



ارائه شده توسط:

سایت ترجمه فا

مرجع جدیدترین مقالات ترجمه شده

از نشریات معتبر

# یک تکنیک جدید تغییر شکل پلاستیک شدید بر اساس برش

## مطلق (خالص)

### چکیده

اکستروژن برشی خالص (مطلق) (PSE) بعنوان یک تکنیک تغییر شکل شدید جدید (SPD) معرفی شده است. فرآیند SPD جدید، امکان تغییر شکل شدید فلزات و آلیاژها را در مُد ترکیبی از برش مطلق و ساده، با فرصت تغییر دادن نسبت برش مطلق به ساده، فراهم میکند. این فرآیند اصولاً بر مبنای آن چیزی میباشد که در مقالات بعنوان برش مطلق نامیده میشود، که در آن یک مربع، در امتداد قطری، به یک لوزی تبدیل میشود. ناحیه تغییر شکل در فرآیند PSE متشکل از دو بخش میباشد، که عبارتند از نواحی تغییر شکل بالایی و پایینی. در ناحیه تغییر شکل بالایی، سطح مقطع مربع اولیه از نمونه، به تدریج، به لوزی تغییر شکل میدهد، در حالیکه سطح مقطع آن ثابت باقی میماند و ثابت بودن سطح مقطع، باعث اطمینان از نبود تغییر سرعت میشود و بنابراین، کرنشی در جهت عمود بر سطح مقطع نمونه؛ که منجر به تغییر شکل کرنش صفحه ای شود، ایجاد نمیشود. در ناحیه تغییر شکل پایینی، نمونه، تدریجاً با تغییر شکل معکوس با توجه به ناحیه بالایی، هندسه اولیه خود را به دست می آورد. ثابت بودن سطح مقطع نمونه، امکان تکرار فرآیند تغییر شکل را فراهم می آورد که PSE را به یک کاندید جدید برای فرآوری (پردازش) SPD فلزات و آلیاژها تبدیل میکند. کرنش موثر با استفاده از روش هندسی تخمین زده میشود. آلیاژ آلومینیوم AA1050؛ با استفاده از PSE، تا دو پاس، بمنظور تایید امکان پذیر بودن فرآوری SPD با PSE، تغییر شکل می یابد.

کلید واژه ها: تغییر شکل پلاستیک شدید، آلیاژهای نانوساختار شده بالک، اکستروژن برش مطلق.

## 1-مقدمه

در سالهای اخیر، فلزات نانوساختار و الیازها، در جوامع دانشگاهی به دلیل خواص منحصر بفرد فیزیکی و مکانیکی‌شان، مورد توجه زیادی قرار گرفته اند [1-5]. در میان همه تکنیکهای تولید بالک مواد نانوساختار (BNM)، تغییر شکل شدید پلاستیک، قابلیت‌های قابل توجهی را برای فلزات و الیازهای مختلف، از خود نشان داده است [6-9]. تکنیکهای SPD مثل اکستروژن زاویه ای کانال برابر، [10-12] (ECAE) ، پیچ خوردگی فشار بالا (HPT) [12-14]، اکستروژن پیچشی (TE) [15]، پیوند رول تجمعی (ARB) [16]، شیار تکراری و صاف کردن [17] (RCS)، آهنگری چند جهتی (MDF) [18]، اکستروژن انبساطی چرخه ای (CEE) [19] و روش جدیداً توسعه یافته اکستروژن برش ساده (SSE) [20, 21] برای تولید BNM [22] در آلیاژها و فلزات مختلف، توسعه یافته اند [6-9].

علیرغم داشتن مشخصات تکنولوژیکی مختلف، این فرایندها معمولاً جهت اهداف مشابهی برای تولید BNM ، مورد استفاده قرار میگیرند، به هر حال، مدهای تغییر شکل، از برش مطلق تا برش ساده و نیز از بارگذاری یک نواخت تا بارگذاری چرخه ای و متقاطع تغییر میکند. [23] Segal نشان داده است که حالت تغییر شکل، یعنی برش ساده و یا مطلق، میتواند موجب ایجاد تفاوت‌های قابل توجهی در پاسخ ماده به اصلاح دانه شود. مشخص شده است که [23] کاربرد برش ساده ، یک گام کوتاه را در ارزیابی پیوسته، موقعیت یابی زود هنگام و بارگذاری متقاطع ایجاد نموده است که باعث اصلاح دانه میشود، در حالیکه برش خالص ممکن است نقش مشابهی را بازی نکند.

به هر حال، قابل ذکر است که فرآیندی که برای اعمال برش مطلق در مقاله [23] مورد استفاده قرار گرفت ، نورد<sup>1</sup> بوده است که ظرفیت ننگ داشتن سطح مقطع ماده را به صورت ثابت، فراهم نمیکند. بنابراین، عجیب نیست، که، مرحله طولانی تکامل پیوسته، مرزهای دانه با زاویه بالای<sup>2</sup> مسطح<sup>2</sup> و بارگذاری یکنواخت با کاهش موثر سطح

<sup>1</sup> rolling

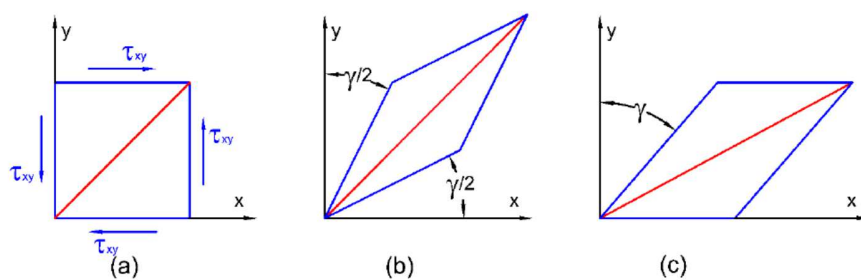
<sup>2</sup> planar high angle grain boundaries

مقطع ماده، در میان این یافته‌ها قرار دارند. همچنین باید افزود که نورد مربوط به کار اضافه‌ای است که باعث ایجاد تغییر شکل ناهمگن می‌شود، علاوه اینکه سطح مقطع را ثابت نگه نمی‌دارد و بنابراین، فرآیند مناسبی برای SPD نمیباشد. عدم حضور فرایند SPD که امکان بکار بردن تغییر شکل برشی مطلق همگن و بازگرداندن شکل اولیه نمونه را فراهم کند، آن را به فرآیند مشکلی برای بررسی اثر مد تغییر شکل، یعنی برش ساده و مطلق، روی تکامل میکروساختاری، تبدیل نموده است. مد تغییر شکل در اکثر فرایندهای بخوبی شناخته شده SPD، مثل ECAE, HPT, TE, SSE برش ساده می‌باشد یا به میزان بیشتر قابل توجهی تحت تسلط توسط برش ساده می‌باشد [23]. بقیه فرآیندهای SPD مثل ARB, RCS, MDF و CEE که بصورت کلی و یا جزئی در مد برش مطلق عمل نمیکنند، بر اساس فرآیندهای شکل دهی سنتی فلز مانند نورد، اکستروژن و یا آهنگری می‌باشند [16-19]. این فرایندها، ذاتا شامل کارهای اضافی هستند [24] که باعث تغییر شکل ناهمگن و در نتیجه باعث ایجاد ریز ساختار و خواص مکانیکی ناهمگن در سراسر نمونه فراوری شده میشوند. با توجه به دانش نویسنده، هیچ تکنیک SPD ای برای بکار بردن کرنش روی برش غیر ساده و یا در حالت تغییر شکل برش مطلق؛ بدون انجام کار اضافی وجود ندارد. جدیداً، اکستروژن برش مطلق (PSE)، بعنوان یک تکنیک جدید SPD معرفی شده است [25]. در این مقاله، این فرایند کاملاً بررسی شده است. فرآیند، امکان بکار بردن حالت تغییر شکل ترکیبی از برش مطلق و یا ساده، بدون کار اضافی و ناهمگونی کرنش را تعریف کرده است. ادعا شده است که PSE فرآیند SPD تکی است که در آن ممکن است که بتوان تغییر شکلهای برشی ساده و مطلق ترکیبی را روی مواد بکار برد. فرایند معرفی شده در این مقاله، امکان مقایسه عادلانه بین بازدهی اصلاح دانه با بکار بردن برش ساده و مطلق را فراهم میکند که میتواند در فعالیتهای مطالعاتی آینده مد نظر قرار گیرد. امکان تغییر شکل شدید مواد با نسبتهای مختلف از برش ساده و مطلق ممکن است منجر به کاربردهای منحصر بفرد برای این فرآیند شود.

## 2. تئوری

### 2.1. اکستروژن برشی خالص

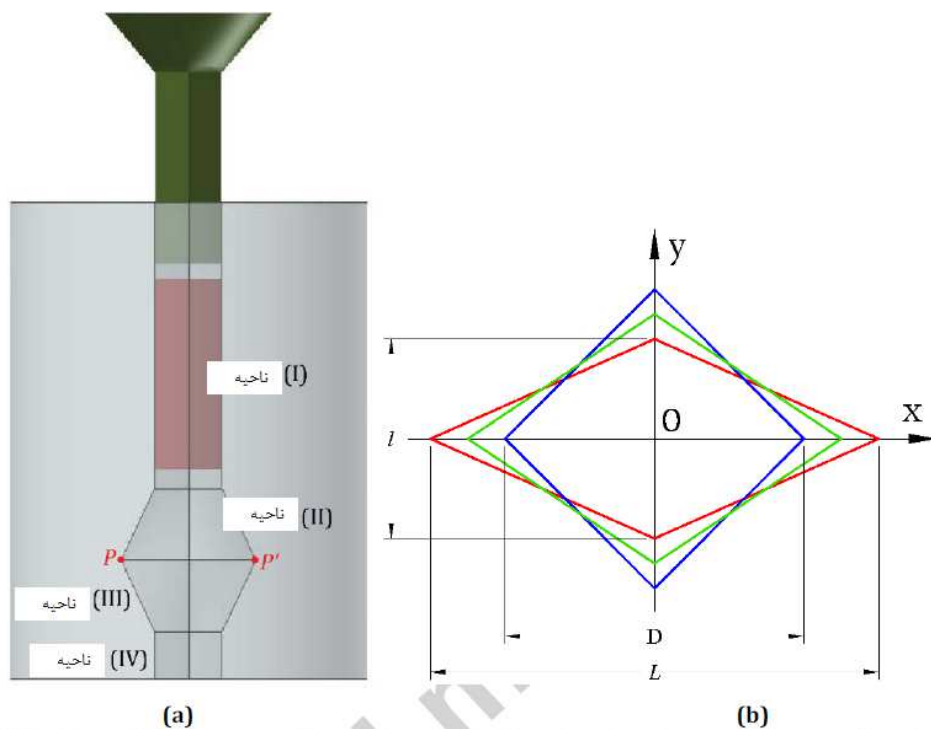
اصول برش مطلق و ساده در شکل 1 نشان داده شده اند [24]. اگر یک عنصر در معرض حالت کرنش برشی قرار گیرد، شکل (a) 1، وجود اعوجاج، موجب تغییرات زاویه ای معادل (برابر) میشود، همانطور که در شکل (b) 1 نشان داده شده است. کرنش برشی مربوط به وجوه نزدیک همانطور که در شکل (b) 1 نشان داده شده است،  $\gamma/2$  میباشد که شرایط کرنش برشی مطلق را توضیح میدهد. شکل (c) 1، مد تغییر شکل برشی ساده را توضیح میدهد که در آن کرنش برشی معادل با  $\gamma$  میباشد [24].



شکل 1- حالات کرنش برشی الف- اعمال تنش برشی ب- برش مطلق ج- شرایط برش ساده

اصول PSE، بر اساس برش خالص که در شکل 1 (b)، توضیح داده شده است، به صورت ترسیمی، در شکل 2 نشان داده شده است، که در آن دو بخش از نواحی تغییر شکل بالایی (ناحیه II) و پایینی (ناحیه III) در یک صفحه اتصال به هم متصل شده اند، که در شکل با  $P-P'$  نشان داده شده است. نمونه باید در کانال ورودی (ناحیه I) قرار داده شود و با استفاده از یک بازو، پرس شود. نمونه‌ی PSE شده باید قالب؛ را از کانال خروجی (ناحیه IV) ترک کند. همچنین ممکن است که با استفاده از یک ناحیه منشوری با سطح مقطع ثابت مانند صفحه  $P-P'$  که در آن هیچ تغییر شکلی رخ نمیدهد، دو ناحیه تغییر شکل بالایی و پایینی را بهم متصل کنیم. این بخش میتواند یک بخش اختیاری از قالب PSE باشد. بهر حال، به دلیل وجود اصطکاک بین دیواره های ناحیه آزاد سازی و سطوح نمونه تغییر شکل دهنده، وجود این بخش، به طور قطعی به نمونه‌ی در حال تغییر

شکل کمک خواهد کرد که کانال قالب را به طور کاملتری پر کند. علاوه بر این، با بکار بردن ناحیه آزاد سازی، گوشه‌های تیزِ صفحه اتصال، حذف میشوند و تمرکز تنش و نیز شانس شکستن قالب، کاهش می‌یابد.



شکل 2- الف) نمایش طرحواره اکستروژن برشی خالص، نشان دهنده کوبه (رم) با رنگ سبز، نمونه در ناحیه I به رنگ قرمز ( کانال ورودی)، نواحی تغییر شکل بالایی ( ناحیه III) و پایینی (IV) و کانال خروجی ( ناحیه V) و ب) نمای از بالای تغییر شکل PSE که نشان دهنده تغییرات سطح مقطع نمونه در نیمه دوره تغییر شکل PSE میباشد.

در ناحیه تغییر شکل بالایی، سطح مقطع مربعی نمونه به تدریج به شکل لوزی تغییر میکند در حالیکه مساحت سطح مقطع، در هر لحظه از تغییر شکل، ثابت نگه داشته میشود. ثبات سطح مقطع باعث اطمینان از این میشود که تغییر سرعت وجود ندارد و بنابراین، هیچ کرنشی در جهت عمود بر سطح مقطع نمونه و تغییر شکل صفحه کرنش وجود ندارد. در ناحیه تغییر شکل پایینی، دانه های نمونه، شکل اولیه خود را در طی چرخه تغییر شکل معکوس، با توجه به ناحیه بالایی، بازمی‌یابند. هیچ تغییر پایداری در هندسه نمونه تغییر شکل داده، امکان

تکرار فرآیند را برای بیش از یکبار فراهم نمیکنند و بنابراین، باید یک تکنیک جدید برای SPD کردن فلزات و آلیاژها در نظر گرفته شود.

نمای از بالای تغییر شکل PSE از سطح بالایی به صفحه اتصال نواحی بالایی و پایینی تغییر شکل در شکل 2 (b). نشان داده شده است. تغییرات سطح مقطع نمونه در نیمه دوره‌ی تغییر شکل PSE، یعنی مربعی به لوزی، در شکل قابل مشاهده است. در لحظه تغییر شکل، سطح مقطع اولیه مربعی با نسبت کوچکی از قطرهای بزرگ به کوچک تغییر شکل میدهد. با ادامه تغییر شکل، نسبت قطرهای بزرگ به کوچک لوزی افزایش می‌یابد و در صفحه اتصال، به حداکثر میرسد. همانطور که در بالا بیان شد، تغییراتی در مساحت سطح مقطع در فرایند PSE وجود ندارد. به منظور حفظ این شرایط، میتوان نوشت:

$$W^2 = \frac{1}{2}(L * l) = \frac{1}{2} D^2 \quad \text{Equation 1}$$

که در آن W و D ضلع و قطر سطح مقطع مربعی اولیه و L و l، بترتیب، قطرهای بلند و کوتاه لوزی میباشد (که در شکل (b) 2 نشان داده شده است). بنابراین، داریم:

$$l = 2 \frac{W^2}{L} = \frac{D^2}{L} \quad \text{Equation 2}$$

## 2.2. محاسبه کرنش در PSE

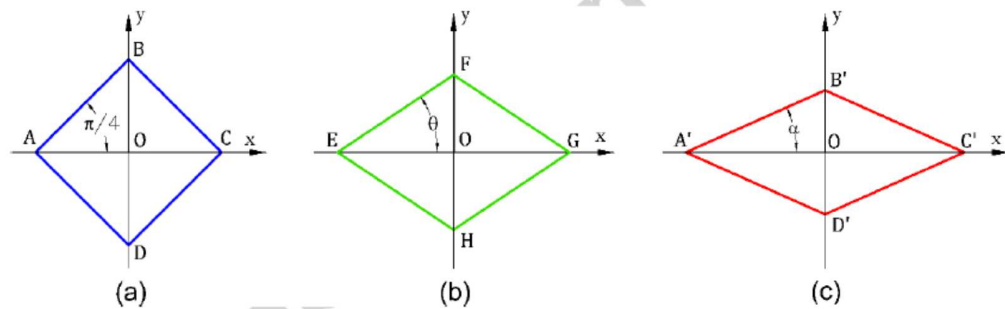
به منظور تخمین کرنش معادل در یک پاس از تغییر شکل PSE، همه 9 مولفه از کرنش باید محاسبه شوند. از آنجا که تغییری در مساحت سطح مقطع نمونه وجود ندارد، میتوان فرض کرد که سرعت ماده در حال تغییر شکل از طریق ارتفاع ناحیه تغییر شکل عمود بر سطح مقطع نمونه؛ ثابت است. بنابراین، تغییر شکلی عمود بر صفحه X-Y وجود ندارد، یعنی تغییر شکل کرنش صفحه‌ی است، و  $\epsilon_{zz} = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$  میباشد.

بقیه مولفه های غیر صفر کرنش میتوانند به صورت زیر محاسبه شوند:

### 2.2.1. تغییر شکل عنصر مستطیلی در PSE

بمنظور تخمین کرنش در فرآیند PSE، یک روش هندسی مورد استفاده قرار میگیرد. این روش قبلاً برای محاسبه کرنش در سایر فرایندهای SPD مثل [26-28] ECAE مورد استفاده قرار گرفته است. برای محاسبه کرنش، تغییر شکل عنصر 2 بعدی کوچک، ABCD، همانطور که در شکل 3 نشان داده شده است، در نظر گرفته میشود. همه چهار ضلع مربع، زاویه  $\pi/4$  را با محور  $x$  میسازند. پس از نصف مسیر تغییر شکل توسط PSE که در طی آن مربع به سمت صفحه اتصال از نواحی تغییر شکل بالایی و پایینی حرکت میکنند ( $P-P'$ ) در شکل (a) 2، زوایای بین ضلعهای مربع و محور  $x$  به  $\alpha$  تغییر میکنند و مربع ABCD نیز، همانطور که در شکل (c) 3 نشان داده شده است، به لوزی  $A'B'C'D'$ ، تغییر میکند.

لوزی EFGH در شکل (b) 3 نشان دهنده شکل واسطه ای عنصر ABCD در هنگام تغییر شکل، در زمانی که هر ضلع لوزی زاویه  $\theta$  را با محور  $x$  میسازد، میباشد. بمنظور تسهیل محاسبه مولفه های کرنش در جهات  $x$  و  $y$ ، مبدا سیستم مختصات در نقطه  $O$  تنظیم میشود و محورهای سیستم مختصات مستطیلی بر روی قطرهای مربع و لوزی قرار میگیرند.



شکل 3- تغییر در هندسه عنصر دو بعدی کوچک (a) قبل از PSE، مربع ABCD، (b) در حین فرایند، لوزی EFGH و (c) پس از PSE، لوزی  $A'B'C'D'$ !



با در نظر گرفتن تغییر شکل از مربع به لوزی، مشاهده میشود که خطوط  $AB$  ,  $DA$  ,  $CD$  ,  $BC$  با تغییر شکل PSE نسبتاً؛ به  $A'B'$  ,  $B'C'$  ,  $C'D'$  ,  $D'A'$  تغییر میکنند. به دلیل هندسه، تغییرات 4 خط دقیقاً مشابه تغییر یافتن خط  $AB$  به  $A'B'$ ، میباشد، طول خط با توجه به محورهای  $x$  و  $y$  تغییر میکند بگونه ای که نشان میدهد که کرنشهای نرمال در صفحه  $x - y$ ، فعال میباشند. علاوه بر این، زاویه بین  $AB$  و محور  $x$ ، بین  $A'B'$  و محور  $x$ ؛ از  $\pi/4$  به  $\alpha$  تغییر میکند. این نشان دهنده وجود کرنشهای برشی میباشد.

مولفه های کرنش نرمال در جهات  $x$  و  $y$

مولفه های کرنش در جهات  $x$  و  $y$  با مقایسه تغییرات در طول خط  $AB$  در جهات  $x$  و  $y$  قبل و بعد از تغییر شکل، قابل محاسبه است. ابعاد خط  $AB$  در جهات  $x$  و  $y$ ، بترتیب، معادل با  $OA$  و  $OB$  میباشد. بنابراین، مولفه کرنش در جهت  $x$  میتواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$\varepsilon_x = \ln\left(\frac{\overline{OC'}}{\overline{OC}}\right) = \ln R \quad \text{Equation 3}$$

مشابه، مولفه کرنش در جهت  $y$ ، برابر با

$$\varepsilon_y = \ln\left(\frac{\overline{OB'}}{\overline{OB}}\right) = \ln\left(\frac{\overline{OC}^2}{\overline{OCOC'}}\right) = \ln\left(\frac{\overline{OC}}{\overline{OC'}}\right) = -\ln R \quad \text{Equation 4}$$

میباشد.

لازم به ذکر است که برای انجام محاسبات در معادله 4، شرط معادل بودن  $\overline{OB} = \overline{OC}$  مورد استفاده قرار گرفته است و شرایط معادله 2 بگونه ای تولید شده اند که میتوان نوشت:

$$\overline{OB'} = \frac{\overline{OC}^2}{\overline{OC'}}$$

علاوه بر مواردی که قبلاً ذکر شد، مولفه کرنش در جهت  $z$  برابر با صفر میباشد، یعنی  $\varepsilon_z = 0$ .

واضح است که  $\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0$  میباشد که بر طبق شرایط غیر قابل تراکم بودن فلزات در حین تغییر شکل پلاستیک، مورد انتظار میباشد.

مولفه های کرنش برشی در PSE ( $\gamma_{xy}$ )

برای محاسبه مولفه های کرنش برشی، تغییرات زوایا بین خط  $AB$  با توجه به محورهای  $x$  و  $y$  مد نظر قرار گرفته اند. زاویه قبل از PSE، برابر با  $\pi/4$  میباشد و پس از فرآیند، به  $\alpha$  تغییر میکند.

$$\gamma_{xy} = \tan\left(\frac{\pi}{4} - \alpha\right) = \sec 2\alpha - \tan 2\alpha \quad \text{Equation 5}$$

از انجا:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{l}{L} = \tan^{-1} \frac{D^2}{L^2} \quad \text{Equation 6}$$

بنابراین،

$$\gamma_{xy} = \frac{\left(\frac{L}{D}\right)^2 - 1^2}{\left(\frac{L}{D}\right)^2 + 1^2} = \frac{R^2 - 1}{R^2 + 1} \quad \text{Equation 7}$$

بنابراین، دو مولفه برای کرنش برشی وجود دارد:

$$\gamma_{xy} = 2 \left( \frac{R^2 - 1}{R^2 + 1} \right) \quad \text{Equation 8}$$

جزئیات محاسبات برای مولفه های کرنش برشی در پیوست A آورده شده است.

### 2.2.2. کرنش معادل

کلی ترین معادله برای محاسبه کرنش معادل به صورت زیر میباشد:

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{9} \left[ (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 \right] + \frac{1}{3} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{xz}^2 + \gamma_{yz}^2)} \quad \text{Equation 9}$$

با جایگذاری مولفه های کرنش در معادلات 3 و 4 و 8 در معادله 9 داریم:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{(\ln R)^2 + \left( \frac{R^2 - 1}{R^2 + 1} \right)^2} \quad \text{Equation 10}$$

اگر تغییر شکل برای  $N$  پاس تکرار شود، کرنش کلی،  $\varepsilon_{tot}$ ، بصورت معادله 11 قابل محاسبه است:

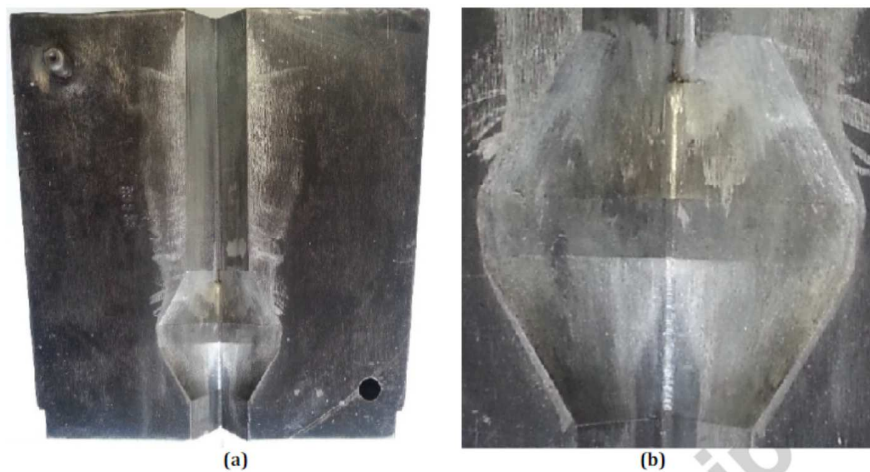
$$\varepsilon_{tot} = \frac{2N}{\sqrt{3}} \sqrt{(\ln R)^2 + \left( \frac{R^2 - 1}{R^2 + 1} \right)^2} \quad \text{Equation 11}$$

### 3. فرآیند تجربی

نیمی از قالب PSE که در بررسی مورد استفاده قرار گرفت، در شکل 4 نشان داده شده است. کانال ورودی یک سطح مقطع مربعی با اندازه ضلع 20 mm بود و دارای طول 120 mm بود. ناحیه تغییر شکل متشکل از دو بخش با ارتفاع 25 mm بود. ناحیه ازاد سازی با طول 10 mm بعنوان ناحیه پاک (شفاف) بین نواحی تغییر شکل بالایی و پایینی در نظر گرفته شد.

ارتفاع کانال خروجی برابر با 20 mm میباشد. قالب قابل جدا شدن، برای اجتناب از تجمع تنش در گوشه ها و برای تسهیل در برداشتن اسان نمونه ها استفاده میشود. اکستروژنها، با استفاده از پرس هیدرولیکی با ظرفیت 400 t هدایت میشوند. الیاژ الومینیوم AA1050، با ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول 1 به منظور تایید بکاربردن PSE برای فرآوری SPD مورد استفاده قرار گرفت. نمونه های مستطیلی 19.8×19.8×100.0

mm از میله های اکستروژن شده ماشین کاری شدند. به منظور حذف اثرات تغییر شکل بر روی نتایج، نمونه ها کاملاً در دمای  $350^{\circ}\text{C}$  بمدت 1 ساعت فرآوری ( بازپخت) شدند.



شکل 4- الف) نیمی از قالب برش خالص ب) نمای بسته از ناحیه تغییر شکل

میکروسکوپ نوری با نور پلاریزه برای بررسی ریز ساختارهای اولیه نمونه ها و نیز برای بررسی موثر بودن رفتارهای فرآوری (پختن)، در از بین بردن اثرات تغییر شکل‌های قبلی، مورد استفاده قرار گرفت. نانوساختارهای نمونه‌های PSE شده با استفاده از پراش بازگشت الکترونی نوری (EBSD) مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌ها از طریق فرآیند قرار دادی، با شروع از آسیاب مکانیکی و پایان با پولیش دادن (پرداخت) الکترولیتی آماده سازی شدند (17 V; 80 s; 9% آب، 73.1% اتانول و 10% متیل سلولز؛ درجه حرارت:  $0^{\circ}\text{C}$ ).

EBSD با استفاده از میکروسکوپ الکترونی اسکن (میکروسکوپ الکترونی روبشی) JEOL 6500 (ولتاژ شتابدهی: 25 کیلوولت، زاویه شیب 70 درجه؛ فاصله کاری: 25mm؛ اندازه گام 0.5 میلی متر) انجام شد. داده های کنتراست جهتگیری، با نرم افزار آنالیز HKL آنالیز شدند. ریز دانه ها با تنظیم مقدار بحرانی برابر با 15 درجه، بعنوان حداقل مقدار جهت گیری نادرست از مرزهای دانه زاویه بالا (HAGBs)، آشکار سازی شدند. حداقل مقدار جهتگیری نامناسب از مرزهای دانه زاویه پایین (LAGBs) برابر با 1 درجه تنظیم شد.

به منظور بررسی همگن بودن توزیع کرنش، بر روی صفحه عمود بر جهت اکستروژن، اندازه گیری سختی برینل<sup>۳</sup> بر روی نمونه‌ی کاری انجام شد. سختی برینل با توپی با قطر 2.5 mm و نیروی آزمایش 15.625 kg.f بمدت 40 s بکار گرفته شد.

#### 4- نتایج و بحث

##### تغییرات مولفه های کرنش و کرنش معادل توسط R

تغییرات  $\epsilon_x$  و  $\epsilon_{xy}$  و نیز  $\epsilon_{eq}$  با نسبت قطری  $R$ ، در شکل 5 نشان داده شده اند. مشخص است که با افزایش  $R$ ، مولفه های برشی کرنش افزایش می یابند تا اینکه به یک مقدار ثابت تقریباً  $R=5$  برسند. مولفه عمودی کرنش و مقدار معادل به صورت ثابت با افزایش R، افزایش می یابند.

---

<sup>3</sup> Brinell



این مقاله، از سری مقالات ترجمه شده رایگان سایت ترجمه فا میباشد که با فرمت PDF در اختیار شما عزیزان قرار گرفته است. در صورت تمایل میتوانید با کلیک بر روی دکمه های زیر از سایر مقالات نیز استفاده نمایید:

لیست مقالات ترجمه شده ✓

لیست مقالات ترجمه شده رایگان ✓

لیست جدیدترین مقالات انگلیسی ISI ✓

سایت ترجمه فا ؛ مرجع جدیدترین مقالات ترجمه شده از نشریات معتبر خارجی