

به نام خدا



# مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



# **The effect of strain path in the accumulative roll bonding (ARB) process on the mechanical properties of the copper strip**

## **Abstract**

In the present study, the effect of the strain path on the mechanical properties of commercial purity copper sheet fabricated via the accumulative roll bonding process was investigated. To achieve this purpose, the copper sheet produced by accumulative roll bonding and cross-roll accumulative roll bonding. In the cross-roll accumulative roll bonding after every rolling cycle the specimen was rotated 90°, around normal direction of the rolling process, and then rolled again. Changes in adhesion sheet during the rolling process were investigated by light microscopy. Tension and Vickers's hardness test were performed on produced sheets for evaluating their mechanical properties. In order to clarify the failure mode, fracture surfaces after the tensile test were observed by scanning electron microscopy. The result indicate that by increasing the number of cycles in the ARB process, the hardness and tensile strength, due to increased dislocation density and finer grains increases. Though hardness and tensile strength in the sheet that fabricated via cross-roll accumulative roll bonding by increasing the number of cycle until fourth cycle increases but it dropped abruptly in fifth and seventh cycle, because of Bushinger effect. Fracture surfaces observations showed that failure mode in accumulative roll bonding and cross-roll accumulative roll bonding processed is shear ductile rupture with elongated small dimples.

Keywords: Accumulative roll bonding, Cross-roll accumulative roll bonding, Mechanical properties, Bushinger effect

# تاثیر مسیر کرنش در فرایند نورد تجمعی پیوندی بر خواص مکانیکی ورق

## مسی

### چکیده

در تحقیق حاضر تاثیر مسیر کرنش بر خواص مکانیکی ورق مس خالص تجاری تولید شده به روش نورد تجمعی پیوندی مورد بررسی قرار گرفته است. برای تحقق این منظور ورق‌های مسی تحت فرایند نورد تجمعی پیوندی و همچنین فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع، قرار گرفت که در آن ورق‌ها در هر سیکل ۹۰ درجه نسبت به سیکل قبل چرخانده می‌شد. به منظور بررسی خواص مکانیکی ورق‌های مسی نورد تجمعی پیوندی شده از آزمایش‌های کشش تک محوری و سختی سنجی استفاده شد. تغییرات میزان چسبندگی ورق‌ها در حین فرایند نورد تجمعی پیوندی به وسیله میکروسکوپ نوری بررسی شد. بررسی سطح شکست نمونه‌های نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع شده پس از آزمایش کشش با میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام گرفت. نتایج نشان داد که در فرایند نورد تجمعی پیوندی با افزایش تعداد سیکل، سختی و استحکام کششی به دلیل افزایش دانسیته نابجایی‌ها و ریزتر شدن دانه‌ها، افزایش می‌یابد. ولی سختی و استحکام کششی ورق‌های تولید شده به روش نورد تجمعی پیوندی متقاطع تا سیکل چهارم با افزایش تعداد سیکل افزایش می‌یابد اما از این سیکل به بعد به طور یک در میان دچار افت می‌شود. دلیل وقوع این پدیده به اثر پوشینگر در حین نورد نسبت داده شد. همچنین با بررسی سطح شکست ورق‌های مسی تولید شده به روش نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع مشخص شد که شکست به صورت نرم و با مکانیزم تشکیل دیپل‌های برشی اتفاق افتاده است.

واژه‌های کلیدی: نورد تجمعی پیوندی، نورد تجمعی پیوندی متقاطع، ورق مس خالص تجاری، خواص مکانیکی، اثر پوشینگر

بهبود ریز ساختار یکی از موثرترین و همچنین اقتصادی ترین راه‌های بهبود خواص مکانیکی مواد است. مواد فلزی فوق ریزدانه (UFG)<sup>۱</sup> دارای خواص مکانیکی بسیار مطلوبی هستند. از آنجایی که کاهش اندازه دانه مواد فلزی به زیر  $5\ \mu\text{m}$  به وسیله روش‌های کار سرد معمولی مشکل است، برخی روش‌های جدید از قبیل زینتر نانو پودرها، آلیاژسازی مکانیکی و تبلور مجدد مواد آمورف سریع منجمد شده برای تولید مواد فوق ریز دانه گسترش یافته است. اما در این روش‌ها تولید ماده بالک بدون نقص ساختاری بسیار مشکل می‌باشد. از این رو برای تولید این مواد از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)<sup>۲</sup> استفاده می‌شود (کیم و همکارانش، ۲۰۰۶؛ تسوجی و همکارانش، ۲۰۰۵). تغییر شکل پلاستیک شدید فرایندی است که با اعمال کرنش پلاستیک شدید به ماده، در زیر دمای تبلور مجدد و بدون عملیات حرارتی میانی، منجر به تولید مواد فوق ریز دانه می‌شود (چروکوری و همکارانش، ۲۰۰۵).

نورد تجمعی پیوندی (ARB)<sup>۳</sup> و نورد تجمعی پیوندی متقاطع (CRARB)<sup>۴</sup> تقریباً جدیدترین روش تغییر شکل پلاستیکی شدید است. هدف از فرایند نورد تجمعی پیوندی و فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع اعمال کرنش پلاستیک بسیار شدید بر ماده است که منجر به اصلاح ساختار و افزایش استحکام بدون تغییر ابعاد نمونه می‌شود (شعرباف و طرقي نژاد، ۲۰۰۸).

علیزاده و پایدار تاثیر فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع در تولید کامپوزیت  $\text{Al/B}_4\text{C}$  را مورد مطالعه قرار داده و به این نتیجه رسیدند که فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع باعث بهبود توزیع ذرات  $\text{B}_4\text{C}$  در زمینه می‌شود. تحقیقات کمی به منظور بررسی تاثیر این فرایند بر خواص مکانیکی مواد صورت گرفته است. هدف از پژوهش حاضر بررسی خواص مکانیکی ورق‌های مسی تولید شده به وسیله فرایند نورد تجمعی پیوندی و همچنین فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع و مقایسه این نتایج با یکدیگر است.

## مواد و روش پژوهش

در این مطالعه از مس خالص تجارتي به عنوان ماده اولیه استفاده شد. ورق‌های اولیه با ضخامت  $1\ \text{mm}$ ، با ابعاد  $50\ \text{mm}$  عرض در  $300\ \text{mm}$  طول و همچنین  $50\ \text{mm}$  عرض در  $40\ \text{mm}$  طول بریده شد و سپس تحت فرایند نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع قرار گرفت. در فرایند نورد تجمعی پیوندی ابتدا سطح دو ورق فلزی با ابعاد یکسان برس‌کاری و چربی زدایی شدند. سپس این دو ورق روی هم قرار گرفت و نورد با کاهش در ضخامت  $50\%$  انجام شد. پس از آن ورق از راستای طولی به دو قسمت مساوی برش داد شد. این مراحل تا چندین سیکل تکرار گردید. تفاوت بین فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع و فرایند نورد تجمعی پیوندی معمولی در آن است که در فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع بعد از هر سیکل ورق‌های بریده شده بر روی یکدیگر قرار گرفته و سپس حول محور عمود بر جهت نورد (ND)<sup>۵</sup>،  $90^\circ$  درجه در جهت پادساعتگرد چرخانده می‌شود (علیزاده، ۲۰۱۰). شکل ۱ اساس فرایند نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع و جهت چرخاندن ورق‌ها را نشان می‌دهد. قطر غلطک دستگاه نورد مورد استفاده در این بررسی  $127\ \text{mm}$  و سرعت نورد در حدود  $4\ \text{m/min}$  بود. در این مطالعه، فرایند نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع تا هشت سیکل و در دمای محیط و بدون استفاده از ماده روانکار انجام گرفت. در جدول ۱ دو مسیر کرنشی بررسی شده در این فرایند مشاهده می‌شود. در حقیقت مسیر A فرایند نورد تجمعی پیوندی و مسیر BC فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع است. بعد از فرایند نورد ورق‌ها در محیط سرد شدند.

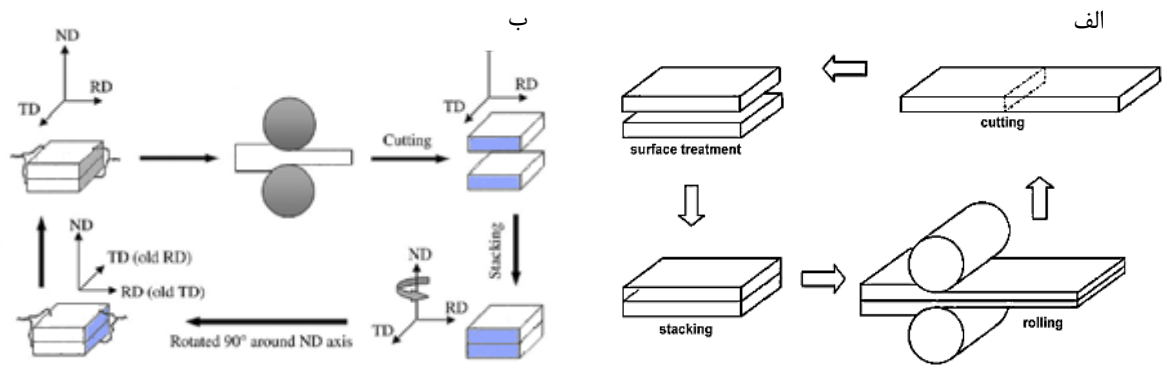
<sup>۱</sup> Ultrafine grain

<sup>۲</sup> Severe plastic deformation

<sup>۳</sup> Accumulative roll bonding

<sup>۴</sup> Cross-roll accumulative roll bonding

<sup>۵</sup> Normal direction



شکل ۱. شماتیکی از فرایند الف) نورد تجمعی پیوندی، ب) نورد تجمعی پیوندی متقاطع.

به منظور بررسی شرایط پیوندهای ایجاد شده از میکروسکوپ نوری استفاده گردید. تمامی تصاویر میکروسکوپ نوری در این بررسی مربوط به سطح مقطع جهت نورد - عمود بر جهت نورد (RD-ND)<sup>۱</sup> نمونه می‌باشند. مقادیر گزارش شده برای سختی ویکرز، میانگین سختی پنج نقطه است که به طور اتفاقی از سطح نمونه و با استفاده از دستگاه ماکرو سختی AMSLER و طبق استاندارد ASTM-E-92 در بار اعمالی ۵kg و برای مدت ۲۰s بدست آمد.

جدول ۱. مسیرهای بررسی شده در پژوهش حاضر

مسیر A				
مسیر BC				

به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها، آزمون کشش در دمای محیط و به وسیله دستگاه کشش Hounsfiel H50ks انجام شد. نمونه‌های آزمایش کشش طبق استاندارد و در جهت نورد تهیه گردید. پس از انجام آزمون کشش، منحنی‌های تنش مهندسی- کرنش مهندسی برای نمونه‌های نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع شده بعد از سیکل‌های مختلف رسم شد. سپس منحنی‌های استحکام و درصد ازدیاد طول بر حسب تعداد سیکل برای هر فرایند رسم شد و در نهایت برای بررسی نوع شکست سطوح بعد از آزمایش کشش، از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup> (SEM) PHILIPS XL30 استفاده گردید.

### تجزیه و تحلیل داده‌ها

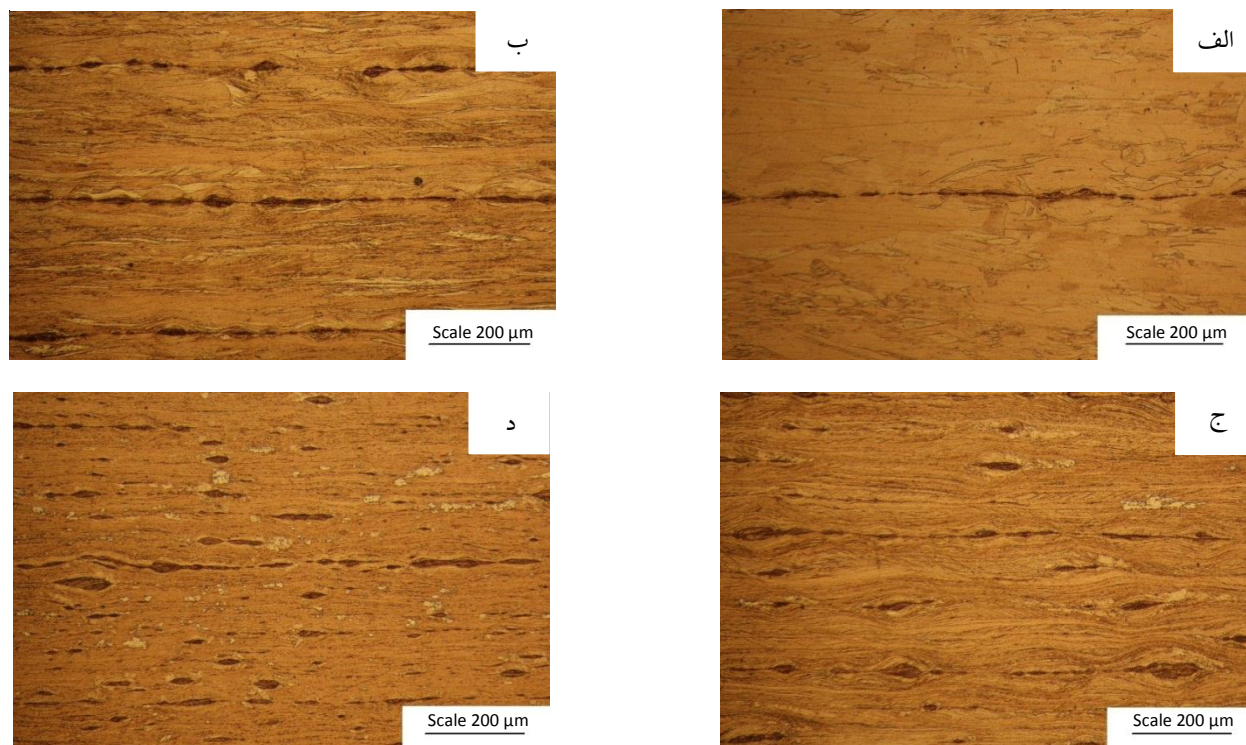
شکل ۲ و ۳ سطح مقطع عرضی (RD-ND) ورق‌های مسی نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع شده تا سیکل-های ۱، ۲، ۴ و ۸ را نشان می‌دهد. در این شکل فصل مشترک لایه‌های مختلف به خوبی قابل مشاهده است. در هر دو فرایند در سیکل اول (شکل ۲-الف و ۳-الف) فصل مشترک لایه‌هایی که در بین آن‌ها پیوند ایجاد شده است به طور کامل قابل مشاهده است. اگر درصد کاهش ضخامت برای ایجاد پیوند در فصل مشترک به اندازه کافی نباشد فصل مشترک لایه‌ها به طور کاملاً واضح مشخص است. اما بعد از ۸ سیکل، که در آن ۲۵۵ (۱-۳)<sup>۱</sup> لایه تولید شده است، فصل مشترک لایه‌ها به جز فصل مشترک مربوط به لایه آخر به سختی مشاهده می‌شود. این مطلب نشان دهنده این موضوع است که افزایش تعداد سیکل در فرایند نورد تجمعی

<sup>۱</sup> Normal direction-Rolling direction

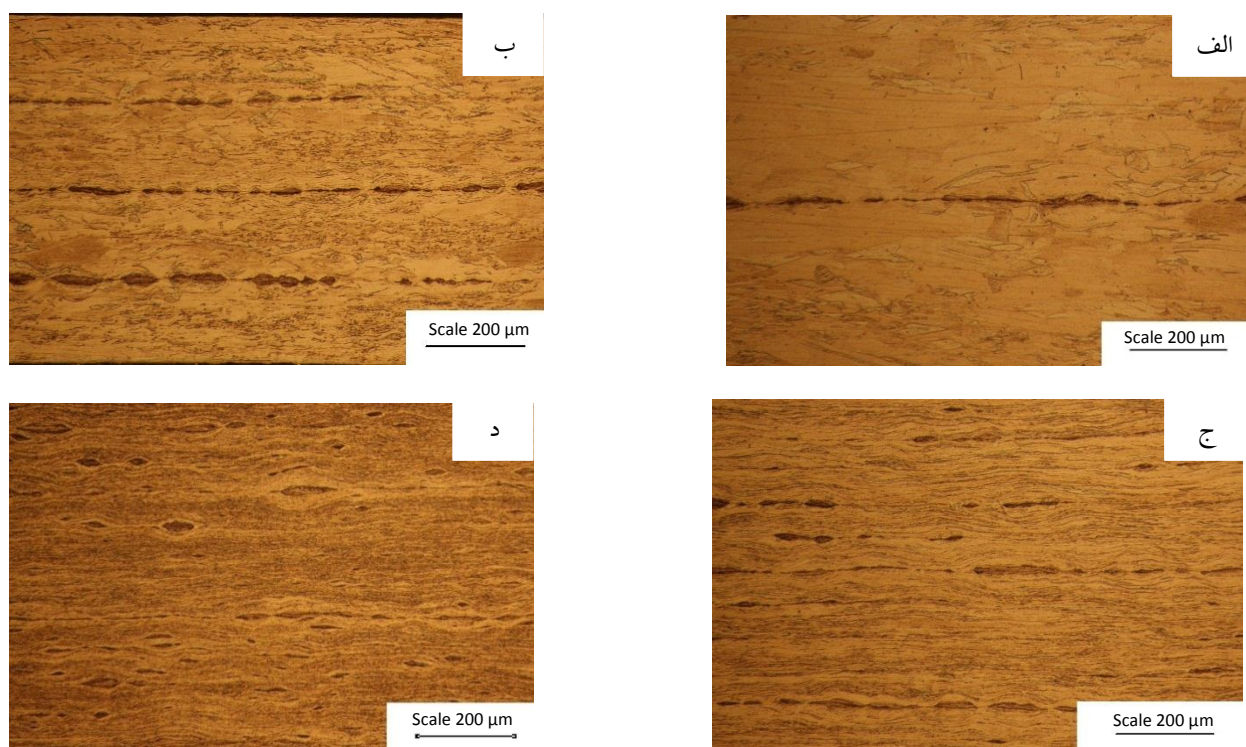
<sup>۲</sup> Scanning electron microscope



پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع باعث بهبود پیوندهای ایجاد شده در سیکل‌های قبل می‌شود. به طور مثال پیوندهای ایجاد شده در سیکل چهارم به وسیله سیکل هشتم بهبود می‌یابند.



شکل ۲. سطح مقطع عرضی ورق‌های مسی نورد تجمعی پیوندی شده تا الف (یک سیکل، ب) دو سیکل، ج) چهار سیکل، د) هشت سیکل.



شکل ۳. سطح مقطع عرضی ورق‌های مسی نورد تجمعی پیوندی متقاطع شده تا الف (یک سیکل، ب) دو سیکل، ج) چهار سیکل، د) هشت سیکل.

همانطور که در شکل ۲ و ۳ مشاهده می‌شود پیوندهای ایجاد شده در فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع (شکل ۳-ج) نسبت به فرایند نورد تجمعی پیوندی (شکل ۲-ج) در یک سیکل یکسان دارای شرایط بهتری هستند به گونه‌ای که در تصویر مربوط به فرایند نورد تجمعی پیوندی تشخیص فصل مشترک‌ها نسبت به تصویر مربوط به فرایند نورد تجمعی پیوندی مشکل‌تر است. علت این موضوع را می‌توان به تغییر شکل بیشتری که در فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع نسبت به فرایند نورد تجمعی پیوندی روی نمونه‌ها اعمال می‌شود، بیان کرد. تغییر شکل بیشتر باعث می‌شود در بازه زمانی بسیار کمی مقدار ماده بیشتری در اثر شکستن لایه‌های ترد سطحی از سطح خارج شود و در نتیجه پیوندهای بیشتری در بین دو ورق ایجاد می‌شود.

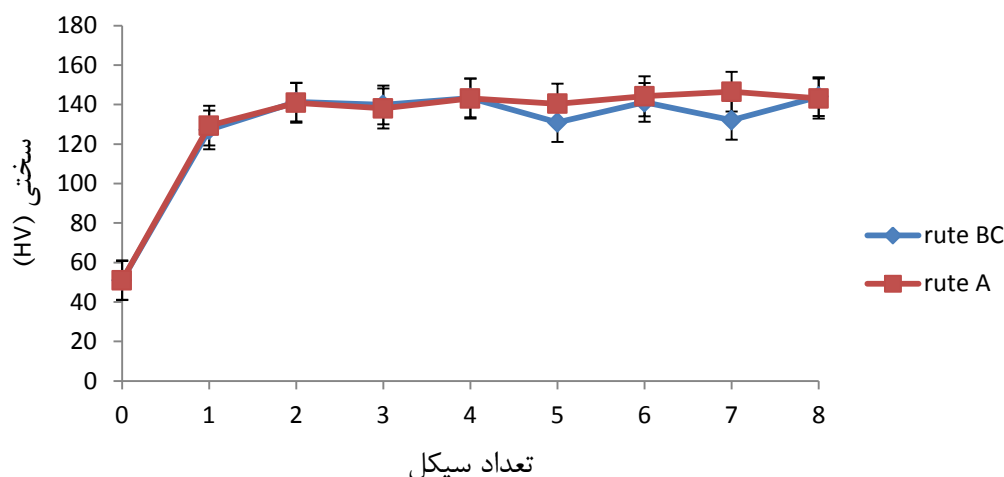
تغییرات سختی ورق‌های مسی خالص تولید شده به وسیله فرایند نورد تجمعی پیوندی و همچنین ورق‌های مسی خالص تولید شده به وسیله فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع مربوط به صفحه جهت نورد - عمود بر جهت نورد در شکل ۴ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در سیکل‌های اولیه یک افزایش سریع سختی در نمودار مشاهده می‌شود. تقریباً مقدار سختی گزارش شده بعد از هشت سیکل سه برابر مقدار سختی نمونه اولیه (قبل از فرایند نورد تجمعی پیوندی) است. این افزایش با شیب کمتری تا سیکل دوم ادامه می‌یابد و سپس به یک مقدار اشباع می‌رسد. افزایش سریع سختی در سیکل‌های اول و دوم (کرنش‌های پایین) به کار سختی که خود نتیجه‌ای از تشکیل دانه فرعی است نسبت داده شده است (شعرباف و طرقي نژاد، ۲۰۰۸). این پدیده منجر به افزایش دانسیته نابجایی‌ها و برهم کنش بین آن‌ها می‌شود که در کرنش‌های بالاتر به حالت اشباع می‌رسد و دلیل آن را می‌توان برقراری تعادل بین ایجاد نابجایی‌ها در طول فرایند نورد تجمعی پیوندی و حذف آن‌ها در مرحله بازیابی دینامیکی دانست که در نتیجه دانسیته نابجایی‌ها به حالت اشباع و پایدار می‌رسد. علاوه بر این، همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود میزان تخلخل‌ها با افزایش تعداد سیکل کاهش می‌یابد که این موضوع نیز می‌تواند باعث افزایش سختی شود. (پاسبانی و طرقي نژاد، ۲۰۱۰).

در مورد ورق مس خالص تولید شده به وسیله فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع تا سیکل چهارم نیز نمودار سختی بر حسب تعداد سیکل، دارای شیب و روندی مشابه با مس خالص نورد تجمعی پیوندی شده است اما از این سیکل به بعد سختی در سیکل پنجم و هفتم کاهش یافت که این موضوع را می‌توان به تاثیر فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع نسبت داد. علت این کاهش را می‌توان با توجه به اثر بوشینگر توضیح داد. زیرا در فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع در هر سیکل به دلیل چرخش ورق‌ها، تنش‌های اعمالی بر روی ورق‌ها به گونه‌ای است که شرایط اثر بوشینگر را ایجاد می‌کنند. در اغلب مواد ایجاد تغییر فرم پلاستیک در یک جهت، روی رفتار پلاستیکی آن مواد در جهت عکس تاثیر می‌گذارد. اگر نمونه‌ای در جهت کشش تحت تاثیر تنش قرار گیرد، به طوری که در آن تغییر فرم پلاستیک ایجاد گردد، سپس در جهت فشار تحت یک تنش فشاری قرار گیرد مشاهده می‌شود که استحکام تسلیم در حالت فشار کمتر از استحکام کششی اولیه ماده است، این اثر را اثر بوشینگر می‌نامند.

شکل ۵ نمودار تغییرات استحکام کششی نهایی (UTS)<sup>۱</sup> و میزان درصد ازدیاد طول نمونه‌ها بر حسب تعداد سیکل نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع را نشان می‌دهد. در منحنی مربوط به فرایند نورد تجمعی پیوندی بیشترین افزایش استحکام کششی نهایی پس از سیکل اول مشاهده می‌شود و پس از آن با روند آرامی افزایش می‌یابد. استحکام کششی ورق مسی اولیه ۲۳۷ MPa بود که با پیشرفت فرایند نورد تجمعی پیوندی تا سیکل ۸ به ۴۶۰ MPa رسید. یعنی استحکام مس در اثر انجام فرایند نورد تجمعی پیوندی به دو برابر افزایش یافته است. سایتو و همکارانش این گونه بیان کرده‌اند که به دلیل اینکه ساختار تا این سیکل بیشتر از دانه فرعی با عدم تطابق کوچک تشکیل شده است افزایش استحکام تا سیکل سوم بیشتر به دلیل کارسختی

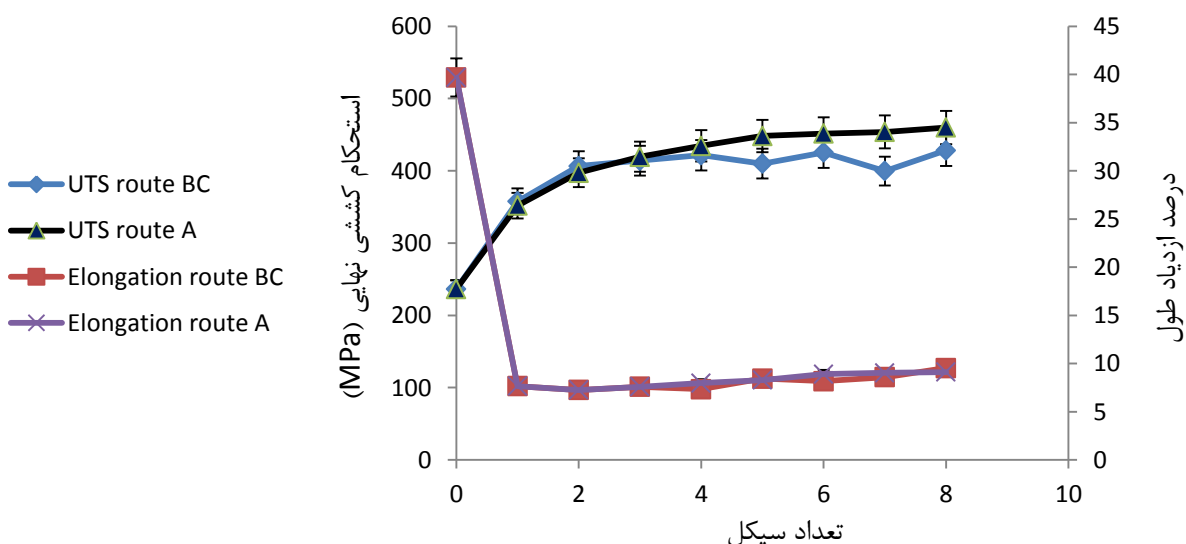
<sup>۱</sup> Ultimate tensile strength

است. افزایش استحکام از سیکل سوم به بعد احتمالا به دلیل تغییر ساختار دانه است و کرنش سختی تاثیر بسیار کمی بر آن دارد، چون تعداد دانه‌های بسیار ریز با مرز دانه زاویه زیاد با افزایش تعداد سیکل افزایش می‌یابد (سایتو و همکارانش، ۱۹۹۸). از طرف دیگر میزان ازدیاد طول ورق مس اولیه پس از یک سیکل نورد تجمعی پیوندی به شدت کاهش یافت که این موضوع یک پدیده عمومی در مواد تغییر شکل شدید یافته است. سپس مقدار آن با افزایش تعداد سیکل به طور جزئی زیاد شد بطوری که پس از هشت سیکل به حدود ۹/۱۲٪ رسید.



شکل ۴. سختی بر حسب تعداد سیکل ورق‌های مسی خالص تولید شده به وسیله فرایند نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع، مربوط به صفحه TD-ND.

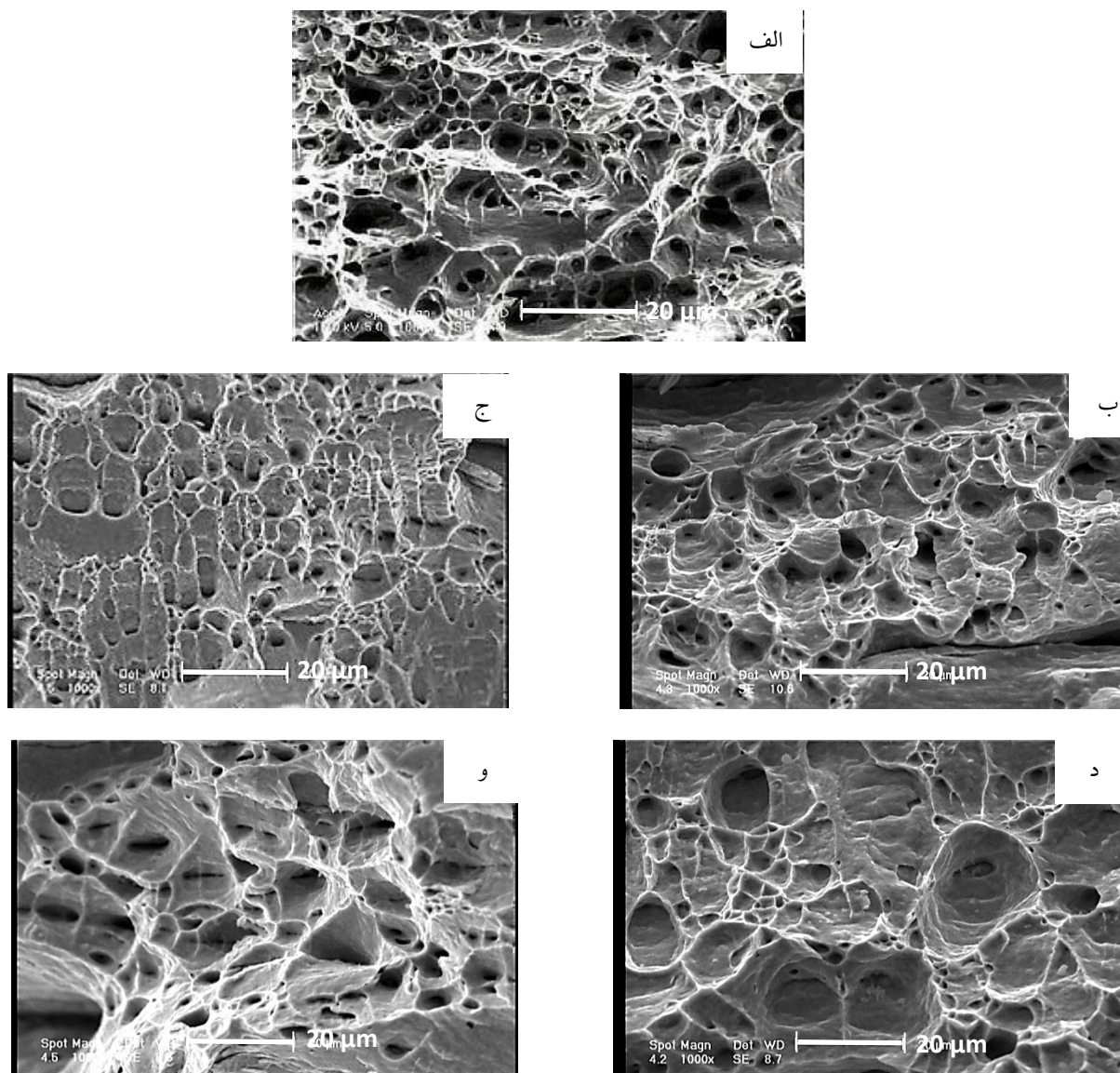
نمودار استحکام بر حسب سیکل ورق مس خالص تولید شده به وسیله فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع تا سیکل چهارم روندی مشابه نمودار مربوط به فرایند نورد تجمعی پیوندی دارد. اما در سیکل پنجم و هفتم استحکام کاهش می‌یابد؛ این کاهش استحکام را مشابه شکل ۵ برای مقادیر سختی می‌توان به اثر بوشینگر در حین نورد ارتباط داد. اما در مورد درصد ازدیاد طول همانطور که در شکل مشاهده می‌شود این تغییرات مشاهده نمی‌شود و روند افزایشی بعد از سیکل اول برای هر دو حالت تقریباً حفظ شده است.



شکل ۵. استحکام کششی نهایی و میزان درصد ازدیاد طول نمونه‌ها بر حسب تعداد سیکل فرایند نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع.



سطح مقطع شکست نمونه‌ها بعد از آزمون کشش به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور تعیین مکانیزم شکست مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۶). سطح شکست ورق‌های مسی اولیه قبل از فرایند نورد تجمعی پیوندی دارای دیمپل‌های عمیق هم محور است (شکل ۶-الف). ظاهر سطح شکست نرم در بیشتر مواد به صورت فیبرهای خاکستری با دیمپل‌های هم محور یا کروی می‌باشد که با تشکیل میکرو حفره‌ها و اتصال آن‌ها اتفاق می‌افتد (گابریل، ۱۹۹۹). بنابراین می‌توان گفت که ورق مسی اولیه به صورت نرم شکسته است. بعد از فرایند نورد تجمعی پیوندی نمونه‌ها باز هم شکست نرم حاوی دیمپل را نشان می‌دهد اما این دیمپل‌ها به عمیقی دیمپل‌های نمونه مسی اولیه نبوده و دیمپل‌ها کشیده شده‌اند. این دیمپل‌ها، دیمپل‌های برشی هستند که در اثر برش پیوندهای حفرات داخلی بوجود می‌آیند.

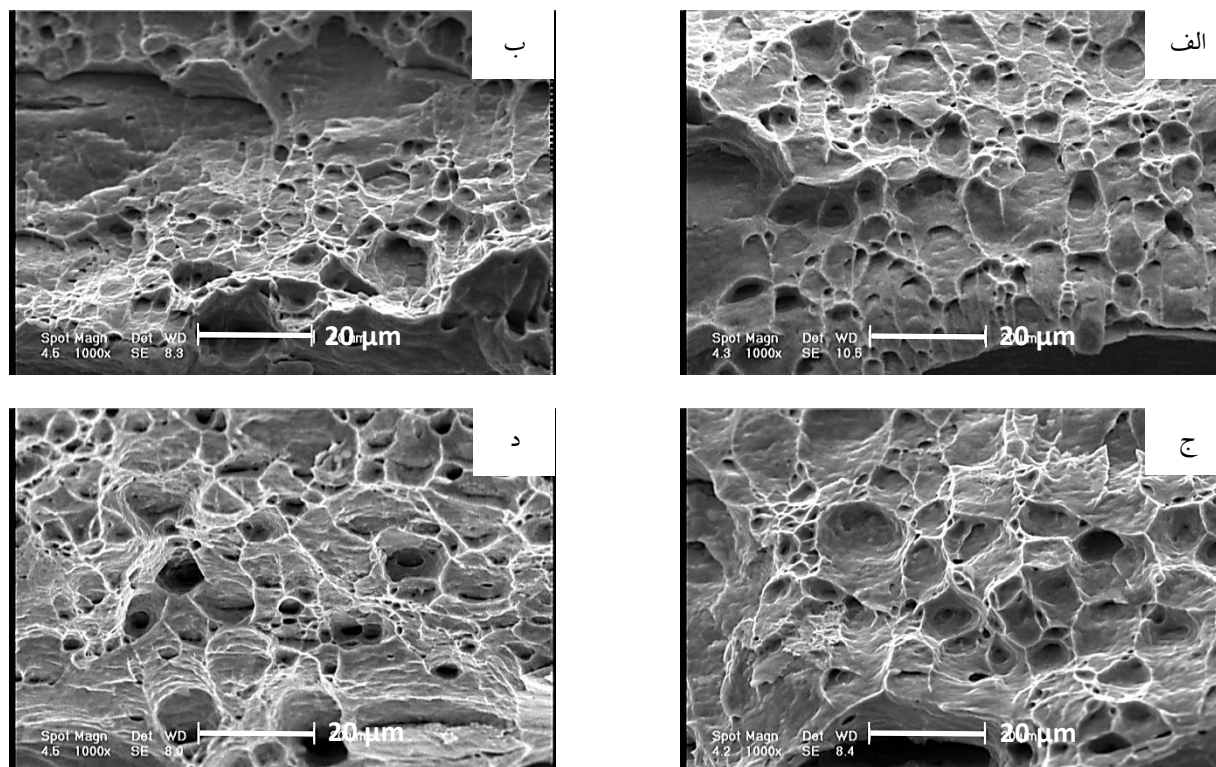


شکل ۶. سطح شکست ورق‌های مسی، الف) ورق اولیه، ب) بعد از ۴ سیکل نورد تجمعی پیوندی، ج) بعد از ۸ سیکل نورد تجمعی پیوندی، د) بعد از ۴ سیکل نورد تجمعی پیوندی متقاطع، و) بعد از ۸ سیکل نورد تجمعی پیوندی متقاطع.

مکانیزم شکست در ورق‌های تولید شده به وسیله هر دو فرایند نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع کاملاً متفاوت از مکانیزم اتصال حفرات داخلی می‌باشد (شکل ۶-ب، ج، د، و). با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بدست آمده از سطوح شکست نمونه‌ها مشاهده می‌شود که در طی هر دو فرایند نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع، دیمپل‌های برشی ایجاد شده‌اند. به طور کلی دو نوع مکانیزم شکست داکتیل وجود دارد: یکی ناشی از بهم پیوستن حفرات داخلی و دیگری

برش پیوندهای حفرات داخلی که این دو مکانیزم در شرایط مختلف یا با هم رقابت کرده و یا همکاری می‌کنند. در نزدیکی تنش برشی حضور و رشد حفرات نقش مهمی در شکست ایفا نمی‌کند. در این موقعیت مکانیزم تجمع حفره‌ها منجر به تشکیل دیمپل-های کشیده کوچک می‌شود و شکست اتفاق می‌افتد (بارسم، ۲۰۰۶).

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به سطح شکست نمونه‌های نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع شده بعد از ۵ و ۷ سیکل در شکل ۷ آورده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود دیمپل‌های ایجاد شده در نمونه‌های مربوط به سیکل ۵ و ۷ فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع دارای قطر بیشتری نسبت به نمونه‌های نورد تجمعی پیوندی شده تا همین تعداد سیکل هستند. این موضوع با کاهش استحکام مشاهده شده در نمودار بالا به طور کامل همخوانی دارد.



شکل ۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح شکست ورق مسی، (الف) بعد از ۵ سیکل نورد تجمعی پیوندی، (ب) بعد از ۷ سیکل نورد تجمعی پیوندی، (ج) بعد از ۵ سیکل نورد تجمعی پیوندی متقاطع، (د) بعد از ۷ سیکل نورد تجمعی پیوندی متقاطع.

## نتیجه‌گیری

۱. با افزایش تعداد سیکل در هر دو فرایند نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع، پیوند ایجاد شده بین لایه‌ها بهبود یافت.
۲. درصد پیوندهای ایجاد شده بین لایه‌های مختلف در ورق‌های تولید شده به وسیله فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع به دلیل تغییر شکل بیشتری که در این فرایند نسبت به فرایند نورد تجمعی پیوندی داشته بیشتر از ورق‌های تولید شده به وسیله فرایند نورد تجمعی پیوندی است.
۳. استحکام و سختی در فرایند نورد تجمعی پیوندی با افزایش تعداد سیکل افزایش می‌یابد در حالی که در فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع تا سیکل چهارم افزایش و در سیکل‌های بعدی به طور یک در میان افزایش و کاهش می‌یابد که این پدیده ناشی از اثر پوشینگر است.

۴. شکست در نمونه‌های نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی پیوندی متقاطع شده همانند ورق مس اولیه بصورت داکتیل رخ می‌دهد با این تفاوت که دیمپل‌های این نمونه‌ها نسبت به نمونه مس اولیه کشیده‌تر و برشی است.
۵. در سیکل پنجم و هفتم قطر دیمپل‌ها در فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع بدلیل اثر بوشینگر در حین نورد کمتر از فرایند نورد تجمعی پیوندی است.

## مراجع

- Alizadeh Morteza., (2010). "Processing of Al/B4C composites by cross-roll accumulative roll bonding", *Materials Letters*, Vol. 64, pp. 2641–2643.
- Barsoum.L , (2006). "Ductile failure and rupture mechanisms in combined tension and shear", *KTH Solid Mechanics*, 1-12.
- Cherukuri. B, Nedkova. T.S., Srinivasan. R., (2005). "A comparison of the properties of SPD-processed AA-6061 by equal-channel angular pressing, multi-axial compressions/forgings and accumulative roll bonding ", *Mater.Sci. Eng. A* 410–411.
- Kim Y.S., Kang S.H., Shin D.H., (2006 ). "Effect of Rolling Direction on the Microstructure and Mechanical Properties of Accumulative Roll Bonding (ARB) Processed Commercially Pure 1050 Aluminum Alloy", *Materials Science*, Vol. 503-504, pp. 681-686.
- Pasebani Somayeh., Toroghinejad Mohammad Reza., (2010). "Nano-grained 70/30 brass strip produced by accumulative roll-bonding (ARB) process", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 491–497.
- Saito, Y., Tsuji,n., Utsunomiya, H., Sakai, T. and Hong R. G., (1998). "Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process", *Scripta Materialia*, Vol.39, No.9, pp. 1221-1227.
- Gabriel, B.L., (1999). "Scanning Electron Microscopy", *ASM Handbook*, V.12, 173-175.
- Shaarbaf Mahnoosh., Toroghinejad Mohammad Reza., (2008). "Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 473, pp. 28–33.
- Tsuji.N, Saito.Y, Lee.S.H, Minamino.Y. (2005). "ARB (accumulative Roll-Bonding) and other new techniques to produce bulk ultrafine grained material", *Advanced engineering material*, vol 5, pp 338-344, 2003.