

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

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

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد- گرایش شناسایی و انتخاب مواد فلزی

علی مهدی کریمی

استاد راهنما
دکتر محمدرضا طرقي نژاد

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



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته شناسایی و انتخاب مواد آقای علی مهدی کریمی
تحت عنوان

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

در تاریخ ۱۳۹۳/۰۶/۲۵ توسط کمیته زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- | | |
|------------------------|-------------------------------|
| دکتر محمدرضا طرقی نژاد | ۱- استاد راهنمای پایان نامه |
| دکتر حسین ادريس | ۲- استاد داور |
| دکتر احمد رضائیان | ۳- استاد داور |
| دکتر کیوان رئیسی | سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده |

تقدیم به

همسرم

او که در نگاه مهربانش آسمان لاله دارد و
وجود پاکش ارزشمندترین هدیه خداوند است.

پدر و مادر مهربان و فداکارم

که همیشه نیازمند دعای خیرشان بوده و هستم

تشکر و قدردانی

اولین تقدیر و سپاس خود را نثار او می‌کنم که با نوشتن نامش بر روی قلب‌ها دل آرام می‌گیرد و نامیدن نامش بر زبان کلید گشایش هر کاری می‌شود و تنها اوست که انسان را در انجام امور کمک می‌کند و حمد و ستایش مخصوص اوست که مرا در انجام این پژوهش یاری نمود.

دروود و سپاس قلبی‌ام را تقدیم به روح پاک پدرم می‌کنم که در تمامی مسیر زندگی نورانی بخش راهم و بهترین مشوق تحصیلی‌ام و همراه همیشگی سختی‌هایم بود. همچنین از برادر و مادر مهربانم نیز تشکر فراوان به عمل می‌آورم.

از همسر عزیز، مهربان و دلسوزم نیز که از لحظه آشنایی تحول و انقلابی نو در زندگی‌م بوجود آورد و باعث شیرین نمودن آن شده است نیز تشکر و قدردانی نموده و امیدوارم بتوانم در ادامه راه زندگی، شریکی لایق و شانه‌هایم تکیه‌گاهی امن برایش باشد.

تشکر و سپاس از استاد ارجمند و گرانقدر پروژه، جناب آقای دکتر محمدرضا طرقي‌نژاد که همواره در طول این پژوهش مرا با درایت کامل و بهترین رهنمودها یاری نموده‌اند و از هیچ‌گونه کمکی به من دریغ نورزیده‌اند.

از همکاری کادر دانشکده مهندسی مواد در طول انجام این پژوهش به ویژه مسئول آزمایشگاه خواص مکانیکی جناب آقای مویدی سپاسگذارم.

مراتب امتنان و تشکر خود را از جناب آقایان دکتر ادریس و رضائیان که زحمت بازخوانی و داوری این پایان‌نامه را بر عهده داشتند اعلام می‌دارم.

چکیده

در پژوهش حاضر تأثیر مسیرهای کرنش در فرایند نورد تجمعی پیوندی بر خواص مکانیکی و ریزساختار نمونه‌های نوار آلومینیومی مورد بررسی قرار گرفت. مسیرهای موردنظر در این پژوهش به صورت نورد مستقیم (مسیر A) و نورد تجمعی متقاطع با زاویه‌های چرخش 90° درجه به صورت متوالی در یک جهت (مسیر B_C)، $90^\circ \pm$ درجه (مسیر B_A)، و 180° درجه (مسیر C) می‌باشند. جهت انجام این پژوهش از نوارهای آلومینیومی خالص تجاری با ضخامت ۱ میلی‌متر و در ابعاد 15×5 سانتی‌متر برای نورد مستقیم و 180° درجه و 10×10 سانتی‌متر برای چرخش‌های 90° درجه استفاده گردید. بررسی‌های صورت گرفته در مورد خواص مکانیکی با استفاده از دستگاه سختی‌سنجی و آزمون کشش مسیرها نشان داد که سختی و استحکام کششی در این فرایندها با افزایش تعداد سیکل، به دلیل افزایش دانسیته نابجایی‌ها و ریزتر شدن دانه‌ها، افزایش یافته است؛ با این تفاوت که رشد افزایش سختی و استحکام در مسیر نورد با زاویه چرخش 180° درجه به علت ناهمسانگردی و دانسیته نابجایی بالاتر، بیشترین مقدار و در مسیر $90^\circ \pm$ درجه به سبب اثر باوشینگر، ناهمسانگردی و دانسیته نابجایی کمتر، کمترین مقدار را به خود اختصاص دادند. سختی پس از ۸ سیکل نسبت به نمونه آئیل شده در مسیرهای A، C، B_C و B_A به ترتیب $2/63$ ، $2/56$ و $2/51$ برابر گزارش شد. با اعمال اولین سیکل فرایندها، استحکام تسلیم و کششی به شدت افزایش یافته ولی در سیکل‌های بعدی نرخ افزایش استحکام کاهش پیدا کرد. همچنین استحکام پس از ۸ سیکل نسبت به نمونه آئیل شده در مسیرهای A، C، B_C و B_A به ترتیب $2/83$ ، $2/90$ ، $2/73$ و $2/70$ برابر گزارش شد. درصد ازدیاد طول نیز با اولین سیکل شدیداً کاهش یافت ولی در سیکل‌های بعدی افزایش پیدا کرد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مسیرهای مختلف و آنالیز آن‌ها توسط نرم‌افزار پردازش تصویر نشان داد که با افزایش تعداد سیکل در تمامی مسیرها، دیپل‌های هم محور و کم عمق تری تشکیل شده است که نشان دهنده انعطاف‌پذیری و نرمی بیشتر نمونه‌ها می‌باشد و همچنین میانگین قطر دیپل‌ها در مسیر C بیشترین و در مسیر B_A کمترین مقدار می‌باشد. از نتایج آزمایشات صورت گرفته مسیر C به عنوان بهترین مسیر از لحاظ خواص مکانیکی انتخاب گردید.

کلمات کلیدی: آلومینیوم خالص تجاری، تغییر شکل پلاستیک شدید، فرایند نورد تجمعی پیوندی، فرایند اتصال نورد تجمعی متقاطع، اثر باوشینگر، خواص مکانیکی و ریزساختار

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	هشت
فهرست اشکال	ده
فهرست جداول	سیزده
چکیده	۱
فصل اول: مقدمه	۲
فصل دوم: مروری بر مطالب	۴
۱-۲ تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) و فرایندهای آن	۴
۱-۱-۲ فرایندهای SPD	۵
۲-۱-۲ خواص و کاربردهای SPD	۵
۲-۲ فرایند نورد تجمعی پیوندی ARB	۵
۱-۲-۲ نورد تجمعی پیوندی (ARB) در مورد آلومینیوم خالص تجاری	۸
۲-۲-۲ نورد تجمعی پیوندی آلیاژهای آلومینیوم	۱۰
۳-۲-۲ ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت لایه ای Mg/Al ساخته شده توسط ARB	۱۲
۴-۲-۲ اثر ذرات روی تحول ریزساختار و خواص مکانیکی آلومینیوم در طول فرایند ARB	۱۶
۵-۲-۲ بررسی اثر فرایند آنیل بر استحکام و انعطاف پذیری آلومینیوم خالص تجاری توسط ARB	۱۸
۳-۲ نورد تجمعی متقاطع	۱۹
۱-۳-۲ اصلاح و تصفیه دانه و بهبود خواص مکانیکی توسط نورد تجمعی متقاطع	۲۱
۲-۳-۲ اثر زاویه نورد متقاطع روی ریزساختار و خواص مکانیکی	۲۳
۳-۳-۲ کامپوزیت نانو ساختار استحکام بالای تولید شده توسط اتصال نورد تجمعی متقاطع	۲۵
۴-۲ ناهمسانگردی در فرایندهای نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی متقاطع	۲۹
۵-۲ جمع بندی و برنامه پژوهشی حاضر	۳۰
فصل سوم: مواد و روش تحقیق	۳۱
۱-۳ مواد آزمایش	۳۱
۲-۳ عملیات حرارتی	۳۱

۳۲	..... فرایند نورد تجمعی پیوندی با چرخش های متفاوت
۳۲	..... مسیره های کرنش انتخاب شده برای انجام فرایند
۳۳	..... ۵-۳ آزمون سختی
۳۳	..... ۶-۳ آزمون کشش
۳۴	..... ۷-۳ مطالعات ریزساختاری و بررسی سطوح شکست
۳۴	..... ۸-۳ محاسبه پارامترهای ریزساختاری با استفاده از روش ریت ولد
۳۶	..... فصل چهارم: نتایج و بحث
۳۶	..... ۱-۴ ریزساختار
۳۶	..... ۱-۱-۴ تصاویر متالوگرافی توسط میکروسکوپ نوری
۴۰	..... ۲-۴ خواص مکانیکی
۴۰	..... ۱-۲-۴ سختی
۴۶	..... ۲-۲-۴ استحکام کششی
۵۱	..... ۳-۲-۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطوح شکست
۵۷	..... ۴-۴ جمع بندی
۵۹	..... فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۵۹	..... ۱-۵ نتیجه گیری
۶۱	..... ۳-۵ پیشنهادات
۶۲	..... مراجع

<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
شکل ۱-۲ کاربردهای SPD در صنایع پزشکی، نظامی و خودرو.....	۶
شکل ۲-۲ تصویری از فرایند ARB.....	۷
شکل ۳-۲ اشکال قطبی مربوط به آلومینیوم با خلوص ۹۹/۸ درصد در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد.....	۹
شکل ۴-۲ تغییرات استحکام کششی آلومینیوم ۱۱۰۰ را با تعداد سیکل ARB در دمای ۴۷۳ درجه کلونین.....	۱۱
شکل ۵-۲ منحنی تنش - کرنش نمونه آلومینیومی با خلوص ۹۹/۸ نورد سرد.....	۱۱
شکل ۶-۲ ریزساختار میکروسکوپ نوری ورق منیزیم خالص اولیه.....	۱۳
شکل ۷-۲ تصویر SEM بخش متقاطع طولی کامپوزیت Mg/Al ARB شده.....	۱۴
شکل ۸-۲ ریزساختار نوری کامپوزیت Mg/Al بعد از ۳ سیکل فرایند ARB.....	۱۴
شکل ۹-۲ میکروسختی لایه‌های آلومینیوم و منیزیم با افزایش سیکل‌های ARB.....	۱۵
شکل ۱۰-۲ منحنی تنش - کرنش مهندسی مواد اولیه و کامپوزیت Mg/Al در طول جهت نورد.....	۱۵
شکل ۱۱-۲ تصاویر شکست کامپوزیت Mg/Al بعد از سومین سیکل.....	۱۶
شکل ۱۲-۲ تصویر SEM از ریزساختار کامپوزیت تولید شده توسط فرایند ARB در بزرگنمایی بالا.....	۱۷
شکل ۱۳-۲ تغییرات سختی در راستای ضخامت نمونه‌های آلومینیوم خالص تجاری ARB شده.....	۱۸
شکل ۱۴-۲ نمودار تنش مهندسی - کرنش مهندسی نمونه‌های آلومینیوم خالص تجاری ARB.....	۲۰
شکل ۱۵-۲ تصویری از فرایند نورد تجمعی متقاطع.....	۲۱
شکل ۱۶-۲ نقشه‌های تصویر جهت‌گیری (OIMS).....	۲۲
شکل ۱۷-۲ کرنش‌های موثر در امتداد لایه‌ها.....	۲۳
شکل ۱۸-۲ متوسط اندازه دانه اندازه‌گیری شده با توجه به مقادیر مختلف زاویه نورد متقاطع.....	۲۴
شکل ۱۹-۲ تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار کامپوزیت تولید شده بعد از اولین سیکل توسط فرایند CRAR.....	۲۶

- شکل ۲-۲۰ ریزساختار کامپوزیت تولید شده از فرایند CRARB در مقایسه با فرایند ARB در هشتمین سیکل..... ۲۷
- شکل ۲-۲۱ استحکام کششی و سختی نمونه‌های کامپوزیت و آلومینیومی تولید شده توسط فرایند CRARB..... ۲۸
- شکل ۲-۲۲ درصد ازدیاد طول نمونه‌های کامپوزیت و آلومینیومی تولید شده توسط فرایند ARB..... ۲۸
- شکل ۲-۲۳ منحنی تنش- کرنش مهندسی کامپوزیت Al- 8vol% B4C..... ۲۹
- شکل ۴-۱ تصاویر متالوگرافی از مقطع نمونه در مسیر A و C از سیکل‌های مختلف..... ۳۸
- شکل ۴-۲ تصاویر متالوگرافی از مقطع نمونه در مسیر B_C و B_A از سیکل‌های مختلف..... ۳۹
- شکل ۴-۳ مقدار فصل مشترک قابل رویت بر حسب تعداد سیکل اعمالی برای مسیرهای مختلف..... ۴۰
- شکل ۴-۴ ماکروسختی مربوط به مسیرهای A و C، B_C و B_A تحت بار اعمالی ۱۰ کیلوگرم..... ۴۰
- شکل ۴-۵ میکروسختی مربوط به مسیر A تحت بار اعمالی ۵۰ گرم و مدت زمان ۱۰ ثانیه..... ۴۱
- شکل ۴-۶ میکروسختی مربوط به مسیر C تحت بار اعمالی ۵۰ گرم و مدت زمان ۱۰ ثانیه..... ۴۱
- شکل ۴-۷ میکروسختی مربوط به مسیر B_C تحت بار اعمالی ۵۰ گرم و مدت زمان ۱۰ ثانیه..... ۴۲
- شکل ۴-۸ میکروسختی مربوط به مسیر B_A تحت بار اعمالی ۵۰ گرم و مدت زمان ۱۰ ثانیه..... ۴۲
- شکل ۴-۹ دانسیته نابجایی‌ها نسبت به تعداد سیکل فرایند طبق روش نیکس-گائو..... ۴۴
- شکل ۴-۱۰ تغییرات استحکام کششی برای مسیرهای A، C، B_C و B_A بر حسب تعداد سیکل نورد..... ۴۷
- شکل ۴-۱۱ تغییرات میزان درصد ازدیاد طول برای مسیرهای A، C، B_C و B_A بر حسب تعداد سیکل نورد..... ۴۷
- شکل ۴-۱۲ تغییرات استحکام تسلیم و کششی و کرنش شکست نمونه‌ها تحت نورد تجمعی پیوندی متقاطع..... ۴۸
- شکل ۴-۱۳ تصویر میکروسکوپ نوری کامپوزیت تولید شده به روش CRARB..... ۴۹
- شکل ۴-۱۴ نمودار تنش-کرنش مهندسی کامپوزیت AL/B₄C تولید شده به روش ARB و CRARB..... ۴۹
- شکل ۴-۱۵ استحکام کششی کامپوزیت AL/B₄C به روش نورد تجمعی پیوندی..... ۵۰
- شکل ۴-۱۶ سطوح شکست نوارهای آلومینیوم (مسیر A)..... ۵۲
- شکل ۴-۱۷ سطوح شکست نوارهای آلومینیوم را برای مسیر C..... ۵۳

شکل ۴-۱۸ سطوح شکست نوارهای آلومینیوم را برای مسیر B_C ۵۴

شکل ۴-۱۹ سطوح شکست نوارهای آلومینیوم را برای مسیر B_A ۵۵

شکل ۴-۲۰ میانگین قطر دیمپل‌ها در مسیرهای متفاوت A ، C ، B_C و B_A ۵۶

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲ خصوصیات کششی آلومینیوم با خلوص ۹۹/۸ درصد طی فرایند ARB	۸
جدول ۲-۲ نتایج آزمون‌های کشش انجام شده با محورهای کششی صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد	۲۵
جدول ۱-۳ مشخصات نوارهای آلومینیومی آنیل شده مورد استفاده	۳۱
جدول ۲-۳ الگوی مسیرها برای نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی متقاطع	۳۳
جدول ۳-۳ نقشه و اندازه نمونه آماده شده جهت آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E-8	۳۴
جدول ۱-۴ اندازه‌گیری خواص مکانیکی در مسیرهای متفاوت A، C، B _C و B _A	۵۷

فصل اول

مقدمه

مواد فوق ریزدانه (UFG)^۱ که اندازه دانه آن‌ها کمتر از یک میکرون باشد خواص مکانیکی ویژه‌ای دارند. تغییر شکل پلاستیکی شدید (SPD)^۲ یک فرایند مناسب برای تولید مواد حجمی با اندازه دانه‌ی زیر میکرون می‌باشد. قبل از تغییر شکل پلاستیکی شدید، ریزدانه شدن مواد فلزی از طریق فرایندهای پلاستیکی متداول و آنیل انجام می‌گرفت که آنیل منجر به تبلور مجدد از طریق جوانه‌زنی و رشد (تبلور مجدد غیر پیوسته) می‌شد. اندازه دانه به دست آمده از این روش حداکثر ۱۰ میکرون می‌باشد.

هم اکنون کرنش‌های پلاستیکی بسیار بزرگی در فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید استفاده می‌شود تا ریز ساختارهایی با دانه‌های بسیار ریز در مواد به شدت تغییر شکل یافته تشکیل گردد. فرایندهای ویژه‌ای مانند پرسکاری در کانال زاویه‌ای با مقطع یکسان (ECAP)^۳، متراکم کردن و اکستروژن سیکلی (CEC)^۴ و پیچش در فشار بالا (HPT)^۵ برخی از فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید می‌باشند و در مورد مواد مختلف موفق بوده‌اند. ویژگی مشترک این فرایندها ثابت باقی ماندن ابعاد حین فرایند می‌باشد که در نتیجه آن اعمال کرنش‌های بسیار بالا بر ماده امکان پذیر است. ویژگی دیگر این فرایندها افزایش استحکام مواد بدون افزودن عناصر آلیاژی یا ذرات سرامیکی می‌باشد. البته در این فرایندها میزان تولید نسبتاً پایین بوده و در اغلب موارد استفاده از ماشین‌های شکل‌دهی با ظرفیت بار بالا و قالب‌های گران‌قیمت ضروری است.

¹ Ultra-fine Grained Material

² Severe Plastic Deformation

³ Equal channel angular pressing

⁴ Cyclic Extrusion Compression

⁵ High Pressure Torsion

با توجه به این موارد محققین یک فرایند تغییر شکل پلاستیکی شدید به نام فرایند نورد تجمعی (ARB)^۱ را برای تولید مواد با دانه‌های بسیار ریز ابداع کرده‌اند. در این فرایند ابتدا سطح دو ورق فلزی با ابعاد یکسان برسکاری و چربی‌زدایی می‌شود. سپس این دو ورق روی هم قرار گرفته و نورد با کاهش ضخامت ۵۰ درصد انجام می‌گیرد. پس از آن ورق از راستای طولی به دو قسمت مساوی برش داده می‌شود. این مراحل تا چندین سیکل تکرار می‌گردد. از آنجایی که ضخامت ورق حین فرایند ثابت است می‌توان فرایند را تا کرنش بالا جهت رسیدن به ورق‌هایی با اندازه دانه‌ی بسیار ریز و استحکام بالا تکرار کرد.

یکی دیگر از فرایندهایی که به وسیله آن می‌توان خواص ورق نورد شده را بهبود بخشید نورد تجمعی پیوندی متقاطع (CRARB)^۲ می‌باشد. در این فرایند ورق‌های نورد شده در سیکل اول قبل از نورد در سیکل بعد چرخیده می‌شوند. تا کنون تحقیقی بر روی زاویه‌های چرخش اشاره شده در مورد آلومینیوم خالص صورت نگرفته است؛ اما بر روی زاویه‌های چرخش در مورد آلومینیوم آلیاژی تحقیقاتی صورت گرفته است.

در پژوهش حاضر از آلومینیوم خالص تجاری به صورت ورق به عنوان ماده اولیه برای فرایندهای نورد تجمعی پیوندی و نورد تجمعی متقاطع استفاده می‌شود. هدف از انجام این پژوهش بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیومی تولید شده به روش نورد تجمعی پیوندی و بررسی مسیرهای مختلف کرنش می‌باشد که این مورد در مسیرهای کرنش مختلف بررسی شده است.

بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. همچنین تغییرات خواص مکانیکی شامل سختی، استحکام و درصد ازدیاد طول نیز در سیکل‌های مختلف و در دمای محیط صورت گرفته است. بررسی فصل مشترک‌ها و همین‌طور مقدار فصل مشترک‌ها به ترتیب توسط میکروسکوپ نوری و نرم‌افزار پردازش تصویر مورد بررسی قرار گرفتند. سطح شکست نمونه‌ها بعد از انجام تست کشش در فرایندهای مختلف توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی در بزرگنمایی‌های مختلف انجام پذیرفت و مقدار قطر دیپل‌ها در سیکل‌های مختلف فرایندها توسط نرم‌افزار پردازش تصویر مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. در فصل دوم پایان‌نامه به تغییر شکل پلاستیکی شدید (SPD) و معرفی فرایندهای نورد تجمعی پیوندی و نورد متقاطع و خواص مواد تولید شده به این روش‌ها اشاره شده است. در فصل سوم نیز مواد به کار گرفته شده و همچنین روش‌ها و تجهیزات مورد استفاده برای انجام این پژوهش تشریح گردیده است. در فصل چهارم نتایج به دست آمده از آزمون‌های مختلف در فرایندهای مختلف به همراه بحث و تحلیل آن‌ها ارائه شده است و در فصل پنجم نتیجه‌گیری کلی از این پژوهش به همراه جمع‌بندی و ارائه پیشنهاداتی جهت انجام پژوهش‌های بعدی ارائه شده است.

¹ Accumulative Roll Bonding

² Cross Rolling ARB

فصل دوم مروری بر مطالب

۲-۱ تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) و فرایندهای آن

فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) به عنوان فرایندهای ساخت فلز که در آن کرنش پلاستیک بسیار بزرگ روی ماده حجمی به منظور ساخت یک فلز فوق العاده دانه ریز (UFG) اعمال می‌شود، تعریف شده است. هدف از فرایندهای SPD، ایجاد دانه‌های فلزی با دانه‌بندی فوق‌العاده ریز، تولید کردن قطعات سبک وزن با استحکام بالا و سازگاری با محیط‌زیست می‌باشد. ویژگی مشترک و منحصر به فرد این فرایندها، ثابت بودن ابعاد و عدم تغییر شکل ظاهری ماده حین فرایند می‌باشد که در نتیجه آن محدودیت در اعمال کرنش از بین می‌رود و دستیابی به کرنش‌های بسیار بالا در ماده به راحتی میسر است. به این ترتیب در اثر اعمال کرنش، امکان اصلاح ریزساختار، کاهش اندازه دانه تا مقیاس نانومتری و بهبود خواص مکانیکی نمونه فلزی فراهم می‌آید، در حالی که شکل نمونه تغییری نکرده است. ویژگی دیگر این فرایندها افزایش استحکام و اصلاح ساختار دانه‌ها بدون اضافه کردن عناصر آلیاژی یا ذرات سرامیکی است [۲۱].

به طور خلاصه مزایای روش تغییر شکل پلاستیک شدید عبارتند از:

- امکان تولید مستقیم قطعات فلزی با ابعاد بزرگ و اندازه دانه‌های نانومتری
- امکان اعمال کرنش‌های شدید پلاستیکی بدون تغییر ابعاد نمونه‌ها
- عدم وجود محدودیت در اعمال کرنش
- امکان تهیه نمونه‌های بسیار دانه ریز با ابعاد مناسب برای انجام آزمون‌های مکانیکی [۲ و ۳].

۱-۱-۲ فرایندهای SPD

- از مهمترین فرایندهای SPD می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- فرایند تغییر شکل پیچشی تحت فشار زیاد (High Pressure Torsion) HPT
- پرسکاری در کانال زاویه‌ای با مقطع یکسان (Equal Channel Angular Pressing) ECAP
- فرایند متراکم کردن و اکستروژن متوالی (Cyclic Extrusion Compression) CEC
- فرایند نورد تجمعی پیوندی (Accumulative Roll Bonding) ARB
- فرایندهای دیگری مثل ^۱RCS، ^۲ECAR، ^۳CCDF و غیره [۱-۴].

۲-۱-۲ خواص و کاربردهای SPD

خواص فرایندهای SPD شامل استحکام، انعطاف‌پذیری و استحکام خستگی بالا می‌باشد. فلزات با دانه‌های فوق‌العاده ریز (UFG) به عنوان یک ماده ساختاری، با توجه به این خواص استفاده می‌شوند. کاربردها شامل:

- پیچ و مهره‌ها که با آلیاژهای تیتانیوم توسط فرایند ECAP تولید می‌شوند
- در صنایع فضایی و خودرو مثل سرسیلندر خودروها
- در کاربردهای پزشکی مثل ایمپلنت‌ها و پیچ و شبکه‌های مورد استفاده در ارتوپدی
- در صنایع دفاعی مثل زره پوش و وسایل جنگی (زره سبک‌تر برای خودروهای نظامی برای کاهش مصرف سوخت، سرعت بالاتر، قدرت مانور بهتر، محدوده عملیات طولانی‌تر و حمل و نقل وسایل نقلیه از راه دور، بسیار مهم است) [۱ و ۳].

شکل ۱-۲ نمونه‌هایی از کاربردهای تغییر شکل پلاستیکی شدید (SPD) در صنایع مختلف را نشان می‌دهد.

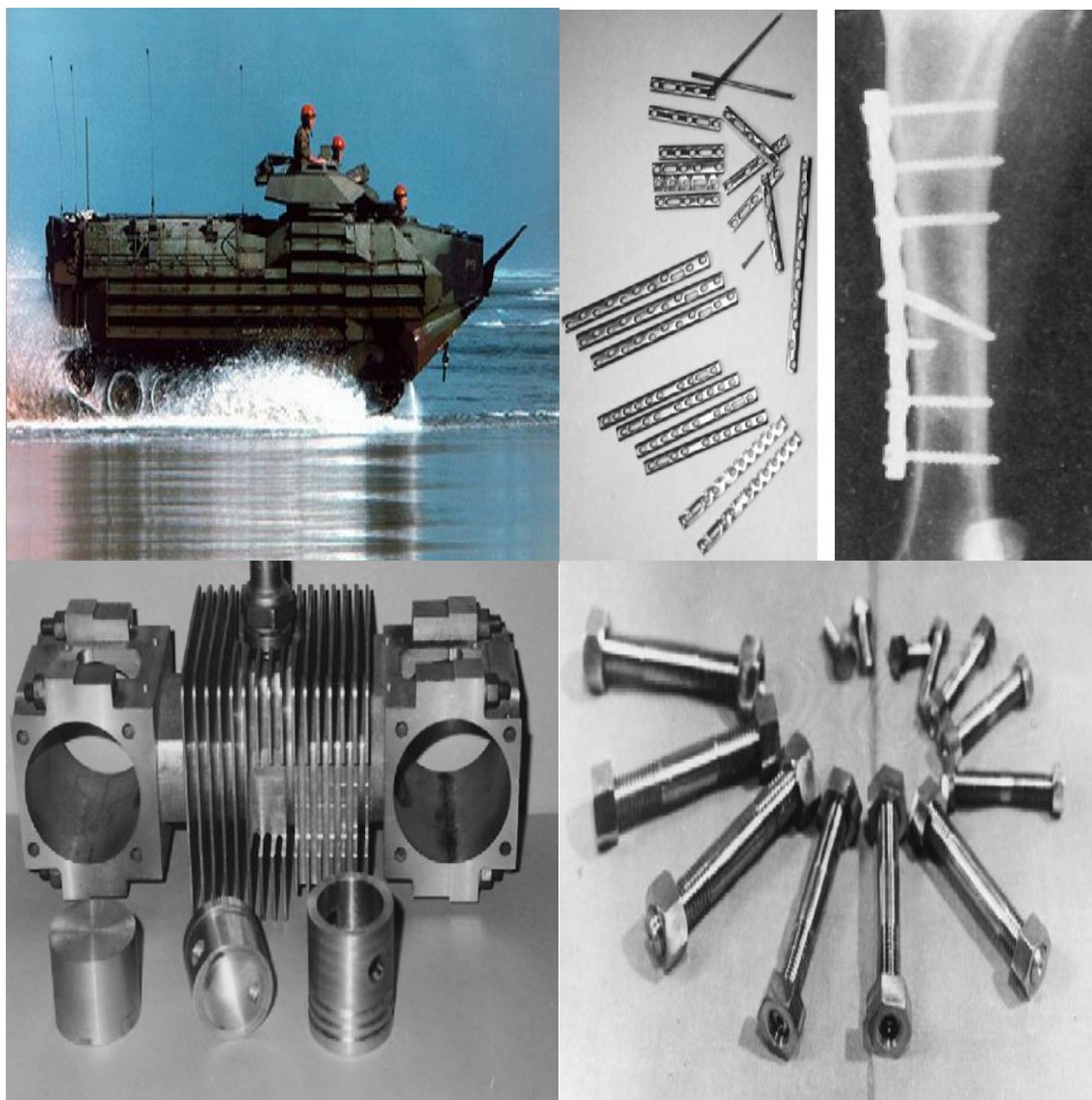
۲-۲ فرایند نورد تجمعی پیوندی ARB

فرایند ARB به عنوان یک روش اعمال تغییر شکل پلاستیکی شدید و دستیابی به ساختاری با اندازه دانه نانومتری توسط Saito و همکارانش [۱] معرفی شد. اولین مرحله در فرایند ARB مرحله آماده‌سازی سطح دو ورق می‌باشد که معمولاً شامل حذف لایه‌های اکسیدی سطح با برس زنی و ایجاد یک لایه کارسخت شده در سطح ورق است. برای دستیابی به یک اتصال نوردی کامل بین دو ورق، تمیز کردن و چربی زدایی کامل سطوح دو ورق قبل از فرایند نورد ضروری است. پس از آماده‌سازی، دو ورق طوری روی هم قرار می‌گیرند که سطوح آماده شده آنها بعد از تمیزکاری و برس زدن در تماس با هم باشند و برای جلوگیری از لغزش دو ورق روی هم، از اتصال به وسیله جوش نقطه‌ای، پرچ و یا سوراخکاری و بستن ورق‌ها به وسیله سیم استفاده می‌شود. مهمترین مرحله در فرایند ARB نورد همزمان دو ورق می‌باشد. گاهی برای بهتر شدن اتصال بین دو ورق، فرایند نورد در دمای بالا ولی زیر دمای تبلور مجدد انجام می‌شود. معمولاً میزان کاهش ضخامت اعمال شده در نمونه ۵۰ درصد است که در نتیجه آن ورق حاصله ضخامتی برابر ضخامت ورق اولیه خواهد داشت. سپس این ورق از راستای طولی به دو قسمت بریده می‌شود و مراحل کار مجدداً تکرار می‌شوند [۱-۴].

¹ Repetitive Conugation and Straightening

² Equal Channel Angular Rolling

³ Cyclic Closed-Die Forging



شکل ۱-۲ کاربردهای SPD در صنایع پزشکی، نظامی و خودرو [۱].

در فرایندهای ARB تحول ریزساختار و افزایش عدم تطابق مرزدانه‌ها، بسیار سریع‌تر از هنگامیست که توسط نورده معمولی صورت می‌گیرد. تنش تسلیم فلزات چند بلور بستگی به قطر دانه (d) دارد که به وسیله معادله هال-پچ^۱ ارائه شده است:

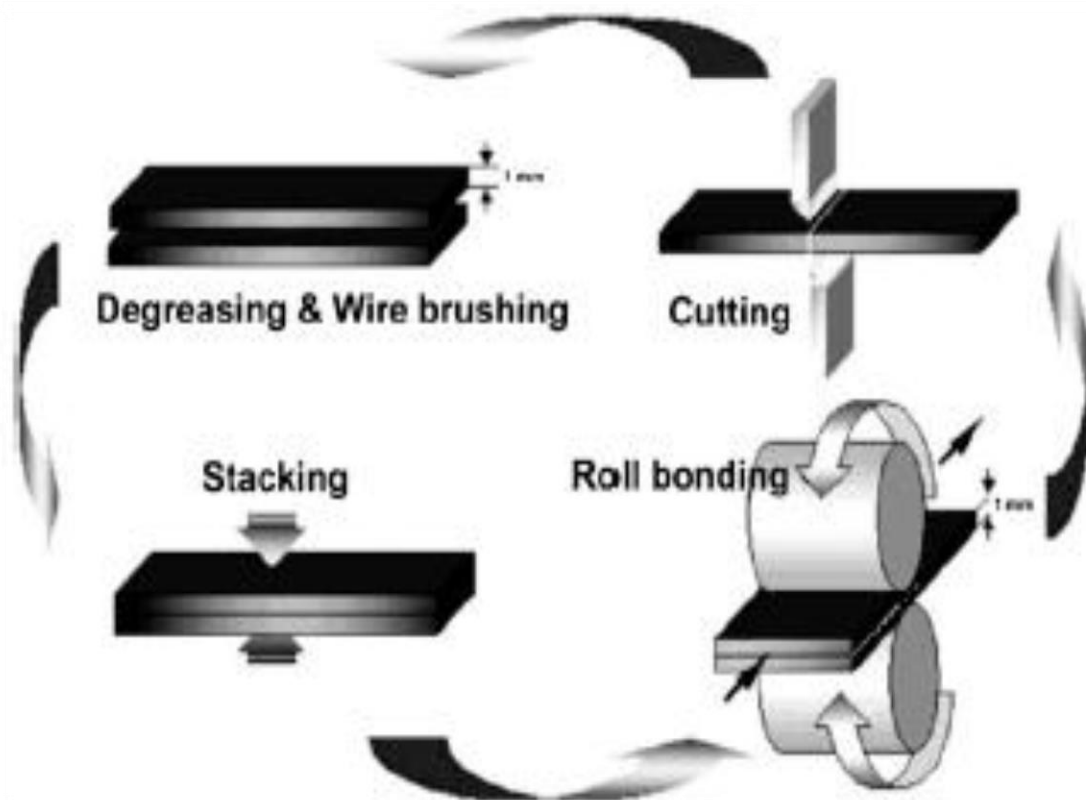
$$\sigma_y = \sigma_0 + A d^{-1/2} \quad \text{معادله (۱-۲):}$$

σ_0 تنش اصطکاکی و A یک ثابت می‌باشد. معادله (۱-۲) نشان می‌دهد که تنش تسلیم با کاهش جذر اندازه دانه، افزایش می‌یابد. کاهش اندازه دانه منجر به یک استحکام کششی بالاتر بدون کاهش چقرمگی می‌شود [۵۱].

¹ - Hall-Petch

عدم تغییر ابعاد نمونه حین اعمال کرنش در تمام فرایندهای تغییرشکل شدید پلاستیکی باعث ایجاد تغییرات ریزساختاری عمده‌ای در نمونه‌ها می‌شود. در بیشتر موارد گزارش شده است [۶] که مکانیزم‌های مختلفی در کاهش اندازه دانه‌ها و تغییرات ریزساختاری حین فرایندهای مذکور موثر می‌باشند. در مورد فرایندهای ECAP و ARB دیده شده است [۲] که فشرده شدن دانه‌ها به شکل دانه‌های پهن شده در کرنش‌های نسبتاً کم، منجر به ایجاد ساختار لایه‌ای شکل از دانه‌های کشیده شده می‌شود. تبدیل مرزهای فرعی با زاویه کوچک به مرزهایی با زاویه بزرگ‌تر، مکانیزم حاکم در کرنش‌های متوسط است که یک ساختار لایه‌ای بسیار ریز در نمونه‌ها ایجاد می‌کند. مکانیزم بعدی که در کرنش‌های بالا باعث شکل‌گیری ریزساختاری از دانه‌های نانومتری می‌شود، شکسته شدن دانه‌های کشیده شده و تبدیل آن‌ها به دانه‌های هم‌محورتر و بسیار ریز است. شکل ۲-۲۰ تصویری از فرایند نورد تجمعی را نشان می‌دهد.

تحول خصوصیات مکانیکی، ریزساختار و بافت، به تعداد پاس‌ها وابسته می‌باشند. به طور کلی روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید مانند ARB یا ECAP می‌توانند نمونه‌های حجمی و نسبتاً با ابعاد زیاد و بدون خلل و فرج را در مقایسه با روش‌های متالورژی پودر^۱ (PM) تولید کنند که در آن‌ها حذف کردن خلل و فرج مشکل است. فرض کنید ضخامت اولیه نوار t_0 باشد که در هر سیکل ۵۰ درصد کاهش سطح مقطع روی آن صورت می‌گیرد. ضخامت t_n از لایه اول بعد از n سیکل، می‌تواند طبق فرمول زیر محاسبه گردد: [۷]



شکل ۲-۲ تصویری از فرایند ARB [۴].

¹ - Powder Metallurgy

$$t_n = t_0 / 2^n \quad \text{معادله (۲-۲):}$$

کاهش سطح مقطع کل Z_n بعد از n سیکل برابر است با:

$$Z_n = 1 - t/t_0 = 1 - 1/2^n \quad \text{معادله (۳-۲):}$$

و به همین ترتیب کرنش پلاستیکی برابر است با:

$$\varepsilon_n = 0.8n \quad \text{معادله (۴-۲):}$$

نکته قابل ذکر این است که تعداد لایه‌ها در نمونه n سیکل ARB شده، 2^n می‌باشد [۷].

تغییر جهت‌گیری‌های کریستالوگرافی توسط روش اشکال قطبی^۱ مورد مطالعه قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری اشکال قطبی در وسط لایه نوار نورد شده با استفاده از پراش سنچ پرتو ایکس و تابش مشخصه $\text{CoK}\alpha$ به دست می‌آید. تابع توزیع جهت‌گیری^۲ که دانسیته احتمالی دانه‌ها را بیان می‌کند برای نمونه فرایند محاسبه می‌شود [۷].

۲-۲-۱ نورد تجمعی پیوندی (ARB) در مورد آلومینیوم خالص تجاری

خصوصیات کششی آلومینیوم با خلوص ۹۹/۸ درصد طی فرایند ARB در جدول ۲-۱ با توجه به دما و تعداد پاس‌ها آورده شده است. به‌طور مثال A150-1 بیانگر دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد و ۱ پاس نورد می‌باشد و r نیز بیانگر تبلور مجدد می‌باشد. همچنین اشکال قطبی مربوط به آلومینیوم خالص در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد و در ۵ و ۱۰ سیکل نورد در شکل ۲-۳ نشان داده شده است [۴].

جدول ۲-۱ خصوصیات کششی آلومینیوم با خلوص ۹۹/۸ درصد طی فرایند ARB [۴]

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

¹ - Pole Figures

² - Orientation Distribution Function