

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

تأثیر مسیر کرنش در فرایند نورد تجمعی پیوندی (ARB) بر ریزساختار و خواص مکانیکی نوار مسی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد گرایش شناسایی انتخاب و روش ساخت مواد

حسین طاهری برایجانی

اساتید راهنما

دکتر محمدرضا طوقی نژاد

دکتر احمد رضاییان

دی ۱۳۹۳



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مواد گرایش شناسایی و انتخاب و روش ساخت
مواد

تحت عنوان

تأثیر مسیر کرنش در فرایند نورد تجمعی پیوندی (ARB) بر ریزساختار و خواص مکانیکی
نوار مسی

در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۲۰ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر محمدرضا طرقتی نژاد

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه

دکتر احمد رضاییان

۲- استاد راهنمای پایان‌نامه

دکتر مرتضی شمعیان

۳- استاد داور

دکتر ابوذر طاهری زاده

۴- استاد داور

دکتر کیوان رئیسی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

تشکر و قدردانی

ضمن سپاس و ستایش به درگاه ایزد منان که به من توانایی داد که با استعانت از او بتوانم این پژوهش را انجام دهم، بر خود لازم می‌بینم از دلگرمی و تشویق همه کسانی که در نگارش این مجموعه مرا یاری نمودند قدردانی نمایم:

دروود و سپاس قلبی خود را به پدر و مادرم، حامیان همیشگی زندگی زندگیم و برادر عزیزم و خواهران مهربانم تقدیم می‌نمایم که در تمامی مراحل زندگی مشوق، همراه و پشتیبان من بوده‌اند.

تشکر و سپاس فراوان از اساتید گرانقدر، جناب آقای دکتر محمدرضا طرقي نژاد و جناب آقای دکتر احمد رضاییان که دانش و وقت خود را در اختیار بنده قرار داده و همواره در طول این پروژه پشتیبان و همراه من بوده‌اند.

از همکاری کادر محترم دانشکده‌ی مهندسی مواد به ویژه مسئول آزمایشگاه خواص مکانیکی سپاس گزارم.

حسین طاهری برایجانی

دی ۱۳۹۳

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان
است.

تقدیم به پدر و مادرم

که از نگاهشان صلابت

از رفتارشان محبت

و از صبرشان ایستادگی را آموختم

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
ده	فهرست شکل ها
دوازده	فهرست جداول
۱	چکیده
۲	فصل اول: مقدمه
۵	فصل دوم: مروری بر مطالب
۵	۱-۲ مقدمه
۶	۲-۲ فرایند تغییر شکل پلاستیکی شدید
۸	۳-۲ بررسی خواص ورق آلومینیوم خالص تولید شده به وسیله ARB
۹	۴-۲ بررسی خواص ورق مس خالص تولید شده به وسیله ARB
۱۴	۵-۲ بررسی خواص ورق برنجی ۷۰-۳۰ تولید شده به وسیله ARB
۱۶	۶-۲ تأثیر انرژی نقص چیدن بر ساختار ایجاد شده به وسیله ARB
۱۹	۷-۲ نحوه ی توزیع کرنش در فرایند ARB
۲۰	۸-۲ نورد متقاطع
۲۵	۹-۲ نورد تجمعی پیوندی متقاطع
۲۵	۱-۹-۲ نورد تجمعی پیوندی متقاطع نوع ۱ (C-ARB)
۲۷	۲-۹-۲ نورد تجمعی پیوندی متقاطع نوع ۲ (CRARB)
۳۰	۱۰-۲ جمع بندی
۳۱	فصل سوم: مواد و روش انجام آزمون
۳۱	۱-۳ مواد و ترکیب شیمیایی
۳۱	۲-۳ چگونگی انجام فرایند ARB با مسیرهای مختلف
۳۱	۱-۲-۳ آماده سازی سطحی
۳۲	۲-۲-۳ تغییر مسیر در فرایند ARB
۳۳	۳-۳ بررسی ریز ساختار
۳۳	۱-۳-۳ ارزیابی شرایط پیوند
۳۳	۲-۳-۳ بررسی تحولات ریز ساختاری توسط EBSD
۳۴	۴-۳ بررسی سطح شکست

۳۴.....	۵-۳ ارزیابی خواص مکانیکی
۳۴.....	۱-۵-۳ آزمون کشش
۳۵.....	۲-۵-۳ آزمون سختی
۳۶.....	فصل چهارم: نتایج و بحث
۳۶.....	۱-۴ مقدمه
۳۶.....	۲-۴ بررسی پیوند ایجاد شده بین لایه‌ها با میکروسکوپ نوری
۳۹.....	۳-۴ بررسی باندهای برشی تشکیل شده در حین ARB به وسیله میکروسکوپ نوری
۴۰.....	۴-۴ بررسی ریز ساختار توسط EBSD
۵۴.....	۵-۴ بررسی تغییر خواص مکانیکی حین فرایند ARB در مسیرهای مختلف
۵۵.....	۱-۵-۴ تغییرات استحکام و ازدیاد طول
۵۸.....	۲-۵-۴ تغییرات سختی
۵۹.....	۶-۴ بررسی سطح شکست
۶۵.....	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۶۵.....	۱-۵ نتیجه‌گیری
۶۷.....	۲-۵ پیشنهادها
۶۸.....	مراجع

فهرست شکل‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۶.....	شکل ۲-۱. رابطه بین اندازه دانه و تنش معیار آهن خالص
۷.....	شکل ۲-۲. شکل نمایی ARB
۹.....	شکل ۲-۳. میکروساختار آلومینیوم خالص ARB شده
۹.....	شکل ۲-۴. نمودار استحکام کششی در مقابل ازدیاد طول آلومینیوم خالص ARB شده
۱۰.....	شکل ۲-۵. سطح مقطع ورق مسی ARB شده
۱۱.....	شکل ۲-۶. تصویر TEM و الگو SAD ورق‌های مسی ARB شده
۱۱.....	شکل ۲-۷. نقشه متمایز کننده مربوط به ورق‌های مس ARB شده
۱۲.....	شکل ۲-۸. طرح نمایی مکانیزم تفکیک دانه طی فرایند ARB
۱۳.....	شکل ۲-۹. طرح نمایی تبلور مجدد پیوسته‌ی ریز ساختار لایه‌ای به شدت تغییر شکل یافته
۱۳.....	شکل ۲-۱۰. تغییرات استحکام کششی و درصد ازدیاد طول ورق مسی ARB شده
۱۴.....	شکل ۲-۱۱. سطح شکست نمونه‌های مسی ARB شده
۱۵.....	شکل ۲-۱۲. تصویر میکروسکوپ نوری از ورق برنج ۷۰-۳۰ ARB شده
۱۵.....	شکل ۲-۱۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری برنج ۷۰-۳۰ ARB شده
۱۷.....	شکل ۲-۱۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی آلومینیوم خالص ARB شده
۱۷.....	شکل ۲-۱۵. تصویر TEM و الگو پراش از صفحه RD-ND ورق‌های مس ARB شده
۱۸.....	شکل ۲-۱۶. تصویر TEM و الگو پراش از صفحه RD-ND ورق‌های برنجی ARB شده
۲۰.....	شکل ۲-۱۷. نحوه‌ی توزیع کرنش برشی در ضخامت آلیاژ آلومینیوم AA1100 پس از سیکلهای مختلف
۲۱.....	شکل ۲-۱۸. ریز ساختار مربوط به آلیاژ AZ۳۱ نورد متقاطع شده
۲۲.....	شکل ۲-۱۹. شکل قطبی پیش بینی شده و آزمایشگاهی مس نورد مستقیم شده و نورد متقاطع شده
۲۳.....	شکل ۲-۲۰. تصویر ODFs آزمایشگاهی برای مس نورد مستقیم شده و نورد متقاطع شده
۲۳.....	شکل ۲-۲۱. شکل قطبی پیش بینی شده و آزمایشگاهی فولاد کم کربن نورد مستقیم شده و نورد متقاطع شده
۲۴.....	شکل ۲-۲۲. تصویر ODFs آزمایشگاهی برای فولاد کم کربن نورد مستقیم شده و نورد متقاطع شده
۲۴.....	شکل ۲-۲۳. تصویر قطبی معکوس ND برای نمونه‌های نورد معمولی شده و نورد متقاطع شده
۲۵.....	شکل ۲-۲۴. شکل نمایی از روش نورد تجمعی پیوندی متقاطع نوع ۱
۲۶.....	شکل ۲-۲۵. تغییرات استحکام تسلیم و کشش‌نمونه‌های نورد تجمعی پیوندی متقاطع شده
۲۷.....	شکل ۲-۲۶. تصویر TEM ورق آلومینیوم خالص تجاری نورد تجمعی پیوندی متقاطع قرار شده تا ۲ سیکل
۲۷.....	شکل ۲-۲۷. تصویر TEM ورق آلومینیوم خالص تجاری نورد تجمعی پیوندی شده تا ۶ سیکل
۲۸.....	شکل ۲-۲۸. شکل نمایی از فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع نوع ۲
۲۸.....	شکل ۲-۲۹. تصویر میکروسکوپ نوری کامپوزیت تولید شده به روش ARB و CRARB
۲۹.....	شکل ۲-۳۰. نمودار تنش-کرنش مهندسی کامپوزیت AL/B4C تولید شده به روش ARB و CRARB
۲۹.....	شکل ۲-۳۱. الگو پراش اشعه ایکس کامپوزیت AL/B4C تولید شده به روش ARB و CRARB

- شکل ۲-۳۲. استحکام کششی کامپوزیت AL/B-4C و آلومینیوم تولید شده به روش ARB..... ۳۰
- شکل ۳-۱. شکل نمایشی از فرایند نورد تجمعی پیوندی (ARB)..... ۳۲
- شکل ۳-۲. شکل نمایشی از فرایند نورد تجمعی پیوندی با مسیرهای B_C ، B_A و C..... ۳۳
- شکل ۴-۱. سطح مقطع عرضی ورق‌های مسی ARB شده با مسیر A..... ۳۷
- شکل ۴-۲. سطح مقطع عرضی ورق‌های مسی ARB شده با مسیرهای B_C ، B_A و C..... ۳۸
- شکل ۴-۳. سطح مقطع عرضی ورق‌های مسی ARB شده با مسیر A با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر..... ۳۹
- شکل ۴-۴. سطح مقطع عرضی ورق‌های مسی ARB شده تا ۸ سیکل با مسیرهای مختلف با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر..... ۴۰
- شکل ۴-۵. نقشه جهت‌گیری نمونه یک سیکل ARB شده با مسیر A..... ۴۱
- شکل ۴-۶. نقشه جهت‌گیری به همراه نقشه مرز دانه‌ای نمونه‌های ARB شده با مسیر A..... ۴۳
- شکل ۴-۷. تصویر الکترون برگشتی از سطح مقطع RD-ND نمونه یک سیکل ARB شده با مسیر A..... ۴۵
- شکل ۴-۸. نقشه مرز دانه‌ای نمونه‌های ARB شده با مسیر C..... ۴۶
- شکل ۴-۹. شکل نمایشی از نحوه‌ی توزیع کرنش برشی در ورق‌های ARB شده..... ۴۷
- شکل ۴-۱۰. تصویر نمایشی مکانیزم درشت شدن دانه‌ها در طی تفکیک شدن دانه مجاور..... ۴۹
- شکل ۴-۱۱. نقشه مرز دانه‌ای نمونه‌های ARB شده با مسیر B_C ۵۰
- شکل ۴-۱۲. نقشه مرز دانه‌ای نمونه‌های ARB شده با مسیر B_A ۵۱
- شکل ۴-۱۳. شکل نمایشی نحوه اعمال تنش روی نمونه و هر دانه در حین نورد تجمعی پیوندی..... ۵۲
- شکل ۴-۱۴. نقشه جهت‌گیری ورق‌های مسی ARB شده تا ۸ سیکل با مسیرهای مختلف..... ۵۳
- شکل ۴-۱۵. استحکام کششی و درصد ازدیاد طول بر حسب تعداد سیکل‌های ARB برای مسیرهای مختلف..... ۵۵
- شکل ۴-۱۶. تصویر قطبی (۱۱۱) مربوط به نمونه‌های ARB شده با مسیر B_C ۵۸
- شکل ۴-۱۷. نقشه مرز دانه‌ای سیکل ۷ مسیر BC..... ۵۸
- شکل ۴-۱۸. تغییرات سختی ورق‌های مسی خالص تولید شده به وسیله فرایند ARB با مسیرهای مختلف..... ۵۹
- شکل ۴-۱۹. تصویر SEM از سطح شکست نمونه‌های مسی ARB شده با مسیرهای مختلف با بزرگنمایی ۳۰X..... ۶۰
- شکل ۴-۲۰. تصویر SEM از سطح شکست نمونه‌های مسی ARB شده با مسیرهای مختلف با بزرگنمایی ۱۰۰X..... ۶۲
- شکل ۴-۲۱. تصویر SEM سطح شکست ورق مسی ARB شده تا ۵ و ۷ سیکل..... ۷۵
- شکل ۴-۲۲. نمودار قطر دیپل بر حسب تعداد سیکل ARB برای نمونه‌های ARB شده با مسیرهای مختلف..... ۷۵

فهرست جداول

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۷	جدول ۲-۱. تغییرات هندسه مربوط به ورق تولید شده به وسیله نورد پیوندی
۸	جدول ۲-۲. خواص مکانیکی آلومینیوم تولید شده به وسیله نورد تجمعی پیوندی.
۱۸	جدول ۲-۳. انرژی نقص چیدن آلومینیوم، مس و برنج
۲۲	جدول ۲-۴. نتایج آزمون کشش به دست آمده در مورد نمونه‌های تحت نورد متقاطع قرار گرفته در جهت‌های مختلف
۳۱	جدول ۳-۱. خواص مکانیکی اولیه ورق مورد استفاده
۳۳	جدول ۳-۲. شکل نمایی از چرخاندن ورق‌ها در مسیرهای استفاده شده در این پژوهش
۳۴	جدول ۳-۳. ابعاد استاندارد نمونه آزمایش کشش
۶۳	جدول ۴-۱ میانگین فاکتور اشمید سیکل‌های ۷ و ۸ مسیر B _C

چکیده

در پژوهش حاضر تأثیر مسیرهای کرنش در فرایند نورد تجمعی پیوندی بر خواص مکانیکی و ریزساختار نوارهای مسی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از نورد تجمعی پیوندی مستقیم (مسیر A) و همچنین نورد تجمعی پیوندی با زاویه‌های چرخش ۹۰ درجه در جهت پادساعتگرد (مسیر B_C)، ±۹۰ درجه (مسیر B_A) و ۱۸۰ درجه (مسیر C) استفاده شد. جهت انجام این پژوهش از نوارهای مسی خالص تجاری با ضخامت ۱ میلی‌متر و در ابعاد ۵ × ۱۵ سانتی‌متر برای نورد مستقیم و ۱۸۰ درجه و ۴ × ۵ سانتی‌متر برای چرخش‌های ۹۰ درجه استفاده گردید. فرایند نورد تجمعی پیوندی با مسیرهای مختلف تا ۸ سیکل (کرنش معادل ۶/۴) روی ورق‌های مسی با موفقیت انجام شد. در فرایند نورد تجمعی پیوندی با مسیر A نمونه‌ها در سیکل دوم چرخانده نشد در حالی که در مسیرهای B_C، B_A و C نمونه‌ها پس از نورد در سیکل اول به ترتیب ۹۰ درجه در جهت پادساعتگرد، ±۹۰ و ۱۸۰ درجه حول محور عمود بر جهت نورد چرخانده شد. به منظور بررسی شرایط پیوندهای ایجاد شده در طی فرایند نورد تجمعی پیوندی با مسیرهای مختلف از تصاویر میکروسکوپ نوری استفاده شد. نتایج نشان داد که در هر چهار مسیر با افزایش تعداد سیکل پیوندهای ایجاد شده در سیکل قبل بهبود یافت. همچنین بررسی‌ها نشان داد که پیوندهای ایجاد شده در فرایند نورد تجمعی پیوندی با مسیرهای B_C، B_A و C نسبت به فرایند نورد تجمعی پیوندی با مسیر A در تعداد سیکل یکسان دارای شرایط بهتری هستند. تغییرات ریز ساختاری حین فرایند نورد تجمعی پیوندی با مسیرهای مختلف، توسط آزمون پراش الکترونی برگشتی مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر پراش الکترونی برگشتی نشان داد که ساختار لایه‌ای در حین فرایند نورد تجمعی پیوندی با مسیرهای A و C به وجود آمد در حالی که ریز ساختار نمونه‌های فرایند نورد تجمعی پیوندی شده با مسیرهای B_C و B_A شامل دانه‌هایی تقریباً هم محور بود. به منظور بررسی خواص مکانیکی ورق‌های نورد تجمعی پیوندی شده با مسیرهای مختلف از آزمایش کشش تک محوری و سختی سنجی استفاده شد. نتایج نشان داد که با انجام فرایند نورد تجمعی پیوندی روی ورق‌های مسی و در هر چهار مسیر، سختی و استحکام نهایی ورق‌ها حدود ۲ برابر مقدار اولیه افزایش یافت. همچنین مقدار سختی و استحکام ورق‌های نورد تجمعی پیوندی شده با مسیر A و C بالاتر از ورق‌های نورد تجمعی پیوندی شده با مسیر B_C و B_A بود. بررسی سطح شکست نمونه‌های نورد تجمعی پیوندی شده با مسیرهای مختلف پس از انجام آزمایش کشش با میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام گرفت و مشخص شد که شکست در ورق‌های تولید شده در هر چهار مسیر دارای شکست نرم با مکانیزم تشکیل دیمپل‌های برشی است.

کلمات کلیدی

مس خالص تجاری، فرایند نورد تجمعی پیوندی، مسیر کرنش، خواص مکانیکی، ریز ساختار، سطح شکست

فصل اول

مقدمه

بهبود ریز ساختار یکی از موثرترین و همچنین اقتصادی‌ترین راه‌های بهبود خواص مکانیکی مواد است. مواد فلزی فوق ریز دانه (UFG)^۱ که متوسط اندازه دانه آن‌ها کوچک‌تر از $1\ \mu\text{m}$ است، دارای خواص مکانیکی بسیار مطلوبی هستند. به منظور استفاده از مواد UFG باید این مواد دارای ابعاد مواد حجمی باشند. 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 UFG گسترش یافته است اما در این روش‌ها تولید ماده حجمی بدون نقص ساختاری بسیار مشکل می‌باشد از این رو برای تولید این مواد از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)^۲ استفاده می‌شود.

فرایندهای SPD روش‌هایی بسیار مفیدی در تولید مواد حجمی با اندازه دانه‌های زیر میکرونی^۳ هستند. پیش از توسعه فرایندهای SPD، بهبود ساختار دانه‌های مواد فلزی اغلب به وسیله تغییر شکل پلاستیک معمولی و عملیات آنیل منجر به تبلور مجدد صورت می‌گرفت. حداقل اندازه دانه‌ای که به وسیله این روش به دست می‌آید حدود $10\ \mu\text{m}$ است. کاهش سطح مقطع کلی که به وسیله نورد سرد معمولی در صنعت ایجاد می‌شود برای مثال حدود $80\% - 60\%$ است که متناظر با کرنش حقیقی فون مایسز^۴ $1/85 - 1/06$ است، این در حالی است که کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد، بالای ۴ در فرایندهای SPD به مواد اعمال می‌شود. بنابراین ریز ساختار مواد در فرایندهای SPD تحت تغییر شکل بسیار شدید ایجاد می‌شود. مواد نانو کریستال و UFG دارای پتانسیل بسیار بالایی برای کاربردهای مهندسی در آینده هستند

¹ Ultra-fine grain

² Severe plastic deformation

³ submicrometer

⁴ Von mises

که از جمله این کاربردها می‌توان به مقاومت بالای اجزا در صنعت اتومبیل و هوافضا اشاره کرد.

از جمله مشهورترین و در عین حال موفقیت‌آمیزترین فرایندهای SPD دو فرایند اکستروژن کانال‌های مشابه زاویه دار (ECAP)^۱ و فشار تحت پیچش بالا (HPT)^۲ است. فرایند نورد تجمعی پیوندی (ARB)^۳ از جمله دیگر فرایندهای SPD است. این فرایند برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ مورد استفاده قرار گرفته است. کاهش ضخامت کلی که روی مواد در این فرایند اعمال می‌شود محدود است. در فرایند ARB برای مثال ورق ۵۰٪ نورد شده به دو قسمت با ابعادی برابر با ابعاد قطعه اولیه تقسیم شده، سپس این دو قسمت روی یکدیگر قرار گرفته و نورد می‌شوند. در این فرایند، نورد علاوه بر آن که باعث ایجاد تغییر شکل می‌شود، باعث ایجاد پیوند بین دو قسمت قرار داده شده روی یکدیگر نیز می‌شود. به منظور ایجاد پیوند بهتر سطح مواد روغن زدایی و برسکاری سیمی می‌شود.

از آنجایی که فرایندی که در بالا توضیح داده شد قابلیت تکرار پذیری دارد بنابراین می‌توان کرنش‌های پلاستیک بسیار زیادی را روی ماده به وسیله این روش اعمال کرد. در فرایند ARB اگر تعداد سیکل‌ها را n در نظر گرفته شود تعداد لایه‌ها بعد از هر سیکل 2^n ، تعداد مرزهای ایجاد شده بین لایه‌ها برابر با $2^n - 1$ ، ضخامت هر لایه $1/2^n$ ، کاهش ضخامت کلی $100 \times (1 - \frac{1}{2^n})$ و کرنش معادل ایجاد شده $n/8$ می‌باشد.

در اکثر بررسی‌هایی که روی ورق‌های تولید شده به وسیله نورد تجمعی پیوندی صورت گرفته است، ضخامت متوسط دانه‌های ریز پنکیکی و یا ساختارهای لایه‌ای ریز ایجاد شده در حدود ۲۰۰-۱۰۰ nm است. موادی با درجه خلوص بالاتر تمایل به ایجاد دانه‌های درشت‌تری در طی فرایند ARB دارند. همچنین هر چه دمای فرایند ARB کاهش یابد دانه‌های تولید شده دارای اندازه کوچک‌تری هستند. موادی با اندازه دانه کوچک که از فرایند ARB تولید می‌شود دارای استحکام کششی دو تا چهار برابر بیشتر از مواد با اندازه دانه معمولی هستند. اما این مواد ازدیاد طول پایینی دارند که این انعطاف‌پذیری کم مربوط به انرژی بسیار زیادی است که در طی تغییر شکل شدید در ماده ذخیره می‌شود.

علیزاده و پایدار تأثیر فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع در تولید کامپوزیت Al/B_4C را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که فرایند نورد تجمعی پیوندی متقاطع باعث بهبود توزیع ذرات B_4C در زمینه می‌شود. همچنین سلیمیان‌فرد و همکارانش خواص مکانیکی و بافت مس تولید شده به وسیله مسیرهای مختلف ECAP را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که خواص مکانیکی و بافت نمونه‌های تولید شده به وسیله مسیرهای مختلف کاملاً با یکدیگر متفاوت است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاکنون خواص متالورژیکی ورق‌های مس خالص تولید شده توسط ARB با مسیرهای مختلف، به صورت چشم‌گیر صورت نگرفته است.

در تحقیق حاضر تأثیر مسیر کرنش در فرایند ARB مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تحقق این هدف نوارهای مسی نورد شده در سیکل اول قبل از نورد در سیکل بعد حول محور عمود بر جهت نورد (ND)^۴ چرخانده شد. در این تحقیق از چرخش‌های مختلف صفر، ۹۰ درجه در جهت ساعتگرد، ± 90 و ۱۸۰ درجه استفاده شد و تغییرات ریز ساختاری و خواص مکانیکی حین این چرخش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. فصل دوم این پایان‌نامه به معرفی فرایند

^۲ Equal channel angular pressing

^۳ High pressure torsion

^۴ Accumulative roll bonding

^۴ Normal direction

ARB و پارامترهای موثر در فرایند ARB می‌پردازد. در فصل سوم نحوه انجام فرایند و آزمایش‌های انجام شده روی مواد ARB شده، مطرح می‌شود. فصل چهارم به بیان نتایج به دست آمده و بحث روی آن‌ها اختصاص یافته است و نهایتاً در فصل پنجم نتیجه‌گیری کلی از این تحقیق ارائه می‌شود.

فصل دوم

مروری بر مطالب

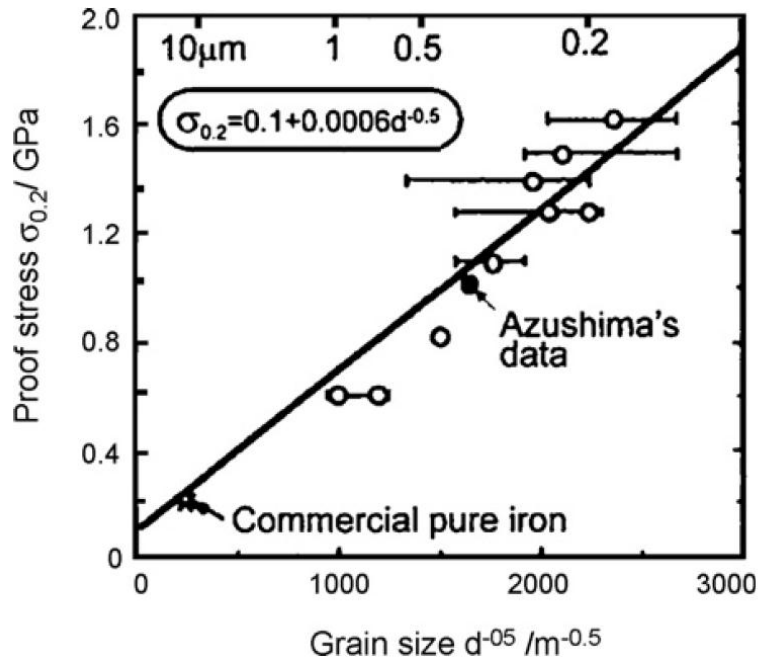
۱-۲ مقدمه

اصلاح ریز ساختار یکی از راه‌های مؤثر و نسبتاً اقتصادی به منظور بهبود خواص مکانیکی است. فلزات با اندازه دانه فوق ریز استحکام بسیار بالایی را از خود نشان می‌دهند. استحکام تسلیم مواد پلی کریستال به وسیله رابطه هال-پچ که در زیر مشاهده می‌شود با مجذور قطر دانه رابطه مستقیم دارد.

$$\sigma_Y = \sigma_0 + Ad^{-1/2} \quad \text{معادله ۱-۲}$$

در این رابطه σ_0 تنش اصطکاکی و A عدد ثابتی است. رابطه بالا نشان می‌دهد که استحکام تسلیم با کاهش ریشه دوم اندازه دانه افزایش می‌یابد. کاهش اندازه دانه باعث ایجاد استحکام تسلیم بیشتر بدون کاهش چقرمگی می‌شود، که در دیگر روش‌های افزایش استحکام نظیر عملیات حرارتی مشاهده نمی‌شود.

رابطه بین تنش معیار و اندازه دانه آهن خالص در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تنش با ریشه دوم اندازه دانه طبق رابطه هال-پچ به طور معکوس تغییر می‌کند. علاوه بر استحکام خواص دیگر مواد فوق ریز دانه از قبیل خواص خوردگی و خواص خستگی نسبت به مواد با اندازه دانه بزرگ بهبود می‌یابد [۱]. روش‌های مختلفی برای به دست آوردن دانه‌های زیر یک میکرون وجود دارد، از جمله این روش‌ها می‌توان به زینتر نانو پودرها، تبلور مجدد مواد آمورف سریع منجمد شده، رسوب بخار، آسیاکاری گلوله‌ای انرژی بالا، تغییر شکل پلاستیکی شدید (SPD) اشاره کرد.



شکل ۲-۱. رابطه بین اندازه دانه و تنش معیار آهن خالص [۱].

۲-۲ فرایند تغییر شکل پلاستیکی شدید

فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید (SPD) به فرایندهایی گفته می‌شود که در آن کرنش پلاستیکی بسیار زیادی روی یک ماده به منظور به دست آوردن فلز فوق ریز دانه (UFG) اعمال می‌شود. هدف از فرایندهای تغییر شکل شدید در به دست آوردن فلزی با اندازه دانه فوق ریز، تولید قطعات سبک و با استحکام بالا می‌باشد.

در فرایندهای معمول شکل دهی فلزات از قبیل نورد، فورج و اکستروژن میزان کرنش پلاستیکی اعمالی به طور کلی کمتر از ۲ می‌باشد. زمانی که برای ایجاد کرنش پلاستیکی بیش از ۲ چندین پاس نورد، کشیدن و یا اکستروژن مورد استفاده قرار می‌گیرد ضخامت و قطر نمونه‌ها بسیار نازک می‌شود و نمی‌توان از آنها در قطعات کاربردی استفاده کرد. به منظور اعمال کرنش بسیار زیاد روی فلز با ابعاد ماده حجمی بدون تغییر ابعاد و شکل روش‌های تغییر شکل پلاستیکی شدید مختلفی از جمله اکستروژن در کانال زاویه‌دار با مقاطع یکسان (ECAP) [۲]، پیچش تحت فشار بالا (HPT) [۳]، نورد تجمعی پیوندی (ARB) [۴]، فشار اکستروژن سیکلی (CEC) [۵]، اکستروژن پیچشی [۶]، کرنش پیچشی شدید (STS) [۷]، فرج سیکلی قالب بسته (CCDF) [۸] و نورد چند پاسی کوتاه (SSMR) [۹] گسترش یافته است.

با توجه به موضوع پژوهش حاضر در این قسمت به بررسی فرایند نورد تجمعی پیوندی پرداخته می‌شود. این فرایند در ابتدا توسط سایتو^۵ و همکارانش گسترش یافت. اصول فرایند نورد تجمعی پیوندی به طور نمایشی در شکل ۲-۲ ارائه شده است. در این فرایند ابتدا دو ورق روی یکدیگر قرار می‌گیرند. به منظور افزایش استحکام پیوندهای ایجاد شده فصل مشترک دو ورق قبل از نورد آماده سازی سطحی می‌شوند سپس دو لایه به وسیله نورد به یکدیگر متصل می‌شوند. در ادامه ورق نورد شده به دو نیم تقسیم شده و قسمت‌های بریده شده مجدداً آماده سازی سطحی شده و

^۱ Cyclic extrusion compression

^۲ Severe torsion straining

^۳ Cyclic closed-die forging

^۴ Super short multi-pass rolling

^۵ Saito

روی یکدیگر قرار می‌گیرند و نورد می‌شوند. این روش را می‌توان به طور نامحدود تکرار کرد به طوری که تغییر شکل پلاستیک بسیار زیادی روی ماده اعمال شود.

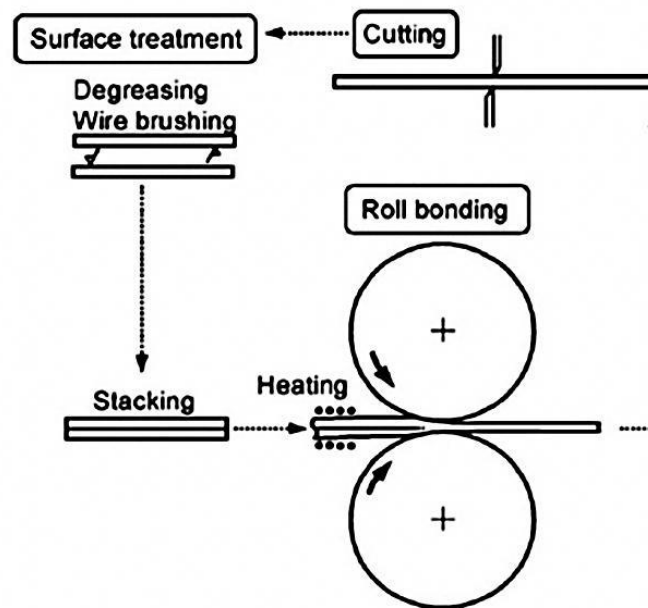
کرنش اعمالی بعد از n سیکل به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{3}}{2} \ln(r), r = 1 - \frac{t}{t_0} \quad \text{معادله ۲-۲}$$

در این رابطه t_0 ضخامت اولیه ورق‌ها، t ضخامت ورق بعد از نورد پیوندی و r میزان کاهش ضخامت اعمالی بعد از هر سیکل می‌باشد. در جدول ۱-۲ تغییرات مربوط به تعداد لایه‌ها، میزان کاهش ضخامت و کرنش معادل بر حسب شماره سیکل در ورق تولید شده به وسیله نورد پیوندی پس از اعمال ۵۰ درصد ازدیاد طول آورده شده است [۱۰].

جدول ۱-۲. تغییرات تعداد لایه‌ها، میزان کاهش ضخامت و کرنش معادل بر حسب شماره سیکل در ورق تولید شده به وسیله نورد پیوندی پس از اعمال ۵۰ درصد ازدیاد طول [۱۰]

Number of Cycles, n	1	2	3	5	10
Number of layers, m	2	4	8	32	1024
Total reduction, r (%)	50	75	87.5	96.9	99.9
Equivalent strain, ε	0.80	1.60	2.40	4.00	8.00



شکل ۲-۲. نمایشی از فرایند نورد تجمعی پیوندی (ARB) [۱۰].

تعدادی از بررسی‌های صورت گرفته روی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای چند لایه و نوارهای کامپوزیتی تولید شده به وسیله ARB عبارتند از: AL [۱۱، ۱۲ و ۱۳]، Al-Cu [۱۴ و ۱۵]، Al-Ti [۱۶]، Cu [۱۷ و ۱۸]، Cu-Ni [۱۹]، فولاد [۲۰ و ۲۱] و برنج [۲۲ و ۲۳]. در اینجا به بررسی کامل ورق‌های آلومینیوم، برنج ۳۰-۷۰ و مس ARB شده پرداخته می‌شود.

۳-۲ بررسی خواص ورق آلومینیوم خالص تولید شده به وسیله ARB

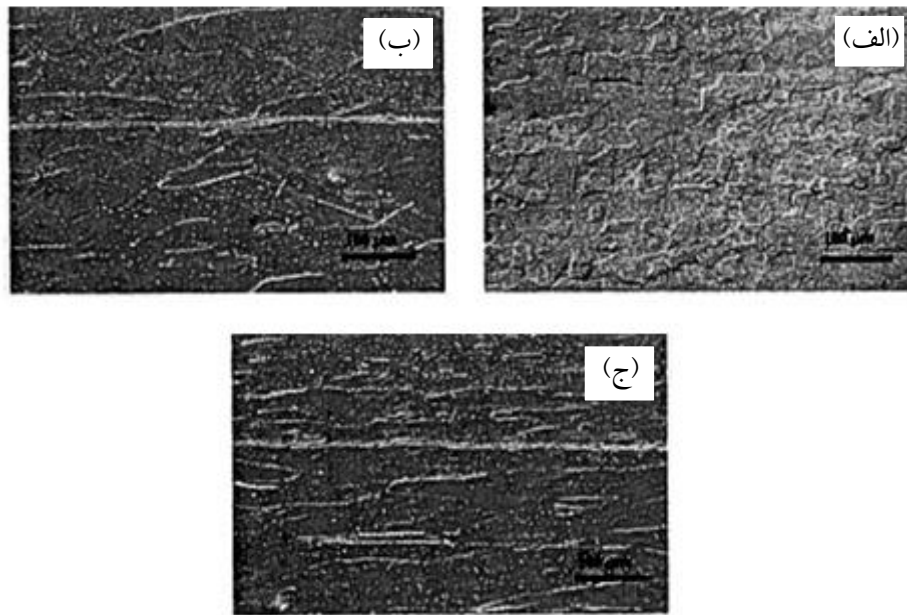
ورق آلومینیوم خالص تجاری به طور موفقیت آمیزی به وسیله فرایند نورد تجمعی پیوندی توسط کسنیرز^۱ و همکارانش [۲۴] تولید شده است. در جدول ۲-۲ نتایج مربوط به آزمون کشش ورق‌های تولید شده در دماها و پاس‌ها مختلف آورده شده است. بهترین خواص مکانیکی مربوط به ورق تولید شده به وسیله نورد تجمعی پیوندی و آزمون شده در دمای ۱۵۰°C و بعد از ۵ سیکل نورد به دست می‌آید. در این شرایط استحکام دو برابر می‌شود و درصد ازدیاد طول به ۸٪ کاهش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود در فرایند نورد تجمعی بهینه خواص مکانیکی در حداکثر سیکل به دست نمی‌آیند. در این مورد همانطور که مشاهده می‌شود بهینه خواص در سیکل ۵ به دست آمده است و نه در سیکل ۱۵ که مربوط به حداکثر سیکل است.

جدول ۲-۲. خواص مکانیکی آلومینیوم تولید شده به وسیله نورد تجمعی پیوندی. در جدول زیر دما، تعداد پاس و شماره نمونه به صورت روبرو علامت گذاری شده‌اند: ۱-۱۵۰ A مربوط به نمونه شماره ۱ و در پاس اول و دمای ۱۵۰°C است [۲۴]

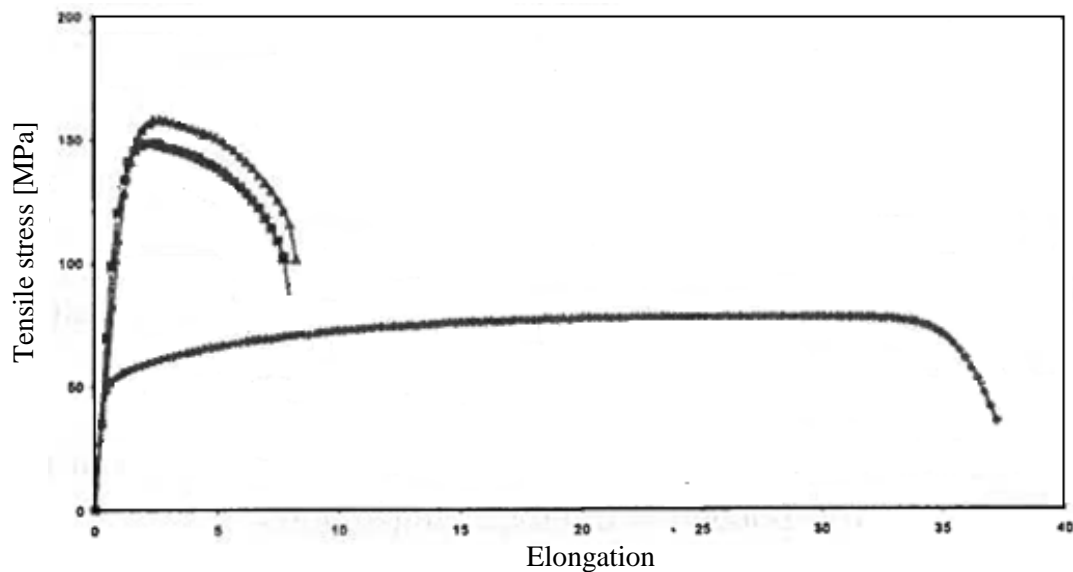
Sample	Yield Stress [MPa]	Ultimate Tensile Strength [MPa]	Elongation [%]
	R _{0.2}	R _m	A
Mean values			
A150-1	127.0	140.85	6.3
A150-5	129.5	164.0	8.9
A150-10	130.0	159.5	8.0
A150-15	133.5	153.0	7.1
A200-1	125.0	137.2	6.5
A200-5	135.0	156.8	8.3
A200-10	127.5	147.1	8.0
A250-1	122.0	136.5	6.4
A250-5	125.0	151.6	7.5
A250-10	127.0	144.6	7.7
A-r	50.6	77.5	33.6

تصویر مربوط به میکروسکوپ نوری از سطح مقطع ورق نورد تجمعی شده در پاس‌های مختلف در شکل ۲-۳ آورده شده است. در شکل ۲-۳ (ب) و شکل ۲-۳ (ج) می‌توان سطح جدایش مربوط به سیکل نهایی را به وضوح مشاهده کرد. همچنین نمودار تنش بر حسب ازدیاد طول مربوط به نمونه اولیه تبلور مجدد یافته و نمونه‌ها نورد تجمعی شده بعد از ۱، ۵ و ۱۰ پاس در شکل ۲-۴ آورده شده است [۲۴].

¹ Kusnierz



شکل ۲-۳. میکروساختار مربوط به سطح مقطع RD-ND مربوط به آلومینیوم خالص نورد تجمعی پیوندی شده. الف) نمونه تبلور مجدد یافته اولیه، ب) بعد از یک سیکل نورد، ج) بعد از پنج سیکل نورد [۲۴].



شکل ۲-۴. نمودار استحکام کششی در مقابل ازدیاد طول برای نمونه اولیه تبلور مجدد یافته، بعد از سیکل اول، بعد از ۵ سیکل و بعد از ۱۰ سیکل [۲۴].

۲-۴ بررسی خواص ورق مس خالص تولید شده به وسیله ARB

شعرباف و طرقي نژاد [۲۵] ورق‌های مس خالص را به وسیله فرایند نورد تجمعی پیوندی تولید کرده‌اند و ریز ساختار و خواص این ورق‌ها را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. سطح مقطع ورق‌های مسی ARB شده در شکل ۲-۵ مشاهده می‌شود. اگر میزان درصد ازدیاد طول اعمال شده به منظور ایجاد پیوند در بین ورق‌ها به اندازه کافی نباشد مرز بین ورق‌ها همانطور که در شکل ۲-۵ (الف) مشاهده می‌شود، کاملاً مشخص و قابل تشخیص است. اما در سیکل‌های بالاتر که میزان درصد ازدیاد طول افزایش می‌یابد (مثلاً بعد از سیکل ۸) تنها فصل مشترک‌های بسیار کمی مشاهده