



## تعیین پارامترهای رئولوژیکی مدل کراس برای آلیاژ نیمه جامد آلومینیوم 7075 با استفاده از آزمون‌های تست فشار و اکستروژن معکوس

رامین مشک آبادی<sup>1</sup>، قادر فرجی<sup>2\*</sup>، وحید پویافار<sup>3</sup>، اکبر جاودانی<sup>4</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

4- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

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

### چکیده

آلیاژهای فلزی در محدوده دمای نیمه جامد رفتار رئولوژیکی مشابه سیالات غیر نیوتنی نشان می‌دهند. چنین رفتاری را می‌توان با استفاده از مدل‌های رئولوژیکی توصیف نموده و برای تعیین پارامترهای این مدل‌ها از روش‌های ویسکومتری معمول استفاده نمود. در این تحقیق، ویسکوزیته آلیاژ نیمه جامد آلومینیوم 7075 با استفاده از نتایج سیگنال‌های نیرو - جابجائی حاصل از دو آزمون فشار در بین صفحات موازی و اکستروژن معکوس اندازه‌گیری شد و برای تعیین پارامترهای مدل کراس در محدوده وسیعی از نرخ برش مورد استفاده قرار گرفت. تاثیر پارامترهای نرخ برش و دما (میزان کسر جامد) بر روی ویسکوزیته آلیاژ بررسی گردید. مشاهده گردید که رفتار این آلیاژ در محدوده نیمه جامد از نوع رقیق شونده برشی است که در آن با افزایش نرخ برش مقدار ویسکوزیته کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دما مقدار ماکزیم نیروی وارده به دلیل کاهش میزان کسر جامد و کاهش مقاومت در برابر سیلان ناشی از آن کاهش می‌یابد که سبب کاهش مقدار ویسکوزیته می‌گردد. نتایج نشان داد که مقادیر ویسکوزیته محاسبه شده توسط مدل چهارپارامتری کراس در مطابقت خوبی با نتایج تجربی به دست آمده در محدوده وسیعی از نرخ برش می‌باشد. همچنین نتایج شبیه سازی صورت گرفته نشانگر عملکرد بسیار خوب مدل ارائه شده برای پیش بینی خواص رئولوژیکی و رفتار سیلانی آلیاژ نیمه جامد در محدوده وسیعی از نرخ برش می‌باشد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 06 تیر 1395

پذیرش: 10 مرداد 1395

ارائه در سایت: 21 شهریور 1395

کلید واژگان:

آلیاژ آلومینیوم 7075

آزمون فشار در بین صفحات موازی

آزمون اکستروژن معکوس

مدل کراس

شکل دهی نیمه جامد

## Determination of rheological parameters of the Cross model for semi-solid Al7075 by using parallel plate compression and backward extrusion experiments

Ramin Meshkabadi<sup>1</sup>, Ghader Faraji<sup>1\*</sup>, Vahid Pouyafar<sup>2</sup>, Akbar Javdani<sup>2</sup>

1- School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

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

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 26 June 2016  
Accepted 31 July 2016  
Available Online 11 September 2016

### Keywords:

7075 minium Alloy  
Compression Between Parallel Plate  
Backward Extrusion Test  
Cross Model  
Semi-Solid Forming

### ABSTRACT

Metallic alloys exhibit rheological behavior similar to non-Newtonian fluids in the semi-solid temperature range. This behavior can be described using rheological models. In this study, the viscosity of semi-solid 7075 aluminum alloy was measured by using the results of load-displacement signals obtained from two different experiments: parallel plate compression and backward extrusion. The obtained data were used to determine the parameters of the Cross model in a wide range of shear rates. The effects of temperature (solid fraction) and shear rate were studied on the viscosity of the alloy. The results showed that with increasing temperature and decreasing the solid fraction the resistance to flow decreases, resulting in a reduced amount of applied forces. This reduction in applied forces results in reducing the viscosity. It was observed that the behavior of semi-solid alloy is shear thinning in which the viscosity decreases with increasing shear rate. Also, the calculated viscosity values of the four parameters Cross model were in good agreement with the obtained experimental results in a wide range of shear rates. The simulation results showed good agreement of the presented model for predicting the rheological properties and flow behavior of the semi-solid alloy in a wide range of shear rates.

### 1- مقدمه

فلزات و آلیاژهای آن‌ها به قطعات با ابعاد نزدیک به ابعاد نهایی است. این روش برای تولید قطعات پیچیده با ساختار و خواص مکانیکی برتر و با قیمت مقرون به صرفه مناسب است. فرایند شکل دهی نیمه جامد در محدوده دمائی

فرایندهای شکل دهی نیمه جامد<sup>1</sup> یک روش نسبتاً جدید برای شکل دادن

<sup>1</sup> Semi-Solid Forming

Please cite this article using:

R. Meshkabadi, Gh. Faraji, V. Pouyafar, A. Javdani, Determination of rheological parameters of the Cross model for semi-solid Al7075 by using parallel plate compression and backward extrusion experiments, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 97-106, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

با ساختار تیگزوتروپیک<sup>9</sup> تمرکز پیدا کرده است و در خصوص ارائه مدل‌های مناسب برای بیان رفتار سیالیتی ماده در داخل قالب تحقیقات کمتری صورت گرفته است.

با توجه به اینکه اکثر مدل‌های مورد استفاده تا به امروز تنها در بازه محدودی از نرخ‌های برش قابل اعمال هستند در این تحقیق جهت در نظر گرفتن محدوده وسیع نرخ‌های برش که در فرایندهای صنعتی شکل دهی نیمه جامد مشاهده می‌گردد از مدل چهار پارامتری کراس استفاده شده است و از دو سری آزمون مختلف برای پیدا کردن پارامترهای مدل استفاده شده است. دسته اول شامل آزمون‌های اکستروژن معکوس<sup>10</sup> برای اعمال نرخ‌های برش بالا می‌باشد. در این آزمون پاسخ نیروی وارده بر ماده نیمه جامد در حین فرایند اکستروژن معکوس در مقابل جابجایی صورت گرفته، توسط سیستم داده برداری سریع اندازه‌گیری می‌شود. دسته دوم آزمون‌ها شامل تست فشار در صفحات موازی<sup>11</sup> برای اعمال نرخ‌های کرنش کم می‌باشد. از روی نتایج این دسته از آزمون می‌توان مقادیر ویسکوزیته در نرخ‌های برش کم را اندازه‌گیری نمود.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- تهیه ریز ساختار نیمه جامد

آلیاژ مورد بررسی در این تحقیق آلومینیوم 7075 می‌باشد که ترکیب شیمیایی آن در جدول 1 نشان داده شده است. برای تهیه ماده اولیه با ساختار کروی از فرایند پرسکاری در کانال‌های زاویه‌ای با مقطع یکسان<sup>12</sup> استفاده گردید [8]. برای رسیدن به ریز ساختار بهینه، نمونه‌ها در دمای اتاق از طریق مسیر BA تحت پنج پاس فرایند ECAP قرار گرفتند و سپس جهت کروی شدن ریزساختار در داخل کوره مقاومتی به مدت 15 دقیقه نگهداری شدند.

### 2-2- آزمایش فشار در بین صفحات موازی

رفتار تغییر شکل ماده نیمه جامد در نرخ‌های برشی کم توسط آزمایش فشار در بین صفحات موازی مطالعه می‌شود [9]. در این آزمایش نمونه ای به قطر 12 و ارتفاع 16 میلی‌متر از نمونه‌های ECAP شده ماشینکاری گردید و سپس در بین دو صفحه فولادی موازی در داخل کوره قرار گرفت. نمونه در دمای نیمه جامد مورد نظر حرارت دهی شده و پس از اینکه به مدت معین 15 دقیقه نگهداری گردید با نرخ‌های کرنش معین تحت فشار قرار گرفت. در این آزمایش سطح صفحات و نیز پیشانی نمونه ماشینکاری شده و توسط اسپری  $MoS_2$  پوشانده شد تا نقش اصطکاک در انجام فرایند به حداقل ممکن برسد. در جدول 2 شرایط انجام آزمایش و پارامترهای مربوطه آورده شده است. با استفاده از یک سیستم داده برداری سریع و دقیق تغییرات نیروی وارده به نمونه نسبت به جابجایی رم اندازه‌گیری می‌شود. ملزومات چنین سیستمی عبارتند از سنسور اندازه‌گیری نیرو، سنسور اندازه‌گیری جابجایی و نیز نرم افزار همزمان سازی ثبت داده‌ها که بتواند داده برداری

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 7075 (درصد جرمی)

Table 1 Chemical composition of Al 7075 (mass fraction, %)

Si	Fe	Mn	Cr	Cu	Mg	Zn	Al
0.333	0.405	0.139	0.229	1.51	2.25	5.27	فلز پایه

<sup>9</sup> Thixotropic

<sup>10</sup> Backward Extrusion

<sup>11</sup> Compression Between Parallel Plate

<sup>12</sup> Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

بین دمای حد انجماد (سالیدوس<sup>1</sup>) و حد مذاب (لیکویدوس<sup>2</sup>) انجام می‌شود. اولین مرحله در انجام این فرایند به دست آوردن ساختار تا حد ممکن کروی و بدون مذاب حبس شده می‌باشد. در مرحله بعد قطعه کار به دست آمده تا دمای نیمه جامد حرارت دهی شده و پس از نگهداری تا زمان معین در این دما شکل دهی می‌شود [1].

داشتن دانش مناسب از مدل سیالیتی ماده برای مدل سازی عددی فرایند شکل‌دهی بسیار ضروری است و منجر به انجام موفقیت آمیز فرایند شکل دهی می‌گردد. با توجه به اینکه فرایند شکل دهی نیمه جامد در کسر بسیار کوچکی از زمان انجام می‌گیرد امکان بررسی خواص سیالیتی توسط روش‌های تجربی وجود ندارد و لازم است از روش‌های شبیه سازی و توسط معادلات ساختاری برای این منظور استفاده گردد. استفاده از معادلات ساختاری در سال‌های اخیر برای پیش بینی رفتار سیالیتی آلیاژهای نیمه جامد گسترش یافته است چرا که با استفاده از آن‌ها می‌توان به بهینه سازی پارامترهای فرایند و مطالعه تئوریک فرایند پرداخت [2].

برای توصیف رفتار سیالیتی آلیاژهای نیمه جامد معادلات ساختاری متعددی ارائه شده است. بیشترین معادلات استفاده شده عبارتند از مدل توانی<sup>3</sup> و مدل بینگهام پلاستیک<sup>4</sup> که هر کدام از آن‌ها دارای دو پارامتر قابل تنظیم هستند [4,3]. مدل توانی توصیف کننده رفتار رقیق شونده<sup>5</sup> و غلیظ شونده برشی<sup>6</sup> بوده و مدل بینگهام پلاستیک تنش تسلیم آلیاژ را در بر می‌گیرد [5]. در این دو مدل امکان توصیف تمام خواص رئولوژیکی ماده به ویژه در محدوده وسیعی از نرخ برش وجود ندارد.

مدل‌های رئولوژیکی دیگری نیز وجود دارند که دارای سه پارامتر قابل تنظیم هستند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان سیلان ماده را در نرخ‌های برشی بالا و پایین و نیز محدوده مدل توانی توصیف نمود. مدل هرشل بالکلی<sup>7</sup> نمونه‌ای از این مدل‌ها می‌باشد که با در نظر گرفتن تنش تسلیم ماده در مدل توانی کاستی‌های مدل‌های اشاره شده را می‌تواند رفع نماید [6].

مدل‌های چهار پارامتری دسته دیگری از مدل‌ها هستند که می‌توانند در محدوده وسیعی از نرخ‌های برش سیلان ماده را پیش بینی نمایند. یکی از این نوع مدل‌ها مدل کراس<sup>8</sup> می‌باشد که سیلان شبه پلاستیک ماده را با در نظر گرفتن ویسکوزیته در نرخ‌های برشی کم ( $\eta_0$ ) و نرخ‌های برشی بالا ( $\eta_{\infty}$ ) بیان می‌کند. به طور کلی امکان برازش منحنی جهت تعیین پارامترهای مدل‌های چهار پارامتری به دلیل نبود داده‌های کافی وجود ندارد اما در عوض این مدل‌ها می‌توانند به خوبی رفتار سیالات غیر نیوتنی مانند آلیاژهای نیمه جامد را پیش بینی نمایند.

تحقیقات صورت گرفته در خصوص شکل دهی نیمه جامد آلیاژهای آلومینیوم عموماً بر روی آلیاژهای ریختگی انجام شده اند که دارای خاصیت شکل پذیری زیادی هستند. از سوی دیگر آلیاژهای کارپذیر مانند آلیاژهای سری 7000 که دارای خواص مکانیکی برتر بوده و در صنایع هوا و فضا مورد استفاده قرار می‌گیرند کمتر مورد توجه قرار گرفته اند. بنابراین تحقیقات در خصوص شکل دهی نیمه جامد این آلیاژها دارای اهمیت زیادی است [7]. از طرفی بررسی خواص رئولوژیکی آلیاژ آلومینیوم 7075 در منابع کمتری صورت گرفته است و بیشتر تحقیقات صورت گرفته در حوزه تولید بیلت اولیه

<sup>1</sup> Solidus

<sup>2</sup> Liquidus

<sup>3</sup> Power-Law Model

<sup>4</sup> Bingham Plastic Model

<sup>5</sup> Shear Thinning

<sup>6</sup> Shear Thickening

<sup>7</sup> Herschel-Bulkley Model

<sup>8</sup> Cross Model

خطی با طول اکستروژن شده افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش سطح تماس بین سنبه و سیال می‌باشد. در حالتی که سرعت اکستروژن ثابت باشد ویسکوزیته ظاهری سیال را می‌توان با اندازه گیری شیب قسمت خطی نمودار نیرو - زمان ( $dF/dt$ ) و در صورت ثابت نبودن سرعت پیستون با اندازه گیری شیب قسمت خطی نمودار نیرو - جابجایی ( $dF/dx$ ) فرایند اکستروژن معکوس با استفاده از رابطه (3) تعیین کرد [10]:

$$\eta_{app} = \frac{1}{2\pi\lambda C_1 V_r} \frac{dF}{dt} = \frac{1}{2\pi\lambda C_1} \frac{dF}{dx} \quad (3)$$

که در آن  $\lambda$  نسبت اکستروژن می‌باشد که بر اساس شعاع محفظه  $R_c$  و شعاع سنبه  $R_p$  توسط رابطه (4) تعیین می‌گردد،  $V_r$  سرعت رم و  $C_1$  ثابتی است که توسط رابطه (5) تعیین می‌گردد.

$$\lambda = \frac{R_c^2}{R_c^2 - R_p^2} \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{1}{\ln\left(\frac{R_p}{R_c}\right)} \cdot (C_2 \cdot (R_c^2 - R_p^2) - V_r) \quad (5)$$

و ثابت  $C_2$  طبق رابطه (6) تعیین می‌گردد:

$$C_2 = \frac{V_r \cdot (2\ln\frac{R_c}{R_p} - 1)}{(R_c^2 + R_p^2) \cdot \ln\frac{R_c}{R_p} - (R_c^2 - R_p^2)} \quad (6)$$

مقدار نرخ برش متناظر در فاصله گپ بین محفظه و سنبه را می‌توان توسط رابطه (7) محاسبه نمود:

$$\dot{\gamma}_{av} = \frac{C_1 \cdot \left\{ \ln\left(\frac{-C_1}{2C_2 R_c R_p}\right) - 1 \right\} - C_2 \cdot (R_c^2 + R_p^2)}{R_c - R_p} \quad (7)$$

روابط فوق به طور تجربی در تست‌های اکستروژن معکوس روغن‌های نیوتنی با مقادیر مشخص ویسکوزیته و در محدوده گسترده‌ای از نرخ‌های برشی مورد صحنه گذاری قرار گرفته اند. بررسی‌های صورت گرفته نشان داده است که نتایج تئوری و تجربی دارای مطابقت بسیار خوبی با هم هستند [11]. در شکل 2 قالب طراحی شده برای انجام این آزمایش به همراه سنبه‌های مورد نظر در قطره‌های مختلف و نیز نمونه اکستروژن معکوس شده نشان داده شده است. در جدول 3 شرایط فیزیکی انجام آزمایش و نیز نرخ‌های برش متناسب با هر کدام نشان داده شده است.

جدول 2 شرایط انجام آزمون فشار و پارامترهای مربوطه

نرخ برش (1/s)	کسر جامد (%)	سرعت رم (mm/s)
0.01, 0.1, 1	50, 60	500

صورت گرفته را به صورت آفلاین ذخیره کرده و در فرمت مناسب ارائه نماید. در شکل 1 سیستم داده برداری مورد استفاده و نیز نحوه قرارگیری اجزا نشان داده شده است. با انجام این آزمون و با اعمال کرنش  $\varepsilon$  (برابر تغییر ارتفاع از ارتفاع اولیه  $h_0$  به ارتفاع لحظه‌ای  $h_\varepsilon$ ) ویسکوزیته ظاهری  $\eta_{app}$  را می‌توان با در دست داشتن  $F_\varepsilon$  (نیروی لحظه‌ای) و  $h_\varepsilon$  (ارتفاع لحظه‌ای) با استفاده از رابطه (1) تعیین کرد [10]:

$$\eta_{app} = \frac{2\pi h_\varepsilon^4}{3V^2 \varepsilon} \cdot F_\varepsilon = \frac{2\pi h_\varepsilon^5}{3V^2} \cdot \frac{dF_\varepsilon}{dt} \quad (1)$$

که در آن  $V$  حجم نمونه و  $dh/dt$  سرعت رم می‌باشد. مقدار میانگین نرخ برش اعمال شده  $\dot{\gamma}_{av}$  برابر است با [10]:

$$\dot{\gamma}_{av} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{V}{\pi h_\varepsilon^3}} \varepsilon = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{V}{\pi h_\varepsilon^5}} \cdot \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

### 2-3- آزمون اکستروژن معکوس

رفتار تغییر شکل ماده نیمه جامد در نرخ‌های برشی بالا توسط فرایند اکستروژن معکوس مورد مطالعه قرار می‌گیرد [10]. در این آزمون پاسخ نیروی وارده بر ماده نیمه جامد در حین فرایند اکستروژن معکوس در مقابل جابجایی صورت گرفته، توسط سیستم داده برداری سریع اندازه‌گیری می‌شود. برای این منظور نمونه ECAP شده به اندازه مورد نظر (بر اساس قطر سنبه) ماشینکاری شده و پس از آن که قالب بر اساس سیکل گرمایش به دست آمده به دمای مورد نظر رسید، نمونه در داخل قالب قرار داده شده و به مدت زمان معین به صورت هم‌دمای نگهداری شده و سپس تحت شکل دهی قرار می‌گیرد. به ازای هر کسر جامد مورد نظر یک سری آزمون تحت نرخ‌های برش ذکر شده انجام شده است.

برای سیالات نیوتنی ثابت شده است که مقدار نیروی اکستروژن به طور



Fig. 1 Components of the data acquisition system and their placement

شکل 1 اجزاء مربوط به سیستم داده برداری و نحوه قرارگیری آن‌ها

می‌باشد و امکان نفوذ فاز مایع در آن وجود ندارد در اثر تغییر شکل الاستیک و پلاستیک فاز جامد پدیده کرنش سختی اتفاق افتاده و مقدار تنش وارده به سرعت افزایش می‌یابد. در مرحله دوم با نفوذ فاز مایع در اطراف مرز دانه‌های فاز جامد و تشکیل فیلم مایع، ساختار دانه بندی مستحکم مرحله اول سست شده و نیروهای وارده به شدت کاهش می‌یابند تا اینکه در مرحله سوم پس از رسیدن به حالت تعادل شاهد تغییرات چندانی در میزان تنش وارده با افزایش جابجائی نخواهیم بود. همچنان که مشاهده می‌گردد با کاهش دما (افزایش کسر جامد) و در نرخ‌های برشی ثابت مقدار حداکثر تنش واقعی افزایش می‌یابد؛ چرا که با افزایش میزان کسر جامد آلیاژ به دلیل تشکیل باندهای قوی بین ذرات جامد مقاومت آلیاژ در برابر سیلان افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش نیروی لازم برای شکل دهی می‌گردد [12].

### 3-3- منحنی‌های نیرو - جابجائی آزمون اکستروژن معکوس

در شکل‌های 5 و 6 نتایج آزمون اکستروژن معکوس در مقادیر کسر جامد 0.5 و 0.6 درصد بر اساس شرایط جدول 3 آورده شده است. همچنان که مشاهده می‌گردد منحنی نیرو - جابجائی را از لحظه تماس سنبه با نمونه می‌توان به دو قسمت اصلی تقسیم نمود: قسمت اول که در آن نمونه فشرده شده و نیرو به طور سریع افزایش یافته و به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد که علت این امر می‌تواند پدیده کرنش سختی باشد. پس از این مرحله مقدار نیروی وارده با افزایش مقدار کم جابجائی کاهش می‌یابد که علت آن می‌تواند به شکست ساختار دانه بندی فاز جامد و نیز تبلور مجدد دینامیکی مربوط باشد. پس از این مرحله به دلیل افزایش یافتن سطح تماس بین نمونه و قالب و اصطکاک ناشی از آن مقدار نیرو با افزایش جابجائی بیشتر خواهد شد [13]. با استفاده از اطلاعات به دست آمده از منحنی تنش - کرنش هر دو آزمون و با استفاده از روابط (1) و (3) می‌توان مقادیر ویسکوزیته متناظر با نرخ‌های برشی اعمال

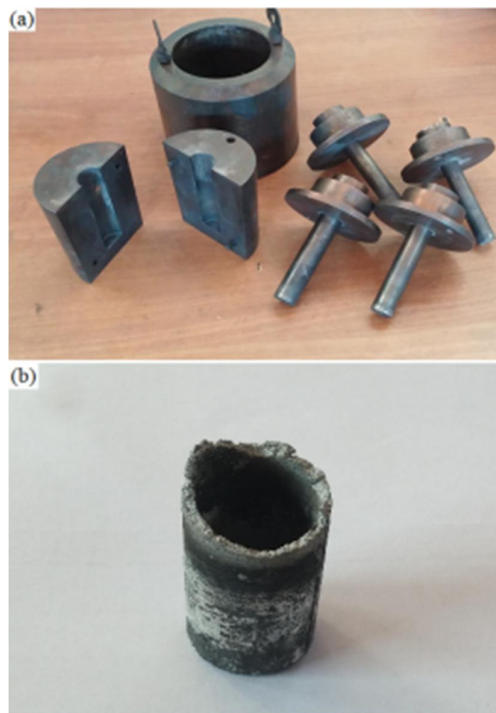


Fig. 2 (a) Designed mold and (b) Extruded part

شکل 2 (a) قالب طراحی شده و (b) نمونه اکستروژد شده

جدول 3 شرایط فیزیکی انجام آزمون‌های اکستروژن معکوس و نرخ‌های برشی متناظر با آن‌ها

Table 3 Physical conditions of backward extrusion tests and corresponding shear rates

$\dot{\gamma}$ (1/s)	$V_r$ (mm/s)	$R_p$ (mm)	$R_c$ (mm)
1127		9	
419	100	8.5	10
191		8	
94		7.5	
789		9	
293	70	8.5	10
133		8	
66		7.5	

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- ریز ساختار ماده اولیه

در شکل 3 ریز ساختار ماده اولیه و نیز آلیاژ نیمه جامد تهیه شده تحت شرایط ذکر شده نشان داده شده است. همچنان که مشاهده می‌گردد ریز ساختار ماده اولیه شامل ذرات بسیار ریز پراکنده در ساختار دانه‌ای می‌باشد که از ویژگی‌های اصلی این آلیاژ می‌باشد. ریزساختار نیمه جامد شامل فاز جامد کروی شکل پراکنده در فاز مایع می‌باشد که دارای فاکتور شکل و عدد اندازه دانه مناسب برای فرایند شکل دهی نیمه جامد می‌باشد و وجود چنین ریز ساختاری باعث کاهش میزان نیروی مورد نیاز برای شکل دهی می‌شود.

#### 3-2- منحنی‌های تنش - کرنش آزمون فشار

در شکل 4 نمودار تغییرات تنش واقعی - کرنش واقعی در نرخ‌های کرنش مختلف به دست آمده از آزمون فشار نشان داده شده است. در این منحنی‌ها تغییرات تنش بر حسب کرنش وارده دارای رفتار متفاوتی به شرح زیر می‌باشد: در مرحله اول که ساختار دانه بندی فاز جامد کاملاً مستحکم

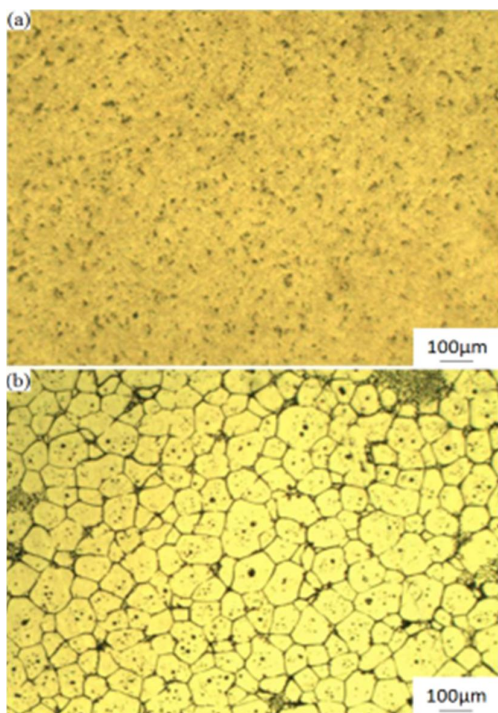


Fig. 3 Microstructure of (a) raw material and (b) ECAPed semi-solid alloy

شکل 3 ریز ساختار (a) ماده اولیه و (b) آلیاژ ECAP شده نیمه جامد

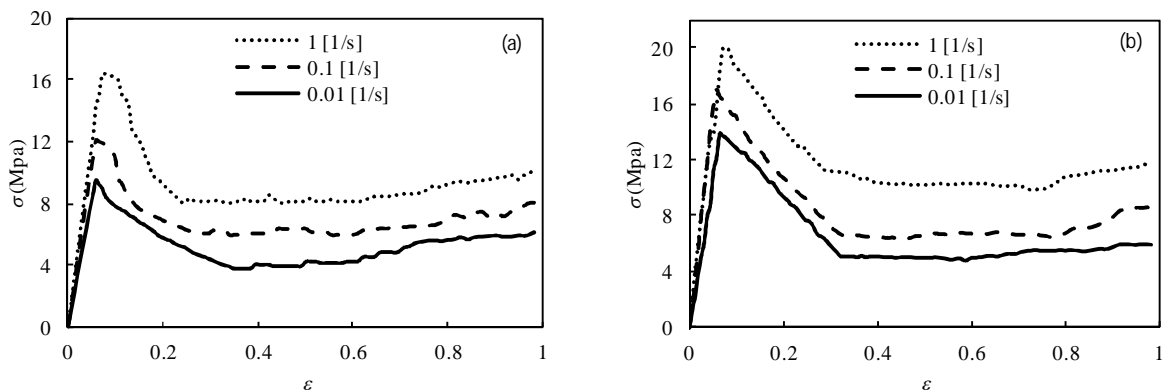


Fig. 4 Variations of true stress - true strain at different shear rates obtained from the compression test (a)  $f_s=0.5$ , (b)  $f_s=0.6$

شکل 4 تغییرات تنش واقعی - کرنش واقعی آلیاژ در نرخ‌های برشی مختلف حاصل از آزمون فشار (a)  $f_s=0.5$  و (b)  $f_s=0.6$

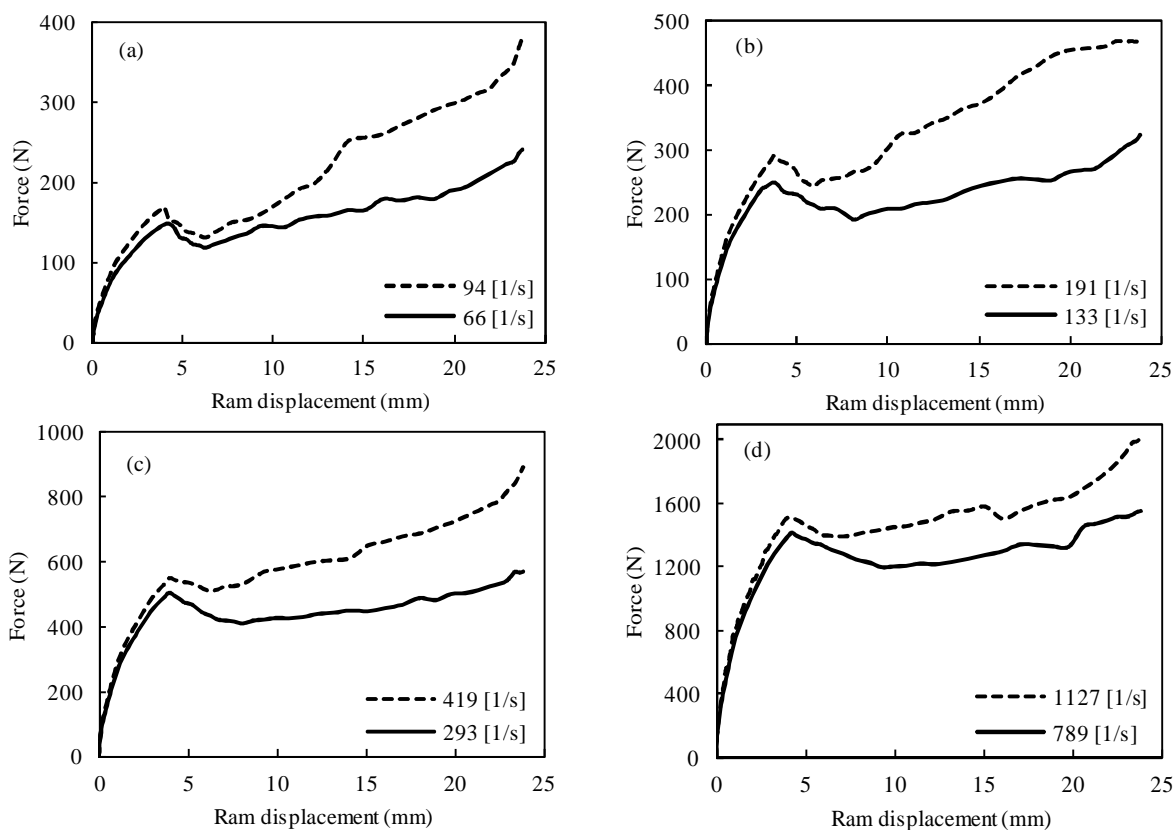


Fig. 5 Variations of force versus ram displacement at 0.5% solid fraction and punch diameters: a-15mm, b-16mm, c-17mm, d-18 mm

شکل 5 تغییرات نیرو بر حسب جابجایی رم در کسر جامد 0.5 درصد و قطرهای سنبه: a-15 mm, b-16 mm, c-17 mm, d-18 mm

حرکت می‌کنند که باعث کاهش ناگهانی ویسکوزیته در همان لحظات اولیه فرایند برش می‌شوند. فاز مایع در این حالت به عنوان روان کننده عمل کرده و به لغزش فاز جامد کروی کمک می‌کند. با گذشت بیشتر زمان ویسکوزیته آلیاژ به سمت مقدار ثابتی میل می‌کند. در این حالت تعامل بین ذرات جامد کروی و فرایند انباشته شدن و شکستن به حالت تعادل می‌رسد. بنابراین واضح است که افزایش نرخ برش باعث افزایش تعداد باندهای شکسته شده میان فازهای جامد کروی شده و ویسکوزیته کاهش می‌یابد [14]. این همان رفتاری است که در شکل 7 دیده می‌شود.

شده را محاسبه نمود که نتایج به دست آمده در نموداری با مقیاس لگاریتمی در شکل 7 نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود رفتار سیلانی رقیق شونده با برش برای این آلیاژ کاملاً مشهود است. در این نوع رفتار در یک دمای ثابت با افزایش نرخ برش مقدار ویسکوزیته به صورت توانی کاهش پیدا می‌کند. با توجه به اینکه ریز ساختار آلیاژ نیمه جامد متشکل از ذرات کروی پخش شده در فاز مایع می‌باشد، در حال استراحت ذرات کروی توسط باندهای جامد به هم متصل شده‌اند. زمانی که آلیاژ نیمه جامد تحت برش قرار می‌گیرد به دلیل شکستن این باندها ذرات کروی بر روی همدیگر به راحتی

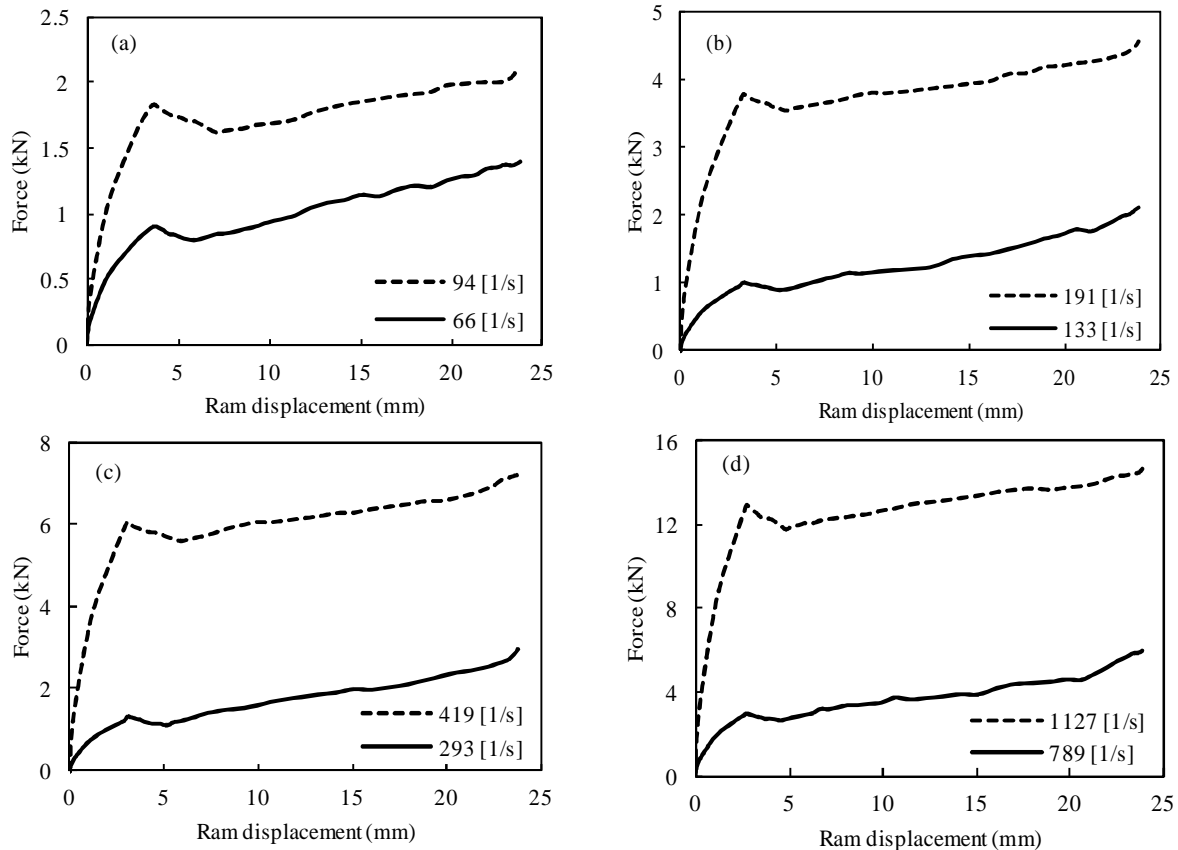


Fig. 6 Variations of force versus ram displacement at 0.6% solid fraction and punch diameters: a-15mm, b-16mm, c-17mm, d-18 mm  
 شکل 6 تغییرات نیرو بر حسب جابجایی رم در کسر جامد 0.6 درصد و قطرهای سنبه: a-15 mm, b-16 mm, c-17 mm, d-18 mm

برحسب  $\dot{\gamma}^n$  را برای توان‌های مختلف  $n$  رسم نمود به طوری که با در نظر گرفتن تغییرات زیر مقدار  $1/(\eta - \eta_\infty)$  بر حسب  $\dot{\gamma}^n$  باید رابطه‌ای خطی داشته باشد.

$$\frac{1}{\eta - \eta_\infty} = \frac{1 + k\dot{\gamma}^n}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{\eta_0 - \eta_\infty} + \frac{k}{\eta_0 - \eta_\infty} \dot{\gamma}^n \quad (9)$$

لازم به ذکر است که در معادله کراس تابع  $\dot{\gamma}^n$  یک تابع زوج می‌باشد و باید در تعیین پارامتر  $n$  مورد توجه قرار گیرد به طوری که:

$$\dot{\gamma}^n = (-\dot{\gamma})^n \rightarrow (-1)^n = +1 \quad (10)$$

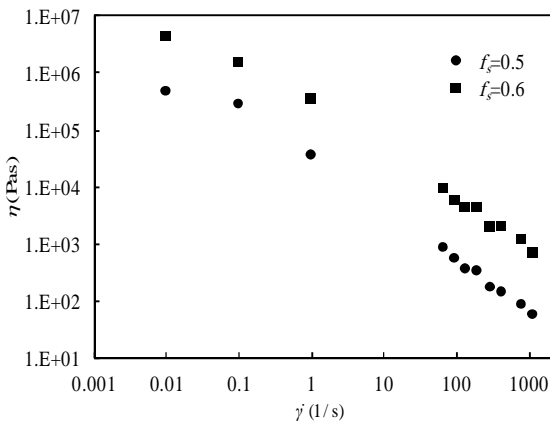


Fig. 7 Viscosity changes over a wide range of shear rates  
 شکل 7 تغییرات ویسکوزیته در محدوده وسیعی از نرخ برش

### 4-3- مدل سازی

مدل‌های بسیار زیادی برای رفتار شبه پلاستیک ارائه شده اند که برخی از آن‌ها پایه تئوری داشته و برخی دیگر جنبه تجربی دارند و بیشتر سعی در برازش داده‌ها دارند. یکی از مدل‌هایی که دارای مقبولیت زیادی می‌باشد و می‌تواند انحراف قابل توجه مدل توانی در نرخ‌های برشی بسیار بالا و بسیار پایین را کاهش دهد مدل کراس می‌باشد که مقادیر محدود کننده ویسکوزیته  $(\eta_\infty)$  و  $(\eta_0)$  را در نظر می‌گیرد [15]:

$$\eta - \eta_\infty = \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + k\dot{\gamma}^n} \quad (8)$$

که در آن  $\dot{\gamma}$  نرخ برش،  $k$  مقداری ثابت با واحد زمان و  $n$  یک ثابت بدون بعد است که معمولاً دارای مقدار بین 2/3 الی 1 می‌باشد و به ترتیب مقادیر ویسکوزیته در نرخ‌های برشی پایین و بالا می‌باشند. این مدل وقتی  $k \rightarrow 0$  به معادله سیال نیوتنی و در حالت‌هایی که  $\eta \gg \eta_0$  یا  $\eta \ll \eta_0$  به مدل توانی ساده تبدیل می‌شود. هرچند کراس ادعا کرد که مقدار  $n=2/3$  برای تخمین داده‌ها در بسیاری از سامانه‌ها کافی است اما امروزه محققان معتقدند که اصلاح مقدار  $n$  به عنوان یک پارامتر قابل تنظیم نسبت به استفاده از یک مقدار ثابت برای این پارامتر ارجح است [16].

### 5-3- پیدا کردن پارامترهای مدل

برای تعیین پارامترهای مدل ارائه شده لازم است قبل از تعیین پارامترهای  $k, \eta_\infty, \eta_0$  مقدار پارامتر  $n$  تعیین گردد. ابتدا می‌توان نمودار  $1/(\eta - \eta_\infty)$



مقدار  $n$  سه پارامتر بعدی معادله را می‌توان توسط روش‌های گرافیکی به دست آورد. در مقادیر بالای نرخ برشی که  $1 \gg k\dot{\gamma}^n$  باشد معادله کراس را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\eta = \eta_{\infty} + \left(\frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{k}\right)\dot{\gamma}^{-n} \quad (13)$$

که به معنای آن است که در مقادیر بالای نرخ برشی رابطه  $\eta$  بر حسب  $\dot{\gamma}^{-n}$  رابطه‌ای خطی خواهد بود که شیب آن برابر با  $(\eta_0 - \eta_{\infty})/k$  و عرض از مبدا آن برابر  $\eta_{\infty}$  خواهد بود. با توجه به شکل 10 مقدار  $\eta_{\infty}$  در کسر جامد 0.5 و 0.6 بر اساس عرض از مبدا معادله تخمین زده شده به دست می‌آیند. برای به دست آوردن پارامتر  $\eta_0$  از داده‌های مربوط به نرخ برشی کم استفاده می‌شود. با اعمال تغییرات زیر در معادله کراس خواهیم داشت:

$$\eta(1 + k\dot{\gamma}^n) = \eta_0(1 + \frac{\eta_{\infty}}{\eta_0}k\dot{\gamma}^n) \quad (14)$$

در نرخ‌های برش پایین که  $1 \gg k\dot{\gamma}^n$  می‌باشد خواهیم داشت:

$$\frac{\eta_0}{\eta} = 1 + k\dot{\gamma}^n \rightarrow \frac{1}{\eta} = \frac{1}{\eta_0} + \frac{k}{\eta_0}\dot{\gamma}^n \quad (15)$$

بنابراین نمودار  $1/\eta$  بر حسب  $\dot{\gamma}^n$  باید خطی بوده و عرض از مبدا آن برابر  $1/\eta_0$  و شیب آن برابر  $k/\eta_0$  خواهد بود. در شکل 11 نحوه بکارگیری رابطه (15) در تعیین پارامترهای  $\eta_0$ ،  $k$  نشان داده شده است. با توجه به مطالب بالا و نیز محاسبه پارامترهای مدل برای کسرهای جامد مورد نظر مقادیر پارامترهای به دست آمده در جدول 4 نشان داده شده است. همچنین که مشاهده می‌گردد مقدار پارامتر  $n$  برای این آلیاژ، مستقل از میزان کسر

که این رابطه زمانی صادق است که مقدار  $n$  یک عدد زوج باشد و با توجه به اینکه  $n \leq 1$  است بنابراین  $n$  مقداری کسری به صورت  $p/q$  می‌باشد که برای تامین شرط (10) باید  $p$  عددی زوج و  $q$  فرد باشد [15]. بنابراین مقادیر متناسب با  $n$  عبارتند از  $2/3, 4/5, 6/7, \dots$  که با رسم نمودار اشاره شده در شکل 8 مشاهده می‌گردد که به ازای مقدار  $n=6/7$  خط عبوری از نقاط مختلف به خط کامل نزدیک‌تر است و بنابراین مقدار  $n=6/7$  برای تخمین مناسب سیستم مناسب است. با توجه به اینکه  $\eta_{\infty}$  ویسکوزیته در مقادیر بالای نرخ برش می‌باشد و مقدار آن به دلیل رفتار رقیق شونده برشی نشان داده شده از طرف آلیاژ در مقایسه با مقادیر ویسکوزیته به دست آمده بسیار کوچک می‌باشد لذا می‌توان از مقدار آن در برابر  $\eta$  صرف‌نظر کرد. از طرف دیگر با اعمال تغییراتی مطابق با معادلات (11) و (12) در معادله کراس خواهیم داشت:

$$\eta - \eta_{\infty} = \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{k\dot{\gamma}^n} \quad (11)$$

$$\log(\eta - \eta_{\infty}) = \log\left(\frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{k}\right) - n\log\dot{\gamma} \quad (12)$$

با رسم نمودار  $\log(\eta - \eta_{\infty})$  بر حسب  $\log\dot{\gamma}$  و با در نظر گرفتن محدوده نرخ‌های برشی بالا که در آن  $1 \gg k\dot{\gamma}^n$  و با توجه به توضیحات داده شده رابطه بین  $\log\eta$  در برابر  $\log\dot{\gamma}$  رابطه‌ای خطی خواهد بود که در این صورت شیب خط رسم شده برابر با  $-n$  خواهد بود که در شکل 9 نشان داده شده است. معادله تخمین زده شده با نسبت  $R^2$  قابل قبول نشان دهنده شیب نزدیک به مقادیر به دست آمده از روش اول می‌باشد. با در دست داشتن

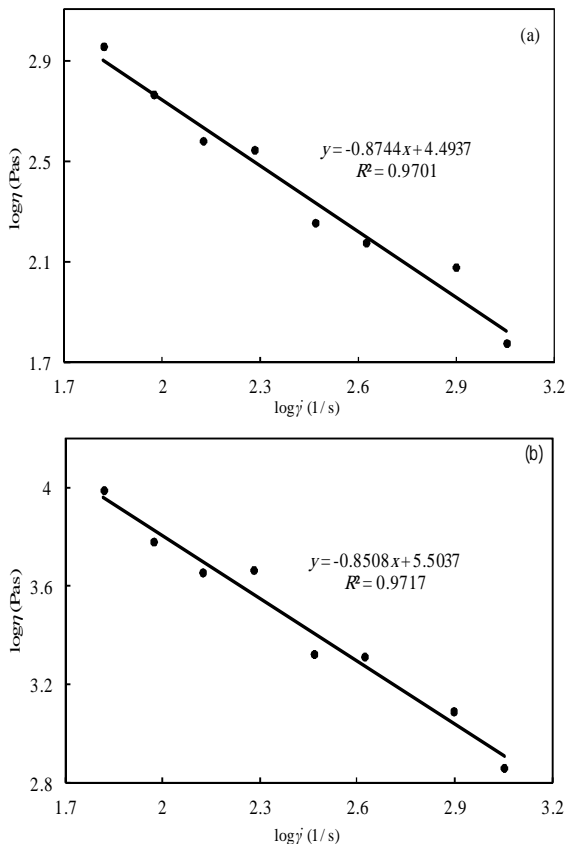


Fig. 9 The  $n$ -index value calculated based on the equation (12) (a)  $f_s=0.5$ , (b)  $f_s=0.6$

شکل 9 محاسبه مقدار اندیس  $n$  بر اساس معادله (12) (a)  $f_s=0.5$  (b)  $f_s=0.6$

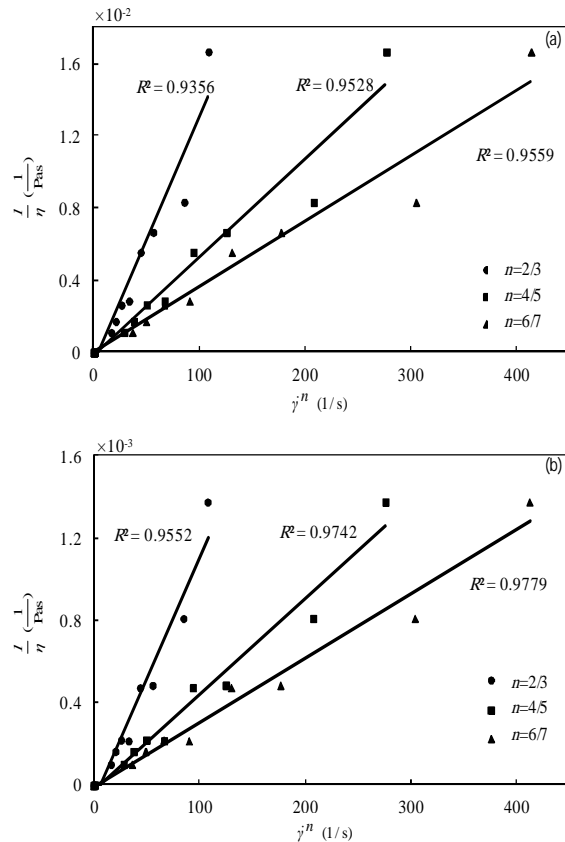


Fig. 8 Calculation of  $n$ -index value based on equation (9) (a)  $f_s=0.5$ , (b)  $f_s=0.6$

شکل 8 محاسبه مقدار اندیس  $n$  بر اساس معادله (9) برای (a)  $f_s=0.5$  (b)  $f_s=0.6$

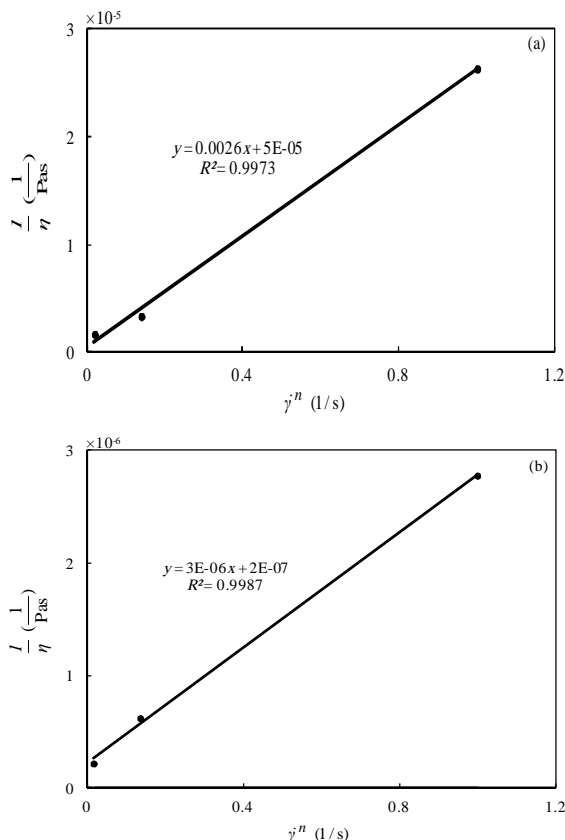


Fig. 11 Determining  $\eta_0$  and  $k$  values (a)  $f_s=0.5$ , (b)  $f_s=0.6$   
 شکل 11 تعیین پارامترهای  $\eta_0$  و  $k$  برای  $f_s=0.5$  (a) و  $f_s=0.6$  (b)

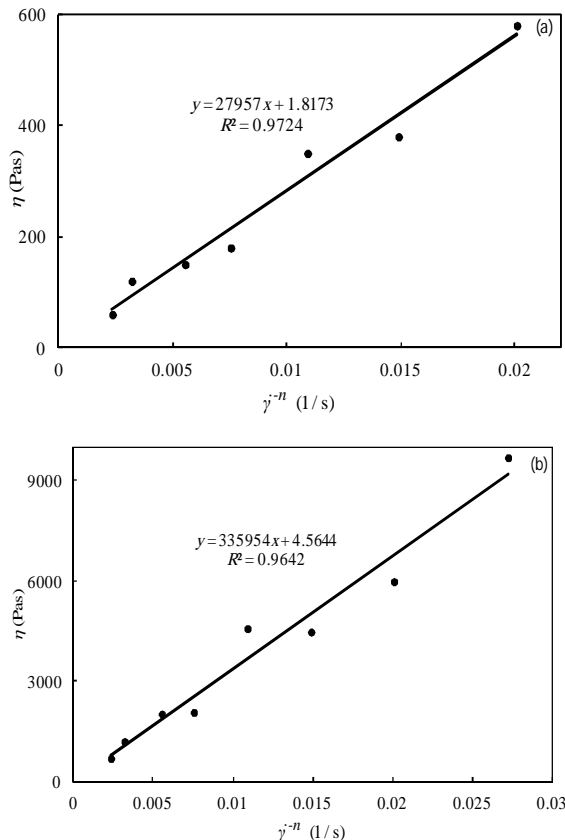


Fig. 10 Calculation of  $\eta_\infty$  value based on equation (13) (a)  $f_s=0.5$ , (b)  $f_s=0.6$   
 شکل 10 محاسبه مقدار  $\eta_\infty$  بر اساس معادله (13) (a)  $f_s=0.5$  و (b)  $f_s=0.6$

جدول 4 مقادیر پارامترهای به دست آمده مدل در کسرهای جامد مختلف

Table 4 Obtained values of model parameters in different solid fractions

مدل کراس	پارامتر				کسر جامد
	$k$	$\eta_0$	$\eta_\infty$	$n$	
$\eta = 1.81 + \frac{1999998.19}{1 + 60 \times \dot{\gamma}^{0.86}}$	60	$2 \times 10^6$	1.81	0.86	$f_s=0.5$
$\eta = 4.56 + \frac{4999995.44}{1 + 15 \times \dot{\gamma}^{0.86}}$	15	$5 \times 10^6$	4.56	0.86	$f_s=0.6$

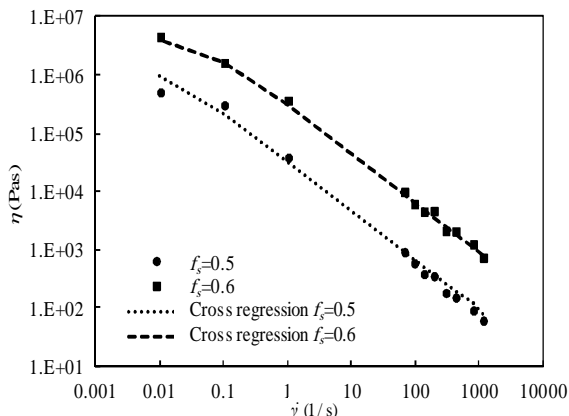


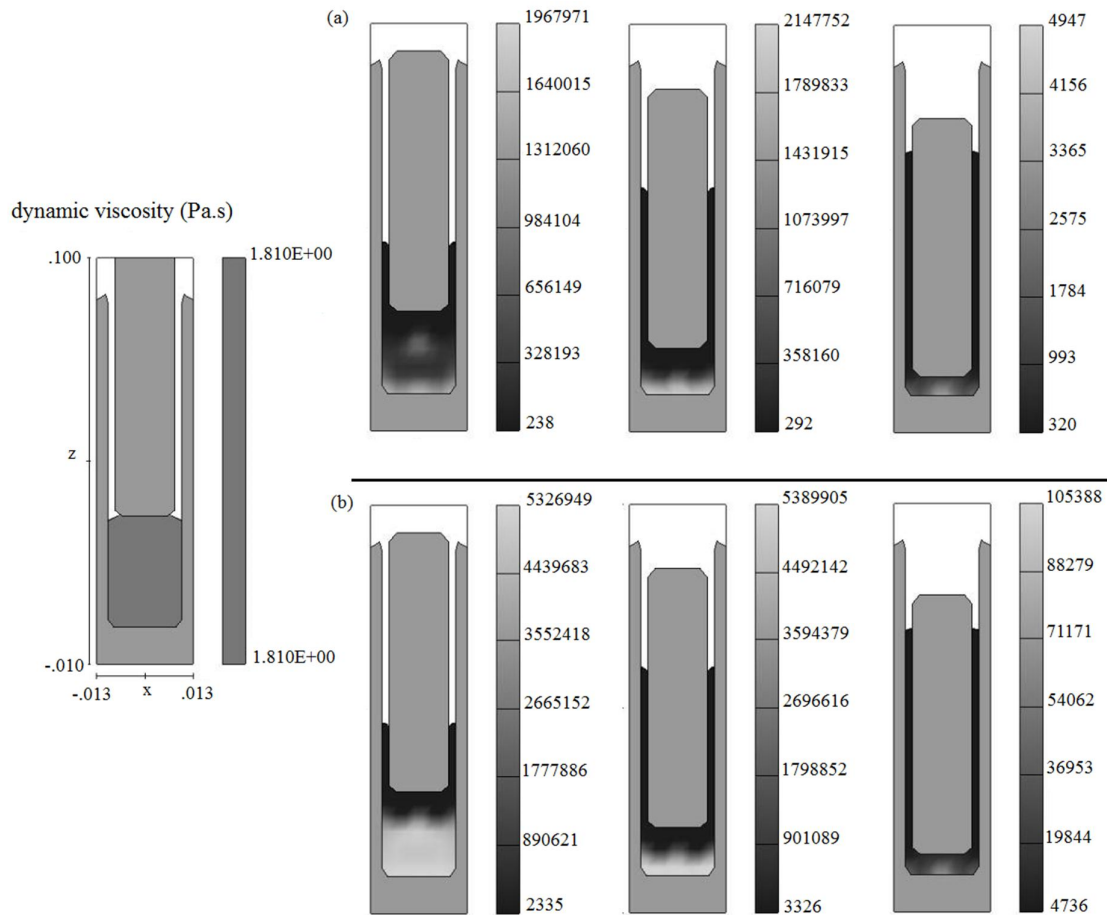
Fig. 12 Experimental results and cross regression on them  
 شکل 12 نتایج تجربی و برازش معادله کراس بر روی آن

جامد می‌باشد که در نتایج دیگر تحقیقات مشابه نیز به آن اشاره شده است [18,17]. همچنین در برخی از تحقیقات که تاثیر زمان را در معادله کراس در نظر گرفته اند با اصلاح معادله و انجام آزمون‌های تغییرات پله‌ای نرخ برش به عدد  $n=4/3$  رسیده‌است که عموماً برای بررسی ویسکوزیته حالت پایدار و تیگزوتروپی اکثر محلول‌های نیمه جامد مقداری ثابت می‌باشد [19]. با در دست داشتن پارامترهای  $n$ ,  $k$ ,  $\eta_0$ ,  $\eta_\infty$  و نیز داده‌های تجربی به دست آمده از دو سری آزمون‌های رئولوژی برازش معادله کراس بر روی این داده‌ها انجام گردید که مطابقت نتایج تجربی و معادله کراس در شکل 12 نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد معادله کراس برازش شده دارای مطابقت بسیار خوبی با نتایج تجربی به دست آمده از دو سری آزمون‌ها می‌باشد. در ادامه کار جهت بررسی صحت مدل به دست آمده مدل به دست آمده به نرم افزار شبیه سازی فلو تری دی لینک شده و با تعریف خواص سیالیتی جدید فرایند اکستروژن معکوس طبق شرایط مربوط به آزمون تجربی شبیه سازی گردید. نتایج شبیه سازی صورت گرفته برای دو حالت از نرخ‌های برشی اعمالی طبق شرایط نشان داده شده در شکل 13 نشان داده شده است. مقادیر ویسکوزیته تعادلی به دست آمده بسیار نزدیک به مقادیر تجربی به دست آمده می‌باشند.

#### 4- نتیجه گیری

در این تحقیق خواص رئولوژیکی آلیاژ نیمه جامد آلومینیوم 7075 با بکارگیری آزمون‌های فشار بین صفحات موازی و اکستروژن معکوس جهت





**Fig. 13** Viscosity contours in different time frames for (a)  $f_s=0.5$ ,  $R_p=8\text{mm}$ ,  $V_r=100\text{mm/s}$  and (b)  $f_s=0.6$ ,  $R_p=8\text{mm}$ ,  $V_r=70\text{mm/s}$

شکل 13 کانطور ویسکوزیته در بازه‌های زمانی مختلف برای (a)  $V_r=100\text{mm/s}$ ,  $R_p=8\text{mm}$ ,  $f_s=0.5$  و (b)  $V_r=70\text{mm/s}$ ,  $R_p=8\text{mm}$ ,  $f_s=0.6$

### 5- مراجع

- [1] Z. Fan, Semisolid metal processing, *International Materials Reviews*, Vol. 47, No. 2, pp. 49-85, 2002.
- [2] J. Wang, A. Phillion, G. Lu, Development of a visco-plastic constitutive modeling for thixoforming of AA6061 in semi-solid state, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 609, pp. 290-295, 2014.
- [3] N. Kim, C. Kang, An investigation of flow characteristics considering the effect of viscosity variation in the thixoforming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, No. 2, pp. 237-246, 2000.
- [4] P. Seo, H. Kim, C. Kang, Numerical integration design process to development of suspension parts by semi-solid die casting process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183, No. 1, pp. 18-32, 2007.
- [5] S. Z. Shang, J. J. Wang, G. M. Lu, X. L. Tang, Study on the semi-solid thixo-diecasting process of aluminum alloys and die design, *Solid State Phenomena*, Vol. 192, pp. 460-465, 2013.
- [6] V. Pouyafar, S. Sadough, An enhanced Herschel-Bulkley model for thixotropic flow behavior of semisolid steel alloys, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 44, No. 5, pp. 1304-1310, 2013.
- [7] S. Lee, S. Han, C. Kang, Thixo forging process of wrought aluminum alloy fabricated by rotational helical shape stirrer, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 10, pp. 1656-1662, 2007.
- [8] H. Torabzadeh Kashi, G. Faraji, A review of the production of ultrafine grained and nongrained metals by applying severe plastic deformation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 271-282, 2016. (in persian فارسی)
- [9] V. Favier, H. Atkinson, Analysis of semi-solid response under rapid compression tests using multi-scale modelling and experiments, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 20, No. 9, pp. 1691-1695, 2010.
- [10] J. Gebelin, M. Suery, D. Favier, Characterisation of the rheological behaviour in the semi-solid state of grain-refined AZ91 magnesium alloys, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 272, No. 1, pp. 134-144, 1999.
- [11] W. Loue, S. Landkroon, W. Kool, Rheology of partially solidified AlSi7Mg0.3 and the influence of SiC additions, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 151, No. 2, pp. 255-262, 1992.

تعیین پارامترهای مدل کراس مورد مطالعه قرار گرفت و نتایجی به شرح زیر حاصل گردید:

- 1- آزمون‌های فشار بین صفحات موازی و اکستروژن معکوس به عنوان روش‌های مناسب برای بررسی رفتار رئولوژیکی آلیاژ نیمه جامد تحت نرخ‌های برشی پایین و بالا به طور موفقیت آمیزی مورد استفاده قرار گرفتند و از نتایج سیگنال‌های نیرو - جابجایی برای محاسبه ویسکوزیته آلیاژ در محدوده وسیعی از نرخ‌های برش استفاده گردید.
- 2- رفتار سیالاتی رقیق شونده برشی برای آلیاژ نیمه جامد در محدوده وسیعی از نرخ برشی مشاهده گردید که در آن ویسکوزیته آلیاژ با افزایش نرخ برشی کاهش پیدا می‌کند.
- 3- پارامترهای مدل چهار پارامتری کراس با استفاده از نتایج آزمون‌های ویسکومتری توسط روش‌های گرافیکی با دقت زیاد تعیین گردیدند و مشاهده گردید که مقدار پارامتر  $n$  مستقل از کسر جامد آلیاژ بوده و برابر  $n=0.86$  می‌باشد.
- 4- مدل کراس با پارامترهای تعیین شده دارای مطابقت خوبی با نتایج تجربی به دست آمده از آزمون‌های ویسکومتری در محدوده وسیعی از نرخ برش و نزدیک به فرایندهای صنعتی می‌باشد.
- 5- از معادلات ویسکوزیته به دست آمده می‌توان برای شبیه سازی نحوه پرشدن قالب در نرم افزارهای CFD استفاده نمود.

- pp. 18-20, 1989.
- [17] A. R. A. McLelland, N. G. Henderson, H. V. Atkinson, D. H. Kirkwood, Anomalous rheological behaviour of semi-solid alloy slurries at low shear rates, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 232, No. 1, pp. 110-118, 1997.
- [18] C. Quaak, M. Horsten, W. Kool, Rheological behaviour of partially solidified aluminium matrix composites, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 183, No. 1, pp. 247-256, 1994.
- [19] D. Kirkwood, P. Ward, Comment on the power law in rheological equations, *Materials Letters*, Vol. 62, No. 24, pp. 3981-3983, 2008.
- [12] G. Chen, F. Lin, S. Yao, F. Han, B. Wei, Y. Zhang, Constitutive behavior of aluminum alloy in a wide temperature range from warm to semi-solid regions, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 674, pp. 26-36, 2016.
- [13] A. Neag, V. Favier, R. Bigot, M. Pop, Microstructure and flow behaviour during backward extrusion of semi-solid 7075
- [14] D. Kirkwood, Semisolid metal processing, *International Materials Reviews*, Vol. 39, No. 5, pp. 173-189, 2013.
- [15] M. M. Cross, Rheology of non-Newtonian fluids: A new flow equation for pseudoplastic systems, *Journal of colloid science*, Vol. 20, No. 5, pp. 417-437, 1965.
- [16] H. A. Barnes, J. F. Hutton, K. Walters, *An introduction to rheology*, Elsevier,