

بررسی قابلیت تغییر شکل منیزیم خالص و آلیاژ AZ91، در دمای پایین با کاربرد فرآیند "اکستروژن برشی ساده"

نازنین بیات ترک^{۱*}، نیما پردیس^۲ و رامین ابراهیمی^۳

چکیده

در این پژوهش، امکان تغییر شکل شدید در دمای محیط منیزیم خالص و آلیاژ AZ91 آن با هدف دستیابی به ساختاری با اندازه‌ی دانه ریز مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، روشی نوین تغییر شکل پلاستیک شدید به نام "اکستروژن برشی ساده" (SSE) بکار گرفته شد تا بتوان با توجه به ویژگی منحصر به فرد این روش در اعمال تدریجی تغییر شکل، امکان اعمال کرنش در دماهای پایین بر فلز منیزیم خالص و آلیاژ AZ91 را فراهم کرد. هم‌چنین، بمنظور مقایسه‌ی این روش و سایر روش‌های متداول، اعمال کرنش در دمای محیط بر نمونه‌ها با کاربرد روش اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار (ECAP) و روش اکستروژن در کانال‌های ناهم مقطع زاویه دار (CAD/NECAP) نیز صورت پذیرفت. نمونه‌های بدست آمده به صورت ماکروسکوپی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند و از لحاظ ریز ساختاری بررسی شدند. نتایج نشان می‌دهند که اعمال کرنش تدریجی در روش اکستروژن برشی ساده کار پذیری نمونه‌های تولید شده با این روش را در دمای پایین به گونه‌ی قابل توجهی افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: اکستروژن برشی ساده، تغییر شکل بسیار شدید، کارپذیری، کرنش، نرخ کرنش.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مواد دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه شیراز.

۲- دانشجوی دکتری، بخش مهندسی مواد دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه شیراز.

۳- دانشیار، بخش مهندسی مواد دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه شیراز.

*-نویسنده‌ی مسئول مقاله: nazanin.bayat@yahoo.com

پیشگفتار

آلیاژهای منیزیم بخاطر استحکام ویژه^۱ و صلبیت^۲ بالایی که دارند، مورد توجه بسیاری از کاربردهای مهندسی در زمینه‌های گوناگون قرار دارند[۱]. افزون بر این، منیزیم دارای قابلیت ماشین‌کاری خوب و جذب ارتعاش بالاست[۲]. از سوی دیگر، منابع منیزیم بسیار فراوان بوده و همچنین، تولیدات منیزیمی در مقایسه با پلیمرها بسیار راحت‌تر و به گونه‌ی کامل بازیافت می‌شوند[۳]، اما در کنار تمام این ویژگی‌های مطلوب، برخی از ویژگی‌های نامطلوب این فلز از قبیل کارپذیری کم در دمای پایین، چقرمگی^۳، استحکام پایین و همچنین، مقاومت به خزش ضعیف منجر به محدود شدن کاربرد این فلز گردیده است[۳،۴].

بنابراین تلاش‌های بسیاری بمنظور بهبود بخشیدن به ویژگی‌های منیزیم انجام گرفته است. در این راستا، فعالیت‌های بسیاری در زمینه‌ی ریز کردن اندازه‌ی دانه انجام شده است[۲] زیرا افزون بر بحث استحکام دهی، ریز شدن دانه می‌تواند به خاصیت سوپر پلاستیسیته در دماهای پایین منجر شود که کاربرد بسیار زیادی در صنعت هوا فضا خواهد داشت[۳]. یکی از روش‌هایی که امروزه بمنظور ریز دانه کردن مواد جامد حجیم بسیار مورد توجه و استفاده قرار گرفته است، اعمال کرنش‌های شدید و در نتیجه، ایجاد دانسیته‌ی بالای نابه جایی‌هاست که در نتیجه‌ی آن می‌توان به ماده‌ی ای با ساختار بسیار ریز دست یافت و از آن‌جا که این فرایندها با اعمال کرنش‌های شدید همراه هستند، به آن‌ها فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید^۴ (SPD) گفته می‌شود. از انواع روش‌های SPD می‌توان به روش پیچش تحت فشار^۵، روش فشردن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار^۶ (ECAP)، روش اتصال نورد تجمعی^۷ و ... اشاره کرد[۵،۶].

از آن‌جا که منیزیم دارای شبکه‌ی بلوری شش وجهی متراکم است، تمایلی به تغییر شکل سرد ندارد و کلیه‌ی

فرایندهای ذکر شده برای این فلز و آلیاژهای آن، در دماهای بالا قابل انجام است و انجام این فرایندها در مورد منیزیم خالص و آلیاژی منجر به ایجاد پدیده‌ی جدایش^۸ یا شکست خواهد شد[۷]. از سوی دیگر، انجام فرآیند در دماهای پایین مانع از رشد دانه شده و در نتیجه‌ی آن می‌توان به ماده‌ای با ساختار بسیار ریز دست یافت که منجر به ایجاد خواص برتر مکانیکی و همچنین، دست یابی به خاصیت سوپر پلاستیسیته در دماهای پایین خواهد شد[۲]. با توجه به آنچه که گفته شد، تلاش‌هایی بمنظور کاهش دمای تغییر شکل منیزیم صورت گرفته است. در این راستا، یکی از تلاش‌های صورت گرفته انجام فرآیند اکستروژن در مورد نمونه‌ها پیش از انجام ECAP می‌باشد که منجر به کاهش اندازه‌ی دانه و همچنین، ایجاد بافت^۹ در راستای اکستروژن شده و کارپذیری منیزیم را افزایش می‌دهد[۸]. همچنین اعمال فشار معکوس^{۱۰} حین تغییر شکل به فعال شدن سیستم‌های لغزشی غیر قاعده منجر شده و قابلیت تغییر شکل را افزایش می‌دهد[۹]، اما تاکنون هیچ یک از این روش‌ها به ایجاد امکان تغییر شکل این فلز در دماهای پایین منجر نشده است. در این پژوهش نیز با استفاده از یک روش جدید SPD به نام اکستروژن برشی ساده^{۱۱} (SSE) [۱۰] تلاش گردیده تا قابلیت تغییر شکل این فلز در دماهای پایین‌تر مورد بررسی قرار گیرد. در این روش، قالب مورد استفاده، یک قالب اکستروژن مستقیم است که عبور از آن نمونه دچار تغییر شکل برشی شده و کرنش می‌بیند. شکل ۱ نحوه‌ی تغییر شکل تدریجی مقطع نمونه در حین عبور از قالب را نشان می‌دهد[۱۰].

با توجه به این‌که در فرآیند مورد نظر بیشینه‌ی زاویه‌ی اعوجاج (α)، 45° در نظر گرفته شده؛ لذا، کرنش بدست آمده در هر پاس ۱/۱۵ خواهد بود و انتظار می‌رود در عمل، بتوان با اعمال فشار معکوس مناسب به میزان تئوری کرنش دست یافت. از آن‌جا که در این روش در مقایسه با سایر روش‌ها، نرخ کرنش بسیار پایین‌تر است، امکان تغییر شکل فلزات سخت کار در دماهای پایین‌تر

¹-Specific Strength

²-Stiffness

³- Toughness

⁴-Sever Plastic Deformation

⁵-High Pressure Torsion

⁶-Equal Channel Angular Pressing

⁷-Accumulative Roll Bonding

⁸-Segmentation

⁹-Texture

¹⁰-Back Pressure

¹¹-Simple Shear Extrusion (SSE)

نمونه‌ی تولید شده با روش SSE به مراتب بهتر از نمونه‌های سایر روش‌هاست. در مورد نمونه‌های روش‌های ECAP، DECLE [۱۱] و CAD [۱۲]، با توجه به این‌که تمامی کرنش در یک صفحه^۴ و در کسری از ثانیه اعمال می‌شود، نرخ کرنش از روش SSE که در آن همین میزان کرنش به صورت تدریجی در طول کانال اکستروژن به نمونه اعمال می‌شود، بالاتر است (شکل ۳).

این تفاوت در نرخ کرنش اعمالی می‌تواند مزیت این روش را نسبت به سایر روش‌های SPD در اعمال کرنش‌های بالا، بر مواد با ساختار HCP مانند منیزیم، در دمای محیط نشان دهد. افزون بر این، با توجه به چگونگی طراحی قالب، همواره مقداری فشار معکوس بر نمونه اعمال می‌شود که ناشی از اثر اصطکاک میان نمونه و کانال و هم‌چنین، در اثر نیروی مقاومی است که هر نمونه درون کانال بر نمونه‌ی پشتی خود اعمال می‌کند [۱۳]. بنابراین، با توجه به نتایج بدست آمده در مقایسه با سایر روش‌ها انتظار می‌رود با تغییرات ریز ساختاری و ایجاد بافت در نمونه‌های اولیه بتوان نمونه‌های منیزیمی را به صورت موفقیت آمیز و با حذف ترک‌های بسته در دمای محیط تولید کرد. بررسی تغییر شکل نمونه‌های آلیاژی در شرایط ریختگی به روش SSE در دمای محیط نشان داد که نمونه‌ها در این شرایط متلاشی و تخریب می‌شوند (شکل ۴). تخریب نمونه‌ها در این شرایط به علت وجود فاز ترد و پیوسته‌ی $Mg_{17}Al_{12}$ می‌باشد که در بررسی ریز ساختاری این نمونه‌ها مشهود است (شکل ۵-الف). بنابراین، سعی شد تا با انجام عملیات حرارتی، پیش از انجام فرآیند این رسوبات در زمینه حل شوند که این مورد در مقایسه‌ی ریز ساختار نمونه‌ها پیش و پس از عملیات حرارتی به خوبی نشان داده شده است (شکل ۵).

در نتیجه‌ی حذف فازهای پیوسته، قابلیت تغییر شکل منیزیم AZ91 به گونه‌ی قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد [۱۵] که به موفقیت نسبی پروسه‌ی SSE در مقایسه با سایر روش‌ها در تغییر شکل منیزیم در دمای محیط منجر می‌شود. در شکل ۶ وضعیت نمونه‌ی آلیاژی عملیات شده در میانه‌ی فرآیند ارایه شده است. مقایسه‌ی ضمنی این شکل با سایر نمونه‌های خالص و عملیات نشده

فراهم می‌شود. هم‌چنین، در این روش امکان اعمال فشار معکوس به کمک نمونه‌های دیگر نیز وجود دارد.

مواد و روش پژوهش

در این پژوهش، منیزیم خالص ۹۹/۹ درصد و آلیاژ AZ91 که یکی از پرکاربردترین آلیاژهای ریختگی منیزیم است، بکار برده شده است. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۱ آمده است.

نمونه‌ها در ابعاد $30\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ تهیه شدند و برخی از نمونه‌های آلیاژی به مدت ۲ ساعت در 370°C و ۲۴ ساعت در 415°C تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند و سپس در آب، سرد شدند. اعمال کرنش با روش اکستروژن برشی ساده بر نمونه‌های منیزیمی خالص، آلیاژی ریختگی و آلیاژی پس از عملیات حرارتی در دمای محیط با سرعت 0.1 mm/s انجام پذیرفت. بدین منظور، نمونه‌ها، با استفاده از روان‌ساز تفلون یک مرحله تحت تغییر شکل قرار گرفتند. افزون بر این، بمنظور مقایسه‌ی ماکروسکوپی وضعیت نمونه‌ها، نمونه‌های منیزیم خالص با روش‌های اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار^۱، اکستروژن جانبی در دو کانال هم مقطع^۲ و تغییر شکل در کانال‌های زاویه دار^۳ نیز تولید شدند. هم‌چنین، بمنظور بررسی ریزساختار نمونه‌های آلیاژی، سطح مربوطه از نمونه‌های یاد شده پیش و در حین تغییر شکل، با روش SSE، به صورت آینه‌ای پالیش و به وسیله‌ی محلول‌های Picral و Acetic Glycol حکاکی شد و ریز ساختار نمونه‌ها به وسیله‌ی میکروسکوپ نوری و الکترونی عبوری بررسی گردید.

نتایج و بحث

شکل ۲ وضعیت نمونه‌های منیزیم خالص تولید شده در دمای محیط با روش‌های گوناگون را نمایش می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، نمونه‌های SSE دارای ترک‌های بسته‌اند در حالی که نمونه‌های سایر روش‌ها به گونه‌ی کامل دچار جدایش و تخریب شده‌اند و وضعیت

^۱-ECAP

^۲- Dual Equal Channel Lateral Extrusion

^۳-Channel Angular Deformation

^۴- Shear Plane

تخریب کامل نمونه در فرآیند SSE گردید. عملیات حرارتی قابلیت تغییر شکل نمونه‌ها را به گونه‌ای قابل توجه افزایش داد که نتایج به رغم تولید دوباره‌ی رسوبات در اثر اعمال کرنش و ایجاد ترک‌های میکرونی در امتداد آن‌ها، بمنظور اعمال کرنش بر مواد با ساختار بلوری HCP در دمای محیط حاکی از موفقیت قابل توجه این روش در مقایسه با سایر روش‌هاست.

منابع

- 1- C.W. Su., B.W. Chua., L. Lu., and M.O. Lai., "Properties of severe plastically deformed Mg alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol.402, pp. 163–169, 2005.
- 2- K.U. Kainer., and F. Von Buch., "The Current State of Technology and Potential for further Development of Magnesium Applications", *Magnesium Alloys and Technology*, Edited by K.U. Kainer, WILEY-VCH, pp. 1-7, 2003.
- 3- K. Kubota., M. Mabuchi., and K. Higashi., "Processing and mechanical properties of fine-grained magnesium alloys", *Material Science*, Vol.34, pp. 2255 – 2262, 1999.
- 4- Q.D. Wang., Y.J. Chen., J.B. Lin., L.J. Zhang., and C.Q. Zhai., "Microstructure and properties of magnesium alloy processed by a new severe plastic deformation method", *Materials Letters*, Vol.61, pp. 4599–4602, 2007.
- 5- A. P. Zhilyaev, T. G. Langdon, "Using high-pressure torsion for metal processing: fundamentals and applications", *Progress in Materials Science*, Vol.53, Issue 6, pp. 893-979, 2008.
- 6- R.Z. Valiev., and T.G. langdon., "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement", *Progress in Materials Science*, Vol.51, pp. 881–981, 2006.
- 7- R. Cetlin , Maria Teresa P. Aguilar, Roberto B. Figueiredo, Terence G. Langdon, "Avoiding cracks and inhomogeneities in billets processed by ECAP", *Material Science*, 45, 2010, 4561–4570.
- 8- K. Matsubara., Y. Miyahara., Z. Horita., and T.G. Langdon., "Developing superplasticity in a magnesium alloy through a combination of

پس از تغییر شکل، حاکی از موفقیت آمیز بودن نسبی انجام این فرآیند در دمای محیط است. با این وجود، بمنظور بررسی احتمال ایجاد ترک در حین فرآیند و در طی اعمال مقادیر بالاتر کرنش که می‌تواند منجر به تخریب نمونه گردد، مطالعات ریز ساختاری انجام گرفت. بدین منظور، ریز ساختار نمونه در ابتدا و میانه‌ی فرآیند بررسی و با یکدیگر مقایسه شدند (شکل ۷).

همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در میانه‌ی فرآیند، اعمال کرنش منجر به ایجاد رسوبات $Mg_{17}Al_{12}$ از فاز زمینه شده که در ابتدای فرآیند به وسیله‌ی عملیات حرارتی به صورت اشباع در زمینه حل شده و مشاهده نمی‌گردد. از آن‌جا که این رسوبات ترد بوده و گزارش‌هایی در مورد وقوع پدیده‌ی شکست در راستای این رسوبات وجود دارد [۱۶]، به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی دقیق‌تری صورت گرفت که نتایج آن در ادامه آمده‌اند.

در شکل ۸ تصویر رسوبات در زمینه نشان داده شده است. بررسی دقیق این شکل نشان می‌دهد که مطابق انتظار، ترک‌های میکرونی در امتداد این رسوبات در حال شکل‌گیری هستند. بنابراین، هر چند این روش در اعمال کرنش به منیزیم نسبت به سایر روش‌های SPD موفق بوده، ولی ممکن است در ادامه و در پاس‌های بعدی فرآیند که مقادیر بالای کرنش اعمال می‌شود، ایجاد رسوبات بیش‌تر به همراه حضور این ترک‌ها منجر به تخریب نمونه گردد که بررسی این مورد و راهکارهای احتمالی حل آن در حال بررسی است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش امکان تغییر شکل منیزیم خالص و آلیاژی در دمای محیط با کمک روش SSE بررسی شد و نتایج بدست آمده نشان داد که اعمال تدریجی کرنش در این فرآیند تأثیر به‌سزایی بر قابلیت تغییر شکل این فلزات دارد. در نمونه‌های خالص اعمال کرنش با سایر روش‌ها منجر به جدایش کامل نمونه‌ها گردید؛ این در حالیست که اعمال تدریجی کرنش با روش SSE تنها تعدادی ترک کاملاً بسته در نمونه ایجاد کرد. هم‌چنین، در نمونه‌های ریختگی وجود فاز ترد و پیوسته‌ی $Mg_{17}Al_{12}$ منجر به

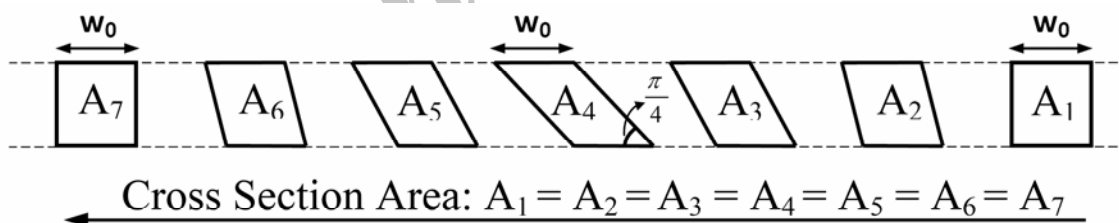
- ۱۳- ن. پردیس، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، ۱۳۸۸.
- 14- C.J. Luis-Pérez., R. Luri-Irigoyen., and D. Gastón-Ochoa., "Finite element modelling of an Al-Mn alloy by equal channel angular extrusion (ECAE) ", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153-154, 2004, 846-852.
- 15- L. Cizek., M. Greger., L. Pawlica., L.A. Dbrzanski., and T. Tanski., "Study of selected properties of magnesium alloy AZ91 after heat treatment and forming", Material Processing Technology, Vol.157-158, 2004, 466-471.
- 16- K. Mathis., J. Gubicza., and N.H. Nam., "Microstructure and mechanical behavior of AZ91 Mg alloy processed by equal channel angular pressing", Alloy and Compound, Vol.394, 2005, 194-199.

- extrusion and ECAP", Acta Materialia, Vol.51, 2003, 3073-3084.
- 9- X.U. Cheng., and Kenong, Xia., Terence G. Longdon., "Processing of a magnesium by equal-channel angular pressing using back-pressure", Materials Science and Engineering A, Vol.527, pp. 205-211, 2009.
- 10- N. Pardis., and R. Ebrahimi., "Deformation behavior in Simple Shear Extrusion (SSE) as a new severe plastic deformation technique", Materials Science and Engineering A, Vol.572, pp. 355-360, 2009.
- 11- B. Talebanpour., R. Ebrahimi., and K. Janghorban., "Microstructural and mechanical properties of commercially pure aluminum subjected Dual Equal Channel Lateral Extrusion" Materials Science and Engineering A, Vol.527, pp.141-145, 2009.
- 12- Dong Nyung Lee, "An upper-bound solution of channel angular deformation", Scripta Materialia, Vol. 43, pp.115-118, 2000.

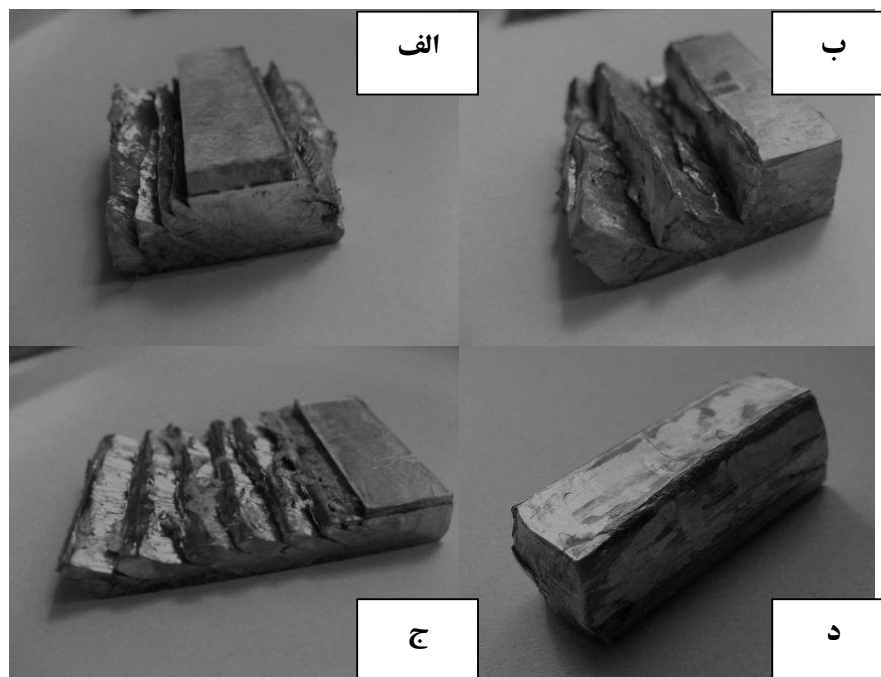
پیوست‌ها

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ AZ91E

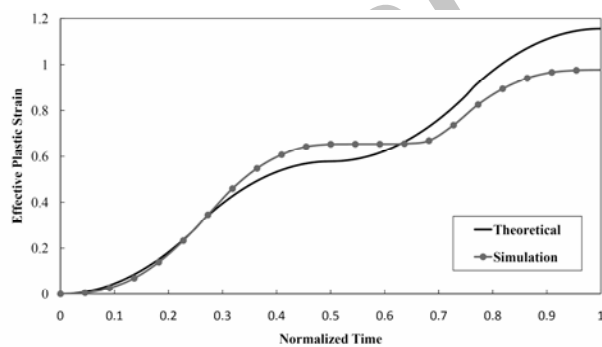
Product name	Element (weight percentage)								
	Al	Zn	Mn	Fe	Be	Si	Cu	Ni	Mg
AZ91E	۹/۰۵	۰/۶۵	۰/۲۱	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۸۲	۰/۰۲۲	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۰۵۷	۰/۰۶۲۵۱



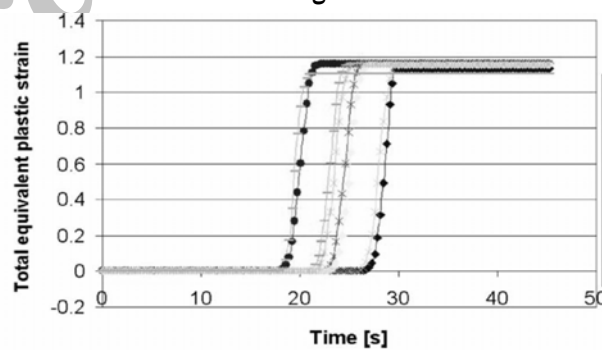
شکل ۱- چگونگی تغییر شکل تدریجی مقطع نمونه در حین عبور از کانال اکستروژن [۱۰].



شکل ۲- مقایسه‌ی نمونه‌ی بدست آمده از اکستروژن برشی ساده با سایر روش‌ها الف) DECLE، ب) ECAP، ج) CAD، د) SSE.

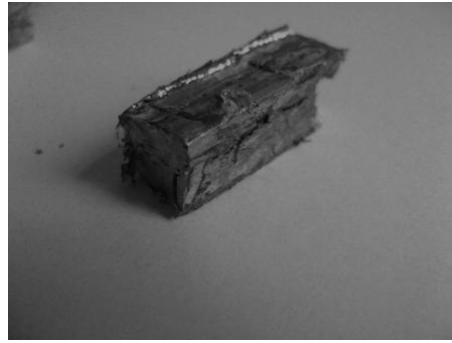


شکل ۳- الف

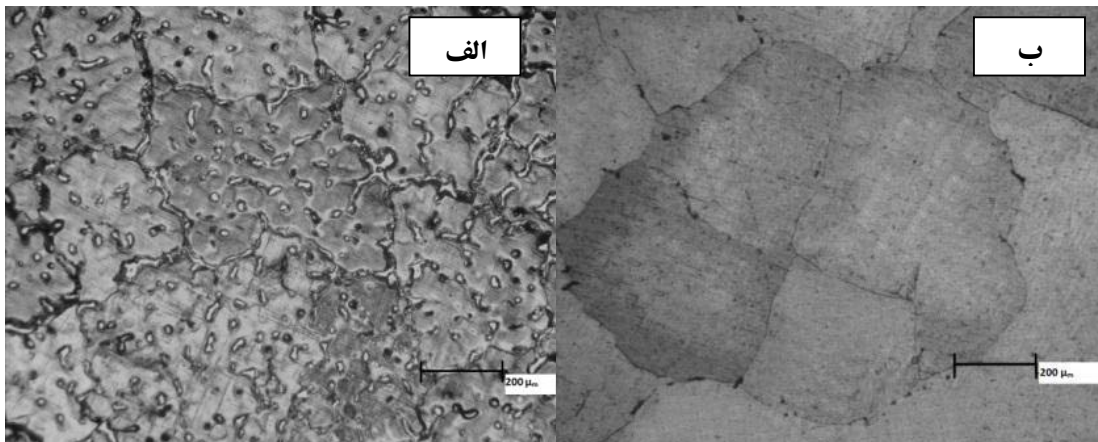


شکل ۳- ب

شکل ۳- الف) نمودار تغییرات کرنش نمونه بر حسب زمان در طی عبور از کانال اکستروژن برشی ساده [۱۳]، ب) نمودار تغییرات کرنش نمونه بر حسب زمان در فرایند ECAP [۱۴].



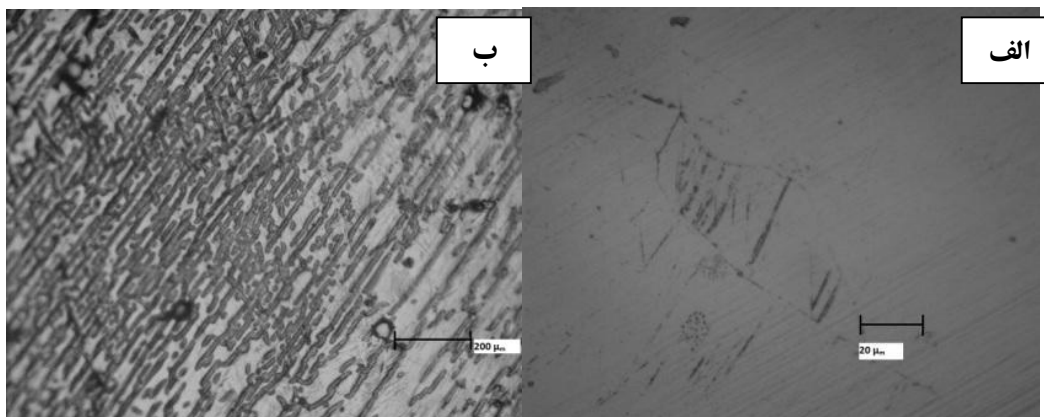
شکل ۴ - نمونه‌ی آلیاژی ریختگی پس از فرآیند SSE



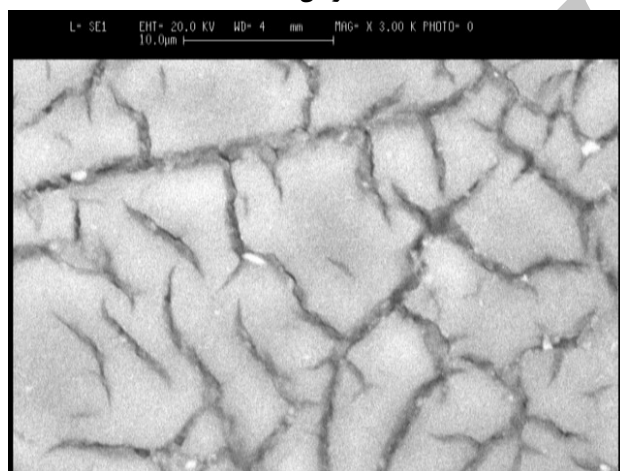
شکل ۵ - (الف) ریز ساختار آلیاژ AZ91 در شرایط ریختگی (ب) ریز ساختار پس از عملیات حرارتی.



شکل ۶ - مقایسه‌ی میکروسکوپی نمونه پیش از فرآیند و در حین آن.



شکل ۷- (الف) عدم وجود رسوبات در ابتدای فرآیند. (ب) ریز ساختار نمونه‌ی آلیاژی در میانه‌ی فرآیند (رسوبات ناشی از کرنش).



شکل ۸- تصویر SEM از رسوبات در میانه‌ی فرآیند. ترک‌های میکرونی در امتداد رسوبات قابل رویت‌اند.