



Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of AA5051 Aluminium Alloy Deformed by ECAP Method in BC Route

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hoseini S.M.J.¹ MSc,

Qods F.*¹ PhD,

Mohammadian Semnani H.R.¹ PhD

How to cite this article

Hoseini S.M.J, Qods F, Mohammadian Semnani H.R. Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of AA5051 Aluminium Alloy Deformed by ECAP Method in BC Route. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(9):2413-2421.

¹Materials Science and Engineering Department, Materials Faculty, Semnan University, Semnan, Iran

*Correspondence

Address: Materials Science and Engineering Department, Materials Faculty, Semnan University, Semnan, Iran. Postal Code: 3519645399
Phone: +98 (31) 31532386
Fax: -
qods@semnan.ac.ir

Article History

Received: June 12, 2020

Accepted: July 23, 2020

ePublished: September 20, 2020

ABSTRACT

This research is mainly focused on to study microstructure and mechanical properties of AA5051 aluminum alloy deformed by equal-channel angular pressing (ECAP) process at 200°C and in BC routes and 4 four passes. The ECAP processing was carried out using die with an intersecting channel angle ' Φ '= 120° and corner angle ' Ψ '= 20°. The results of uniaxial tensile test showed that tensile strength was found to be increased from 115MPa for annealed sample to 239MPa after four passes ECAP in route BC that shows that the strength in ECAP samples has increased. In addition, the percentage of elongation also decreased in initially passes and then increased slowly. Microstructure and grain refinement of specimens were investigated by optical microscopy and scanning electron microscopy and fractography were investigated by scanning electron microscopy. The grain size of annealed sample was 123 μ m and decreased to 18 μ m after four passes ECAP in route BC. The hardness also increased from 51HV in annealed sample to 90HV the fourth passes.

Keywords ECAP; Severe Plastic Deformation; Strength; AA5051 Alloy

CITATION LINKS

- [1] Bulk nano Structured materials from severe plastic ... [2] Quantative study of grain refinement in Al-Mg Alloy processed by equal channel Angular pressing at cryogenic ... [3] Influence of fraction of high angle boundaries on the mechanical behavior of an ultrafine ... [4] High Strength AA7050 Al alloy processed by ECAP: Microstructure and mechanical ... [5] Recrystallization and related annealing ... [6] Microstructural evolution in copper processed by sever plastic ... [7] Principal of equal channel angular pressing as a processing tool for ... [8] The principles of grain refinement in equal-channel angular ... [9] ensile properties and fracture mechanism of Al-Mg Alloy subjected ... [10] Review of warm forming of aluminum ... [11] Bifurcation of thermal restoration processes in deformed iron ... [12] Microstructure and strengthening mechanisms in an Al-Mg-Si alloy processed by equal channel angular ... [13] Grain refinement in aluminum alloy 2219 during ECAP ... [14] Effect of equal channel angular pressing (ECAP) on the evolution of texture, microstructure and mechanical properties ... [15] Grain refinement in a commercial Al-Mg-Sc alloy under hot ECAP ... [16] Large strain work hardening ... [17] Strain-induced grain evolution in an austenitic stainless steel under warm ... [18] Microstructure and mechanical properties of AA6082-T6 by ECAP under warm ... [19] Dynamic recrystallization mechanisms operating in a Ni-20%Cr alloy under ... [20] Influence of pressing temperature on microstructural development in equal-channel ... [21] Effect of ECAP temperature on microstructure and mechanical properties of ... [22] Room and high temperature ECAP processing of Al-10%Si ... [23] Microstructural and hardness evolution of AZ80 alloy after ECAP and post-ECAP ... [24] The texture developement of ECAP processed AA1050 aluminum before and after a final anneal: Effect of the initial ... [25] Texture and microstructure evolution of A390 aluminum alloy during ... [26] Effect of heat treatment and deformation temperature on the mechanical properties of ECAP processed ZK60 ... [27] Microstructural evaluation and superplasticity in an Mg-Gd-Y-Zr alloy after processing by different ... [28] Influence of damage and texture evolution on limit strain in biaxially stretched ... [29] Stacking fault energies and slip in nanocrystalline ... [30] Mechanical behavior of nanocrystalline metals ... [31] he process of grain refinement in equal channel angular ...

بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم AA5051 تغییرشکل یافته با روش ECAP در مسیر Bc

سید محمدجواد حسینی MSc

گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مواد، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

فتح اله قدس* PhD

گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مواد، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

حمیدرضا محمدیان سمنانی PhD

گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مواد، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در این تحقیق، مطالعه بر روی خواص مکانیکی و ریزساختاری آلیاژ آلومینیوم AA5051 که در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و در مسیر Bc و در ۴ پاس تحت فرآیند فشارش زاویه‌ای در کانال‌های هم‌مقطع (ECAP) قرار گرفته‌اند، انجام شد. فرآیند ECAP در یک قالب با زاویه بین دو کانال (Φ) برابر با ۱۲۰ درجه و زاویه کمان بیرونی (Ψ) برابر با ۲۰ درجه انجام گرفت. نتایج آزمون کشش تک‌محوره نشان داد که استحکام کششی ماده از ۱۱۵ مگاپاسکال در نمونه بازیخت‌شده اولیه به ۲۳۹ مگاپاسکال در نمونه پاس چهارم در مسیر Bc می‌رسد که نشان می‌دهد استحکام در نمونه‌های ECAP شده افزایش داشته است. همچنین درصد تغییرات طول نیز در پاس‌های متوالی ابتدا کاهش و سپس تا حدودی افزایش می‌یابد. بررسی ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی و شکست‌نگاری نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام گرفت. اندازه دانه از ۱۲۳ میکرومتر در نمونه بازیخت‌شده به ۱۸ میکرومتر در نمونه پاس چهارم در مسیر Bc رسید. سختی از ۵۱ در نمونه بازیخت اولیه تا ۹۰ ویکرز در پاس چهارم افزایش یافته است.

کلیدواژه‌ها: ECAP، تغییر شکل پلاستیک شدید، استحکام، آلیاژ AA5051

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۲

*نویسنده مسئول: Qods@semnan.ac.ir

مقدمه

تغییر شکل پلاستیک شدید (Severe Plastic Deformation; SPD) نقطه عطفی در صنعت شکل‌دهی فلزات به‌شمار می‌رود؛ فرآیندهایی که در آن ماده ضمن تغییر شکل، ابعاد اولیه خود را حفظ می‌کند و دچار دگرگونی در خواص ماده می‌شود.

مطابق با رابطه هال-پچ (Hall-Petch) (رابطه ۱) اندازه دانه تأثیر به‌سزایی بر استحکام و البته سایر خواص مکانیکی ماده دارد^[1]؛ به این ترتیب ریزدانه‌سازی می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در افزایش استحکام و بهبود خواص مکانیکی ماده باشد.

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y d^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

در رابطه ۱، σ_0 تنش اصطکاکی، K_y ثابت تسلیم و d اندازه دانه است. با توجه به این رابطه استحکام ماده با کاهش اندازه دانه افزایش می‌یابد و این افزایش در مواد با دانه‌بندی بسیار ریز تا سطوح بالایی ادامه پیدا می‌کند.

فشارش زاویه‌ای کانال‌های هم‌مقطع (ECAP) یکی از مهم‌ترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است که برای دست‌یابی به

دانه‌های خیلی ریز (Ultra Fine Grain; UFG) آلومینیوم و آلیاژهای آن کاربرد وسیعی دارد^[2].

بیشتر فعالیت‌هایی که برای ریزکردن دانه‌ها به‌کار می‌رود با بهینه‌کردن پارامترهای ECAP انجام می‌گیرد. فرآیند بهینه برای ECAP نیاز به دمای اکستروژن تا حد ممکن پایین و بیشترین کرنش تجمعی دارد. افزایش ترکیب منیزیم در آلیاژهای آلومینیوم-منیزیم (Al-Mg) با کاهش انرژی نقص در چیده‌شدن (Stacking Fault Energy; SFE) همراه است. اگر چه وقتی آلیاژهای Al-Mg شامل بیشتر از ۴ درصد وزنی منیزیم باشند و تحت فرآیند ECAP قرار گیرند، ترک و شکستگی می‌تواند اتفاق بیفتد^[2, 3]. ماهیت مرزهای دانه‌ای که تولید می‌شود، معمولاً با استفاده از زاویه عدم تطابق بین مرزخانه‌ها مشخص می‌شود، مرزهای بزرگ و کوچک زاویه به‌ترتیب، به‌صورت $\phi \geq 15^\circ$ و $\phi \leq 2^\circ$ تعریف می‌شود^[3].

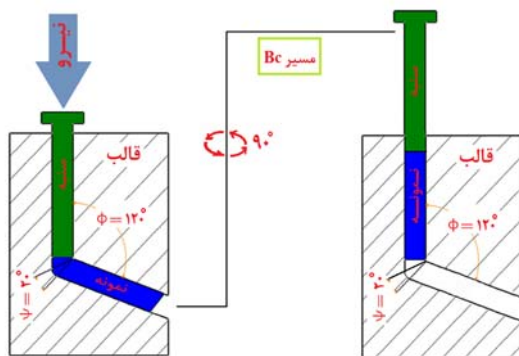
در فرآیند ECAP بعد از تعداد پاس‌هایی تحت تغییر شکل برشی شدید، بافت اصلی ماده به دانه‌های بسیار ریز یا موادی با ساختار نانو شکسته می‌شود. ماده بین دو کانال متقاطع که زاویه بین آنها معمولاً ۹۰ یا ۱۲۰ درجه است، تحت پرس قرار می‌گیرد و کرنش بسیار زیادی به قطعه وارد می‌شود. اعمال کرنش‌های بزرگ باعث افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها می‌شود که این انبوه نابه‌جایی‌ها در ابتدا به‌صورت مرزخانه‌های فرعی و در حین پاس‌های ECAP به شکل مرزهای دانه زاویه بزرگ جدید نمایان می‌شوند^[4]. وقتی که کرنش‌های زیادی به‌واسطه تغییر شکل شدید در نمونه‌ها اعمال می‌شود، ریزساختاری تشکیل می‌شود که دارای کسر زیادی از مرزخانه‌های زاویه بزرگ است. حرکات جزئی مرزها در حین تغییر شکل باعث ایجاد ریزساختار دانه‌ریزی شامل بلورهایی که توسط مرزهای زاویه بزرگ احاطه شده‌اند، می‌شود. این نوع از ریزساختار بسیار شبیه به ریزساختاری است که از تبلور مجدد متداول به‌دست می‌آید. زمانی که یک ماده پلی‌کریستال تغییر شکل پیدا می‌کند، سطح مرزخانه نیز با برخی متناسب با حالت تغییر شکل افزایش می‌یابد. در حین تغییر شکل پلاستیک، سلول‌ها یا دانه‌های فرعی تشکیل می‌شوند و پس از یک کرنش متوسط (در حدود ۱/۱۵) تغییر چندانی در آنها پدیدار نمی‌شود. بنابراین با افزایش کرنش، درصد مرزهای زاویه بزرگ افزایش می‌یابد و همچنین مرزهای زاویه بزرگی در اثر تقسیم‌شدن دانه‌ها ایجاد می‌شوند^[5].

اساس این مدل در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل ۱- الف توزیع تصادفی نابه‌جایی‌ها را نشان می‌دهد که از نظر انرژی ناپایدار است. با ادامه تغییر شکل و افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها، به‌علت تمایل به کاهش انرژی، مرزهای فرعی تشکیل می‌شوند (شکل ۱- ب). مطابق شکل ۱- ت مرزهای فرعی تشکیل‌شده از پیش‌روی نابه‌جایی‌ها ممانعت می‌کند. به‌تدریج با افزایش کرنش پلاستیک اعمالی، زاویه عدم تطابق بین دانه‌های مجاور افزایش می‌یابد. دانه‌های فرعی طویل‌شده ترجیح می‌دهند به دانه‌های

برش به صورت متوالی در سه صفحه بلورنگاری حین ECAP در مسیر Bc. مرزانه‌های فرعی با سرعت بیشتری نسبت به سایر مسیرها تمایل به چرخش و تبدیل به مرزانه‌های بزرگ زاویه دارند. در نتیجه پس از ۴ پاس ECAP، باندهایی از دانه‌های فرعی در مجموعه‌ای از صفحات مجزا و متقاطع در طول نمونه گسترش می‌یابند که منجر به توسعه مرزانه‌های بزرگ زاویه، به صورت هم‌محور می‌شود.

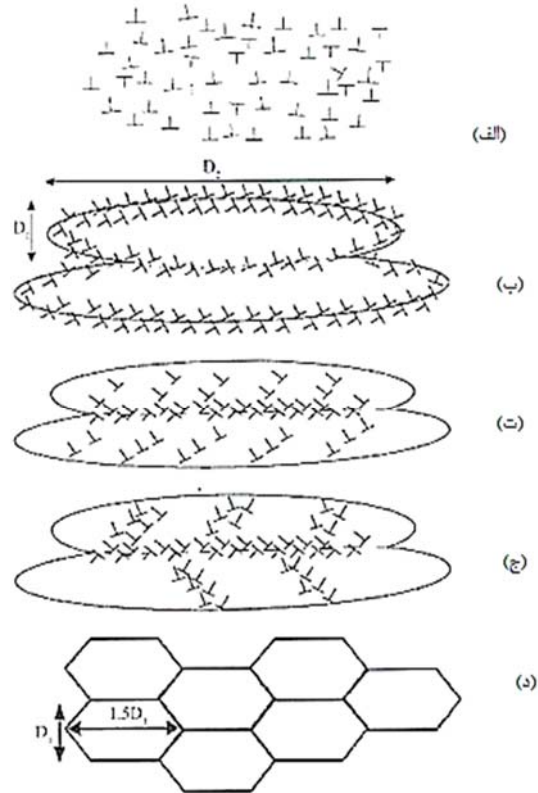
روش ECAP یک فرآیند سیلان فلز است که باعث اعمال برش ساده در آن می‌شود و چندین پارامتر اساسی از قبیل کرنش اعمال شده در هر قسمت عبور از قالب، سیستم‌های لغزشی عمل‌کننده در حین اعمال پرس و برآیند الگوهای برشی موجود در هر بیلت پرس شده مؤثر است. همچنین تمام این پارامترها نقش تعیین‌کننده‌ای در ماهیت ساختار مواد UFG دارد [9]. از لحاظ عملی پرس نمونه‌ها در دمای بالاتر ساده‌تر است ولی ریزساختار بهینه خیلی ریزشده دانه‌ها وقتی است که پرس در پایین‌ترین دمای ممکن انجام شود، به طوری که پرس بتواند بدون هیچ گونه ترک مهمی در بیلت اعمال شود. محققان معتقدند که در آلیاژهای Al-Mg در محدوده دمای ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد که شکل‌پذیری افزایش پیدا کرده و کیفیت سطح محصول نهایی بهتری به دست می‌آید [10]. بر همین اساس دمای انجام ECAP، ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد.

شماتیکی از اجزای مختلف یک قالب ECAP و مسیر مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. در این فرآیند کرنش بسیار زیادی به نمونه اعمال می‌شود که تابعی از زاویه قالب (ϕ)، شرایط روانکاری و تنش سیلان ماده است. برای جلوگیری از پرشدن گوشه‌ای یا ایجاد منطقه مرده، وجود یک زاویه انحنای کمان بیرونی در نقطه تقاطع دو کانال قالب (ψ) ضروری است [4]. در این تحقیق فرآیند ECAP بر روی آلیاژ AA5051 در مسیر Bc و در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده و اثر ECAP بر روی این آلیاژ مورد بررسی قرار گرفته است. بیشتر تحقیقات انجام شده در دمای محیط و در دمای کار داغ صورت گرفته است. این آلیاژ عملیات حرارتی‌پذیر نبوده و استحکام‌پذیری آن از طریق کار مکانیکی و کار سرد قابل افزایش است.



شکل ۲ شماتیکی از قالب ECAP و مسیر مورد استفاده (مسیر Bc)

کوچک‌تر شکسته شوند (شکل ۱-ج) و در نتیجه ساختار هم‌محور تشکیل می‌شود که در شکل ۱-د نشان داده شده است [6]. این همان پدیده‌ای است که در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید مشاهده و تبلور مجدد پیوسته نامیده می‌شود [5].



شکل ۱ شماتیک تغییرات ریزساختار در حین تغییر شکل پلاستیکی شدید: الف) توزیع همگن ناهنجاری‌ها، ب) تشکیل سلول سلول طولیل شده، ت) قفل شدن ناهنجاری‌ها توسط مرزهای فرعی، ج) شکسته شدن دانه‌های فرعی طولیل شده، د) آرایش مجدد مرزانه‌های فرعی و تشکیل دانه‌های بسیار ریز [6]

برای انجام فرآیند ECAP از چهار مسیر اصلی می‌توان استفاده کرد و این مسیرها سیستم‌های لغزشی مختلف در طی عملیات پرس ایجاد می‌کند که منجر به تولید ریزساختارهای مختلف توسط ECAP می‌شود. مسیرهای مختلف و سیستم‌های لغزشی در صفحات X، Y و Z در فرآیند ECAP به طور خلاصه تعریف می‌شود: در مسیر A نمونه بدون هیچ گونه چرخشی عبور می‌کند، در مسیر BA نمونه تحت زاویه ۹۰ درجه به صورت متناوب و در پاس‌های پیاپی عبور می‌کند، در مسیر Bc نمونه تحت زاویه ۹۰ درجه و در همان جهت (ساعت‌گرد یا پادساعت‌گرد) بین هر پاس و مسیر C نمونه تحت زاویه ۱۸۰ درجه بین پاس‌ها چرخش دارد [7]. به دلیل تقویت برش ضمن چرخش نمونه بین پاس‌های ECAP و تکمیل فرآیند برشی ضمن این فرآیند، برخی از محققان از جمله لانگدون [8] به بیشتربودن پالایش دانه‌ای (Grain Refinement) در مسیر Bc نسبت به سایر مسیرها اشاره کرده‌اند. به علت انجام

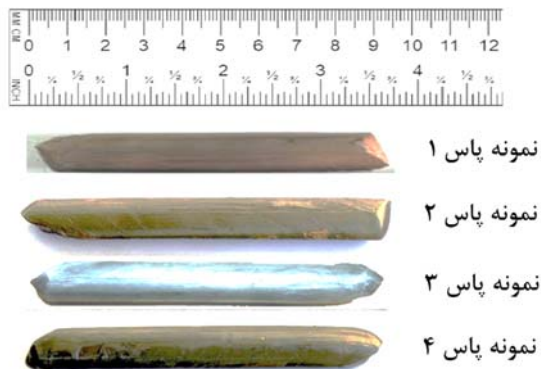
مواد و روش تحقیق

از آلیاژ آلومینیوم AA5051 استفاده شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ مطابق جدول ۱ است.

نمونه‌های استوانه‌ای شکل و دارای قطر ۱۳ و ارتفاع ۸۵ میلی‌متر بودند که سطح تمامی نمونه‌ها کاملاً صیقل داده شده بود و جهت اطمینان از عدم وجود عیوب سطحی روی نمونه‌های مورد استفاده، کلیه سطوح با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد بازپخت شدند تا ساختار همگنی در نمونه‌ها به دست آید. قالب مورد استفاده مطابق شکل ۳ است.

جدول (۱) آنالیز شیمیایی آلیاژ AA5051

نام عنصر	درصد وزنی
Al	۹۷/۸۹
Ti	۰/۰۱
Cr	۰/۰۲
Zn	۰/۰۲
Mn	۰/۰۷
Cu	۰/۰۷
Fe	۰/۱
Mg	۱/۶۵
Si	۰/۰۳



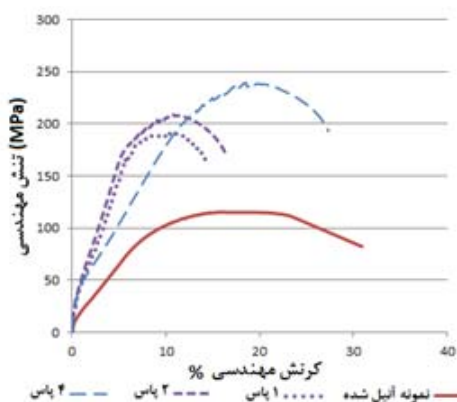
شکل (۴) نمونه‌های ECAP شده در پاس‌های مختلف در مسیر Bc

نتایج

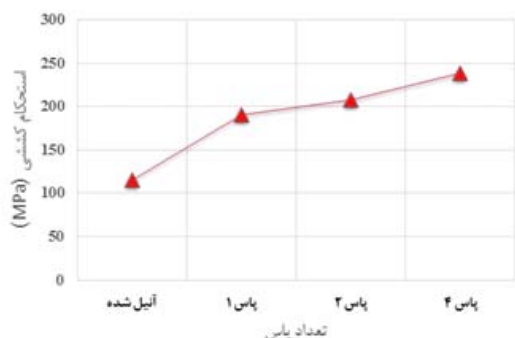
آزمون کشش

منحنی‌های تنش- کرنش مهندسی برای این آلیاژ برای نمونه بازپخت شده اولیه و پس از یک، ۲ و ۴ پاس ECAP در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در مسیر Bc آورده شده است.

انجام یک پاس ECAP در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در مسیر Bc افزایش استحکام و کاهش ازدیاد طول آن را در بر داشته است. همان طور که در نمودارهای ۱ و ۲ ملاحظه می‌شود با افزایش تعداد پاس‌ها استحکام افزایش پیدا می‌کند و همچنین ازدیاد طول نمونه‌ها بعد از پاس اول روندی صعودی دارد.



نمودار (۱) منحنی تنش- کرنش مهندسی نمونه‌های بازپخت شده اولیه و یک، ۲ و ۴ پاس ECAP شده



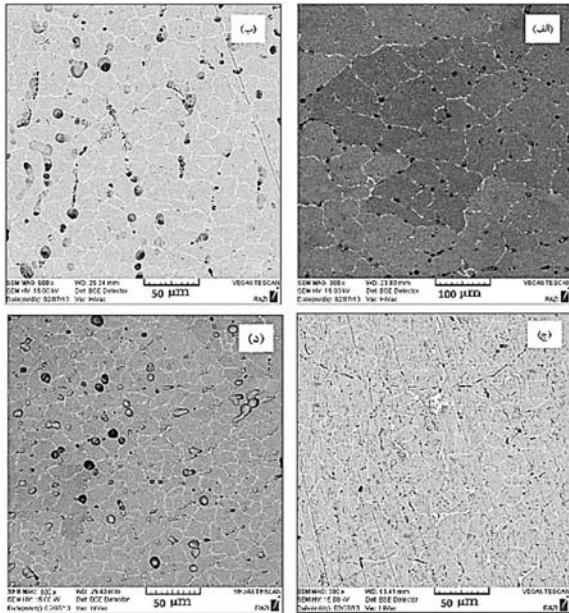
نمودار (۲) منحنی تغییرات استحکام با تعداد پاس ECAP



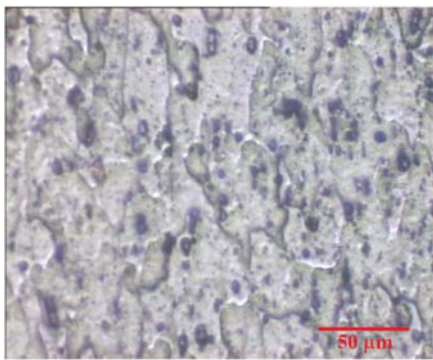
شکل (۳) قالب ECAP و پرس استفاده شده

زاویه بین کانال‌ها در این قالب ۲۰ درجه است همچنین برای حذف منطقه مرده در حین تغییر شکل، زاویه ۲۰ درجه در نظر گرفته شده است. از ماده دی‌سولفیدمولیبدن (MoS_2) به عنوان ماده روانکار برای کاهش تأثیر اصطکاک استفاده شد. با توجه به اینکه فرآیند در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت، برای افزایش دمای قالب از المنت‌های صفحه‌ای در طراحی قالب استفاده شد که توسط یک ترموکوپل دمای قالب کنترل شد. بدین ترتیب فرآیند ECAP بر روی نمونه‌های بازپخت شده در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و در مسیر Bc و در ۴ پاس انجام شد. سرعت حرکت فک دستگاه در تمام فرآیند ۱۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. تصاویر نمونه‌های ECAP شده در پاس‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.

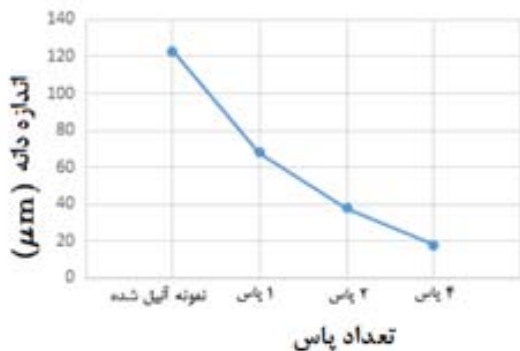
نمودار ۵ آورده شده است. اعداد گزارش شده میانگین پنج عدد اندازه‌گیری میکروسختی هستند که از مقطع طولی نمونه‌ها گرفته شده است. رشد سختی در تمامی نمونه‌ها قابل مشاهده است. افزایش سختی در نمونه‌های کار شده به دلیل افزایش چگالی ناهنجاری‌های متحرک است که در اثر انجام تغییر شکل پلاستیک شدید در ماده به وجود آمده‌اند.



شکل ۵ تصاویر SEM گرفته شده از نمونه‌های؛ الف) بازپخت شده، ب) یک پاس، ج) ۲ پاس، د) ۴ پاس، ECAP شده در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در مسیر BC بر روی آلیاژ AA 5051



شکل ۶ تصویر گرفته شده از نمونه یک پاس ECAP شده



نمودار ۳) منحنی مقایسه اندازه دانه به دست آمده بر حسب تعداد پاس ECAP

ریزساختار

ریزساختار به دست آمده توسط پرتوی الکترون برگشتی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای نمونه اولیه و نمونه‌ای که یک پاس، ۲ پاس و ۴ پاس ECAP شده، در شکل ۵ آورده شده است. انجام یک پاس ECAP در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد منجر به ریزشدن دانه‌ها شده است. میانگین اندازه دانه که با استفاده از نرم‌افزار Clemex و استاندارد ASTM E-112 برای نمونه بازپخت شده و نمونه یک، ۲ و ۴ پاس ECAP شده به ترتیب ۱۲۳، ۶۸، ۳۸ و ۱۸ میکرومتر محاسبه شد. با افزایش تعداد پاس‌ها اندازه دانه کاهش پیدا کرده است. نرخ کاهش اندازه دانه با افزایش تعداد پاس‌ها پس از پاس اول تا حدودی کاهش یافته است. تأثیر ECAP را در یک پاس می‌توان به کشیده شدن دانه‌های اولیه ضمن تشکیل دانه‌های فرعی و توسعه یک ساختار الیافی شکل که در شکل ۶ نشان داده شده است، دانست که در آن نوارها تقریباً به موازات جهت ECAP مرتب شده‌اند. با توجه به اینکه این آلیاژ ۱/۶٪ منیزیم و مقداری عناصر ناخالصی مانند فلئور و سیلیسیوم در ترکیب خود دارد، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیبات بین فلزی این عناصر در مرز دانه‌ها و داخل دانه‌ها انتشار پیدا کرده‌اند. هر چند برخی از نقاط سیاه‌رنگ در تصاویر متالوگرافی را می‌توان به دلیل انجام عملیات الکتروچاپ و ایجاد تلاطم در محلول اچ مربوط دانست.

همان طور که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پاس در فرآیند ECAP در مسیر BC در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بر روی آلیاژ AA5051 اندازه دانه به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. مطابق با رابطه هال-پیچ (رابطه ۱) استحکام با کاهش اندازه دانه افزایش می‌یابد. نمودار ۴ رابطه بین اندازه دانه و استحکام به دست آمده در مسیر BC را نشان می‌دهد. /تکنیسون^[11] در تحقیقی مشابه با توجه به نوع کرنش گذاری $m = -0.5$ را تعیین کرده است.

$$\sigma = \sigma_0 + ad^m \quad (2)$$

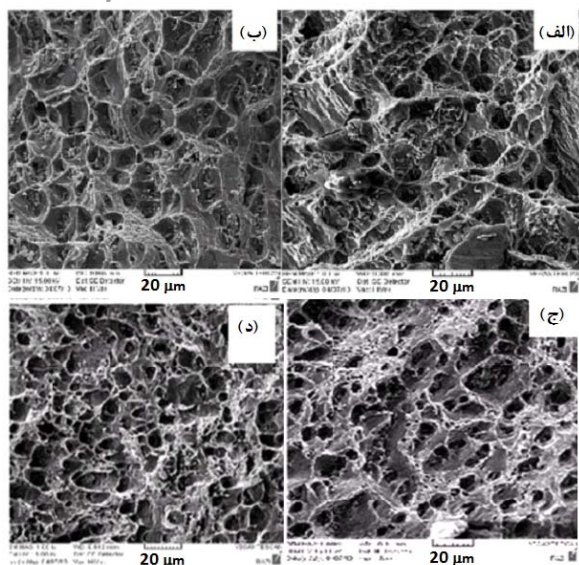
خطای مشاهده شده در رابطه ۲، خصوصاً در پاس‌های اولیه، مربوط به خطای اندازه‌گیری و عواملی مانند ناهمگن بودن کرنش اعمالی، اصطکاک و نیروهای محدودکننده از دیواره قالب است. مطابق با نمودار ۴ می‌توان رابطه ۳ را بین اندازه دانه و استحکام این آلیاژ به دست آورد.

$$\sigma = -\frac{7.5836}{d} + \frac{3259.8}{\sqrt{d}} \quad (3)$$

خلفا و همکاران^[12] در پژوهشی بر روی آلیاژ آلومینیوم AA6060 رابطه مشابهی را با استفاده از پارامترهایی مانند استحکام بخشی ناشی از ناهنجاری‌ها، محلول جامد و اندازه دانه به دست آوردند.

میکروسختی

میکروسختی اندازه‌گیری شده در مقطع طولی (مقطع ED) برای نمونه بازپخت شده اولیه و نمونه‌های یک، ۲ و ۴ پاس ECAP شده در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در مسیر BC آلیاژ AA5051 در

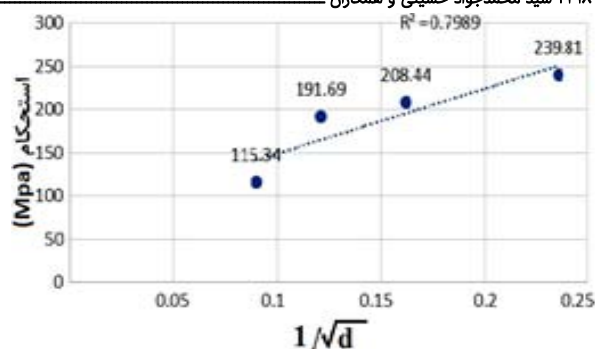


شکل ۷) تصاویر میکروسکوپی از سطح شکست مقطع عرضی؛ الف) بازپخت شده، ب) نمونه یک پاس، ج) ۲ پاس، د) ۴ پاس ECAP شده

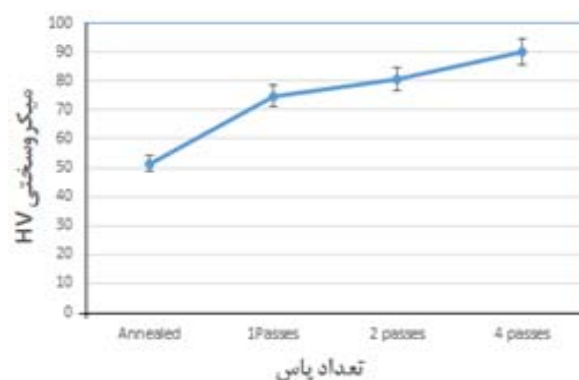
بحث

انجام ECAP نه تنها باعث کاهش میانگین اندازه دانه‌ها شده است، بلکه ریزساختار به دست آمده پس از ۴ پاس شامل دانه‌های هم‌محور ریز است. در نهایت در پاس چهارم گسترش دانه‌های بسیار ریز در تمامی مناطق اعمال کرنش را شاهد بوده‌ایم. در پاس‌های اولیه ECAP چگالی بالایی از نابه‌جایی‌های تولید شده منجر به تشکیل دانه‌های فرعی کوچک زاویه با زاویه عدم تطابق کم می‌شود که به صورت همگن در مرز دانه‌های اولیه جوانه زنی کرده‌اند و در احاطه مرزهای کوچک زاویه بی‌شماری که ضمن به هم پیوستن نابه‌جایی‌ها تولید شده‌اند و به صورت باندهای تغییر شکل ظاهر می‌شوند، قرار می‌گیرند. مازورینا و همکاران [13] این باندهای تغییر شکل را حاوی مقادیر بی‌شماری دانه‌های فرعی که در جهتی موازی با جهت اکستروژن کشیده شده‌اند و دارای عدم تطابق با زاویه کمتر مساوی ۱۵ درجه هستند، می‌دانند. سورش و همکاران [14] علت کاهش اندازه دانه‌ها با افزایش تعداد پاس‌های ECAP را با تقسیم و تکه‌تکه شدن دانه‌ها به وسیله باندهای تغییر شکل مرتبط دانسته‌اند.

با استناد به نتایج به دست آمده، می‌توان گفت که با افزایش تعداد پاس‌های ECAP از ۲ تا ۴، باندهای تغییر شکل به سرعت توسعه یافته‌اند. پس از انجام ۲ پاس ECAP باندهای تغییر شکل بزرگ زاویه تشکیل می‌شوند و پس از آن با افزایش تعداد پاس‌ها تا ۴ پاس، چگالی آنها به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. از طرفی مناطقی از نمونه که در آنها چگالی این باندهای برشی زیاد است، در مقایسه با سایر مناطق که در آنها فقط دانه‌های فرعی کوچک زاویه تحت تأثیر ECAP و بازپخت اولیه به وجود آمده‌اند، بیشتر است، مناطق مناسبی برای جوانه‌زنی و تشکیل دانه‌های جدید



نمودار ۴) رابطه بین استحکام و اندازه دانه به دست آمده برای نمونه‌های بازپخت شده اولیه و نمونه‌های یک، ۲ و ۴ پاس ECAP شده



نمودار ۵) منحنی سختی به دست آمده بر حسب تعداد پاس برای نمونه‌های ECAP شده

سطح شکست

تصاویر میکروسکوپ الکترونی گرفته شده از سطح شکست مقطع عرضی نمونه‌های بازپخت شده اولیه و نمونه یک، ۲ و ۴ پاس ECAP شده در شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، نمونه بازپخت شده دارای یک منطقه گردنی واضح و قابل تشخیص است. به علت کارسختی انجام شده در نمونه پس از ECAP مکانیزم شکست پس از انجام فرآیند ECAP تغییر کرده و حالت برشی به خود می‌گیرد. همان‌طور که مشخص است با افزایش تعداد پاس‌ها و اعمال کرنش‌های بیشتر و کارسخت شدن نمونه‌ها تعداد حفره‌ها بیشتر و عمق آنها کمتر شده است. در واقع نمونه دارای حفره‌های کم عمقی است که در صفحه برش و در جهت برش کشیده شده‌اند. عمق حفره‌های موجود برای نمونه اولیه در حدود ۱۰ میکرون است و این در حالی است که عمق آن برای نمونه یک پاس در حدود ۱۰ میکرون و برای نمونه‌های دو پاسی کمتر از ۱۰ میکرون است. کاهش عمق حفره‌های کشیده شده در جهت برش با انجام ۲ پاس ECAP را می‌توان به پالایش دانه‌ای به وجود آمده در اثر ECAP، کاهش اندازه دانه‌ها و همچنین توزیع ذرات و رسوبات نسبت داد که با انجام ECAP به صورت یکنواخت‌تر در طول ریزساختار توزیع شده‌اند.

نسبت داد. بنابراین انتظار می‌رود با افزایش تعداد پاس‌های ECAP در این دما ریزساختار دارای رفتار دوگانه باشد. یک‌سری از دانه‌ها تحت تأثیر پدیده رشد دانه‌ها رشد کرده و در جهت اکستروژن کشیده شده‌اند که چگالی نابه‌جایی‌ها درون آنها ناچیز بوده و سایر دانه‌ها که ناشی از برهم‌کنش نابه‌جایی‌ها هستند، حاوی مقادیر زیادی نابه‌جایی بوده و با توجه به بالابودن دمای کاری تحت تأثیر فرآیند بازیابی دینامیکی انرژی داخلی آنها ناچیز بوده و تمایل زیادی به تقسیم‌شدن و تشکیل دانه‌های ریز تبلور مجدد یافته دارند که در پژوهش‌های شاعری و همکاران [21] و کاردوسو و همکاران [22] نیز مشاهده شده است. در واقع، تکامل پالایش دانه ای توسط فرآیند ECAP، در درجه اول با تبلور مجدد دینامیکی انجام می‌شود [23]. وگا و همکاران [24] معتقدند تبلور مجدد دینامیکی در آلومینیوم خالص حتی پس از اولین پاس ECAP مشاهده می‌شود، در حالی که در آلیاژهای تجاری، این فرآیند تنها پس از ۴ پاس ECAP حاصل می‌شود. با این حال، از ریزساختار مشاهده می‌شود که پالایش دانه و تبلور مجدد دانه در اولین پاس ECAP به‌دست آمده است. همان طور که قبلاً ذکر شد، دمای کاری بالا منجر به حصول تبلور مجدد پس از طی مرحله‌ای از بازیابی در چند گذر اول می‌شود [25].

افزایش سختی در نمونه‌های کار شده به دلیل افزایش چگالی نابه‌جایی‌های متحرک است که در اثر انجام تغییر شکل پلاستیک شدید در ماده به‌وجود آمده‌اند. عامل تأثیرگذار اصلی در تغییر سختی ساختار فرعی به‌وجود آمده، ناشی از پرخش دانه‌های اصلی و تشکیل مرزهای بزرگ زاویه ذکر شده است. بدین طریق می‌توان انجام پالایش دانه را بهترین روش برای افزایش سختی به‌دست‌آمده در اثر ECAP دانست. با این حال بالابودن دمای تغییر شکل باعث شده تا فرآیندهای لغزش متقاطع و صعود نابه‌جایی‌ها که نیاز به فعال‌سازی حرارتی دارند، راحت‌تر صورت گیرد و علاوه بر وقوع بازیابی دینامیکی و احیاناً تبلور مجدد دینامیکی، خصوصاً در پاس چهارم، چگالی نابه‌جایی‌های غیرمتحرک داخل دانه‌ها زیاد شود و افزایش آرام سختی را در پاس‌های بالاتر به همراه داشته باشد.

انجام یک پاس ECAP در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در مسیر Bc افزایش استحکام و کاهش ازدیاد طول آن را در بر داشته است. افزایش استحکام ناشی از کارسختی و ریزشدن دانه‌ها ناشی از این فرآیند است. افزایش استحکام ناشی از کارسختی در تقابل ریزشدن دانه‌ها در اثر پالایش دانه‌ای در افزایش ازدیاد طول است. بدین معنی که غیریکنواخت بودن توزیع کرنش اعمالی منجر به توزیع غیریکنواخت دانه‌ها و همچنین به‌وجود آمدن ساختار سلولی و توزیع غیریکنواخت دانه‌ها باعث افزایش استحکام و کاهش ازدیاد طول ناشی از کارسختی می‌شود. با اعمال کرنش‌های بیشتر تأثیر پالایش دانه‌ای بیشتر از کارسختی به‌وجود آمده افزایش استحکام و ازدیاد طول را به‌صورت همزمان در پی داشته است که در تحقیق یون و همکاران [26] نیز مشاهده شده است. اُفت شدید ازدیاد طول

خواهند بود. مطابق با تحقیق سیتدیگوف و همکاران [15] که در زمینه انجام ECAP داغ انجام شده است و نتیجه‌ای مشابه به‌دست آمده است، در زمینه زاویه عدم تطابق می‌توان گفت که در حین انجام ECAP تقسیم زاویه عدم تطابق شامل سه مرحله است. در مرحله اول به آرامی تا زاویه ۵ درجه افزایش می‌یابد، در مرحله دوم سرعت افزایش زاویه عدم تطابق بیشتر شده و به حداکثر مقدار خود رسیده و در نهایت در مرحله سوم به آرامی تا مقدار نهایی افزایش می‌یابد. سرعت آرام افزایش زاویه عدم تطابق در مرحله اول را می‌توان به افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها و تشکیل ساختار فرعی و افزایش چگالی باندهای تغییر شکل که تا یک کرنش بحرانی به‌خصوصی تغییر چشمگیری در آن دیده نمی‌شود، نسبت داد. توجه به این نکته ضروری است که رسیدن به این کرنش بحرانی مستقل از تغییر شکل به‌وجود آمده بوده و در شرایط پایدار شارش در بسیاری آلیاژهای آلومینیوم حین ECAP گرم و به‌خصوص داغ دیده شده است [16]. همچنین تیخونو و همکاران [17] تفاوت بین مکانیزم‌های کار داغ و گرم را تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته در کار داغ و تبلور مجدد دینامیکی پیوسته در کار گرم می‌دانند. تبلور مجدد دینامیکی پیوسته در پژوهش‌هایی که خلفا و همکاران [18] بر روی ECAP آلیاژ آلومینیوم AA6082 و دودو/ و همکاران [19] در دمای کار گرم انجام دادند نیز مشاهده شد. بحث دیگری که در مورد فرآیند ECAP این آلیاژ در دمای بالا مطرح می‌شود مربوط به چگونگی تبدیل دانه‌های فرعی به‌وجودآمده به دانه‌های اصلی و چگونگی انجام پالایش دانه‌ای در این آلیاژ است. پس از اولین پاس ECAP، دانه‌های فرعی در نتیجه این فرآیند و همان گونه که توضیح داده شد، شکل می‌گیرند. پس از آن مرزهای فرعی که دارای عدم تطابق بلایی هستند، با هجوم نابه‌جایی‌های به‌وجودآمده به سمت دیواره مرزها و جذب مرزهای بزرگ زاویه‌ای که از قبل در ساختار موجود بوده‌اند، تبدیل به مرزهای اصلی می‌شوند. این مکانیزم اولین بار توسط یاماشیتا و همکاران [20] در آلومینیوم خالص با مشاهدات پراش الکترون‌های بازگشتی (EBSD) و آنالیز کامپیوتری مطرح شد. نتیجه‌ای که از این آنالیز به‌دست آمد افزایش عدم تطابق مرزدانه‌ها با افزایش پاس‌های ECAP بود. پس از آن فرآیند پالایش دانه‌ای با سرعت کمتری نسبت به پاس اول رخ می‌دهد که از نظر اندازه دانه به‌دست‌آمده پس از ۴ پاس ECAP و ریزساختار به‌دست‌آمده با نتایج حاصل مطابقت کامل داشته است. از آنجا که دمای انجام فرآیند ECAP بالا بوده و در محدوده کار داغ برای این آلیاژ به‌شمار می‌رود و با توجه به بالابودن انرژی نقص در چیده‌شدن این آلیاژ، فرآیند پالایش دانه‌ای با افزایش تعداد پاس‌های ECAP با سرعت بالاتری رخ داده و در نهایت پس از ۴ پاس ECAP یک ساختار همگن حاوی دانه‌های بسیار ریز تبلور مجدد یافته هم‌محور به‌دست آمده است (شکل ۵). علت این امر را می‌توان به از بین رفتن نابه‌جایی‌ها توسط جذب شدن به مرزدانه‌های فرعی و افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها در مرزدانه‌ها

جمع‌بندی

۱- فرآیند ECAP منجر به ریزش قابل توجه دانه‌ها می‌شود، چنان که اندازه دانه‌ها از حدود ۱۲۳ میکرون در نمونه بازیخت شده به حدود ۱۸ میکرون در نمونه ECAP شده در ۴ پاس و در مسیر Bc رسید.

۲- پس از یک پاس سختی نمونه‌ها به شدت افزایش می‌یابد، به طوری که از ۵۱/۵ به حدود ۹۱ ویکرز در مسیر Bc و در پاس چهارم رسیده است. شیب افزایش سختی از پاس اول تا پاس چهارم به علت انجام بازیابی دینامیکی و تبلور مجدد و در پی آن تشکیل ساختار سلولی به علت بالابودن دمای تغییر شکل کاهش می‌یابد.

۳- فرآیند ECAP موجب افزایش استحکام در آلیاژ AA5051 می‌شود. ازدیاد طول نمونه‌ها در آزمایش کشش بعد از فرآیند ECAP کاهش چشمگیری می‌یابد ولی با افزایش تعداد پاس‌ها به دلایل پالایش دانه‌ای انجام شده و تحولات ترمومکانیکی و وقوع تبلور مجدد دینامیکی پیوسته در حین انجام فرآیند تا حدودی افزایش پیدا می‌کند.

تشکر و قدردانی: نویسندگان، مراتب سپاس و قدردانی خود را از مسئولین محترم دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی مواد و کارشناسان آزمایشگاه‌ها به منظور فراهم آوردن شرایط مناسب اعلام می‌دارند.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی حاصل پژوهش نویسندگان بوده و صحت نتایج نیز بر عهده آنها است.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص وجود ندارد.

سهم نویسندگان: سیدمحمدجواد حسینی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۴٪)؛ فتح‌الله قدس (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/تحلیلگر آماری (۳۳٪)؛ حمیدرضا محمدیان سمنانی (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۳۳٪).

منابع مالی: هزینه‌ها توسط نویسندگان و دانشگاه سمنان تامین شده است.

منابع

- 1- Valiev RZ, Islamgaliev RK, Alexandrov IV. Bulk nano Structured materials from severe plastic deformation. Progress in Materials Science. 2000;45(2):103-189.
- 2- Chen YJ, Roven HJ, Gireesh SS, Skaret PC, Hjelen J. Quantative study of grain refinement in Al-Mg Alloy processed by equal channel Angular pressing at cryogenic temperature. Materials Letters. 2011;65(23-24):3472-3475.
- 3- Kapoor R, Kumar N, Mishra RS, Huskamp CS, Sankaran KK. Influence of fraction of high angle boundaries on the mechanical behavior of an ultrafine grained Al-Mg alloy. Materials Science and Engineering: A. 2010;527(20):5246-5254.
- 4- Cardoso KR, Travessa DN, Botta WJ, Jorge Jr AM. High

در اولین پاس ECAP نتوانسته توسط پالایش دانه‌ای انجام شده در پاس دوم به تعادل برسد، بنابراین ازدیاد طول نمونه از دومین پاس به آرامی افزایش داشته است، همانند تحقیقی که *علیزاده* و همکاران^[27] انجام دادند. همچنین افزایش استحکام ناشی از ریزش دانه‌ها و کارسخت شدن نمونه در دومین پاس ادامه داشته ولی با شیب کمتری نسبت به پاس اول زیاد شده است. کم شدن سرعت افزایش استحکام در دومین پاس را می‌توان به وقوع بازیابی دینامیکی به وجود آمده در دومین پاس نسبت داد. به این صورت که بالابودن دمای کاری و کرنش اعمالی زمینه را برای فرار نابه‌جایی‌ها از موانعی مانند مرزخانه‌ها و رسوبات و ناهمگنی‌های موجود در ریزساختار با توجه به مکانیزم‌های توضیح داده شده، فراهم ساخته و تولید دانه‌های فرعی با سرعت کمتری اتفاق می‌افتد. در نتیجه استحکام به دست آمده با سرعت کمتری نسبت به پاس اول افزایش داشته است. با توجه به این که بعد از تغییر شکل، دانه‌ها هم‌محور و ریزتر شده‌اند می‌توان نتیجه گرفت که دچار تبلور مجدد شدند. ادامه فرآیند تا ۴ پاس منجر به تشکیل یک ساختار تبلور مجدد یافته حاوی دانه‌های ریز هم‌محور در مجاورت دانه‌های کشیده شده و ساختار سلولی موجود شده است که افزایش شدیدتر ازدیاد طول را به همراه داشته است. پس از پاس دوم میزان تولید و مصرف نابه‌جایی‌ها به تعادل می‌رسد. وجود دانه‌های عاری از نابه‌جایی در مطالعه هو و همکاران^[28] نشان‌دهنده این مطلب است.

مکانیزم‌هایی که برای خواص مکانیکی حاصل از ECAP در دمای بالا ارایه شده است، متفاوت با دمای کار سرد است. به عنوان مثال حذف نابه‌جایی‌های جزئی از مرزخانه‌ها حین تغییر شکل، اصلی‌ترین مکانیزم تغییر خواص مکانیکی حین تغییر شکل پلاستیک شدید در دمای بالا ذکر شده است^[29]. در این مورد شیب چگالی نابه‌جایی‌ها از مرزخانه به داخل دانه‌ها زیاد شده ولی به علت بالابودن نقص در چیده شدن این آلیاژ انتقال نابه‌جایی‌ها از یک دانه به دانه دیگر به سختی اتفاق می‌افتد. بنابراین انتظار می‌رود نابه‌جایی‌های جزئی از مرکز دانه‌ها به سمت مرزخانه‌ها حرکت کنند. افزایش چگالی نابه‌جایی‌های جزئی باعث فعال شدن مکانیزم دیگری در آن مناطق می‌شود. بدین صورت که نابه‌جایی‌های جزئی مثبت و منفی در مرزخانه‌ها یا همدیگر را خنثی کرده یا با یکدیگر ترکیب می‌شوند. خنثی شدن نابه‌جایی‌های جزئی باعث می‌شود تا راه برای سایر نابه‌جایی‌ها در مرزخانه‌ها فراهم باشد که آزادانه حرکت کنند. در این مورد چندوجهی شدن رخ می‌دهد و به این وسیله شار نرمی و افزایش ازدیاد طول به دست می‌آید^[30]. با توجه به مشاهدات ریزساختاری، شار نرمی ناشی از ECAP را می‌توان توسط این استدلال به چندوجهی شدن مرتبط دانست. افزایش تدریجی و آرام استحکام در دومین پاس و کاهش روند نزولی افزایش ازدیاد طول در این پاس ناشی از این پدیده است که در دمای بالا در پژوهش *یاواهاشی* و همکاران^[31] مشاهده شده است.

- processing. *Metals and Materials International*. 2020;26:1247-1261.
- 19- Dudova N, Belyakov A, Sakai T, Kaibyshev R. Dynamic recrystallization mechanisms operating in a Ni-20%Cr alloy under hot-to-warm working. *Acta Materialia*. 2010;58(10):3624-3632.
- 20- Yamashita A, Yamaguchi D, Horita Z, Langdon TG. Influence of pressing temperature on microstructural development in equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*. 2000;287(1):100-106.
- 21- Shaeri MH, Shaeri M, Ebrahimi M, Salehi MT, Seyyedin SH. Effect of ECAP temperature on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2016;26(2):182-191.
- 22- Cardoso KR, Munoz-Morris MA, León KV, Morris DG. Room and high temperature ECAP processing of Al-10%Si alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2013;587:387-396.
- 23- Naik GM, Gote GD, Narendranath S. Microstructural and hardness evolution of AZ80 alloy after ECAP and post-ECAP processes. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(9):17763-17768.
- 24- Vega MCV, Piva BH, Bolmaro R, Ferrante M, Kliagua AM. The texture development of ECAP processed AA1050 aluminum before and after a final anneal: Effect of the initial texture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2014;63(1):1240-1249.
- 25- Damavandi E, Nourouzi S, Rabiee SM, Jamaati R. Texture and microstructure evolution of A390 aluminum alloy during ECAP. *Materials Research Express*. 2019;6(7):076536.
- 26- Yuan Y, Ma A, Gou X, Jiang J, Arhin G, Song D, et al. Effect of heat treatment and deformation temperature on the mechanical properties of ECAP processed ZK60 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2016;677:125-132.
- 27- Alizadeh R, Mahmudi R, Pereira PHR, Huang Y, Longdon TG. Microstructural evaluation and superplasticity in an Mg-Gd-Y-Zr alloy after processing by different SPD techniques. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;682:577-585.
- 28- Hu J, Jonas JJ, Zhou Y, Ishikawa T. Influence of damage and texture evolution on limit strain in biaxially stretched aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 1998;251(1-2):243-250.
- 29- Swygenhoven HV, Derlet PM, Froseth AG. Stacking fault energies and slip in nanocrystalline metals. *Nature Materials*. 2004;3:399-403.
- 30- Kumar KS, Swygenhoven HV, Suresh S. Mechanical behavior of nanocrystalline metals and alloys. *Acta Materialia*. 2003;51(19):5743-5774.
- 31- Iwahashi Y, Horita Z, Nemoto M, Longdon TG. The process of grain refinement in equal channel angular pressing. *Acta Materialia*. 1998;46(9):3317-3331.
- Strength AA7050 Al alloy processed by ECAP: Microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(18):5804-5811.
- 5- Rollett A, Humphreys FJ, Rohrer GS, Hatherly M. *Recrystallization and related annealing phenomena*. Amsterdam: Elsevier; 2004.
- 6- Mishra A, Richard V, Gregori F, Asaro RJ, Meyers MA. Microstructural evolution in copper processed by severe plastic deformation. *Material science and Engineering: A*. 2005;410-411:290-298.
- 7- Valiev RZ, Langdon TG. Principal of equal channel angular pressing as a processing tool for refinement. *Progress in Material Science*. 2006;51(7):881-981.
- 8- Langdon TG. The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*. 2007;462(1-2):3-11.
- 9- Fang DR, Duan QQ, Zhao NQ, Li JJ, Wu SD, Zhang Z. Tensile properties and fracture mechanism of Al-Mg Alloy subjected to ECAP. *Materials Science and Engineering: A*. 2007;459(1):137-144.
- 10- Toros S, Ozturk F, Kacar I. Review of warm forming of aluminum-magnesium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;207(1-3):1-12.
- 11- Atkinson M. Bifurcation of thermal restoration processes in deformed iron and steel. *Materials Science and Engineering: A*. 1999;262(1-2):33-38.
- 12- Khelifa T, Rekik MA, Munoz-Bolanos JA, Cabrera-Marrero JM, Khitouni M. Microstructure and strengthening mechanisms in an Al-Mg-Si alloy processed by equal channel angular pressing (ECAP). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;95:1165-1177.
- 13- Mazurina I, Sakai T, Miura H, Sitdikov O, Kaibyshev R. Grain refinement in aluminum alloy 2219 during ECAP at 250 °C. *Materials Science and Engineering: A*. 2008;473(1-2):297-305.
- 14- Suresh M, Sharma A, More AM, Kalsar R, Bisht A, Nayan N, et al. Effect of equal channel angular pressing (ECAP) on the evolution of texture, microstructure and mechanical properties in the Al-Cu-Li alloy AA2195. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;785:972-983.
- 15- Sitdikov O, Sakai T, Avtokratov E, Kaibyshev R, Kimura Y, Tsuzaki K. Grain refinement in a commercial Al-Mg-Sc alloy under hot ECAP conditions. *Materials Science and Engineering: A*. 2007;444(1-2):18-30.
- 16- Sevilano JG, Houtte PV, Aernoudt E. Large strain work hardening and textures. *Progress in Materials Science*. 1980;25(2-4):69-134.
- 17- Tikhonova M, Belyakov A, Kaibyshev R. Strain-induced grain evolution in an austenitic stainless steel under warm multiple forging. *Materials Science and Engineering: A*. 2013;564:413-422.
- 18- Khelifa T, Munoz-Bolanos JA, Li F, Cabrera-Marrero JM, Khitouni M. Microstructure and mechanical properties of AA6082-T6 by ECAP under warm