Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(8) (2021) 1115-1118
DOI: 10.22060/mej.2021.18754.6883

Theoretical Analysis of Equal Channel Angular Pressing Process by Upper Bound Method and Its Experimental Investigation in Condition of Circular Cross-Section Channel

R. Naseri[1*], M. Kadkhodayan[2], M. Shariati[2]

[1] Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran,
[2] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ABSTRACT: The equal channel angular pressing process is one of the most effective severe plastic deformation processes to produce ultrafine grained steels metals. Also, the upper bound theory is one of the reliable theoretical tools to forecast deformation strain and forming load. In this research, analysis of equal channel angular pressing technique in an arbitrary channel and corner angles using upper-bound theory was performed and a general and user-friendly equation for predicting the forming force is proposed according to the geometry of process and elastic-plastic properties of work-piece material. By comparing the amount of obtained theoretical load with experimental forming force resulted from applying process on 7075 Al alloy, has been observed very good agreement between the results. This guarantees the reliability of the achieved general equation for equal channel angular pressing force. According to the results of the present research, experimental and theoretical forming load of equal channel angular pressing process on this material under conditions of channel angle 135°, corner angle 20°, billet diameter 10 mm, and billet length 90 mm were obtained equal to 48 kN and 55.04 kN, respectively. Furthermore, by increasing the channel angle from 60 to 150 under a constant corner angle of 20°, process load is decreased equal to 41.3% from 86.4 kN to 50.7 kN. In addition, by increasing the corner angle from 0° to 40° under a constant channel angle of 135°, the negligible reduction of a load equal to 2.5% was observed from 56 kN to 54.6 kN.

Review History:

Received: Jul. 20, 2020
Revised: Jun. 30, 2021
Accepted: Jul. 03, 2021
Available Online: Jul. 14, 2021

Keywords:

Equal channel angular pressing
Upper-bound theorem
Elastic-plastic properties
Forming load

1. INTRODUCTION

The Equal Channel Angular Pressing (ECAP) process is one of the most important and effective processes of Severe Plastic Deformation (SPD) processes for producing ultrafine or nano grained structures and consequently enhancement of static and dynamic mechanical properties of pure and alloy metals. In this process, high strains are introduced to the workpiece due to the existence of shear stress in the deformation region [1]. In a forming process to optimization of die design, determination of required load and applied strain prior to performing of the process is very essential. Nowadays, analytical and numerical methods are generally used to predict these parameters in a forming process. Upper-bound theorem as an analytical method is one of the most conventional, accessible, and reliable techniques for forecasting load and strain [2, 3].

Literature review shows that most researches have focused on utilize of the upper bound method in the ECAP process with square and circular cross-section channels and under the angle of 90 degrees [4, 5]. It is clear that the use of the upper bound method in investigating of deformation and forming load of ECAP with a circular cross-section with an arbitrary or general channel angle has been neglected. In this regard, the use of this method in the analysis of the ECAP process with a circular cross-section and at arbitrary geometric angles is innovative. Hence, there is a need to achieve a comprehensive and user-friendly equation for forecasting of forming load and this equation was obtained in this research. Furthermore, the experimental test has been performed for validation of this obtained theoretical relationship.

2. Methodology

2.1. Analysis of deformation

The understanding of the geometry of the deformation zone and the velocity discontinuity surfaces of material are the most important matters in analyzing the deformation in forming processes. In this research, based on these items, the development and extension of relationships obtained by Paydar et al [5] were used for the analysis of deformation in the ECAP process with arbitrary channel angle. Hence, the required force (F) and pressure (P) were obtained according to Eq. (1) and Eq. (2):

*Corresponding author's email: rnaseri@tvu.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

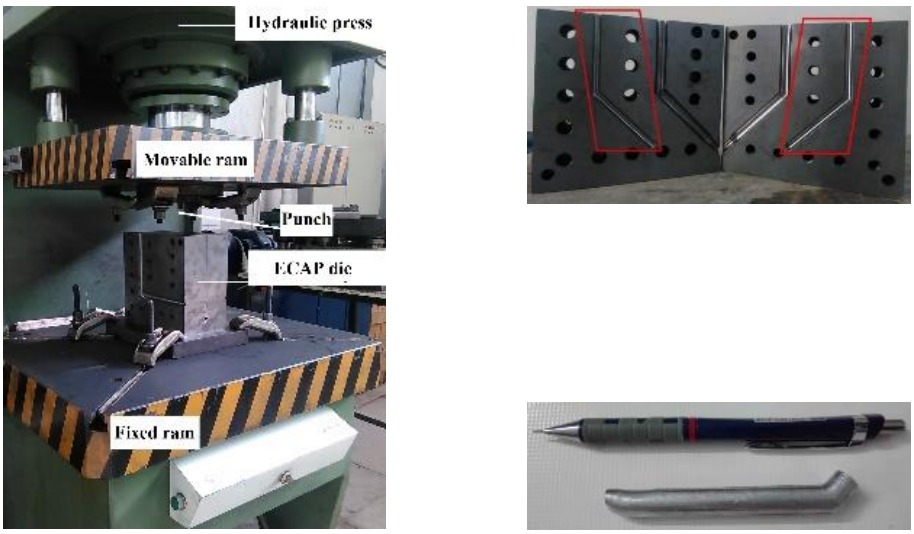


Fig. 1. The real view of (a) set-up of process and (b) ECAP die and used channel with an angle of 135 degrees, corner angle of 20 degrees, and diameter of 10 mm (shown in the red box)

Table 1. Strain-hardening properties of annealed Al-7075

Annealed metal	Strain hardening $\sigma = c\,\varepsilon^n$		Mean shear stress (MPa)
	c (MPa)	n	$\bar{k}$
Al-7075	592.99	0.2133	169.836
True strain		True stress (MPa)	
Yield	Ultimate	Yield	Ultimate
ε_Y	ε_U	σ_Y	σ_U
0.004108	0.082505	191.737	317.667

Table 2: Input and output parameters and how to obtain them in the determination of forming force

Input parameters								
φ	ψ	a	L	m	c	n	ε_Y	ε_U
Die and work-piece geometry				*	Uniaxial tensile test			
Output parameters								
l			$\bar{k}$		$\bar{\sigma}_Y$		F	
$l = L - 2a$			Eq. (4)		Eq. (3)		Eq. (1)	

*1- Ring compression test, 2- Finite element simulation of ring compression test and using the calibration curve [7, 8]

$$F = \pi a^2 \bar{k}\left[\begin{array}{l}\psi + 2\cot\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \frac{4m}{\pi}\psi\csc\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \\ 4m\cot\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \frac{2ml}{a}\end{array}\right] \quad (1)$$

$$P = \bar{k}\left[\begin{array}{l}\psi + 2\cot\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \frac{4m}{\pi}\psi\csc\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \\ 4m\cot\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \frac{2ml}{a}\end{array}\right] \quad (2)$$

2.2.Materials and experimental procedures

Al-7075 alloy was chosen as the material to apply ECAP. This material was machined as a rod with a length of 90 mm and an approximate diameter of 10 mm and then for annealing was inserted into a furnace at a temperature of 415 °C for one hour and then cooled in a closed furnace [6]. In addition, the elastic-plastic properties of the annealed metal before and after ECAP were obtained according to the ASTM E 8M-00.

To compare the forming load in ECAP in two methods of the experimental and bound theorem, one pass of ECAP was performed on the Al-7075 billet under diameter of 10 mm, die angle of 135°, corner angle of 20°, and ram speed of 9 mm/s. Fig. 1 demonstrates real views of ECAP die and setup and Also, the billet after applying one pass of ECAP under mentioned condition.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Mechanical properties

The true stress-strain diagram of annealed Al-7075 obtained from the uniaxial tensile test shows that the power equation σ=592.99 $\varepsilon^{0.2133}$ has been fitted on the strain-hardening region of the diagram. Amounts of strains in yield and ultimate points are 0.004108 and 0.082505, respectively. Using these values and the power relationship reported in the strain-hardening region, the mean shear yield stress ($\bar{k}$) according to the Eq. (3) and Eq. (4) and Table 1 was obtained equal to 169.8 MPa.

Therefore, by relationship obtained from the upper bound theorem, Eq. (1), and using the geometric properties of die and the mechanical properties of the billet material, the forming force can be calculated analytically and this value should be compared with the results of the experimental test for validation.

Table 3. Forming force in ECAP technique in experimental and upper-bound methods

ECAP	Channel angle	Corner angle	Channel diameter
	φ (°)	ψ (°)	$2a$ (mm)
	135	20	10
Billet length	Friction factor	Maximum load	
L (mm)	m	F (kN)	
		Analytical	Experimental
90	~ 0.1	55.04	48

By fitting the Holloman power equation ($\sigma = c\varepsilon^n$) to the strain-hardening region, with a coefficient (c) and power (n), the mean yield stress ($\bar{\sigma}_Y$) is obtained using Eq. (3), where, ε_Y and ε_U are yield and ultimate strains, respectively. Therefore, using von-Misses criteria, the mean shear yield stress ($\bar{k}$) is determined by Eq. (4) [4]:

$$\bar{\sigma}_Y = \frac{1}{\varepsilon_U - \varepsilon_Y}\int_{\varepsilon_Y}^{\varepsilon_U} c\,\varepsilon^n d\,\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_U - \varepsilon_Y}\frac{c}{n+1}\left(\varepsilon_U^{n+1} - \varepsilon_Y^{n+1}\right) \tag{3}$$

$$\bar{k} = \frac{\bar{\sigma}_Y}{\sqrt{3}} \tag{4}$$

3.2. Forming load analysis

The experimental tests show that the required forming load for one pass ECAP of under mentioned conditions was 48 kN. All input and output parameters and how to obtain them were presented in Table 2. According to the amounts of geometrical characterization of setup (Table 3) and mechanical properties of the material (Table 1) and also Eqs. (1), (3), and (4), the required force will be obtained equal to 55.04 kN using the upper-bound theorem.

s can be observed from comparing the amount of forming force obtained from analytical (55.04 kN) and experimental (48 kN) methods, there is a very good agreement between the results from the upper bound method and the real value, which means high reliability to Eq. (1) to predict the forming force in ECAP process. The greater amount of analytical force than the experimental one can also be attributed to the upstream prediction in the upper limit analytical method. The amount of analytical force is more than the experimental result, which can be attributed to properties of upper-bound analysis in predicting with a higher value.

4. CONCLUSIONS

The qualitative and quantitative results of the present study include the following:

· In this study, using the elastic-plastic properties of the work-piece material and the upper bound theory, a general, comprehensive, and user-friendly relationship was obtained to predict the amount of required force to apply the ECAP process with circular cross-section channel and also arbitrary die and corner angles.

· Comparison of ECAP forces obtained from upper-bound analytical method (55.04 kN) with the experimental result (48 kN) on the annealed Al-7075 alloy in channel angle of 135°, corner angle of 20°, billet length of 90 mm, and diameter of 10 mm, have demonstrated that it can be trusted to the relationship obtained in this study based on the upper-bound theorem analysis.

REFERENCES

[1] R. Naseri, M. Shariati, M. Kadkhodayan, Effect of work-piece cross section on the mechanical properties of commercially pure titanium produced by Equal Channel Angular Pressing, Modares Mechanical Engineering, 15(6) (2015) 157-166.

[2] K. Abrinia, M.J. Mirnia, A new generalized upper-bound solution for the ECAE process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 46(1-4) (2010) 411-421.

[3] F.R.F. Silva, N. Medeiros, L.P. Moreira, J.F.C. Lins, J.P. Gouvêa, Upper-bound and finite-element analyses of non-isothermal ECAP, Materials Science and Engineering A, 546 (2012) 180-188.

[4] A.R. Eivani, A. Karimi Taheri, An upper bound solution of ECAE process with outer curved corner, Journal of Materials Processing Technology, 182(1-3) (2007) 555-563.

[5] M.H. Paydar, M. Reihanian, R. Ebrahimi, T.A. Dean, M.M. Moshksar, An upper-bound approach for equal channel angular extrusion with circular cross-section, Journal of Materials Processing Technology, 198(1) (2008) 48-53.

[6] M.H. Shaeri, F. Djavanroodi, M. Sedighi, S. Ahmadi, M.T. Salehi, S.H. Seyyedein, Effect of copper tube casing on strain distribution and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing, Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 48(8) (2013) 512-521.

[7] F. Fereshteh Saniee, I. Pillinger, P. Hartley, Friction modelling for the physical simulation of the bulk metal forming processes, Journal of Materials Processing Technology, 153-154 (2004) 151-156.

[8] E.M. Mielnik, Metalworking science and engineering, 1st ed., McGraw-Hill College, 1991.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

R. Naseri, M. Kadkhodayan, M. Shariati, Theoretical Analysis of Equal Channel Angular Pressing Process by Upper Bound Method and Its Experimental Investigation in Condition of Circular Cross-Section Channel, Amirkabir J. Mech Eng., 53(8) (2021) 1115-1118.

DOI: 10.22060/mej.2021.18754.6883

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۸، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۷۲۹ تا ۴۷۴۴
DOI: 10.22060/mej.2021.18754.6883

تحلیل تئوری فرآیند ایکپ به روش کران بالا و بررسی تجربی آن در وضعیت مقطع دایروی کانال

رضا ناصری[1*]، مهران کدخدایان[2]، محمود شریعتی[2]

[1] گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران
[2] دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

خلاصه: فرآیند ایکپ، یکی از موثرترین فرآیندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید جهت تولید فلزات فوق ریزدانه است. نظریه کران بالا نیز یکی از ابزارهای تئوری قابل اعتماد جهت پیش‌بینی تغییرشکل کرنشی و نیروی شکل‌دهی می‌باشد. در این تحقیق، تحلیل روش ایکپ با استفاده از نظریه کران بالا در زاویه کانال و گوشه دلخواه انجام و رابطه‌ای کلی و کاربرپسند جهت پیش‌بینی نیروی شکل‌دهی، بر اساس هندسه فرآیند و خواص الاستیک-پلاستیک ماده پیشنهاد گردید. با مقایسه‌ی مقدار نیروی به دست آمده از رابطه تئوری با مقدار تجربی حاصل از اعمال فرآیند روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، انطباق مناسبی بین نتایج مشاهده شد که این مهم قابلیت اعتماد به این رابطه را برای نیروی ایکپ تضمین می‌کند. بر اساس نتایج تحقیق حاضر، در ایکپ این ماده در شرایط زاویه کانال، زاویه گوشه، قطر و طول بیلت به ترتیب برابر °۱۳۵، °۲۰، ۱۰ mm و ۹۰ mm میزان نیروی شکل‌دهی در دو حالت تجربی و تئوری به ترتیب برابر ۴۸ kN و ۵۵/۰۴ kN به دست آمد. همچنین با افزایش زاویه کانال از ۶۰ به ۱۵۰ درجه در زاویه گوشه ثابت ۲۰ درجه، میزان نیروی فرآیند با ٪ ۴۱/۳ کاهش از ۸۶/۴ kN به ۵۰/۷ kN تغییر یافت. با افزایش زاویه گوشه از صفر به ۴۰ درجه در زاویه کانال ثابت ۱۳۵ درجه نیز کاهشی قابل چشم پوشی به میزان ٪ ۲/۵ از ۵۶ kN به ۵۴/۶ kN مشاهده شد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۳۰
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۲۳

کلمات کلیدی:
فرآیند ایکپ
نظریه کران بالا
خواص الاستیک- پلاستیک
نیروی شکل‌دهی

۱- مقدمه

فرآیند ایکپ [1] یا پرسکاری در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار یکی از مهمترین و موثرترین فرآیندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید[2] جهت تولید ساختارهای فوق ریزدانه و حتی نانوساختار و در نتیجه ارتقای خواص مکانیکی در فلزات خالص و آلیاژی است [۱]. در فرآیند ایکپ، مشابه سایر فرآیندهای تغییرشکل پلاستیکی شدید، کرنش‌های بسیار بالای اعمالی در اثر برش ساده، منجر به افزایش چگالی نابجایی‌ها و در نتیجه آرایش مجدد آنها و تغییر ساختار دانه‌بندی شده [۲] و خواص استاتیکی [۳ و ۴] و دینامیکی- خستگی [۵] ماده‌ی فلزی بهبود می‌یابد. در این تکنیک شکل‌دهی، قطعه‌کار از میان دو کانال هم‌مقطع که تحت زاویه نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند، با نیروی پرس عبور داده می‌شود. از آنجا که سطح مقطع دو کانال با یکدیگر برابر است، امکان پرسکاری مجدد قطعه تحت عنوان گذر بعدی وجود دارد. با افزایش گذرهای شکل‌دهی، بر میزان کرنش وارده افزوده می‌شود. در محل تغییر زاویه‌ی کانال، دو زاویه موسوم به زاویه کانال (φ) و زاویه گوشه (ψ) وجود دارد که دیگر پارامترهای مؤثر بر میزان کرنش وارده بر قطعه‌کار می‌باشند. با توجه به تعداد گذرهای تکرار فرآیند (N)، میزان کرنش معادل (ε_{eq}) اعمالی بر قطعه‌کار با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود [۶]:

$$\varepsilon_{eq} = N/\sqrt{3}\left[2\cot\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right)+\psi\csc\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right)\right] \quad (۱)$$

در یک فرآیند شکل‌دهی، تعیین نیرو و کرنش اعمالی پیش

1 Equal Channel Angular Pressing (ECAP)
2 Severe Plastic Deformation (SPD)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rnaseri@tvu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

از انجام تجربی، جهت طراحی و بررسی میزان بهینه بودن فرآیند، ضروری است. امروزه برای پیش‌بینی میزان کرنش اعمالی و نیروی مورد نیاز در یک فرآیند شکل‌دهی، عموماً از دو روش تحلیلی و عددی استفاده می‌شود [۷]. تکنیک کران بالا[1] [۸] به عنوان روشی تحلیلی و روش اجزاء محدود [۹] به عنوان شیوه‌ای عددی، نمونه‌هایی از متداول‌ترین، در دسترس‌ترین و مطمئن‌ترین ابزارهای تعیین این پارامترها می‌باشند. ثابت شده است که این تکنیک‌ها از دقت کافی برخوردار بوده و انطباق مناسبی با نتایج تجربی نیروی شکل‌دهی [۱۰] و کرنش‌های تغییرشکل [۹] دارند. لازم به ذکر است که استفاده از روش کران بالا، محدود در یک فرآیند شکل‌دهی خاص نبوده و قابلیت تعمیم به سایر روش‌های شکل‌دهی را دارا می‌باشد [۱۱].

تاکنون مطالعات بسیاری بر پیش‌بینی نیروی شکل‌دهی در فرآیند ایکپ با استفاده از روش کران بالا انجام شده است. آلکُوتا و سِویلانُو دو روش کران بالا و اجزاء محدود را جهت بررسی کرنش و بار شکل‌دهی، در ایکپ با مقطع مربعی و زاویه کانال کلی مقایسه کردند [۱۲]. روش کران بالا در ایکپ با شعاع انحنای برابر در محل تغییر شکل، توسط پِرز مورد استفاده و پارامترهای نیرو و کرنش به دست آمده با نتایج اجزاء محدود مقایسه شد. در تحقیق مذکور از مقطع دایروی با زاویه کانال کلی استفاده گردید [۱۳]. آلتان و همکاران [۱۴] کرنش، نیرو و منطقه‌ی تغییر شکل ایکپ با مقطع مربعی و زاویه کانال ۹۰ درجه را به روش کران بالا مورد بررسی قرار دادند. یک تحلیل کران بالا در فرآیند ایکپ مربعی با زاویه کانال ۹۰ درجه و دارای زاویه گوشه، توسط اِیوانی و کریمی‌طاهری [۱۵] صورت گرفت و نیروی شکل‌دهی با نتایج تجربی مقایسه شد. فرآیند ایکپ مربعی با زاویه کانال ۹۰ درجه با روش کران بالا توسط پرز و لوری [۱۶] بررسی شد و بهینه‌سازی طراحی قالب روی آن صورت گرفت. پایدار و همکاران [۱۷] روش کران بالا را در تقریب نیروی شکل‌دهی ایکپ ۹۰ درجه دارای زاویه گوشه و با مقطع دایروی استفاده و نتایج را با مطالعات تجربی مقایسه کردند. ریحانیان و همکاران [۱۸] برای بررسی تغییرشکل و نیروی شکل‌دهی فرآیند ایکپ با استفاده از روش کران بالا، از میدان سرعت خطی و دورانی استفاده نمودند. طالبانپور و ابراهیمی [۱۹] روش کران بالا را روی فرآیند جدید ایکپ دو کاناله اعمال نموده و نیروی شکل‌دهی، کرنش و رفتار تغییرشکل را مورد بررسی قرار دادند. ابداع یک مدل بر اساس میدان سرعت سینماتیکی سه‌بعدی جدید در روش کران بالا برای پیش‌بینی کرنش و بار شکل‌دهی در فرآیند ایکپ با مقطع دایروی و زاویه کانال کلی، توسط ناروئی و کریمی‌طاهری [۲۰] انجام شد. پیش‌بینی شکل منطقه مرده تحت شرایط متغیر اصطکاکی به روش کران بالا در فرآیند ایکپ مربعی با زاویه کانال ۹۰ درجه، توسط ابری‌نیا و میرنیا [۸] صورت گرفت. فاشانو و همکاران [۲۱] نتایج کرنش اعمالی و بار وارده در ایکپ مربعی با زاویه کانال ۹۰ درجه و به دست آمده با روش کران بالا را با نتایج اجزاء محدود مقایسه کردند. سیلوا و همکاران [۷] اثر خواص ترمومکانیکی ماده را بر نیروی تغییرشکل فرآیند ایکپ مربعی با زاویه کانال ۹۰ درجه به دو روش کران بالا و شبیه‌سازی اجزاء محدود بررسی کردند. میدان کرنش و میزان بار شکل‌دهی در فرآیند ایکپ دایروی با زاویه کانال کلی، در حالت استفاده از قطعه‌کار دو فلزی با استفاده از روش کران بالا توسط ناروئی و کریمی‌طاهری [۲۲] مورد تحلیل واقع شد. لاپِتف و همکاران [۲۳] از روش کران بالا با مدل بلوک صلب برای تحلیل نیرو و تغییرشکل ایکپ مربعی با زاویه کانال ۹۰ درجه استفاده کردند. وِی و همکاران [۲۴] نیز روش کران بالا را در تحلیل شکل‌دهی فرآیند ایکپ T شکل مورد استفاده قرار دادند. در جدیدترین مطالعه، غفوریان نصرتی و همکاران [۲۵] تحلیل تئوری و عددی از گشتاور پیچشی مورد نیاز جهت انجام فرایند ایکپ-کانفرم[2] روی تیتانیم خالص تجاری را بر اساس اعمال روش کران بالا روی منطقه تغییرشکل ایکپ و ناحیه خم اولیه ارائه کردند.

مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد که عموم تحقیقات، بر استفاده از روش کران بالا در فرآیند ایکپ با مقطع مربعی و دایروی با زاویه کانال ۹۰ درجه معطوف شده‌اند. به وضوح مشخص است که استفاده از روش کران بالا در بررسی تغییرشکل و نیروی شکل‌دهی فرآیند ایکپ با مقطع دایروی با زاویه کانال دلخواه یا کلی، مغفول مانده است و از این حیث بررسی استفاده از روش کران بالا در تحلیل نیرویی فرآیند ایکپ با مقطع دایروی و در زوایای هندسی دلخواه دارای نوآوری می‌باشد. همانطور که از مروری بر منابع مشخص است نیاز به رابطه‌ای جامع با قابلیت استفاده آسان توسط کاربر وجود دارد. در تحقیق حاضر، پیش‌بینی نیروی مورد نیاز جهت شکل‌دهی فرآیند ایکپ با مقطع دایروی و هر زاویه کانال، با استفاده از روش کران بالا

1 Upper-bound technique

2 ECAP-Conform

صورت گرفته است و استفاده از رابطه‌ی کاربرپسند[1] نهایی با توضیح گام به گام پارامترهای مورد نیاز، تسهیل شده است. از آزمون تجربی نیز جهت صحت‌سنجی روابط تئوری استفاده گردیده است.

۲- تحلیل تغییرشکل

۲-۱- نظریه‌ی کران بالا در تغییرشکل پلاستیک

بر اساس قضیه‌ی کران بالا هر تخمینی از بار فروپاشی یک سازه، که با برابر در نظر گرفتن نرخ مصرف انرژی داخلی، با نرخ انجام کار نیروهای خارجی در الگوی تغییرشکل فرضی به دست آید، از بار واقعی بیشتر یا با آن برابر است [۲۶]. با توجه به این قضیه، روش کران بالا یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی میزان بار می‌باشد که برابر یا بزرگتر از بار مورد نیاز برای ایجاد شارش مومسان یا نیروی واقعی در فرآیندهای شکل‌دهی است [۱۷]. در این روش به تعادل تنش توجه نشده و بر ارضای یک معیار تسلیم و فرض انجام تغییرشکل پلاستیک در منطقه‌ی تغییرشکل به ازای تنش اعمالی بر ماده، تأکید می‌گردد [۲۶].

اصول، فرض‌ها و شرایط یک تحلیل کران بالا در موارد زیر خلاصه می‌شود [۲۶]:

• انرژی مصرفی داخلی در منطقه‌ی تغییرشکل بر اساس میدان سیلان داخلی و با استفاده از خواص مکانیکی ماده و حداکثر استحکام آن محاسبه می‌شود.

• با برابر قراردادن کار یا انرژی خارجی با انرژی مصرفی داخلی در منطقه‌ی تغییرشکل، نیروی مورد نیاز برای انجام تغییرشکل به دست می‌آید.

• ماده به صورت همگن و همسانگرد است.

• ماده تراکم‌ناپذیر است و حجم آن در تغییرشکل پلاستیکی ثابت باقی می‌ماند.

• فرض می‌شود در فصل مشترک ابزار- قطعه‌کار تنش برشی ثابت برقرار است.

• از آثار کرنش‌سختی و آهنگ کرنش بر تنش سیلان چشم‌پوشی می‌شود.

بر اساس این مدل، برای یک ماده‌ی فون میزز صلب- پلاستیک[2] از میان همه‌ی میدان‌های سرعت قابل قبول سینماتیکی، میدان سرعت حقیقی، معادله‌ی توان ارائه شده در معادله (۲) را کمینه می‌کند [۱۷]:

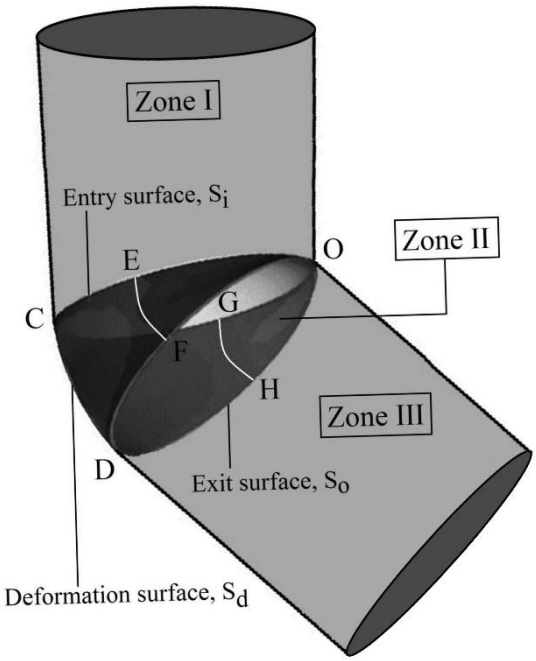
$$J = 2\bar{k}\int_V^0 \sqrt{\frac{1}{2}\,\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}\;dV + \int_{S_v}^0 \bar{k}\,\Delta v ds + \int_{S_f}^0 m\bar{k}\,\Delta v ds - \int_{S_t}^0 T_i v_i ds \quad (۲)$$

در این رابطه، J، توان مصرفی، $\bar{k}$، متوسط تنش تسلیم برشی، $\dot{\varepsilon}_{ij}$، مولفه‌های نرخ کرنش، m، عامل اصطکاک ثابت، V، حجم منطقه‌ی تغییرشکل پلاستیک، S_v، سطح ناپیوستگی سرعت، S_f، سطوح اصطکاکی، S_t، سطحی که ممکن است در آن ترکشن (بردار تنش) وجود داشته باشد، Δv، مقدار ناپیوستگی سرعت روی سطوح اصطکاکی و ناپیوستگی، v_i، سرعت اعمال شده روی سطح S_t و T_i، ترکشن‌های اعمال شده روی سطح S_t می‌باشند. جمله‌ی اول در این رابطه توان مصرفی در منطقه‌ی تغییرشکل را ارائه می‌دهد. جمله‌های دوم و سوم توان مصرف شده در طول سطوح ناپیوستگی سرعت و سطوح اصطکاکی را بیان می‌کنند. جمله‌ی آخر نیز توان ناشی از ترکشن‌های جسم را معرفی می‌کند [۱۷].

۲-۲- تحلیل تغییرشکل در فرآیند ایکپ

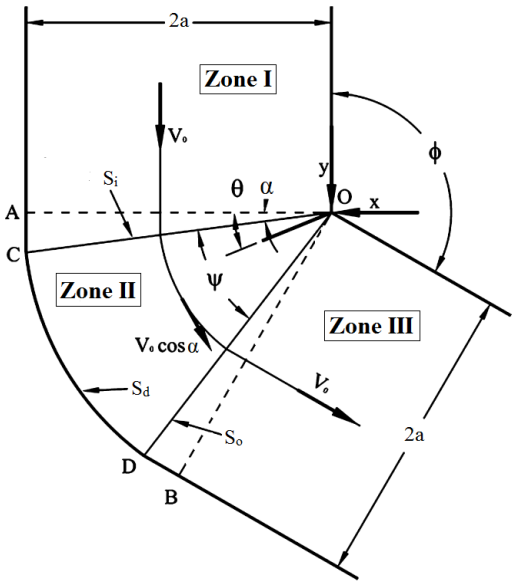
مهم‌ترین موضوع در تحلیل کران بالا، درک هندسه‌ی منطقه‌ی تغییرشکل و محل‌های ناپیوستگی مولفه‌ی سرعت ماده است. ناپیوستگی مولفه‌ی سرعت، زمانی اتفاق می‌افتد که جهت یا مقدار بردار سرعت در حین تغییرشکل، تغییر کند. در این تحقیق جهت تحلیل تغییرشکل در فرآیند ایکپ، از تعمیم و گسترش روابط به دست آمده توسط پایدار و همکاران [۱۷] استفاده شد تا تغییرشکل در زاویه کانال کلی غیر از ۹۰ درجه بررسی گردد. در شکل ۱ مدل تغییرشکل در قالب ایکپ با کانال‌های با سطح مقطع دایروی متقاطع در زاویه‌ی کانال φ و زاویه گوشه‌ی ψ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، حجم مورد تحلیل به سه منطقه‌ی I، II و III تقسیم شده است. در منطقه‌ی I و III ماده به صورت صلب با سرعت v_0 حرکت می‌کند. سطوح ناپیوستگی سرعت بیضی شکل Si و So، منطقه‌ی II را از مناطق I و III جدا می‌کند. Si و So به ترتیب بیانگر سطوح ورودی و خروجی از منطقه‌ی تغییرشکل II می‌باشند. سطح این دو بیضی با هم برابر و قطرهای بزرگ و کوچک آنها به ترتیب برابر $2a/\cos\alpha$ و $2a$ می‌باشد که a شعاع کانال و α زاویه‌ی ثابت بین سطح OA و سطح بیضوی Si و یا سطح OB

1 User friendly
2 Rigid-Plastic Von-Misses



شکل ۱. مدل تغییرشکل سه‌بعدی مورد استفاده در تحلیل کران بالای فرآیند ایکپ مقطع دایروی با قوس خارجی

Fig. 1. Three-dimensional deformation model utilized in the upper-bound analysis of ECAP process with circular cross-section and outer curve



شکل ۲. مدل تغییرشکل دوبعدی مورد استفاده در تحلیل کران بالای فرآیند ایکپ مقطع دایروی با قوس خارجی

Fig. 2. Two-dimensional deformation model utilized in the upper-bound analysis of ECAP process with circular cross-section and outer curve

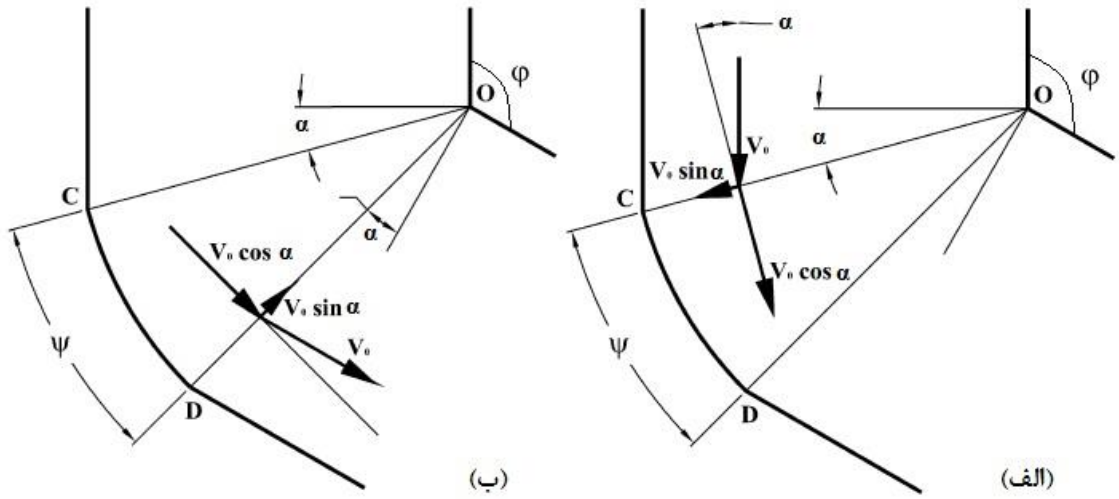
و سطح بیضوی So است. مدل تغییرشکل، زوایا، سطوح و مناطق، در شکل ۲ به خوبی نشان داده شده است. با توجه به این شکل، زاویه‌ی α توسط معادله (۳) بیان می‌گردد:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) \quad (۳)$$

فرض‌های مورد استفاده در محل تغییرشکل به شرح زیر است [۱۷]:

• منطقه‌ی تغییرشکل یا منطقه‌ی II، از دوران بیضی Si حول محور z در نقطه‌ی O از α تا $(\alpha + \psi)$ به دست می‌آید.

• در منطقه‌ی II ماده در امتداد دوایر هم‌مرکز به مرکز O حرکت می‌کند.



شکل ۳. ناپیوستگی سرعت روی سطوح (الف) ورودی و (ب) خروجی منطقه‌ی تغییرشکل

Fig. 3. Velocity discontinuities on the (a) entry and (b) exit surfaces of the deformation zone

با این فرض‌ها، ماده در مناطق I و III با سرعت ثابت v_0 و در منطقه‌ی II نیز با سرعت ثابت $v_0 \cos\alpha$ حرکت می‌کند. لذا در سطوح ورودی و خروجی Si و So منطقه‌ی تغییرشکل، ناپیوستگی سرعت وجود دارد. Sd نیز سطح جانبی منطقه‌ی تغییرشکل را که حاصل از دوران بیضی Si حول محور z در نقطه‌ی O است، را نشان می‌دهد. در مجاورت این سطح نیز مطابق با کلیه‌ی نقاط منطقه‌ی تغییرشکل، ماده با سرعت ثابت $v_0 \cos\alpha$ حرکت می‌کند. شکل ۳ ناپیوستگی سرعت را روی سطوح ورودی و خروجی Si و So نشان می‌دهد.

اگر r فاصله‌ی شعاعی از نقطه‌ی O، θ زاویه از خط OA و z محور عمود بر محورهای مختصات x و y، به سمت بیرون صفحه باشد، با استفاده از یک مختصات استوانه‌ای، میدان سرعت فرض شده در منطقه‌ی II به صورت معادله (۴) بیان می‌شود:

$$v_r = 0 \qquad v_\theta = v_0 \cos\alpha \qquad v_z = 0 \tag{۴}$$

بر اساس این میدان سرعت، تنها مولفه‌های نرخ کرنش در منطقه‌ی تغییرشکل، به شرح معادله (۵) است [۱۴ و ۱۷]:

$$\dot{\varepsilon}_{r\theta} = \dot{\varepsilon}_{\theta r} = -\frac{1}{2}\frac{v_0 \cos\alpha}{r} \tag{۵}$$

توان کل مصرفی در حین فرآیند ایکپ توسط معادله (۶) به دست می‌آید:

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_d + \dot{W}_{S_i} + \dot{W}_{S_o} + \dot{W}_{S_d} + \dot{W}_{S_{OAC}} + \dot{W}_{S_{OBD}} + \dot{W}_{S_l} \tag{۶}$$

در معادله (۶) هر جمله معرف موارد زیر هستند:

$\dot{W}_{total}$، توان کل مصرفی در فرآیند ایکپ

$\dot{W}_d$، توان مصرفی در منطقه‌ی تغییرشکل (منطقه‌ی II)

$\dot{W}_{S_i}$، توان مصرفی روی سطح ناپیوستگی سرعت ورودی Si

$\dot{W}_{S_o}$، توان مصرفی روی سطح ناپیوستگی سرعت خروجی So

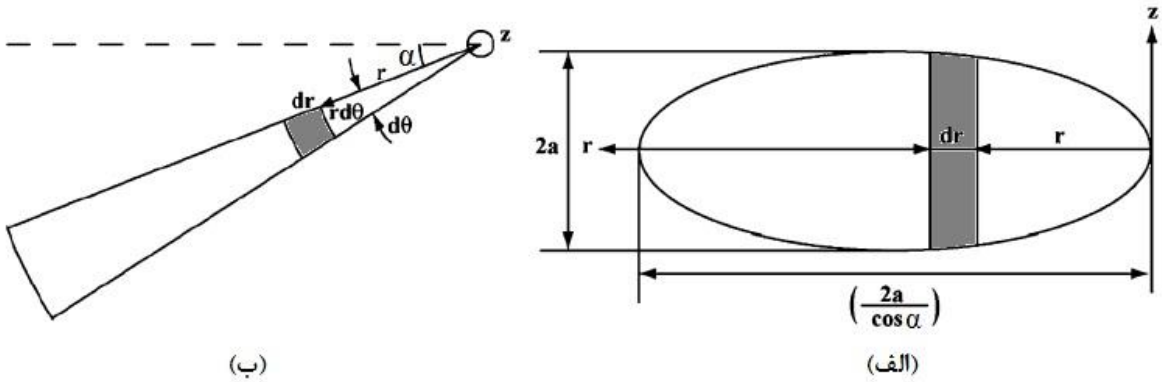
$\dot{W}_{S_d}$، توان مصرفی روی سطح جانبی منطقه‌ی تغییرشکل Sd

$\dot{W}_{S_{OAC}}$، توان مصرفی روی سطح جانبی نیم‌استوانه‌ی کانال ورودی S_{OAC}

$\dot{W}_{S_{OBD}}$، توان مصرفی روی سطح جانبی نیم‌استوانه‌ی کانال خروجی S_{OBD}

$\dot{W}_{S_l}$، توان مصرفی روی سطح جانبی دیواره‌ی کانال ورودی و خروجی

هریک از جمله‌های معادله‌ی توان کل مصرفی یعنی معادله (۶)، در ادامه با جزئیات و به تفصیل اثبات و ارائه خواهند شد. لذا با استفاده از روابط به دست آمده، توان مصرفی کل در حین فرآیند ایکپ در کانال با مقطع دایروی به صورت معادله (۷) به دست می‌آید:



شکل ۴. جزء حجمی در نظر گرفته شده در منطقه‌ی تغییرشکل، (الف) نمای بالایی و (ب) نمای جانبی

Fig. 4. Volume element considered in deformation zone, (a) top view and (b) side view

$$\dot{W}_{total} = \pi a^2 \bar{k} v_0 \begin{bmatrix} \psi + 2\cot\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \\ \frac{4m}{\pi}\psi\csc\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \\ 4m\cot\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \frac{2ml}{a} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

که l برابر مجموع طول لحظه‌ای بیلت در کانال ورودی قبل از نقطه‌ی A یعنی l_i و طول لحظه‌ای بیلت در کانال خروجی بعد از نقطه‌ی B یعنی l_o می‌باشد.

توان به کار گرفته شده جهت تغییرشکل ماده در فرآیند ایکپ، J ، به صورت معادله (۸) است:

$$J = F v_0 = \pi a^2 P v_0 \quad (۸)$$

که F و P به ترتیب بیشینه‌ی نیرو و فشار به کار گرفته شده در پرسکاری را نشان می‌دهند. همچنین a و v_0 به ترتیب برابر شعاع کانال دایروی و سرعت پرسکاری می‌باشند.

با برابر قرار دادن معادله (۷) و معادله (۸) یعنی $\dot{W}_{total} = J$، معادله (۹) و معادله (۱۰) برای بیشینه‌ی نیرو (F) و فشار (P) پرسکاری به دست می‌آید:

$$F = \pi a^2 \bar{k} \begin{bmatrix} \psi + 2\cot\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \\ \frac{4m}{\pi}\psi\csc\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \\ 4m\cot\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \frac{2ml}{a} \end{bmatrix} \quad (۹)$$

$$P = \bar{k} \begin{bmatrix} \psi + 2\cot\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \\ \frac{4m}{\pi}\psi\csc\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \\ 4m\cot\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) + \frac{2ml}{a} \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

۲-۳- مؤلفه‌های توان کل مصرفی در حین فرآیند ایکپ

(الف) توان مصرفی در منطقه‌ی تغییرشکل

شکل ۴ سطح بیضی ناپیوستگی Si و جزء حجمی در نظر گرفته شده در منطقه‌ی تغییرشکل را در دو نمای بالایی و جانبی نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن معادله‌ی هندسی حاکم بر بیضی افقی، رابطه‌ی بین r و z به صورت معادله (۱۱) به دست می‌آید:

$$z = \pm\sqrt{2ar\cos\alpha - r^2\cos^2\alpha} \quad (۱۱)$$

همچنین با انتخاب جزء مکعب مستطیل تغییرشکل، به طول $2z$ و سطح مقطع $rdrd\theta$، جزء حجمی می‌تواند به صورت معادله (۱۲) تعریف شود:

$$dV = 2zrdrd\theta \quad (۱۲)$$

بر اساس قضیه‌ی کران بالا، توان مصرفی در منطقه‌ی تغییرشکل یا به عبارتی توان داخلی، توسط معادله (۱۳) به دست می‌آید:

$$\dot{W}_d = 2\bar{k}\int_V^0 \sqrt{\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}\,dV \qquad \dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij} = 2\dot{\varepsilon}_{r\theta}{}^2 \quad (۱۳)$$

با استفاده از جمله‌ی اول معادله (۲) و همچنین معادلات (۳)، (۵) و (۱۱) الی (۱۳)، توان مصرفی در منطقه‌ی تغییرشکل یا توان داخلی ($\dot{W}_d$) به صورت معادله (۱۴) به دست می‌آید:

$$\dot{W}_d = 4\bar{k}\, v_0 \int_{\alpha}^{\alpha+\psi}\int_0^{2a/cos\alpha} cos\alpha\sqrt{2ar\cos\alpha - r^2cos^2\alpha}\, dr d\theta = \pi a^2 \bar{k}\, v_0 \psi \quad (۱۴)$$

(ب) توان مصرفی روی سطح ناپیوستگی سرعت ورودی و خروجی

مساحت سطوح ناپیوستگی سرعت Si و So برابر با مساحت یک بیضی با قطر بزرگ و کوچک به ترتیب برابر $۲a/\cos\alpha$ و $۲a$ می‌باشد. مقدار ناپیوستگی سرعت روی این سطوح برابر $v_0 \sin\alpha$ و مساحت بیضی برابر $\frac{\pi a^۲}{\cos\alpha}$ است. لذا توان مصرفی روی سطوح ناپیوستگی سرعت ورودی و خروجی به صورت معادله (۱۵) به دست می‌آید:

$$\dot{W}_{S_i} = \dot{W}_{S_o} = \int_{S_{Ellipse}}^{0} \bar{k}\,\Delta v ds = \pi a^2 \bar{k}\, v_0\, cot\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) \quad (۱۵)$$

(پ) توان مصرفی روی سطح جانبی منطقه‌ی تغییرشکل

مقدار ناپیوستگی سرعت روی سطح جانبی منطقه‌ی تغییرشکل برابر $v_0 \cos\alpha$ است. این سطح برابر سطح جانبی حجم تشکیل شده از دوران بیضی حول محور z در نقطه‌ی O می‌باشد که با مجموع سطوح تحت عناوین OECDF و OGCDH برابر است. جزء سطحی این سطح به صورت معادله (۱۶) بیان می‌شود:

$$ds = \psi\left(r\, sin^2\alpha + a\, cos\,\alpha\right) \quad (۱۶)$$

توان مصرفی ناشی از اصطکاک روی این سطح به صورت معادله (۱۷) تخمین زده می‌شود:

$$\dot{W}_{S_d} = \int_{S_d}^{0} m\bar{k}\,\Delta v ds = \int_0^{\frac{2a}{\cos\alpha}} m\bar{k} v_0 \psi cos\alpha\left(r sin^2\alpha + a cos\,\alpha\right) dr = 4m\bar{k}\, v_0\, a^2 \psi csc\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) \quad (۱۷)$$

(ت) توان مصرفی روی سطح جانبی نیم‌استوانه‌ی کانال ورودی و خروجی

نیم‌استوانه‌ی OAC در واقع استوانه‌ای است با قطر مقطع $۲a$ و ارتفاع AC که به صورت قطری برش داده شده است. مقدار AC برابر $\frac{۲a}{\cos\alpha}\sin\alpha$ می‌باشد، لذا سطح جانبی نیم‌استوانه برابر $۲\pi a^۲ \tan\alpha$ خواهد بود. با مقدار سرعت ناپیوستگی برابر v_0 در این ناحیه، مقدار توان مصرفی روی سطح جانبی نیم‌استوانه‌های مفروض به صورت معادله (۱۸) است:

$$\dot{W}_{S_{OAC}} = \dot{W}_{S_{OBD}} = \int_{S_{OAC}=S_{OBD}}^{0} m\bar{k}\,\Delta v ds = 2\pi a^2 m\bar{k} v_0 cot\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right) \quad (۱۸)$$

(ث) توان مصرفی روی سطح جانبی دیواره‌ی کانال ورودی و خروجی

سرعت ناپیوستگی در کانال‌های ورودی و خروجی v_0 می‌باشد. سطوح جانبی دیواره‌های کانال ورودی و خروجی به ترتیب برابر $۲\pi a l_i$ و $۲\pi a l_o$ است . با احتساب و جمع دو سطح مذکور، سطح جانبی دیواره‌ی کانال‌های ورودی و خروجی قبل و بعد از منطقه‌ی تغییرشکل برابر با $۲\pi a l$ خواهد بود. با درنظر گرفتن L به عنوان طول بیلت اولیه و a به عنوان شعاع مقطع کانال، مقدار l به صورت معادله (۱۹) می‌باشد:

$$l = l_i + l_o \cong \begin{cases} = L - 2a & \varphi = 90^\circ \\ \approx L - 2a & \varphi \neq 90^\circ \end{cases} \quad (۱۹)$$

لذا می‌توان مقدار توان مصرفی روی سطح جانبی دیواره‌ی کانال‌های ورودی و خروجی را به صورت معادله (۲۰) تعریف کرد:

$$\dot{W}_{S_l} = 2\pi a l m\bar{k} v_0 \quad (۲۰)$$

۲-۴- تعیین تنش تسلیم برشی متوسط

اگر بر منطقه‌ی کرنش‌سختی حاصل از آزمون کشش تک‌محوره که در آن تنش تسلیم لحظه‌ای در حال افزایش است، معادله‌ی توانی هولومان[1] ($\sigma = c\varepsilon^n$) با ضریب و توان کرنش‌سختی به ترتیب c و n را منطبق کنیم، مقدار تنش تسلیم میانگین ($\bar{\sigma}_Y$) از معادله (۲۱)

1 Holloman power equation

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ (درصد وزنی)

Table 1. Chemical composition of Al-7075 alloy (% wt)

Mn	Cr	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Al
۰/۰۵	۰/۲۱	۰/۳۴	۰/۳۶	۱/۴۷	۲/۷۳	۵/۷۸	فلز پایه

به دست می‌آید [۱۵]:

$$\bar{\sigma}_Y = \frac{1}{\varepsilon_U - \varepsilon_Y}\int_{\varepsilon_Y}^{\varepsilon_U} c\varepsilon^n d\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_U - \varepsilon_Y}\frac{c}{n+1}\left(\varepsilon_U^{n+1} - \varepsilon_Y^{n+1}\right) \quad (۲۱)$$

که در آن ε_Y و ε_U به ترتیب بیانگر کرنش تسلیم و نهایی حاصل از آزمون کشش تک‌محوره می‌باشد. لذا با استفاده از معیار فون میزز، مقدار تنش تسلیم برشی متوسط به صورت معادله (۲۲) تعیین می‌گردد [۱۵]:

$$\bar{k} = \frac{\bar{\sigma}_Y}{\sqrt{3}} \quad (۲۲)$$

۳- مواد و فرآیندهای تجربی

۳-۱- ماده

ماده‌ی مورد استفاده جهت اعمال فرآیند ایکپ از نوع آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ انتخاب شد. ترکیب شیمیایی این ماده که با استفاده از روش اسپکترومتری نشری به دست آمده است، به صورت درصد وزنی در جدول ۱ ارائه شده است. این ماده جهت اعمال فرآیند ایکپ به صورت میله‌گرد با طول ۹۰ mm و قطر تقریبی ۱۰ mm تراشکاری شد و سپس جهت فرآیند آنیل به مدت یک ساعت در دمای حدود ۴۱۵ °C در کوره قرار گرفت و پس از آن در داخل کوره خاموش دربسته سرد گردید [۲۷].

جهت بررسی خواص الاستیک- پلاستیک ماده‌ی مورد استفاده، نمونه‌های آنیل شده بر اساس استاندارد ASTM E ۸M−۰۰ به صورت دمبلی‌شکل تراشکاری و با نرخ کرنش $۰/۰۰۱\ s^{-1}$ [۲۷] توسط دستگاه کشش تک‌محوره‌ی زوئیک[1] با سه تکرار تحت آزمون کشش قرار گرفت.

۳-۲- فرآیند ایکپ

جهت مقایسه‌ی نیروی آزمایشگاهی شکل‌دهی به روش ایکپ با نیروی به دست آمده از نظریه‌ی کران بالا، بیلت از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده با طول ۹۰ mm و قطر تقریبی ۱۰ mm تحت یک گذر ایکپ با زاویه کانال و گوشه‌ی به ترتیب برابر ۱۳۵ و ۲۰ درجه و با سرعت فک ۹ mm/s قرار گرفت. شکل ۵ نمایی واقعی از پیکربندی فرآیند (الف) و قالب (ب) و شکل ۶ بیلت یک گذر ایکپ شده را نشان می‌دهد. جهت کاهش نیروی اصطکاک نیز از روانکار دی‌سولفیدمولیبدن[2] بین بیلت و جداره‌ی داخلی کانال استفاده شد. لازم به ذکر است که برای تعیین مقدار نیروی شکل‌دهی، از گیج فشار با دقت بالا استفاده و پس از ثبت تصویری تغییرات فشار گیج و بر اساس هندسه دقیق سطح مقطع سیلندرهای دستگاه پرس، مقادیر کالیبره شده‌ی نیروی شکل‌دهی با سه تکرار به دست آورده شد.

۴- تعیین عامل اصطکاک

در فرآیندهای شکل‌دهی جهت تعیین دقیق مقدار عامل اصطکاک، می‌توان از آزمون تجربی فشار حلقه[3] تحت روانکاری مشابه استفاده کرد [۲۸]. یک روش قابل اعتماد دیگر برای تخمین تقریبی فاکتور اصطکاک، استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود تست فشار حلقه و بهره‌گیری از منحنی کالیبراسیون است. در این روش از تغییرات ابعادی در ارتفاع و قطر داخلی حلقه استفاده کرده و میزان فاکتور اصطکاک تعیین می‌گردد [۲۹].

در پژوهش حاضر از نرم‌افزار شبیه‌ساز اجزاء محدود آباکوس[4] استفاده شد. حلقه با قطر خارجی، قطر داخلی و ارتفاع به ترتیب برابر ۲۴، ۱۲ و ۸ میلی‌متر و نسبت ابعادی (۶:۳:۲) معادل (ارتفاع: قطر داخلی: قطر خارجی) در نظر گرفته شد و خواص ماده آلومینیوم ۷۰۷۵ شامل چگالی ($۲۸۱۰\ kg/m^3$)، ضریب پوآسون (۰/۳۳)، مدول الاستیسیته (۷۱/۷ GPa) و خواص پلاستیک مطابق شکل ۹ به نرم‌افزار وارد گردید. جهت آزمون فشار حلقه، دو صفحه‌ی گرد صلب ثابت و متحرک با سرعت ۰/۰۷ mm/s [۲۹] به عنوان فک ثابت و

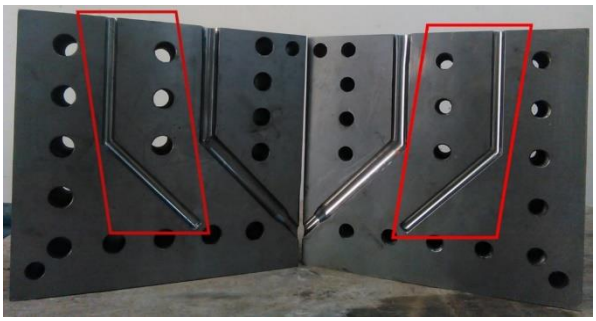
1 Zwick-Z 250

2 MoS_2

3 Ring compression test

4 Abaqus/CAE 6.12-1

(الف)



(ب)

شکل ۵. نمایی واقعی از (الف) پیکربندی فرآیند و (ب) قالب ایکپ و کانال مورد استفاده با زاویه کانال ۱۳۵ درجه، زاویه گوشه‌ی ۲۰ درجه و قطر ۱۰ mm (مشخص شده در کادر)

Fig. 5. The real view of (a) set-up of process and (b) ECAP die and used channel with angle of 135 degree, corner angle of 20 degree and diameter of 10 mm (shown in the red box)

شکل ۶. بیلت از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده بعد از اعمال یک گذر ایکپ ۱۳۵ درجه در کانال با قطر مقطع ۱۰ mm

Fig. 6. Al-7075 annealed billet after applying one pass of ECAP in channel angle of 135 degree and cross-section diameter of 10 mm

متحرک پرس به کار گرفته شد و تغییر ابعادی شعاع حلقه بعد از تغییر ارتفاع از ۸ mm به ۶ mm یعنی ٪۲۵ کاهش ارتفاع، ثبت گردید. نتایج نشان داد که مطابق شرایط روانکاری واقعی، با اعمال ضریب اصطکاک (m) برابر ۰/۱ [۹] به سطوح حلقه و صفحات، قطر داخلی متوسط حلقه از ۱۲ mm به ۱۳/۳۱۳ mm یعنی به میزان ٪ ۱۰/۹۴ افزایش یافته است. لازم به ذکر است که مش‌بندی حلقه از نوع هشت گره‌ای C۳D۸R و تعداد ۲۶۴۰ جزء یا المان و صفحات گرد از نوع چهار گره‌ای R۳D۳ و تعداد ۲۱۵۰ جزء انتخاب شد. اندازه یا تعداد مش در حلقه با استفاده از تکنیک حساسیت مش به صورت بهینه در نظر گرفته شده است. شکل ۷ نمای قبل و بعد از تغییرشکل در آزمون فشار حلقه را نشان می‌دهد.

بر اساس تغییرات ابعادی به دست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود، درصد کاهش ارتفاع برابر ٪۲۵ و درصد کاهش قطر داخلی برابر ٪۱۰/۹۴- می‌باشد. با استفاده از منحنی مرجع کالیبراسیون آزمون فشار حلقه برای نسبت ابعادی ۶:۳:۲ [۲۸ و ۳۰]، مقدار تقریبی فاکتور اصطکاک برابر با ۰/۱ به دست می‌آید. لازم به ذکر است که در منحنی کالیبراسیون مذکور، محل تلاقی مقادیر درصد کاهش ارتفاع و درصد کاهش قطر داخلی، تخمینی تقریبی از مقدار عامل اصطکاک را ارائه می‌کند.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- خواص مکانیکی

در شکل ۸ نمودار تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده‌ی حاصل از آزمون کشش تک‌محوره ارائه شده است. ۰/۰۰۴۱۰۸ و ۰/۰۸۲۵۰۵ مقادیر کرنش به ترتیب در نقطه‌ی تسلیم و نهایی می‌باشد. با استفاده از این مقادیر و رابطه‌ی توانی گزارش شده در منطقه‌ی کرنش‌سختی حقیقی، مقدار تنش تسلیم برشی متوسط ($\bar{k}$) بر اساس معادله (۲۱) و معادله (۲۲) مطابق جدول ۲ برابر با ۱۶۹/۸ MPa به دست می‌آید. با استفاده از مشخصات هندسی قالب و خواص مکانیکی ماده‌ی بیلت، می‌توان توسط رابطه‌ی نیروی به دست آمده از نظریه‌ی کران بالا یعنی معادله (۹)، نیروی شکل‌دهی را به دو روش آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه و رابطه‌ی تحلیلی نیرو را صحت‌سنجی کرد.

۵-۲- تحلیل نیرویی

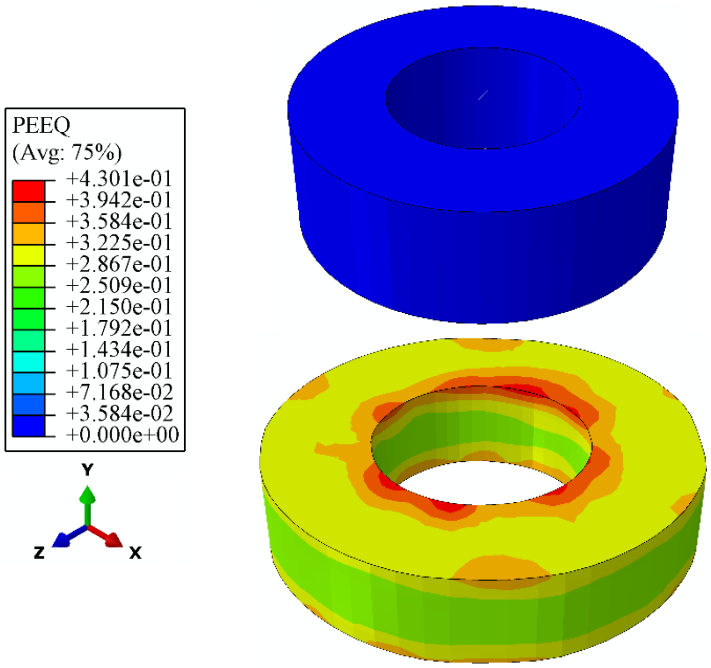
جهت صحت‌سنجی رابطه‌ی نیروی به دست آمده برای فرآیند ایکپ با مقطع دایروی و دارای زاویه‌ی گوشه، از مطالعات آزمایشگاهی استفاده شد. ابتدا بیلت از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده تحت فرآیند ایکپ در کانال ۱۳۵ درجه و زاویه گوشه‌ی ۲۰ درجه قرار گرفت و مقدار نیروی صرف شده جهت ایکپ به میزان ۴۸ kN ثبت شد.

در این تحقیق، معادله (۹) برای به دست آوردن نیروی شکل‌دهی به روش ایکپ با استفاده از روش کران بالا ارائه گردید. جهت تعیین نیروی شکل‌دهی در این فرآیند از نرم‌افزار محاسبات ریاضی وُلفرم مثمتیکا[1] استفاده شد. در جدول ۳، پارامترهای ورودی و خروجی و نحوه به دست آوردن آنها مشخص شده است. با اعمال تنش برشی میانگین آلومینیوم ۷۰۷۵، قطر بیلت، طول بیلت، زاویه‌ی کانال، زاویه‌ی گوشه و همچنین فاکتور اصطکاک به دست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود، مقدار نیروی مورد نیاز جهت شکل‌دهی در روش تحلیلی برابر ۵۵/۰۴ kN به دست آمد. خواص کرنش‌سختی آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده مورد استفاده در جدول ۲ و شرایط آزمایشگاهی و پارامترهای هندسی بیلت و ایکپ در جدول ۴ ارائه شده است.

همان‌طور که از مقایسه‌ی مقدار نیروی شکل‌دهی به دست آمده از روش تحلیلی (۵۵/۰۴ kN) و تجربی (۴۸ kN) می‌توان دریافت، انطباق بسیار مناسبی بین تحلیل نیرویی حاصل از نظریه‌ی کران بالا و حالت واقعی وجود دارد و این مهم به معنی قابلیت اطمینان بالا به معادله (۹) برای پیش‌بینی نیروی شکل‌دهی به روش ایکپ است. بیشتر بودن مقدار نیروی تحلیلی نسبت به تجربی را می‌توان به ذات پیش‌بینی بالادستی در روش تحلیلی کران بالا نسبت داد، به طوری که ٪۱۴/۷ اختلاف قابل اغماض بوده و نشان می‌دهد بار مورد نیاز با ضریب اطمینان مناسبی، بالاتر از مقدار واقعی است. این پیش‌بینی بالادستی می‌تواند در اطمینان‌بخشی به طراحی قالب و اعمال فرآیند، مفید باشد.

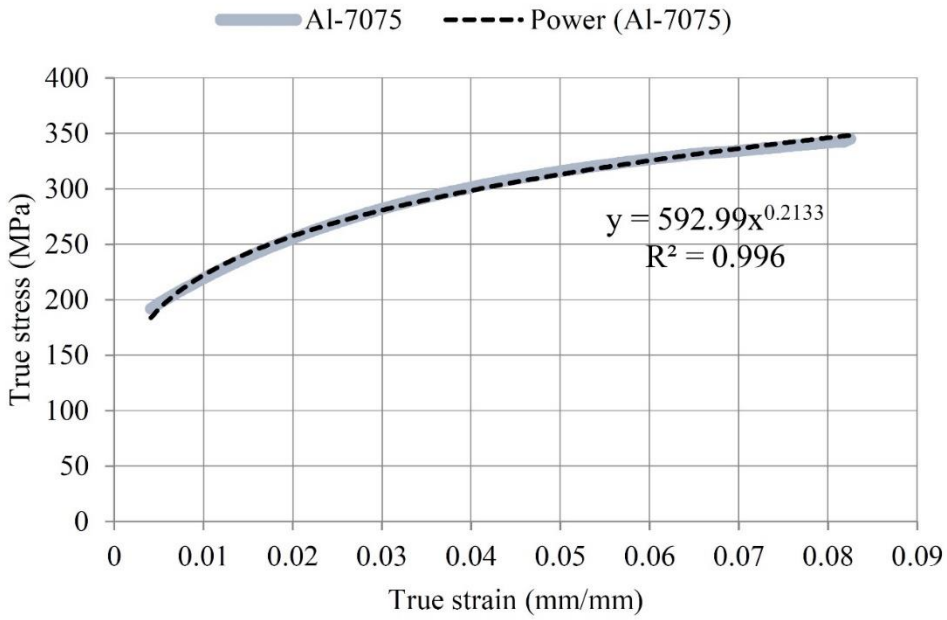
جهت صحت‌سنجی مجدد، از تحقیقات انجام شده در گذشته روی فرآیند ایکپ با مقطع دایروی و زاویه کانال ۹۰ درجه نیز استفاده شد [۱۷]. بدین منظور پارامترهای زاویه کانال (φ)، زاویه گوشه (

1 Wolfram Mathematica 9.0



شکل ۷. نمای گرافیکی از تغییر شکل و کرنش‌های وارده روی حلقه از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده، طی آزمون فشار در محیط شبیه‌ساز اجزاء محدود

Fig. 7. The graphical view of deformation and introduced strains on the Al-7075 annealed ring during the compression test in environment of finite element simulator



شکل ۸. نمودار تنش- کرنش حقیقی آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده در منطقه‌ی کرنش‌سختی

Fig. 8. True stress-strain diagram of annealed Al-7075 in strain-hardening region

ψ)، قطر بیلت ($2a$)، طول مؤثر بیلت (l)، عامل اصطکاک (m) و تنش سیلان متوسط ($\bar{\sigma}_Y$) به ترتیب برابر ۹۰ درجه، صفر درجه، ۱۰ میلی‌متر، ۳۰ میلی‌متر، ۰/۱۷ و ۱۰۰ مگاپاسکال در معادله (۹) قرار داده شد و مقدار نیروی شکل‌دهی برابر با ۲۱/۴ kN به دست آمد. نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در تحقیق مذکور نشان داد که مقدار نیروی واقعی مورد نیاز حدوداً برابر با ۲۲ kN است. انطباق بسیار

جدول ۲. خواص کرنش‌سختی آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده

Table 2. Strain-hardening properties of annealed Al-7075

ماده (آنیل شده)	کرنش‌سختی $\sigma = c\,\varepsilon^n$		کرنش حقیقی		تنش حقیقی (MPa)		تنش برشی میانگین (MPa)
			تسلیم	نهایی	تسلیم	نهایی	
	c (MPa)	n	ε_Y	ε_U	σ_Y	σ_U	$\bar{k}$
Al – ۷۰۷۵	۵۹۲/۹۹	۰/۲۱۳۳	۰/۰۰۴۱۰۸	۰/۰۸۲۵۰۵	۱۹۱/۷۳۷	۳۱۷/۶۶۷	۱۶۹/۸۳۶

جدول ۳. پارامترهای ورودی و خروجی و نحوه‌ی به دست آوردن آنها در تعیین نیروی شکل‌دهی

Table 3. Input and output parameters and how to obtain them in determination of forming force

پارامترهای ورودی								
φ	ψ	a	L	m	c	n	ε_Y	ε_U
هندسه قالب و قطعه‌کار				*	آزمون کشش تک‌محوره			
پارامترهای خروجی								
l			$\bar{k}$		$\bar{\sigma}_Y$		F	
$l = L - 2a$ معادله (۱۹)،			معادله (۲۲)		معادله (۲۱)		معادله (۹)	

* ۱- آزمون فشار حلقه، ۲- شبیه‌سازی آزمون فشار حلقه و استفاده از منحنی کالیبراسیون [۲۸ و ۳۰]

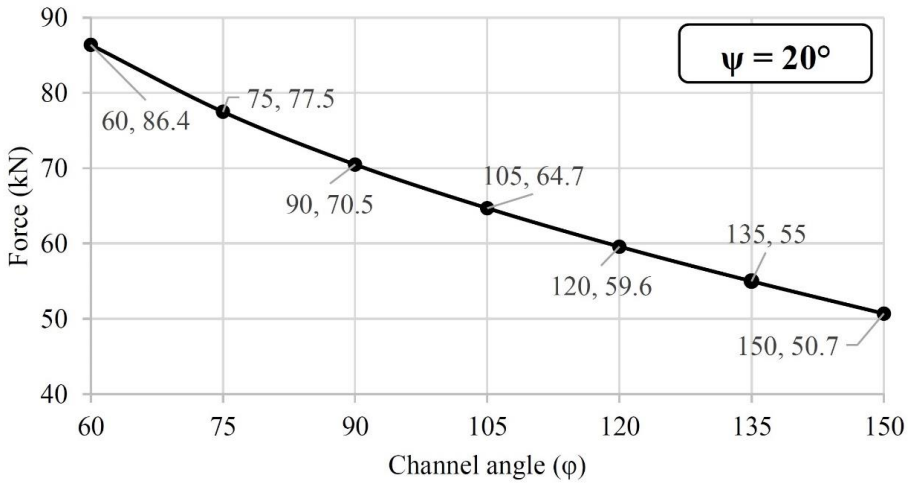
جدول ۴. نیروی شکل‌دهی به روش ایکپ در دو روش تجربی و نظریه‌ی کران بالا

Table 4. Forming force in ECAP technique in experimental and upper-bound methods

زاویه‌ی کانال	زاویه‌ی گوشه	قطر کانال	طول بیلت	عامل اصطکاک	نیروی بیشینه F (kN)	
					تحلیلی	تجربی
φ (°)	ψ (°)	$2a$ (mm)	L (mm)	m		
۱۳۵	۲۰	۱۰	۹۰	~ ۰/۱	۵۵/۰۴	۴۸

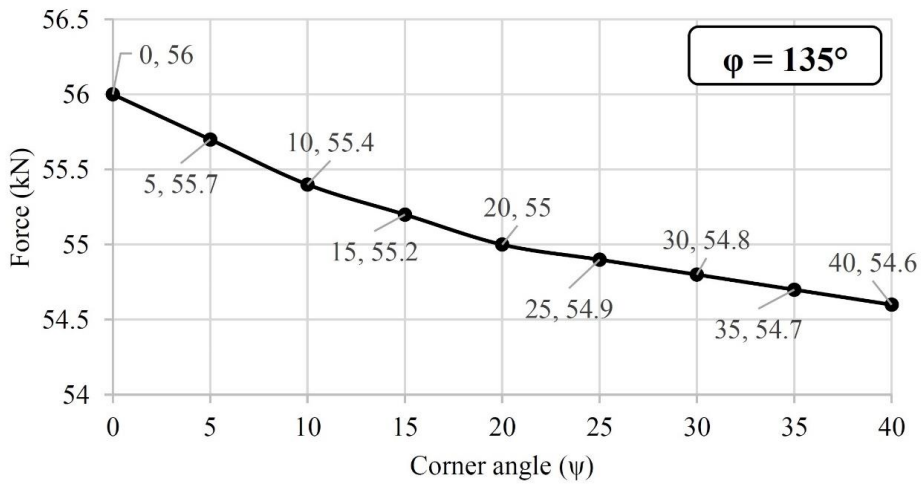
مناسبی بین نتایج تئوری و تجربی مشاهده می‌شود که حاکی از دقت بالای رابطه نیرویی به دست آمده است.

با استفاده از رابطه به دست آمده از روش کران بالا برای پیش‌بینی نیروی فرایند شکل‌دهی با مقطع دایروی، معادله (۹)، مقادیر نیروی مورد نیاز برای اعمال یک گذر فرایند ایکپ در زوایای گوناگون کانال (φ) و گوشه (ψ) و در شرایط قید شده به دست آورده شد. بدین منظور با ثابت نگه داشتن مقدار زاویه گوشه برابر با ۲۰ درجه و تغییر زاویه کانال از ۶۰ تا ۱۵۰ درجه، روند تغییر نیروی شکل‌دهی در شکل ۹ ثبت شد. همچنین با ثابت نگه داشتن مقدار زاویه کانال برابر با ۱۳۵ درجه و تغییر زاویه گوشه از ۰ تا ۴۰ درجه مقادیر نیروی شکل‌دهی مطابق شکل ۱۰ به دست آورده شد. همانطور که از نتایج مشخص است با افزایش زاویه کانال از ۶۰ تا ۱۵۰ درجه، مقدار نیرو از ۸۶/۴ kN به ۵۰/۷ kN یعنی به میزان ٪ ۴۱/۳ کاهش می‌یابد و با افزایش زاویه گوشه از ۰ تا ۴۰ درجه، نیروی شکل‌دهی از ۵۶ kN به ۵۴/۶ kN یعنی به میزان ٪ ۲/۵ می‌رسد. نتایج به وضوح نشان داد که با افزایش مقدار زوایای کانال و گوشه از میزان بار شکل‌دهی کاسته می‌شود ولی تأثیر زاویه کانال بر کاهش نیرو بسیار مشهودتر و چشمگیرتر از اثر زاویه گوشه است. این مهم به تأثیر بیشتر زاویه کانال در مقدار کرنش اعمالی بر اساس معادله (۱) وابسته است. در واقع در زاویه کانال کمتر با



شکل ۹. اثر زاویه کانال (φ) بر نیروی تئوری شکل‌دهی حاصل از روش تحلیلی کران بالا

Fig. 9. Effect of channel angle (φ) on the theoretical forming force obtained by upper-bound analytical method



شکل ۱۰. اثر زاویه گوشه (ψ) بر نیروی تئوری شکل‌دهی حاصل از روش تحلیلی کران بالا

Fig. 10. Effect of corner angle (ψ) on the theoretical forming force obtained by upper-bound analytical method

اعمال کرنش بزرگتر، نیروی بیشتری برای اعمال تنش برشی ساده و همچنین سیلان ماده نیاز می‌باشد [۶ و ۳۱].

۶- نتیجه‌گیری

نتایج کیفی و کمی تحقیق حاضر شامل موارد زیر است:

• تغییرشکل پلاستیکی شدید فلزات و آلیاژها طی فرآیند ایکپ با مقطع دایروی بسیار متداول است، لذا وجود رابطه‌ای کلی که بدون محدودیت در مقدار زاویه‌ی کانال و گوشه، پیش‌بینی مناسبی از بار وارده را به دست دهد بسیار ضروری است که طی این تحقیق رابطه‌ای کلی و تعمیم‌یافته برای نیروی شکل‌دهی به روش ایکپ به دست آمد و بر خلاف سایر روابط به دست آمده، از حیث درک پارامترها و کاربرد، یک رابطه‌ی تسهیل‌یافته و اصطلاحاً کاربرپسند است.

• در این تحقیق با استفاده از خواص الاستیک-پلاستیک ماده‌ی قطعه‌کار و نظریه‌ی کران بالا، رابطه‌ای برای پیش‌بینی مقدار نیروی مورد نیاز برای اعمال فرآیند ایکپ با کانال با سطح مقطع دایروی در هر زاویه کانال و گوشه، به دست آمد.

• مقایسه‌ی یک گذر نیروی شکل‌دهی به دست آمده از روش نظریه‌ی کران بالا (۵۵/۰۴ kN) با نتیجه‌ی تجربی (۴۸ kN) اعمال فرآیند ایکپ روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده در شرایط زاویه کانال ۱۳۵ درجه، زاویه گوشه ۲۰ درجه و طول و قطر بیلت به ترتیب برابر با ۹۰ و ۱۰ میلی‌متر نشان داده است که می‌توان به تحلیل نیرویی بر اساس این نظریه و رابطه‌ی به دست آمده در این تحقیق برای ایکپ با مقطع دایروی با زاویه‌ی کانال و گوشه‌ی دلخواه، اعتماد کرد.

• مشاهده شد که مقدار نیروی شکل‌دهی با استفاده از رابطه‌ی کران بالای به دست آمده (۵۵/۰۴ kN)، کمی از مقدار نیروی آزمایشگاهی (۴۸ kN) بالاتر است که با توجه به اساس پیش‌بینی بالادستی نظریه‌ی کران بالا، این مقادیر قابل قبول بوده و اعتماد به رابطه‌ی به دست آمده تضمین می‌گردد.

• بررسی اثر زوایای کانال در مقدار نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی با استفاده از رابطه‌ی تئوری به دست آمده نشان داد که با افزایش زوایای کانال از ۶۰ تا ۱۵۰ درجه در زاویه گوشه ثابت ۲۰ درجه، نیروی شکل‌دهی از ۸۶/۴ kN به ۵۰/۷ kN یعنی به میزان قابل توجه ٪ ۴۱/۳ کاهش می‌یابد. لذا نتیجه شد با کاهش زاویه کانال به دلیل افزایش کرنش وارده و کاهش سیلان ماده، نیروی مورد نیاز به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد.

• با افزایش زاویه گوشه از ۰ تا ۴۰ درجه نشان داده شد که در زاویه کانال ثابت ۱۳۵ درجه، نیروی شکل‌دهی با کاهش قابل اغماض ٪ ۲/۵ از ۵۶ kN به ۵۴/۶ kN رسیده است. لذا بر خلاف زاویه کانال، تأثیر زاویه گوشه در تغییر بار شکل‌دهی قابل چشمپوشی می‌باشد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

a: شعاع کانال دایروی

c: ضریب کرنش‌سختی هولومان

F: بیشینه‌ی نیرو

J: توان مصرفی

$\bar{k}$: متوسط تنش تسلیم برشی

l: مجموع طول لحظه‌ای بیلت در کانال ورودی و خروجی

l_i: طول لحظه‌ای بیلت در کانال ورودی

l_o: طول لحظه‌ای بیلت در کانال خروجی

L: طول اولیه بیلت

m: عامل اصطکاک ثابت

n: توان کرنش‌سختی هولومان

N: تعداد گذرهای تکرار فرآیند

P: بیشینه‌ی فشار

S_d: سطح جانبی منطقه‌ی تغییرشکل

S_f: سطوح اصطکاکی

S_i: سطح ورودی منطقه تغییرشکل

S_o: سطح خروجی منطقه تغییرشکل

S_t: سطح ترکشن

S_v: سطح ناپیوستگی سرعت

T_i: ترکشن‌های اعمال شده روی سطح S_t

V: حجم منطقه‌ی تغییرشکل پلاستیک

v_i: سرعت اعمال شده روی سطح S_t

v_0: سرعت حرکت ماده

Δv: مقدار ناپیوستگی سرعت روی سطوح اصطکاکی و ناپیوستگی

$\dot{W}_d$: توان مصرفی در منطقه‌ی تغییرشکل (منطقه‌ی II)

$\dot{W}_{S_d}$: توان مصرفی روی سطح جانبی منطقه‌ی تغییرشکل S_d

$\dot{W}_{S_i}$: توان مصرفی روی سطح ناپیوستگی سرعت ورودی S_i

$\dot{W}_{S_l}$: توان مصرفی روی سطح جانبی دیواره‌ی کانال ورودی و خروجی

$\dot{W}_{S_o}$: توان مصرفی روی سطح ناپیوستگی سرعت خروجی S_o

$\dot{W}_{S_{OAC}}$: توان مصرفی روی سطح جانبی نیم‌استوانه‌ی کانال ورودی S_{OAC}

$\dot{W}_{S_{OBD}}$: توان مصرفی روی سطح جانبی نیم‌استوانه‌ی کانال خروجی S_{OBD}

$\dot{W}_{total}$: توان کل مصرفی در فرآیند ایکپ

علائم یونانی

α: زاویه منطقه تغییرشکل

ε_U: کرنش نهایی

ε_Y: کرنش تسلیم

ε_{eq}: کرنش معادل

$\dot{\varepsilon}_{ij}$: مؤلفه‌های نرخ کرنش

σ_U: تنش نهایی

σ_Y: تنش تسلیم

$\bar{\sigma}_Y$: تنش تسلیم میانگین

φ: زاویه کانال

ψ: زاویه گوشه

مراجع

[1] R. Naseri, M. Shariati, M. Kadkhodayan, Effect of work-piece cross section on the mechanical properties of commercially pure titanium produced by Equal Channel Angular Pressing, Modares Mechanical Engineering, 15(6) (2015) 157-166.

[2] M. Ebrahimi, M.H. Shaeri, R. Naseri, C. Gode, Equal channel angular extrusion for tube configuration of Al-Zn-Mg-Cu alloy, Materials Science and Engineering A, 731 (2018) 569-576.

[3] R. Naseri, M. Kadkhodayan, M. Shariati, Static mechanical properties and ductility of biomedical ultrafine-grained commercially pure titanium produced by ECAP process, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 27(9) (2017) 1964-1975.

[4] R. Naseri, M. Kadkhodayan, M. Shariati, The investigation of springback of UFG commercially pure titanium in three-point bending test, Modares Mechanical Engineering, 16(11) (2017) 266-276.

[5] R. Naseri, H. Hiradfar, M. Shariati, M. Kadkhodayan, A comparison of axial fatigue strength of coarse and ultrafine grain commercially pure titanium produced by ECAP, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18(3) (2018) 755-767.

[6] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, J. Wang, T.G. Langdon, Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials, Scripta Materialia, 35(2) (1996) 143-146.

[7] F.R.F. Silva, N. Medeiros, L.P. Moreira, J.F.C. Lins, J.P. Gouvêa, Upper-bound and finite-element analyses of non-isothermal ECAP, Materials Science and Engineering A, 546 (2012) 180-188.

[8] K. Abrinia, M.J. Mirnia, A new generalized upper-bound solution for the ECAE process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 46(1-4) (2010) 411-421.

[9] R. Naseri, M. Kadkhodayan, M. Shariati, An experimental investigation of casing effect on mechanical properties of billet in ECAP process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 90(9-12) (2017) 3203-3216.

[10] F. Djavanroodi, H. Ahmadian, K. Koohkan, R. Naseri, Ultrasonic assisted-ECAP, Ultrasonics, 53(6) (2013) 1089-1096.

[11] I. Jalili, H. Yousefian, M. Sedighi, M. Kasaeian, Analytical solution for tube spinning process of metallic cone: The ideal work and upper bound method, Modares Mechanical Engineering, 18(8) (2018) 55-60.

[12] J. Alkorta, J.G. Sevillano, A comparison of FEM and upper-bound type analysis of equal-channel angular pressing (ECAP), Journal of Materials Processing Technology, 141(3) (2003) 313-318.

[13] C.J.L. Pérez, Upper bound analysis and FEM simulation of equal fillet radii angular pressing, Modelling Simulation in Materials Science Engineering, 12(2) (2004) 205-214.

[14] B.S. Altan, G. Purcek, I. Miskioglu, An upper-bound analysis for equal-channel angular extrusion, Journal of Materials Processing Technology, 168(1) (2005) 137-146.

[15] A.R. Eivani, A. Karimi Taheri, An upper bound solution of ECAE process with outer curved corner, Journal of Materials Processing Technology, 182(1-3) (2007) 555-563.

[16] C.J.L. Pérez, R. Luri, Study of the ECAE process by the upper bound method considering the correct die design, Mechanics of Materials, 40(8) (2008) 617-628.

[17] M.H. Paydar, M. Reihanian, R. Ebrahimi, T.A. Dean, M.M. Moshksar, An upper-bound approach for equal

channel angular extrusion with circular cross-section, Journal of Materials Processing Technology, 198(1) (2008) 48-53.

[18] M. Reihanian, R. Ebrahimi, M.M. Moshksar, Upper-bound analysis of equal channel angular extrusion using linear and rotational velocity fields, Materials Design, 30(1) (2009) 28-34.

[19] B. Talebanpour, R. Ebrahimi, Upper-bound analysis of dual equal channel lateral extrusion, Materials Design, 30(5) (2009) 1484-1489.

[20] K. Narooei, A. Karimi Taheri, A new model for prediction the strain field and extrusion pressure in ECAE process of circular cross section, Applied Mathematical Modelling, 34(7) (2010) 1901-1917.

[21] T.A. Fashanu, S.T. Adedokun, B.Y. Ogunmola, Finite element method and upper-bound type analysis of equal channel angular pressing, International Journal of Engineering Technology, 2(10) (2012) 1666-1671.

[22] K. Narooei, A. Karimi Taheri, Strain field and extrusion load in ECAE process of bi-metal circular cross section, Applied Mathematical Modelling, 36(5) (2012) 2128-2141.

[23] A.M. Laptev, A.V. Perig, O.Y. Vyal, Analysis of equal channel angular extrusion by upper bound method and rigid blocks model, Materials Research, 17(2) (2014) 359-366.

[24] K. Wei, P. Liu, Z. Ma, W. Wei, I.V. Alexandrov, J. Hu, An upper bound analysis of T-shaped equal channel angular pressing, Acta Metallurgica Slovaca, 21(1) (2015) 4-12.

[25] H. Ghaforian Nosrati, K. Khalili, M. Gerdooei, Theoretical and numerical investigation of required torque in ECAP-Conform process, Metallurgical and Materials Transactions B, 51(2) (2020) 519-528.

[26] W.F. Hosford, R.M. Caddell, Metal forming: Mechanics and Metallurgy, Cambridge University Press, 2011.

[27] M.H. Shaeri, F. Djavanroodi, M. Sedighi, S. Ahmadi, M.T. Salehi, S.H. Seyyedein, Effect of copper tube casing on strain distribution and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing, Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 48(8) (2013) 512-521.

[28] F. Fereshteh Saniee, I. Pillinger, P. Hartley, Friction modelling for the physical simulation of the bulk metal forming processes, Journal of Materials Processing Technology, 153-154 (2004) 151-156.

[29] M.K. Besharati Givi, A. Sarvi, Determination of flow stress and friction factor of aluminum 7075 by inverse analysis, Journal of the College of Engineering, 42(5) (2008) 617-623.

[30] E.M. Mielnik, Metalworking science and engineering, 1st ed., McGraw-Hill College, 1991.

[31] R.Z. Valiev, T.G. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as processing tool for grain refinement, Progress in Materials Science, 51(7) (2006) 881-981.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Naseri, M. Kadkhodayan, M. Shariati, Theoretical Analysis of Equal Channel Angular Pressing Process by Upper Bound Method and Its Experimental Investigation in Condition of Circular Cross-Section Channel, Amirkabir J. Mech Eng., 53(8) (2021) 4729-4744.

DOI: 10.22060/mej.2021.18754.6883