



طراحی و ساخت قالب اکستروژن انبساطی متناوب (CEE) و بررسی میکروساختار و استحکام آلومینیوم ۱۰۵۰ تحت این فرایند

فرشید احمدی^{۱*}، علیرضا فروغی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: fa.ahmadi@kashanu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۴ تیر ۱۴۰۳

پذیرش: ۱۱ شهریور ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

تغییر شکل پلاستیک شدید

فرایند CEE

میکروساختار

اندازه دانه

استحکام کششی

یکی از فرایندهای تغییر شکل شدید پلاستیک که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است، فرایند اکستروژن متناوب بازشونده (CEE) می‌باشد. بررسی اثر این فرایند در پاس‌های مختلف بر خواص مکانیکی و میکروساختار آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ هدف این مقاله می‌باشد. بعد از طراحی و ساخت قالب CEE، نمونه‌های آلومینیومی با تعداد ۱، ۲، ۴، ۶ و ۸ پاس مورد آزمایش قرار گرفتند. نمودارهای استحکام کششی نشان داد که با افزایش تعداد پاس، استحکام کششی نمونه‌ها با یک‌روند تدریجی صعودی از مقدار ۷۲ مگاپاسکال برای نمونه آنیل شده به مقدار ۹۹/۴ مگاپاسکال در نمونه ۴ پاس رسیده و یک افزایش ۳۸ درصدی در استحکام حاصل می‌شود. در ادامه با افزایش تعداد پاس، تغییرات استحکام سیر نزولی اندکی به خود گرفت. همچنین بررسی میکروساختاری نمونه‌ها نشان داد که مشابه روند تغییرات استحکام کششی، اندازه دانه از ۲۶۰ میکرومتر در نمونه آنیل شده به ۱۵۰ میکرومتر در نمونه ۴ پاس کاهش پیدا کرده است. اما این روند در پاس‌های ۶ و ۸ به‌طور نسبی معکوس شد. منطق اساسی برای این روند مشاهده شده را می‌توان به بازیابی دینامیکی میکروساختار نسبت داد که از پاس ۶م به بعد شروع می‌شود. باتوجه به انرژی نقص چیدمان بالای این آلیاژ همراه با تحرکات بیشتر نابجایی‌ها، احتمال آرایش مجدد و نابودی نابجایی‌ها، به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این امر در کنار افزایش نسبی دما ناشی از تغییر شکل، بازیابی دینامیکی و رشد دانه را تسهیل می‌کند.

Design and manufacture of Cyclic Expansion Extrusion (CEE) die and investigation of microstructure and strength of aluminum 1050 under the process

Farshid Ahmadi^{1*}, Alireza Foroughi²

1- Assistant Professor, Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

2- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

* Corresponding Author's Email: fa.ahmadi@kashanu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 4 July 2024

Accepted: 1 September 2024

Keywords:

Severe Plastic Deformation

CEE Process

Microstructure

Grain Size

Tensile Strength

Abstract

One of the processes of severe plastic deformation that has recently received attention is the cyclic extrusion expansion process (CEE). Investigating the effect of CEE process in different passes on the mechanical properties and microstructure of aluminum alloy 1050 was the aim of this paper. After designing and building the CEE die, aluminum samples were processed with the number of 1, 2, 4, 6 and 8 passes. The tensile strength graphs showed that by increasing the number of passes, the tensile strength of the samples gradually increased from 72 MPa for the annealed sample to 99.4 MPa in the 4-pass sample, and a 38% increase in strength was achieved. In the following, with the increase of the number of passes, the trend of strength variations exhibited a slight decline. Furthermore, the microstructural analysis of the specimens indicated that the grain size has decreased from 260 μm in the annealed sample to 150 μm in the 4-pass sample according to the strength variation trend. However, this trend was relatively reversed in the 6th and 8th passes. The underlying rationale for this observed trend can be attributed to the phenomenon of dynamic recovery of the microstructure commencing from the 6th pass onward. Owing to the high stacking fault energy of this alloy, coupled with higher mobility of dislocations, the likelihood of dislocations rearrangement and annihilation is significantly heightened. Besides, along with the relative increase in temperature resulting from the deformation process, it facilitates both dynamic recovery and grain growth.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Ahmadi F, Foroughi A. Design and manufacture of Cyclic Expansion Extrusion (CEE) die and investigation of microstructure and strength of aluminum 1050 under the process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Aug 22;11(6):42-53. doi: 10.22034/IJME.2024.466177.1982 [In Persian]

۱- مقدمه

فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید^۱ (SPD) به عنوان گروهی از فرایندهای شکل‌دهی فلزات معرفی شده‌اند که در این فرایندها کرنش پلاستیک بسیار زیادی به فلز با حجم مشخصی اعمال می‌گردد. نتیجه این کرنش شدید پلاستیک اعمال‌شده، پالایش و ریزش داننه‌ها می‌باشد که این امر منجر به بهبود بسیاری از خواص ماده می‌شود [۱].

چندین فرایند SPD با مزایای مختلف در طول دهه‌های گذشته پیشنهاد شده است. فرایند پیچش فشار بالا^۲ [۲]، فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای^۳ [۳]، فشردن در کانال زاویه‌دار لوله‌ای موازی^۴ [۴]، فشار در کانال زاویه‌دار با مقاطع یکسان^۵ [۵]، فشردن - اکستروژن تناوبی^۶ [۶]، نورد تجمعی^۷ [۷]، فرایند اکستروژن - فشردن تناوبی در کانال زاویه‌دار^۸ [۸]، اکستروژن انبساطی متناوب^۹ [۹]، فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاسی^{۱۰} [۱۰]، فرایند اکستروژن - فشار در کانال زاویه‌ای یکسان^{۱۱} [۱۱]، فرایند اکستروژن متناوبی فشاری پروفیل سبک غیرمقارن^{۱۲} [۱۲] و فرایند اکستروژن پیچشی^{۱۳} [۱۳]، برخی از فرایندهای رایج SPD هستند که برای افزایش ویژگی‌های مکانیکی از طریق پالایش داننه‌ها استفاده می‌شوند. هدف عمده فرایندهای SPD برای ایجاد ساختار بسیار ریزدانه در تولید قطعات سبک وزن با خواص متمایز است [۱۴].

مطالعات زیادی برای تعیین تغییرات در ساختار و خواص مواد در معرض تغییرشکل پلاستیک شدید انجام شده است. مشخص شده که ماده در طول چند چرخه اول تغییرشکل سخت می‌شود و سپس یک جریان حالت پایدار ایجاد می‌گردد [۱۵، ۱۶]. در حالت پایدار، میکروساختار از نظر اندازه دانه و تراکم نابجایی‌ها پایدار می‌ماند. بدیهی است که جریان حالت پایدار نتیجه تعادل بین فرایندهای نرم شدن (بازیابی و تبلور مجدد) و سخت شدن است. نوع فلز یا آلیاژ تغییرشکل داده شده نیز بر سطح جریان حالت پایدار تأثیر می‌گذارد. هرچه انرژی نقص چیدمان^{۱۴} ماده بیشتر باشد، جریان حالت پایدار سریع‌تر به دست می‌آید و سطح سخت شدن در این حالت کمتر می‌شود [۱۷، ۱۸]. در نتیجه تجمع کرنش‌های بسیار بزرگ، کاهش شدید دمای تبلور مجدد نیز وجود دارد و همین امر باعث می‌شود آستانه حفظ ساختار تغییرشکل و مقادیر بالای سخت شدن را به ویژه در فلزات بسیار خالص کاهش دهد. در زمان‌هایی که شرایط برای توسعه مکانیسم‌های نرم‌کننده ایجاد می‌شود، تولید داننه‌های جدید بدون نابجایی و حتی رشد داننه‌ها مشاهده شده است [۱۹-۲۱]. در عین حال، با افزایش کرنش، دمای مواد تغییرشکل یافته نیز افزایش می‌یابد و همین عامل باعث توسعه بیشتر فرایندهای آرایش مجدد میکرو ساختار و متعاقباً نرم شدن فلزات را به همراه دارد [۲۲]. ساختار نانومتریکی حاصل، به ویژه در فلزات و آلیاژهایی که انرژی نقص چیدمان بسیار بالایی دارند، پایدار نیست [۲۳]. از این رو بررسی اثر فرایندهای مختلف بر هر آلیاژ لزوماً یکسان نمی‌باشد. به عبارتی اثر هر فرایند بر هر آلیاژ بایستی به تنهایی مورد بررسی قرارگیرد.

از بین روش‌های ذکر شده، برای اعمال کرنش‌های بسیار بزرگ و بدون تغییرشکل نمونه اولیه، فرایندهای CEC، ECAP و CEE مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. با توجه به مزیت عدم تغییرشکل نمونه اولیه در این فرایندها، تحقیقات بسیار زیادی در راستای بهبود ویژگی‌های حاصل شده توسط این فرایندها و برطرف کردن نواقص آن‌ها انجام شده است. از جمله این موارد می‌توان به اعمال ارتعاشات آلتراسونیک در فرایندهای SPD [۲۴، ۲۵]، اعمال زاویه مارپیچ در کانال خروجی قالب [۲۶]، اعمال مسیره‌های جدید در فرایند و کوچک‌سازی در ابعاد نمونه در فرایند [۲۷، ۲۸] اشاره کرد. عمده فعالیت‌های تحقیقاتی تاکنون بیشتر در زمینه فرایند ECAP بوده و در زمینه دو فرایند دیگر یعنی CEC و CEE کارهای پژوهشی کمتری انجام شده است.

¹ Severe Plastic Deformation (SPD)

² High-Pressure Torsion (HPT)

³ Tubular Channel Angular Pressing (TCAP)

⁴ Parallel Tubular Channel Angular Pressing (PTCAP)

⁵ Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

⁶ Cyclic Extrusion-Compression (CEC)

⁷ Accumulative Roll Bonding (ARB)

⁸ Cyclic Extrusion Channel Angular Pressing (CECAP)

⁹ Cyclic Extrusion-Expansion (CEE)

¹⁰ Friction Stir Back Extrusion (FSBE)

¹¹ Extrusion + ECAP (Ex-ECAP)

¹² Noncircular Thin Section Cyclic Extrusion-Compression (NCTS-CEC)

¹³ Torsion Extrusion (TE)

¹⁴ Stacking-Fault Energy (SFE)

در حین فرایند تغییر شکل CEC، می‌توان با فشاردادن متناوب نمونه بین محفظه‌های اکستروژن و فشرده‌سازی، به کرنش پلاستیک شدید دست یافت [۲۹]. در این فرایند مانند فرایند ECAP هیچ تغییری در شکل و اندازه نمونه، قبل و بعد از فرایند، وجود ندارد. مزیت فرایند CEC این است که مواد می‌توانند چندین چرخه را بدون خارج شدن از قالب طی کنند. فرایند اکستروژن انبساطی متناوب (CEE) به عنوان فرم اصلاح شده و جایگزین فرایند CEC معرفی شده است. در فرایند CEE، با مسدود کردن کانال خروجی به‌طور موقت، نمونه در حفره قالب گسترش می‌یابد. علاوه بر مزایای قبلی همچون اعمال تعداد دلخواه رفت و برگشت نمونه بدون نیاز به خارج کردن آن از قالب، مزیت اصلی فرایند CEE نسبت به CEC آن است که نیازی به سیستم فشار برگشتی خارجی ندارد. نتایج نشان می‌دهند که اجرای اکستروژن انبساطی متناوب، نه تنها باعث اعمال مقادیر بالای کرنش در هر مرحله می‌شود، بلکه توزیع یکنواخت سختی در سطح مقطع نمونه نیز حفظ می‌گردد [۳۰].

مطالعات انجام شده در زمینه بررسی میزان کارایی فرایند CEE محدود می‌باشد. بررسی‌های انجام شده در زمینه اثربخشی این فرایند بر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، حاکی از تاثیر قابل توجه فرایند CEE بر خواص مکانیکی و ریزساختار این آلیاژ دارد [۳۱، ۳۲]. تحقیقات نشان می‌دهد که تنها پس از یک چرخه CEE، میکروسختی آلیاژ از ۴۰ ویکرز به تقریباً ۶۸ ویکرز افزایش یافته است. این میزان سختی در چرخه‌های بعدی، تغییرات اندکی داشته و در حدود ۷۰ ویکرز تثبیت می‌شود. به‌طور همزمان، متوسط اندازه دانه از ۱۰۰ میکرومتر به حدود ۵-۶ میکرومتر پس از چهار چرخه رسیده که نشان‌دهنده اثربخشی فرایند CEE در تولید دانه‌های بسیار ریز بر روی این آلیاژ می‌باشد. در پژوهش‌های دیگری اثر فرایند CEE بر آلیاژ منیزیوم ZK60 مورد بررسی قرار گرفته است [۳۳، ۳۴]. در تحقیقات مذکور فرایند CEE در سه دمای ۱۹۰، ۲۷۰ و ۳۵۰ درجه بر روی آلیاژ انجام شده است. مشاهده شده که انجام عملیات در دمای ۱۹۰ درجه باعث افزایش استحکام و ریزشدن دانه می‌شود اما به دلیل تبلور مجدد دینامیکی در دماهای ۲۷۰ و ۳۵۰ درجه، دانه‌ها رشد کرده و متعاقباً استحکام نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است.

به‌طور کلی اثرات فرایندهای مختلف SPD بر هر آلیاژ می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر اساس ویژگی‌های ترکیبی و ساختاری آن متفاوت باشد. آلیاژهایی که از دو یا چند عنصر تشکیل شده‌اند، طیف وسیعی از خواص را تحت تأثیر مواد تشکیل‌دهنده خود نشان می‌دهند. ماهیت فلزات پایه، وجود عناصر آلیاژی و برهم‌کنش‌های فردی آن‌ها نقش مهمی در تعیین نحوه واکنش این مواد به فرایندهای SPD دارند. به عنوان مثال، آلیاژهای با ساختار کریستالی FCC ممکن است رفتار متفاوتی در مقایسه با ساختار کریستالی BCC در شرایط تغییر شکل یکسان نشان دهند. علاوه بر این، نوع فرایند SPD استفاده شده نیز بر میزان اثربخشی آن اثرگذار است. علت این امر آن است که هر تکنیک، مسیرها و توزیع کرنش مجزایی را تحمیل می‌کند، که منجر به نتایج متفاوتی در اصلاح ریزساختار و عملکرد مکانیکی می‌شود [۲۳، ۳۵، ۳۶]. تحقیقات انجام شده در زمینه اثربخشی فرایند CEE بسیار محدود می‌باشد و همان‌طور که ذکر شد صرفاً اثر این فرایند بر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و چند آلیاژ منیزیوم مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر اثربخشی یک فرایند SPD، بازیابی دینامیکی^۱ در میکروساختار بوده که می‌تواند منجر به رشد دانه و کاهش اثربخشی فرایند مربوطه شود. میزان خلوص ماده و انرژی نقص چیدمان دو عامل مهم در بازیابی دینامیکی و تبلور مجدد در دمای اتاق می‌باشند. وجود این دو عامل و نوع فرایند SPD باعث می‌شود نتوان در زمینه میزان اثربخشی یک فرایند به‌طور قطع قانون مستقلی تعریف کرد. از این‌رو با توجه به این‌که تا کنون هیچ پژوهشی در زمینه اثر فرایند CEE بر آلیاژهای آلومینیوم سری ۱۰۰۰، به عنوان یک آلیاژ با درصد خلوص حداقل ۹۹ درصد و با انرژی نقص چیدمان بالا، انجام نشده است، هدف این مقاله بررسی خواص مکانیکی و میکروساختار حاصل شده در طی استفاده از فرایند CEE در سیکل‌های مختلف بر آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ می‌باشد. در این راستا نیز سعی شده است یک ساختار کم نقص و بهینه در بحث طراحی قالب و انجام فرایند CEE نیز ارائه شود.

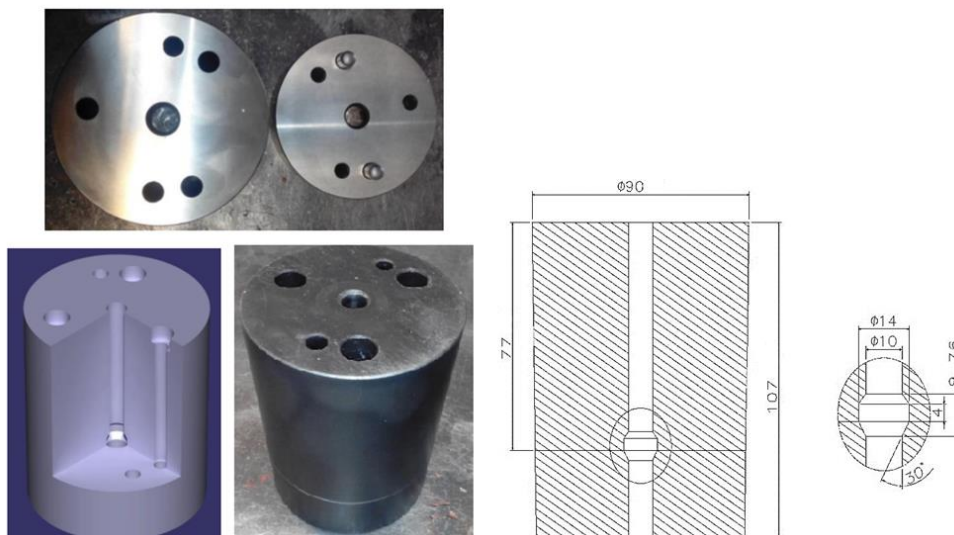
۲- روش آزمایش

۲-۱- ساخت قالب

جنس در نظر گرفته شده برای ساخت قالب از نوع فولاد ابزاری با شماره استاندارد DIN، 1.2379 و کد X153CrMoV12 است. این فولاد مناسب برای قالب‌های برش، خم و سوراخ‌زنی بوده و یکی از بهترین مواد ذکر شده در کاتالوگ‌های فولاد برای غلتک‌های نورد و

¹ Dynamic Recovery

قالب‌های اکستروژن سرد می‌باشد. شکل ۱ نمایی از قالب و ابعاد آن به صورت سوار شده و باز شده همراه با نمای برش خورده‌ای از آن را نشان می‌دهد. قطر قالب برای حذف رینگ خارجی حدود ۹۰ میلی‌متر و قطر دهانه راهگاه ۱۰ میلی‌متر تعیین شدند. برای سهولت در خارج کردن نمونه‌ها، قالب به صورت دوتکه طراحی و ساخته شده است به صورتی که پس از اتمام فرایند برای هر نمونه، قالب باز شده، تمیز گردیده و مجدداً بسته می‌شود. برای بسته نگاه داشتن دونیمه قالب در طول فرایند از سه عدد پیچ استفاده شده که به صورت کامل در نیمه پایینی قالب بسته می‌شوند. همان‌طور که در شکل مشخص است برای افزایش دقت انطباق دونیمه قالب از پین‌های هدایت‌کننده استفاده شده است که دقت انطباق دونیمه را بسیار افزایش می‌دهد. به کمک عملیات حرارتی حجمی سختی قالب را تا ۵۰ راکول سی افزایش داده و سپس به کمک عملیات نیتراسیون سختی سطح به عمق حدوداً ۰/۳ میلی‌متر به مقدار ۱۱۰۰ ویکرز افزایش داده شد.



شکل ۱ قالب فرایند CEE (ابعاد به میلی‌متر می‌باشند)

۲-۲- طراحی و ساخت پرس

باتوجه به خاص بودن فرایند، دستگاه پرس، متناسب با شرایط کاری طراحی و ساخته شد. این پرس منطبق با میزان فشارهای محاسبه شده و فعالیت‌هایی که باید در طول فرایند انجام می‌گرفت، طراحی شده است. پرس موردنظر دارای یک بدنه اصلی بوده که جک دوطرفه‌ای در قسمت بالای آن و میز کار در قسمت میانی آن تعبیه شده است. در شکل ۲ نمایی از پرس ساخته شده به همراه قالب سوار شده نشان داده شده است.



شکل ۲ نمایی از پرس ساخته شده به همراه قالب

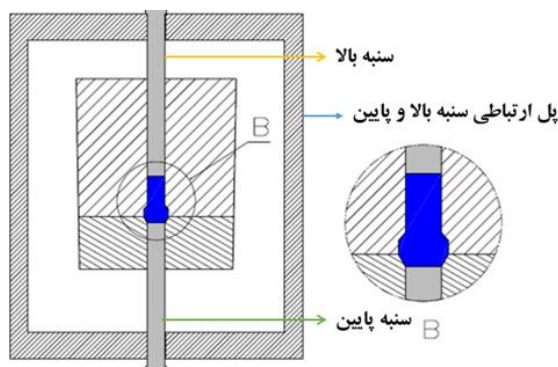
۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها برای فرایند

نمونه‌ها از یک ورق آلومینیوم به ضخامت ۱۲ میلی‌متر تهیه شدند. بدین صورت که نیاز بود با اعمال فرایند ماشین‌کاری بر روی نمونه‌های با مقطع مربعی شکل نمونه‌هایی با مقطع گرد با قطر ۱۰ میلی‌متر ایجاد شوند. پس از فرایند ماشین‌کاری به‌منظور انجام فرایند آنیل، کلیه نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای ۴۵۰-۴۱۰ درجه سانتی‌گراد در کوره قرار گرفته و سپس در همان کوره سرد شدند تا دانه‌بندی فلز کاملاً یکنواخت شود. این نوع آلیاژ به‌واسطه داشتن خلوص بالا، بسیار نرم و انعطاف‌پذیر است و به همین دلیل قابلیت ماشین‌کاری آن بسیار ضعیف می‌باشد.

۲-۴- انجام فرایند CEE

فرایند CEE به‌صورت ترتیبی و عبوردهی متوالی نمونه‌های مختلف انجام گرفته است. با قراردادن نمونه بین دو سنبه بالا و پایین و ثابت نگاه‌داشتن سنبه پایین در زمان اولین اکستروژن می‌توان پرشدن کامل راهگاه و فشار مقاوم را ایجاد کرد. مطابق شکل ۳ جهت حرکت رفت و برگشت از دو پل نگهدارنده در طرفین استفاده شده است. ضخامت و طول این پل‌ها متناسب با مقدار نیروی وارده و فشارهای داخل راهگاه محاسبه و ساخته شده‌اند.

هر نمونه به‌صورت اختصاصی با هر تعداد دلخواه رفت و برگشت اکستروژن می‌شود. نمونه و سطح قالب به ماده روانکار گرافیت آغشته شده و سپس نمونه از قسمت انتهایی وارد قالب می‌شود. پس از قرارگیری نمونه سنبه پایین از قسمت انتهایی وارد قالب شده و نمونه را در انتهای قسمت راهگاه نگاه می‌دارد. سنبه بالایی با استفاده از نیروی پرس به سمت پایین حرکت کرده و باعث پرشدن راهگاه توسط نمونه می‌شود. پس از پر شدن راهگاه پل‌های اتصال‌دهنده دو سنبه متصل می‌شوند و به‌گونه‌ای عمل می‌کنند که حرکت رفت و برگشت سنبه‌ها با فاصله طولی مشخصی انجام گیرد. با هر حرکت طولی سنبه‌ها یک فرایند اکستروژن برای نمونه ثبت می‌گردد.



شکل ۳ نحوه اعمال پل بین سنبه بالایی و پایینی و شماتیک نحوه پرشدن قالب

۳- نتایج و بحث

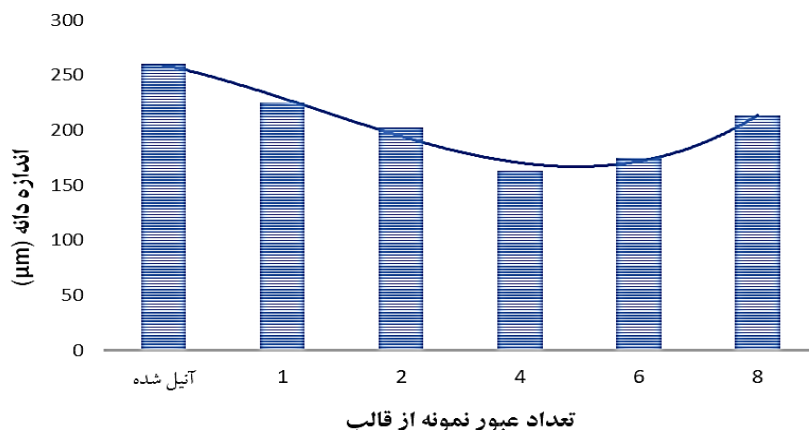
۳-۱- بررسی میکروساختار

برای بررسی و مطالعات متالوگرافی، نمونه‌ها از مرکز و در راستای محور اکستروژن، برش داده می‌شوند. این عمل با استفاده از یک فیکسچر و توسط دستگاه وایرکات در راستای اکستروژن و دقیقاً از مرکز نمونه‌ها انجام می‌گردد. نمونه‌های برش خورده طبق اصول اولیه آماده‌سازی، مانع شده و سپس مراحل سنباده‌زنی و پولیش بر روی آن‌ها اعمال گردیده است. پس از آن کلیه نمونه‌ها به کمک محلول اسید هیدروفلوریک ۵/۰ درصد، اچ می‌شوند. سعی شده است تصویر دانه‌بندی نمونه‌ها در یک موقعیت ثابت برای کلیه نمونه‌ها استخراج شود. تصاویر OM از مقطع نمونه‌های تحت عملیات قرار گرفته در پاس‌های ۱، ۲، ۴، ۶ و ۸ همراه با نمونه آنیل شده در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. اندازه دانه بعد از آنیل کردن به صورت میانگین ۲۶۰ میکرومتر می‌باشد.



شکل ۴ تصاویر متالوگرافی نمونه‌ها در عبورهای مختلف از قالب CEE

شکل ۵ تغییرات اندازه دانه در مرکز نمونه را نسبت به تعداد عبور نمونه از قالب نشان می‌دهد. از نمودار شکل ۵ مشخص است که اندازه دانه تا عبور ۱۴ام از قالب، روند کاهشی داشته است، اما از عبور ۱۶ام به بعد دانه‌ها شروع به رشد کرده‌اند. معمولاً انتظار این است که با افزایش تغییر شکل پلاستیک در ماده و اعمال کرنش‌های بیشتر، دانه‌ها ریزتر شوند. برای توجیه این رشد دانه ابتدا بایستی به موضوع تبلور مجدد دینامیکی و پارامترهای تأثیرگذار بر آن پرداخته شود.



شکل ۵ تغییرات اندازه دانه در مرکز نمونه نسبت به تعداد عبور از قالب

همان طور که از قبل مشخص است، عیوبی مانند نابجایی‌ها در حین تغییر شکل ماده افزایش می‌یابند و این عامل باعث می‌شود مواد از نظر ترمودینامیکی ناپایدار شوند. هنگام تغییر شکل فلزات بالاخص در دماهای بالا، فرایندهای فعال شده حرارتی تمایل به حذف این عیوب به منظور کاهش انرژی آزاد سیستم دارند. از این رو میکروساختار و خواص ماده، توسط پدیده بازبازی از طریق نابودی و آرایش مجدد نابجایی‌ها، می‌تواند تا حدی به مقادیر اولیه خود قبل از تغییر شکل بازگردند. فرایند بازبازی ممکن است در طول آنیل کردن ماده و یا در حین تغییر شکل رخ دهد که به ترتیب به عنوان بازبازی استاتیکی^۱ و بازبازی پویا^۲ شناخته می‌شوند [۳۷]. در حین یک فرایند SPD مانند فرایند CEE، مواد دچار کرنش شدید شده و این عامل خود منجر به تشکیل تعداد زیادی نابجایی و خرد شدن دانه‌های بزرگ‌تر به زیردانه‌های کوچک‌تر می‌شود. انرژی ذاتی ذخیره شده در ریزساختار تغییر شکل یافته قابل توجه بوده و این امر باعث ایجاد یک شرایط غیرتعادلی می‌گردد. در این شرایط، عوامل مختلفی می‌توانند منجر به رشد دانه حتی در دمای اتاق شود. در درجه اول، فرایندهای بازبازی و تبلور مجدد ممکن است به دلیل تجمع چگالی نابجایی‌ها و وجود مرز دانه‌های با زاویه بالا^۳ آغاز شود. پدیده بازبازی پویا نقش مهمی در این زمینه ایفا می‌کند. در حین تغییر شکل آرایش مجدد نابجایی‌ها و حذف آن‌ها در هنگام برخورد نابجایی‌های دو قطبی^۴ می‌تواند منجر به تشکیل دانه‌های جدید و بزرگ‌تر از زیردانه‌های کوچک‌تر موجود شود. علاوه بر این، اگر ماده در معرض بارگذاری چرخه‌ای قرار گیرد، انرژی حرارتی تولید شده از طریق اصطکاک داخلی نیز ممکن است فرایندهای نفوذ را تسهیل کند و منجر به افزایش رشد دانه شود. پس از توقف تغییر شکل نیز این پتانسیل رشد دانه یا در دماهای بالا و یا در دمای محیط برای مواد با SFE بالا بطور خاص وجود دارد [۲۳، ۳۸، ۳۹]. انرژی نقص چیدمان، نقشی محوری در تعیین میزان حرکت نابجایی‌ها در طول تغییر شکل و پایداری ریزساختار حاصل شده ایفا می‌کند. در مواد با SFE بالا، مانند فلزات با ساختار کریستالی FCC، تحرک نابجایی‌ها بیشتر می‌باشد. این تحرک افزایش یافته، امکان ادغام نابجایی‌ها و نابودی آن‌ها را فراهم می‌کند و در نهایت به دلیل افزایش تحرک اتمی، پتانسیل رشد دانه را در دمای اتاق افزایش می‌دهد. برعکس، در موادی که با SFE پایین مشخص می‌شوند، مانند فلزات با ساختار کریستالی BCC، حرکت نابجایی‌ها محدود بوده و کمتر مستعد چنین پویایی بازبازی هستند، لذا ریزساختار پایداری ایجاد شده و پس از تغییر شکل شدید پلاستیک مقاومت در برابر رشد دانه‌ها افزایش می‌یابد [۲۲، ۴۰]. در جدول ۱ انرژی نقص چیدمان فلزات رایج صنعتی ارائه شده است.

از جدول مشخص است که آلومینیوم دارای انرژی نقص چیدمان بالاتری در مقایسه با سایر آلیاژها دارد؛ لذا امکان بازبازی دینامیکی در این آلیاژ در مقایسه با سایر آلیاژها بالاتر است. همان طور که قبلاً نیز ذکر شد، یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در تبلور مجدد دینامیکی حضور عناصر و فازهای تشکیل شده در میکروساختار می‌باشد. اصولاً هر چه ماده خالص‌تر باشد، این بازبازی راحت‌تر اتفاق می‌افتد. از این جهت آلیاژهای آلومینیوم سری ۱۰۰۰ که دارای حداقل ۹۹ درصد آلومینیوم هستند بیشتر مستعد رشد دانه بعد از ریز شدن می‌باشند. در مورد فرایند CEE بر روی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ مشخص است بعد از ۴ پاس عملیات و افزایش چگالی نابجایی‌ها

¹ Static Recovery (SRV)

² Dynamic Recovery (DRV)

³ High-Angle Grain Boundaries (HAGB)

⁴ Dipole Dislocations

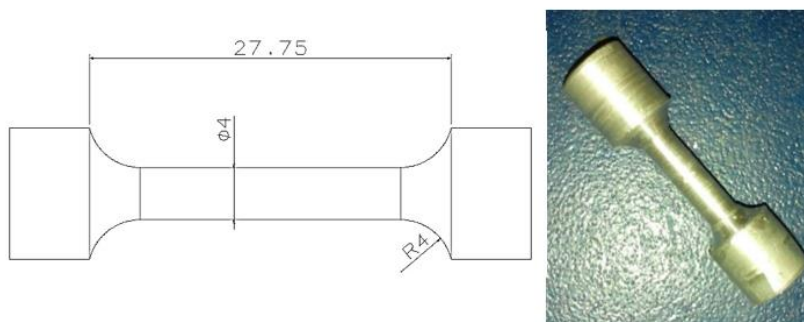
و متعاقباً حرکات بالای نابی‌ها به دلیل SFE بالا، بازیابی دینامیکی در عبور ۶ام مشاهده شده است. نکته دیگری که می‌توان از این نمودار به‌دست آورد این است که بعد از ۴ بار عبور نمونه از قالب، حدوداً ۴۰ درصد از اندازه دانه اولیه کاهش پیدا کرده است. به عبارت دیگر روند کاهش اندازه دانه در این فرایند در مقایسه با فرایندهایی مثل ECAP کند می‌باشد. تعداد عبور بهینه این فرایند برای آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰، ۴ پاس بوده و پس از آن روند ریزش دانه‌بندی برعکس می‌شود.

جدول ۱ مقدار SFE فلزات و آلیاژهای رایج در دمای اتاق [۴۱]

نام فلز	SFE (mJ m ⁻²)	نام فلز	SFE (mJ m ⁻²)
آلومینیوم	۱۶۶	روی	۱۴۰
مس	۷۸	منیزیوم	۱۲۵
نقره	۲۲	برنج زرد	۲۰
طلا	۴۵	فولاد ضدزنگ ۳۰۴	۲۱
نیکل	۱۲۸		
کبالت	۱۵		

۳-۲- بررسی استحکام

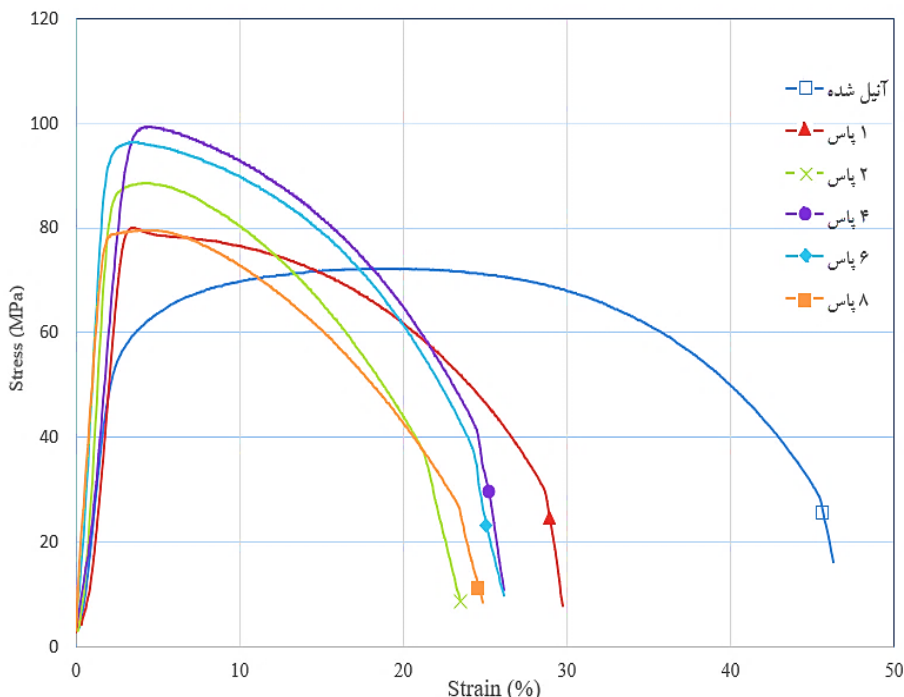
به‌منظور اعمال تست کشش بر روی نمونه‌ها ابتدا طبق استاندارد ASTM E8، کلیه نمونه مطابق با شکل ۶ به فرم دمبلی‌شکل ماشین‌کاری شدند.



شکل ۶ ابعاد نمونه جهت تست کشش طبق استاندارد (ابعاد به میلی‌متر می‌باشند)

شکل ۷ نمودار تنش- کرنش مهندسی نمونه های CEE شده در عبورهای مختلف از قالب را نشان می‌دهد. تعیین دقیق استحکام تسلیم که در آن انحراف از حالت خطی در منحنی تنش- کرنش آغاز می‌شود، مشکل می‌باشد. لذا با توجه به قانون ۲ درصد کرنش، این مقدار برای نمونه خام برابر ۵۰ مگاپاسکال است که در مقایسه با نمونه‌های آزمایش شده بسیار کمتر می‌باشد و به ترتیب این عدد برای نمونه ۱ پاس برابر ۷۵ مگاپاسکال، ۲ پاس برابر ۸۰ مگاپاسکال، ۴ پاس برابر ۹۵ مگاپاسکال، ۶ پاس برابر ۹۰ مگاپاسکال و نهایتاً ۸ پاس برابر ۷۰ مگاپاسکال است.

از آنجایی که استحکام کششی نهایی نمونه‌ها راحت‌تر قابل‌اندازه‌گیری و گزارش می‌باشد در ادامه مقدار استحکام کششی نمونه‌ها نیز گزارش شده است. برای نمونه خام آنیل شده این مقدار برابر ۷۲ مگاپاسکال بوده که در مقایسه با سایر نمونه‌ها دارای کمترین مقدار استحکام است و برای سایر نمونه‌ها به ترتیب برای ۱ پاس برابر ۸۰/۱ مگاپاسکال، ۲ پاس برابر ۸۸/۵ مگاپاسکال، ۴ پاس برابر ۹۹/۴ مگاپاسکال، ۶ پاس برابر ۹۶/۴ مگاپاسکال و نهایتاً برای ۸ پاس برابر ۷۹/۵ مگاپاسکال می‌باشد. لازم به ذکر است برای هر شرایط فرایند دو بار تست کشش انجام شده است، اما برای نمونه ۶ و ۸ پاس سه بار تست صورت پذیرفته است تا صحت نتایج مورد تایید قرار گیرد. روند تغییرات استحکامی کاملاً یکسان بوده ولی میزان استحکام‌های ارائه شده متوسط استحکام‌ها در نمونه‌های تست کششی مختلف می‌باشد.

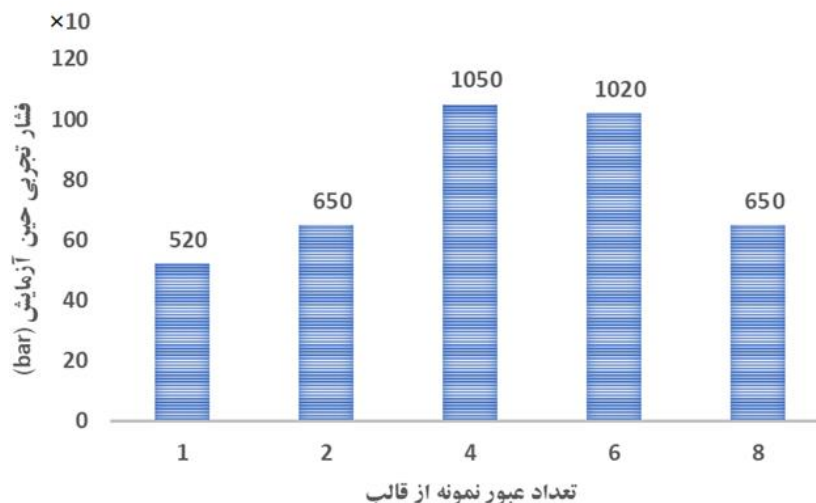


شکل ۷ نمودار تنش-کرنش حاصل از تست کشش نمونه‌ها در پاس‌های مختلف

نتایج تغییرات استحکامی نمونه‌ها در تطابق کامل با قانون هال-پچ، که بیان می‌کند استحکام قطعه با اندازه دانه رابطه معکوس دارد، می‌باشد. به عبارت دیگر مطابق شکل ۵ هر زمان اندازه دانه کاهش پیدا کرده است، در شکل ۷ استحکام روند افزایشی نشان داده است و به‌طور برعکس بعد از رشد دانه استحکام نیز کاهش پیدا کرده است. از نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها نیز مشخص است که تا عبور ۴ام استحکام کششی افزایش پیدا کرده است، اما در نمونه ۶ پاس افت اندکی در استحکام کششی نهایی نسبت به نمونه ۴ پاس دیده می‌شود. این میزان افت استحکام کششی نهایی در نمونه ۸ پاس بیشتر بوده به گونه‌ای که استحکام آن نزدیک به نمونه ۱ پاس می‌باشد. نکته دیگری که از نمودار مشخص است، روند کاهش انعطاف‌پذیری ماده می‌باشد. اصولاً استحکام و انعطاف‌پذیری یک رابطه معکوس با یکدیگر دارند. از آنجایی که استحکام نهایی کلیه نمونه‌ها نسبت به نمونه آنیل شده افزایش یافته، انتظار کاهش انعطاف‌پذیری از قبل وجود داشته است. این میزان کاهش انعطاف‌پذیری در نمونه ۱ پاس نسبت به نمونه آنیل شده حدود ۳۸ درصد می‌باشد که مقدار قابل توجهی است. در نمونه ۴ پاس انعطاف‌پذیری نسبت به نمونه ۲ پاس، علی‌رغم ریزتر شدن اندازه دانه و افزایش استحکام، اندکی افزایش یافته است. علت این امر را می‌توان با افزایش انرژی بازیابی دینامیکی در حین تست کشش توجیه کرد. به عبارت دیگر، بالابودن انرژی نقص چیدمان قطعه تحرکات نابجایی‌ها را افزایش می‌دهد و این امر برای چگالی‌های بالایی از نابجایی‌ها که در عبور ۴ام در نمونه ایجاد شده است، باعث می‌گردد در حین تست کشش نابجایی‌های بیشتری با همدیگر برخورد کرده و حذف بیشتر نابجایی‌های دوقطبی اتفاق بیفتد. این کاهش نسبی در چگالی نابجایی‌ها در حین تست کشش منجر به افزایش نسبی انعطاف‌پذیری خواهد شد.

۳-۳- فشار پرس

حداکثر فشار اعمال شده در حین فرایند برای هر نمونه در عبوردهی‌های مختلف در شکل ۸ ارائه شده است. لازم به ذکر است برای هر پاس مجزا مقدار میانگین حاصل از ۵ بار آزمایش بیان شده است. مشاهده می‌شود که روند میزان فشار پرس با افزایش تعداد عبور از قالب تا عبور ۶ام افزایش داشته و سپس یک افت قابل توجهی در میزان فشار لازم برای عبور نمونه ۸ پاس مشاهده می‌شود. این کاهش نسبی در فشار پرس منطبق با کاهش استحکام ذکر شده در بند قبلی می‌باشد.



شکل ۸ نمودار فشار تجربی اعمالی به نمونه‌ها در پاس‌های مختلف

۴- جمع‌بندی

در این مقاله به بررسی فرایند CEE به‌عنوان فرم اصلاح شده فرایند CEC بر روی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ پرداخته شد. با توجه به پدیده بازیابی دینامیکی در چنین آلیاژی با خلوص و انرژی نقص چیدمان بالا، بررسی اثر این فرایند به‌عنوان یکی از فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید و تغییرات میکروساختاری بعد از آن، از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است. به این منظور نمونه‌های آلومینیومی با پاس‌های ۱، ۲، ۴، ۶ و ۸ مورد بررسی میکروساختاری و استحکامی قرار گرفتند. نتایج حاصل شده به شرح ذیل می‌باشد:

- اندازه دانه از ۲۶۰ میکرومتر در نمونه آنیل شده تا ۴ پاس فرایند، یک روند کاهشی داشته و مقدار آن به ۱۵۰ میکرومتر رسید. بعد از ۴ پاس این روند کاهشی متوقف شده و اندازه دانه‌ها یک روند افزایشی در مقایسه با حالت قبل را نشان دادند.
- در تطابق با تغییرات اندازه دانه، میزان استحکام‌های تسلیم و کششی نمونه‌ها به ترتیب از ۵۰ و ۷۲ مگاپاسکال در نمونه آنیل شده به ۹۵ و ۹۹/۴ مگاپاسکال بعد از ۴ پاس فرایند CEE افزایش داشته و بعد از آن دچار یک کاهش نسبی شدند.
- علت رشد دانه و کاهش نسبی استحکام در پاس ۶ام به کمک پدیده بازیابی دینامیکی قابل توضیح می‌باشد. با توجه به انرژی نقص چیدمان بالا در این آلیاژ، تحرکات نابجایی‌ها زیاد بوده و همین امر بعد از افزایش تراکم نابجایی‌ها ناشی از تغییرشکل شدید در پاس ۶ام، امکان رسیدن نابجایی‌های دوقطبی به همدیگر و حذف آن‌ها را میسر می‌کند. کاهش نابجایی‌ها باعث ایجاد یک محرک برای رشد نسبی دانه و کاهش استحکام می‌شود. افزایش دما نیز در حین تغییرشکل در چنین ماده‌ای با مشخصات مذکور به بازیابی دینامیکی کمک می‌کند.

References

- [1] Lowe TC, Valiev RZ. The use of severe plastic deformation techniques in grain refinement. *Jom*. 2004 Oct;56:64-8. doi: 10.1007/s11837-004-0295-z
- [2] Torbati-Sarraf SA, Langdon TG. Properties of a ZK60 magnesium alloy processed by high-pressure torsion. *Journal of alloys and compounds*. 2014 Nov 15;613:357-63. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.06.056
- [3] Faraji G, Mashhadi MM, Kim HS. Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Materials Letters*. 2011 Oct 1;65(19-20):3009-12. doi: 10.1016/j.matlet.2011.06.039
- [4] Modanloo V, Akhoundi B, Mashayekhi A, Talebi-Ghadikolaee H. Prediction and optimization of strain homogeneity in PTCAP process using ANFIS, ANN, and Taguchi approaches. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2024 Jun 19;1-9. doi: 10.1007/s12008-024-01955-3
- [5] Segal V. Equal-channel angular extrusion (ECAE): from a laboratory curiosity to an industrial technology. *Metals*. 2020 Feb 12;10(2):244. doi: 10.3390/met10020244
- [6] Richert M, Liu Q, Hansen N. Microstructural evolution over a large strain range in aluminium deformed by cyclic-extrusion-compression. *Materials Science and Engineering: A*. 1999 Feb 1;260(1-2):275-83. doi: 10.1016/S0921-5093(98)00988-5

- [7] Pérez-Prado MT, Ruano OA. Grain refinement of Mg–Al–Zn alloys via accumulative roll bonding. *Scripta materialia*. 2004 Nov 1;51(11):1093-7. doi: [10.1016/j.scriptamat.2004.07.028](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.07.028)
- [8] Ensafi M, Faraji G, Abdolvand H. Cyclic extrusion compression angular pressing (CECAP) as a novel severe plastic deformation method for producing bulk ultrafine grained metals. *Materials Letters*. 2017 Jun 15;197:12-6. doi: [10.1016/j.matlet.2017.03.142](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.03.142)
- [9] Pardis N, Talebanpour B, Ebrahimi R, Zomorodian S. Cyclic expansion-extrusion (CEE): A modified counterpart of cyclic extrusion-compression (CEC). *Materials Science and Engineering: A*. 2011 Sep 25;528(25-26):7537-40. doi: [10.1016/j.msea.2011.06.059](https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.06.059)
- [10] Boroumand R, Babaei A, Mazloom Bashiri H, Zaheri MH. Processing MMC tubes via friction stir backward extrusion. *Karafan Quarterly Scientific Journal*. 2022 May 22;19(1):225-42. doi: [10.48301/kssa.2021.287462.1550](https://doi.org/10.48301/kssa.2021.287462.1550) [In Persian]
- [11] Akbarzadeh B, Gorji H, Bakhshi M, Jamaati R, Mirnia MJ. Development of a new process for the severe plastic deformation of AA 1050 to improve the mechanical properties. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Jun 21;7(4):19-29. [In persian]
- [12] Jafarzadeh H, Alizadi Balegh K. Study of the cyclic extrusion–compression in production of high stringed and ultrafine grained AM60 Magnesium noncircular thin section beams. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Jul 23;10(5):1-8. doi: [10.22034/ijme.2023.407082.1808](https://doi.org/10.22034/ijme.2023.407082.1808) [In persian]
- [13] Alimirzaloo V, Modanloo V. Investigation of the forming force in torsion extrusion process of aluminum alloy 1050. *International Journal of Engineering*. 2017 Jun 1;30(6):920-5.
- [14] 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)
- [15] Liu F, Fa T, Chen PH, Wang JT. Steady-state characteristics of fcc pure metals processed by severe plastic deformation: experiments and modelling. *Philosophical Magazine*. 2020 Jan 2;100(1):62-83. doi: [10.1080/14786435.2019.1671621](https://doi.org/10.1080/14786435.2019.1671621)
- [16] Gil Sevillano J. Dynamic steady state by unlimited unidirectional plastic deformation of crystalline materials deforming by dislocation glide at low to moderate temperatures. *Metals*. 2020 Jan 1;10(1):66. doi: [10.3390/met10010066](https://doi.org/10.3390/met10010066)
- [17] Moshkovich A, Rapoport LS. Effect of stacking-fault energy on the deformed structures and work hardening of Ag and Ni after scratching during early loading stage. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020 Nov;29:7231-8. doi: [10.1007/s11665-020-05228-4](https://doi.org/10.1007/s11665-020-05228-4)
- [18] Humphreys FJ, Prangnell PB, Bowen JR, Gholinia A, Harris C. Developing stable fine–grain microstructures by large strain deformation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1999 Jun 15;357(1756):1663-81. doi: [10.1098/rsta.1999.0395](https://doi.org/10.1098/rsta.1999.0395)
- [19] Cao Y, Ni S, Liao X, Song M, Zhu Y. Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2018 Nov 1;133:1-59. doi: [10.1016/j.mser.2018.06.001](https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.06.001)
- [20] Edalati K, Hashiguchi Y, Iwaoka H, Matsunaga H, Valiev RZ, Horita Z. Long-time stability of metals after severe plastic deformation: Softening and hardening by self-annealing versus thermal stability. *Materials Science and Engineering: A*. 2018 Jun 27;729:340-8. doi: [10.1016/j.msea.2018.05.079](https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.079)
- [21] Renk O, Kapp MW, Pippan R. Understanding structural evolution of nanostructures during deformation from 2D (3D) experiments. *InOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019 Aug 1 (Vol. 580, No. 1, p. 012021)*. IOP Publishing. doi: [10.1088/1757-899X/580/1/012021](https://doi.org/10.1088/1757-899X/580/1/012021)
- [22] Krawczynska AT, Kerber M, Suchecki P, Romelczyk-Baishya B, Lewandowska M, Setman D. The impact of the stacking fault energy of nanostructured metals on phenomena during annealing at the high hydrostatic pressure. *Materials Science and Engineering: A*. 2021 Mar 18;808:140913. doi: [10.1016/j.msea.2021.140913](https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140913)
- [23] Edalati K, Bachmaier A, Beloshenko VA, Beygelzimer Y, Blank VD, Botta WJ, Bryła K, Čížek J, Divinski S, Enikeev NA, Estrin Y. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters*. 2022 Apr 3;10(4):163-256. doi: [10.1080/21663831.2022.2029779](https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2029779)
- [24] Ahmadi F, Farzin M. Finite element analysis of ultrasonic-assisted equal channel angular pressing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2014 Aug;228(11):1859-68. doi: [10.1177/0954406213514961](https://doi.org/10.1177/0954406213514961)
- [25] Ahmadi F, Farzin M, Meratian M, Loeian SM, Forouzan MR. Improvement of ECAP process by imposing ultrasonic vibrations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015 Jul;79:503-12. doi: [10.1007/s00170-015-6848-1](https://doi.org/10.1007/s00170-015-6848-1)

- [26] Neshastegir Kashi A, Ahmadi F. The effect of ECAP die helix angle on the microstructure homogeneity of the processed samples by fem method. *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*. 2021 May 1;10(2):27-39.
- [27] Ahmadi F, Farzin M. Investigation of a new route for equal channel angular pressing process using three-dimensional finite element method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2014 Jul;228(7):765-74. doi: [10.1177/0954405413510309](https://doi.org/10.1177/0954405413510309)
- [28] Abbasi M, Ahmadi F, Farzin M. Production of ultrafine-grained titanium with suitable properties for dental implant applications by RS-ECAP process. *Metals and Materials International*. 2021 Apr;27:705-16. doi: [10.1007/s12540-020-00796-5](https://doi.org/10.1007/s12540-020-00796-5)
- [29] Lin J, Wang Q, Peng L, Roven HJ. Study on deformation behavior and strain homogeneity during cyclic extrusion and compression. *Journal of materials science*. 2008 Nov;43:6920-4. doi: [10.1007/s10853-008-2994-2](https://doi.org/10.1007/s10853-008-2994-2)
- [30] Pardis N, Chen C, Shahbaz M, Ebrahimi R, Toth LS. Development of new routes of severe plastic deformation through cyclic expansion-extrusion process. *Materials Science and Engineering: A*. 2014 Sep 8;613:357-64. doi: [10.1016/j.msea.2014.06.074](https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.074)
- [31] Truong DX, Nguyen MT, Hung NM, An NT. Effect of the cyclic expansion-extrusion (CEE) process on mechanical properties and the grain refinement of AA6061 aluminum alloy. *Journal of Military Science and Technology*. 2023 May 25;87:100-7. doi: [10.54939/1859-1043.j.mst.87.2023.100-107](https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.87.2023.100-107)
- [32] Babu V, Shanmugavel BP, Padmanabhan KA. On the microstructural homogeneity and mechanical properties of Al 6063 alloy processed by the cyclic expansion extrusion process. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020 Oct;29:6870-80. doi: [10.1007/s11665-020-05151-8](https://doi.org/10.1007/s11665-020-05151-8)
- [33] Marheb AM, Subhi AD. Enhancing the characteristics of ZK60 Mg alloy using cyclic expansion-extrusion (CEE) process. In *AIP Conference Proceedings 2023 Jul 14 (Vol. 2787, No. 1)*. AIP Publishing. doi: [10.1063/5.0161006](https://doi.org/10.1063/5.0161006)
- [34] Marheb AM, Subhi AD. Microstructure and Mechanical Properties of ZK60 Mg Alloy Processed by Cyclic Expansion-Extrusion (CEE) at Different Temperatures. *Engineering and Technology Journal*. 2022 Dec 1;40(12):1624-30. doi: [10.30684/etj.2022.133572.1194](https://doi.org/10.30684/etj.2022.133572.1194)
- [35] Sheik HM, Sanjeev S, Brijesh K. A review of severe plastic deformation. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*. 2017;6(7):66-85.
- [36] Faraji G, Torabzadeh H. An overview on the continuous severe plastic deformation methods. *Materials transactions*. 2019 Jul 1;60(7):1316-30. doi: [10.2320/matertrans.MF201905](https://doi.org/10.2320/matertrans.MF201905)
- [37] Huang KE, Logé RE. A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials. *Materials & Design*. 2016 Dec 5;111:548-74. doi: [10.1016/j.matdes.2016.09.012](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.09.012)
- [38] Sedláček R, Blum W, Kratochvil J, Forest S. Subgrain formation during deformation: physical origin and consequences. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2002 Feb;33:319-27. doi: [10.1007/s11661-002-0093-6](https://doi.org/10.1007/s11661-002-0093-6)
- [39] Vinogradov A, Estrin Y. Analytical and numerical approaches to modelling severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*. 2018 Jun 1;95:172-242. doi: [10.1016/j.pmatsci.2018.02.001](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.001)
- [40] Zaynullina L, Alexandrov I, Wei W. Effect of the stacking fault energy on the mechanical properties of pure Cu and Cu-Al alloys subjected to severe plastic deformation. *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*; 2017 September 11-17; Sevastopol, Russia. doi: [10.1051/mateconf/201712902032](https://doi.org/10.1051/mateconf/201712902032)
- [41] Murr LE. *Interfacial phenomena in metals and alloys*. Addison-Wesley Publishing Company; 1975.