http://mjmec.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

اردیبهشت ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۲ ص‌ص ۱۲۳-۱۳۲

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/۲/۱۱
تاریخ پذیرش ۹۱/۸/۱۰
ارائه در سایت ۹۱/۱۱/۳۰

بررسی ریزساختار و ناهمسانگردی خواص مکانیکی آلومینیوم خالص تجاری تحت فرایند اتصال نورد انباشتی با عملیات حرارتی بین‌سیکلی

مجتبی دهقان[۱]، فتح‌ا... قدس[۲*]، مهدی گردویی[۳]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مواد، دانشگاه سمنان، سمنان
۲- استادیار مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان
۳- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
* سمنان، صندوق پستی ۴۵۳۹۹-۳۵۱۹۶، qods@semnan.ac.ir

چکیده- فرایند اتصال نورد انباشتی به عنوان یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، یک فرایند نورد چندمرحله‌ای است که منجر به تولید ورق‌های فلزی با استحکام بالا و ساختار بسیار ریزدانه با ابعاد نانومتری می‌شود. در این تحقیق ۱۳ سیکل فرایند اتصال نورد انباشتی با عملیات حرارتی بین‌سیکلی، بر روی ورق آلومینیوم خالص تجاری انجام و سپس تغییرات ریزساختار قطعه تا دستیابی به دانه‌های نانومتری بررسی شده است. همچنین با انجام آزمون میکروسختی‌در جهت ضخامت ورق، تغییرات سختی مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با انجام آزمون کشش تک‌محور در سه جهت نورد، عمود بر جهت نورد و زاویه ۴۵^{o} نسبت به جهت نورد تغییرات استحکام، درصد افزایش طول نسبی و همچنین ناهمسانگردی خواص مکانیکی ورق طی سیکل‌های مختلف فرایند اندازه‌گیری و بررسی شده است.

کلیدواژگان: فرایند اتصال نورد انباشتی (ARB)، نانوساختار، میکروسختی ویکرز، خواص مکانیکی، ناهمسانگرد

Investigation of microstructure and anisotropy of mechanical properties of the ARB-processed commercial purity Aluminium with interpassing heat treatment

M. Dehghan[1], F. Qods[2*], M. Gerdooei[3]

1- PhD Student, Materials Sci. & Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran
2- Assist. Prof., Materials Sci. & Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran
3- Assist. Prof., Manufacturing Eng., Shahrood Univ., Shahrood, Iran
* P.O.B. 35196-45399 Semnan, qods@semnan.ac.ir

Abstract- Accumulative roll bonding (ARB) is a severe plastic deformation (SPD) process that may be defined as multistep rolling process in order to create high strength metals with ultra-fine grained (UFG) in nanometer level. In this study, ARB process with interpassing heat treatment was carried out on the commercial pure Aluminium sheet up to 13 cycles. The variation of microstructure during the cycles of ARB process to access to grains with nanometer dimensions was investigated. In addition, micro-Vickers hardness measurement was carried out throughout thickness of the ARB processed sheets. Eventually, the changes of strength and elongation and also anisotropy of mechanical properties of the sheets during the cycles of process was studied by uni-axial tensile test in 3 directions (roll direction (RD), transverse direction (TD) and direction of 45° toward RD).

Keywords: ARB Process, Nanostructure, Micro-Vickers Hardness, Mechanical Properties, Anisotropy

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.2.8.2]

۱- مقدمه

فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)[1] به فرایندهای شکل‌دهی فلزات گفته می‌شود، که در آنها به منظور تولید فلزات فوق‌العاده ریزدانه (UFG)[2] کرنش پلاستیک خیلی بزرگی در دمای پایین‌تر از دمای تبلور مجدد ماده، بر آن وارد می‌شود[۲،۱]. ویژگی مشترک و منحصربه‌فرد فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، ثابت بودن ابعاد و عدم تغییرشکل ظاهری ماده حین فرآیند است، که در نتیجه آن محدودیت اعمال کرنش از بین می‌رود. فلزاتی که تحت فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفته‌اند، خواص بی‌نظیری همانند استحکام زیاد در دمای محیط، مقاومت در برابر سایش، خاصیت سوپر پلاستیک در دمای بالا و نرخ کرنش کم، خواص خستگی خوب و مقاومت عالی در برابر خوردگی از خود نشان می‌دهند[۲-۷].

فرایند اتصال نورد انباشتی (ARB)[3] که توسط ساتیو و همکارانش معرفی شده است، کرنش پلاستیک شدیدی را بدون تغییری در ابعاد ورق بر آن وارد می‌کند و منجر به تولید ساختار فوق‌العاده ریز دانه و در نتیجه افزایش استحکام آن می‌شود[۳،۸-۱۱]. مهم‌ترین برتری فرایند ARB نسبت به دیگر فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید قابلیت تولید پیوسته ورق‌های فلزی فوق‌العاده ریزدانه ودر نتیجه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بودن آن است[۸،۱۲]. در فرایندهای مرسوم نورد حداکثر کاهش ضخامت ماده بسیار محدود است، که به دلیل کاهش سطح مقطع ورق همراه با محدود شدن کاهش ضخامت می‌باشد[۱۳].

در فرایند ARB، ورقی که توسط فرایند نورد ۵۰ درصد کاهش ضخامت داده شده است، به دو قسمت بریده می‌شود. سپس این دو ورق روی هم قرار داده شده و نورد می‌شوند [۶،۹،۱۱-۱۳]. از آنجا که در فرایند ARB روند ذکر شده در بالا را بدون محدودیت می‌توان تکرار نمود، در نتیجه قابلیت اعمال کرنش پلاستیک خیلی بزرگی بر ماده وجود دارد [۸،۱۳،۱۴].

هدف از انجام این تحقیق بررسی بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی آلومینیوم خالص تجاری (AA1050) طی سیکل‌های مختلف فرایند اتصال نورد انباشتی می‌باشد. مطالعات ریزساختاری در این تحقیق توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)[4] انجام شده است. سختی ورق‌های ARB شده در جهت ضخامت اندازه‌گیری و تحلیل و بررسی شده است. ورق‌های ARB شده پس از سیکل‌های مختلف فرایند در سه جهت نورد (RD)[5]، عمود بر جهت نورد (TD)[6] و زاویه ۴۵^{o} نسبت به جهت نورد تحت آزمون کشش تک‌محور قرار گرفته و استحکام کششی و میزان افزایش طول نسبی آن‌ها اندازه‌گیری شده است. در نهایت ناهمسانگردی خواص مکانیکی قطعات ARB شده محاسبه و بررسی شده است.

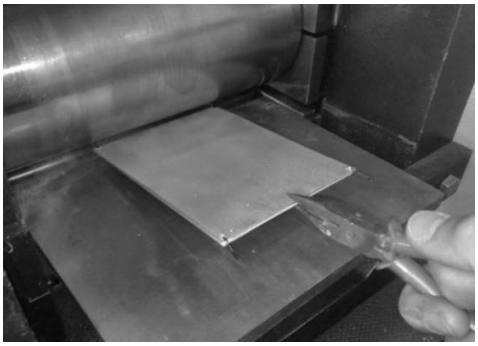
۲- مواد و روش تحقیق

فلز مورد استفاده در این تحقیق ورق آلومینیوم خالص تجاری[7] می‌باشد. ابتدا ورق فلزی با ضخامت ۴mm توسط فرایند نورد سرد تا ۱mm کاهش ضخامت داده شد و سپس به مدت ۱ ساعت در دمای $۴۳۰^{o}C$ تحت فرایند تابکاری قرار گرفت. دو قطعه از این ورق با ابعاد $۱\times۱۰۰\times۱۵۰mm^{3}$ با استفاده از استون روغن‌زدایی و توسط برس فولادی خراشیده و زبر شدند؛ سپس دو ورق روی‌هم قرار داده شده و البته برای جلوگیری از لغزش ورق‌ها بر روی هم، چهار گوشه آن‌ها توسط سیم مسی به هم محکم شدند. در ادامه به منظور افزایش چسبندگی لایه‌ها به یکدیگر به مدت ۵ دقیقه در دمای $۲۰۰^{o}C$ تحت عملیات حرارتی قرار گرفت و بلافاصله توسط دستگاه نورد ۵۰ درصد کاهش ضخامت داده شد (شکل ۱). قطر غلتک دستگاه نورد ۱۱cm و سرعت دوران غلتک‌های آن ۲۰ دور در دقیقه بوده است. ورق‌های چسبیده شده در جهت طولی به دو نیم تقسیم شده و فرایند ذکرشده در بالا تا ۱۳ سیکل تکرار شد.

کرنش معادل هر سیکل طی انجام فرایند ۰/۸ می‌باشد. در نتیجه ورق ۱۳ سیکل ARB شده تحت کرنش معادل ۱۰/۴ قرار گرفته و کاهش ضخامت کل آن نیز ۹۹/۹۸۸ درصد است. تعداد لایه‌های ورق ARB شده از رابطه ۲^{n} به‌دست می‌آید (n تعداد سیکل‌های فرایند است). درنتیجه ورق ۱۳ سیکل ARB شده دارای ۸۱۹۲ لایه و ضخامت هر لایه آن ۱۲۲nm است.

1. Severe Plastic Deformation
2. Ultra-Fine Grain
3. Accumulative Roll Bonding
4. Scanning Electron Microscope
5. Roll Direction
6. Transverse Direction
7. 99.54 wt.% Al-0.172Si-0.157Fe-0.01Mn

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.2.8.2]



شکل ۱ انجام فرایند اتصال نوردی

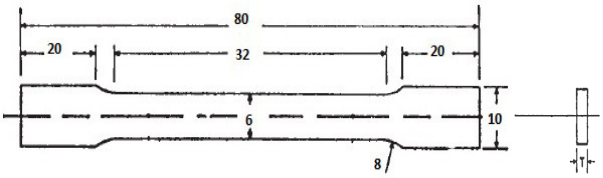
به منظور افزایش استحکام چسبندگی لایه‌ها فرایند ARB در شرایط بدون روانکار انجام شد و در نتیجه تغییر شکل برشی شدیدی بر نمونه‌ها اعمال شده است. در نتیجه کرنش اعمالی به قطعه ۱۳ سیکل ARB شده، به‌دلیل این کرنش برشی اضافی، بزرگ‌تر از کرنش اسمی ۱۰/۴ محاسبه شده در بالاست.

به منظور بررسی تغییرات ریزساختار قطعات طی فرایند ARB از میکروسکوپ الکترونی روبشی با ولتاژ ۲۰kV استفاده شد. بدین منظور سطح RD-ND[1] ورق‌ها پس از سیکل‌های مختلف توسط پولیش مکانیکی آماده‌سازی و در محلولی که مشخصات آن در پاورقی آمده[2] به مدت ۴ دقیقه حکاکی میکروسکوپی شده است.

اندازه‌گیری میکروسختی قطعات ARB شده پس از سیکل‌های مختلف فرایند، در جهت ضخامت ورق‌ها به فاصله ۱۰۰μm انجام شد و تغییرات میکروسختی ویکرز در جهت ضخامت مورد مطالعه قرار گرفت.

در این پژوهش به منظور بررسی تغییرات استحکام کششی و میزان افزایش طول نسبی ورق تحت فرایند ARB، از آزمون کشش تک‌محور استفاده شده است. نمونه‌های آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM B 557M با سنجه‌ای به طول ۳۲mm و پهنای ۶mm (شکل ۲)، از سیکل‌های مختلف قطعات ARB شده، تهیه شده است. به منظور بررسی خواص ناهمسانگردی، نمونه‌های آزمون کشش در سه جهت نورد، جهت عرضی و زاویه ۴۵^{o} نسبت به جهت نورد از هر ورق ARB شده تهیه گردید.

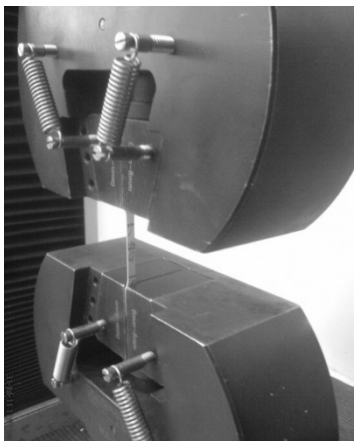
1. Roll Direction-Normal Direction
2. 50 ml Poultons reagent (30 ml HCl + 15 ml HNO_3 + 2.5 ml HF + 2.5 ml H_2O) + 25 ml HNO_3 + 40 ml of solution of 3 gr Chromic acid per 10 ml of H_2O



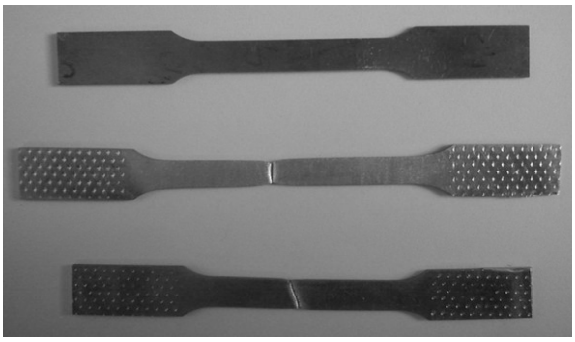
شکل ۲ تصویر شماتیک ورق آزمون کشش با ضخامت T مطابق استاندارد ASTM B 557M (ابعاد برحسب mm)

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها آزمون کشش تک‌محور توسط دستگاه کشش عمودی ۲۰ تن مدل KSLAB03 انجام شد (شکل ۳). سرعت حرکت فک‌ها $۱/۲۸\ mm\ min^{-1}$ بوده، که متناظر با نرخ کرنش $۸/۳\times۱۰^{-۴}\ s^{-1}$ است. نمونه‌ای از قطعات، قبل و بعد از آزمون کشش، در شکل ۴ نشان داده شده است.

در انتها میزان ناهمسانگردی استحکام کششی و افزایش طول نسبی ورق‌ها پس از فرایند ARB با استفاده از شاخص ناهمگنی اندازه‌گیری و بررسی شده است.



شکل ۳ انجام آزمون کشش تک‌محور



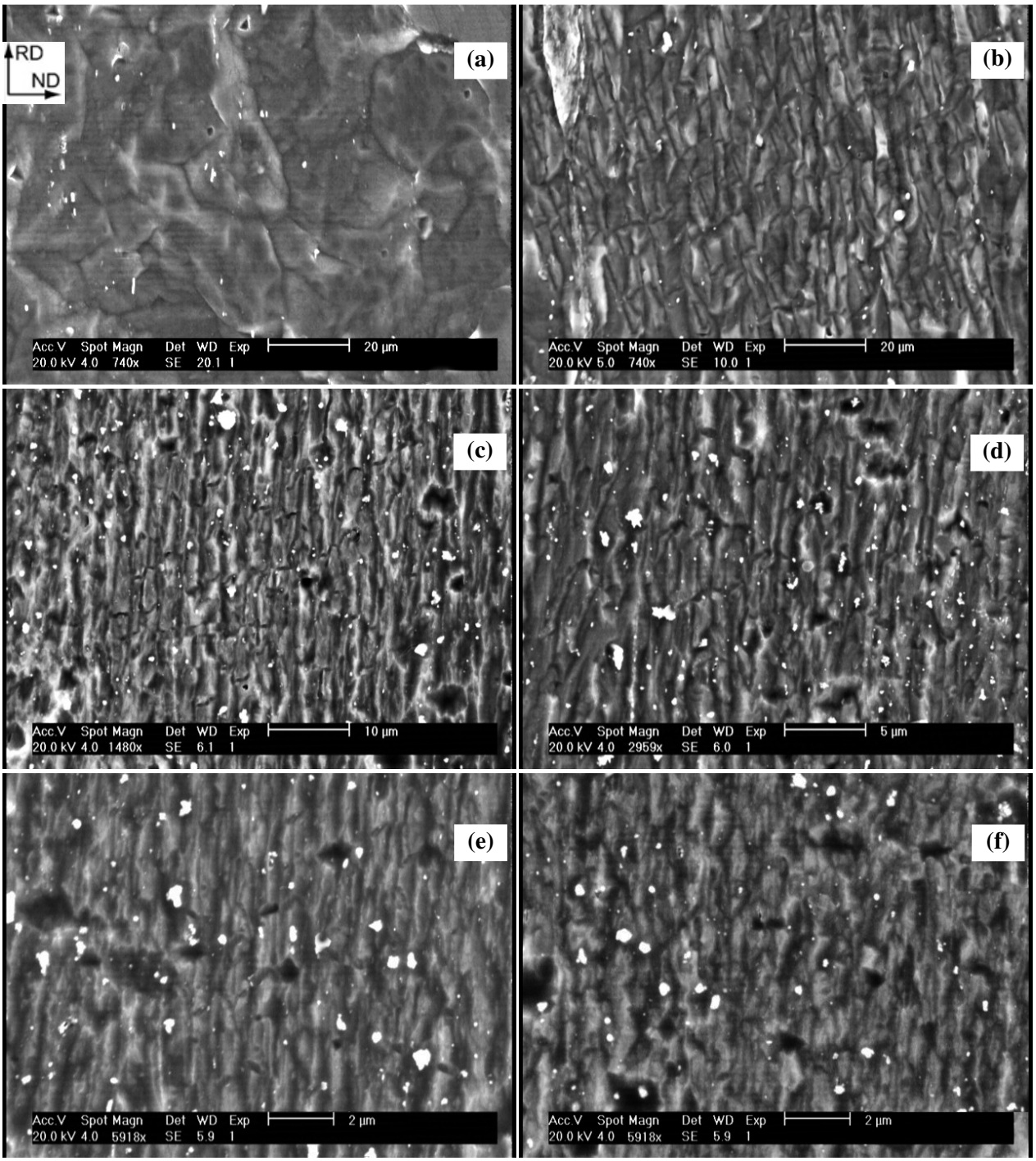
شکل ۴ نمونه‌های آزمون کشش (a) نمونه اولیه، (b) نمونه تابکاری کشیده شده و (c) نمونه ۲ سیکل ARB کشیده شده

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.2.8.2]

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختار

ریزساختار سطح RD-ND قطعات پس از سیکل‌های مختلف فرایند ARB در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند ARB از طول و ضخامت دانه‌ها کاسته می‌شود. البته نرخ کاهش اندازه دانه در جهت ضخامت بیشتر از جهت طولی نورد می‌باشد و دانه‌ها به صورت کشیده شده در جهت نورد در می‌آیند. ضخامت و طول متوسط دانه‌ها در جدول ۱ است. محاسبه اندازه متوسط دانه‌ها با روش خطی انجام شد.



شکل ۵ ریزساختار SEM سطح مقطع RD-ND قطعات پس از (a) تابکاری، (b) ۲، (c) ۴، (d) ۷، (e) ۱۰ و (f) ۱۳ سیکل فرایند ARB

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.2.8.2]

جدول ۱ میانگین ضخامت و طول دانه قطعات ARB شده (μm)

قطعه	ضخامت دانه	طول دانه
تابکاری شده	۳۵	۳۳
۲ سیکل	۵/۱	۱۶/۳
۴ سیکل	۲/۱	۷/۱
۷ سیکل	۱/۲	۳/۵
۱۰ سیکل	۰/۶۱	۱/۷
۱۳ سیکل	۰/۴۹	۱/۴

مکانیزم ریزدانه‌شدن طی سیکل‌های اولیه فرایند، شکل‌گیری نابجایی‌ها درون دانه‌ها و تشکیل دانه‌های فرعی می‌باشد. با افزایش سیکل‌های فرایند کم‌کم دانه‌های فوق‌العاده ریز ایجاد می‌شود. در سیکل‌های پایانی ساختار فوق‌العاده ریزدانه با دانه‌های نانومتری فلز را فرا می‌گیرد، به طوری که ضخامت میانگین دانه‌ها در سیکل سیزدهم ۴۹۰nm می‌شود.

در سیکل‌های ابتدایی فرآیند ARB در اثر ایجاد لغزش، تعداد زیادی نابجایی درون دانه‌های اولیه ظاهر می‌شود، که موجب شکل‌گیری سلول‌ها و دیواره‌های پرچگال نابجایی می‌شود. در این مراحل چگالی نابجایی در داخل دانه‌ها بالاست. بعد از سیکل هفتم مرز دانه‌ها نشان‌دهنده مناطقی با دانسیته بالا از نابجایی‌ها هستند، که به شدت تغییر شکل یافته‌اند. در این مرحله ساختار لایه‌ای شامل دانه‌های بسیار ریز کشیده شده در جهت نورد مشاهده می‌شود و همچنین دانه‌های فرعی با مرز زاویه کوچک[1] در ساختار نمونه شکل گرفته‌اند[۱۴-۱۷]. در این مرحله کرنش شدید اعمالی منجر به چرخش دانه‌های فرعی و در نتیجه افزایش ناهم‌جهتی مرزی می‌شود و بدین ترتیب ساختار ریزدانه کم‌کم شکل می‌گیرد[۹،۱۴]. با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند کسر دانه‌های فوق‌العاده ریز در ساختار افزایش می‌یابد[۷]. در سیکل‌های پایانی ساختار فوق‌العاده ریز دانه با اندازه دانه نانومتری به صورت همگن در سراسر نمونه گسترش می‌یابند. مکانیزم تشکیل این دانه‌های فوق‌العاده ریز در سراسر قطعه وقوع هم‌زمان دو پدیده ناشی از تغییر شکل شدید اعمالی می‌باشد؛ اولاً خرد شدن و تقسیم مجدد دانه‌ها در مقیاس نانومتری به دلیل تشکیل مرزهایی با زاویه بزرگ (HAGB)[2] از مرزهایی با زاویه کوچک و ثانیاً وقوع بازیابی به منظور ایجاد مرز دانه‌های پایدار[۱۷،۱۴،۳]. با تبدیل مرزهای فرعی با زاویه کوچک به مرزهایی با زاویه بزرگ و فراگرفتن تمام ساختار توسط دانه‌های فوق‌العاده ریز با ضخامت نانومتری، این ساختار کاملاً متفاوت از ساختار نمونه در سیکل‌های میانی فرآیند می‌باشد[۱۷،۱۵،۱۴].

۳-۲- اندازه‌گیری میکروسختی

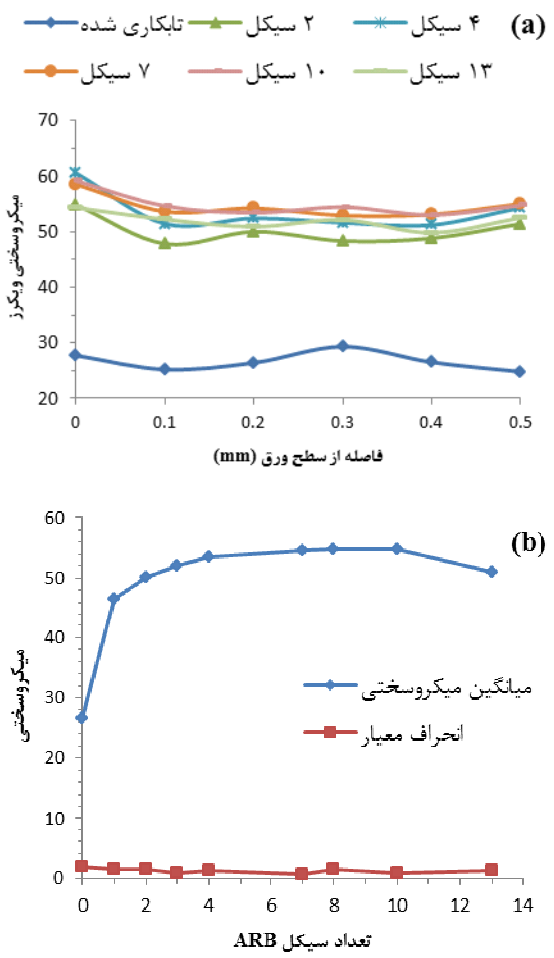
به منظور بررسی موضعی توزیع استحکام در قطعات ARB شده، میکروسختی ویکرز در جهت ضخامت ورق‌ها اندازه‌گیری شده است. چگونگی توزیع میکروسختی در سیکل‌های مختلف فرایند در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۶ توزیع میکروسختی در جهت ضخامت یکنواخت است، به‌جز زیر سطح ورق که کمی بیشتر است. در شکل ۶ میزان انحراف معیار سختی در جهت ضخامت ورق نشان داده شده است. در همه سیکل‌های انجام فرایند انحراف معیار سختی کمتر از ۲ است، که نشان‌دهنده یکنواختی توزیع میکروسختی در جهت ضخامت ورق است. بالاتر بودن میکروسختی در زیر سطح ورق به کرنش‌های برشی اعمالی در سطوح ورق نسبت داده می‌شود. به منظور افزایش استحکام اتصال بین ورق‌ها فرایند نورد بدون روانکار انجام و در نتیجه در هر سیکل کرنش برشی بزرگی در سطح ورق اعمال می‌شود[۹]. در فرایند ARB، به دلیل اصطکاک زیاد بین غلتک‌ها و قطعه، کرنش برشی باقی مانده زیادی در مناطق سطحی وجود دارد. علاوه بر این با دو نیم کردن و چسباندن ورق‌ها به یکدیگر در سیکل بعدی، نیمی از ناحیه سطحی تحت تغییر شکل برشی قرار گرفته، به مرکز می‌رود. با تکرار این پروسه در فرایند ARB توزیع کرنش برشی باقیمانده در جهت ضخامت ورق بسیار پیچیده شده و باندهای برشی در سیکل‌های پایانی فرایند اشباع می‌شود[۳،۸].

میانگین سختی قطعات پس از سیکل‌های مختلف فرایند در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۶ در سیکل‌های ابتدایی سختی به‌سرعت افزایش می‌یابد، اما از سیکل هفتم تا دهم تقریباً ثابت است و از آن پس کم‌کم کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل توزیع پیچیده کرنش برشی و اشباع شدن باندهای برشی در سیکل‌های بالای فرایند است.

1. Low angle grain boundary

2. High Angle Grain Boundary

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.2.8.2]

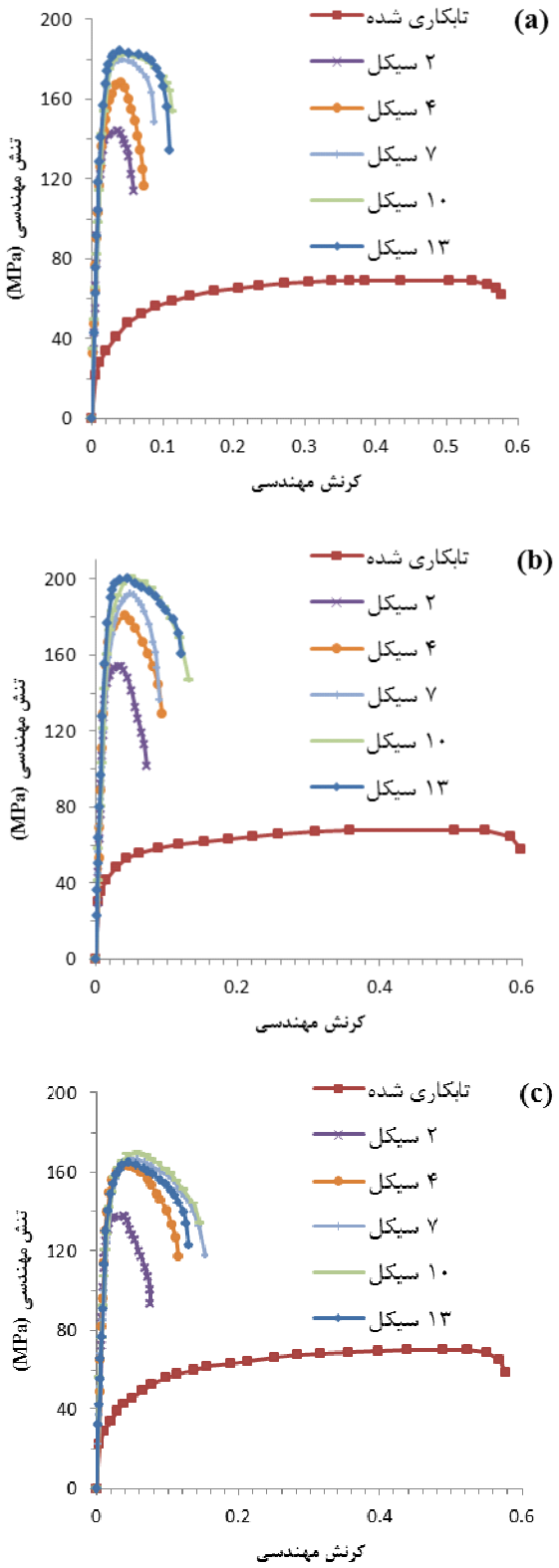


شکل ۶ (a) توزیع میکروسختی در جهت ضخامت ورق، (b) میانگین سختی قطعات در سیکل‌های مختلف

۳-۳- تغییرات خواص مکانیکی

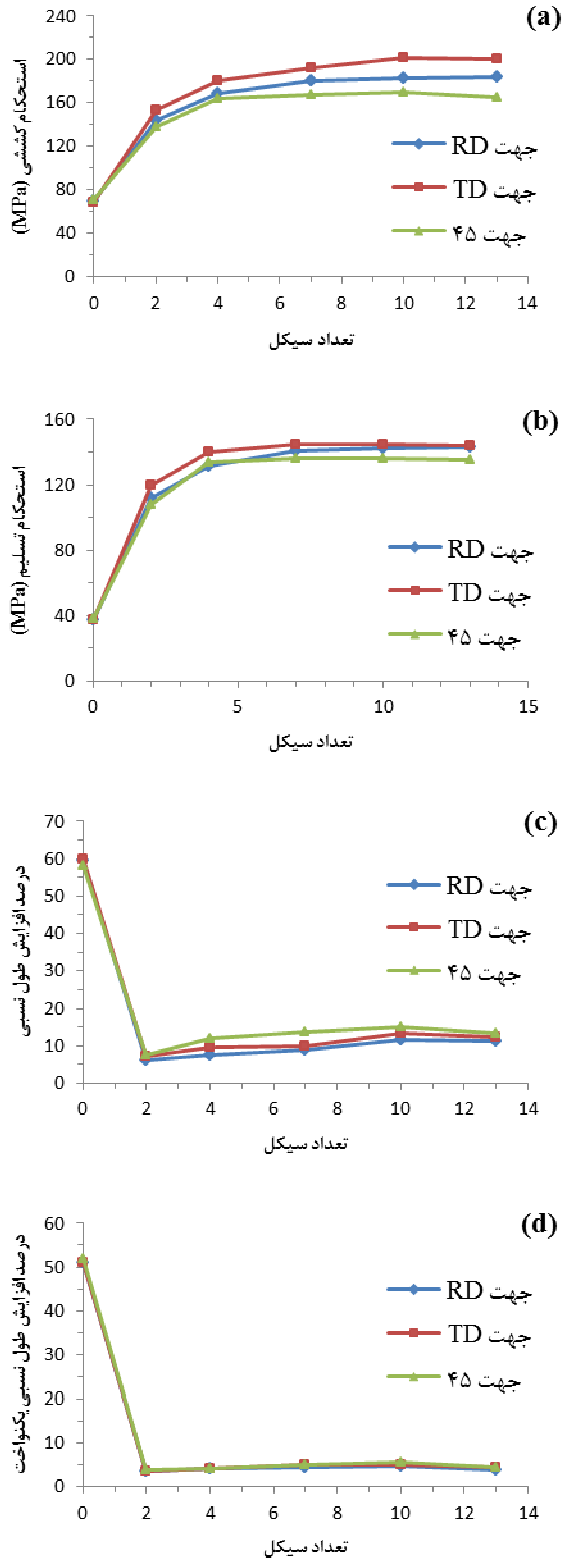
در شکل ۷ منحنی تنش مهندسی-کرنش مهندسی قطعات که در سه جهت RD، TD و زاویه ۴۵^{o} نسبت به جهت نورد تحت آزمون کشش قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، نمای کلی منحنی برای سیکل‌های مختلف فرایند شبیه یکدیگر است. در همه منحنی‌ها تنش به‌سرعت به مقدار بیشینه می‌رسد، سپس گلویی‌شدن به‌وقوع می‌پیوندد و در پایان در افزایش طول نسبی کمتر از ۱۵ درصد شکست روی می‌دهد. درصد افزایش طول نسبی یکنواخت نیز در حد کمتر از ۶ درصد محدود شده است.

تغییرات خواص مکانیکی قطعات طی سیکل‌های فرایند در شکل ۸ آورده شده است.



شکل ۷ منحنی تنش-کرنش مهندسی قطعات پس از سیکل‌های مختلف فرایند ARB، (a)جهتRD، (b)جهت TD و (c) زاویه ۴۵^{o}

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.2.8.2]



شکل ۸ چگونگی تغییرات (a) استحکام کششی، (b) استحکام تسلیم، (c) درصد افزایش طول نسبی و (d) افزایش طول نسبی یکنواخت قطعات پس از سیکل‌های مختلف فرایند ARB

در هر سه جهت قطعات، با افزایش سیکل‌های فرایند استحکام کششی و تسلیم قطعات افزایش می‌یابد. استحکام در سیکل‌های اولیه فرایند افزایش سریعی دارد، که به کارسختی ایجادشده ناشی از افزایش دانسیته نابجایی‌ها و تشکیل دانه‌های فرعی نانومتری طی این مراحل نسبت داده می‌شود[۷]. از سیکل چهارم به بعد نرخ افزایش استحکام کاهش می‌یابد. در این مرحله، تأثیر کرنش سختی در افزایش استحکام کمتر و کمتر شده و به طور عمده تکامل تدریجی ریزساختار و شکل‌گیری دانه‌های فوق‌العاده ریز نانومتری نقش اساسی در افزایش استحکام دارند[۱۴،۶]. در سیکل‌های پایانی نیز استحکام قطعه کمی کاهش می‌یابد، که به دلیل وقوع بازیابی دینامیکی طی این مراحل می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، استحکام قطعات کشیده شده در جهت TD بیشتر از استحکام قطعات کشیده شده در جهت RD می‌باشد. استحکام قطعات کشیده شده در جهت زاویه ۴۵^{o} نیز کمتر از استحکام قطعات جهات RD و TD می‌باشد.

شایان ذکر است، تشکیل لایه سخت حاوی ذرات اکسیدی بر روی سطح ورق در اثر فرآیند آماده‌سازی سطحی اولیه نیز باعث افزایش استحکام می‌گردد[۱۸،۱۵،۱۳]. با افزایش سیکل‌های فرایند، تعداد زیادی فصل مشترک اتصالی جدید که از این لایه‌های سخت سطحی تشکیل شده‌اند، به صورت نسبتاً همگن در تمام قطعه گسترش می‌یابند. بدین ترتیب، ذرات اکسیدی واقع در این سطوح نیز به صورت همگن در ساختار پخش می‌شوند. ذرات اکسیدی توزیع شده با ممانعت از حرکت نابجایی‌ها و مرز دانه‌های فرعی سبب افزایش استحکام می‌شوند.

با انجام اولین سیکل فرایند ARB، درصد افزایش طول نسبی قطعه دچار افت ناگهانی شده، که به دلیل وقوع شرایط ناپایداری پلاستیک ناشی از ریزدانه شدن قطعه می‌باشد [۱۹،۶]. با افزایش سیکل‌های فرایند میزان ازدیاد طول نسبی با شیب بسیار کمی افزایش یافته و در سیکل‌های پایانی تقریباً ثابت می‌ماند.

۳-۴- ناهمسانگردی خواص

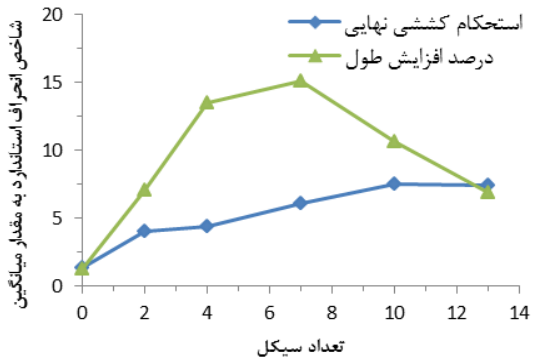
به منظور مطالعه‌ی ناهمسانگردی خواص مکانیکی در ورق‌های ARB شده، آزمون کشش در سه جهت RD، TD و زاویه ۴۵^{o} نسبت به جهت نورد انجام شده است. خواص مکانیکی که ناهمسانگردی آنها مورد بررسی قرار گرفته است، عبارت‌اند از:

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.2.8.2]

استحکام کششی نهایی و درصد افزایش طول نسبی. به منظور تعیین میزان ناهمسانگردی خواص، شاخصی متغیر به نام شاخص ناهمگنی (V) تعریف شده است، که از نسبت انحراف استاندارد (SD) به مقدار میانگین پارامتر ($\bar{x}$) در این سه جهت به‌دست می‌آید[۲۰].

$$V = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100\% \quad (۱)$$

شاخص ناهمگنی استحکام کششی نهایی و درصد افزایش طول نسبی برای سیکل‌های مختلف ورق ARB شده اندازه‌گیری و در شکل ۹ ارائه شده است. مطابق شکل ۹، بیشترین میزان همسانگردی خواص مربوط به قطعه اولیه تابکاری شده می‌باشد و با انجام فرایند ARB خواص به سمت ناهمسانگردی پیش می‌رود. میزان ناهمسانگردی درصد ازدیاد طول نسبی قطعه در سیکل‌های ابتدایی فرایند به‌شدت افزایش می‌یابد، در سیکل‌های میانی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و البته در سیکل‌های پایانی با شیب زیادی کاهش می‌یابد؛ ولی میزان ناهمسانگردی استحکام کششی با انجام فرایند، با نرخ کمی افزایش یافته و در سیکل‌های پایانی تقریباً ثابت می‌شود. مطابق شکل ۹، میزان ناهمسانگردی قابلیت افزایش طول نسبی قطعه ARB شده بسیار بیشتر از ناهمسانگردی استحکام کششی آن می‌باشد.



شکل ۹ تغییرات شاخص ناهمگنی برای استحکام کششی و درصد افزایش طول نسبی قطعات ARB شده در سه جهت RD، TD و زاویه ۴۵^{o} نسبت به جهت نورد برحسب تعداد سیکل

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ریز ساختار، خواص مکانیکی و میزان ناهمسانگردی خواص آلومینیوم خالص تجاری طی فرایند ARB با عملیات حرارتی بین‌سیکلی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر حاصل شده است:

۱. با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند ARB از طول و ضخامت دانه‌ها کاسته می‌شود، به طوری که در سیکل‌های پایانی فرایند ساختار فوق‌العاده ریزدانه با ابعاد نانومتری حاصل می‌شود. پس از سیکل سیزدهم، طول میانگین دانه‌ها ۱/۴μm و ضخامت میانگین آن‌ها ۴۹۰nm می‌شود.

۲. سختی قطعات در سیکل‌های ابتدایی فرایند با سرعت افزایش می‌یابد، به طوری که با دو سیکل انجام فرایند، میکروسختی میانگین قطعه از ۲۶ به ۵۰ افزایش می‌یابد. در ادامه در سیکل‌های میانی سرعت افزایش سختی کاهش می‌یابد. در سیکل‌های پایانی نیز سختی کمی کاهش می‌یابد. توزیع سختی در جهت ضخامت ورق ARB شده یکنواخت است، به‌جز مناطق زیر سطح ورق که به دلیل وجود کرنش برشی باقیمانده، سختی در این مناطق کمی بیشتر است.

۳. با افزایش سیکل‌های فرایند ARB استحکام کششی قطعات افزایش می‌یابد، با دو سیکل انجام فرایند، استحکام کششی ورق از ۶۸MPa به ۱۵۳MPa افزایش می‌یابد و در سیکل دهم به ۲۰۱MPa می‌رسد. این افزایش در سیکل‌های اولیه فرایند سرعت زیادی دارد، که به کارسختی ایجاد شده طی این مراحل نسبت داده می‌شود، در ادامه با افزایش سیکل‌های فرایند نرخ افزایش استحکام کاهش می‌یابد. در سیکل‌های پایانی نیز استحکام قطعه کمی کاهش می‌یابد. استحکام کششی در سیزدهم به ۲۰۰MPa می‌رسد. این موضوع در مورد قطعات کشیده شده در هر سه جهت RD، TD و زاویه ۴۵^{o} صادق است.

۴. استحکام قطعات در جهت RD کمتر از استحکام قطعات در جهت TD است. استحکام قطعات در جهت زاویه ۴۵^{o} نیز کمتر از استحکام قطعات جهات RD و TD است.

۵. با انجام اولین سیکل فرایند ARB، میزان افزایش طول نسبی قطعه دچار افت ناگهانی شده، که به دلیل وقوع شرایط ناپایداری پلاستیک ناشی از ریزدانه شدن قطعه می‌باشد. با دو سیکل انجام فرایند، میزان افزایش طول نسبی قطعه از ۵۸ درصد به ۸ درصد کاهش می‌یابد. سپس با افزایش سیکل‌های فرایند میزان ازدیاد طول نسبی با شیب بسیار کمی افزایش یافته و در سیکل دهم به ۱۵ درصد می‌رسد. میزان ازدیاد طول نسبی در سیکل‌های پایانی تقریباً ثابت می‌ماند.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.2.8.2]

۶. با انجام فرایند ARB ناهمسانگردی خواص مکانیکی قطعه افزایش می‌یابد. میزان ناهمسانگردی قابلیت افزایش طول نسبی ورق‌های ARB شده بیش از ناهمسانگردی استحکام آنها می‌باشد.

۷. جهت دستیابی به برآیندی از خواص مکانیکی مطلوب همراه با میزان ناهمسانگردی کم و اندازه دانه مناسب، انجام ۱۰ سیکل فرایند ARB بر روی ورق آلومینیوم خالص تجاری مناسب می‌باشد.

۵- سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت دفتر استعداد درخشان دانشگاه سمنان و همچنین همکاری شرکت تولیدی آلدا سپاسگزاری می‌نماید.

۶- مراجع

[1] Nasiri Dehsorkhi R., Qods F., Tajally M., "Investigation on Microstructure and Mechanical Properties of Al–Zn Composite During Accumulative Roll Bonding (ARB) Process", *Materials Science and Engineering A*, No. 530, 2011, pp. 63-72.

[2] Azushima A., Kopp R., Korhonen A., Yang D. Y., Micari F., Lahoti G. D., Groche P., Yanagimoto J., Tsuji N., Rosochowski A., Yanagida A., "Severe Plastic Deformation (SPD) Processes for Metals", *CIRP Annals Manufacturing Technology*, No. 57, 2008, pp. 716-35.

[3] Chowdhury S. G., Srivastava V. C., Ravikumar B., Soren S., "Evolution of Texture During Accumulative Roll Bonding (ARB) and its Comparison with Normal Cold Rolled Aluminium–Manganese Alloy", *Scripta Materialia*, No. 54, 2006, pp. 1691-96.

[4] Tsuji N., Toyoda T., Minamino Y., Koizumi Y., Yamane T., Komatsu M., Kiritani M., "Microstructural Change of Ultrafine-Grained Aluminum During High-Speed Plastic Deformation", *Materials Science and Engineering A*, No. 350, 2003, pp. 108-16.

[5] Kamikawa N., Huang X., Tsuji N., Hansen N., "Strengthening Mechanisms in Nanostructured High-Purity Aluminium Deformed to High Strain and Annealed", *Acta Materialia*, No. 57, 2009, pp. 4198-4208.

[6] Eizadjou M., Danesh Manesh H., Janghorban K., "Microstructure and Mechanical Properties of Ultra-Fine Grains (UFGs) Aluminum Strips Produced by ARB Process", *Journal of Alloys and Compounds*, No. 474, 2009, pp. 406-15.

[7] Pirgazi H., Akbarzadeh A., Petrov R., Kestens L., "Microstructure Evolution and Mechanical Properties of AA1100 Aluminum Sheet Processed by Accumulative Roll Bonding", *Materials Science and Engineering A*, No. 497, 2008, pp. 132-38.

[8] Dehghan M., Qods F., Gerdooei M., "Investigation of Microstructure of the Commercial Pure Aluminium in the ARB Process", *Materials Science Forum*, Vols. 702-703, 2012, pp. 147-50.

[9] Kolahi A., Akbarzadeh A., Barnett M. R., "Electron Back Scattered Diffraction (EBSD) Characterization of Warm Rolled and Accumulative Roll Bonding (ARB) Processed Ferrite", *Journal of Materials Processing Technology*, No. 209, 2009, pp. 1436-44.

[10] Eizadjou M., Kazemi Talachi A., Danesh Manesh H., Shakur Shahabi H., Janghorban K., "Investigation of Structure and Mechanical Properties of Multi-Layered Al/Cu Composite Produced by Accumulative Roll Bonding (ARB) Process", *Composites Science and Technology*, No. 68, 2008, pp. 2003-09.

[11] Wu K., Chang H., Maawad E., Gan W. M., Brokmeier H. G., Zheng M. Y., "Microstructure and Mechanical Properties of the Mg/Al Laminated Composite Fabricated by Accumulative Roll Bonding (ARB)", *Materials Science and Engineering A*, No. 527, 2010, pp. 3073-78.

[12] Pasebani S., Toroghinejad M. R., Hosseini M., Szpunar J., "Textural Evolution of Nanograined 70/30 Brass Produced by Accumulative Roll-Bonding", *Materials Science and Engineering A*, No. 527, 2010, pp. 2050-56.

[13] Pasebani S., Toroghinejad M. R., "Nano-Grained 70/30 Brass Strip Produced by Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process", *Materials Science and Engineering A*, No. 527, 2010, pp. 491-97.

[14] Hosseini S. A., Danesh Manesh H., "High-Strength, High-Conductivity Ultra-Fine Grains Commercial Pure Copper Produced by ARB Process", *Materials and Design*, No. 30, 2009, pp. 2911-18.

[15] Kwan C., Wang Z., Kang S. B., "Mechanical Behavior and Microstructural Evolution Upon Annealing of the Accumulative Roll-Bonding (ARB) Processed Al Alloy 1100", *Materials Science and Engineering A*, No. 480, 2008, pp. 148-59.

[16] Lee S. H., Saito Y., Sakai T., Utsunomiya H., "Microstructures and Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy Processed by Accumulative Roll-Bonding", *Materials Science and Engineering A*, No. 325, 2002, pp. 228-35.

[17] Karlik M., Homola P., Slamova M., "Accumulative Roll-Bonding: First Experience with a Twin-Roll Cast AA8006 Alloy", *Journal*

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.2.8.2]

of Alloys and Compounds, No. 378, 2004, pp. 322-25.

[18] Elseaidy I. M., Ibrahim M. M., Ghoneim M. M., Abd EL-Azim M. E., "Aluminum Alloys Strengthening by Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process Transactions", *SMIRT 19 Conference*, Toronto, 2007.

[19] Kim H. W., Kang S. Tsuji B., N., Minamino Y., "Elongation Increase in Ultra-Fine Grained Al-Fe-Si Alloy Sheets", *Acta Materialia*, No. 53, 2005, pp. 1737-49.

[20] Zhilyaev A. P., Nurislamova G. V., Kim B. K., Baró M. D., Szpunar J. A., Langdon T. G., "Experimental Parameters Influencing Grain Refinement and Microstructural Evolution During High-Pressure Torsion", *Acta Materialia*, No. 51, 2003, pp. 753-765.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.2.8.2]