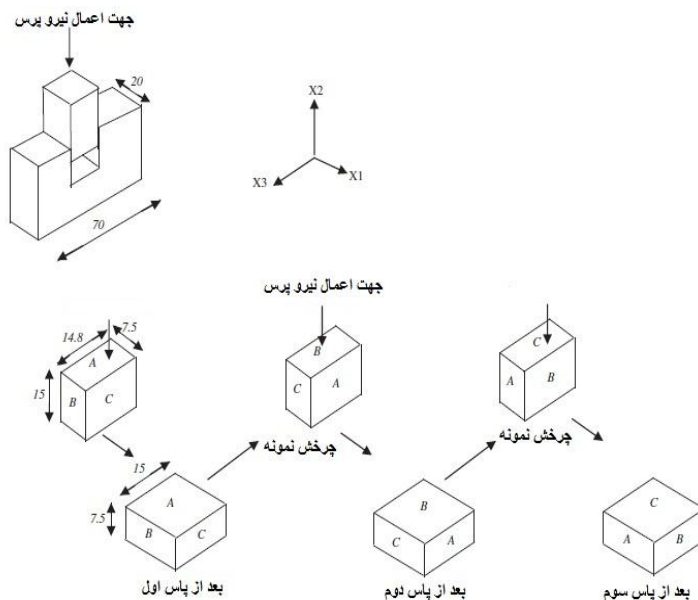
جنس ورق	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)	ابعاد ورق
بلوکه مس	98.4Cu, 0.68Zn, 0.18Fe, 0.52Pb, 0.48Co, 0.019Sn, 0.012Cd, 0.009Cr	۱۵×۱۴.۸×۷.۵mm

جدول ۲- خواص مس بکار رفته در تحقیق

فلز	افزایش طول (%)	سختی (HV)	استحکام تسلیم (MPa)
مس	30.5	84	89.5

- شرح انجام کار و روش تولید

فرآیند آهنگری چند محوره بسیار ساده به نظر می رسد اما بعد از هر مرحله اعمال فشار سطوح جانبی نمونه بشکه ای 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 ۱ 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.

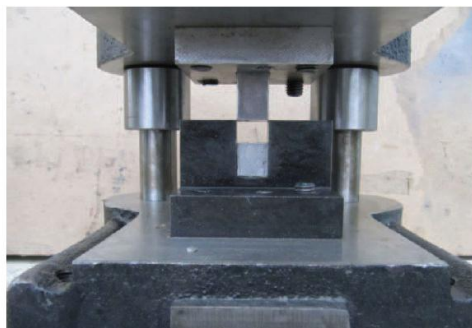


شکل ۱- مراحل انجام فرایند آهنگری چند محوره بر روی مس خالص [۴]

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 بشکه ای 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. شکل ۲ تصویر قالب مورد استفاده در فرایند آهنگری چند محوره را نشان می دهد.



شکل ۲- تصویر قالب مورد استفاده در فرایند آهنگری چند محوره

- بررسی خواص مکانیکی

بمنظور بررسی تغییرات خواص مکانیکی مس تحت فرایند آهنگری چند محوره از آزمونهای کشش و سختی سنجی استفاده گردید. بدلیل کوچک بودن ابعاد نمونه های تولید شده به روش آهنگری چند محوره امکان انجام آزمایش کشش در این نمونه ها وجود نداشت به همین دلیل از آزمون فشار برای این نمونه ها استفاده شده است. برای این منظور از درون نمونه های تغییر شکل داده شده تحت کرنش های مختلف نمونه های تست فشار با ابعاد $10 \times 5 \times 5$ آماده سازی شده اند. آزمون کشش و فشار با استفاده از دستگاه کشش Zwick /Z250 با ظرفیت ۲۵ تن در دمای اتاق و با نرخ کرنش 0.002 میلیمتر بر ثانیه صورت گرفت. برای اندازه گیری سختی نمونه ها نیز از دستگاه سختی سنج ویکرز مدل Buhler با بار ۲۵ گرم و زمان توقف ۱۰ ثانیه بر روی سطح عمود بر آخرین محور فشاردر فرایند آهنگری چند محوره استفاده شد. با حذف مقدار بیشینه و کمینه و با میانگیری از مقادیر سختی، سختی مس در سیکل های مختلف اندازه گیری و نمودار مربوطه رسم شد.

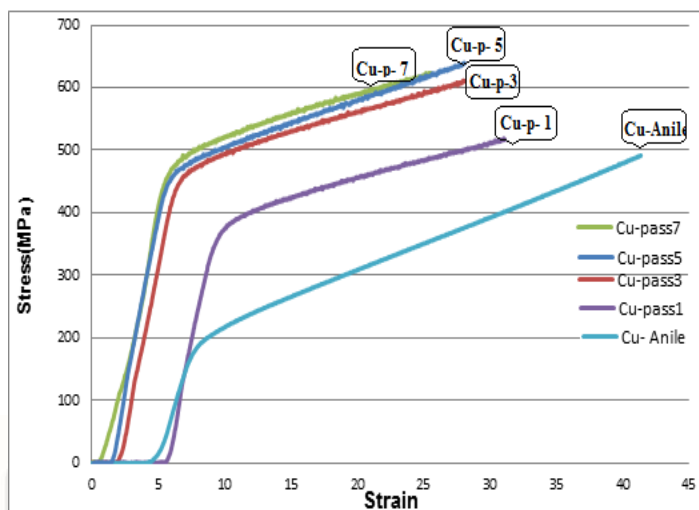
نتایج و بحث

- نتایج مربوط به خواص مکانیکی مس تحت فرایند آهنگری چند محوره (MAF)

جهت بررسی خواص مکانیکی مس تحت فرایند آهنگری چند محوره همانطور که بیشتر اشاره شد آزمون های میکرو سختی و کشش تک محوری روی نمونه ها صورت گرفت. بدلیل کوچک بودن ابعاد نمونه های تولید شده به روش آهنگری چند محوره امکان انجام آزمایش کشش در این نمونه ها وجود نداشت .

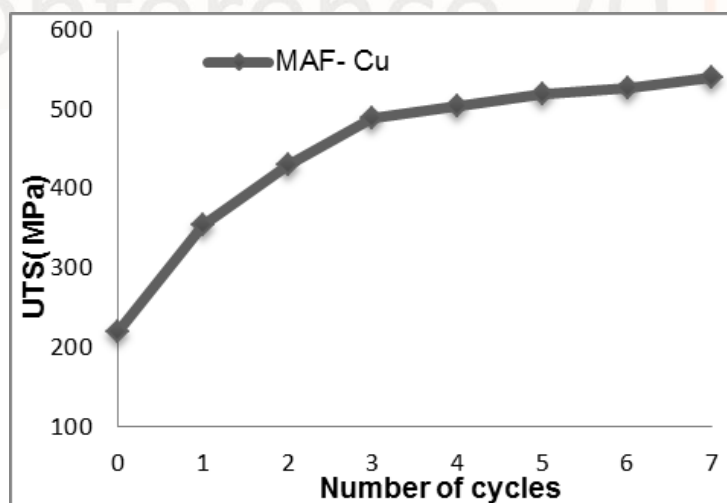
به همین دلیل از آزمون فشار برای این نمونه ها استفاده شده است. منحنی تنش-کرنش نمونه های مس در مراحل مختلف فرایند آهنگری چند محوره در شکل ۳ نشان داده شده است . در هر مرحله سه نمونه برای آزمون فشار تهیه گردید. اما در این قسمت برای اختصار فقط یکی از منحنی های تنش-کرنش آورده شده است . لازم به ذکر است که شرایط انجام آزمون فشار برای هر سه نمونه مربوط به یک کرنش خاص یکسان بود. همانطور که در تصاویر مشاهده می شود بعد از مراحل اولیه فرایند MAF افزایش شدیدی در استحکام تسلیم نمونه ها مشاهده می گردد و با پیشرفت فرایند و افزایش سیکل های پرس روند صعودی استحکام تسلیم کاهش می یابد.

مطابق شکل ۴ استحکام تسلیم و استحکام تسلیم نهایی مس با افزایش سیکل های فرایند MAF افزایش می یابد. ماکزیمم استحکام تسلیم و استحکام تسلیم نهایی بترتیب ۴۴۰ و ۵۵۰ مگاپاسکال مطابق شکل پس از سیکل هفتم بدست می آید.



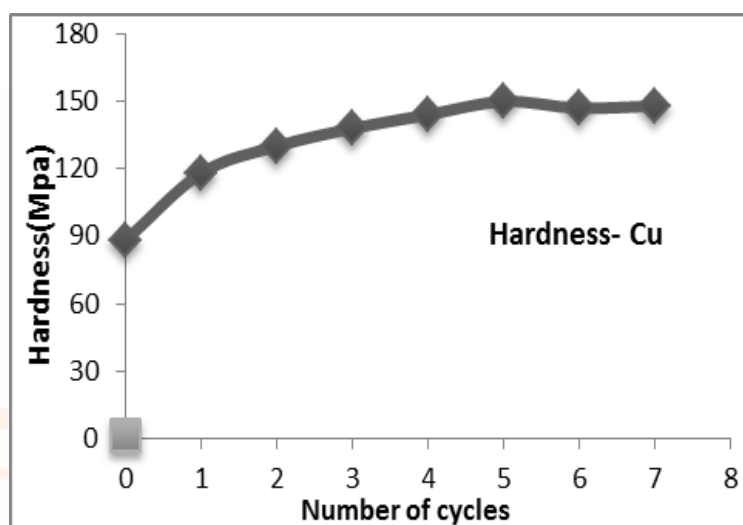
شکل ۳- منحنی تنش - کرنش مربوط به نمونه های مختلف مس پس از مراحل مختلف فرآیند آهنگری چندمحوره.

در روش MAF 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 [۶]. به عبارتی دیگر نمونه های تولید شده توسط فرایند آهنگری چند محوره دارای اندازه دانه های کوچکتری نسبت به فرایند نورد تجمعی می باشد [۶]. به همین دلیل شاهد استحکام بالاتری در نمونه های مس MAF شده می باشیم که بطور واضح در نمودار مقایسه ای که بین مس ARB شده و مس تحت فرایند MAF قرار گرفته قابل مشاهده می باشد.



شکل ۴- منحنی استحکام کششی نهایی در سیکل های مختلف فرایند MAF.

همچنین نکته قابل توجه دیگر مربوط به کرنش نمونه‌ها می‌باشد همانطور که در نمودار تنش-کرنش فرایند MAF مشاهده می‌شود کرنش و داکتیلیته در طی اجرا فرایند در سیکل‌های بالاتر کاهش یافته است. نمونه‌ها تا سیکل هفتم بدون عیب فرایند MAF را پشت سر گذاشتند. اما افزایش چگالی نابه‌جایی و کاهش اندازه دانه سبب افزایش کرنش ماده و در نتیجه تردی گردید که این امر سبب تردی زیاد نمونه‌های فرایند MAF پس از سیکل هفتم شد. نتایج آزمون سختی در شکل ۵ نشان داده شده 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 بر حسب تعداد مراحل می‌باشد. در ابتدا سختی از ۸۴ مگا پاسکال برای ماده اولیه به تقریباً ۱۲۰ مگا پاسکال برای ماده، بعد از مرحله اول افزایش می‌یابد. 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 می‌رسد که در مقایسه با نمونه اولیه ۱/۷۲ برابر افزایش یافته است. با دقت بیشتر در این شکل مشاهده می‌شود سختی از مرحله ۵ به بعد تقریباً ثابت باقی می‌ماند.



شکل ۵- نتایج ریزسختی سنجی مربوط به سیکل‌های مختلف فرایند MAF مس.

۴- نتیجه گیری

- ۱- بررسی صورت گرفته نشان داده روش آهنگری چند محوره در تولید مس خالص تجاری فوق ریزدانه و با استحکام بالا تا هفت مرحله بطور موفقیت آمیز بر روی مس خالص انجام گرفت موفق بوده است.
- ۲- نتایج آزمون فشار نشان داده که بیشترین افزایش استحکام تسلیم مربوطه به مرحله اول می‌باشد. در این مرحله استحکام تسلیم مس از میزان ۲۱۰ برای ماده اولیه به ۵۰ افزایش یافت. در مرحله دوم مقدار استحکام تسلیم تقریباً ۴۱۵ است. از مرحله سوم به بعد میزان استحکام تسلیم تقریباً به ۴۷۰ مگا پاسکال می‌رسد و تغییرات آن کم می‌شود.
- ۳- نتایج آزمون سختی نیز بیشترین افزایش ریزسختی را برای مرحله اول نشان داد و پس از آن روند افزایش ریزسختی کاهش یافت. در مرحله هفتم سختی در حدود ۱۵۵ می‌باشد که این میزان در مقایسه با سختی نمونه اولیه، ۱/۷ برابر افزایش یافت.

بررسی نتایج نشانگر آن بود که روش آهنگری چند محوره در حالت کرنش صفحه ای که از جمله روش های تغییر شکل شدید مومسان می باشد، می تواند به منظور تولید نمونه های مس خالص تجاری فوق ریزدانه با استحکام بالا و سختی مناسب مورد استفاده قرار گیرد.

۵- 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] Y. Estrin, R.J. Helming, S.C. Baik, H.S. Kim, H.G. Brokmeier, "Microstructure and texture development in copper and aluminum under ECAP", Ultrafine Grained Materials III. Warrendale, PA: TMS; 2004.

[5] 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.

[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.