



## بررسی اثر فشار معکوس و اصطکاک بر جریان مواد در فرآیند اکستروژن پیچشی آلیاژ آلومینیوم 6063

سید حسن جهان تاب<sup>1</sup>، عبدالواحد کمی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

\* سمنان، صندوق پستی 35131-19111، akami@semnan.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این تحقیق، تغییر شکل پلاستیک شدید از طریق فرآیند اکستروژن پیچشی مورد بررسی قرار گرفته است. در فرآیند اکستروژن پیچشی، قطعه به داخل یک کانال پیچشی فشرده می‌شود که این کار باعث ایجاد کرنش‌های برشی در ماده می‌شود. این کرنش‌های برشی منجر به یک ساختار ریزدانه در ماده می‌شود. برای بررسی نحوه تغییر شکل ماده، فرآیند اکستروژن پیچشی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شد. اثرات فشار معکوس و اصطکاک بین قطعه و کانال مورد بررسی قرار گرفت. در مدل المان محدود، یک قطعه از آلیاژ آلومینیوم 6063 در یک کانال پیچشی با زاویه 45 درجه و طول 16 میلی‌متر شکل‌دهی شد. شبیه‌سازی‌های المان محدود با انجام آزمایش‌های تجربی صحت‌گذاری شدند. هنگامی که فشار معکوس 50 مگاپاسکال استفاده شد نمونه دچار اعوجاج شد که با افزایش فشار تا 70 مگاپاسکال بهبود یافت. بیشترین کرنش‌ها در گوشه‌های نمونه رخ دادند که مقادیر آن در حدود دو برابر کرنش‌های پلاستیک در لبه‌های نمونه بود. همچنین کرنش‌های پلاستیک محاسبه‌شده در نواحی مرکزی نمونه (0/042) در مقایسه با کرنش‌های ایجاد شده در گوشه‌ها و لبه‌های نمونه بسیار پایین بودند.

این مقاله به عنوان یکی از مقالات برتر در هفدهمین همایش ملی و ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ساخت و تولید ایران (ICME2021) انتخاب شده است.

### کلیدواژگان:

تغییر شکل پلاستیک شدید  
مواد فوق ریزدانه  
فرآیند اکستروژن پیچشی  
شبیه‌سازی المان محدود

## Investigation of the Effect of Backpressure and Friction on Material Flow in the Twist Extrusion Process of 6063 Aluminum Alloy

Seyed Hassan Jahantab<sup>1</sup>, Abdolvahed Kami<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

\* P.O.B. 3513119111 Semnan, Iran, akami@semnan.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 15 April 2021  
First Decision: 26 April 2021  
Accepted: 7 July 2021

### Keywords:

Severe plastic deformation  
Fine-grained material  
Twist extrusion process  
Finite element simulation

### Abstract

In this study, the severe plastic deformation by twist extrusion (TE) process is investigated. In this process, the workpiece is forced through a twist channel, which develops shear strains in the material. These shear strains result in a fine-grained structure in the material. For investigating the material deformation, the TE process was simulated in the Abaqus finite element (FE) software. The effects of backpressure and friction between the sample and channel were investigated. In the FE model, a sample of AA6063 aluminum alloy was formed in a twist channel with an angle of 45 degrees and a length of 16 mm. The FE simulation results were validated by conducting experimental tests. When the backpressure of 50 MPa was used, the sample was distorted, which improved by increasing the backpressure to 70 MPa. The highest strains occurred in the corners of the sample, which was about twice the plastic strains obtained at the side edges of the sample. Furthermore, the calculated plastic strains in the central areas of the sample were very low (0.042) in comparison to the strains developed in the corners and side edges of the sample.

### 1- مقدمه

که با اعمال فشار هیدرواستاتیکی زیاد، کرنش بالایی در نمونه‌های جامد اعمال می‌کند و دانه‌های کریستالی ریز بدون تغییر در ابعاد کلی نمونه‌ها بوجود می‌آیند. ساختارهای ریز دانه را حتی می‌توان در موادی با دانه‌های اولیه درشت و پودرها ایجاد کرد. در این دسته از فرآیندها شکل هندسی نمونه تغییر نمی‌کند و شکل نهایی با شکل اولیه یکسان است اما به دلیل میزان تغییر شکل پلاستیک زیادی که در نمونه القا می‌شود

در حال حاضر پیشرفت‌های بسیاری در زمینه شکل‌دهی فلزات صورت گرفته و منجر به این شده است که بسیاری از قطعات ریخته‌گری به وسیله قطعات شکل‌دهی جایگزین گردند [1]. یکی دسته از روش‌های شکل‌دهی که امروزه مورد توجه قرار گرفته است، روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است. تغییر شکل پلاستیک شدید در زمره روش‌های شکل دادن فلزات است

### Please cite this article using:

Seyed Hassan Jahantab, Abdolvahed Kami, Investigation of the Effect of Backpressure and Friction on Material Flow in the Twist Extrusion Process of 6063 Aluminum Alloy, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 6, pp. 1- 6, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پرداختند. آنها تغییرات سختی و خواص کششی مس خالص در شکلهای نمونهها با مقطع مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که سختی، نقطه تسلیم و استحکام آلیاژ با فاصله گرفتن از مرکز افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی در شکل‌دهی قطعه در دو پاس مشاهده شد. اکبری موسوی و همکاران [6] به مدل‌سازی فرآیند اکستروژن قطعه Ti-6Al-4V تحت فشار زیاد و دمای بالا پرداختند. برای مدل‌سازی از نرم افزار آباکوس استفاده شد. مشخص شد که هر دو حالت برش خالص و ساده در فرآیند اکستروژن پیچشی در سراسر نمونه وجود دارند. کریمی و همکاران [7] مدل‌سازی و بهینه‌سازی چندهدفه فرآیند اکستروژن پیچشی را انجام دادند. آنها زاویه اکستروژن، ضریب اصطکاک و سرعت بارگذاری را به عنوان متغیرهای طراحی و کرنش ایجاد شده، میزان همگنی کرنش و نیروی اکستروژن را به عنوان توابع هدف در نظر گرفتند. شبیه‌سازی‌های المان محدود در نرم‌افزار دی‌فرم سه‌بعدی انجام شد. نتایج نشان داد که بیشترین کرنش در گوشه‌های قطعه که در تماس با سطح داخلی قالب است، رخ می‌دهد. تغییر سرعت سنبه اثر چندانی در کرنش نشان نداد و زاویه اکستروژن و ضریب اصطکاک بیشترین تأثیر را بر کرنش داشتند.

در فرآیند اکستروژن پیچشی، نحوه جریان مواد تأثیر فراوانی بر کرنش‌های پلاستیک و در نتیجه میزان ریز دانه شده ماده دارد. از جمله پارامترهای مهمی که روی نحوه جریان ماده اثرگذار هستند، فشار معکوس و اصطکاک بین ماده و قالب است. کارهای بسیار محدودی در زمینه بررسی نحوه جریان ماده و اثر پارامترهای فرایندی صورت گرفته است. به همین دلیل، در این مقاله اثر پارامترهای مهم شامل فشار معکوس و اصطکاک در کانال پیچش بر نحوه جریان ماده مورد بررسی قرار گرفت. همچنین نوآوری دیگر این تحقیق شکل‌دهی در قالب پیچشی با زاویه تند (45 درجه) است که کرنش‌های شدیدی را حتی در یک پاس ایجاد می‌کند.

## 2- مواد و روش تحقیق

فرآیند اکستروژن پیچشی روی قطعات آلومینیومی آلیاژ 6063 با مقطع 20×20 میلی‌متر مربع انجام شود. قالب اکستروژن دارای زاویه کانال 45 درجه و طول 16 میلی‌متر است. در هر پاس، نمونه به میزان 90 درجه دچار پیچش می‌شود. در شکل 2 قالب اکستروژن پیچشی به همراه نمای داخلی کانال پیچشی نمایش داده شده است. کانال بالایی دارای طول 85 میلی‌متر بوده و مواد از طریق این کانال به داخل کانال پیچشی هدایت می‌شوند.

استحکام نمونه به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. چند نمونه از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید رایج شامل پیچش تحت فشار بالا، اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار، آهنگری چند جهته، نورد تجمعی، اکستروژن برشی ساده و اکستروژن پیچشی هستند.

فرآیند اکستروژن پیچشی برای اولین بار توسط بیگلزیمر در سال 1999 ارائه شد [2]. این فرآیند شامل اکستروژن کردن یک بلوک فلزی در یک قالب با کانال پیچشی است. مقطع ورودی و خروجی کانال مشابه است اما بواسطه پیچش در قالب، نمونه به اندازه 90 درجه دوران می‌یابد. در این حالت با اعمال فشار معکوس، در ماده تنش برشی ایجاد شده و در نتیجه ساختار ماده ریز دانه می‌شود [3]. در شکل 1 شماتیک فرآیند اکستروژن پیچشی نمایش داده شده است.



Fig. 1 Schematic of twist extrusion process [3]

شکل 1 شماتیک فرآیند اکستروژن پیچشی [3]

بهداری و همکاران [4] اثر شکل مقطع قطعه و تعداد پاس انجام فرآیند بر تغییر شکل ماده را مورد بررسی قرار دادند. پیچش در سطح مقطع به دو صورت ساعتگرد یا پادساعتگرد انجام شد. در این بررسی قطعه‌کار آلومینیومی در پاس اول از قالبی با پیچش ساعتگرد و در پاس دوم از قالب با پیچش پادساعتگرد عبور داده شد. نتایج نشان داد که انجام فرآیند در قالب ساعتگرد-پادساعتگرد موجب توزیع مناسب‌تر کرنش پلاستیک معادل در قطعه می‌گردد و یکنواختی بیشتری در کرنش مشاهده شد. نور و همکاران [5] به ناهمگن بودن در ریزساختار و خصوصیات مکانیکی در طول اکستروژن پیچشی

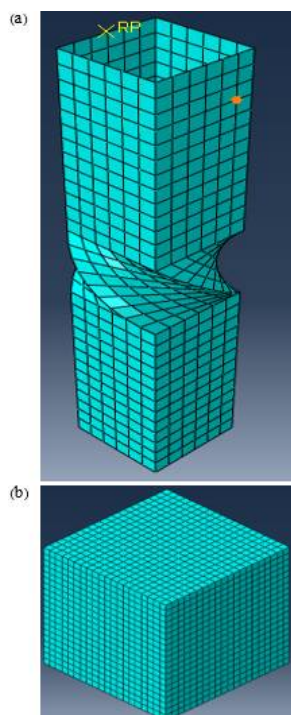


Fig. 3 Meshed model of (a) twist extrusion channel, (b) aluminum sample with the dimensions of  $20 \times 20 \times 20$  mm

شکل 3 مدل مش بندی شده (a) کانال پیچشی با زاویه پیچش 45 درجه و (b) قطعه آلومینیومی با ابعاد  $20 \times 20 \times 20$  میلی متر

### 3- ارائه نتایج و بحث

در شکل 4 نمونه آلومینیومی قبل و بعد از اکستروژن نمایش داده شده است. همان طور که از این شکل مشخص است، مقطع ورودی نمونه (سطح بالا در شکل 4b) در حین عبور از قالب از حالت مربعی به صورت دایروی تغییر شکل داده است. همچنین در مقاطع دیگر نیز، سطح مقطع نمونه به صورت کامل از ماده پر نشده است که دلیل آن اعمال فشار معکوس ناکافی است. برای بهبود این شرایط، باید فشار معکوس افزایش یابد، در غیر اینصورت امکان تکرار اکستروژن روی نمونه وجود نخواهد داشت.

برای بررسی میزان اعوجاج و نیز کرنش های پلاستیک اعمالی به نمونه، شبیه سازی المان محدود انجام شد. در شکل 5 کرنش ها در مقطع میانی نمونه نشان داده شده است. بر اساس این شکل، نمونه دچار اعوجاج شده است که در انطباق با نتایج حاصل از شکل دهی تجربی است. با پیشروی فرآیند و عبور نمونه از داخل کانال پیچشی به تدریج اعوجاج در نمونه افزایش می یابد. میزان کرنش های پلاستیک در نواحی مرکزی نمونه کم بوده و در حدود 0/029 است. در حالیکه در گوشه ها بیشترین مقدار کرنش پلاستیک (در حدود 0/409) ایجاد می شود. بخشی از این کرنش به دلیل پیچش مقطع نمونه و بخشی دیگر به دلیل

قالب از جنس فولاد SPK ساخته شد و برای افزایش مقاومت به سایش عملیات حرارتی شد.

برای شبیه سازی فرآیند اکستروژن پیچشی از نرم افزار آباکوس استفاده شد. حل گر از نوع دینامیکی صریح انتخاب گردید و تحلیل ها به صورت غیرخطی انجام شد. قطعات به صورت سه بعدی مدل شده و قطعه مورد آزمایش به صورت تغییر فرم پذیر و قالب و سنبه به صورت صلب در نظر گرفته شدند. با توجه به اینکه شکل دهی در دمای اتاق انجام می شود و نیز به دلیل روانکاری خوب در حین آزمایش، ضریب اصطکاک کولمبی برابر با 0/1 در سطح تماس قطعه کار با سطح داخلی و خارجی قالب تعریف گردید. پس از مونتاژ قالب و قطعه کار شرایط مرزی به مجموعه اعمال گردید. قالب در کلیه جهات کاملاً ثابت شده و هیچ نوع حرکتی ندارد. برای مش بندی قطعه از المان C3D8R (المان سه بعدی خطی با هشت گره) استفاده شد. پس از بررسی اندازه المان های مختلف طول مناسب المان 1 میلی متر بدست آمد. در شکل 3 قطعه کار و کانال پیچشی با زاویه 45 درجه در حالت مش بندی شده نشان داده شده است.

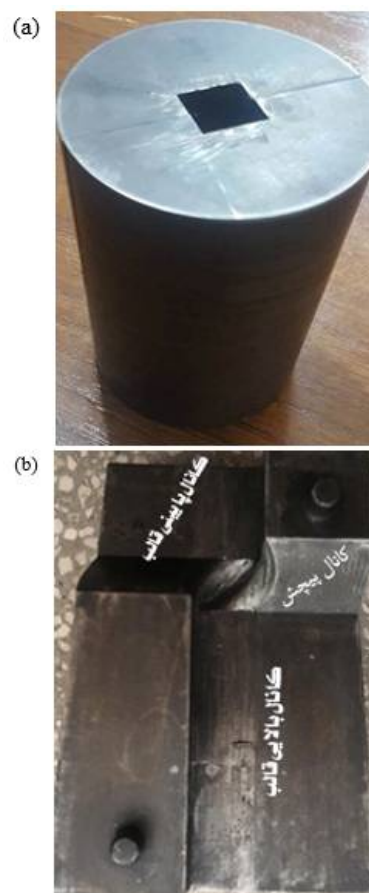


Fig. 2 (a) Twist extrusion die's forming channel, (b) interior view of twist extrusion channel

شکل 2 (a) کانال شکل دهی قالب اکستروژن پیچشی و (b) نمای داخلی کانال اکستروژن پیچشی

گرفته شد و نحوه جریان ماده در حین تغییر شکل، از طریق بررسی مسیر حرکت این نقاط بدست آمد. مقطع میانی قطعه در صفحه X-Z واقع شده و شکل‌دهی قطعه در راستای محور Y (محور کانال) انجام شده است. بررسی‌ها به دو صورت انجام شدند: الف) بررسی یک گره خاص در مقادیر مختلف اصطکاک و فشار معکوس و ب) بررسی جریان مواد از طریق رسم حرکت‌ها در صفحه X-Z.

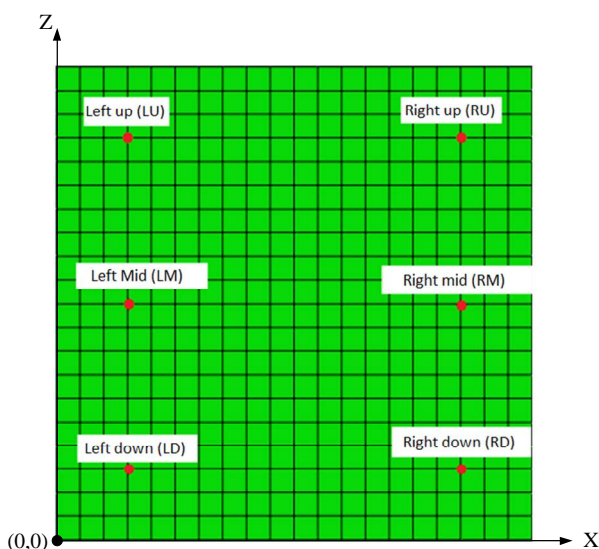


Fig. 6 Middle section of the sample and the points selected for measuring strains and movements

شکل 6 مقطع میانی قطعه و نقاط انتخاب‌شده برای اندازه‌گیری کرنش‌ها و حرکت‌ها

در شکل 7 اثرات تغییر اصطکاک و فشار معکوس بر جریان مواد در نقطه LU نمایش داده شده است. مطابق این شکل، کمترین کشیدگی و بیشترین پیچش مربوط به حالتی است که اصطکاک و فشار معکوس مقادیر کمینه خود را دارند یعنی مقدار فشار 50 مگاپاسکال بوده و ضریب اصطکاک 0/10 است. این شکل نشان می‌دهد که تغییر ضریب اصطکاک به نسبت تغییر فشار معکوس اثر بیشتری بر جریان ماده دارد به طوریکه بیشترین کشیدگی و کمترین پیچش در نقطه‌ای با اصطکاک 0/25 و در فشار 50 مگاپاسکال بدست آمده است. این بدان دلیل است که در مقادیر اصطکاک زیاد بین قطعه و کانال، پیچش مواد در کانال پیچشی با مشکل مواجه می‌شود. با حرکت مواد در داخل کانال و تداوم تماس آنها با دیواره کانال، کشیدگی بیشتر می‌شود.

در شکل 8 جریان مواد در نقطه میانی یعنی LM نمایش داده شده است. در نقاط میانی (LM و RM) جابه‌جایی بیشتر

کشیدگی ناشی از اصطکاک نمونه با دیواره کانال ایجاد می‌شود.

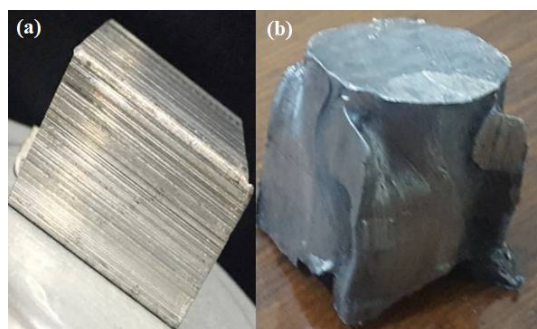


Fig. 4 Aluminum sample (a) before, (b) after twist extrusion

شکل 4 نمونه آلومینیومی (a) قبل و (b) بعد از اکستروژن پیچشی

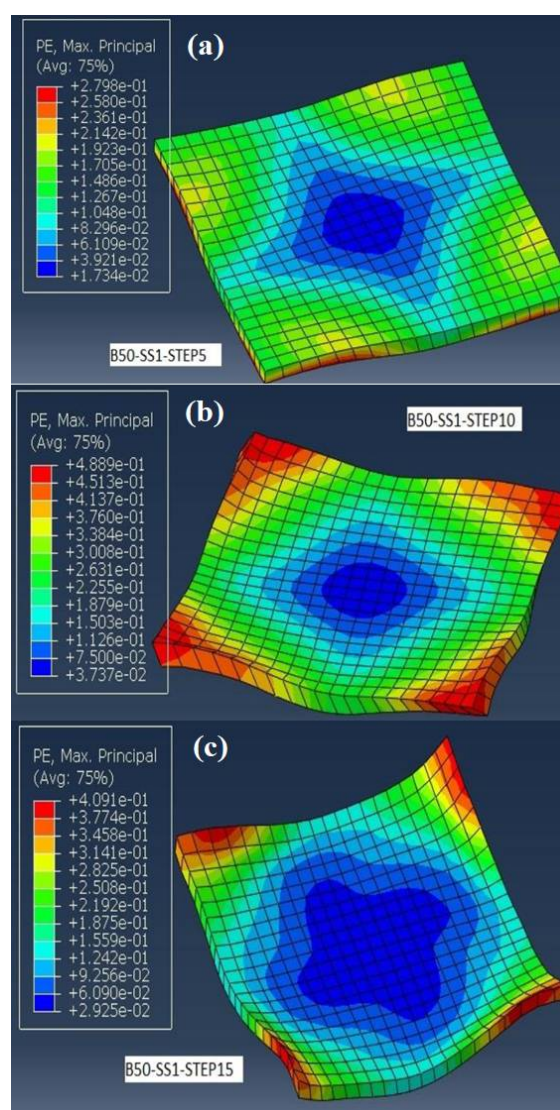


Fig. 5 Deformation of the middle section of the sample, after (a) 10%, (b) 50% and (c) 90% passing through twist channel

شکل 5 تغییر شکل مقطع میانی نمونه، پس از 10% (a)، 50% (b) و 90% (c) عبور از کانال پیچشی

مطابق شکل 6 تعداد 6 گره در مقطع میانی قطعه در نظر



انتظار می‌رفت میزان پیچش نقاط گوشه (LU، RU، LD و RD) با یکدیگر برابر است. همچنین میزان پیچش در نقاط میانی (LM و RM) با یکدیگر مشابه است. مطابق با شکل 10، با افزایش فشار از 70 به 90 مگاپاسکال، پیچش ماده در مقطع پیچشی کانال کاهش می‌یابد. این اثرات در نقاط گوشه شدیدتر از نقاط میانی است. نتایج ارائه شده در شکل‌های 9 و 10 نشان می‌دهند که در شرایط شکل‌دهی با فشار معکوس بالاتر و برای اصطکاک بیشتر، تغییر شکل به سختی صورت می‌گیرد و برای رسیدن به ساختارهای ریز دانه که ناشی از پیچش ماده در کانال پیچشی و اعمال کرنش‌های برشی است، لازم است شکل‌دهی در پاس‌های بیشتری انجام شود.

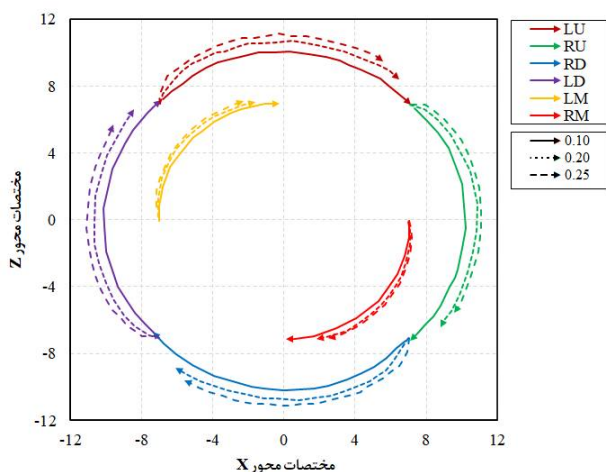


Fig. 9 Material flow curve for different values of friction coefficient (0.10, 0.2, 0.25) at back pressure of 50 MPa

شکل 9 نمودار جریان مواد در مقطع پیچش برای ضرایب اصطکاک مختلف (0/10، 0/20 و 0/25) در فشار معکوس 50 MPa

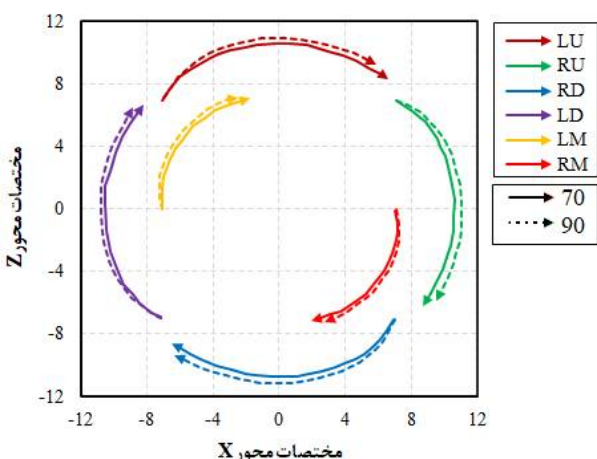


Fig. 10 Material flow curve for different values of back pressure (70 MPa and 90 MPa) and friction coefficient of 0.15

شکل 10 نمودار جریان مواد در مقطع پیچش برای فشارهای معکوس مختلف (70 و 90 مگاپاسکال) و ضریب اصطکاک 0/15

بوده و کشیدگی کمتری رخ می‌دهد. بدین ترتیب منحنی‌های تغییر شکل نزدیک به یکدیگر قرار گرفته‌اند. مشابه با شکل 7، بیشترین جابه‌جایی مربوط به حالت فشار 50 مگاپاسکال بوده و ضریب اصطکاک 0/10 است.

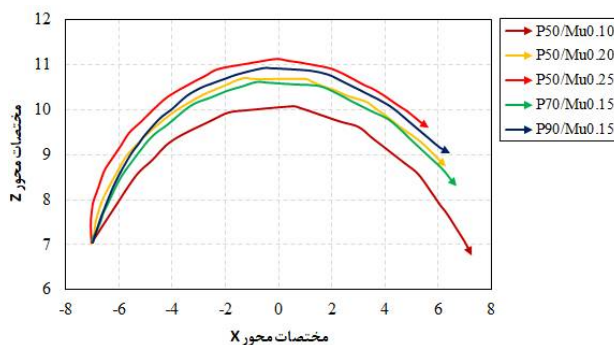


Fig. 7 The effects of friction and back pressure on the material flow at LU

شکل 7 اثرات اصطکاک و فشار معکوس بر جریان مواد در نقطه LU

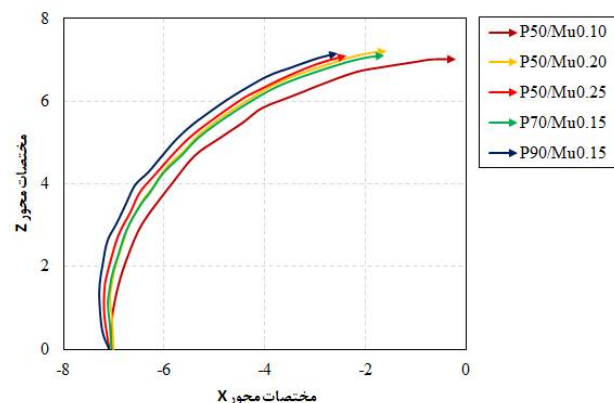


Fig. 8 The effects of friction and back pressure on the material flow at LM

شکل 8 اثرات اصطکاک و فشار معکوس بر جریان مواد در نقطه LM

نحوه جریان مواد در مقطع پیچش (مقطع عرضی نمونه) در شکل‌های 9 و 10 نشان داده شده است. در شکل 9 اثرات تغییر ضریب اصطکاک و در شکل 10 اثرات تغییر فشار معکوس مشخص شده است. مطابق شکل 9، در حالت فشار معکوس 50 مگاپاسکال و اصطکاک 0/1 کلیه نقاط به اندازه 90 درجه پیچش داشته‌اند ولی با افزایش ضریب اصطکاک به 0/2، کشیدگی المان‌ها بیشتر شده و پیچش 90 درجه‌ای به طور کامل انجام نشده است. با افزایش بیشتر اصطکاک به 0/25، میزان جریان مواد کمتر شده و پیچش بسیار کمتری از 90 درجه رخ می‌دهد. بر اساس شکل 9، بیشترین پیچش‌ها در نقاط گوشه و کمترین پیچش و جریان ماده در نقاط میانی رخ می‌دهد. همان‌طور که

#### 4- نتیجه گیری

در این تحقیق، فرآیند اکستروژن پیشی بر روی نمونه‌های آلومینیومی آلیاژ 6063 به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به دست آمده به صورت خلاصه عبارتند از:

- مقدار فشار معکوس 50 مگاپاسکال برای اکستروژن پیشی نمونه آلومینیومی در یک قالب با زاویه مارپیچ 45 درجه کافی نیست. در نتیجه نمونه اکستروژن شده دچار اعوجاج شده و امکان اکستروژن مجدد ندارد. با افزایش فشار معکوس تا 70 مگاپاسکال اعوجاج نمونه تا حد قابل قبولی کاهش پیدا کرد.
- بیشترین مقدار کرنش در گوشه‌های نمونه رخ می‌دهد، به طوریکه مقدار کرنش پلاستیک در گوشه‌ها برابر با 0/409 بدست آمد که بیش از دو برابر مقدار کرنش در لبه‌های قطعه است.
- نواحی مرکزی نمونه تغییرات کرنش پلاستیک کمی تجربه می‌کنند و مقدار کرنش در این نواحی نیز بسیار کم است (0/042 در انتهای یک پاس عملیات اکستروژن پیشی).
- با افزایش فشار معکوس و ضریب اصطکاک اگرچه پرشدگی مقطع قالب بهتر می‌شود ولی میزان تغییرشکل و پیش مواد در مقطع عرضی نمونه کاهش می‌یابد. بنابراین برای ایجاد یک کرنش مشخص لازم است، تغییرشکل‌ها در پاس‌های بیشتری انجام شوند.

#### 5- مراجع

- [1] T. G. Langdon, Twenty-five years of ultrafine-grained materials: Achieving exceptional properties through grain refinement, *Acta Materialia*, Vol. 61, No. 19, pp. 7035-7059, 2013.
- [2] Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, A. Saponov, V. Synkov, New schemes of large plastic deformations accumulating with using of hydroextrusion, *Phys. Technol. High Press*, Vol. 9, No. 3, pp. 109-111, 1999.
- [3] Y. Beygelzimer, R. Kulagin, Y. Estrin, L. S. Toth, H.S. Kim, M. I. Latypov, Twist extrusion as a potent tool for obtaining advanced engineering materials: a review, *Advanced engineering materials*, Vol. 19, No. 8, pp. 1600873, 2017.
- [4] S. R. Bahadori, S. A. Mousavi, Examination of an aluminum alloy behavior under different routes of twist extrusion processing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 21, pp. 6527-6534, 2011.
- [5] S. V. Noor, A. Eivani, H. Jafarian, M. Mirzaei, Inhomogeneity in microstructure and mechanical properties during twist extrusion, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 652, pp. 186-191, 2016.
- [6] S. A. Mousavi, A. Shahab, M. Mastroori, Computational study of Ti-6Al-4V flow behaviors during the twist extrusion process, *Materials & Design*, Vol. 29, No. 7, pp. 1316-1329, 2008.
- [7] M. Karimi, H. Bakhtiari, A. Keshavarz, Modeling and multiobjective optimization of twist extrusion process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 60-73, 2013. (in Persian)