

بررسی تولید مواد با استحکام بالا در فرآیند ECAP به کمک شبیه سازی سه بعدی

عرفان عباسی^۱، سید راوش احدی^۲

چکیده

در روش تغییرشکل در کانال‌های مساوی زاویه‌دار (ECAP)، ماده از داخل یک قالب با دو کانال متقاطع عبور کرده و تغییرشکل برشی شدیدی در ماده ایجاد می‌شود که به موجب آن کرنش‌های شدیدی در ماده پدیدار گشته و سبب ریزدانه‌گی ساختار ماده می‌شود. در این تحقیق به کمک شبیه‌سازی سه‌بعدی فرآیند ECAP با استفاده از نرم‌افزار المان محدود اثر پارامترهای موثر نظیر سرعت پرس، زاویه‌ی کانال، زاویه‌ی گوشه‌ی قالب و ضریب اصطکاک بررسی شده و سپس تغییرات ساختار با نتایج آزمایشات تجربی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. براساس نتایج حاصله انطباق مناسبی بین روش‌های ارزیابی صورت گرفته وجود دارد و شبیه‌سازی انجام شده می‌تواند جهت پیش‌بینی نتایج فرآیند به‌کار گرفته شود.

کلمات کلیدی: تغییرشکل پلاستیک شدید، تغییرشکل در کانال‌های مساوی زاویه‌دار (ECAP)، مواد با دانه‌بندی بسیار ریز

فهرست علائم

تغییرشکل پلاستیک شدید	SPD
تغییرشکل در کانال‌های مساوی زاویه‌دار	ECAP
فشار پرس (MPa)	P
زاویه‌ی کانال (درجه)	Φ
تنش سیلان ماده (MPa)	Y
زاویه‌ی گوشه (درجه)	Ψ
افزایش کرنش	$\Delta\epsilon_i$

۱- دانشجوی دکتری - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساوه، باشگاه پژوهشگران جوان، ساوه، ایران eng_abasi@yahoo.com

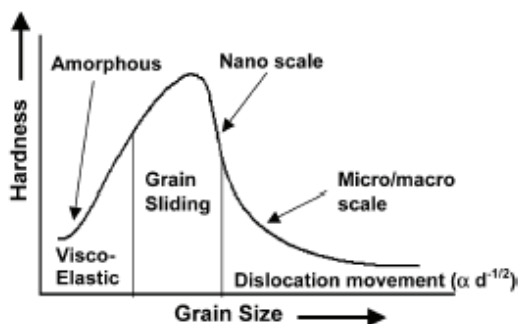
۲- مدرس دانشگاه جامع علمی کاربردی

۱- مقدمه

حین پرس، تغییرشکل برشی شدیدی به نمونه اعمال می‌شود، در حالی که سطح مقطع نمونه بدون تغییر باقی می‌ماند و امکان تکرارپذیری فرآیند ممکن می‌شود که این یکی از برتری‌های محسوس فرآیند ECAP می‌باشد [۳]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که فشار پرس (P) و افزایش کرنش ($\Delta\epsilon_i$) با عبور ماده از صفحه‌ی برش ایجاد می‌شود و با زاویه Φ بین دو کانال و تنش سیلان ماده (Y) به صورت ذیل رابطه دارد [۴].

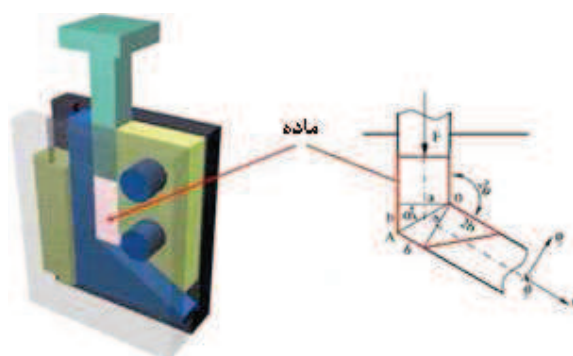
$$\frac{P}{Y} = \Delta\epsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cot \frac{\phi}{2} \quad (1)$$

با تغییرشکل، اندازه‌ی دانه در مواد و خواص مکانیکی آن‌ها تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود مقدار سختی با ریز شدن دانه‌ها تا حد نانو می‌تواند تا بیش از دو برابر افزایش یابد [۵، ۶]. در این تحقیق با به‌کارگیری شبیه‌سازی سه‌بعدی فرآیند ECAP طی یک مرحله، شرایط بهینه برای فرآیند مذکور ارزیابی و نتایج پس از مقایسه با یک مرحله فرآیند ECAP در وضعیت تجربی معرفی می‌گردد.



شکل (۲): شماتیک تغییرات سختی بر اساس اندازه دانه [۵]

فرآیند تغییرشکل در کانال‌های مساوی زاویه‌دار ECAP روشی است که با اعمال تغییرشکل برشی بدون تغییر در سطح مقطع نمونه کارایی گسترده‌ای دارد [۱]. پیدایش روش ECAP برای ایجاد تغییرشکل شدید به سال‌های حدود ۱۹۸۰ میلادی بر می‌گردد که سگال این فرآیند را پیشنهاد کرد [۱]. اما قابلیت ECAP در تولید فلزات و آلیاژهای با ساختار ریز، در دهه اخیر توسط ویلف و همکارانش [۲] گسترش یافت و آن‌ها این روش را به صورت یک روش SPD، برای ریزدانه کردن ساختار فلزات در حد نانو به کار بردند. مطابق شکل (۱) شماتیکی از فرآیند ECAP توسط قالب فلزی نشان داده شده است [۲].



شکل (۱): شماتیکی از قالب ECAP با زاویه‌ی کانال Φ و زاویه‌ی گوشه Ψ

در این روش نمونه‌ای فلزی با سطح مقطع دایره‌ای یا مستطیلی بسته به طراحی قالب، در داخل کانال اول (کانال عمودی) قرار داده می‌شود. سپس تحت فشار پرس، نمونه از کانال اول به داخل کانال دوم (کانال افقی) رانده می‌شود.

جدول (۱): خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ ۷۰۷۵

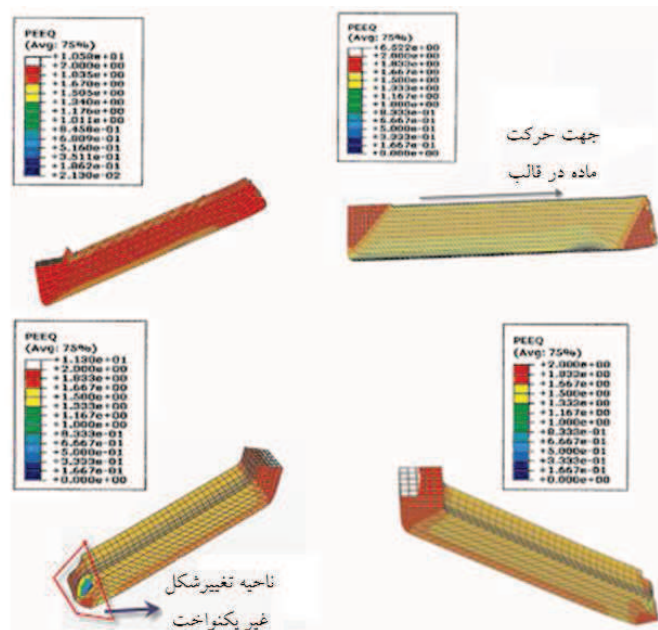
چگالی (tonne/mm^3)	هدایت حرارتی (W/m.K)	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{ml}/\text{tone.K}$)	مدول الاستیک (MPa)	نسبت پواسون
2.80E-09	130	9.60E+08	75000	3.30E-01

به دلیل عدم وجود خواص کششی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در شرایط مذکور در مراجع موجود، تعداد شش نمونه برای آزمون کشش تهیه و بعد از انجام عملیات آنیل انحلالی و کوئنچ در آب بلافاصله با نرخ کرنش‌های $0.1/s$ و 1 و 10 توسط دستگاه تست کشش اینسترون (INSTRON) کشیده شدند. از روی نمودارهای به دست آمده خواص پلاستیک آلیاژ در نرخ‌های مختلف کرنش محاسبه و به نرم‌افزار داده شد. در مرحله اول شبیه‌سازی بر روی نمونه در دمای محیط با زوایای کانال (۷۵، ۹۰، ۱۲۰، ۱۳۵) و بدون زاویه‌ی گوشه قالب و در حالت بدون اصطکاک در نظر گرفته شد. سپس زاویه‌ی کانال ثابت و بررسی روی قالب با زوایای گوشه مختلف (۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰) انجام گردید و در نهایت برای بررسی اثر اصطکاک قالب با زاویه‌ی کانال ($\Phi=90$ و $\Psi=0$) و ضرایب اصطکاک مختلف (۰/۰۸ و ۰/۰۶ و ۰/۰۴ و ۰/۰۲) در نظر گرفته شد. در شبیه‌سازی انجام شده مش‌بندی به کمک روش seeding و تنظیمات بر اساس هندسه‌ی قالب و بیلت انجام گرفت و نوع تحلیل دینامیکی به روش Explicit انتخاب شد. مطابق نمونه‌های حاصل از آزمایش عملی توسط قالب فولادی با زاویه‌ی کانال ۹۰ درجه و زاویه‌ی گوشه ۲۰ درجه، پس از طی یک مرحله ECAP، مقادیر استحکام کششی، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول و میکرو سختی با دستگاه میتونویو

MITUTOYO-HM) با نرخ بارگذاری (gf) ۲۰۰ و ایندنتور ویکرز طی بارگذاری به مدت ۱۰ ثانیه در مقطع نمونه‌ها در قبل و بعد از فرآیند ECAP ثبت گردید.

۳- بحث و تحلیل

در بررسی اثر زاویه‌ی کانال مطابق شکل (۳)، می‌توان گفت که بهترین یکنواختی در توزیع کرنش مربوط به قالب با زاویه‌ی کانال ۹۰ می‌باشد و با افزایش زاویه‌ی کانال ناهمگونی در توزیع کرنش افزایش می‌یابد. در نمونه با زاویه‌ی کانال ۷۵ درجه هرچند توزیع کرنش یکنواخت است، اما اعوجاج و شکستگی در سطح بیلت دیده می‌شود که این امر به هیچ‌وجه مناسب نمی‌باشد. اما پارامتر تاثیرگذار دیگری که مورد بحث قرار می‌گیرد، زاویه‌ی گوشه‌ی قالب می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۴) و (۵) مشخص گردید که با حرکت از زاویه‌ی گوشه‌ی صفر درجه (گوشه‌ی کاملاً تیز) به سمت زاویه ۹۰ درجه (گوشه‌ی کاملاً گرد) مقدار کرنش کاهش می‌یابد. لذا تاثیر زاویه‌ی گوشه در برابر اثر زاویه‌ی کانال ناچیز است. به طوری که سبب یکنواختی بیش‌تر در توزیع کرنش یکنواخت و کاهش نیروی پرس می‌شود.



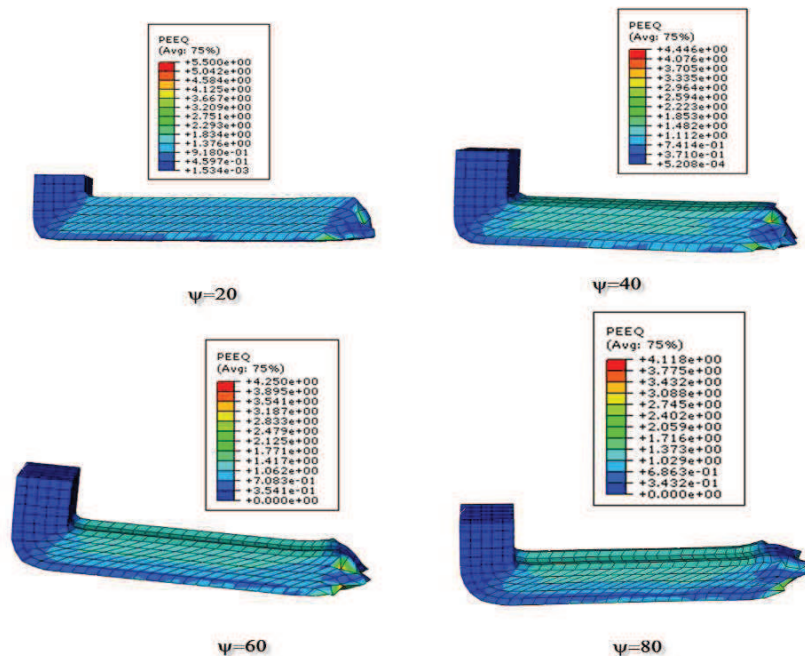
شکل (۳): تاثیر زاویه‌ی کانال بر روی میزان توزیع کرنش معادل

مس نتایج مشابهی را نشان داده است، به طوری که مقدار ضریب اصطکاک معادل ۰/۱ می تواند به عنوان یک عامل بسیار موثر در قابلیت پرکنندگی قالب نقش داشته باشد و بهترین شرایط را ایجاد نماید [۹].

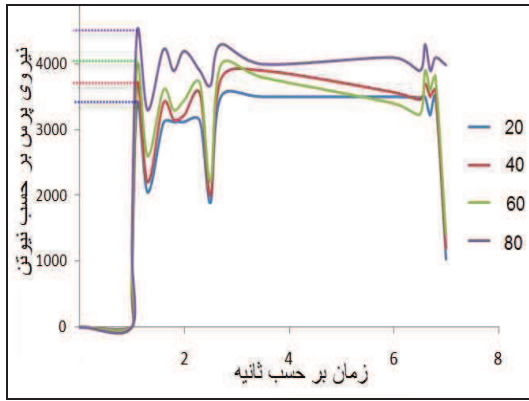
همان طور که قبلاً توسط پیوی نشان داده شده است، مقدار استحکام کششی پس از فرآیند ECAP رابطه مستقیم با ریزدانه‌گی ساختار دارد [۱۰]. لذا جهت بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی، نمونه بیلت با قالب فولادی تحت فرآیند ECAP قرار گرفت. با توجه به تغییرات وضعیت اصطکاکی در شروع و حین عملیات مذکور اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و واقعی بدیهی می‌باشد. اما با توجه به نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی صورت گرفته، مقدار نتایج آزمون تعیین خواص مکانیکی به عنوان معیار تعیین‌کننده توزیع یکنواخت کرنش و نتیجتاً بهبود خواص ماده به طور همگن‌تر مد نظر قرار گرفته شد. طی آزمایش میکروسختی‌سنجی انجام شده افزایش مقدار سختی (ویکرز) تا حدود دو برابر با توزیع یکنواخت ثبت گردید. (جدول (۲)) [۱۱-۱۴]

اما با افزایش زاویه‌ی گوشه، منطقه تغییرشکل غیریکنواخت بیش تر می‌شود. بنابراین باید از انتخاب قالب با زوایای گوشه‌ی بالا پرهیز نمود. با توجه به تاثیر زاویه‌ی گوشه قالب در توزیع کرنش یکنواخت، استفاده از قالب با زاویه‌ی گوشه ۲۰ درجه مناسب می‌باشد. در این جا مقادیر حاصله با نتایج موجود در مقالات و نتایج حاصل از رابطه (۱) مقایسه شد و صحت شبیه‌سازی تایید گردید [۴، ۶].

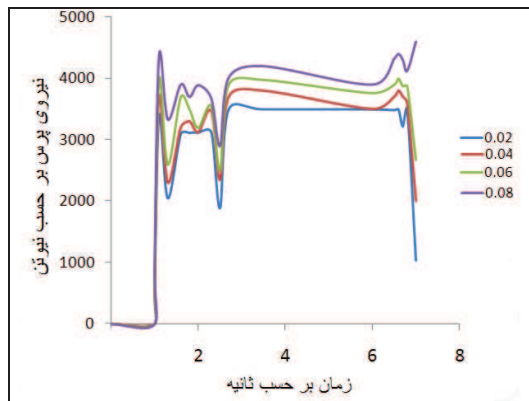
هم چنین لازم به ذکر است که افت و خیزهای نیرو در شروع و پایان فرآیند در دیاگرام نشان داده شده است، که این پدیده ناشی از تغییرات شرایط شروع تغییر فرم در ماده و انتقال نیرو و هم چنین شرایط اصطکاکی بین قالب و بیلت می‌باشد. از طرف دیگر با افزایش ضریب اصطکاک نیروی لازم برای انجام فرآیند افزایش می‌یابد، اما توزیع کرنش معادل یکنواخت‌تر می‌شود [۸، ۷]. با توجه به مطالب مذکور استفاده از قالب با زاویه‌ی گوشه کم و اعمال ضریب اصطکاک تا ۰/۰۸ می‌تواند میزان بهره‌وری فرآیند را به مقدار قابل‌توجهی افزایش دهد (شکل (۶)). هم چنین تحقیقات صورت گرفته توسط سایه بروری فلز



شکل (۴): تاثیر زاویه‌ی گوشه قالب بر توزیع کرنش میانگین



شکل (۵): تاثیر زاویه‌ی گوشه‌ی قالب بر نیروی پرس



شکل (۶): تاثیر پارامتر اصطکاک روی نیروی پرس

۴- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی تنش برشی شدید ایجاد شده در حین فرآیند ECAP سبب ایجاد کرنش‌های بسیار شدیدی در ماده می‌شود. این امر سبب تغییر در ساختار دانه‌بندی ماده می‌شود و انجام فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید ECAP سبب کاهش اندازه دانه‌ها تا مقیاس بسیار ریزی می‌شود و با توجه به این‌که اندازه دانه تنها عامل افزایش همزمان استحکام و چقرمگی می‌باشد، از این رو با به‌کارگیری ضریب اصطکاک تا 0.08 و زاویه‌ی گوشه معادل 20° درجه و همچنین زاویه‌ی کانال 90° می‌توان شرایط تغییر فرم برای این فرآیند را به نحو مطلوبی تعریف نمود. به‌طوری‌که در پایان فرآیند به تغییرات بسیار زیادی در خواص مکانیکی ماده با حضور تغییرات در ساختار دانه‌بندی آن رسید. لازم به ذکر است که جهت بررسی دقیق‌تر صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه‌بعدی انجام شده با شرایط واقعی، می‌توان از دو روش الگوهای تئوریک برای محاسبه‌ی شکل نمونه و پیش‌گویی آن بعد از فرآیند ECAP و یا با انجام آزمایشات دقیق عملی به عنوان تحقیقات آتی استفاده نمود.

جدول (۲): نتایج آزمون میکروسختی‌سنجی در مواضع مختلف نمونه قبل و

بعد از یک مرحله فرآیند ECAP

محل آزمون	بدون ECAP	یک مرحله ECAP
موضع ۱	۹۰	۱۷۰
موضع ۲	۹۲	۱۷۰
موضع ۳	۸۸	۱۷۱
موضع ۴	۹۳	۱۷۲
موضع ۵	۸۸	۱۶۸
موضع ۶	۹۰	۱۶۷
موضع ۷	۸۹	۱۷۳
موضع ۸	۹۱	۱۷۰
موضع ۹	۸۹	۱۶۹
میانگین	۹۰	۱۷۰/۲

با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که با کاهش ضریب اصطکاک و انتخاب زاویه‌ی گوشه معادل 20° درجه می‌توان به تغییر فرم یکنواخت‌تر و با نیروی پرس کم‌تر و در نتیجه توزیع یکنواخت‌تر نیرو در طول بیلت رسید. به نحوی که نتایج حاصل از بررسی خواص مکانیکی نمونه ECAP شده توسط تست تجربی نیز مؤید این موضوع می‌باشد. با کاهش اندازه دانه‌ها در ساختار در نتیجه عملیات ECAP افزایش خواص استحکامی در برابر تنش‌های کششی و کاهش میزان ازیاد طول تا حد نصف را می‌توان در جدول (۳) مشاهده نمود. بدیهی است افزایش استحکام کششی بر اساس قانون هال-پچ ناشی از کاهش اندازه دانه می‌باشد [۱۵، ۶].

هم‌چنین مطابق میانگین نتایج میکروسختی‌سنجی در نقاط مختلف مقطع نمونه، مقدار همگنی ساختار به موجب یکنواختی بیش‌تر در توزیع کرنش قابل مشاهده می‌باشد (جدول ۲).

جدول (۳): خواص مکانیکی آلیاژ ۷۰۷۵ قبل و بعد از یک مرحله فرآیند

ECAP

	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	درصد ازدیاد طول (%)
بدون ECAP	۴۲۰	۲۰۲	۱۶
یک‌بار ECAP	۶۲۰	۵۵۰	۸

مراجع

- 1- Segal V.M., "Materials processing by simple shear", *Material Science and Engineering A*, Vol.197, pp. 157-164, 1995.
- 2- Ruslan Z.V., Terence G.L., "Principles of equal-channel angular pressing as processing tool for grain refinement", *Progress in Materials Science*, Vol.51, pp. 881-981, 2006.
- 3- Xu S., Zhao G., Ma X., Ren G., "Finite element analysis and optimization of equal channel angular pressing for producing ultra-fine grained materials", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.184, pp. 209-216, 2007.
- 4- Nagasekhar A.V., Tick-Hon Y., Lib S., Seow H.P., "Effect of acute tool angles on equal channel angular extrusion/pressing", *Material Science and Engineering A*, Vol.410-411, pp. 269-272, 2005.
- 5- Narendra B.D., Nayak S., "Nanocoatings for engine application", *Surface & Coatings Technology*, Vol.194, pp. 58- 67, 2005.
- 6- Greger M., Cerny M., Kander L., "The formation of submicron and nanocrystalline grain structures Al- Mg-Si alloy by ECAP deformation", *Proceedings of the 19th International Conference of Metallurgy and Materials (Metal 2010)*, Czech Rep., pp. 1-6, 2010.
- 7- Basavaraj V.P., Uday Ch., Prasanna Kumar T.S., "Influence of friction in equal channel angular pressing – A study with simulation", *Proceedings of the 17th International Conference of Metallurgy and Materials (Metal 2008)*, Czech Rep., pp. 1-9, 2008.
- 8- Bidulska J., Kocisko R., Kvackaj T., Bidulsky R., Actis Grande M., "Numerical simulations of EN AW 2014 Aluminum alloy in ECAP process", *Acta Metallurgica Slovaca*, Vol.14, pp. 342-348, 2008.
- 9- Li S., Beyerlein I.J., Necker C.T., Alexander D.J., Bourke M., "Heterogeneity of deformation texture in equal channel angular extrusion of copper", *Acta Materialia*, Vol.52, pp. 4859-4875, 2004.
- 10- Xun Y., Mohamed F.A., "Refining efficiency and capability of top-down synthesis of nanocrystalline materials", *Materials Science and Engineering A*, Vol.528, pp. 5446-5452, 2011.
- 11- Gholinia A1, Prangnell P.B., Markushev M.V., "The effect of strain path on the development of deformation structures in severely deformed aluminum alloys processed by ECAE", *Acta mater*, Vol.48, pp. 1115-1130, 2000.
- 12- Cardoso K.R., Travessa D.N., Botta W.J., Jorge Jr.A.M., "High Strength AA7050 Al alloy processed by ECAP: Microstructure and mechanical properties", *Materials Science and Engineering A*, Vol.528, pp. 5804-5811, 2011.
- 13- Alhajeria S., Gaoa N., Langdona T., "Hardness homogeneity on longitudinal and transverse sections of an aluminum alloy processed by ECAP", *Materials Science and Engineering A*, Vol.528, pp. 3833-3840, 2011.
- 14- Nagasekhar A.V., Yoon S.C., Tick-Hon Y., Kim H.S., "An experimental verification of the finite element modeling of equal channel angular pressing", *Computational Materials Science*, Vol.46, pp. 347-351, 2009.
- 15- Hertzberg R.W., "Deformation and fracture mechanics of engineering materials", John Wiley and Sons, 1996.