



فرآیند افزایش و کاهش تناوبی قطر (CFS) به عنوان روش نوین تغییر شکل پلاستیک شدید در تولید لوله های ریزدانه با ضخامت کم

حسام تراب زاده کاشی¹، قادر فرجی^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 11155-4563، ghfaraji@ut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش روش جدیدی تحت عنوان "افزایش و کاهش تناوبی قطر" برای تولید لوله های ریزدانه شده با ضخامت کم معرفی شده است. شبیه سازی اجزا محدود این روش، کم بودن نیروی تغییر شکل مورد نیاز و همگنی کرنش اعمالی را نشان می دهد. این روش از دو نیم سیکل تشکیل شده است. در نیم سیکل اول لوله بر روی ماندرل افزایش قطر، فشار داده می شود که بدین ترتیب در نواحی برشی، تنش عمودی کششی همراه با برش ایجاد و قطر لوله افزایش می یابد. در نیم سیکل بعدی لوله درون قالب کاهش قطر به صورتی که در همان نواحی برشی تنش فشاری همراه با برش ایجاد شود، رانده می شود تا قطر لوله به مقدار اولیه برسد. این فرآیند می تواند به صورت متناوب بر روی لوله اجرا شود تا به کرنش اعمالی بیشتر و به تبع آن اندازه دانه ریزتر و در نهایت خواص مکانیکی بهتر دست یافت. لوله از جنس آلومینیوم 1050 تحت این روش قرار گرفت که نتایج حاصله نشان می دهد مقدار حد تسلیم و استحکام کششی از حالت اولیه 50 مگاپاسکال و 115 مگاپاسکال به ترتیب به مقادیر 165 مگاپاسکال و 173 مگاپاسکال افزایش یافته است. مقدار درصد تغییر طول نهایی پس از انجام سه پاس، از 42% به 14% کاهش یافته است. از طرفی دیگر سختی لوله پس از انجام ده پاس، از مقدار 23 ویکرز به 38 ویکرز افزایش یافته است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 06 اردیبهشت 1394
پذیرش: 11 تیر 1394
ارائه در سایت: 22 تیر 1394

کلیدواژگان:

تغییر شکل پلاستیک شدید
مواد فوق ریزدانه
لوله با ضخامت کم
آلومینیوم
خواص مکانیکی

Cyclic flaring and sinking (CFS) as a new severe plastic deformation method for thin-walled cylindrical tubes

Hesam Torabzadeh kashi, Ghader Faraji*

Department of Mechanical Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 11155-4563, Tehran, Iran, ghfaraji@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 26 April 2015
Accepted 02 July 2015
Available Online 13 July 2015

Keywords:

Severe plastic deformation
ultrafine-grained materials
thin-walled tube
Aluminum
Mechanical properties

ABSTRACT

In this research, a novel severe plastic deformation (SPD) method entitled cyclic flaring and sinking (CFS) is presented for producing the ultrafine-grained (UFG) thin-walled cylindrical tubes. Finite element (FE) results showed that CFS process has good strain homogeneity and requires a low load. CFS process includes two different flaring and sinking half-cycles. At flaring half cycle, the flaring punch with two stepped regions is pressed into the tube. Shear and normal tensile strains are applied as a result of the existence of shear zones and increase in the tube diameter. In the second half cycle, the tube is then pressed to a sinking die that applies the same shear strains and normal compression strain so that the initial diameter of the tube is achieved and high plastic strain is applied. This process can be run periodically on the tube to exert more strain and consequently finer grain size and ultimately achieve better mechanical properties. The results indicated that the yield and ultimate strengths of the CFS processed Al (1050) tube were significantly increased to 165 MPa, and 173 MPa, respectively from the initial values of 50 MPa, and 115 MPa. The elongation to failure was decreased to about 14% after three cycles from the initial value of 42%. In addition, the hardness increases to ~38 Hv after ten cycles of CFS from ~23 Hv.

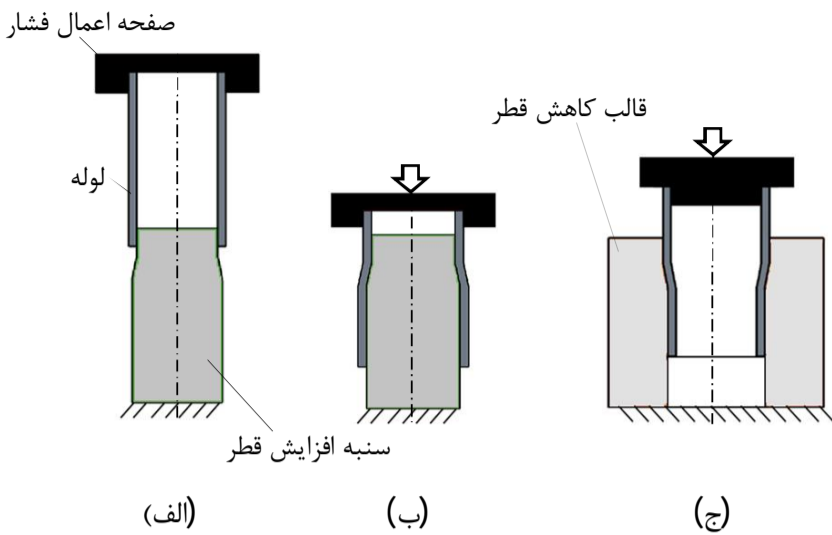
1- مقدمه

افزون قطعات لوله ای با استحکام بالا، تحقیقاتی در جهت تولید لوله های فوق ریزدانه صورت گرفته است. یکی از راه های تولید لوله های فوق ریزدانه استفاده از روش های تغییر شکل پلاستیک شدید² است که اساس آن ها بر اعمال

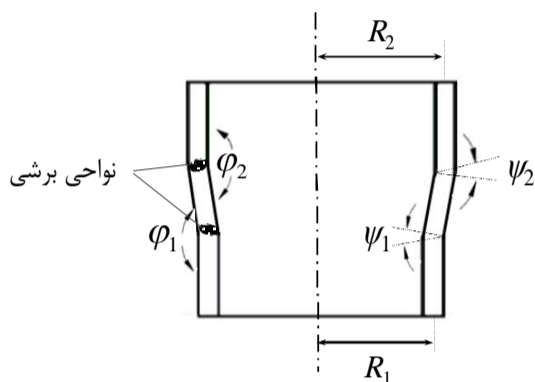
مواد فوق ریزدانه¹ خواص مکانیکی فوق العاده ای از خود نشان می دهند و کاربرد فراوانی در صنایع مختلف دارند [1]. در دهه اخیر با توجه به نیاز روز

2- Severe Plastic Deformation (SPD)

1- ultrafine-grained materials (UFG)



شکل 1 شماتیک فرآیند افزایش و کاهش تناوبی قطر الف- حالت اولیه ب- افزایش قطر (نیم سیکل اول) ج- کاهش قطر (نیم سیکل دوم)



شکل 2 متغیرهای هندسی فرآیند افزایش و کاهش تناوبی قطر

$$\bar{\epsilon}_{TN} = 2N \left\{ \sum_{i=1}^2 \left[\frac{2 \cot(\phi_i / 2)}{\sqrt{3}} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{R_2}{R_1} \right\} \quad (2)$$

در این پژوهش، با قرار دادن مقادیر متغیرها در رابطه (2)، مقدار کرنش پلاستیک معادل اعمال شده به لوله، پس از انجام یک پاس فرآیند CFS، برابر 0/45 می شود که در نهایت با انجام ده پاس، مقدار کرنش پلاستیک معادل تا مقدار 4/5 اعمال شد.

2- آزمایش های تجربی

در این مقاله برای بررسی روش CFS لوله ای از جنس آلومینیوم 1050 استفاده شده است. قطر خارجی لوله 11 میلی متر و ضخامت آن 1/2 میلی متر و طول آن 70 میلی متر انتخاب شد. سنبه افزایش قطر و قالب کاهش قطر هر دو از جنس فولاد VCN 150 با سختی 25 راکول سی ساخته شده است. همان طور که متغیرهای ابعادی نواحی برشی در شکل 2 ملاحظه می شود، مقدار زوایای گوشه ($\psi_1 = \psi_2$) برابر صفر درجه و مقدار زوایای کانال ($\phi_1 = \phi_2$) برابر 170 درجه در نظر گرفته شده است. اختلاف شعاع های لوله قبل و بعد از نیم سیکل اول $K = R_2 - R_1$ برابر ضخامت لوله (t) است.

برای انجام فرآیند CFS، از پرس با مکانیزم پیچی و با سرعت 150 میلی متر بر دقیقه و در دمای اتاق استفاده شده است که نشانگر سرعت بالای فرآیند است. همان طور که در شکل 3-الف مشخص است نمونه تست کشش پس از انجام تعداد پاس های مختلف در جهت طولی از لوله بریده شد تا بتوان چگونگی تاثیرات فرآیند روی خواص مکانیکی را بررسی کرد. از طرفی دیگر آزمون میکروسختی سنجی در مقطع عرضی لوله به صورتی که در شکل 3-ب نشان داده شده است و با احتساب میانگینی از پنج نقطه تحت بار 200 گرم و به مدت 10 ثانیه انجام گرفت.

کرنش زیاد بدون تغییر ابعادی می باشد [2]. توس در سال 2009 لوله های فوق ریزدانه را با استفاده از روش پیچش لوله در فشار بالا¹ تولید نمود [3]. محبی در سال 2010 روشی جدید تحت عنوان چرخش اتصال تجمعی² جهت تولید این نوع لوله ها معرفی کرد [4]. زنگی آبادی و همکارانش در سال 2011 با استفاده از روش فشار در کانال لوله ای³ اقدام به تولید لوله های با استحکام بالا کردند [5]. فرجی و همکاران در سال 2011 فرآیند فشار در کانال زاویه دار لوله ای⁴ [6] را به عنوان روشی بهینه، ارزان و با قابلیت صنعتی ابداع نمودند [7]. در سال 2012 فرآیند فشار در کانال زاویه دار لوله ای به صورت موازی⁵ توسط فرجی و همکارانش ابداع و ارائه شد [8]. بابایی و همکاران در سال 2014 با دو روش نوین انبساط و روزنرانی متناوب لوله⁶ و تراکم و روزنرانی متناوب لوله⁷ توانستند گامی نوآورانه در جهت تولید لوله های مستحکم بردارند [9,10]. به تازگی نیز جعفرزاده و همکاران روشی را تحت عنوان انبساط و انقباض تناوبی معرفی نموده اند و توانسته اند با این روش به موفقیت هایی در تولید لوله های فوق ریزدانه دست یابند [11]. لزوم بهینه سازی روش های تغییر شکل پلاستیک جهت تولید لوله های فوق ریزدانه یکی از دغدغه های محققین علم شکل دهی بوده است. در این پژوهش، روش ابداعی معرفی شده است که با حذف نیروهای اصطکاک اضافی و اعمال تدریجی کرنش، علاوه بر عدم نیاز به تجهیزات با تناژ بالا، باعث همگنی کرنش اعمالی و یکنواختی خواص مکانیکی لوله می شود.

همان طور که در شکل 1 نشان داده شده است، روش افزایش و کاهش تناوبی قطر⁸ از دو نیم سیکل تشکیل شده است. در ابتدای فرآیند لوله بر روی سنبه افزایش قطر⁹ فشار داده می شود که بدین ترتیب نواحی برشی با تنش عمودی کششی همراه با برش روی لوله ایجاد می شود و قطر لوله نیز افزایش می یابد. در نیم سیکل دوم لوله درون قالب کاهش قطر¹⁰ به صورتی که در همان نواحی برشی تنش فشاری همراه با برش ایجاد شود، رانده می شود تا بتوان ضمن دستیابی به قطر اولیه لوله، کرنش پلاستیک بالایی اعمال کرد. انجام این فرآیند به صورت تناوبی و در تعداد سیکل بالاتر می تواند کرنش اعمالی را به صورت تدریجی افزایش دهد تا به خواص مکانیکی مناسب تری در لوله دست یافت.

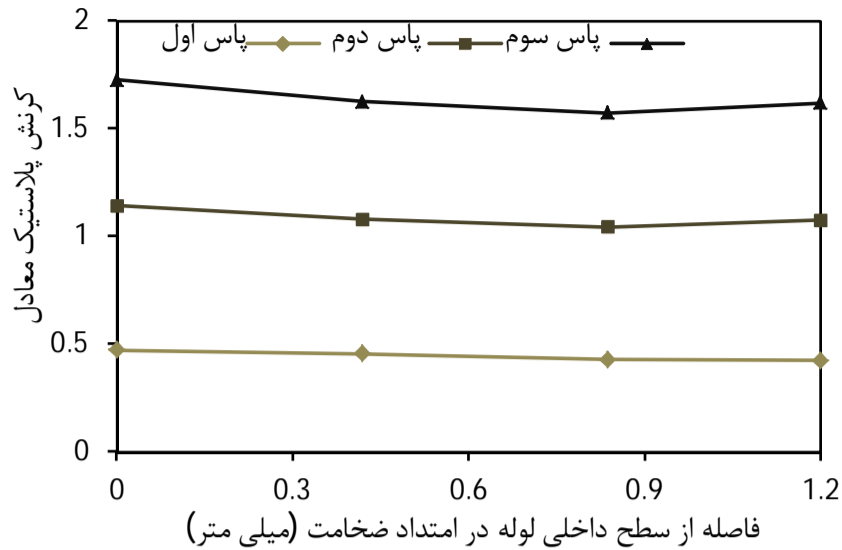
شکل 2 متغیرهای لازم را جهت محاسبه کرنش معادل اعمال شده در نواحی برشی برای حالتی که شعاع متوسط اولیه لوله از R_1 پس از نیم سیکل اول به مقدار R_2 می رسد و سپس در نیم سیکل دوم به مقدار اولیه باز می گردد، نشان می دهد.

کرنش پلاستیک معادل را در یک نیم سیکل و در نواحی برشی مانند آنچه که در روش PTCAP صورت گرفته است [5]، می توان به صورت رابطه (1) محاسبه کرد (با توجه به این که در این روش داریم: $\psi_1 = \psi_2 = 0^\circ$):

$$\bar{\epsilon}_T = \sum_{i=1}^2 \left[\frac{2 \cot(\phi_i / 2)}{\sqrt{3}} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

لذا با استفاده از رابطه (2) می توان مجموع کرنش پلاستیک معادل را پس از انجام N پاس فرآیند CFS بدست آورد:

- 1- high-pressure tube twisting (HPTT)
- 2- Accumulative spin-bonding (ASB)
- 3- Tube Channel Pressing (TCP)
- 4- Tube Channel Angular Pressing (TCAP)
- 5- Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP)
- 6- Tube cyclic expansion-extrusion (TCEE)
- 7- Tube Cyclic Extrusion-Compression (TCEC)
- 8- Cyclic flaring and sinking (CFS)
- 9- Flaring punch
- 10- Sinking die

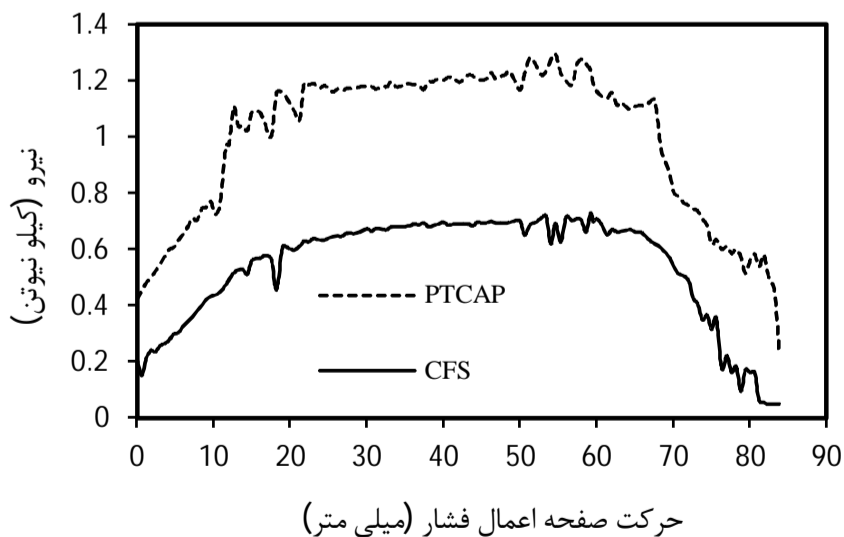


شکل 5 کرنش پلاستیک معادل در امتداد ضخامت لوله و در تعداد پاس های مختلف

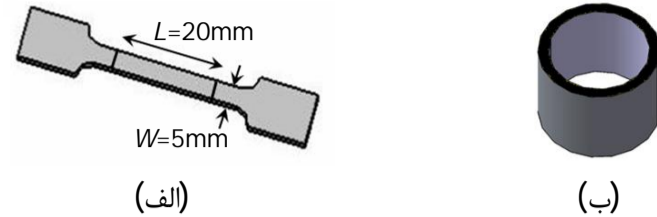
مورد نیاز در آزمایش های تجربی روش CFS بود. با توجه به اینکه در این روش تماس های اصطکاکی اضافی بین قالب و لوله حذف شده است، پیش بینی می شد که نیروی تغییر شکل مورد نیاز در این روش در مقایسه با روش های دیگر کمتر باشد تا بتوان این مورد را نیز به عنوان مزیتی دیگر از روش CFS معرفی کرد. شکل 6 محاسبات اجزا محدود مربوط به مقدار نیروی اعمالی در حین حرکت صفحه اعمال فشار برای دو روش CFS و PTCAP در شرایط کاملا یکسان را نشان می دهد. همان طور که مشهود است بیشترین نیروی مورد نیاز برای روش CFS برابر 718 نیوتن است در حالی که این مقدار برای روش PTCAP برابر 1282 نیوتن است. به وضوح می توان دریافت که نیروی مورد نیاز برای فرآیند CFS حدود 80 درصد کمتر از روش PTCAP است و این امر به علت کاهش نیروهای اصطکاکی بر اثر حذف تماس های اصطکاکی اضافی رخ داده است.

4-1-2- تاثیر زاویه کانال⁶ ($\psi_1=\psi_2=0^\circ, K=t, \varphi=\varphi_1=\varphi_2$)

شکل 7-الف تاثیر زاویه کانال (φ) را بر روی توزیع کرنش پلاستیک معادل در امتداد ضخامت لوله، پس از پاس اول فرآیند CFS نشان می دهد. همچنین متوسط کرنش پلاستیک در زوایای کانال مختلف در شکل 7-ب آورده شده است. در زوایای کانال بزرگتر از 155 درجه، همان طور که انتظار می رود، با افزایش زاویه کانال، متوسط کرنش پلاستیک کاهش می یابد [13]، اما این روند در زوایای کانال کمتر از 155 درجه صدق نمی کند. جهت توضیح تاثیر زوایای کانال کمتر از 155 درجه بر روی کرنش پلاستیک معادل باید به



شکل 6 نیروی محاسبه شده در نرم افزار اجزا محدود بر حسب حرکت صفحه اعمال فشار در روش های CFS و PTCAP



شکل 3 الف- نمونه تست کشش ب- مقطع عرضی مورد استفاده در میکروسختی سنجی

3- شبیه سازی اجزا محدود

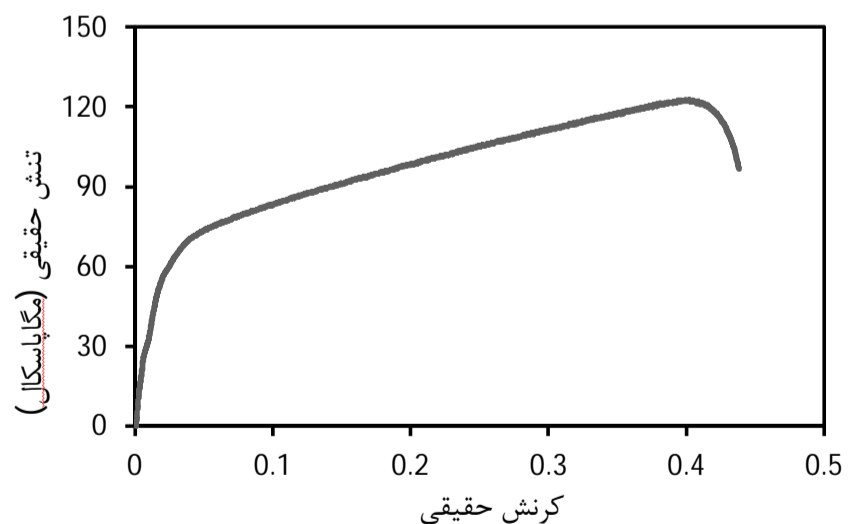
برای شبیه سازی عددی فرآیند از نرم افزار اجزا محدود آباکوس 6-10¹ استفاده شده و نوع حل صریح² بوده است. به علت استفاده از مولیبدن دی سولفید³ به عنوان روانکار، ضریب اصطکاک کولمب (μ) برابر 0/05 فرض شده است [12]. در این شبیه سازی از مدل متقارن محوری استفاده شده و نوع المان برای لوله، سه گره ای⁴ در نظر گرفته شده است. همان طور که در شکل 4 نشان داده شده است، نمودار تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم 1050 با استفاده از آزمون کشش در دمای اتاق و با نرخ کرنش 10^{-5} بر ثانیه بدست آمده و در نرم افزار شبیه سازی وارد شده است.

4- نتایج و بحث

4-1-1- شبیه سازی اجزا محدود

4-1-1-1- نیروی مورد نیاز و کرنش پلاستیک معادل در آزمایش های تجربی توزیع کرنش پلاستیک معادل⁵ در امتداد ضخامت لوله در پاس های اول، دوم و سوم مطابق آزمایش های تجربی، تحت شبیه سازی اجزا محدود قرار گرفت که در شکل 5 نشان داده شده است. کرنش پلاستیک معادل در پاس اول در امتداد ضخامت لوله، دارای کمترین مقدار 0/422 و بیشترین مقدار 0/47 است، بنابراین مقدار بازه تغییرات کرنش پلاستیک معادل برابر $\pm 0/03$ است که همگنی کرنش اعمالی در روش CFS را نشان می دهد. همگنی کرنش پلاستیک معادل به عنوان یک مزیت روش های تولید لوله های فوق ریزدانه مطرح است چرا که می تواند باعث یکنواختی خواص مکانیکی در لوله شود. از طرفی دیگر میانگین کرنش پلاستیک معادل در امتداد ضخامت، در پاس اول برابر 0/446 است که این مقدار با مقدار بدست آمده از تحلیل محاسباتی که برابر 0/45 بود، مطابقت دارد.

مبحث دیگری که در شبیه سازی اجزا محدود مورد توجه گرفت، نیروی



شکل 4 نمودار تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم 1050

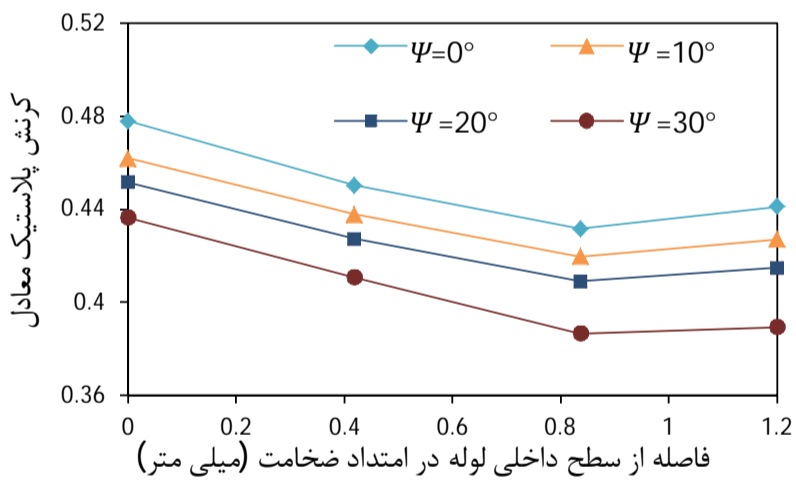
1- ABAQUS 6-10
2- Explicit
3- MoS₂
4- CAX3
5- equivalent plastic strain (EPS)

6- Channel angle (φ)

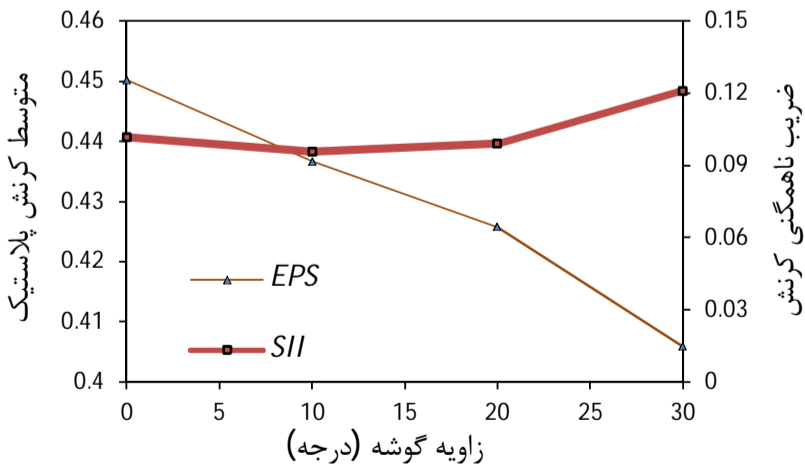
است با افزایش زاویه گوشه، تراز کرنش پلاستیک معادل در امتداد ضخامت کاهش می یابد. در شکل 9-ب کرنش متوسط در امتداد ضخامت لوله نیز به صورت تابعی از زاویه گوشه نشان داده شده است که با افزایش زاویه گوشه به صورت تقریباً خطی کاهش می یابد. شکل 9-ب اثر زاویه گوشه را بر شاخص ناهمگنی کرنش² که از تقسیم اختلاف بیشینه و کمینه کرنش بر کرنش متوسط روی ضخامت لوله بدست می آید، نشان می دهد. همان طور که مشخص است، کمترین مقدار ناهمگنی در زاویه گوشه 10 درجه ایجاد می شود و پس از آن با افزایش زاویه گوشه، ناهمگنی کرنش افزایش می یابد.

4-1-4- تاثیر نسبت تغییر شکل³ ($\varphi_1=\varphi_2=170^\circ, \psi_1=\psi_2=0^\circ$)

جهت بررسی تاثیر نسبت تغییر شکل، پارامتر $K=R_2-R_1$ تعریف شده است. مقادیر مختلف K به صورت مضاربی از ضخامت (t) و به اندازه $0.0/8t, 0.0/6t, 0.0/4t, 0.0/2t$ و $1/4t$ در شبیه سازی اعمال گردید. تاثیر نسبت تغییر شکل بر روی کرنش پلاستیک در امتداد ضخامت لوله پس از یک پاس فرآیند CFS در شکل 10-الف نشان داده شده است. همانطور که با توجه به رابطه (2) انتظار می رفت، با افزایش مقدار K ، کرنش پلاستیک در امتداد ضخامت لوله افزایش می یابد. احتمالاً با افزایش مقدار K و تغییر نسبت شعاع های R_1 و R_2 ، بخشی از کرنش پلاستیک معادل که از کرنش عمودی ناشی می شود، افزایش می یابد [13]. شکل 10-ب نیز اثر پارامتر K بر متوسط کرنش پلاستیک و شاخص ناهمگنی کرنش را نشان می دهد. با افزایش مقدار K ، متوسط کرنش پلاستیک تقریباً به صورت خطی افزایش می یابد در صورتی که شاخص ناهمگنی کرنش با روندی نامشخص افزایش یافته است. به طور کلی می توان کمترین ناهمگنی کرنش را در نسبت تغییر شکل کمتر از $0.0/8t$ مشاهده کرد.

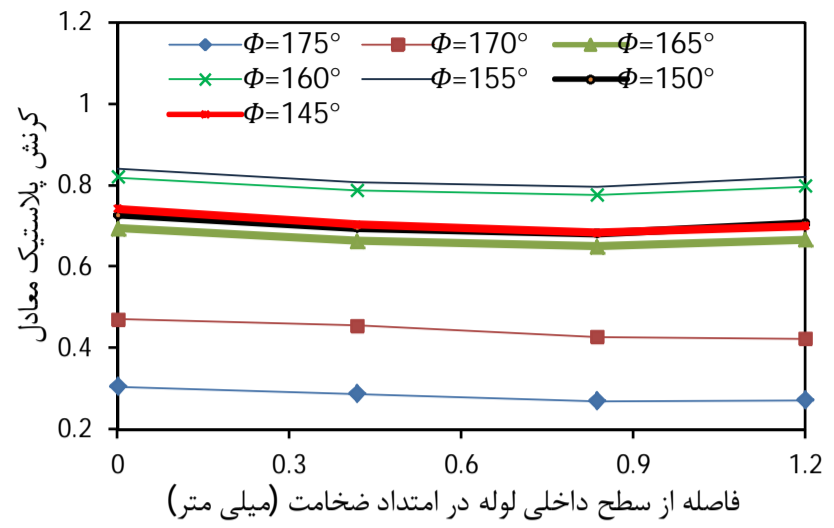


(الف)

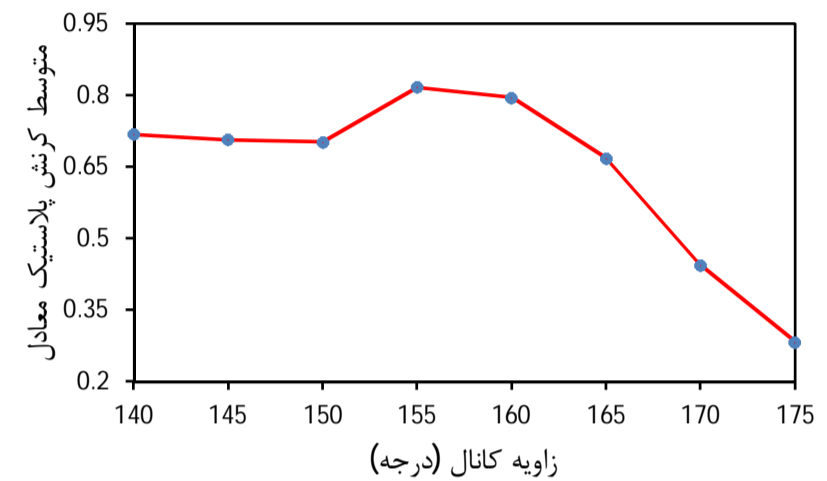


(ب)

شکل 9 الف- اثر زاویه گوشه بر روی توزیع کرنش پلاستیک ب- اثر زاویه گوشه بر روی متوسط کرنش پلاستیک و شاخص ناهمگنی کرنش



(الف)



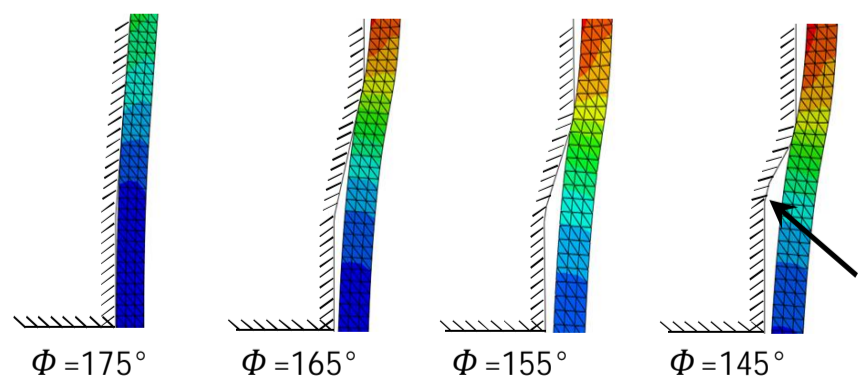
(ب)

شکل 7 الف - اثر زاویه کانال بر روی توزیع کرنش پلاستیک ب- اثر زاویه گوشه بر روی متوسط کرنش پلاستیک و شاخص ناهمگنی کرنش

چگونگی تماس بین لوله و قالب توجه کرد. شکل 8 تماس بین قالب و سنبه افزایش قطر در زوایای کانال مختلف را نشان می دهد. همانطور که مشهود است در زوایای کانال کوچکتر از 155 درجه، بین سنبه و لوله فاصله زیادی ایجاد می شود (پیکان سیاه) و تنها بخشی از کرنش پلاستیکی که از رابطه (2) بدست می آید، به لوله اعمال می شود. بنابراین کرنش پلاستیک معادل در زوایای کمتر از 155 کاهش می یابد و دیگر با روند مشخصی تغییر نخواهد کرد. نقص در اعمال کرنش پلاستیک در زوایای کانال پایین به علت عدم وجود فشار هیدروستاتیک بر سطح بیرونی لوله در روش CFS رخ می دهد، از این رو روش CFS برای زوایای کانال بیشتر از 155 درجه کاربرد دارد.

3-1-4- تاثیر زاویه گوشه¹ ($\varphi_1=\varphi_2=170, K=t, \psi=\psi_1=\psi_2$)

شکل 9-الف توزیع کرنش پلاستیک معادل پس از یک پاس را در امتداد ضخامت لوله در زوایای گوشه مختلف نشان می دهد. همان طور که مشهود



شکل 8 تماس بین سنبه افزایش قطر و لوله در زوایای کانال مختلف

2- Strain Inhomogeneity Index (SII)
3- deformation ratio (K)

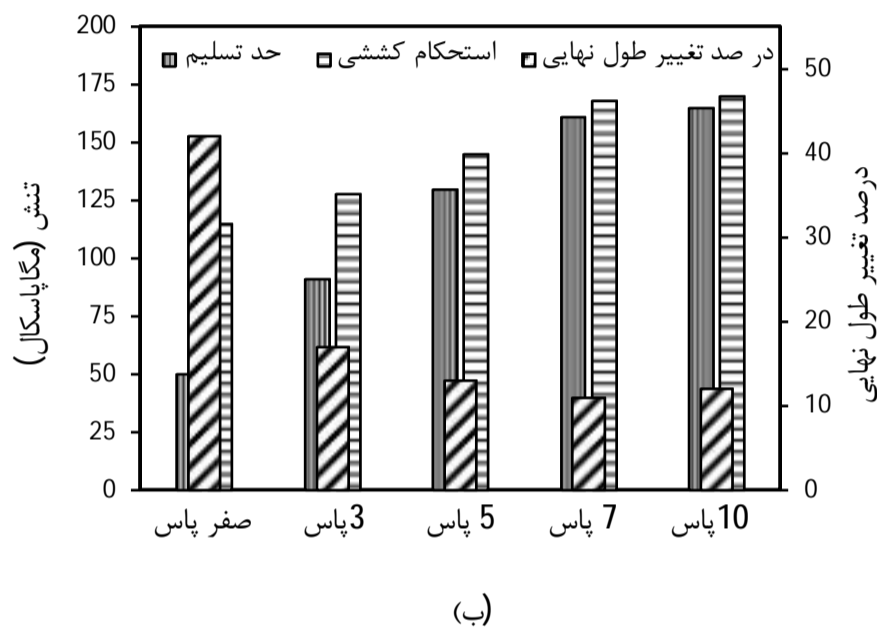
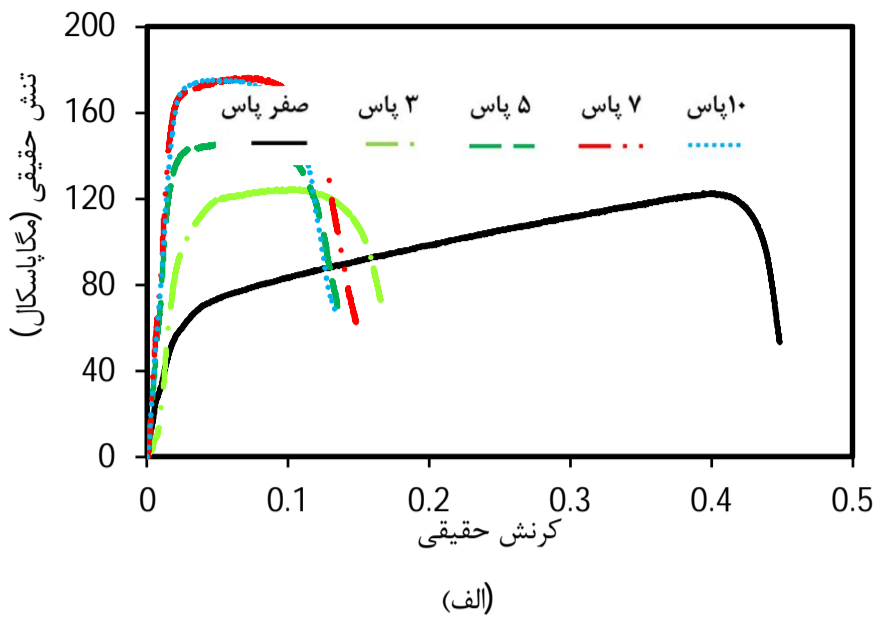
1- curvature angle (ψ)

2-4- خواص مکانیکی

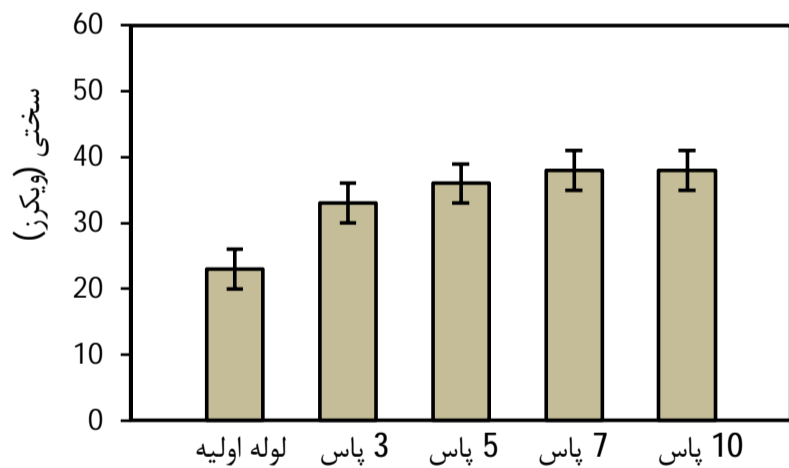
شکل 11-الف نشانگر نمودارهای تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمون کشش در دمای اتاق و پس از انجام پاس های مختلف فرآیند CFS می باشد. نتایج استخراجی از این نمودارها برای مقادیر حد تسلیم، استحکام کششی و درصد تغییر طول نهایی در شکل 11-ب نشان داده شده است.

حد تسلیم (در کرنش 0/2 درصد) قبل از انجام فرآیند CFS، 50 مگاپاسکال بوده است که پس از انجام سه، پنج، هفت و ده پاس به ترتیب تا مقادیر 91، 135، 160 و 165 مگاپاسکال افزایش یافته است. مانند سایر روش های SPD، کاهش اندازه دانه ها و افزایش چگالی نابجایی ها سبب افزایش حد تسلیم و استحکام کششی خواهد شد [14]. از طرف دیگر پس از انجام سه پاس، مقدار درصد تغییر طول نهایی از مقدار 42 درصد در حالت اولیه به مقدار 14 درصد رسیده است. افزایش استحکام ماده کاهش تغییر طول نهایی را به دنبال دارد. در نهایت پس از انجام ده پاس فرآیند CFS، می توان به حد تسلیم 165 مگاپاسکال و استحکام کششی 173 مگاپاسکال دست یافت که نسبت به حالت اولیه لوله به ترتیب 230% و 47% افزایش داشته اند.

آزمون میکروسختی ویکرز¹ در مقطع عرضی لوله به صورت میانگینی از پنج نقطه انجام شد. مقادیر مختلف سختی در لوله ها پس از انجام تعداد پاس های متفاوت در شکل 12 مشهود است. افزایش قابل توجهی در مقدار سختی ویکرز پس از انجام سه پاس ایجاد شده است به طوری که سختی از 23 ویکرز در حالت اولیه به 33 ویکرز می رسد. البته این نرخ افزایش سختی در پاس های بعدی کاهش می یابد تا در نهایت پس از ده پاس، سختی لوله به 38 ویکرز می رسد. افزایش استحکام و سختی لوله ها در تعداد



شکل 11 الف- نمودارهای تنش-کرنش حقیقی پس از پاس های مختلف فرآیند افزایش و کاهش تناوبی قطر ب- حد تسلیم، استحکام کششی و درصد تغییر طول نهایی در پاس های مختلف

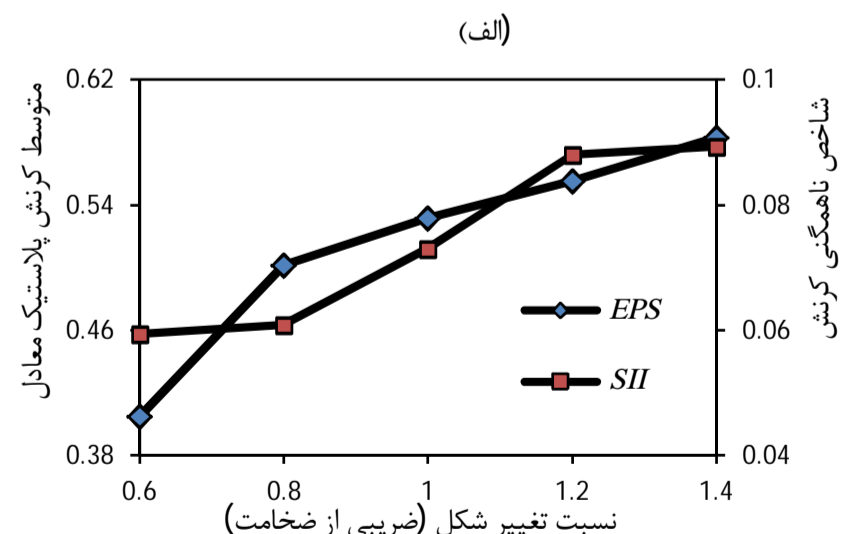
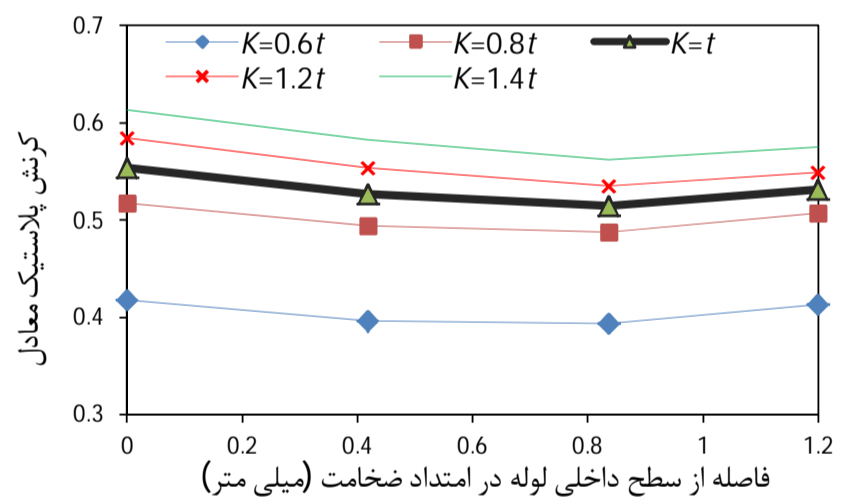


شکل 12 مقدار سختی لوله پس از تعداد پاس های مختلف

پاس های بالاتر به علت بهبود دانه بندی و کاهش اندازه دانه های ماده است [15].

5- نتیجه گیری

در این مقاله روش جدید تغییر شکل پلاستیک شدید با عنوان افزایش و کاهش تناوبی قطر برای تولید لوله های ریزدانه معرفی گردید. روش ابداعی با موفقیت بر روی لوله از جنس آلومینیوم 1050 تا ده پاس انجام گرفت. خواص مکانیکی لوله ها در اثر روش CFS به شکل چشمگیری بهبود پیدا کرد به صورتیکه حد تسلیم و استحکام کششی آلومینیوم 1050 به ترتیب تا



شکل 10 الف- اثر نسبت تغییر شکل بر روی توزیع کرنش پلاستیک ب- اثر نسبت تغییر شکل بر روی متوسط کرنش پلاستیک و شاخص ناهمگنی کرنش

1- Vickers microhardness test

- [3] L. S. Tóth, M. Arzaghi, J. J. Funderberger, B. Beausir, O. Bouaziz, R. Arruffat-Massion, Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting, *Scripta Materialia*, Vol. 60, No. 3, pp. 175-177, 2009.
- [4] M. S. Mohebbi, A. Akbarzadeh, Accumulative spin-bonding (ASB) as a novel SPD process for fabrication of nanostructured tubes, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 1, pp. 180-188, 2010.
- [5] A. Zangiabadi, M. Kazeminezhad, Development of a novel severe plastic deformation method for tubular materials: Tube Channel Pressing (TCP), *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 15, pp. 5066-5072, 2011.
- [6] G. Faraji, M. Mashhadi, A. Bushroa, A. Babaei, TEM analysis and determination of dislocation densities in nanostructured copper tube produced via parallel tubular channel angular pressing process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 563, pp. 193-198, 2013.
- [7] G. Faraji, M. M. Mashhadi, H. S. Kim, Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes, *Materials Letters*, Vol. 65, No. 19, pp. 3009-3012, 2011.
- [8] G. Faraji, A. Babaei, M. M. Mashhadi, K. Abrinia, Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes, *Materials Letters*, Vol. 77, No. 0, pp. 82-85, 2012.
- [9] A. Babaei, M. M. Mashhadi, H. Jafarzadeh, Tube Cyclic Extrusion-Compression (TCEC) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 598, No. 0, pp. 1-6, 2014.
- [10] A. Babaei, M. M. Mashhadi, H. Jafarzadeh, Tube cyclic expansion-extrusion (TCEE) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes, *Journal of Materials Science*, Vol. 49, No. 8, pp. 3158-3165, 2014/04/01, 2014. English
- [11] H. Jafarzadeh, K. Abrinia, Fabrication of ultra-fine grained aluminium tubes by RTES technique, *Materials Characterization*, Vol. 102, No. 0, pp. 1-8, 2015.
- [12] M. Kamachi, M. Furukawa, Z. Horita, T. G. Langdon, Equal-channel angular pressing using plate samples, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 361, No. 1-2, pp. 258-266, 11/25/, 2003.
- [13] G. Faraji, M. Mousavi Mashhadia, Plastic deformation analysis in parallel tubular channel angular pressing (PTCAP), *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol. 1, No. 4, pp. 23-32, 2013.
- [14] K. Máthys, J. Gubicza, N. H. Nam, Microstructure and mechanical behavior of AZ91 Mg alloy processed by equal channel angular pressing, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 394, No. 1-2, pp. 194-199, 2005.
- [15] R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Materials Science*, Vol. 45, No. 2, pp. 103-189, 2000.

مقادیر 165 و 173 مگاپاسکال افزایش یافت. مقدار سختی لوله از 23 ویکرز در حالت اولیه پس از انجام ده پاس به 38 ویکرز رسید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزا محدود روش CFS به صورت زیر بدست آمد:

- در زوایای کانال کمتر از 155 درجه به علت عدم وجود فشار هیدروستاتیک بر سطح بیرونی لوله، اعمال کرنش پلاستیک به صورت ناقص رخ می‌دهد. از این رو روش CFS برای زوایای کانال بالای 155 درجه کاربرد دارد.
- کرنش پلاستیک معادل با افزایش زاویه گوشه، به صورت تقریباً خطی کاهش می‌یابد و کمترین مقدار ناهمگنی در زاویه گوشه 10 درجه ایجاد می‌شود.
- با افزایش مقدار K ، کرنش پلاستیک معادل افزایش می‌یابد و کمترین ناهمگنی کرنش در نسبت تغییر شکل کمتر از $0/8t$ رخ می‌دهد.
- مقدار بازه تغییرات کرنش پلاستیک معادل در امتداد ضخامت لوله پس از انجام یک پاس فرآیند CFS برابر $0/03 \pm$ است که نشانگر همگنی خوب کرنش اعمالی در این روش است.
- بیشینه نیروی مورد نیاز در این روش 718 نیوتن برآورد شد که در مقایسه با روش‌های دیگر بسیار کمتر است.

6- مراجع

- [1] A. Babaei, G. Faraji, M. Mashhadi, M. Hamdi, Repetitive forging (RF) using inclined punches as a new bulk severe plastic deformation method, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 558, pp. 150-157, 2012.
- [2] A. S. Mohammadi, M. M. Mashhadi, G. Faraji, The effect of pass numbers over microstructure and mechanical properties of magnesium alloy of AZ31C in the tubular channel angular pressing (TCAP) at temperature of 300°C, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 126-130, 2015. (In Persian).