



یک فرایند جدید تغییر شکل پلاستیک شدید بر مبنای برش ساده و برش خالص

محمد محمودی¹، علی شکوه فر²، سهیل نخودچی³*

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* صندوق پستی 19395-1999، snakhodchi@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 آبان 1394

پذیرش: 06 دی 1394

ارائه در سایت: 28 فروردین 1395

کلید واژگان:

تغییر شکل پلاستیک شدید

اکستروژن برشی خالص

اکستروژن برشی ساده

کرنش برشی

آنالیز المان محدود

چکیده

فرایند اکستروژن برشی ترکیبی (CSE) یک فرایند جدید تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) می‌باشد، که از ترکیب همزمان دو فرایند اکستروژن برشی ساده (SSE) و اکستروژن برشی خالص (PSE) تشکیل شده است. این فرایند اساساً بر پایه تعریف‌های برش خالص و برش ساده پایه‌گذاری شده است. به طوری که یک مربع در اثر برش خالص و برش ساده به یک متوازی‌الضلاع تغییر شکل پیدا می‌کند. در این مقاله با استفاده از نظریه تحلیل سینماتیک تغییر شکل (تغییر شکل بزرگ)، مقدار کرنش برشی اعمالی به نمونه تحت فرایند اکستروژن برشی ترکیبی برای زوایای اعوجاج مختلف بدست آمده است. همچنین آنالیز المان محدود (FEM) با استفاده از نرم‌افزار تجاری المان محدود دیفرم برای فرایند اکستروژن برشی ترکیبی انجام گرفته و مؤثر اعمالی به نمونه، مقدار نیروی مورد نیاز برای انجام فرایند و شکل نهایی سطح مقطع در زوایای اعوجاج مختلف بررسی شده است. نتایج تحلیلی و حل المان محدود نشان می‌دهد با افزایش زوایای اعوجاج، میزان کرنش برشی و همچنین نرخ افزایش کرنش برشی اعمالی به نمونه افزایش می‌یابد که در پی آن کرنش مؤثر و مقدار نیروی لازم برای انجام فرایند نیز افزایش می‌یابد. حل المان محدود و هندسه فرایند نشان می‌دهد توزیع کرنش برشی و مؤثر در سطح مقطع نمونه به صورت متقارن می‌باشد و با افزایش زوایای اعوجاج توزیع کرنش به صورت ناهمگن‌تر می‌شود، همچنین سطح مقطع نهایی نمونه تغییر شکل بیشتری پیدا می‌کند.

A new severe plastic deformation technique based on simple and pure shear

Mohammad Mahmoudi, Ali Shokuhfar, Soheil Nakhodchi*

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, snakhodchi@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 November 2015
Accepted 27 December 2015
Available Online 16 April 2016

Keywords:

Severe plastic deformation
Pure shear extrusion
simple shear extrusion
Shear strain
Finite element method

ABSTRACT

Combined shear extrusion (CSE) is a new severe plastic deformation (SPD) technique to produce bulk ultra-fine grained materials. CSE is obtained by the combination of simple and pure shear extrusion. This technique is based on definitions of pure and simple shear. In the present work, the nonlinear (large) deformation elasticity theory is used for obtaining the shear strain applied to the sample under pure shear extrusion with various angles of distortion. Also, plastic deformation characteristics of CSE method were analyzed with finite element analysis using commercial Deform 3D software. Shear strain and effective strain were applied to the sample, the load required to carry out the process and the final shape of the cross-sectional area were studied for different angles of distortion. Analytical results and finite element analysis show that by increasing the angles of distortion, shear strain and increased rate of shear strain applied to the sample increased, so the effective strain and load required to carry out the process increases. Analysis of finite element and geometry of the die show that distribution of shear strain and effective strain is inhomogeneous and symmetrical in specimen's cross section which increases from the center to the corners and by increasing the angles of distortion, distribution of strain becomes more inhomogeneous, also the final shape of the cross-sectional area is more deformed.

1- مقدمه

توسعه روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید¹ و بررسی پارامترهای فرایند و روش‌های ایجاد فلزات با ساختار بسیار ریز با خواص مکانیکی و فیزیکی بسیار بالا انجام گرفته است [4,3]. از جمله فرایندهای SPD می‌توان به پرس کاری در کانال‌های زاویه‌دار [6,5]، اکستروژن پیچشی³ [7]، پرس در کانال‌های

فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید روش‌هایی هستند که در آن کرنش بسیار بالایی به یک جامد توده‌ای اعمال می‌شود، بدون اینکه کاهش قابل ملاحظه‌ای در ابعاد کلی نمونه ایجاد شود [1]. در سال‌های اخیر فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید به عنوان یک روش مؤثر در تولید فلزات با ساختار فوق ریزدانه معرفی شده است [2]. لذا تحقیقات وسیعی به منظور

¹ Severe Plastic Deformation (SPD)

² Equal channel angular pressing (ECAP)

³ Twist Extrusion (TE)

Please cite this article using:

M. Mahmoudi, A. Shokuhfar, S. Nakhodchi, A new severe plastic deformation technique based on simple and pure shear, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 145-154, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مجموعی از دو برش ساده و خالص می‌باشد که دارای زوایای اعوجاج مساوی نمی‌باشد، در شکل 1-d برش ترکیبی نشان داده شده است.

بر طبق تعریف، فرایند اکستروژن برش ترکیبی، فرایندی است که در آن مجموع کرنش برشی خالص و کرنش برشی ساده به طور همزمان وجود دارند. لذا چنانچه مطابق شکل‌های 2 و 3 و 4 فرایند در نظر گرفته شود، قطعه کار بعد از عبور از سطح مقطع مربعی در ابتدای کانال اکستروژن، وارد ناحیه‌ای با سطح مقطع متوازی‌الاضلاع می‌شود که بیشترین اعوجاج در وسط قالب و با زاویه‌های اعوجاج α و β رخ می‌دهد و پس از عبور از نیمه کانال به تدریج زاویه اعوجاج متوازی‌الاضلاع کم می‌شود تا نهایتاً به زاویه اعوجاج صفر با سطح مقطع مربعی برسد. تغییرات تدریجی در سطح مقطع نمونه با زاویه‌های اعوجاج α و β در شکل 3 نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل‌های 2، 3 و 4 نشان داده شده است، در منطقه تغییر شکل، کرنش برشی همزمان در دو صفحه به نمونه اعمال می‌شود. بدین ترتیب شکل هندسی فرایند با دو پارامتر زاویه‌ای α و β مشخص می‌شود.

سطح مقطع نمونه پس از انجام فرایند تغییر آنچنانی پیدا نمی‌کند و فرایند را می‌توان چندین بار تکرار کرد که این خود یکی از الزامات اصلی فرایندهای SPD است. در فرایندهای SPD دست یابی به ساختار نانو متری باعث افزایش میزان استحکام تسلیم در مواد می‌شود، همچنین مشابه سایر فرایندهای کار سرد، از میزان شکل‌پذیری و چقرمگی قطعه کار کاسته می‌شود. با تکرار فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید بعد از تعداد پاس معینی میزان استحکام تسلیم افت اندکی پیدا می‌کند که این افت اندک همراه با افزایش چشمگیر چقرمگی و شکل‌پذیری نمونه می‌باشد. بنابراین با انجام تعداد پاس بیشتر می‌توان به نمونه‌ای با استحکام تسلیم بالا و چقرمگی و شکل‌پذیری مناسب دست پیدا کرد [26].

شکل 4 قالب فرایند اکستروژن برش ترکیبی را نشان می‌دهد که شامل سه ناحیه ورودی، تغییر شکل و خروجی می‌باشد. در ناحیه تغییر شکل متناسب با زاویه‌های اعوجاج، نمونه به طور کامل قادر به پر کردن قالب نمی‌باشد، در نتیجه قسمت انتهایی قطعه کار شکل قالب را به خود نمی‌گیرد و تبدیل به یک هشت ضلعی می‌شود که البته این مشکل مانند فرایندهای SSE و PSE با اعمال فشار پشتی قابل رفع شدن می‌باشد [16,13].

در فرایند اکستروژن برش ساده کرنش پلاستیک فقط در یک صفحه به نمونه اعمال می‌شود، ولی در فرایند اکستروژن برش ترکیبی، کرنش پلاستیک به طور همزمان در دو صفحه به نمونه اعمال می‌شود که این خود

زاویه‌دار پیچشی¹ [9,8]، ترکیب ECAP با اکستروژن چرخشی² [10]، اکستروژن حلقه‌ای³ [11]، اکستروژن برشی ساده⁴ [13,12]، اکستروژن پیچشی در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع⁵ [15,14] و اکستروژن برشی خالص⁶ [17,16] اشاره کرد.

از آنجا که تغییرات ابعاد در نمونه بر میزان کرنش اعمالی به نمونه تأثیر گذار است، فرایندهای SPD به گونه‌ای طراحی می‌شوند که ابعاد نمونه در طول انجام فرایند تغییر آنچنانی پیدا نکنند [18]. از جمله پارامترهای مهم دیگر در فرایندهای SPD دستیابی به میزان کرنش پلاستیک مؤثر بالا در یک چرخه است که هرچه میزان کرنش پلاستیک بالاتری اعمال شود، میزان ریزدانه شدن و در نتیجه استحکام بیشتر رخ می‌دهد [19]. از روش‌های مؤثر برای افزایش میزان کرنش پلاستیک مؤثر ترکیب فرایندهای مختلف SPD به طور همزمان می‌باشد [11]. میزان همگن بودن تغییر شکل نیز از دیگر ویژگی‌های مهم در بهبود فرایندهای SPD می‌باشد که در بعضی از فرایندهای SPD مانند HPT و TE تغییر شکل ذاتاً به صورت ناهمگن است [21,20]. در حقیقت فرایندهای SPD وقتی مفید می‌باشند که همراه با بهبود خواص مکانیکی باشند [22].

در فرایندهای SPD با افزایش میزان کرنش برشی اعمالی به نمونه دانسیته ناهنجاری‌ها به صورت شدیدی افزایش می‌یابد. این عامل باعث کوچک شدن مرز دانه‌ها تا حد نانومتر می‌شود، که باعث بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی ماده می‌شوند. در تحقیق حاضر با توجه به تعریف برش خالص و برش ساده، فرایند اکستروژن برشی ترکیبی با هدف افزایش میزان کرنش پلاستیک اعمالی و بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است.

حل تحلیلی با استفاده از نظریه تحلیل سینماتیک تغییر شکل برای یک المان بسیار کوچک که تحت برش خالص و برش ساده و ترکیبی از این دو می‌باشد، بدست آمده است. فرایند اکستروژن برشی ترکیبی در نرم‌افزار المان محدود دیفرم مدل‌سازی شده و نتایج حل تحلیلی با نتایج عددی بدست آمده، مقایسه شده است. همچنین فرایندهای اکستروژن برشی ساده و پرس زاویه‌ای در کانال‌های هم مقطع شبیه‌سازی و با فرایند جدید ارائه شده مقایسه شد. نتایج عددی و تحلیلی نشان می‌دهد که میزان کرنش پلاستیک مؤثر اعمالی به نمونه تحت فرایند "اکستروژن برشی ترکیبی" به میزان قابل توجهی نسبت به فرایندهای "اکستروژن برشی ساده" و "پرس زاویه‌ای با مقاطع یکسان" افزایش می‌یابد، که این افزایش کرنش پلاستیک مؤثر خود عاملی بر بهبود خواص مکانیکی نمونه می‌باشد [23,9,7].

2- اصول فرایند اکستروژن برشی ترکیبی

اصول کلی برش ساده و خالص در شکل 1 نشان داده شده است [25,24]. در صورتی که یک المان تحت تأثیر کرنش برشی با مقادیر یکسان که فقط در یک راستا وارد می‌شود، قرار بگیرد (شکل a.1)، اعوجاج حاصل از کرنش برشی باعث ایجاد برش ساده می‌شود که تغییر شکل مانند شکل 1-b انتظار می‌رود. در صورتی که کرنش برشی در دو جهت و به مقدار مساوی به المان وارد شود، اعوجاج حاصل از کرنش برشی باعث ایجاد برش خالص که دارای زوایای مساوی اعوجاج می‌باشد، می‌شود (شکل 1-c). برش ترکیبی،

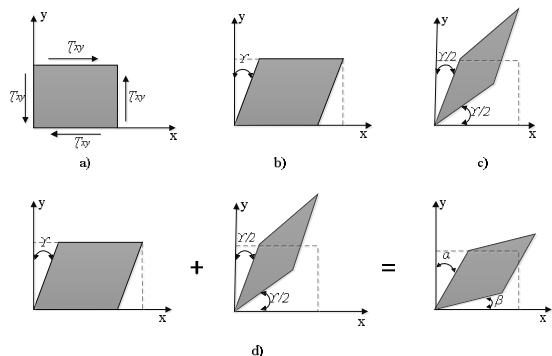


Fig. 1 Shear strain states a) imposing shear stress b) simple shear d) pure shear and d) combination shear [24]

شکل 1 حالت‌های کرنش برشی (a) اعمال تنش برشی (b) برش ساده (c) برش خالص (d) برش ترکیبی [24]

¹ Twist Channel Angular Pressing (TCAP)

² Torsional-equal channel angular pressing (T-CAEP)

³ Vortex Extrusion (VE)

⁴ Simple Shear Extrusion (SSE)

⁵ Planar Twist Channel Angular Extrusion (PTCAE)

⁶ Pure Shear Extrusion (PSE)

معادلات تغییر شکل غیر خطی بدست آورد. که جسم سه بعدی در نظر گرفته شده و از محورهای مختصات لاگرانژی x_1, x_2, x_3 مطابق شکل 5 استفاده می‌شود.

برای بررسی تغییر شکل در نقطه‌ای مانند $P(x_1, x_2, x_3)$ نقطه دیگری مانند $A(x_1 + dx, x_2 + dx, x_3 + dx)$ در مجاورت P در نظر گرفته می‌شود. بردار هادی PA با $\vec{N}(\vec{N}_1, \vec{N}_2, \vec{N}_3)$ نشان داده شده است. در اثر تغییر شکل، نقطه $P(x_1, x_2, x_3)$ به نقطه $\varphi(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ به اندازه بردار $\vec{u}(\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3)$ جابه‌جا می‌شود. المان خطی PA به طول ds به المان خطی $\varphi A'$ به طول ds' در جهت $\vec{N}'(\vec{N}'_1, \vec{N}'_2, \vec{N}'_3)$ تبدیل می‌شود. با توجه شکل 5 روابط (6-1) را می‌توان ارائه کرد [27]:

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 \quad (1)$$

و به طور مشابه برای المان خطی $\varphi A'$:

$$ds'^2 = d\xi_1^2 + d\xi_2^2 + d\xi_3^2 \quad (2)$$

که در رابطه (2) به صورت روابط (3) و (4) می‌باشد:

$$d\xi_1 = \frac{\partial \xi_1}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial \xi_1}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial \xi_1}{\partial x_3} dx_3 \quad (a-3)$$

$$d\xi_\alpha = \frac{\partial \xi_\alpha}{\partial x_\beta} dx_\beta \quad (b-3)$$

$$d\xi_1 = (1 + u_{1,1})dx_1 + u_{1,2}dx_2 + u_{1,3}dx_3 \quad (4)$$

که در نوشتار اندیسی به صورت رابطه (5) و (6) می‌باشد:

$$d\xi_\alpha = (\delta_{\alpha\beta} + u_{\alpha,\beta})dx_\beta, \quad \frac{\partial \xi_\alpha}{\partial x_\beta} = (\delta_{\alpha\beta} + u_{\alpha,\beta}) \quad (5)$$

$$d\xi_\alpha = \frac{\partial \xi_\alpha}{\partial x_\beta} dx_\beta = \xi_{\alpha,\beta} dx_\beta \quad (6)$$

از ترکیب روابط (4)، (5) و (6) رابطه (7) بدست می‌آید:

$$\frac{1}{2}(ds'^2 - ds^2) = \varepsilon_{11}dx_1^2 + \varepsilon_{22}dx_2^2 + \varepsilon_{33}dx_3^2 + 2\varepsilon_{12}dx_1dx_2 + 2\varepsilon_{13}dx_1dx_3 + 2\varepsilon_{23}dx_2dx_3 \quad (7)$$

با استفاده از قوانین اندیسی‌ها، رابطه (7) به صورت رابطه (8) بدست می‌آید:

$$\frac{1}{2}(ds'^2 - ds^2) = \varepsilon_{\alpha\beta} dx_\alpha dx_\beta \quad (8)$$

کسینوس‌های هادی بردار $\vec{N}(\vec{N}_1, \vec{N}_2, \vec{N}_3)$ به صورت رابطه (9)

می‌باشد:

$$N_1 = \frac{dx_1}{ds}, N_2 = \frac{dx_2}{ds}, N_3 = \frac{dx_3}{ds} \quad (a-9)$$

$$N_\alpha = \frac{dx_\alpha}{ds} \quad (b-9)$$

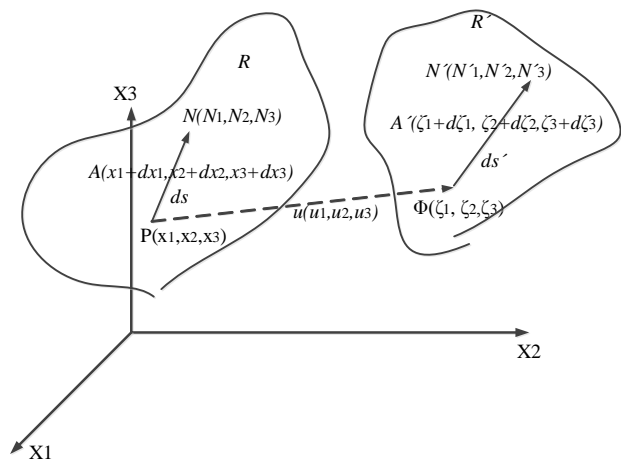


Fig. 5 Extension of infinitesimal line element [26]

شکل 5 انبساط یک المان بی‌نهایت کوچک [27]

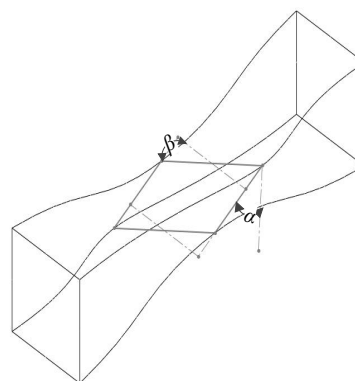


Fig. 2 geometry of combination shear extrusion with distortion angle of α and β

شکل 2 طرح‌واره فرایند اکستروژن برشی ترکیبی با زاویه اعوجاج α و β

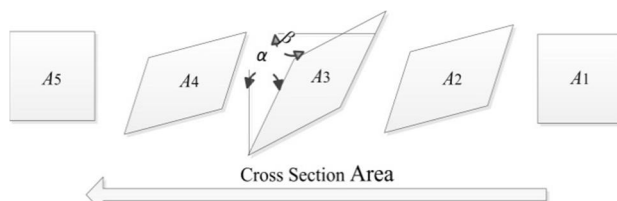


Fig. 3 Gradual change in specimen's cross section while passing through the deformation channel

شکل 3 مراحل تغییر شکل سطح مقطع در طول فرایند

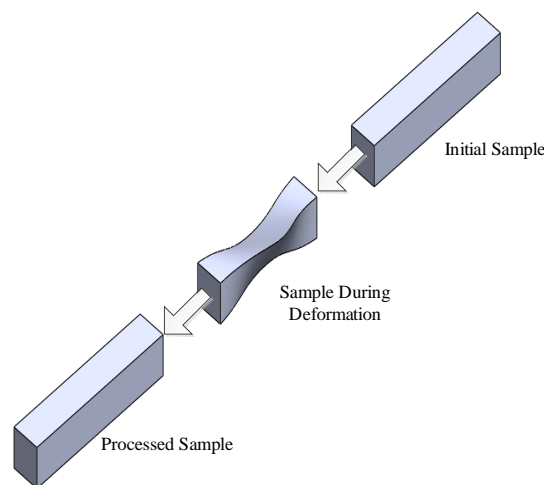


Fig. 4 Die of Combined shear extrusion processing

شکل 4 قالب فرایند اکستروژن برشی ترکیبی

عاملی برای افزایش میزان کرنش پلاستیک اعمالی به نمونه می‌باشد. به همین دلیل این فرایند را می‌توان در گروه فرایندهای جدید SPD تعریف کرد.

3- حل تحلیلی

در نظریه کلاسیک الاستیسیته و پلاستیسیته، بسیاری از روابط و فرمول‌ها بر اساس جابه‌جایی‌های بسیار کوچک می‌باشند. این فرض منجر به نظریه تغییر شکل خطی می‌شود. اما در بسیاری از مسایل عمومی و بخصوص تغییر شکل‌های بزرگ و همچنین مکانیک سیالات، اثرات غیرخطی مهم می‌باشند. لذا در این قسمت از مقاله نظریه‌ی تغییر شکل غیر خطی توضیح داده می‌شود، بدیهی است که معادلات خاص تغییر شکل خطی را نیز می‌توان از

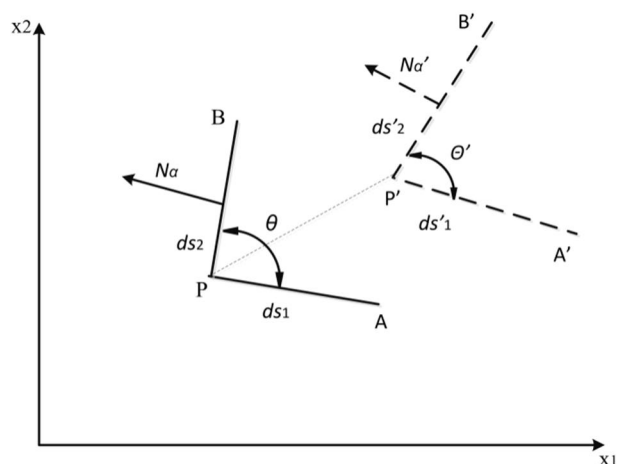


Fig. 6 Change the angle of linear elements

شکل 6 تغییر زاویه المان‌های خطی

اندیس‌های 1 و 2 در MF به ترتیب بزرگنمایی خطوط PA و PB را نشان می‌دهد. معادله (18) زاویه بین المان‌های خطی $P'A'$ و $P'B'$ را که در ابتدا باهم زاویه θ تشکیل می‌دادند، را ارائه می‌دهد.

3-3- کرنش برشی در فرایند اکستروژن برشی ترکیبی

با توجه به اینکه در فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید ابعاد تأثیری در نتیجه فرایند ندارند، مسأله برای سطح مقطع با طول محدود حل شده و سپس به مسأله واقعی تعمیم داده خواهد شد.

در فرایند اکستروژن برشی ترکیبی، تغییر شکل برشی در نمونه با عبور از کانال اکستروژن، از سطح مقطع مربعی در ابتدای کانال شروع شده و به بیشینه مقدار خود در وسط کانال با زاویه اعوجاج α و β و با سطح مقطع متوازی‌الاضلاع می‌رسد. همان‌طور که در شکل 7 نشان داده شده است، دو المان خطی PA و PB به طول‌های L_1 و L_2 از سطح مقطع مربعی در ابتدای کانال که با یکدیگر زاویه $\theta = 90^\circ$ درجه می‌سازند، در اثر تغییر شکل به دو المان خطی $P'A'$ و $P'B'$ به طول‌های L'_1 و L'_2 که با یکدیگر زاویه $(\alpha + \beta) - \pi/2$ می‌سازند، تبدیل می‌شود. در این صورت کسینوس‌های هادی المان خطی PA (با M نشان داده شده است) که در جهت محور x و PB (با N نشان داده شده است) که در جهت محور y است:

$$\begin{aligned} M_1 &= 1, M_2 = M_3 = 0 \\ N_1 &= N_3 = 0, N_2 = 1 \end{aligned} \quad (19)$$

با اعمال $\theta = 90^\circ$ ، رابطه (18) به صورت رابطه (20) بدست می‌آید:

$$\Gamma_{12} = \sqrt{(1 + 2MF_1)(1 + 2MF_2)} \cos \theta' = 2\varepsilon_{12} \quad (20)$$

رابطه (20) مبنای تعریف کرنش برشی را تشکیل می‌دهد. به عنوان مثال در تئوری تغییر شکل‌های بزرگ کمیت Γ_{12} به عنوان کرنش برشی بین المان‌های خطی می‌باشد. در صورتی که انبساط نسبی برای دو المان در مقایسه با 1 کوچک باشد (MF_1 و MF_2 در مقایسه با 1 کوچک باشد)، ملاحظه می‌شود که $\Gamma_{12} = \cos \theta'$. بعلاوه برای کرنش‌های کوچک، مقدار θ' تقریباً برابر $\pi/2$ است. در نتیجه $\pi/2 - \theta' \approx \sin[(\pi/2 - \theta')] \approx \cos \theta'$. بنابراین تعریف کرنش برشی برای تغییر شکل‌های بزرگ با آنچه که به صورت $\gamma_{12} = \pi/2 - \theta'$ می‌باشد فرق ندارد، مگر اینکه کرنش‌های برشی خیلی بزرگ باشند.

با توجه به شکل 7 و هندسه فرایند ابعاد نمونه بعد از تغییر شکل به صورت رابطه (21) تغییر پیدا می‌کند:

ضریب بزرگنمایی MF برای المان خطی PA به صورت رابطه (10) تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} MF_A &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{ds'}{ds} \right)^2 - 1 \right] = \varepsilon_{11} dx_1^2 + \varepsilon_{22} dx_2^2 + \varepsilon_{33} dx_3^2 \\ &\quad + 2\varepsilon_{12} dx_1 dx_2 + 2\varepsilon_{13} dx_1 dx_3 + 2\varepsilon_{23} dx_2 dx_3 \end{aligned} \quad (10)$$

رابطه (10) با استفاده از قوانین اندیس‌ها به صورت رابطه (11) می‌شود:

$$MF_A = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{ds'}{ds} \right)^2 - 1 \right] = \varepsilon_{\alpha\beta} N_\alpha N_\beta \quad (11)$$

$$\frac{ds'}{ds} = \sqrt{1 + 2MF_A}, \quad \frac{ds}{ds'} = \frac{1}{\sqrt{1 + 2MF_A}} \quad (12)$$

3-1- تعیین جهات المان تغییر شکل یافته در یک تغییر شکل غیر خطی

تحت تغییر شکل، یک المان خطی dx_α به یک المان خطی $d\xi_\alpha$ تبدیل می‌شود. طول این المان‌ها به ترتیب ds و ds' است. کسینوس هادی‌های المان‌های dx_α (قبل از تغییر شکل) و $d\xi_\alpha$ (بعد از تغییر شکل) را به ترتیب با N_α و N'_α نشان داده که از روابط (9) بدست می‌آید. با جایگذاری رابطه (3) در رابطه (9)، N'_α به صورت رابطه (13) بدست می‌آید:

$$N'_\alpha = \frac{d\xi_\alpha}{ds'} = \frac{d\xi_\alpha}{ds} \frac{ds}{ds'} = \frac{d\xi_\alpha}{dx_\beta} \frac{dx_\beta}{ds} \frac{ds}{ds'} \quad (13)$$

با جایگذاری رابطه (5) و (9-b) در رابطه (13)، کوسینوس هادی المان بعد از تغییر شکل، به صورت رابطه (14) بیان می‌شود:

$$N'_\alpha = (\delta_{\alpha\beta} + u_{\alpha\beta}) N_\beta \frac{ds}{ds'} \quad (14)$$

و با جایگذاری رابطه (12) در رابطه (14) کسینوس هادی یک المان قبل از تغییر شکل N_β و بعد از تغییر شکل N'_α به صورت رابطه (15) بدست می‌آید:

$$N'_\alpha \sqrt{1 + 2MF_A} = (\delta_{\alpha\beta} + u_{\alpha\beta}) N_\beta \quad (15)$$

رابطه (15) خلاصه شده سه رابطه با $\alpha = 1, 2, 3$ می‌باشد.

3-2- کرنش برشی در تغییر شکل غیر خطی

همان‌طور که در شکل 6 نشان داده شده است، دو المان خطی PA و PB به طول‌های ds_1 و ds_2 با یکدیگر زاویه θ می‌سازند که در اثر تغییر شکل به دو المان $P'A'$ و $P'B'$ به طول‌های ds'_1 و ds'_2 که با یکدیگر زاویه θ' می‌سازند، تبدیل می‌شود. در حالت کلی صفحه APB با $A'P'B'$ موازی نمی‌باشد. کوسینوس‌های هادی PA و PB نسبت به x_1 را به ترتیب با M_α و N_α و کوسینوس‌های هادی $P'A'$ و $P'B'$ نسبت به x_1 را به ترتیب با M'_α و N'_α نشان داده شده است. همچنین بزرگنمایی المان PA را با MF_1 و بزرگنمایی المان PB را با MF_2 نشان داده شده است.

با استفاده از ضرب اسکالر دو بردار رابطه (16) بدست می‌آید:

$$\cos \theta' = M'_\alpha N'_\alpha, \quad \cos \theta = M_\alpha N_\alpha \quad (16)$$

برای محاسبه $\cos \theta$ بجای M'_α و N'_α از رابطه (15) استفاده می‌شود در نتیجه:

$$\cos \theta' = \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 2MF_1}} (\delta_{\alpha\beta} + u_{\alpha\beta}) M_\beta \right] \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 2MF_2}} (\delta_{\alpha\gamma} + u_{\alpha\gamma}) N_\gamma \right] \quad (17)$$

با توجه به اینکه β و γ اندیس‌های اختیاری می‌باشند، می‌توان بجای آن‌ها از α و β استفاده نمود. در نتیجه رابطه (18) با ساده‌سازی رابطه (17) بدست می‌آید:

$$\sqrt{(1 + 2MF_1)(1 + 2MF_2)} \cos \theta' = \cos \theta + 2\delta_{\alpha\beta} M_\alpha N_\beta \quad (18)$$

قطعه کار استفاده شد [14]. بررسی همگرایی جواب‌ها روی کرنش پلاستیک بر روی سطح مقطع نمونه نشان داد که افزایش تعداد شبکه‌بندی بر روی جواب‌ها تاثیر چندانی ندارد. نمونه اولیه و نهایی مش زده شده در شکل 8 نشان داده شده است.

در تغییر شکل‌های بزرگ، بهتر است از کرنش حقیقی استفاده شود که کرنش به صورت، جمع یک سری بزرگ از کرنش‌های کوچک تعریف می‌شود. مقدار کرنش مؤثر یا ون مایزس⁵ از طریق رابطه (25) بدست می‌آید:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (25)$$

که ε_1 و ε_2 و ε_3 کرنش‌های اصلی و $\bar{\varepsilon}$ کرنش مؤثر می‌باشد.

از جمله عوامل مهم در فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید میزان کرنش مؤثر اعمالی به نمونه می‌باشد که هرچه میزان کرنش اعمالی به نمونه بیشتر باشد، میزان ریز شدن دانه‌ها و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی بیشتر است، لذا در این تحقیق شبیه‌سازی برای سه فرایند اکستروژن برشی ساده در زاویه‌های اعوجاج $0 \leq \alpha \leq 45$ و پرس کاری در کانال‌های زاویه‌دار با زاویه کانال و گوشه $\varphi = \psi = 90^\circ$ و اکستروژن برشی ترکیبی در زاویه‌ای اعوجاج $\alpha = 25.45$ و $0 \leq \beta \leq 30$ صورت گرفت. تاثیر زاویه‌های اعوجاج بر کرنش اعمالی به نمونه در این سه فرایند با هم مقایسه شد. سطح مقطع نهایی نمونه مش زده شده بعد از فرایند جدید و جهت انتخابی برای توزیع کرنش در شکل 9 نشان داده شده است.

5- نتایج

به طور کلی دو فرایند اکستروژن برشی ساده و اکستروژن برشی خالص، حالت خاصی از فرایند اکستروژن برشی ترکیبی می‌باشند، به طوری که اگر در فرایند اکستروژن برشی ترکیبی، زاویه اعوجاج $\beta=0$ باشد، در این صورت فرایند اکستروژن برشی ترکیبی به فرایند اکستروژن برشی ساده و در صورتی که $\alpha=\beta$ باشد، در این صورت فرایند اکستروژن برشی ترکیبی به فرایند اکستروژن برشی خالص تبدیل می‌شود.

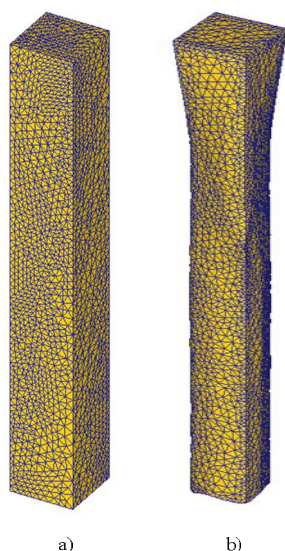


Fig. 8 a) Initial meshed sample and b) meshed sample after deformation.

شکل 8 مش‌بندی (a) نمونه اولیه (b) نمونه بعد از تغییر شکل.

$$L'_1 = \frac{L_1}{\cos \alpha}$$

$$L'_2 = \frac{L_2 \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha)}{\sin(\frac{\pi}{2} - (\alpha + \beta))} \quad (21)$$

L_1 و L_2 طول‌های اولیه سطح مقطع و L'_1 و L'_2 طول‌های تغییر شکل یافته سطح مقطع در میانه فرایند می‌باشند. با جایگذاری فرضیات (19) در رابطه (11) ضریب بزرگنمایی به صورت رابطه (22) بیان می‌شود:

$$MF_A = \varepsilon_{11} \quad (22)$$

در این صورت ضریب بزرگ نمایی مطابق رابطه (23) بدست خواهد آمد:

$$MF_1 = \frac{L'_1 - L_1}{L_1}, \quad MF_2 = \frac{L'_2 - L_2}{L_2} \quad (23)$$

و در نهایت با جایگذاری روابط (21) و (23) در رابطه (20) میزان کرنش برشی به صورت رابطه (24) بدست می‌آید:

$$\Gamma_{12} = \sqrt{\left[1 + 2 \left(\frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)}{\cos(\alpha + \beta)} \right)\right]} \times \sqrt{\left[1 + 2 \frac{(1 - \cos \alpha)}{\cos \alpha}\right]} \sin(\alpha + \beta) \quad (24)$$

معادله (24) میزان کرنش برشی اعمالی به قطعه کار در فرایند اکستروژن برشی ترکیبی با زوایای اعوجاج α و β را نشان می‌دهد.

4- شبیه‌سازی المان محدود

شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود دیفرم انجام شده است. به این صورت که هندسه قالب¹، قطعه کار² و سنبه³ ابتدا در نرم‌افزار سالیدورکس⁴ به صورت دقیق ترسیم و سپس وارد محیط نرم‌افزار دیفرم شده است. قالب و سنبه به صورت صلب و قطعه‌کار به صورت شکل پذیر و با خصوصیات آلیاژ آلومینیوم-منیزیم-سیلیسیم و با ابعاد $70 \times 10 \times 10$ mm در نظر گرفته شد. ضریب اصطکاک بین سطوح قالب و قطعه‌کار نیز 0.1 در نظر گرفته شد [13]. قالب هیچ گونه حرکتی در هیچ کدام از محوره‌های مختصات ندارد و به طور کامل ثابت شده است، بارگذاری و شرایط مرزی بر اساس جابه‌جایی سنبه در جهت مسیر اکستروژن و به اندازه 70 mm می‌باشد، سرعت حرکت سنبه نیز 1 mm/s فرض شده است. همچنین از 28000 المان هرمی در شبکه‌بندی

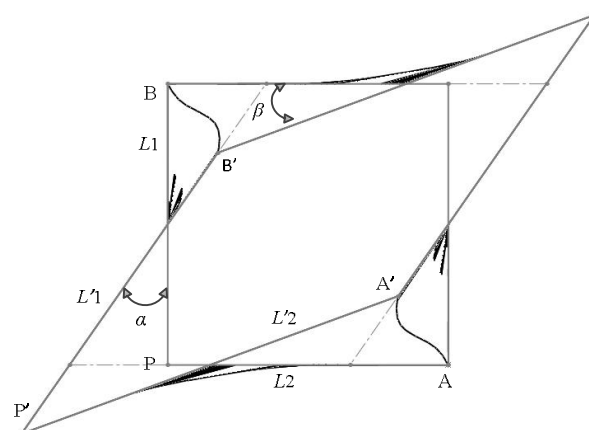


Fig. 7 Schematic of initial and middle cross section of specimen normal to extrusion direction

شکل 7 شماتیک سطح مقطع ابتدایی و میانی عمود بر جهت اکستروژن

¹ die
² billet
³ punch
⁴ Solidworks

⁵ Von-Mise

کرنش متفاوت در سطح مقطع نمونه می‌شود، با تغییر مسیر در پاس‌های بعدی می‌توان توزیع کرنش در سطح مقطع نمونه را همگن‌تر کرد [30,29,12].

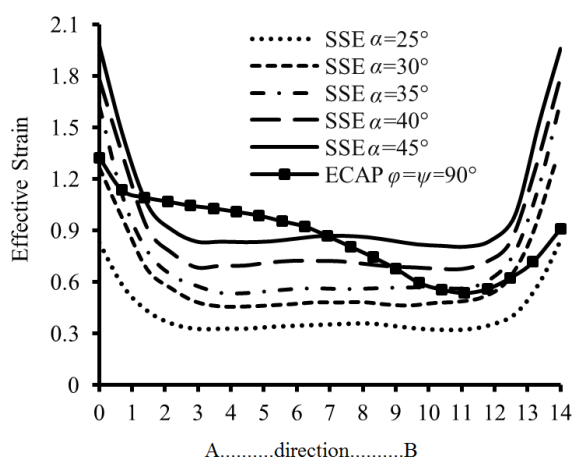


Fig. 10 Distribution of effective strain in the cross section of sample along line AB for ECAP and SSE process.

شکل 10 تغییرات کرنش مؤثر در مسیر AB در فرایندهای ECAP و SSE با زاویه‌های اعوجاج مختلف

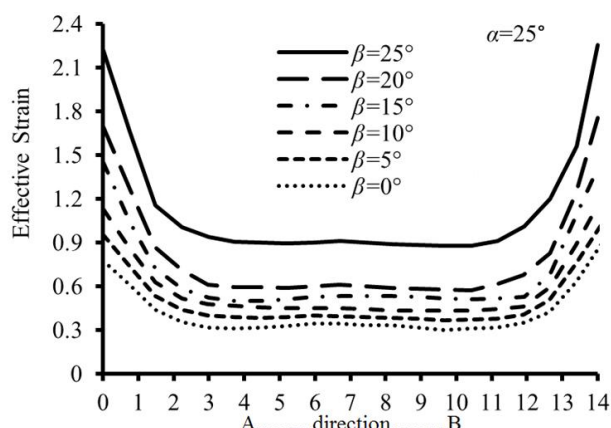


Fig. 11 Distribution of effective strain in the cross section of sample along line AB for $\alpha=25^\circ$.

شکل 11 تغییرات کرنش مؤثر در مسیر AB در فرایند CSE با زاویه اعوجاج $\alpha=25^\circ$

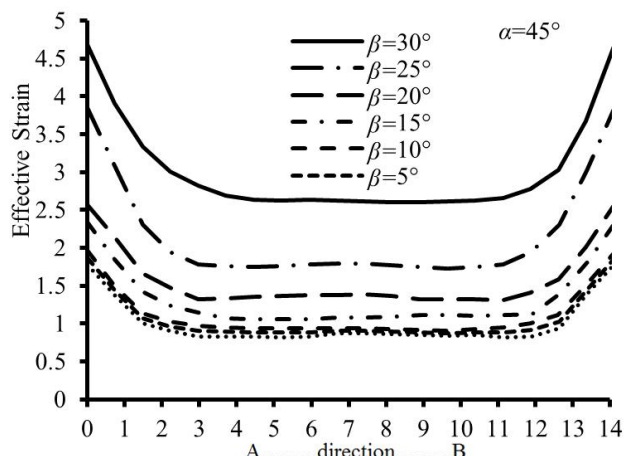


Fig. 12 Distribution of effective strain in the cross section of sample along line AB for $\alpha=45^\circ$.

شکل 12 تغییرات کرنش مؤثر در مسیر AB با زاویه اعوجاج $\alpha=45^\circ$

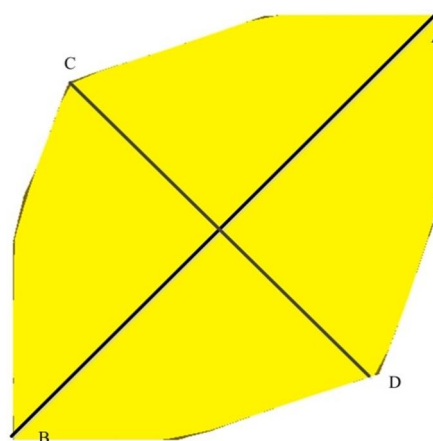


Fig. 9 Final cross section sample after CSE and described directions for strain distribution.

شکل 9 سطح مقطع نهایی بعد از فرایند CSE و جهت انتخابی برای توزیع کرنش.

شکل 10 میزان کرنش اعمالی در فرایندهای اکستروژن برشی ساده در زاویه‌های اعوجاج $0 \leq \alpha \leq 45^\circ$ و پرس کاری در کانال‌های زاویه‌دار با زاویه کانال و گوشه $\varphi = \psi = 90^\circ$ را نشان می‌دهد. در فرایند اکستروژن برشی ساده با افزایش زاویه اعوجاج، میزان کرنش مؤثر اعمالی به نمونه افزایش می‌یابد به طوری که بیشترین مقدار کرنش مؤثر در $\alpha = \pi/4$ که بیشترین زاویه اعوجاج رخ می‌دهد، مشاهده می‌شود. از جمله ویژگی‌های مثبت فرایند SSE می‌توان به توزیع متقارن و همگن کرنش برشی در سطح مقطع نمونه اشاره کرد که در شکل 10 قابل مشاهده می‌باشد [13]. میزان کرنش اعمالی در دو فرایند SSE با زاویه اعوجاج $\alpha = 45^\circ$ و فرایند ECAP با زاویه‌های کانال و گوشه $\varphi = \psi = 90^\circ$ به صورت تقریبی با هم برابر می‌باشند ولی توزیع کرنش در سطح مقطع نمونه در فرایند پرس کاری در کانال‌های زاویه‌دار به صورت یکنواخت نمی‌باشد، به گونه‌ای که میزان کرنش از قسمت بالایی نمونه (نقطه A در شکل 9) به سمت پایین نمونه (نقطه B) کاهش پیدا می‌کند، که یکی از مشکلات اساسی فرایند ECAP توزیع غیر همگن کرنش می‌باشد [28].

شکل‌های 11 و 12 مقدار کرنش مؤثر در فرایند اکستروژن برشی ترکیبی با زاویه‌های اعوجاج $\alpha = 25^\circ, 45^\circ$ در هر نمودار و تغییرات زاویه β از صفر تا 30° را نشان می‌دهد. در یک α ثابت با افزایش β میزان کرنش مؤثر افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه α (با یک β ثابت) میزان کرنش مؤثر نیز افزایش می‌یابد. بنابراین میزان کرنش مؤثر در فرایند اکستروژن برشی ترکیبی مانند فرایند اکستروژن برشی ساده با افزایش زاویه‌های اعوجاج، افزایش می‌یابد. توزیع کرنش در فرایند اکستروژن برشی ترکیبی مانند دو فرایند SSE و PSE به صورت متقارن و همگن بوده، که یکی از ویژگی‌های مثبت این فرایند می‌باشد.

همان‌طور که در شکل 13 مشاهده می‌شود، در فرایند جدید معرفی شده تغییر شکل سطح مقطع متناسب با زاویه‌های اعوجاج تغییر می‌کند. به گونه‌ای که با افزایش زاویه‌های اعوجاج میزان تغییرات سطح مقطع نیز بیشتر می‌شود و این به دلیل عدم پر شدن قالب به طور کامل توسط قطعه‌کار می‌باشد. در اکثر فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید قطعه‌کار قادر به پر کردن قالب به طور کامل نمی‌باشد در نتیجه سطح مقطع اولیه و نهایی با هم متفاوت می‌باشند [17, 13]. متفاوت بودن سطح مقطع قبل و بعد از فرایندهای SPD به معنای عدم امکان تکرار فرایند نمی‌باشد بلکه باعث توزیع

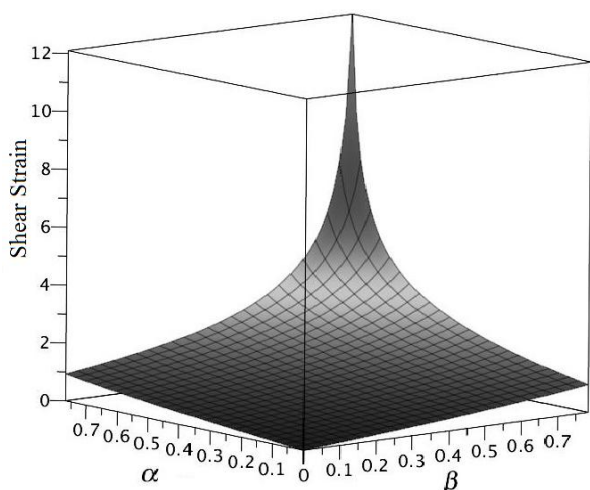


Fig. 14 Three-dimensional diagram of shear strain applied to the sample under different angles of distortion

شکل 14 نمودار سه بعدی کرنش برشی اعمالی به نمونه تحت زوایای اعوجاج متفاوت

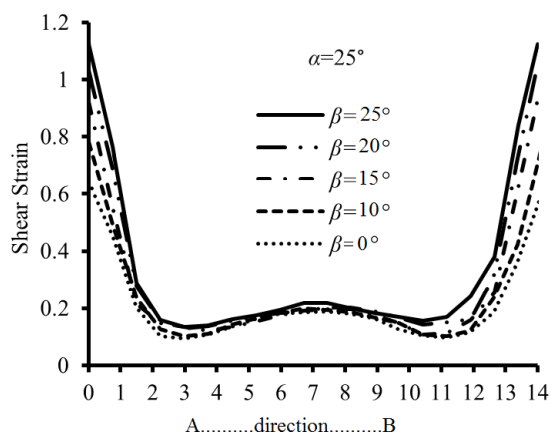


Fig. 15 Distribution of shear strain in the cross section of sample along line AB for $\alpha=25^\circ$.

شکل 15 تغییرات کرنش برشی در مسیر AB با زاویه اعوجاج $\alpha=25$

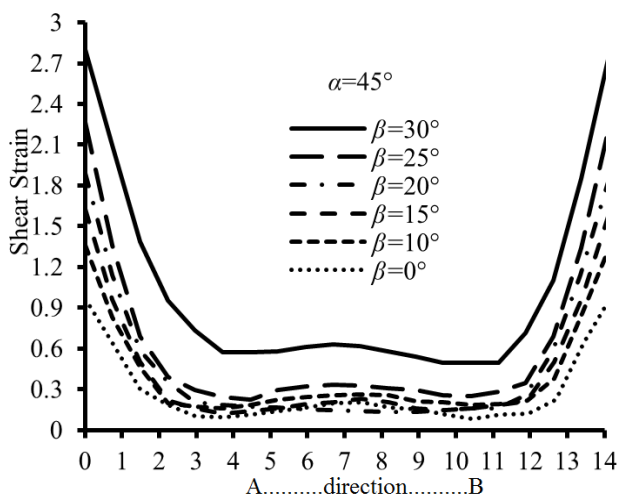


Fig. 16 Distribution of shear strain in the cross section of sample along line AB for $\alpha=45^\circ$.

شکل 16 تغییرات کرنش برشی در مسیر AB با زاویه اعوجاج $\alpha=45$

شکل 14 نمودار سه بعدی توزیع کرنش برشی حاصل از حل تحلیلی (معادله 24) فرایند اکستروژن برشی ترکیبی را نشان می‌دهد. که با استفاده از آن می‌توان میزان کرنش برشی اعمالی به نمونه در فرایند CSE را در هر زاویه اعوجاج α و β بدست آورد. همان‌طور که در شکل 14 مشاهده می‌شود، کرنش برشی در فرایند CSE در زوایای اعوجاج $\alpha = \beta = \pi/4$ به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. میزان کرنش برشی بی‌نهایت در فرایند CSE با زوایای اعوجاج $\alpha = \beta = \pi/4$ در فیزیک مسئله نیز قابل مشاهده می‌باشد. به این صورت که اگر در شکل 7 دو زاویه α و β 45 درجه در نظر گرفته شوند، دو خط $P'A'$ و $P'B'$ بر روی هم افتاده و با هم موازی می‌شوند در نتیجه سطح مقطع میانی قالب به سمت صفر میل می‌کند، به عبارت دیگر قطعه کار در اثر فرایند اکستروژن باید از سطح مقطعی که مساحت آن به سمت صفر میل می‌کند عبور کند و این نیازمند کرنش برشی بسیار زیادی می‌باشد که در معنای فیزیکی کرنش برشی بی‌نهایت را تعریف می‌کند.

همان‌طور که در شکل 14 مشاهده می‌شود، میزان نرخ افزایش کرنش (شیب نمودار) در زوایای اعوجاج کوچک، کم بوده و با افزایش زوایای اعوجاج، میزان نرخ افزایش کرنش بیشتر می‌شود. این موضوع را می‌توان در بررسی‌های عددی نیز مشاهده کرد، با دقت در شکل‌های 11 و 12 مشاهده می‌شود که فاصله عمودی بین دو خط در زوایای اعوجاج متوالی با افزایش زاویه اعوجاج، افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که نرخ افزایش کرنش در زوایای اعوجاج نزدیک به 45 درجه بسیار زیاد می‌باشد و با افزایش یک درجه‌ای یکی از زوایای اعوجاج، میزان کرنش به اندازه 4 واحد تغییر می‌کند.

همان‌طور که در شکل‌های 10 تا 12 مشاهده می‌شود، توزیع کرنش در فرایندهای CSE، SSE در گوشه‌ها زیاد بوده و با شیب زیادی کم می‌شود، تا در وسط نمونه به کرنش برشی یکنواختی برسد و این بخاطر اعوجاج زیاد گوشه‌ها می‌باشد که با کاهش زوایای اعوجاج (کاهش زاویه α و β به طور همزمان) میزان کرنش برشی همان‌طور که در شکل 14 مشخص است به سرعت کم می‌شود. رسیدن کرنش برشی به ناحیه یکنواخت به معنای ثابت ماندن زاویه اعوجاج نیست، بلکه میزان کاهش زاویه α و β به ناحیه‌ای رسیده که نرخ کاهش کرنش برشی خیلی کم است و می‌توان آن را یکنواخت فرض کرد. البته اعوجاج دو زاویه دیگر که قطر دیگر متوازی‌الاضلاع را به هم وصل می‌کند (خط CD در شکل 9) نیز بر میزان غیر یکنواختی کرنش برشی در

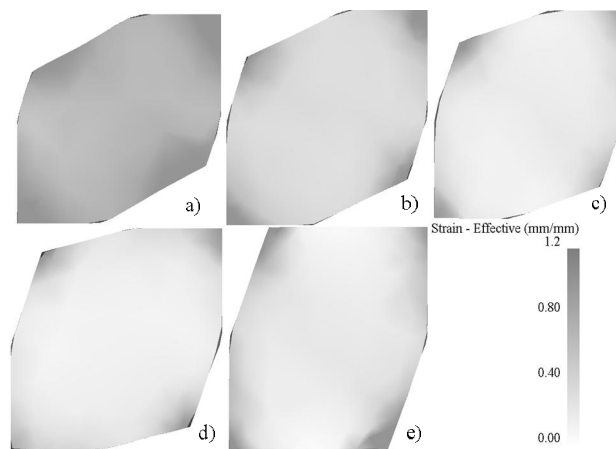


Fig. 13 Cross-sectional shape of samples at the end of process CSE for $\alpha=25$ and a) $\beta=25$ b) $\beta=20$ c) $\beta=15$ d) $\beta=10$ e) $\beta=0$

شکل 13 سطح مقطع نمونه بعد از تغییر شکل تحت فرایند CSE با زاویه $\alpha=25$ و زاویه (a) $\beta=25$ (b) $\beta=20$ (c) $\beta=15$ (d) $\beta=10$ (e) $\beta=0$

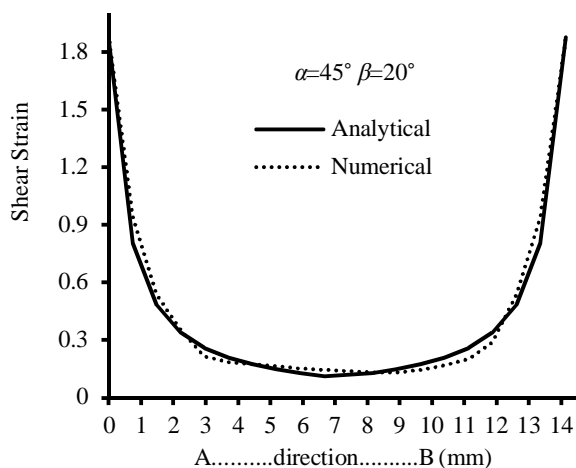


Fig. 18 Numerical and analytical analysis of shear strain for distortion angle $\alpha = 45$ and $\beta = 20$.

شکل 18 مقایسه عددی و تحلیلی کرنش برشی با زوایای اعوجاج $\alpha=45$ $\beta=20$

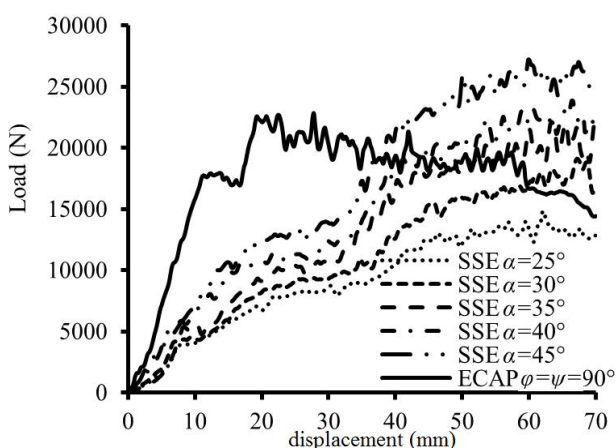


Fig. 19 Required load for ECAP and SSE process

شکل 19 نیروی مورد نیاز برای انجام فرایندهای ECAP و SSE با زوایای اعوجاج مختلف

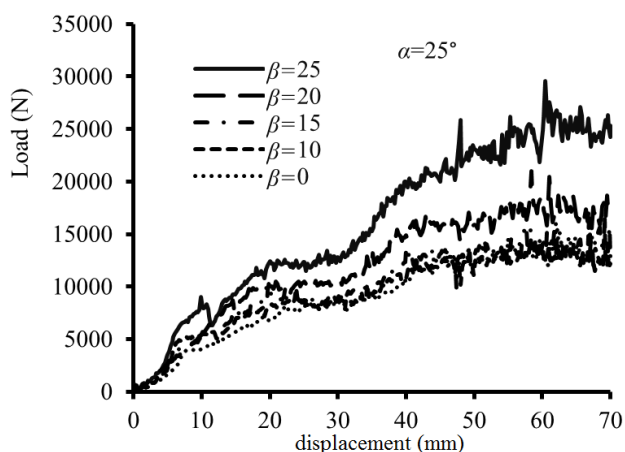


Fig. 20 Required load for CSE process in $\alpha = 25$.

شکل 20 نیروی مورد نیاز برای انجام فرایند CSE با زاویه اعوجاج $\alpha=25$

6- نتیجه گیری و جمع بندی

در این تحقیق، فرایند اکستروژن برشی ترکیبی به عنوان یک فرایند جدید

اواسط خط AB تاثیرگذار می باشد. که میزان افزایش کرنش برشی در اواسط خط AB در شکل های 15 و 16 و همچنین اختلاف ناچیز در اواسط خط AB بین حل تحلیلی و عددی در شکل های 17 و 18 نیز به همین دلیل می باشد.

نیروی مورد نیاز برای انجام فرایند از پارامترهای مهم در فرایندهای SPD به حساب می آید، شکل 19 نیروی مورد نیاز برای انجام فرایندهای SSE با زوایای اعوجاج مختلف و فرایند ECAP با زوایای کانال و گوشه $\varphi = \psi = 90^\circ$ را نشان می دهد. نیروی مورد نیاز برای فرایندهای SSE با زاویه اعوجاج $\alpha = 45^\circ$ و فرایند ECAP به صورت تقریبی با هم برابر می باشند، با این تفاوت که نیروی مورد نیاز برای انجام فرایند ECAP به صورت یکباره و با شیب زیادی به قطعه کار وارد می شود، این در حالی است که نیروی مورد نیاز برای انجام فرایند SSE، در طول انجام فرایند و با شیب نسبتاً آرامی به قطعه کار اعمال می شود، که این خود یکی از مزیت های فرایند SSE نسبت به فرایند ECAP می باشد.

با توجه به شکل های 20 و 21 در فرایند CSE با افزایش زوایای اعوجاج α و β میزان نیروی اعمالی به پانچ متناسب با افزایش کرنش مؤثر افزایش می یابد. که منحنی نیرو برحسب جابه جایی پانچ در کانال اکستروژن را می توان به چهار ناحیه تقسیم کرد (شکل 21). در ناحیه A قطعه کار تا نیمه اول کانال را پر می کند که بر اساس شکل قالب، فشار پشتی به قطعه کار وارد می شود و تا زمانی که نیمه اول قالب توسط قطعه کار پر نشود، این نیرو افزایش می یابد. باتوجه به این که طول ناحیه تغییر شکل قالب 30 mm نظر گرفته شده است طول ناحیه A برابر نصف طول ناحیه تغییر شکل قالب و 15 mm می باشد. در ناحیه B قطعه کار نیمه دوم قالب را پر می کند به همین دلیل میزان نیروی اعمالی به پانچ ثابت است که طول ناحیه B مانند ناحیه A، 15 mm می باشد. ناحیه C، از ورود قطعه کار به کانال خروجی با سطح مقطع مربعی شروع شده و تا زمانی که قطعه کار به اندازه طول ناحیه تغییر شکل قالب، از قالب بگذرد ($x=45$ mm) ادامه دارد که با عبور قطعه کار از ناحیه تغییر شکل به نوعی فشار پشتی ایجاد می شود و باعث افزایش نیروی اعمالی به سنبه می شود. در ناحیه D که به حالت پایدار رسیده میزان نیروی اعمالی به سنبه مقدار تقریباً ثابتی است.

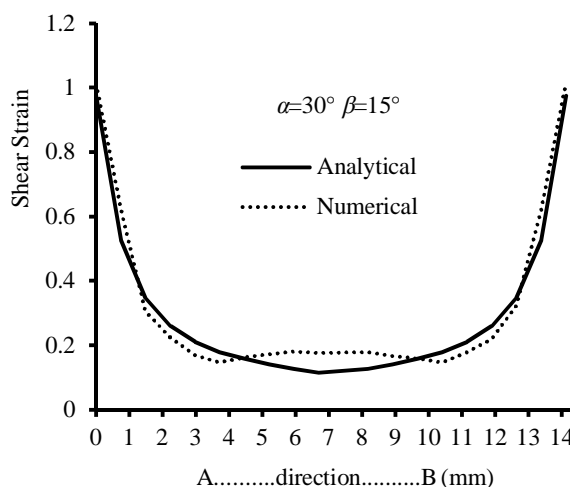


Fig. 17 Numerical and analytical analysis of shear strain for distortion angle $\alpha = 30$ and $\beta = 15$.

شکل 17 مقایسه عددی و تحلیلی کرنش برشی با زوایای اعوجاج $\alpha=30$ $\beta=15$

دلخواه را از حل تحلیلی بدست آورد و با اعمال فشار پستی مناسب، به یک نمونه با کرنش دلخواه و توزیع کرنش متقارن و بدون تغییر شکل در سطح مقطع دست یافت.

7- فهرست علائم

طول اولیه المان خطی	ds
طول نهایی المان خطی بعد از تغییر شکل	ds'
طول‌های اولیه سطح مقطع	L_1, L_2
طول‌های تغییر شکل یافته سطح مقطع در میانه فرایند	L'_1, L'_2
ضریب بزرگ نمایی	MF
بردار هادی المان خطی اولیه	$\vec{N}(\vec{N}_1, \vec{N}_2, \vec{N}_3)$
بردار هادی المان خطی بعد از تغییر شکل	$\vec{N}'(\vec{N}'_1, \vec{N}'_2, \vec{N}'_3)$
نقطه ابتدایی المان خطی	$P(x_1, x_2, x_3)$
بردار جابه جایی	$\vec{u}(\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3)$
علائم یونانی	
زاویه اعوجاج در فرایند اکستروژن برشی ترکیبی	α
زاویه اعوجاج در فرایند اکستروژن برشی ترکیبی	β
کرنش برشی	Γ_{12}
دلتای کرونیگر	$\delta_{\alpha\beta}$
کرنش مهندسی	$\varepsilon_{\alpha\beta}$
زاویه بین المان‌های تغییر نیافته	θ
زاویه بین المان‌های بعد از تغییر شکل	θ'
نقطه ابتدایی المان خطی بعد از تغییر شکل	$\varphi(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$
زاویه کانال در فرایند پرس زاویه‌ای با مقاطع یکسان	φ
زاویه گوشه در فرایند پرس زاویه‌ای با مقاطع یکسان	ψ

8- مراجع

- [1] K. Oh-ishi, Z. Horita, M. Furukawa, M. Nemoto and T. Langdon, Optimizing the Rotation Conditions for Grain Refinement in Equal-Channel Angular Pressing, *Metall Materials Transactions*, Vol. 29, No. 7, pp. 2011-2013, 1998.
- [2] R. Z. Valiev, R. Alexandrov and I. Alexandrov, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Materials Science*, Vol. 45, pp. 103-189, 2000.
- [3] F. Salimyanfard, M. Toroghinejad, F. Ashrafizadeh, M. Hoseini and J. Szpunar, Investigation of texture and mechanical properties of copper processed by new route of equal channel angular pressing, *Materials & Design* Vol. 44, pp. 378-381, 2013.
- [4] R. Naseri, M. Shariati and M. Kadkhodayan, Effect of work-piece cross section on the mechanical properties of commercially pure titanium produced by Equal Channel Angular, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 157-166, 2015. (in Persian)
- [5] V. Segal, Materials processing by simple shear, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 197, pp. 157-164, 1995.
- [6] V. Segal, V. Eznikov, A. Drobyshevskiy and V. Kopylov, Plastic working of metals by simple shear, *Russ Metall (English translation)*, Vol. 1, pp. 99-105, 1981.
- [7] S. Akbari Mousavi, A. Mastroori and M. Mastroori, Computational study of Ti 6Al-4V flow behaviors during the twist extrusion process, *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 1316-1329, 2008.
- [8] R. Kocich, I. Szurman and A. Machackova, Twist-channel angular pressing: effect of the strain path on grain refinement and mechanical properties of copper, *Materials Science*, Vol. 46, pp. 7865-7876, 2011.
- [9] R. Kocich, M. Kurska, I. Szurman and A. Machackova, Twist channel angular pressing (TCAP) as a method for increasing the efficiency of SPD, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, pp. 6386-6392, 2010.
- [10] B. Mami, M. Paydar and M. Paydar, A modification on ECAP process by incorporating torsional deformation, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, pp. 4159-4165, 2011.

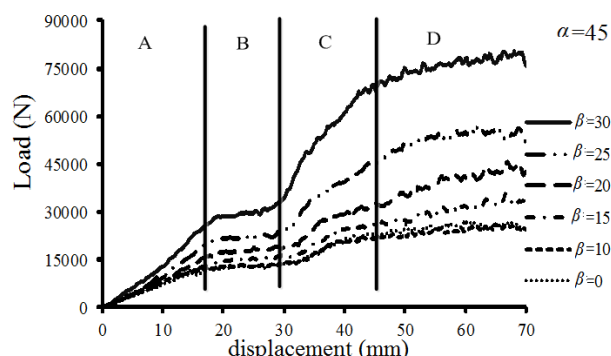


Fig. 21 Variation of applied load versus punch displacement in $\alpha = 45$.

شکل 21 نیروی وارد بر سنبه در جهت اکستروژن با زاویه اعوجاج $\alpha = 45$

تغییر شکل پلاستیک شدید با توجه به تعریف‌های اولیه برش ساده و خالص معرفی شد. آنالیز المان محدود سه فرایند اکستروژن برشی ترکیبی، اکستروژن برشی ساده و پرس زاویه‌ای با مقاطع یکسان با استفاده از نرم‌افزار المان محدود دیفورم انجام و باهم مقایسه شدند. همچنین فرایند اکستروژن برشی ترکیبی به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت و با تحلیل اجزا محدود آن مقایسه شد. نتایج شبیه‌سازی عددی و تحلیلی فرایند اکستروژن برشی ترکیبی نشان می‌دهد، کرنش برشی و مؤثر و همچنین نرخ افزایش کرنش برشی و مؤثر وارد شده به نمونه با افزایش زاویه‌های اعوجاج α و β افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که در زاویه‌های اعوجاج نزدیک به 45 درجه میزان کرنش برشی به بی‌نهایت نیز می‌رسد.

از جمله ویژگی‌های فرایند جدید ارائه شده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- دو فرایند پایه‌ای اکستروژن برشی ساده و اکستروژن برشی خالص حالت‌های خاصی از فرایند جدید ارائه شده می‌باشند. به این صورت که اگر در فرایند جدید، زاویه اعوجاج $\beta = 0^\circ$ باشد، در این صورت فرایند جدید به فرایند اکستروژن برشی ساده و در صورتی که زاویه‌های اعوجاج $\alpha = \beta$ باشد، فرایند جدید به فرایند اکستروژن برشی خالص تبدیل می‌شود.

- میزان کرنش اعمالی در فرایند جدید از فرایند اکستروژن برشی ساده بیشتر و با توجه به انتخاب زاویه‌های اعوجاج می‌تواند از فرایند اکستروژن برشی خالص بیشتر یا کمتر باشد.

- توزیع کرنش در سطح مقطع نمونه در فرایند جدید به صورت متقارن می‌باشد، که یکی از مزیت‌های این فرایند نسبت به سایر فرایندهای SPD مانند پرس کاری در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع می‌باشد.

- از جمله مزیت‌های فرایند اکستروژن برشی ترکیبی نسبت به سایر فرایندهای SPD می‌توان به اعمال کرنش مؤثر دلخواه (از صفر تا بی‌نهایت) با توجه به تعاریف زاویه‌های α و β اشاره کرد.

- مزیت اصلی فرایند اکستروژن برشی ترکیبی نسبت به فرایند اکستروژن برشی خالص و سایر فرایندهای SPD این است که یک کرنش مؤثر را می‌توان از طریق چندین زاویه‌ای اعوجاج بدست آورد. به عبارت دیگر برای رسیدن به کرنش مؤثر مورد نظر، از بین زاویه‌های اعوجاج، زاویه‌ای انتخاب شود که کمترین تغییر شکل در سطح مقطع نمونه را داشته باشد. که این خود یک تحول چشمگیر در فرایندهای SPD می‌باشد.

در فرایند اکستروژن برشی ترکیبی می‌توان میزان کرنش پلاستیک مؤثر

- Vedernikova, Features of twist extrusion: method, structures & material properties, *Solid State Phenom.*, Vol. 114, pp. 69-78, 2006.
- [22] M. Dehghan, F. Qods and M. Gerdooei, Investigation of microstructure and anisotropy of mechanical properties of ARB-processed commercial purity Aluminium with interpassing heat treatment, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 123-132, 2013. (in Persian فارسی)
- [23] M. Ranaei, A. Afsari, S. Ahmadi Brooghani and M. Moshksar, Microstructure, Mechanical and Electrical Properties of Commercially Pure Copper Deformed Severely by Equal Channel Angular Pressing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 257-266, 2015. (in Persian فارسی)
- [24] W. Hosford and R. Cadel, *Metal forming mechanics and metallurgy*, Fourth Edition, pp. 56-79, New York: Cambridge university press, 1983.
- [25] V. Segal, Severe plastic deformation: simple shear versus pure shear, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 338, pp. 331-344, 2002.
- [26] A. Shokuhfar and O. Nejadseyfi, A comparison of the effects of severe plastic deformation and heat treatment on the tensile properties and impact toughness of aluminum alloy 6061, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 594, pp. 140-148, 2014.
- [27] P. Borelli, K. Chong and J. Lee, *Elasticity in engineering*, Third Edition, pp. 78-86, New York: Wiley 1924.
- [28] M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto and T. Nemoto, The shearing characteristics associated with equal-channel angular pressing, *Materials Science and Engineering: A*, No. 257, pp. 328-332, 1998.
- [29] M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto and T. Nemoto, The shearing characteristics associated with equal-channel angular pressing, *Materials Science and Engineering: A*, No. 257, pp. 328-332, 1998.
- [30] Y. Iwahashi, M. Nemoto and T. Langdon, The process of grain refinement in equal-channel angular pressing, *Acta Materialia*, Vol. 46, pp. 3317-3331, 1998.
- [11] M. Shahbaz, N. P. R. Ebrahimi and B. Talebanpour, A novel single pass severe plastic deformation technique: Vortex extrusion, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 530, p. 469-472, 2011.
- [12] N. pardis and R. Ebrahimi, Different processing routes for deformation via simple shear extrusion (SSE), *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, pp. 6153-6156, 2010.
- [13] 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. 527, pp. 355-360, 2009.
- [14] A. Shokuhfar and M. Shamsborhan, Finite element analysis of planar twist channel angular extrusion (PTCAE) as a novel severe plastic deformation method, *Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 5, pp. 1753-1757, 2014.
- [15] M. Shamsborhan and A. Shokuhfar, A planar twist channel angular extrusion (PTCAE) as a novel severe plastic deformation method based on equal channel angular extrusion (ECAE) method, *Mechanical Engineering Science*, Vol. 228, No. 12, pp. 2246-2250, 2014.
- [16] A. Eivani, A new severe plastic deformation technique based on pure shear, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 626, pp. 423-431, 2015.
- [17] F. Rahimi, A. Eivani and M. Kiani, Effect of die design parameters on the deformation behavior in pure shear extrusion, *Materials & Design*, Vol. 83, pp. 144-153, 2015.
- [18] R. Valiev and T. Langdon, Principles of equal channel pressing as a processing tool for grain refinement, *Progress in Materials Science*, Vol. 51, pp. 881-981, 2006.
- [19] K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto and T. Langdon, Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing, *Acta Materialia*, Vol. 46, No. 5, pp. 1589-1599, 1998.
- [20] A. Zhilyaev and T. Langdon, Using high-pressure torsion for metal processing: fundamentals and applications, *Progress in Materials Science*, Vol. 53, pp. 893-979, 2008.
- [21] Y. Beygelzimer, D. Orlov, A. Korshunov, S. Synkov, V. Varyukhin and I.