

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



A comparison between deformation behavior of ECAP, Cross-ECAP and TE by finite element analysis in AA1070

Abstract

Nowadays one the effective manufacturing process to achieve ultrafine-grained structure and modified mechanical properties of metallic materials is severe plastic deformation (SPD). Among SPD techniques, many researches have been performed on equal channel angular pressing (ECAP), twist extrusion (TE) and a new modified ECAP method entitled as cross-equal channel angular pressing (Cross-ECAP). Therefore, the deformation behavior of the deformed sample produced by above methods is a choice of interest. Moreover, homogeneity of the deformation as key factor of the uniform distribution of mechanical properties of the processed sample is an important issue. In present paper, the deformation behavior of AA1070 aluminum alloy sample in ECAP, Cross-ECAP and TE with the help of finite element analysis is investigated. In order to analyze the deformation behavior, the strain distribution and flow of the material is analyzed. Finite element analysis is performed by using DEFORM-3D™ finite element commercial software. In order to verify the simulation results, a comparison with the results of other scientific paper is performed. Results show that the filling fraction of the die in Cross-ECAP is higher than the other methods, therefore, this provides the possibility of repetition of the process and achievement of higher strain. The average plastic strain of 3.5 is imposed on the sample during Cross-ECAP, consequently, this process can deform the sample severely than the other techniques. Moreover, it is observed that the homogeneity of the deformed sample during TE is reduced which is not desirable in SPD techniques.

Keywords: FEA, severe plastic deformation, ECAP, TE.

مقایسه رفتار تغییر شکل در فرآیندهای ECAP، Cross-ECAP و TE با استفاده از

آنالیز المان محدود در آلیاژ آلومینیوم ۱۰۷۰

چکیده

امروزه یکی از مؤثرترین روش‌های فرآوری مواد فلزی به‌منظور دستیابی به ساختارهای بسیار ریزدانه و خواص مکانیکی بهینه استفاده از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است. از میان روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، پرس در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار (ECAP)، اکستروژن پیچشی (TE) و روش نوین پرس در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار صلیبی (Cross-ECAP) مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته‌اند، لذا بررسی رفتار تغییر شکل اعمالی به نمونه توسط فرآیندهای فوق و همگنی آن به سبب بهبود و توزیع یکنواخت خواص در حجم ماده از اهمیت بسیاری برخوردار است. در پژوهش حاضر به بررسی رفتار تغییر شکل نمونه آلیاژ آلومینیومی ۱۰۷۰ توسط روش‌های ECAP، Cross-ECAP و TE با استفاده از آنالیز المان محدود پرداخته شد. به‌منظور بررسی همگنی تغییر شکل اعمالی به نمونه توزیع کرنش مؤثر و سیلان نمونه مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز المان محدود توسط نرم‌افزار DEFORM-3DTM انجام شد و برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی از مقایسه با نتایج عملی و گزارش‌های علمی سایر پژوهشگران استفاده گردید. نتایج نشان دادند که مقدار پرشدن کانال قالب در روش Cross-ECAP نسبت به سایر روش‌ها بیشتر است لذا امکان تکرار فرآیند و اعمال کرنش پلاستیک بیشتری به نمونه فراهم می‌شود. با استفاده از روش Cross-ECAP امکان اعمال کرنش پلاستیک تا حدود ۳/۵ به ازای انجام یک پاس وجود دارد لذا نسبت به سایر روش‌ها، فرآیندی مؤثرتر شناخته می‌شود. همچنین تغییر شکل اعمالی به نمونه در فرآیند TE نسبت به سایر روش‌ها از همگنی کمتری برخوردار است که در روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید این امر مطلوب نیست.

واژه‌های کلیدی: FEA، تغییر شکل پلاستیک شدید، ECAP، TE.

مقدمه

اندازه دانه در مواد تأثیر بسزایی بر خواص مکانیکی و فیزیکی دارد. این مواد با ساختارهایی ریزدانه و خواص مکانیکی و متالورژیکی منحصربه‌فرد به مواد فوق ریزدانه^۱ معروف هستند و امروزه مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند (Pardis and Ebrahimi, 2009; Zhu, Valiev, Langdon, Tsuji and Lu, 2010). از جمله روش‌های فرآوری مواد فوق ریزدانه می‌توان به تغییر شکل پلاستیک شدید^۲ اشاره کرد (Zhu et al, 2010).

تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)^۳ به فرآیند شکل‌دهی گفته می‌شود که در آن کرنش پلاستیک زیادی به ماده وارد می‌شود. این روش از طریق چند مکانیسم سبب ریزدانه سازی مواد می‌شود، از جمله این مکانیسم‌ها می‌توان به ایجاد، حرکت و افزایش چگالی نابجایی‌ها و به تبع آن ایجاد مرزهای فرعی اشاره کرد (شهاب، اکبری موسوی و مسطوری، ۱۳۸۵؛ Valiev, Islamgaliev and Alexandrov, 2000). برای تولید مواد فوق ریزدانه با خواص مطلوب با استفاده از روش فوق رعایت چند شرط لازم است، از جمله این شروط می‌توان به ایجاد مرزهای زاویه زیاد، ریزدانه سازی همگن در حجم و ثبات ابعادی نمونه اشاره کرد. روش‌های شکل‌دهی سنتی نظیر نورد، کشش یا اکستروژن یک یا چند مورد از شروط ذکر شده را ندارند، به همین دلیل برای تولید مواد فوق ریزدانه باید روش‌هایی به کار گرفته شود تا بتوان مقدار زیادی تغییر شکل را با رعایت شرایط فوق در دمای پایین‌تر حجم ماده اعمال نمود (Valiev et al, 2000).

فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید تکنیک‌های متنوعی دارد که هم برای تغییر شکل مواد حجیم^۴ و هم ورق‌ها کاربرد دارند که از جمله تکنیک‌های مؤثر برای تغییر شکل مواد حجیم می‌توان به پرس در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار (ECAP)^۵ (Valiev and Langdon, 2006)، فورج چندمرحله‌ای (MDF)^۶ (Miura, Yang and Sakai, 2010)، اکستروژن پیچشی (TE)^۷ (Beygelzimer, Nagasekhar and Kim, 2002) و پرس در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار صلیبی (Cross-ECAP)^۸ (Orlov and varyukhin, 2002) اشاره کرد. (2008)

از میان روش‌های فوق، پرس در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار و اکستروژن پیچشی پتانسیل تولید قطعات صنعتی و قابلیت فرآوری نمونه‌های بزرگ را دارند لذا بررسی و توسعه آن‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. همچنین روش نوینی از فرآیند ECAP جهت رفع محدودیت‌های ناشی از اعمال تغییر شکل به نمونه، تحت عنوان Cross-ECAP مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است (Nagasekhar and Kim, 2008). ECAP به‌عنوان یکی از روش‌های مرسوم تغییر شکل پلاستیک شدید محسوب می‌شود که اولین بار توسط سگال^۹ و همکارانش (۱۹۸۱) مطرح گردید. هدف اساسی این فرآیند اعمال کرنش‌های بالا بر شمشال‌های^{۱۰} فلزی به‌منظور اصلاح ریزساختار و ریزدانه سازی بوده است. روش Cross-ECAP توسط ناگاسکار^{۱۱} و کیم^{۱۲} (۲۰۰۸) به‌منظور رفع محدودیت‌های اعمال تغییر شکل در فرآیند ECAP معرفی گردیده است. در این روش دو کانال با سطح مقطع یکسان به‌صورت صلیبی نسبت به همدیگر قرار دارند (مطابق شکل ۱). نمونه با استفاده از این روش در دو مرحله تحت تغییر شکل قرار می‌گیرد: (۱) درحالی‌که سنبه‌های ۳ و ۴ ثابت هستند، سنبه‌های ۱ و ۲ به سمت مرکز قالب حرکت کرده و نمونه در جهت محور افقی سیلان می‌کند، (۲) در مرحله دوم سنبه‌های

¹ Ultrafine Grained

² Severe Plastic Deformation

³ Severe plastic deformation

⁴ Bulk

⁵ Equal channel angular pressing

⁶ Multi-directional forging

⁷ Twist extrusion

⁸ Cross-Equal Channel Angular

Pressing

⁹ Segal

¹⁰ Billet

¹¹ Nagasekhar

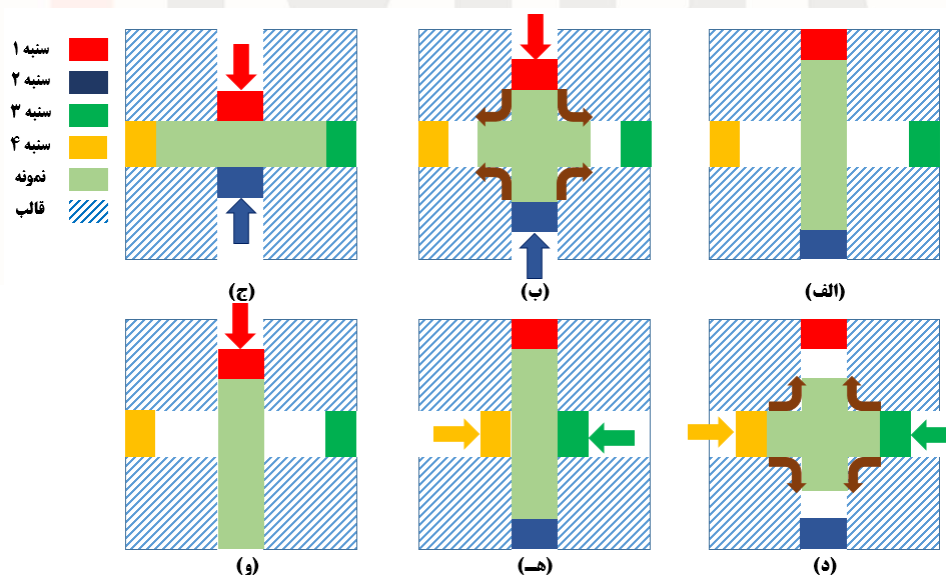
¹² Kim

۳ و ۴ به سمت مرکز قالب حرکت کرده و نمونه در اثر نیروی وارده از آن‌ها در جهت محور عمودی سیلان کرده و تغییر شکل می‌دهد.

اکستروژن پیچشی (TE) از جمله روش‌هایی است که توسط محققین اوکراینی (Beygelzimer, Varyukhin, Synkov, and Orlov, 2009) معرفی شده است. این روش بر پایه فرآیند اکستروژن مستقیم استوار است. شایان ذکر است که وجه تمایز این روش با اکستروژن مستقیم در طراحی قالب اکستروژن می‌باشد به‌طوری‌که قالب این روش با یک زاویه پیچش و یک زاویه شیب طراحی می‌گردد.

با توجه به پتانسیل صنعتی شدن و قابلیت فرآوری نمونه‌های بزرگ با استفاده از روش‌های ECAP، Cross-ECAP و TE، بررسی رفتار تغییر شکل و همگنی آن به سبب بهبود و توزیع یکنواخت خواص در حجم ماده از اهمیت بسیاری برخوردار است.

در پژوهش حاضر به بررسی رفتار تغییر شکل نمونه آلومینیومی ۱۰۷۰ توسط روش‌های ECAP، Cross-ECAP و TE با استفاده از آنالیز المان محدود پرداخته شده است. بدین منظور از قالب‌های ECAP با زاویه داخلی 90° و شعاع خارجی ۳ mm، Cross-ECAP با زاویه داخلی 90° و TE با زاویه پیچش 60° با مقطع ورودی $20 \times 20 \text{ mm}^2$ استفاده شده است. به‌منظور بررسی همگنی تغییر شکل اعمالی به نمونه توزیع کرنش مؤثر و سیلان نمونه^۱ مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز المان محدود توسط نرم‌افزار DEFORM-3DTM انجام شد و برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی از مقایسه با نتایج عملی و گزارش‌های علمی سایر پژوهشگران استفاده گردید.



شکل ۱. شماتیک فرآیند Cross-ECAP: (الف) شروع، (ب) پرس عمودی توسط سنبه‌های ۱ و ۲، (ج) اتمام سیکل اول، (د) پرس افقی نمونه توسط سنبه‌های ۳ و ۴، (ه) اتمام سیکل دوم، (و) خروج نمونه فرآوری شده.

^۱ Flow net

مواد و روش‌ها

برای انجام شبیه‌سازی فرآیندهای ECAP، Cross-ECAP و TE از نرم‌افزار المان محدود DEFORM-3DTM استفاده شد. بدین منظور قالب‌های ECAP با زاویه داخلی ۹۰° و شعاع خارجی ۳ mm، Cross-ECAP با زاویه داخلی ۹۰° و TE با زاویه پیش ۶۰° با مقطع ورودی ۲۰×۲۰ mm² طراحی و به صورت صلب در نظر گرفته شد. نمونه مکعب مستطیلی با ابعاد ۱۲۰×۲۰×۲۰ mm³ طراحی و با رفتار پلاستیک از جنس آلومینیوم ۱۰۷۰ تعریف گردید. تعداد ۳۰،۰۰۰ عدد مش از نوع چهاروجهی^۱ جهت مش بندی نمونه انتخاب شد. رفتار نمونه پلاستیک با استفاده از راهنمای نرم‌افزار مطابق رابطه (۱) تعریف گردید (Scientific forming technologies corporation, 2007):

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \quad (1)$$

که در این رابطه، $\bar{\sigma}$ تنش سیلان (MPa)، $\bar{\epsilon}$ کرنش پلاستیک مؤثر، $\dot{\bar{\epsilon}}$ نرخ کرنش پلاستیک مؤثر و T دما (°C) است. شبیه‌سازی در دمای ۲۰ °C، مدول اصطکاک برشی با ضریبی برابر ۰/۱۲ و سرعت حرکت سنبه ۱ mm.s⁻¹ انجام شد. برای بررسی میزان پرشدن کانال قالب، پس از انجام شبیه‌سازی و آماده‌سازی تصاویر از نرم‌افزار آنالیز تصویر^۲ ImageJ استفاده گردید. فرآیند شبیه‌سازی به ازای اعمال یک پاس از فرآیندهای ECAP، Cross-ECAP و TE به نمونه انجام پذیرفت و پس از آن که تمام حجم نمونه از کانال قالب عبور کرد، فرآیند شبیه‌سازی پایان یافت.

نتایج و بحث

میزان پرشدن کانال قالب:

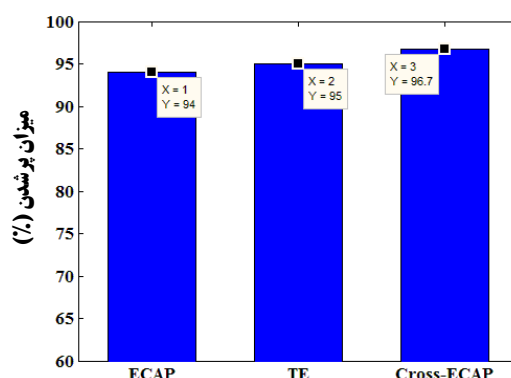
میزان پرشدن کانال خروجی قالب از اهمیت بسیاری برخوردار است، علت آن را می‌توان این‌گونه بیان کرد که هرچه میزان پرشدن بیشتر باشد، نمونه ثبات ابعادی بیشتری داشته و لذا می‌توان به تعداد سیکل بیشتری نمونه را فرآوری کرد و در نهایت کرنش بیشتری به نمونه اعمال و انباشته نمود. بنابراین بررسی این پارامتر از اهمیت خاصی برخوردار است لذا پس از اتمام شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ImageJ و رابطه (۲) میزان پرشدن کانال خروجی قالب محاسبه گردید:

$$F_R = \frac{S_w}{S_c} \times 100 \quad (2)$$

که در این رابطه، F_R میزان پرشدن کانال قالب (%، S_w مساحت نمونه (mm²) و S_c مساحت کانال قالب (mm²) است. در شکل (۲) میزان پرشدن کانال خروجی قالب در فرآیند ECAP، Cross-ECAP و TE نشان داده شده است. مطابق این شکل نمونه فرآوری شده توسط فرآیند Cross-ECAP کسر بیشتری از کانال خروجی قالب را پر می‌کند، بنابراین نمونه افزایش طول نمی‌دهد و می‌تواند ابعاد اولیه خود را با تغییرات جزئی حفظ کند و لذا می‌توان با تکرار فرآیند نسبت به دیگر روش‌ها، نمونه را تحت تغییر شکل بیشتری قرار داد و در نهایت کرنش بیشتری به آن اعمال کرد.

^۱ Tetrahedral

^۲ Image Analyzer



شکل ۲. میزان پر شدن کانال خروجی نمونه فراآوری شده در فرآیندهای ECAP، TE و Cross-ECAP.

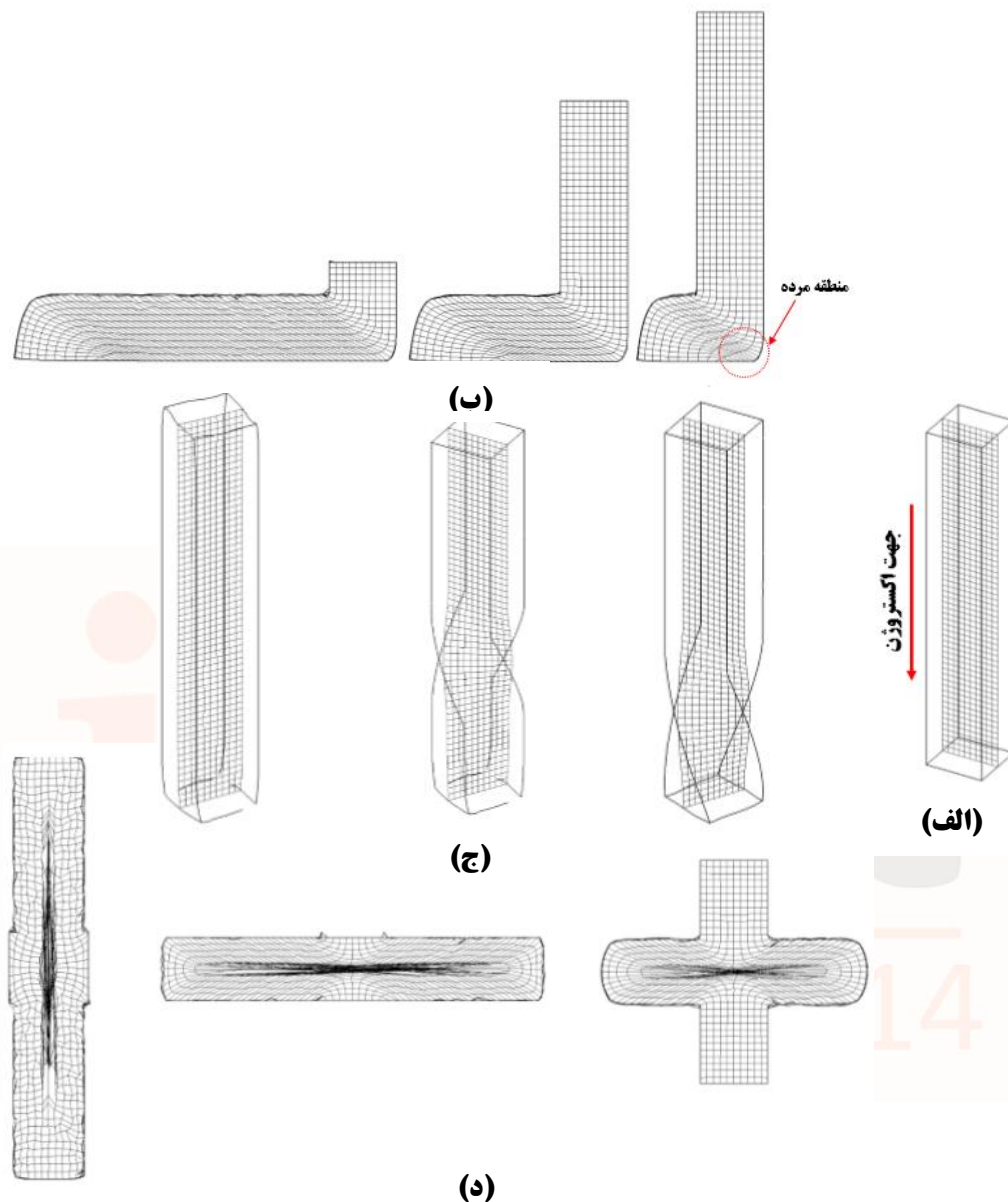
سیلان ماده:

جهت بررسی نحوه سیلان ماده حین انجام تغییر شکل در فرآیندهای فوق، صفحه‌ای از مرکز نمونه در امتداد جهت اکستروژن مطابق شکل (۳-الف) انتخاب و به صورت مربع‌های $2 \times 2 \text{ mm}^2$ شبکه‌بندی^۱ شد. در شکل (۳-ب-د) نحوه سیلان ماده حین تغییر شکل نمونه توسط روش‌های ECAP، Cross-ECAP و TE نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که حین انجام تغییر شکل به روش ECAP (قالب با زاویه داخلی 90°) امکان تشکیل منطقه مرده^۲ وجود دارد، اما در TE به آن دلیل که بر اساس فرآیند اکستروژن مستقیم پایه‌گذاری شده است، هیچ‌گونه منطقه مرده‌ای تشکیل نمی‌شود و لذا ماده به صورت پیوسته تحت تغییر شکل قرار می‌گیرد. همچنین مشاهده می‌شود که سیلان نمونه در روش Cross-ECAP در مرکز نمونه متمرکز است و حین تغییر شکل در نمونه همانند روش TE منطقه مرده تشکیل نمی‌شود. شایان ذکر است که با توجه به آن که در ECAP نسبت به روش‌های Cross-ECAP و TE امکان تشکیل منطقه مرده وجود دارد لذا می‌توان پیش‌بینی کرد که نیروی لازم جهت انجام پرس نمونه در داخل قالب بیشتر خواهد بود.

لازم به ذکر است که نحوه سیلان ماده در سطح مقطع نمونه به سبب نحوه ایجاد تغییر شکل با توجه به نوع فرآیند نیز مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۴-الف-ج) نحوه سیلان ماده در صفحه‌ای عمود بر جهت اکستروژن در فرآیندهای فوق نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در فرآیند TE المان‌های سطحی هیچ‌گونه تغییری نکرده‌اند (شکل (۴-ب)) و تنها سطح مقطع حول محور عمود به صفحه تحت پیچش قرار گرفته است، اما فرآیند ECAP سبب شده است تا المان‌ها تحت کرنش برشی ساده قرار گیرند (شکل (۴-الف)) و در نتیجه تغییر شکل محسوس‌تری را نشان دهند. مطابق شکل (۴-ج) مشاهده می‌شود که سیلان نمونه در روش Cross-ECAP به دلیل تراکم تغییر شکل اعمالی در مرکز نمونه سبب شده است تا سیلان در این نواحی نسبت به سایر روش‌های فوق شدیدتر باشد.

^۱ Grid

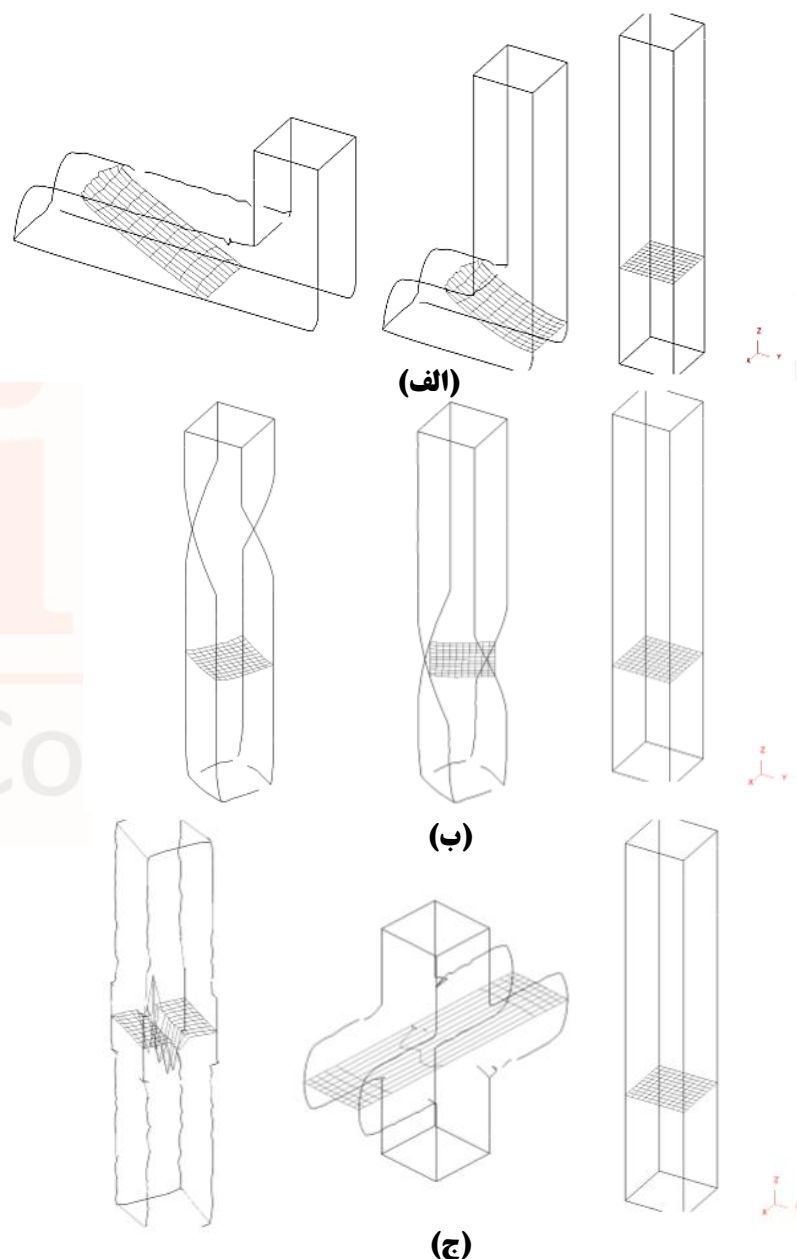
^۲ Dead Zone



شکل ۳. الف) شماتیک صفحه شبکه‌بندی شده و نحوه سیلان ماده حین انجام تغییر شکل در فرآیند: ب) ECAP، ج) TE و د) Cross-ECAP.

مطابق شکل (۴-ب) از آنجایی که روش TE بر پایه فرآیند اکستروژن مستقیم استوار است مقدار سیلان مناطق بیرونی و مناطق درونی به دلیل برابری سرعت سیلان و یا اختلاف ناچیز آن (به دلیل وجود شرایط اصطکاکی) یکسان است، لذا المان‌های سطحی حین تغییر شکل دچار تغییر ابعادی محسوسی نشده‌اند. در طرف مقابل در روش ECAP به سبب تشکیل منطقه مرده سیلان ماده در سطح مقطع متفاوت است. علت را می‌توان به دو صورت تشریح کرد: ۱) مناطق بالایی نمونه به سبب آن که با سطوح کمتری از مناطق داخلی کانال قالب در تماس هستند انرژی اصطکاکی کمتری نسبت به مناطق پایینی حین تغییر شکل مصرف می‌کنند، بنابراین سیلان بیشتری نسبت به مناطق پایینی دارند، ۲) مناطق پایینی نمونه به سبب تشکیل منطقه مرده سرعت سیلان کمتری

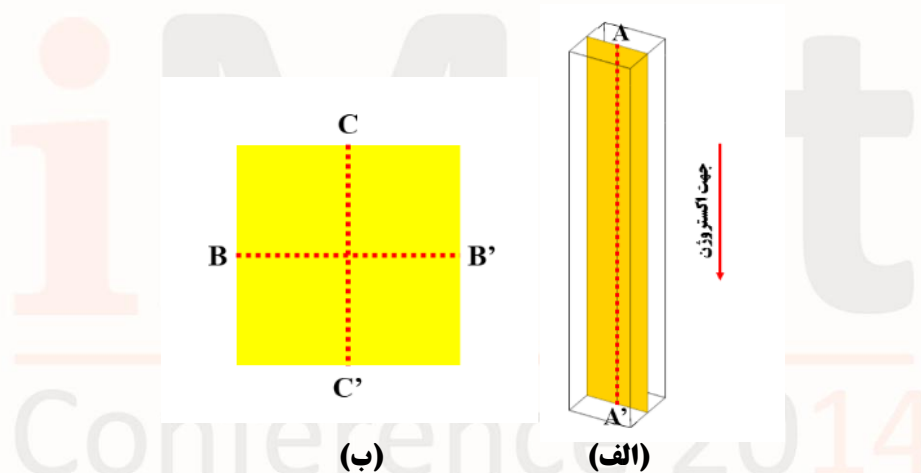
نسبت به مناطق بالایی داشته لذا سیلان این دو ناحیه متفاوت است (شکل ۴-الف)). همچنین در روش Cross-ECAP از آنجایی که نمونه حین تغییر شکل در سیکل اول در جهت محور افقی پرس می‌گردد سبب می‌شود تا این المان‌ها در جهت محور افقی کشیده شوند و سپس در سیکل دوم، در اثر اعمال تغییر شکل در جهت محور عمودی، المان‌ها حین سیلان دچار اعوجاج و جابجایی در جهت عمودی نیز می‌گردند. به همین دلیل، نحوه سیلان ماده در این صفحه در روش Cross-ECAP نسبت به دیگر روش‌های شدیدتر است.



شکل ۴. نحوه سیلان ماده در سطح مقطع نمونه حین تغییر شکل در فرآیندهای: الف) ECAP، ب) TE و ج) Cross-ECAP.

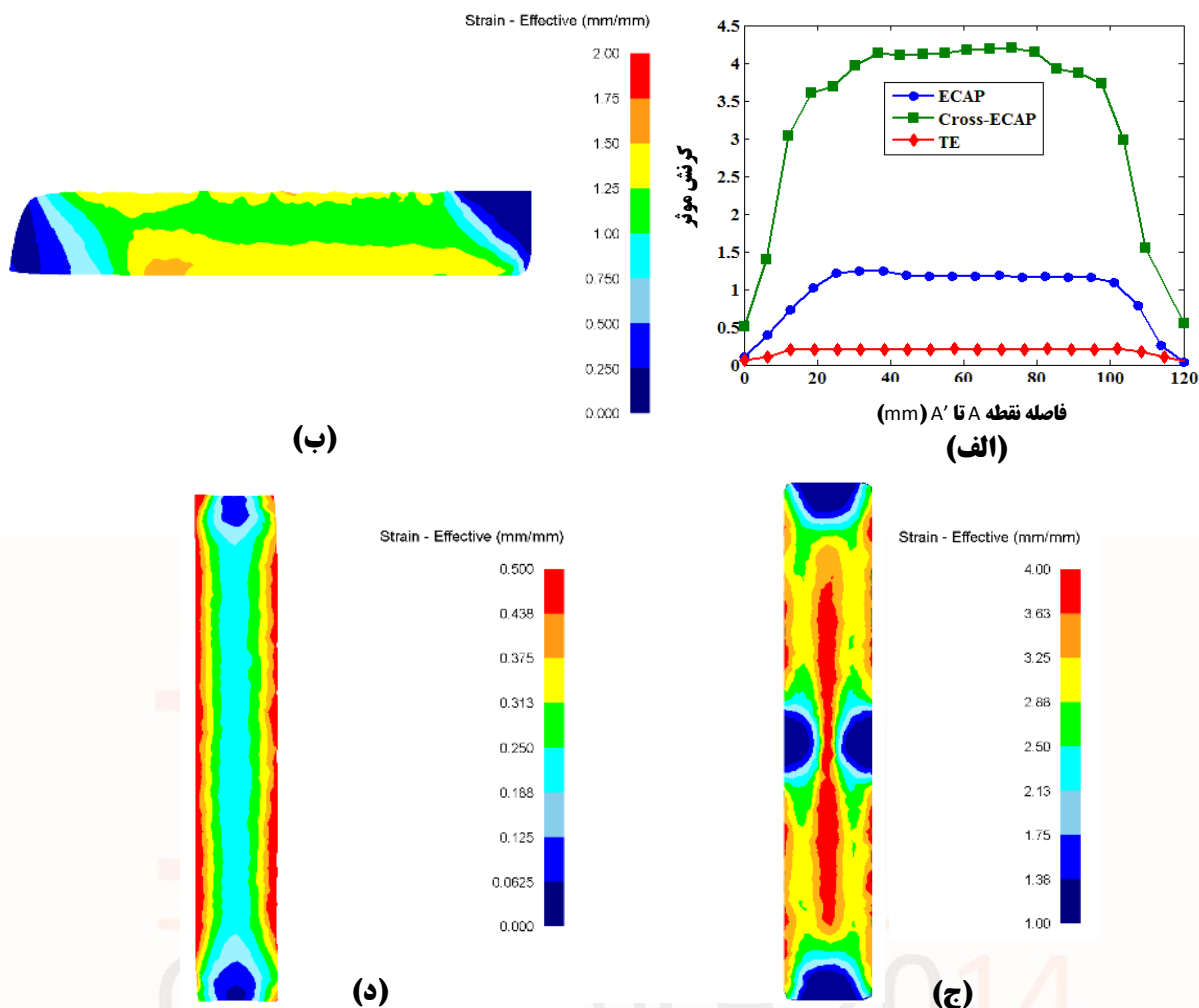
توزیع کرنش مؤثر:

به منظور بررسی توزیع و نحوه پراکندگی تغییر شکل اعمالی به نمونه های فرآوری شده توسط روش های ECAP، Cross-ECAP و TE از توزیع کرنش مؤثر در دو وضعیت نشان داده شده در شکل (۵) استفاده شد: (۱) در صفحه ای در مرکز نمونه در جهت اکستروژن در امتداد خط AA' (شکل (۵-الف))، (۲) در صفحه ای عمود بر جهت اکستروژن در کانال خروجی قالب در امتداد دو خط BB' و CC' (شکل (۵-ب)). در شکل (۶-الف) توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه در امتداد خط AA' پس از انجام یک پاس از فرآیندهای فوق نشان داده شده است، همچنین شکل (۶-ب-د) تصاویر رنگی توزیع کرنش مؤثر نمونه فرآوری شده را نشان می دهد. مشاهده شده است که نمونه فرآوری شده توسط Cross-ECAP نسبت به سایر روش های دیگر کرنش مؤثر بیشتری را تجربه می کند. علت این موضوع را می توان به نحوه سیلان ماده حین تغییر شکل و تراکم کرنش اعمالی به نواحی مرکزی مرتبط دانست. مطابق شکل (۶-ب) مشاهده می شود که مناطق پایینی نمونه حین تغییر شکل توسط ECAP به سبب وجود منطقه مرده و سیلان کمتر نسبت به مناطق بالایی کرنش مؤثر بیشتری را نیز متحمل شده است. همچنین نمونه فرآوری شده توسط روش TE به دلیل ماهیت پیچشی تغییر شکل و وجود شرایط اصطکاکی نواحی بیرونی نمونه نسبت به نواحی مرکزی تحت تأثیر کرنش بیشتری واقع شده است.

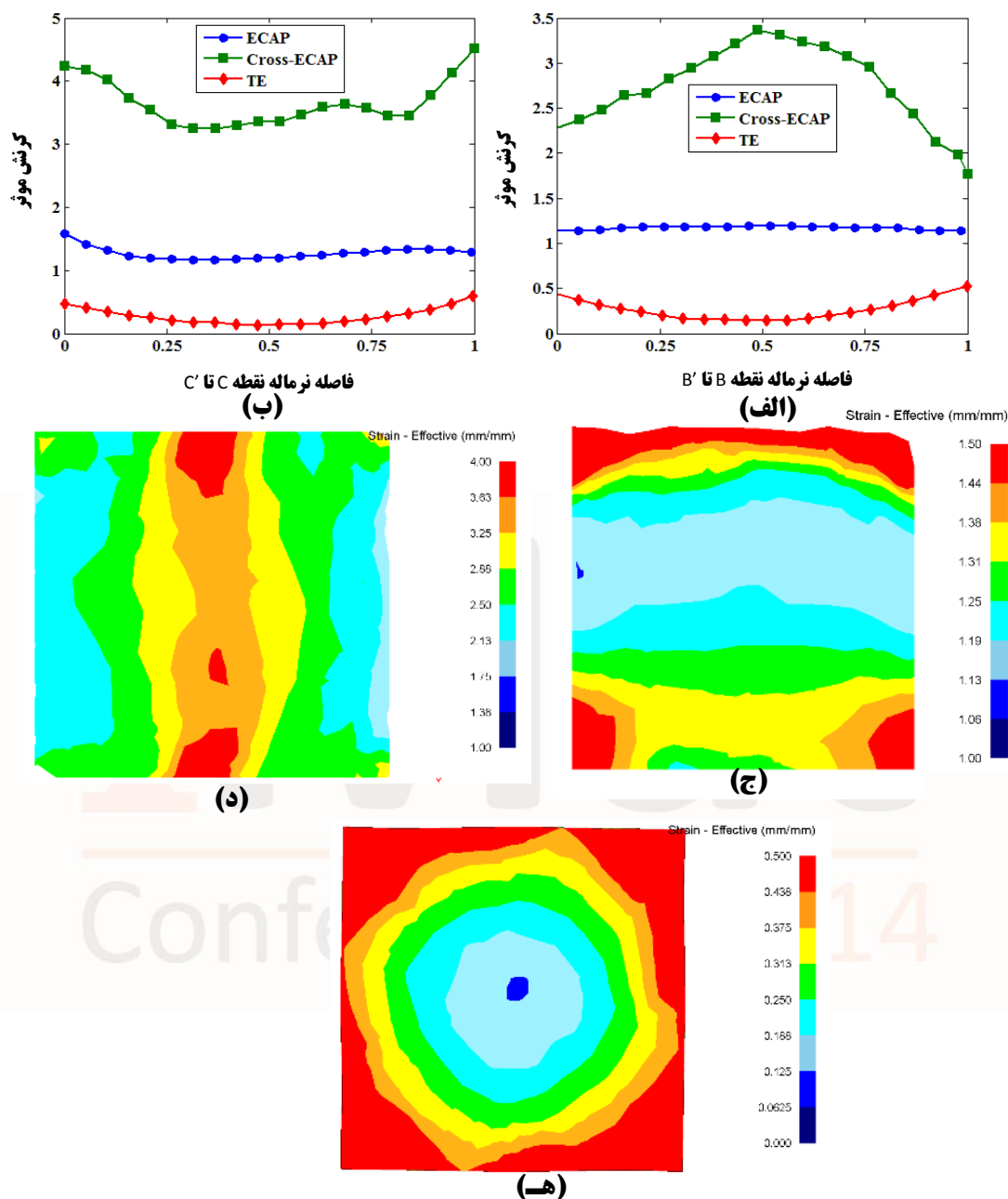


شکل ۵. ارزیابی توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه در: (الف) صفحه ای در مرکز نمونه در امتداد جهت اکستروژن، (ب) صفحه ای عمود به جهت اکستروژن در کانال خروجی قالب.

شکل (۷-الف و ب) توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه در امتداد خطوط BB' و CC' را نشان می دهد. همچنین برای وضوح بیشتر از تصاویر رنگی توزیع کرنش مؤثر مطابق شکل (۷-ج-ه) استفاده گردید. مطابق این شکل مشاهده می شود که نمونه فرآوری شده توسط فرآیند Cross-ECAP نسبت به سایر روش ها، کرنش مؤثر بیشتری را تجربه کرده است. همچنین نمونه در روش TE در امتداد خطوط BB' و CC' تحت تغییر شکل متقارن تری به دلیل اعمال تغییر شکل پیچشی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که کسر بیشتری از مناطق پایینی نمونه پس از انجام یک پاس ECAP کرنش بیشتری را متحمل شده است که علت آن را می توان به نحوه سیلان نمونه و تشکیل منطقه مرده مرتبط دانست.



شکل ۶ الف) توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه در امتداد خط AA'، تصویر رنگی توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه پس از یک پاس فرآیند: ب) ECAP، ج) Cross-ECAP و د) TE.

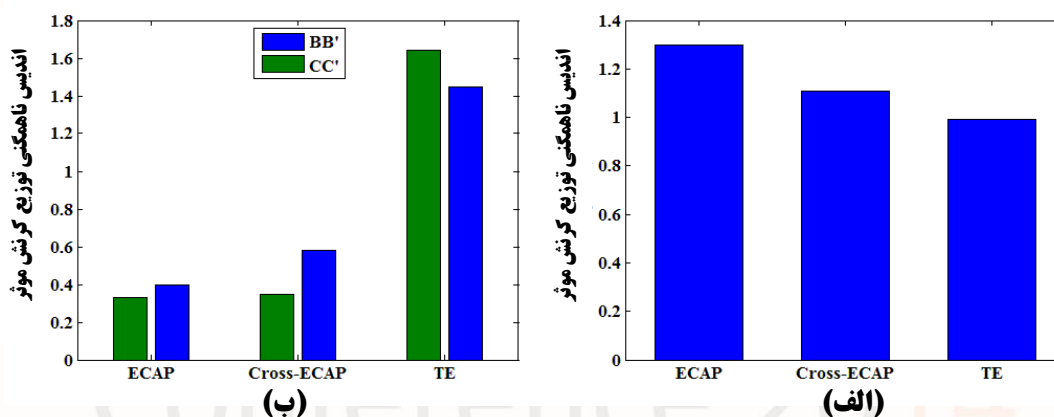


شکل ۷. توزیع کرنش مؤثر در امتداد خطوط: (الف) BB'، (ب) CC' و تصویر رنگی توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه در صفحه‌ای عمود به جهت اکستروژن در کانال خروجی پس از اتمام یک پاس از فرآیندهای: (ج) ECAP، (د) Cross-ECAP و (ه) TE.

جهت بررسی همگنی تغییر شکل اعمالی به نمونه‌های تغییر شکل یافته مطابق رابطه (۳) از اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر استفاده گردید:

$$C_i = \frac{\bar{\epsilon}_{\max} - \bar{\epsilon}_{\min}}{\bar{\epsilon}_{\text{avg}}} \quad (3)$$

که در این رابطه، C_i اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر، $\bar{\epsilon}_{\max}$ ، $\bar{\epsilon}_{\min}$ و $\bar{\epsilon}_{\text{avg}}$ به ترتیب کرنش‌های مؤثر بیشینه، کمینه و میانگین در توزیع است. در شکل (۸-الف و ب) اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر در امتداد خطوط AA'، BB' و CC' نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه در جهت اکستروژن توسط روش ECAP نسبت به روش‌های دیگر بیشینه است، لذا تغییر شکل ایجاد شده در نمونه حین انجام این فرآیند ناهمگن تر بوده و توزیع خواص مکانیکی در نمونه غیریکنواخت است. از طرف دیگر اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر در جهت خطوط BB' و CC' در صفحه‌ای عمود به جهت اکستروژن نشان می‌دهد که تغییر شکل اعمالی توسط فرآیند TE ناهمگن تر است و علت آن را این گونه می‌توان بیان نمود که تغییرات کرنش از نواحی بیرونی به داخلی حین پیچش در فرآیند TE زیاد است و لذا تغییر شکلی غیریکنواخت به نمونه اعمالی می‌شود.

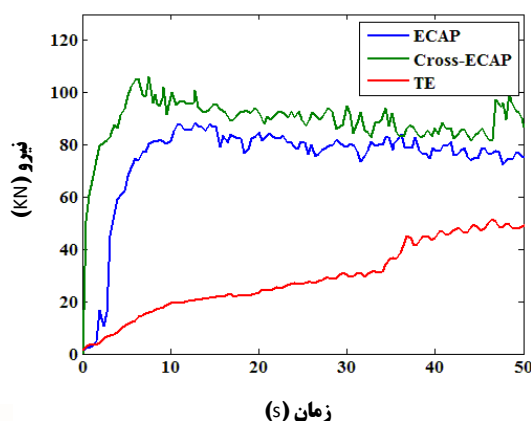


شکل ۸. اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه پس از انجام یک پاس فرآیند ECAP، Cross-ECAP و TE در امتداد خطوط: الف) AA'، ب) BB' و CC'.

نیرو-زمان:

در شکل (۹) تغییرات نیرو برحسب زمان حین تغییر شکل نمونه نشان داده شده است. مطابق این شکل مقدار نیرو اعمالی حین تغییر شکل در فرآیند TE بسیار کمتر از روش‌های ECAP و Cross-ECAP است. علت این موضوع را می‌توان این گونه تشریح کرد که روش TE بر اساس روش اکستروژن مستقیم استوار است و لذا نیروی کمتری جهت اعمال تغییر شکل به نمونه نیاز دارد. از طرف دیگر حین تغییر در روش ECAP (قالب با زاویه داخلی ۹۰°) امکان تشکیل منطقه مرده وجود دارد، بنابراین جهت پیشروی و سیلان ماده نیروی بیشتری نسبت به TE لازم است. همچنین در فرآیند Cross-ECAP به سبب ماهیت سیلان ماده در جهتی عمود به راستای اعمال نیرو، نیروی مورد نیاز برای پرس نمونه افزایش می‌یابد. همچنین مطابق این شکل در فرآیند ECAP تا قبل از برخورد نمونه به سطح پایینی کانال قالب و قبل از شروع تغییر شکل نیروی لازم صرفاً جهت غلبه بر اصطکاک صرف می‌شود، لذا تغییرات نیرو ناچیز است. سپس با آغاز تغییر شکل حاصل از کرنش برشی ساده نیرو به شدت افزایش یافته و با ادامه فرآیند و پس از برقراری

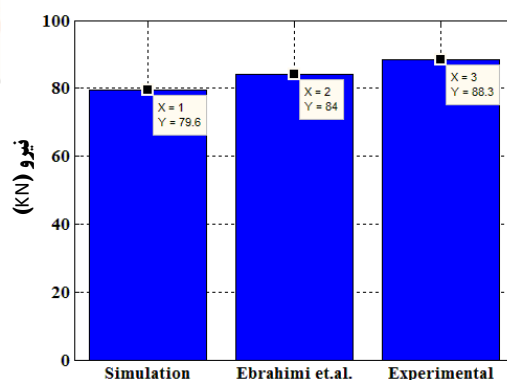
تبادل در تغییر شکل و غلبه بر اصطکاک نیرو کاهش می‌یابد. در روش TE از آنجایی که نمونه تنها تحت پیچش قرار می‌گیرد، نیرو به‌صورت تدریجی تا انتهای فرآیند افزایش می‌یابد.



شکل ۹. تغییرات نیرو-جابجایی در فرآیندهای ECAP و TE.

اعتبار سنجی شبیه‌سازی:

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند ECAP از نتایج شبیه‌سازی ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۰) و آزمایش عملی ایوانی و طاهری (۲۰۰۷) استفاده شد. در شکل (۱۰) مقایسه مقدار نیروی لازم برای پرس نمونه در فرآیند ECAP نشان داده شده است و همچنین جدول (۱) مقدار درصد خطای شبیه‌سازی با هر یک از نتایج را نشان می‌دهد که بیانگر مقادیر قابل قبولی است.

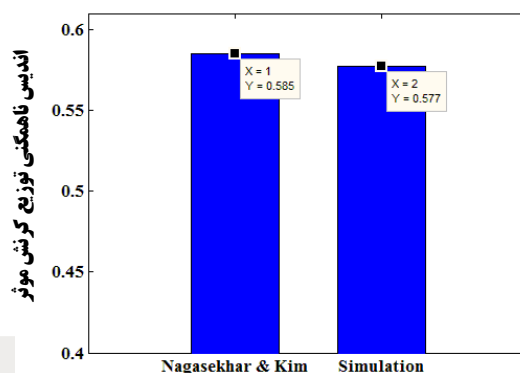


شکل ۱۰. مقایسه مقدار نیروی لازم برای پرس نمونه حاصل از شبیه‌سازی با نتایج گزارش‌های علمی در روش ECAP.

جدول ۱. مقدار درصد خطای هریک از روش های شبیه سازی با سایر نتایج گزارش های علمی.

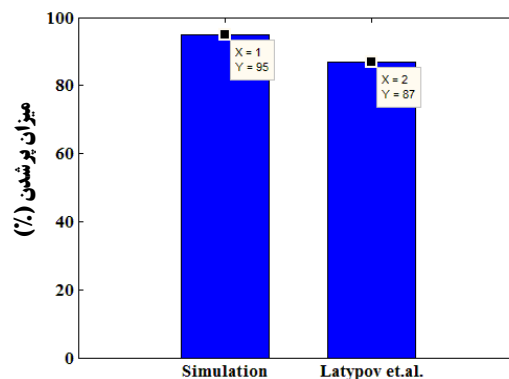
درصد خطا	ابراهیمی و همکاران	آزمایش عملی (ایوانی و طاهری)
نیروی پرس (شبیه سازی)	۵/۲٪	۹/۸٪

همچنین جهت تطبیق نتایج حاصل از شبیه سازی روش Cross-ECAP از نتایج ناگاسخار و کیم (۲۰۰۸) استفاده شد. در شکل (۱۱) مقایسه اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر حاصل از شبیه سازی به نمونه نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می شود که درصد خطای نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج ناگاسخار و کیم به اندازه ۱/۳٪ اختلاف دارد که مقدار قابل قبولی را نشان می دهد.



شکل ۱۱. مقایسه اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه حاصل از شبیه سازی و نتایج ناگاسخار و کیم.

برای ارزیابی نتایج حاصل از شبیه سازی روش TE از مقایسه با نتایج لاتیپوف و دیگران (۲۰۱۲) استفاده شد. در شکل (۱۲) مقدار پرشدن کانال خروجی قالب در روش TE نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می شود که اختلاف بین مقدار پرشدن حاصل از شبیه سازی با نتایج حاصل از گزارش لاتیپوف و دیگران به مقدار ۹/۱٪ خطا دارد که این نیز مقدار قابل قبولی است.



شکل ۱۲. مقایسه میزان پرشدن حاصل از شبیه سازی با نتایج لاتیپوف و همکاران.

نتیجه گیری:

در پژوهش حاضر به بررسی و مقایسه روش های تغییر شکل پلاستیک شدید ECAP، Cross-ECAP و TE بر رفتار تغییر شکل نمونه آلومینیومی ۱۰۷۰ با استفاده از آنالیز المان محدود پرداخته و نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- مقدار پرسیدن کانال قالب در روش Cross-ECAP نسبت به روش های ECAP و TE بیشتر است. بنابراین نمونه تغییر شکل یافته توسط این روش ثبات ابعادی بیشتری داشته و لذا امکان تکرار فرآیند بدون نیاز به عملیات واسطه نظیر ماشین کاری فراهم می شود. همچنین سبب می شود تا بتوان با تکرار فرآیند کرنش پلاستیک بیشتری به نمونه اعمال و انباشته نمود.
- ۲- با استفاده از روش Cross-ECAP امکان اعمال کرنش پلاستیک در حدود ۳/۵ به ازای انجام یک پاس وجود دارد، بنابراین نسبت به سایر روش های تغییر شکل پلاستیک شدید فرآیند مؤثرتری شناخته می شود.
- ۳- روش TE به سبب آن که بر اساس اکستروژن مستقیم استوار است برای ایجاد تغییر شکل در نمونه به کمترین نیرو نیاز دارد همچنین تغییر شکل اعمالی به نمونه در فرآیند TE نسبت به سایر روش ها از همگنی کمتری برخوردار است.
- ۴- نتایج حاصل از شبیه سازی با سایر گزارش های علمی با اختلاف قابل قبولی به دست آمده که بیانگر دقت انجام شبیه سازی است.

منابع:

- Pardis, N. & Ebrahimi, R. (2009). "Deformation behavior in Simple Shear Extrusion (SSE) as a new severe plastic deformation technique". Materials Science and Engineering: A, Vol. 527, Pp. 355-36.
- Zhu, Y., Valiev, R. Z., Langdon, T. G., Tsuji, N., & Lu, K. (2010). "Processing of nanostructured metals and alloys via plastic deformation". MRS bulletin, 35(12), 977-981.
- Valiev, Ruslan Zafarovich, R. K. Islamgaliev, & I. V. Alexandrov. (2000). "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation". Progress in Materials Science, Vol. 45.2, Pp. 103-189.
- Valiev, R. Z. & Langdon, T. G. (2006). "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement". Progress in Materials Science, Vol. 51, Pp. 881-981.
- Miura, H., Yu, G., Yang, X. & Sakai, T. (2010). "Microstructure and mechanical properties of AZ61 Mg alloy prepared by multi directional forging". Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20, Pp. 1294-1298.
- Nagasekhar, A. V. & Kim, H. S. (2008). "Plastic deformation characteristics of cross-equal channel angular pressing". Computational Materials Science, Vol. 43, Pp. 1069-1073.
- Beygelzimer, Y., Orlov, D. & Varyukhin, V. (2002). "A new severe plastic deformation method: Twist Extrusion". Ultrafine Grained Materials II (as held at the 2002 TMS Annual Meeting), Pp. 297-304.
- Segal, V. M. (1999). "Equal channel angular extrusion: from macro-mechanics to structure formation". Materials Science and Engineering: A, Vol. 271, Pp. 322-333.
- Segal, V. M, Reznikov, V. I, Drobyshvskii, A. E. & Kopylov, V. I. (1981). Russ. Met., Issue 1, Pp. 99-105.
- Y. Beygelzimer, Y., Varyukhin, V., Synkov, S. & Orlov, D. (2009). "Useful properties of twist extrusion". Materials Science and Engineering: A, Vol. 503, Pp. 14-17.

Eivani, A. R., Karimi Taheri, A. (2007). "An upper bound solution of ECAE process with outer curved corner". Journal of Materials Processing Technology, Vol. 182, Pp. 555-563.

Latypov, M. I., Alexandrov, I. V., Beygelzimer, Y. E., Lee, E. & Kim, H. S. (2012). "Finite element analysis of plastic deformation in twist extrusion". Computational Materials Science, Vol. 60, Pp. 194-200.

شهاب، امیر رضا، اکبری موسوی، سید علی اصغر و مسطوری، محمد. (۱۳۸۵) "بررسی مقدار کرنش پلاستیک در روش اکستروژن پیچشی با استفاده از روش اجزاء محدود". دهمین کنگره سالانه انجمن مهندسی متالورژی ایران.

ابراهیمی، محمود، نظری تیجی، سبحان‌الله و جوانرودی، فرامرز. (۱۳۹۰). "بررسی شعاع داخلی و خارجی قالب بر توزیع کرنش در نمونه‌های پرس شده با کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار". پنجمین کنفرانس شکل‌دهی فلزات و مواد ایران، دانشگاه صنعتی شریف، ۲۰ الی ۲۲ مهرماه.

iMat
Conference 2014