



مطالعه تجربی اثر فرآیند پرس کاری شیاری محدود بر ورق آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱

معین غلامی^۱، سید احسان افتخاری شهری^{۲*}، مسعود رخس خورشید^۲

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: e.eftekhari@birjandut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۷ دی ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۴ بهمن ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

ورق آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱

فرآیند پرس کاری شیاری محدود

خواص مکانیکی

ریزساختار

چکیده

در راستای نیاز صنایع مختلف به موادی با نسبت استحکام به وزن بالا، اهمیت استفاده از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید جایگاه ویژه‌ای یافته است. فرآیند پرس کاری شیاری محدود یکی از مؤثرترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید جهت تولید ورق‌های فلزی با ساختار بسیار ریزدانه محسوب می‌شود. در این تحقیق، به صورت تجربی اثر فرآیند پرس کاری شیاری محدود بر ورق آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ مورد مطالعه قرار گرفته است. لذا در این راستا فرآیند پرس کاری شیاری محدود تا دو پاس کامل به صورت تجربی اجرا شد. پس از انجام فرآیند، به منظور ارزیابی خواص مکانیکی ورق‌های تغییر شکل یافته، آزمون‌های کشش و میکرو سختی انجام شد و ریزساختار این ورق‌ها به کمک تصاویر میکروسکوپ نوری بررسی شد. نتایج آزمون میکروسختی نشان داد میزان میانگین سختی در پاس اول بر روی سطح ورق و در راستای ضخامت به ترتیب ۴۱/۷ و ۴۸/۹ درصد افزایش یافته است. به طور مشابه، در پاس دوم میزان میانگین سختی سطح ورق و در راستای ضخامت به ترتیب ۵۲/۷ و ۵۸/۹ درصد نسبت به ورق اولیه افزایش یافته است. همچنین، نتایج آزمون کشش نشان داد فرآیند CGP باعث افزایش استحکام تسلیم به میزان ۱۵۰ درصد در پاس دوم شده است. نتایج مطالعات ریزساختاری نیز نشان داد اندازه دانه در طی دو پاس کاهش می‌یابد؛ البته میزان نسبی کاهش اندازه دانه در پاس دوم نسبت به پاس اول کمتر است. علاوه بر این، مشاهده گردید کاهش میانگین اندازه دانه در راستای ضخامت از راستای طولی روی سطح ورق بیشتر است.

Experimental study of the effects of constrained groove pressing process on AA6061 sheet

Moein Gholami¹, Seyyed Ehsan Eftekhari Shahri^{2*}, Masoud Rakhshkhorshid²

1- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

2- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

* Corresponding Author's Email: e.eftekhari@birjandut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 7 January 2024

Accepted: 13 February 2024

Keywords:

Aluminum Alloy 6061 Sheet

Constrained Groove Pressing (CGP)

Mechanical Properties

Microstructure

Abstract

In line with the need of various industries for materials with a high strength-to-weight ratio, the use of severe plastic deformation (SPD) methods has become particularly important. The constrained groove pressing (CGP) process is one of the most effective methods of SPD to produce metal sheets with a very fine grain structure. In this research, the effect of the CGP process on aluminum alloy 6061 sheet has been studied experimentally. Therefore, in this direction, the CGP process was carried out experimentally up to two complete passes. After the process, in order to evaluate the mechanical properties of the deformed sheets, tensile and microhardness tests were performed, and the microstructure of the sheets was studied using optical microscope images. The results showed that the average hardness in the first pass has increased by 41.7% and 48.9% in the direction of length and thickness, respectively. Similarly, in the second pass, the average hardness in the direction of length and thickness increased by 52.7 and 58.9 percent compared to the initial sheet. Also, the tensile test results showed that the CGP process increased the yield strength by 150% in the second pass. The results of microstructural studies showed that the grain size in the CGP process decreases during two passes. Of course, the amount of grain size reduction in the second pass is less than the first pass. In addition, it was observed that the decrease in the average grain size in the thickness direction is greater than in the longitudinal direction.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Gholami M, Eftekhari Shahri SE, Rakhshkhorshid M. Experimental study of the effects of constrained groove pressing process on AA6061 sheet. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 October 23;10(8):49-59. doi: 10.22034/IJME.2024.433980.1895 [In Persian]

۱- مقدمه

ورق‌های آلیاژ آلومینیومی ۶۰۶۱ کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف از جمله کشتی‌سازی دارند. همچنین این آلیاژ قابلیت جوشکاری و اکستروژن دارد و به همین دلیل در ساخت سازه‌هایی با مقاطع مختلف کاربرد فراوانی دارد [۱]. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)^۱ جهت بهبود خواص مواد، از جمله خواص مکانیکی، با تغییر در ریز ساختار مورد توجه قرار گرفته است [۲]. روش SPD یک رویکرد بالا به پایین برای اصلاح دانه‌بندی با هدف تولید فلزات و آلیاژهای با استحکام بالا است [۳]. اصلاح شبکه از طریق فرایندهای SPD منجر به افزایش چگالی نابجایی‌ها و تغییر خواص ماده می‌شود [۴]. فرایندهای مختلفی توسط محققین برای تغییر شکل پلاستیک شدید قطعات حجیم، ورق‌ها و لوله‌ها و دیگر محصولات پیشنهاد شده است؛ از جمله پرس کاری در کانال‌های زاویه‌دار با مقاطع همسان (ECAP)^۲ [۵، ۶]، اکستروژن ترکیبی تجمعی (ACE)^۳ [۷]، اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله [۸]، نورد تجمعی اتصالی (ARB)^۴ [۹] و پرس کاری شیاری محدود (CGP)^۵ [۱۰] برای ریزدانه کردن ورق‌های فلزی.

در فرآیند CGP کرنش پلاستیک بالایی در ورق‌های تغییر شکل یافته ایجاد می‌شود که به صورت غیریکنواخت توزیع شده است [۴]. این فرایند به عنوان یک روش کارآمد برای ساخت ورق‌هایی با دانه‌های اصلاح شده و خواص بهبود یافته مانند سختی، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی معرفی شده است [۱۱]. در تحقیقات پیشین، این فرایند برای فلزات و آلیاژهای آهنی و غیر آهنی مانند آلومینیوم خالص [۱۲]، آلیاژهای آلومینیومی [۱۳، ۱۴]، مس خالص [۱۵، ۱۶]، آلیاژهای مس پایه [۱۷، ۱۸] و نیکل [۱۹] به کار گرفته شده است. با این حال، مطالعات محدودی در خصوص استفاده از فرایند CGP برای آلیاژهای آلومینیوم ۶۰۶۱ انجام شده است. در خصوص تحقیقات انجام‌شده در زمینه اصلاح خواص فلزی با فرایند CGP، خدابخشی و همکاران [۲۰] گزارش دادند که اندازه دانه ورق‌های فولادی کم‌کربن پس از ۴ پاس CGP به ۲۳۰ نانومتر کاهش می‌یابد و کرنش مؤثر ۴/۶۴ در ورق ایجاد می‌شود. دانگ و همکاران [۲۱] با استفاده از روابط رگرسیونی به دست آمده از داده‌های تجربی، نحوه تغییر شکل ورق آلومینیومی با روش CGP را بررسی کردند. خاکباز و کاظمی‌نژاد [۱۴] اثر پرس کاری شیاری بر کار سختی و خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیومی را مطالعه کرده و رابطه‌ای برای تخمین میزان تولید نابجایی از کار سرد ارائه دادند. خدابخشی و همکاران [۲۲] یک روش جدید برای فرآیند پرس کاری شیاری پیشنهاد کردند که با چرخش ۹۰ درجه بین هر دو مرحله از فرآیند، می‌توان کرنش پلاستیک در ورق را به میزان دو برابر افزایش داد. آن‌ها در تحقیق دیگری [۲۳] رابطه بین استحکام و سختی را در روش تغییر شکل شیاری بررسی کردند و نشان دادند یک رابطه خطی بین استحکام تسلیم و استحکام حد نهایی با سختی ویکرز برقرار است. نظری و همکاران [۲۴] با استفاده از روابط پلاستیسیته یک مدل تحلیلی ارائه دادند که می‌تواند با در نظر گرفتن ضریب کارسختی، میزان نیروی شکل‌دهی را در هر مرحله از فرآیند CGP پیش‌بینی کند.

با توجه به اینکه مطالعات محدودی در خصوص تأثیر فرایند CGP بر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ انجام شده است، در پژوهش حاضر، تغییرات خواص مکانیکی این آلیاژ با استفاده از فرایند CGP به صورت تجربی ارزیابی شده است. پس از اجرای فرآیند، جهت مطالعه خواص مکانیکی و متالورژیکی ورق‌های تغییر شکل یافته، آزمون‌های کشش، میکروسختی و متالوگرافی انجام شد. در نهایت مشاهده گردید که اعمال فرآیند CGP باعث اصلاح دانه‌بندی و بهبود خواص مکانیکی نمونه می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- فرایند پرس کاری شیاری محدود

عملکرد فرآیند CGP در مراحل مختلف یک پاس در شکل ۱ به صورت شماتیک و دو بعدی نشان داده شده است. در این فرآیند، چهار مرحله متوالی فشار ورق یک پاس کامل محسوب می‌شود که دو مرحله توسط قالب‌های شیاردار و دو مرحله توسط قالب‌های تخت انجام می‌گیرد [۲۴]. پس از پایان مرحله دوم، قطعه کار به اندازه ۱۸۰ درجه حول محور ضخامت دوران می‌کند، به صورتی که نهایتاً

¹ Severe Plastic Deformation (SPD)

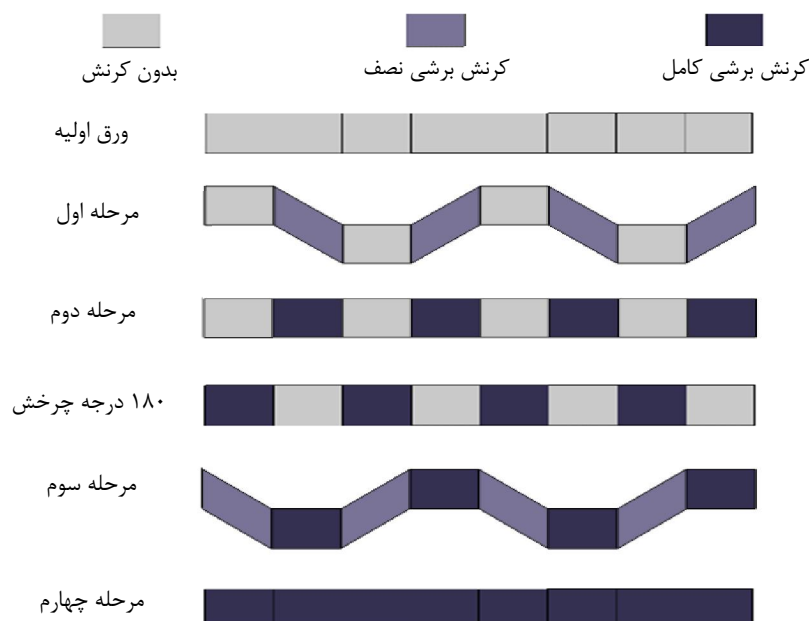
² Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

³ Accumulative Compound Extrusion (ACE)

⁴ Accumulative Roll Bonding (ARB)

⁵ Constrained Groove Pressing (CGP)

تمام ورق تحت کرنش معادل یکسان قرار می‌گیرد. با تکرار مراحل در پاس‌های بالاتر، تا زمانی که ورق بدون ترک تغییر شکل یابد، کرنش پلاستیک در ورق انباشته می‌شود که منجر به ایجاد یک ساختار فوق ریزدانه یا نانومتری در ماده می‌شود.



شکل ۱ شماتیک چهار مرحله مختلف یک پاس از فرآیند CGP و نحوه ایجاد کرنش معادل انباشته‌شده در هر مرحله [۱۰]

۲-۲- آزمایش‌های تجربی

ماده اولیه آزمایش، ورق آلومینیوم AA6061 آنیل شده با ضخامت ۲ میلی‌متر است که به ابعاد ۷۳×۳۰ میلی‌متر برش داده شدند. در جدول ۱ نتایج آزمون کوانتومتری برای تعیین ترکیب شیمیایی عناصر موجود در ورق نشان داده شده است که با مراجع مرتبط مطابقت دارد [۲۵].

جدول ۱ ترکیب شیمیایی عناصر آلیاژی ورق آلومینیومی ۶۰۶۱

المان	Si	FE	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
درصد وزنی	۰/۵۰۷	۰/۴۳۵	۰/۱۲۸	۰/۰۶۴	۰/۹۲۲	۰/۱۶۶	۰/۰۱۹

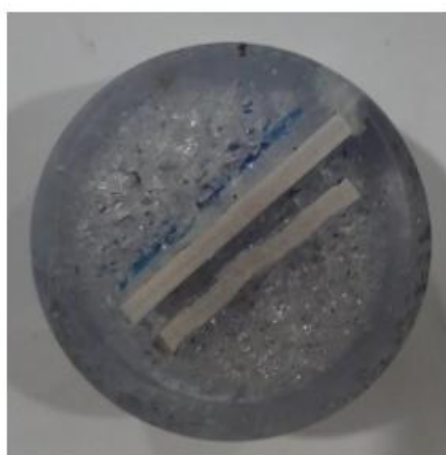
با هدف افزایش شکل‌پذیری، ورق آلومینیوم آلیاژی اولیه آنیل شده است. برای آنیل ورق، نمونه‌های اولیه به مدت ۲/۵ ساعت در دمای ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند و سپس به صورت کنترل شده تا دمای ۲۶۰ درجه و با نرخ ۴۰ درجه سانتی‌گراد در ساعت خنک شدند [۲۶]. از یک جفت قالب برای انجام آزمایش‌های تجربی استفاده شد، یکی قالب برای شیاردار کردن و دیگری برای تخت کردن نمونه‌ها. زاویه شیار قالب‌ها برابر ۴۵ درجه و عرض و عمق شیار برابر با ضخامت ورق به‌اندازه ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. قالب‌ها از جنس فولاد Ck45 سخت‌کاری شده، تهیه شدند و برای ایجاد شیارها از دستگاه برش سیم استفاده شد. برای انجام فرآیند CGP از دستگاه پرس هیدرولیک ۴۰۰ تن استفاده گردید. پیش از قرارگیری ورق در داخل قالب، سطوح تماس توسط روغن ماشین روان کاری شدند. فرآیند CGP تا دو پاس بر روی ورق آلومینیوم اجرا شد و در مرحله سوم از پاس سوم، ترک در نمونه ایجاد شد. در شکل ۲ تغییر شکل ورق در مرحله اول از پاس اول (مرحله ایجاد شیار) نشان داده شده است.



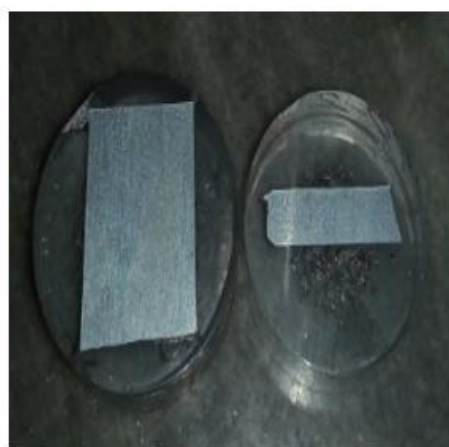
شکل ۲ تغییر شکل ورق در قالب شیاردار

۲-۳- مطالعه ریزساختار

در این تحقیق ریزساختار ورق آلومینیومی بر روی سطح و ضخامت ورق توسط میکروسکوپ نوری ارزیابی شده است. بدین منظور، ابتدا نمونه‌ها از وسط ورق‌ها برش خوردند و پس از برشکاری به ابعاد مناسب، با استفاده از دستگاه مانت گرم بوهرلر و رزین‌های پلی استایرن جهت بررسی‌های میکروسکوپی، مانت شدند. با هدف دستیابی به سطوح یکنواخت و براق، ابتدا نمونه‌ها با سنباده‌های با ۹ درجه مختلف، با شماره‌های ۱۲۰ تا ۲۰۰۰ سنباده زده شدند و در مرحله بعد با استفاده از خمیر الماسه ۰/۲۵ میکرون، سطح نمونه‌ها پولیش شدند. از محلول اچ با مقادیر ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر، ۱۵ میلی‌لیتر HF، ۲۵ میلی‌لیتر HCL، ۱۵ میلی‌لیتر HNO₃ استفاده شده است. در شکل ۳ نمونه‌های مانت و آماده‌سازی شده برای متالوگرافی در دو ناحیه سطح و ضخامت نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳ نمونه‌های مانت شده جهت عکس برداری نوری: (الف) ناحیه سطح نمونه، (ب) ناحیه ضخامت نمونه

۳- نتایج و بحث

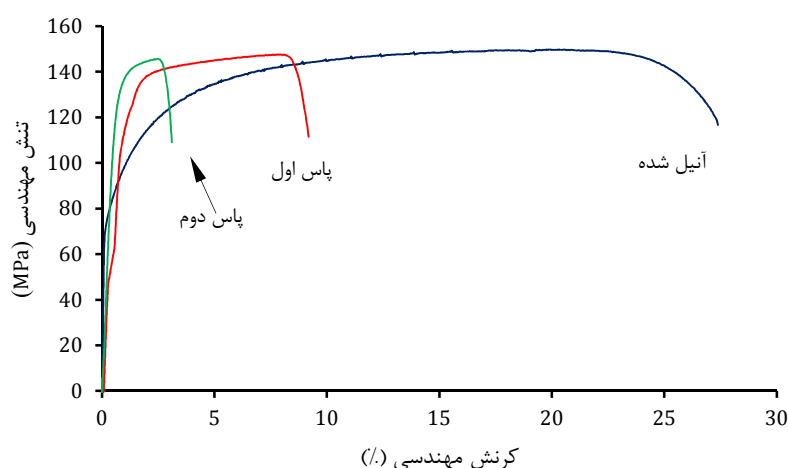
۳-۱- خواص مکانیکی

برای تعیین میزان تأثیر فرآیند CGP بر خواص مکانیکی ورق، از آزمون کشش و آزمون سختی سنجی استفاده شده است. از دستگاه آزمون کشش سنتام ۲۵ تن برای ارزیابی خواص کششی نمونه‌های آلومینیومی استفاده شده است. بدین منظور نمونه‌های ورق اولیه و CGP شده مطابق با استاندارد ASTM E8 Sub Size با دستگاه برش سیمی آماده‌سازی شدند. نمونه آزمون کشش تهیه شده از ورق‌های CGP شده در شکل ۴ نشان داده شده است.



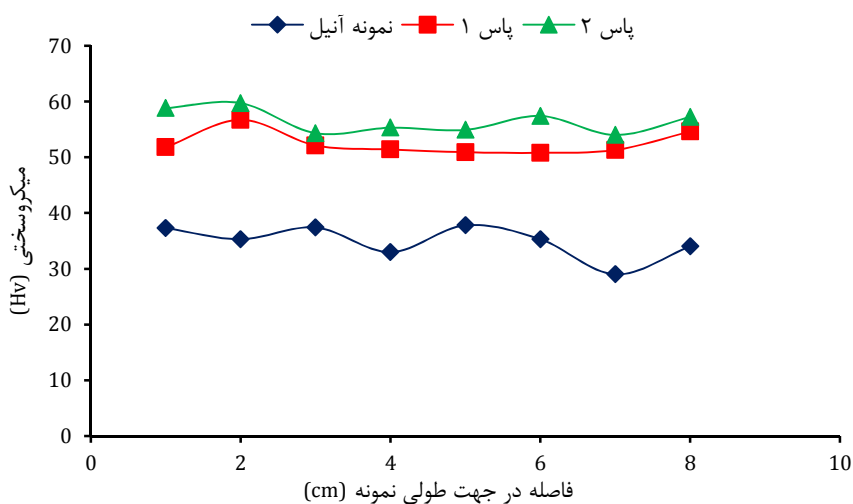
شکل ۴ نمونه‌های آزمون کشش تهیه شده از ورق‌های CGP شده پس از پاس‌های اول و دوم فرآیند

در شکل ۵ منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی نمونه آنیل اولیه و نمونه‌های پس از اعمال فرآیند CGP در دو پاس نشان داده شده است.

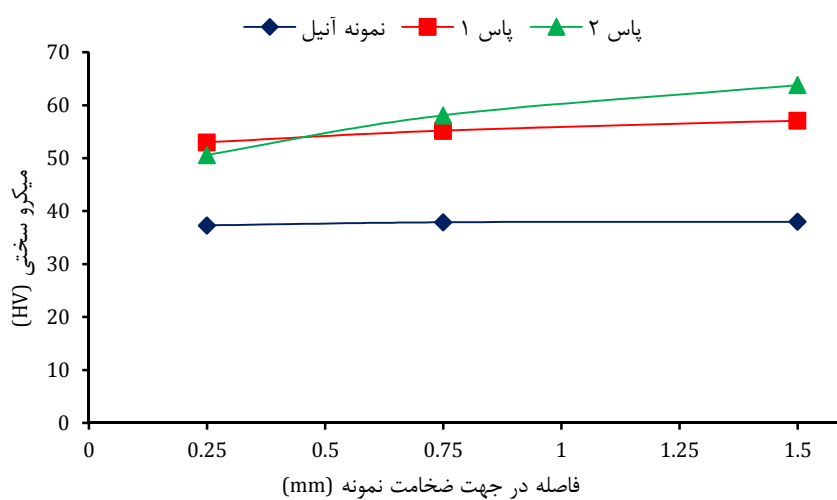


شکل ۵ منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی نمونه آنیل و نمونه‌ها پس از پاس‌های اول و دوم فرآیند CGP

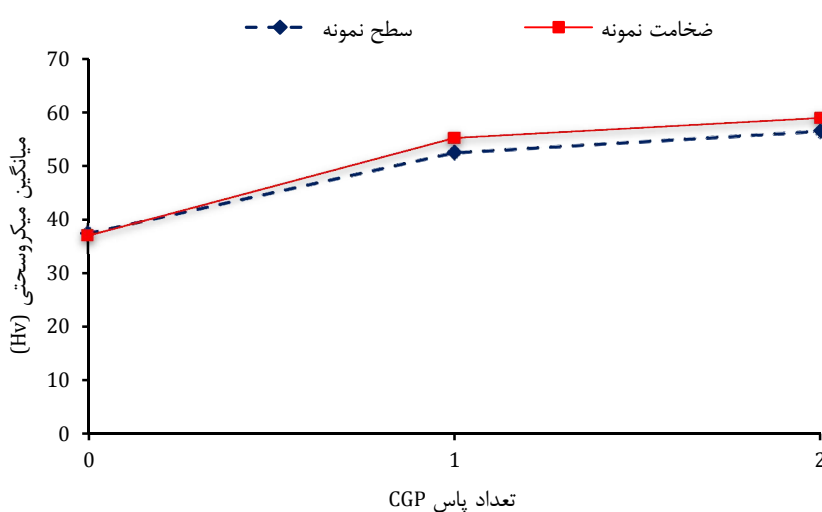
شکل ۵ نشان می‌دهد پس از اعمال فرآیند CGP میزان استحکام تسلیم نمونه افزایش یافته است. مقدار استحکام تسلیم نمونه‌ی آنیل شده ۵۲/۳۰ مگاپاسکال است که با اعمال فرآیند CGP در پاس‌های اول و دوم به ترتیب به مقادیر ۱۱۱ مگاپاسکال و ۱۲۵ مگاپاسکال افزایش یافته است، در حالی که میزان استحکام حد نهایی نمونه اولیه برابر ۱۴۴/۹۰ مگاپاسکال و برای نمونه‌های CGP شده در پاس‌های اول و دوم به ترتیب برابر ۱۴۷/۵۶ و ۱۴۵/۶۴ مگاپاسکال است. بنابراین نتایج نشان می‌دهد اعمال فرآیند پرس کاری در قالب‌های شیاردار مقید در پاس‌های اول و دوم سبب افزایش استحکام تسلیم ماده به ترتیب به میزان ۱۲۲ و ۱۵۰ درصد شده است، در حالی که تأثیر آن بر میزان استحکام حد نهایی ناچیز است. از سوی دیگر نتایج نمودار شکل ۵ نشان می‌دهد فرآیند تغییر شکل پرس کاری در قالب‌های شیاردار مقید، سبب کاهش چشمگیر میزان انعطاف‌پذیری قطعه می‌شود؛ به گونه‌ای که میزان بیشینه کرنش از ۲۷/۳۹ درصد برای نمونه آنیل به میزان ۹/۱۹ و ۳/۱۰ درصد به ترتیب پس از اعمال فرآیند در پاس‌های اول و دوم رسیده است. با توجه به نتایج آزمون کشش، افزایش استحکام تسلیم به ویژه در پاس اول فرآیند CGP ناشی از دو مکانیسم کارسختی و ریزدانه شدن دانه‌ها است [۱۲، ۲۷]. هرگونه انجام کار سرد بر روی مواد باعث تکثیر نابجایی‌ها می‌شود. بنابراین با افزایش کرنش، چگالی نابجایی‌ها افزایش یافته و برخورد آن‌ها با یکدیگر و همچنین با موانع بیشتر می‌شود و در نتیجه برای حرکت نابجایی‌ها با مکانیسم لغزش، تنش بیشتری موردنیاز است. لذا با افزایش تعداد پاس‌های CGP، به دلیل کار سختی ناشی از کار سرد انجام شده، استحکام نمونه افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با اعمال کرنش زیاد در فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید، با شکسته شدن دانه‌های درشت اولیه به واحدهای کوچک‌تر و ایجاد مرز دانه‌های ناشی از نابجایی‌ها، ساختار ریزدانه ایجاد می‌گردد. کاهش اندازه دانه منجر به افزایش استحکام ماده می‌شود. اثر ناشی از مکانیسم ریزدانه شدن دانه‌ها بر استحکام با توجه به رابطه‌ی هال-پچ توجیه می‌شود [۱۵، ۲۸].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶ توزیع سختی در نمونه‌های قبل و بعد از فرآیند CGP در راستای طول بر روی سطح نمونه، (ب) در جهت ضخامت، (ج) میانگین سختی نمونه‌ها در سطح و در راستای ضخامت و در راستای طولی روی سطح نمونه برحسب تعداد پاس فرآیند CGP

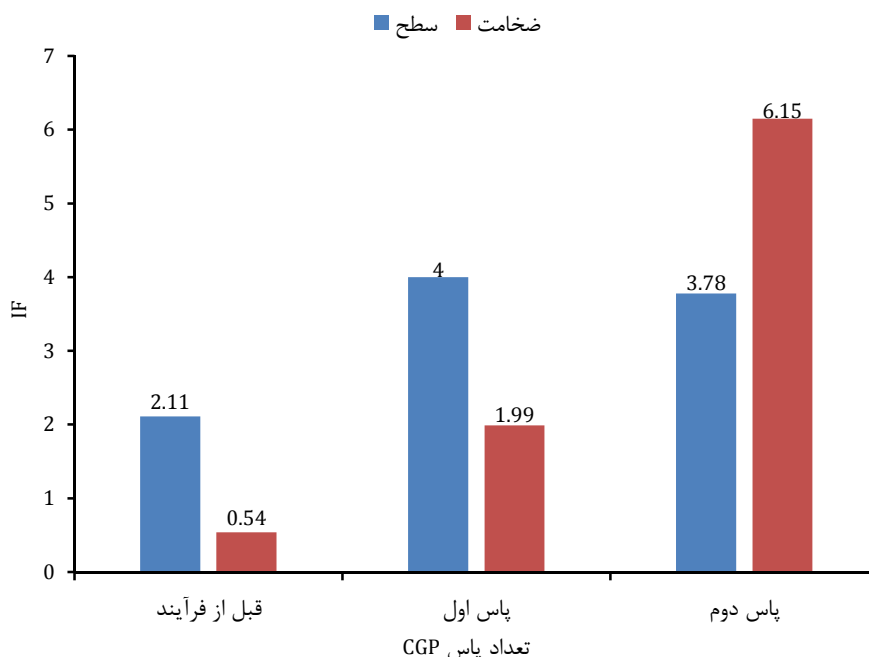
جهت بررسی تأثیر فرآیند CGP بر روی سختی نمونه‌ها قبل و پس از انجام فرآیند CGP، از آزمون میکروسختی به روش ویکرز بهره گرفته شده است. همچنین با بررسی توزیع سختی در نقاط مشخصی بر روی سطح در راستای طولی و راستای ضخامت، میزان یکنواختی سختی در جهات مختلف بررسی شده است. آزمون میکرو سختی با استفاده از فرو رونده هرمی الماسی با نیروی ۳ نیوتن و زمان اعمال نیروی ۱۰ ثانیه انجام شده است.

در شکل ۶ سختی نمونه آنیل شده و نمونه‌های CGP شده مقایسه شده است. در شکل ۶ الف توزیع سختی بر روی سطح در راستای طول نمونه‌های آلومینیوم با فواصل ۱ سانتی‌متر و در شکل ۶ ب در سه نقطه در راستای ضخامت نمونه نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پاس فرایند، میزان سختی در جهت طول و ضخامت به صورت کلی افزایش یافته است، اما نحوه توزیع سختی متفاوت است. با میانگین‌گیری سختی در نقاط اندازه‌گیری شده در دو جهت (طول و ضخامت) میزان میانگین سختی در هر پاس محاسبه و در شکل ۶ ج نشان داده شده است.

با توجه به نتایج گزارش شده در شکل ۶ ج میانگین سختی در جهت طولی و ضخامت سطح نمونه آنیل اولیه برابر ۳۷ ویکرز بوده است. پس از پاس اول فرآیند، میانگین سختی در جهت طولی به ۵۲/۴۵ و در جهت ضخامت به ۵۵/۱ ویکرز افزایش یافته است. در پاس دوم فرآیند، میانگین سختی در جهت طول و ضخامت به ترتیب مقادیر ۵۶/۵ و ۵۸/۸ ویکرز حاصل شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد روند تغییرات سختی همانند استحکام است که در پاس اول فرآیند CGP افزایش زیادی داشته و در پاس دوم نرخ تغییرات سختی کاهش یافته است.

مشابه با استحکام، افزایش سختی پس از اعمال فرایند CGP با توجه به تئوری‌های کار سختی و ریزدانه شدن ساختار که در بخش قبل بیان شد قابل توجیه است. از سوی دیگر به دلیل ایجاد ترک‌های ریز در پاس‌های بالاتر، بازیابی دینامیکی و اثر باوشینگر و در نتیجه کاهش اثر کارسرد، نرخ افزایش سختی در پاس دوم کاهش یافته است [۲۹]. همچنین در شکل ۶ مشاهده می‌شود، پس از اعمال فرآیند در پاس‌های اول و دوم، مقدار میانگین سختی در راستای ضخامت بیشتر از راستای طولی روی سطح نمونه افزایش داشته است. برای ارزیابی کمی میزان غیریکنواختی مقادیر سختی، ضریب ناهمگنی سختی مطابق رابطه ۱ استفاده شده است [۳۰].

$$IF = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_i - H_{ave})^2 / (n - 1)}}{H_{ave}} \times 100 \quad (1)$$



شکل ۷ مقادیر ضریب غیریکنواختی سختی نمونه اولیه و پس از پاس‌های اول و دوم فرآیند CGP

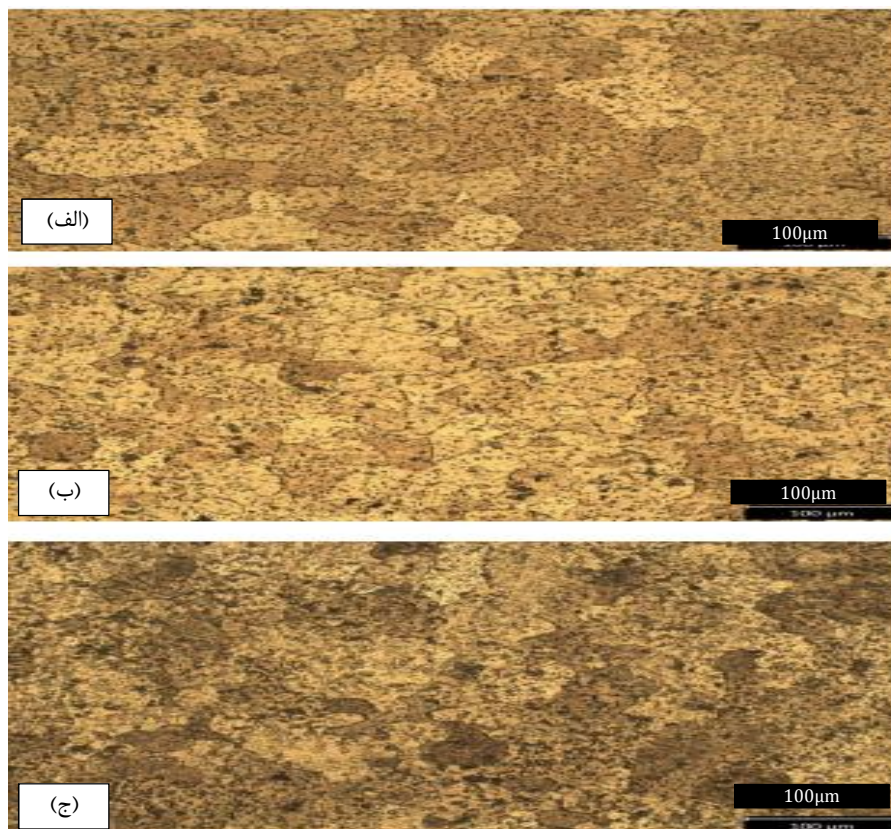
در رابطه ۱، n تعداد نقاط سختی سنجی، H_i مقدار سختی در نقطه i از نمونه و H_{ave} مقدار میانگین سختی روی کل نقاط است. هر چقدر ضریب IF کمتر باشد، به معنای یکنواختی بیشتر سختی ماده است. در نمودار ستونی شکل ۷ میزان ضریب غیریکنواختی سختی در راستای طولی روی سطح نمونه و در راستای ضخامت برای نمونه اولیه و پس از پاس‌های اول و دوم فرآیند CGP ارائه شده است.

مطابق شکل ۷ مقدار ضریب غیریکنواختی در جهت طولی روی سطح نمونه قبل از فرآیند ۲/۱۱ درصد بوده و پس از پاس اول و دوم فرآیند CGP به ترتیب به مقادیر ۴/۰۰ و ۳/۷۸ درصد رسیده است. به همین ترتیب، مقدار ضریب غیریکنواختی در جهت ضخامت قبل از فرآیند برابر ۰/۵۴ درصد بوده و پس از پاس‌های اول و دوم فرآیند CGP به ترتیب برابر ۱/۹۹ و ۶/۱۵ درصد رسیده است. از آنجا که با اعمال کرنش در حین فرآیند، میزان کرنش انباشته در نقاط مختلف نمونه به صورت غیریکنواخت افزایش می‌یابد همین موضوع سبب می‌شود خواص مکانیکی و از جمله سختی در نقاط مختلف نمونه متفاوت و نوسانی باشد [۱۰]. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پاس‌ها در فرآیند CGP ضریب غیریکنواختی بر روی سطح کاهش و در جهت ضخامت افزایش می‌یابد. در جهت ضخامت، در پاس دوم میزان ضریب غیریکنواختی بیش از سه برابر پاس اول است.

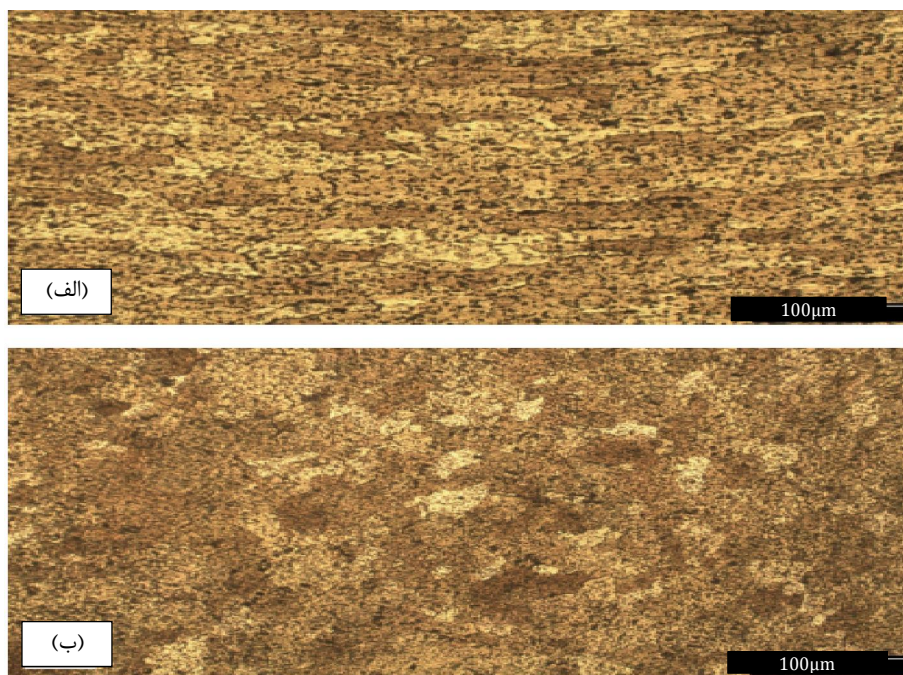
۳-۲- بررسی ریزساختار ماده

در این تحقیق از میکروسکوپ نوری، جهت مطالعه ریزساختار در دو ناحیه سطح و ضخامت نمونه استفاده شده است. در شکل ۸ تصاویر متالوگرافی سطح نمونه آنیل و ورق CGP شده در پاس‌های اول و دوم نشان داده شده است. شکل ۹ نیز تصاویر متالوگرافی ورق در جهت ضخامت را نشان می‌دهد.

از روش رهگیری خطی (روش هین) برای اندازه‌گیری میانگین اندازه دانه‌ها استفاده شده است. در این روش بر روی تصاویر ریزساختار خطوط صاف به طول برابر کشیده می‌شود و تعداد مرز دانه‌هایی که با خطوط برخورد داشته‌اند شمارش شده و میانگین آن‌ها محاسبه می‌شود.



شکل ۸ تصویر میکروسکوپ نوری تهیه شده از سطح ورق (الف) نمونه آنیل، (ب) بعد از پاس اول، (ج) بعد از پاس دوم



شکل ۹ تصویر میکروسکوپ نوری تهیه شده از سطح ضخامت ورق الف) بعد از پاس اول، ب) بعد از پاس دوم

با بررسی ریزساختار روی سطح نمونه مطابق با شکل ۸ میانگین اندازه دانه‌ها برای نمونه آنیل ۶۲ میکرومتر محاسبه شده که پس از پاس اول و دوم فرآیند به ترتیب به اندازه ۴۲ و ۳۶/۶ میکرومتر رسیده است که معادل ۳۲/۳ و ۴۱ درصد کاهش اندازه دانه است. به‌طور مشابه، میانگین اندازه دانه روی سطح ضخامت نمونه بر اساس شکل ۱ پس از پاس اول و دوم فرآیند به ترتیب برابر ۳۰ و ۲۴ میکرومتر به‌دست آمده که نسبت به نمونه اولیه ۵۱/۶ و ۶۱/۲ درصد ریزدانه‌تر شده است.

لذا تصاویر متالوگرافی در نمونه‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ قبل و بعد از فرآیند GGP نشان‌دهنده کاهش اندازه دانه‌ها است. همچنین مقایسه نتایج آزمون میکروسختی و متالوگرافی در دو سطح مختلف نمونه، مبین آن است که این فرآیند اثر ریزدانه‌گی بیشتری بر روی سطح ضخامت نسبت به سطح اصلی نمونه داشته است. بر اساس تئوری نابجایی، نرخ افزایش چگالی نابجایی متناسب با نرخ کرنش اعمال شده بر مواد است. از سوی دیگر اندازه دانه با جذر چگالی نابجایی رابطه معکوس دارد. بنابراین در فرآیندهای SPD از جمله روش GGP با اعمال کرنش و در نتیجه افزایش چگالی نابجایی، اندازه دانه کاهش می‌یابد. علاوه بر این، بازیابی دینامیکی سبب انقراض نابجایی‌ها می‌شود. نرخ بازیابی دینامیکی متناسب با چگالی نابجایی‌هاست، لذا در کرنش‌های بالاتر، نرخ بازیابی دینامیکی افزایش یافته و باعث کاهش در سرعت اصلاح دانه می‌شود [۱۹، ۲۰]. به همین دلیل همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، در فرآیندهای SPD عموماً کاهش شدید اندازه دانه در پاس اول و کاهش کمتر در پاس‌های بالاتر مشاهده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، فرآیند پرس کاری در قالب‌های شیاری محدود به صورت تجربی بررسی شد و اثر این فرآیند بر خواص مکانیکی و ریزساختار ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ مورد مطالعه قرار گرفت. از مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، موارد زیر حائز اهمیت است:

۱- با انجام فرآیند GGP میزان استحکام ورق آلومینیوم افزایش یافته است. با این وجود اثر این فرآیند بر استحکام تسلیم بیشتر از استحکام حد نهایی است. به‌گونه‌ای که میزان استحکام تسلیم پس از دو پاس فرآیند تا حدود ۱۵۰ درصد افزایش داشته است، اما تغییر در میزان استحکام حد نهایی ناچیز است.

۲- نتایج آزمون میکرو سختی نشان داد که نرخ افزایش سختی در پاس اول نسبت به پاس دوم بسیار بیشتر است. به طوری‌که سختی روی سطح ورق در پاس اول بیش از ۴۰ درصد نسبت به ورق اولیه افزایش داشته است، اما در پاس دوم نسبت به پاس

اول کمتر از ۱۱ درصد افزایش داشته است. همچنین نتایج نشان داد میانگین سختی در جهت ضخامت بیشتر از سطح افزایش یافته است.

۳- نتایج بررسی ضریب گیریکنواختی نشان داد که با اعمال فرآیند CGP یکنواختی سختی کاهش می‌یابد. در راستای طول روی سطح ورق با افزایش تعداد پاس، گیریکنواختی مقادیر سختی کاهش ناچیز یافته است، اما در جهت ضخامت و در پاس دوم، توزیع سختی تا حدود ۱۲ مرتبه نسبت به ورق اولیه و ۳ مرتبه نسبت به پاس اول گیریکنواخت‌تر شده است.

۴- نتایج مطالعات ریزساختاری نشان داد که فرآیند CGP سبب ریزدانه شدن ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ شده است. با این وجود نتایج متالوگرافی نشان داد مشابه با نتایج سختی، میزان کاهش اندازه دانه‌ها در راستای ضخامت نسبت به راستای طولی روی سطح ورق بیشتر است.

References

- [1] Sanders RE. Technology innovation in aluminum products. *Jom*. 2001 Feb;53:21-5. doi: 10.1007/s11837-001-0115-7
- [2] Singh R, Goel S, Verma R, Jayaganthan R, Kumar A. Mechanical behaviour of 304 austenitic stainless steel processed by room temperature rolling. *InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018 Mar 1 (Vol. 330, No. 1, p. 012017)*. IOP Publishing. doi: 10.1088/1757-899X/330/1/012017
- [3] Djavanroodi F, Ebrahimi M, Nayfeh JF. Tribological and mechanical investigation of multi-directional forged nickel. *Scientific Reports*. 2019 Jan 18;9(1):241. doi: 10.1038/s41598-018-36584-w
- [4] Gupta AK, Maddukuri TS, Singh SK. Constrained groove pressing for sheet metal processing. *Progress in Materials Science*. 2016 Dec 1;84:403-62. doi: 10.1016/j.pmatsci.2016.09.008
- [5] Hajizadeh K, Eghbali B. Investigation of formability of commercially pure titanium in equal channel angular pressing process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Sep 23;9(7):49-63. doi: 10.22034/IJME.2022.163354 [In Persian]
- [6] Abdolazizi A, Fallahi A. Effect of ECAP and Heat treatment on Mechanical properties of 7075 Al Alloy, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2016;3(2):1-10. [In Persian]
- [7] Shalchi E, Jafarzadeh H, Hashemi G. Numerical and experimented study of UFG pure copper with high strength processed by Accumulative compound extrusion (ACE). *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 May 21;7(3):42-51. [In Persian]
- [8] Eftekhari M, Faraji G, Bahrami M, Baniassadi M. Effects of hydrostatic tube cyclic extrusion compression process on the properties of 5052 aluminum alloy. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Nov 6;8(8):38-51. [In Persian]
- [9] Rahmatabadi D, Faragi G, Hashemi R. Review on accumulative roll bonding of ultrafine grained and nanostructured sheets. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019 Sep 23;6(4):37-51. [In Persian]
- [10] Eftekhari Shahri SE, Gholami M, Rakhshkhorshid M. Numerical-experimental study of die geometry in the constrained groove pressing of 6061 aluminum sheets. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2023 Oct;237(12):1836-46. doi: 10.1177/09544054221138161
- [11] Ebrahimi M, Shaeri MH, Naseri R, Gode C. Equal channel angular extrusion for tube configuration of Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2018 Jul 25;731:569-76. doi: 10.1016/j.msea.2018.06.080
- [12] Shin DH, Park JJ, Kim YS, Park KT. Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum. *materials Science and Engineering: A*. 2002 May 1;328(1-2):98-103. doi: 10.1016/S0921-5093(01)01665-3
- [13] Moradpour M, Khodabakhshi F, Eskandari H. Microstructure-mechanical property relationship in an Al-Mg alloy processed by constrained groove pressing-cross route. *Materials Science and Technology*. 2018 May 24;34(8):1003-17. doi: 10.1080/02670836.2017.1416906
- [14] Khakbaz F, Kazeminezhad M. Work hardening and mechanical properties of severely deformed AA3003 by constrained groove pressing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2012 Jan 1;14(1):20-5. doi: 10.1016/j.jmapro.2011.07.001
- [15] Krishnaiah A, Chakkingal U, Venugopal P. Applicability of the groove pressing technique for grain refinement in commercial purity copper. *Materials Science and Engineering: A*. 2005 Nov 25;410:337-40. doi: 10.1016/j.msea.2005.08.101
- [16] Nazari F, Honarpisheh M, Zhao H. Effect of stress relief annealing on microstructure, mechanical properties, and residual stress of a copper sheet in the constrained groove pressing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019 Jun 19;102:4361-70. doi: 10.1007/s00170-019-03511-w

- [17] Ebrahimi M, Attarilar S, Djavanroodi F, Gode C, Kim HS. Wear properties of brass samples subjected to constrained groove pressing process. *Materials & Design*. 2014 Nov 1;63:531-7. doi: [10.1016/j.matdes.2014.06.043](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.043)
- [18] Peng K, Zhang Y, Shaw LL, Qian KW. Microstructure dependence of a Cu-38Zn alloy on processing conditions of constrained groove pressing. *Acta Materialia*. 2009 Oct 1;57(18):5543-53. doi: [10.1016/j.actamat.2009.07.049](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.07.049)
- [19] Kumar SS, Raghu T. Mechanical behaviour and microstructural evolution of constrained groove pressed nickel sheets. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013 Feb 1;213(2):214-20. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2012.09.012](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.09.012)
- [20] Khodabakhshi F, Kazeminezhad M, Kokabi AH. Constrained groove pressing of low carbon steel: Nanostructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2010 Jun 25;527(16-17):4043-9. doi: [10.1016/j.msea.2010.03.005](https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.03.005)
- [21] Dong XL, Yun B, Ma ZH. Grain refinement in constrained groove pressing of 7050 Aluminum alloy. *Advanced Materials Research*. 2011 Apr 20;189:2823-6. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.2823](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.2823)
- [22] Khodabakhshi F, Abbaszadeh M, Mohebpour SR, Eskandari H. 3D finite element analysis and experimental validation of constrained groove pressing-cross route as an SPD process for sheet form metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014 Aug;73:1291-305.
- [23] Khodabakhshi F, Haghshenas M, Eskandari H, Koohbor B. Hardness– strength relationships in fine and ultra-fine-grained metals processed through constrained groove pressing. *Materials Science and Engineering: A*. 2015 Jun 11;636:331-9. doi: [10.1016/j.msea.2015.03.122](https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.122)
- [24] Nazari F, Honarpisheh M. Analytical model to estimate force of constrained groove pressing process. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018 Apr 1;32:11-9. doi: [10.1016/j.jmapro.2018.01.015](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.01.015)
- [25] Aghamohammadi H, Jamshidi R, Heidarpour A, Mazaheri Y, Nemati M. Effect of friction stir processing with different pass numbers on the mechanical, tribological and corrosion properties of Al6061. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2018 Nov 22;5(3):12-21. [In Persian]
- [26] Azushima A, Kopp R, Korhonen A, Yang DY, Micari F, Lahoti GD, Groche P, Yanagimoto J, Tsuji N, Rosochowski A, Yanagida A. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP annals*. 2008 Jan 1;57(2):716-35. doi: [10.1016/j.cirp.2008.09.005](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005)
- [27] Zhilyaev AP, Langdon TG. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Progress in Materials science*. 2008 Aug 1;53(6):893-979. doi: [10.1016/j.pmatsci.2008.03.002](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.03.002)
- [28] Niranjana GG, Chakkingal U. Deep drawability of commercial purity aluminum sheets processed by groove pressing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010 Aug 1;210(11):1511-6. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2010.04.009](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.04.009)
- [29] Hosseini E, Kazeminezhad M. Integration of physically based models into FE analysis: Homogeneity of copper sheets under large plastic deformations. *Computational Materials Science*. 2010 Mar 1;48(1):166-73. doi: [10.1016/j.commatsci.2009.12.023](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.12.023)
- [30] Sunil BR, Kumar AA, Kumar TS, Chakkingal U. Role of biomineralization on the degradation of fine grained AZ31 magnesium alloy processed by groove pressing. *Materials Science and Engineering: C*. 2013 Apr 1;33(3):1607-15. doi: [10.1016/j.msec.2012.12.095](https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.12.095)