



# بررسی رفتار اصطکاکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ در فرایند شکل دهی گرم با استفاده از آزمایش فشار حلقه و شبیه سازی المان محدود

بابک باروقی<sup>۱</sup>، امیر امیری<sup>۲</sup>، محمد حسین صادقی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استاد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، sadeghim@modares.ac.ir

**چکیده-** متغیرهای متعددی بر فرایند شکل دهی فلزات تأثیرگذار می باشند که یکی از مهمترین آنها اصطکاک است. اصطکاک بر نحوه سیلان ماده و همچنین نیروی مورد نیاز برای شکل دهی اثرگذار می باشد. برای تعیین میزان و نحوه تأثیر آن داشتن مقدار دقیق ضریب اصطکاک ضروری است. در این مقاله از آزمایش فشار حلقه برای تعیین ضریب اصطکاک برشی در فرایند کار گرم آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ استفاده شده است. تغییرات اندازه قطر داخلی حلقه در حین تغییر شکل به میزان ضریب اصطکاک برشی وابسته است بنابراین می تواند معیاری برای مشخص کردن ضریب اصطکاک برشی باشد. گرافیت، تفلون و ورقه های میکا به عنوان روانکار انتخاب شدند. منحنی های کالیبراسیون اصطکاکی به کمک شبیه سازی المان محدود برای مقایسه با نتایج بدست آمده از آزمایش های تجربی رسم شده و ضریب اصطکاک برشی برای هر یک از حالت های روانکاری بدست آمد. نتایج نشان داد که بهترین حالت روانکاری برای کار گرم آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ با استفاده از تفلون با ضریب اصطکاک برشی ۰/۳۲ حاصل می شود. ضریب اصطکاک برشی برای حالت بدون روانکار ۰/۶۹ بدست آمد.

**کلیدواژه ها:** اصطکاک، کار گرم، تست فشار حلقه، آلومینیوم ۶۰۸۲

## Study on hot ring compression test of al 6082 alloy using experimental observations and FEM simulation

B. Barooghi<sup>1</sup>, A. Amiri<sup>2</sup>, M.H. Sadeghi<sup>3\*</sup>

1-MSc. Student of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

2-PhD. Student of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

3- Prof. of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

\* P. O. B. 14115-143, Tehran, Iran. sadeghim@modares.ac.ir

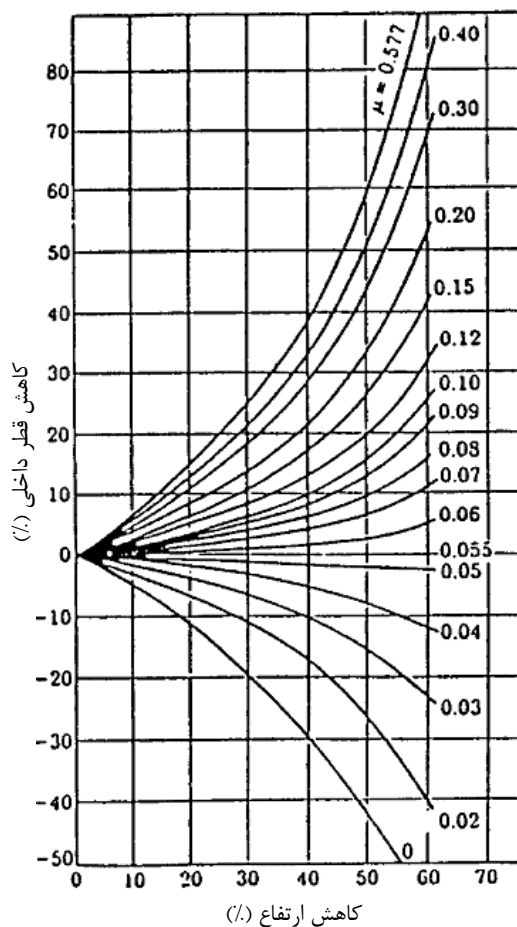
**Abstract-** There is several parameters that have significant influence in metal forming process. One of the most important of them is friction coefficient. Friction can change the pattern of metal flow and the force needed for deformation. It is necessary to determine the friction coefficient to study the effect of friction on metal forming process. In this study ring compression test was used to determine the friction coefficient in hot working of Al 6082 alloy. Variation of inner diameter of a ring during deformation is a function of friction coefficient, so it can be used to determine the friction coefficient. Graphite, PTFE and mica plate were used as lubricants. The calibration curves were developed by using FEM simulations for different friction coefficients and compared with experimental results. The friction coefficient for each deformation condition and lubricant was obtained. The results show the best lubricant for hot working of this alloy is PTFE with the friction coefficient of 0.32. Hot working without lubricant led to friction coefficient of 0.69.

**Keywords:** Friction, Hot Working, Ring Compression Test, Al 6082.

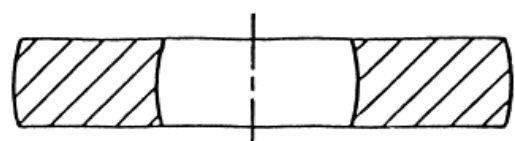
## ۱- مقدمه

مختلف اصطکاک نشان می‌دهند، ایجاد شدند. یک نمونه از این منحنی‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. بعد از اینکه میل و کوکوکرافت مقاله خودشان را در زمینه ضریب اصطکاک منتشر کردند، تحقیقات زیادی توسط دیگر محققان در این زمینه انجام شد. میل [۴] در سال ۱۹۶۵ نشان داد که ضریب اصطکاک  $\mu$  با تغییرات دما تغییر می‌کند. هرچه دما بالا می‌رود مشاهده می‌شود که ممکن است  $\mu$  به سمت اصطکاک چسبنده پیش برود یا ممکن است وابسته به جنس مواد حلقه کاهش یابد. وی هم چنین در سال ۱۹۶۶ تحقیقی برای یافتن اختلاف در ضریب اصطکاک فلزات در طی تغییر شکل فشاری در دمای اتاق انجام داد. نتایج او نشان داد که ضریب اصطکاک با افزایش نرخ تغییر شکل برای مواد مختلف تمایل به زیاد شدن دارد [۵].

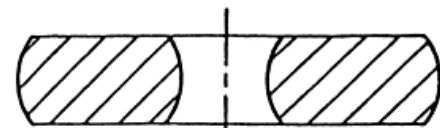
هدف شکل‌دهی دقیق فلزات تولید قطعات نزدیک به ابعاد نهائی، بدن عیب و با کمترین اتلاف مواد و هزینه ابزار می‌باشد. به منظور رسیدن به این هدف درک صحیحی از مشخصات ماده، پارامترهای فرایند و رفتار بین قطعه و قالب مثل اصطکاک ضروری است [۱]. اصطکاک نقش اساسی در کل فرایند شکل‌دهی دارد و باید در حین طراحی فرایند نقش آن در نظر گرفته شود. الگوی جریان مواد و عیوب ایجاد شده در قطعات تولیدی، شدیداً تحت اثر شرایط اصطکاکی کنترل می‌شود. تعیین صحیح ضریب اصطکاک و انتخاب روش آزمایش مناسب برای درک پدیده اصطکاک در سطح تماس قطعه و قالب تحت شرایط روانکاری مختلف مهم است. در میان همه روش‌های مشترک برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک، آزمایش فشار حلقه بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش ابتدا توسط کونگوی به کار گرفته شد [۲] و بعدها به عنوان روش قابل استفاده به وسیله میل و کوکوکرافت توسعه و ارائه شد [۳]. این روش از تغییرات ابعادی نمونه آزمایش برای رسیدن به ضریب اصطکاک استفاده می‌کند. در آزمایش فشار حلقه قطر داخلی حلقه در طی تغییر شکل تغییر می‌کند. به طوری کلی می‌توان گفت که اگر قطر داخلی نمونه در طی تغییر شکل افزایش یابد، اصطکاک کم است و اگر قطر داخلی نمونه در طی تغییر شکل کاهش یابد، اصطکاک زیاد است [۲]. این مطلب به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است [۳].



شکل ۲ منحنی‌های تئوری کالیبراسیون اصطکاکی برای حلقه با نسبت ۶:۳:۲ [۷]



الف- اصطکاک کم (روانکاری مناسب)



ب- اصطکاک زیاد (روانکاری نامناسب)

شکل ۱ شرایط اصطکاکی مختلف

با استفاده از این ارتباط، منحنی‌هایی که ارتباط بین درصد کاهش قطر داخلی نمونه‌ها با کاهش ارتفاعشان را برای مقادیر

## ۲- مدل‌های اصطکاکی

روش‌های تئوری متعددی برای تعیین منحنی‌های کالیبراسیون برای آزمایش فشار حلقه وجود دارد. این روش‌ها براساس آنالیز تختال، روش کرانه بالا و روش آنالیز المان محدود هستند. لازم به ذکر است که مدل‌های تئوری مختلفی برای بررسی اصطکاک وجود دارد که در ادامه به سه مدل به صورت مختصر اشاره می‌شود.

### ۲-۱- مدل اصطکاکی کولمب<sup>۲</sup>

مدل اصطکاکی کولمب بر پایه قانون آمونتون یکی از مدل‌های اصطکاکی است که معمولاً در برنامه‌های کامپیوتری المان محدود استفاده می‌شود. به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$\tau = \mu \cdot p \quad (1)$$

که  $\tau$  تنش برشی اصطکاکی،  $\mu$  ضریب اصطکاک در سطح مشترک قطعه و قالب و  $p$  نیروی عمودی وارده می‌باشد. این قانون برای حالت الاستیک و نیز برای فرایندهای شکل‌دهی با فشار کم معتبر است [۱۲، ۱۱].

### ۲-۲- مدل اصطکاکی برشی<sup>۳</sup>

این مدل برای حالت‌هایی که فشار زیادی در سطح مشترک قطعه و قالب وجود دارد استفاده می‌شود. به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود [۱۲].

$$\tau = m \cdot k \quad (2)$$

که  $m$  ضریب اصطکاک برشی است که از مقادیر  $m=0$  برای سطح بدون اصطکاک تا  $m=1$  برای اصطکاک چسبنده را شامل می‌شود. و  $k$  حد تسلیم برشی است.

بنا به کار آویتزور [۱۳-۱۵] میانگین ضریب اصطکاک کولمب،  $\mu$ ، می‌تواند با استفاده از معادله زیر برای اندازه‌گیری  $m$  استفاده شود:

$$k = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{3}} \left( \frac{\sigma_0}{P_{ave}} \right) \quad (4)$$

که  $\sigma_0$  حد تسلیم و  $P_{ave}$  میانگین فشار در سطح است.

رابینسون [۱] به مطالعه آزمایش فشار حلقه به کمک آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی المان محدود پرداخت و منحنی‌های کالیبراسیون را با شرایط روانکاری مختلف برای پلاستیسین ارائه داد. فلدر [۶] آزمایش فشار حلقه را در دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بر روی استیل انجام داد. نتایج نشان داد که سرعت ابزار شکل‌دهی اثر مهمی روی اصطکاک دارد و نشان دادند که اصطکاک با افزایش سرعت، کاهش می‌یابد.

حسن سوفوقلو [۷] منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاکی را با کمک شبیه‌سازی المان محدود و مدل‌سازی فیزیکی بدست آوردند و نشان دادند که پارامترهای مواد و شرایط آزمایش اثرات مهمی روی شکل منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاکی برای هر دو حالت شبیه‌سازی و مدل‌سازی فیزیکی دارد. میل [۸] مطالعه‌ای به منظور مشاهده این که کدام یک از حالت‌های اصطکاک تعریف واقعی‌تری از شرایط اصطکاک در فرایند شکل‌دهی دارد، انجام داد و نشان داد که  $m$  به عنوان شاخص عددی برای تعریف شرایط اصطکاکی در عملیات کله زنی نسبت به  $\mu$  واقعی‌تر است. همچنین مشخص شد که آزمایش فشار حلقه تکنیک دقیقی برای تعیین منحنی تنش-کرنش واقعی در عملیات شکل‌دهی است.

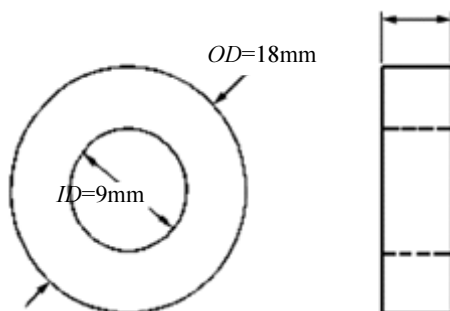
شهریاری [۹] به تعیین ضریب اصطکاک برشی در شکل‌دهی داغ سوپرآلیاژ نایمونیک ۱۱۵ تحت روانکارهای مختلف با استفاده از مشاهدات فیزیکی و شبیه‌سازی المان محدود پرداختند. یانچون ژو [۱۰] به تعیین ضریب اصطکاک برشی برای آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4 V در فرایند شکل‌دهی داغ بوسیله آزمایش فشار حلقه به صورت آزمایش فیزیکی و شبیه‌سازی المان محدود پرداخت. در این تحقیق ضریب انتقال حرارت روانکارها به عنوان پارامتری در فرایند رسم منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاکی در نظر گرفته شد.

در این تحقیق روند مدل‌سازی تجربی و المان محدود برای یافتن منحنی‌های کالیبراسیون آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ با استفاده از روانکارهای مختلف توضیح داده می‌شود. نتایج آزمایش فشار حلقه در هر دو حالت تجربی و المان محدود و اثر روانکارهای مختلف بر منحنی‌های کالیبراسیون بررسی می‌شود.

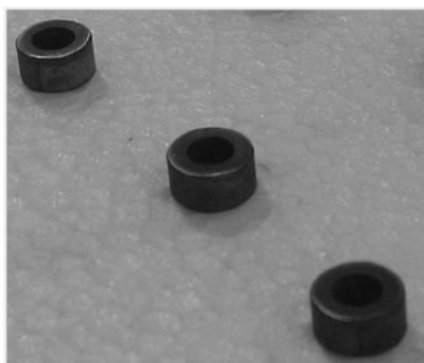
آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ تهیه شدند. این نمونه‌ها با نسبت ۲:۳:۶ یعنی به قطر خارجی ۱۸ میلی‌متر، قطر داخلی ۹ میلی‌متر و ارتفاع ۶ میلی‌متر سوراخ‌کاری شدند. ابعاد نمونه‌های تهیه شده برای انجام آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است.

### ۳-۲- رویه انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق دستگاه فشار ۲۵۰ کیلو نیوتنی زوئیک روئل با کنترل کامپیوتری سروموتور<sup>۲</sup> برای انجام آزمایش فشار داغ حلقه استفاده شده است. این دستگاه می‌تواند برای شبیه‌سازی فرایند صنعتی در هر دو حالت گرمایی و مکانیکی<sup>۳</sup> در محدوده وسیعی از شرایط تغییر شکل داغ مورد استفاده قرار گیرد. در طول آزمایش فشار حلقه، سرعت قالب پایینی با جابجایی رم پرس تغییر می‌کند، بنابراین نرخ کرنش متغیری در طی فرایند تغییر شکل خواهیم داشت.



الف- نقشه نمونه‌های فشار حلقه



ب- نمونه‌های حلقه تهیه شده برای آزمایش فشار

شکل ۳ نمونه‌های آزمایش فشار

2. Type 250 kN Zwick/ Roell Computer-Controlled, Servo-Screw
3. Thermal & Mechanical

### ۳-۲- مدل اصطکاکی عمومی

این مدل ترکیبی از دو مدل ذکر شده در بالاست که با معادله (۵) بیان می‌شود.

$$\tau = f \propto k \quad (5)$$

ضریب اصطکاک  $\mu$  یا فاکتور برشی اصطکاک  $(f, m)$  به عنوان اعداد بدون بعد برای هم‌سانی در شرایط اصطکاک در نظر گرفته می‌شوند. با استفاده از روش‌های تحلیلی، مجموعه‌های مختلفی از منحنی‌های کالیبراسیون برای تعیین  $m$  یا  $f$  برای یک روانکار مخصوص بدست می‌آید. شکل این منحنی‌ها تحت تأثیر هندسه اولیه حلقه استفاده شده در آنالیز می‌باشد. در این تحقیق، کله‌زنی داغ آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ با فشار زیاد در سطح مشترک انجام می‌شود. بنابراین مدل اصطکاکی ثابت به عنوان مدل اصطکاکی در سطح تماس در نظر گرفته می‌شود. هدف اصلی در این تحقیق یافتن روانکاری مناسب و شرایط اصطکاکی برای فرایند شکل‌دهی داغ با آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ می‌باشد.

### ۳- آزمایشات تجربی

#### ۳-۱- مواد مورد استفاده و آماده‌سازی نمونه‌ها

ماده‌ای که در این تحقیق بررسی می‌شود آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ می‌باشد. این آلیاژ به دلیل خصوصیات نهائی خوب، جوش‌پذیری مناسب، قابلیت لحیم‌کاری، مقاومت به خوردگی، قابلیت ماشین‌کاری و شکل‌پذیری بالا از جمله آلیاژهایی است که در سال‌های اخیر بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیب شیمیایی نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ استفاده شده، در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ (%)

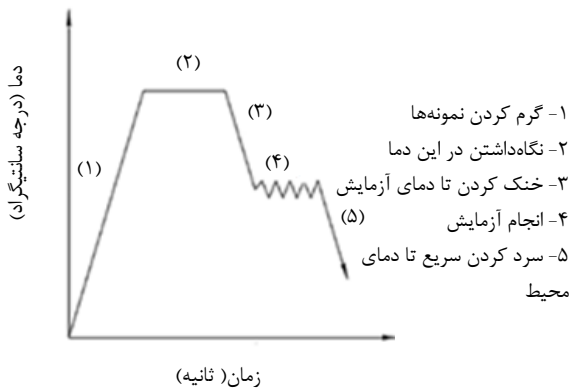
عنصر	Si	Fe	Cu	Mn	Ti
درصد عنصر	۱/۱	۰/۳	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۲
عنصر	Mg	Cr	Zn	Al	
درصد عنصر	۱/۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۹۷/۳	

نمونه‌های آزمایش فشار داغ از ماشین‌کاری میل‌گرد از جنس

1. Al 6082



شکل ۴ دستگاه انجام آزمایش فشار و کوره



شکل ۵ دیاگرام شماتیک آزمایش فشار داغ

به دلیل وجود اصطکاک حالت بشکته‌ای شدن در نمونه‌ها اتفاق می‌افتد. برای اینکه بتوان قطر داخلی نمونه‌ها را دقیق‌تر اندازه گرفت، نمونه‌ها بعد از آزمایش از وسط برش داده شدند و قطر داخلی در ارتفاع بالا، وسط و پایین اندازه گرفته شد. از میانگین اندازه بالا و پایین با اندازه وسط، مجدداً میانگین گرفته شده شد و قطر داخلی بدست آمد.

#### ۴- شبیه‌سازی المان محدود

منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاکی با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود بدست می‌آیند. اطلاعات مواد استفاده شده براساس تابعی از دما در شکل ۶ نشان داده شده است. این تحلیل برای اندازه‌گیری تغییرات ابعادی قطر داخلی حلقه نسبت به کاهش ارتفاع تحت شرایط اصطکاکی مختلف با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انجام می‌شود. با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود، مطالعه‌ای مقایسه‌ای بین شبیه‌سازی

برای اینکه نرخ کرنش متوسط  $0.5 \text{ s}^{-1}$  در طی تغییر شکل ثابت باشد از فرمول ۶ سرعت رم پرس طوری انتخاب می‌شود که نرخ کرنش متوسط  $0.5 \text{ s}^{-1}$  باشد. بنابراین آزمایش فشار داغ روی حلقه در نرخ کرنش  $0.5 \text{ s}^{-1}$  و در دمای ثابت ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. تغییر شکل نمونه‌ها به صورت همدم است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود کوره کاملاً قالب و نمونه‌ها را در بر گرفته و دمای کوره ثابت نگاه داشته می‌شود. این فرایند به صورت شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده است. این آزمایش با سه نوع روانکار مختلف انجام می‌شود:

(۱) تفلون<sup>۱</sup>

(۲) ورقه‌های میکا

(۳) گرافیت

$$\varepsilon = \frac{V \cdot \varepsilon}{2 \cdot \Delta h} \quad (6)$$

روانکار تمام سطح نمونه‌ها را می‌پوشاند غیر از روانکار میکا که فقط سطحی از نمونه را که با قالب در تماس است، می‌پوشاند. آزمایش حلقه با ۱۲ نمونه، با کاهش ارتفاع‌های مختلف (۰.۲۲٪، ۰.۳۶٪، ۰.۶۳٪) انجام شد.

#### ۳-۲-۱- مشخصات مواد

در طی تغییر شکل قطعه کار، کرنش، نرخ کرنش و دما تأثیر زیادی روی جریان و رفتار مواد دارد که می‌تواند با معادله (۷) توضیح داده شود:

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \quad (7)$$

برای یافتن رفتار آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ استفاده شده در این آزمایش، از آزمایش فشار نمونه‌های استوانه‌ای استفاده شد. برای این کار استوانه‌هایی به قطر ۱۰ و به ارتفاع ۱۵ میلی‌متر تهیه آزمایش فشار روی این نمونه‌ها انجام شد. شکل ۶ منحنی تنش-کرنش واقعی نمونه‌ها در نرخ کرنش  $0.5 \text{ s}^{-1}$  و در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.

#### ۳-۳- اندازه‌گیری ابعاد نمونه‌ها

دقت در اندازه‌گیری ابعاد نمونه‌ها قبل و بعد از انجام آزمایش تأثیر زیادی روی نتایج آزمایش دارد. ارتفاع و قطر داخلی نمونه‌ها با استفاده از میکرومتر اندازه گرفته شد.

1. PTFE

منحنی کالیبراسیون بدست آمده از شبیه‌سازی المان محدود و نتایج آزمایش تجربی فشار حلقه را با روانکارهای مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۸ نمونه‌های فشار داده شده تحت روانکارهای مختلف

از روی نتایج آزمایش‌های فشار داغ حلقه، واضح است که کاربرد روانکارهای مختلف ابعاد هندسی مختلفی در حلقه تولید می‌کند. برای مثال افزایش قطر داخلی با استفاده از روانکارهایی با ضریب اصطکاک برشی کم مثل تفلون ناشی می‌شود، در حالی که کاهش قطر داخلی با روانکارهایی مثل گرافیت که ضریب اصطکاک برشی بالایی دارند ناشی می‌شود.

ضریب اصطکاک برشی بالاتر یعنی  $m=0/40$  دارد. گرافیت با بیشترین ضریب اصطکاک برشی مشاهده شده در بین روانکارها یعنی  $m=0/48$  کمترین روانکاری را دارد. حالت بدون روانکار (خشک) ضریب اصطکاک برشی  $m=0/69$  را دارا می‌باشد. بنابراین تفلون استفاده شده در آزمایش فشار حلقه آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد بهترین روانکاری را دارا می‌باشد. میانگین  $m$  برای حالات مختلف روانکاری در جدول ۲ نشان داده شده است.

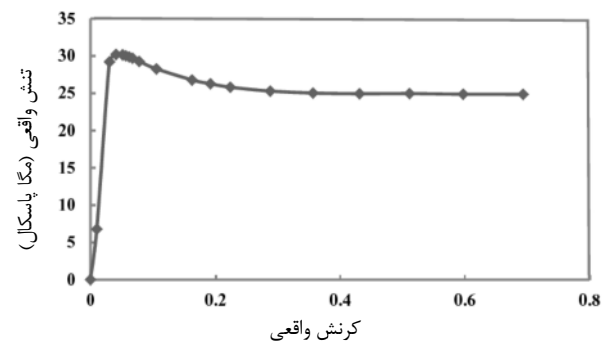
جدول ۲ میانگین ضریب اصطکاک برشی برای روانکارهای مختلف

تفلون	ورقه میکا	گرافیت	خشک
۰/۳۲	۰/۴۰	۰/۴۸	۰/۶۹

المان محدود و آزمایش تجربی درباره آزمایش فشار حلقه امکان‌پذیر باشد. ضریب اصطکاک برشی  $m$  در سطح تماس قطعه و قالب با استفاده از قانون اصطکاک ثابت از تانسورهای تنش بدست می‌آید.

در مدل‌سازی المان محدود قالب‌های بالا و پایین صلب انتخاب می‌شوند. شبیه‌سازی‌های اجزای محدود با ۹ ضریب اصطکاک برشی از  $m=0$  تا  $m=1$  انجام شد و با تغییرات ابعاد بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی‌ها منحنی کالیبراسیون اصطکاکی رسم شد. برای بدست آوردن ضریب اصطکاک برشی روانکارهای استفاده شده، باید تغییرات ابعاد نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی‌ها مقایسه شود تا با تشخیص نزدیک‌ترین منحنی شبیه‌سازی به منحنی تجربی، فاکتور اصطکاک موجود در تست مربوط به هر یک از روانکارها برآورد شود.

شکل ۷ مراحل تغییر شکل در شبیه‌سازی فشار حلقه را نشان می‌دهد. در انجام شبیه‌سازی نمونه‌ها به ۲۹۲۵۵ المان و ۷۱۸۳ گره تقسیم شدند.



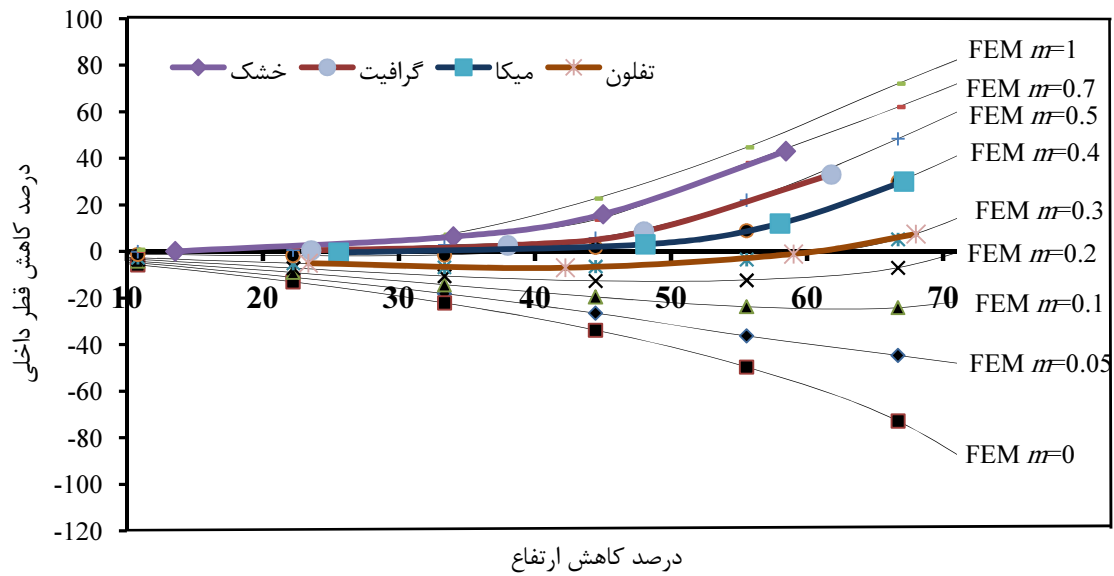
شکل ۶ منحنی تنش-کرنش در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد



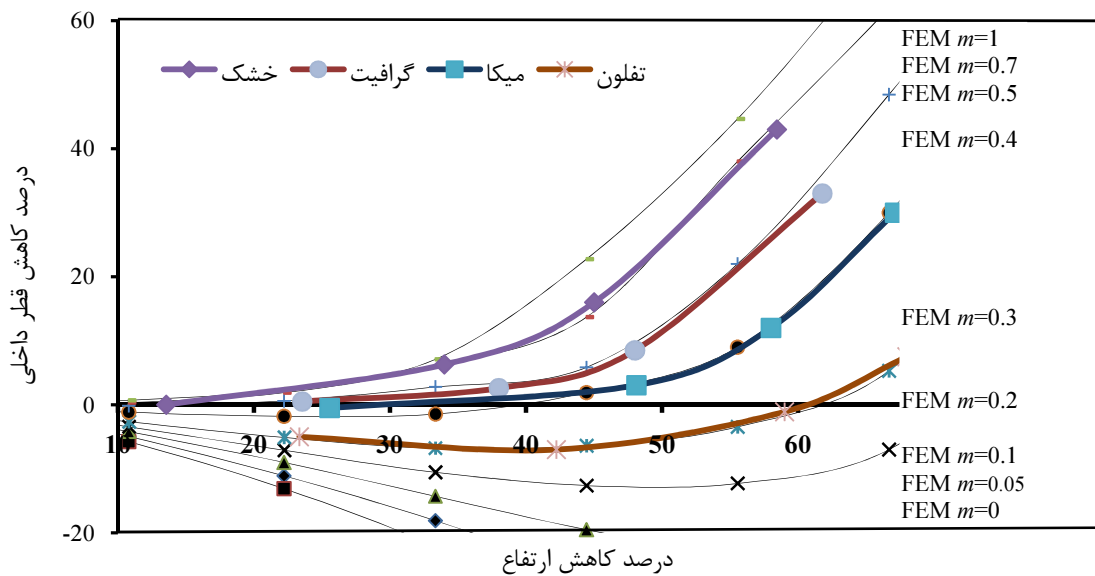
شکل ۷ شبیه‌سازی المان محدود آزمایش فشار حلقه

## ۵- بحث و نتیجه‌گیری

حلقه‌های تغییر شکل داده شده بعد از انجام آزمایش برای هر یک از روانکارها در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل ۹



الف- منحنی کالیبراسیون اصطکاکی و نتایج تجربی قرار داده شده در داخل این منحنی



ب- منحنی کالیبراسیون با بزرگنمایی برای وضوح بیشتر

شکل ۹ منحنی کالیبراسیون اصطکاکی تجزیه و تحلیل منحنی‌های کالیبراسیون تفلون ضریب اصطکاک برشی  $m=0.32$  و میکا

## ۶- نتیجه گیری

شرایط اصطکاکی در فرایند آهنگری داغ آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ بررسی شد. گرافیت، تفلون و ورقه‌های میکا به عنوان روانکار در این آزمایش استفاده شدند. بعضی از آزمایش‌ها بدون روانکار برای مقایسه نتایج انجام شد. منحنی‌های کالیبراسیون با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود بدست آمده سپس نتایج تجربی در آن جایگذاری شد. ضریب اصطکاک برشی برای هر

حالت تغییر شکل و روانکاری بدست آمد. نتایج نشان داد که بهترین روانکار برای آهنگری داغ این آلیاژ تفلون با ضریب اصطکاک برشی  $m=0.32$  می‌باشد. آهنگری داغ بدون روانکار هم ضریب اصطکاک برشی  $m=0.69$  برای آلیاژ دارد.

## ۷- مراجع

- [1] Robinson T., Ou H., Armstrong C.G., "Study on Ring Compression Test Using Physical Modeling and FE Simulation", *Journal of Materials*

- [9] Shahriari D., Amiri A., Sadeghi MH., "Study on Hot Ring Compression Test of Nimonic 115 Superalloy using Experimental Observations and 3D FEM Simulation", *J. Mater Eng Perform*, Vol. 19, 2010, pp. 633-42.
- [10] Zhu Y., Zeng W., Ma X., Tai Q., Li Z., Li X., "Determination of the Friction Factor of Ti-6Al-4V Titanium alloy in hot forging by means of ring-compression test using FEM", *Tribology International*, Vol. 23, July 2011, pp. 119-127.
- [11] Kobayashi S., Oh S.I., Altan T., *Metal Forming and the Finite Element Method*, Oxford University Press, New York, 1989, Chap. 1-9, 12, 14.
- [12] Schey J.A., "Tribology in Metal Working Friction Lubrication and Wear", *ASM International*, Vol. 6, 1983, Chap. 1-5, 9.
- [13] Stuzalec A., *Theory of Metal Forming Plasticity Classical and Advanced Topics*, Springer, Berlin, Germany, 2004, Chap. 1-6, 9-13, 15, 16.
- [14] Ashton M., Pany D.J., "The Effects of Friction on the Compressive Behaviour of High Strength Steels", *J. Phys IV France*, Vol. 7, 1997.
- [15] Avitzur B., "Forging of Hollow Discs", *Israel J. Technol*, Vol. 2, 1964, pp. 295-304.
- Processing Technology*, Vol. 154, 2004, pp. 54-59.
- [2] Kunogi M., "A New Method of Cold Extrusion", *J. Sci. Res. Inst*, Vol. 50, 1956, pp. 215-246.
- [3] Male A.T., Cockcroft M.G., "A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Condition of Bulk Plastic Deformation", *J. Inst. Met*, Vol. 93, 1964, pp. 38-46.
- [4] Male A.T., "The Effect of Temperature on the Frictional Behavior of Various Metals During Mechanical Working", *J. Inst. Metals*, Vol. 93, 1965, pp. 489-497.
- [5] Male A.T., "Variations in Friction Coefficients of Metals During Compressive Deformation", *J. Inst. Metals*, Vol. 94, pp. 121-125.
- [6] Felder E., Montagut J.L., "Friction and Wear During the Hot Forging of Steels", *Tribol. Int*, 1980, pp. 61-68.
- [7] Sofuoglu H., Gedikli H., Rasty J., "Determination of Friction Coefficient by Employing the Ring Compression Test", *J. of Engineering Materials and Technology*, 2001, p. 338.
- [8] Male A.T., Depierre V., Saul G., "The Relative Validity of Concept of Coefficient of Friction and Interface Friction Shear Factor for Use in Metal Deformation Studies", *ASLE Trans*, Vol. 16, 1973, pp. 177-184.