ماهنامه علمى يژوهشى



mme modares ac ir

مهندسی مکانیک مدر س

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

 4 ر امين مشبک آبادی¹، قادر فر جی $^{2^{*}}$ ، و جيد يو يافر³، اکبر جاو دانی⁴

1.52

1 - دانشجوى دكترى، مهندسى مكانيك، 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 پستى hfaraji@ut.ac.ir ،11155-4563

اطلاعات مقاله

آلیاژهای فلزی در محدوده دمای نیمه جامد رفتار رئولوژیکی مشابه سیالات غیر نیوتنی نشان میدهند. چنین رفتاری را میتوان با استفاده از	مقاله پژوهشی کامل
مدل.های رئولوژیکی توصیف نموده و برای تعیین پارامترهای این مدل.ها از روش.های ویسکومتری معمول استفاده نمود. در این تحقیق،	دريافت: 06 تير 1395
وسكمزيته آلباث نيمه جامد الومينيوم 7075 با استفاده از انتابح سيكناا هاي نيرو – جابحائي جاصل از دو آزمون فشار در بين صفحات موازي و	پدیرش: 10 مرداد 1395 ۱۰۰۰ - 21 - 21
	ارائه در سایت: ۱۵۷ شهریور ۱۵۹5
🗌 اکستروژن معکوس اندازهگیری شد و برای تعیین پارامترهای مدل کراس در محدوده وسیعی از نرخ برش مورد استفاده قرار گرفت. تاثیر	کلید واژگان:
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	ألياژ ألومينيوم 7075
نوع رقیق شونده برشی است که در آن با افزایش نرخ برش مقدار ویسکوزیته کاهش می یابد. همچنین با افزایش دما مقدار ماکزیمم نیروی وارده	آزمون فشار در بین صفحات موازی
به دلیل کاهش میزن کسر جامد و کاهش مقاومت در برابر سیلان ناشی از آن کاهش مییابد که سبب کاهش مقدار ویسکوزیته میگردد. نتایج	أزمون اكستروژن معكوس
نشان داد که مقادب و سکوزیته محاسبه شده توسط مدار خوان را امتری کراس در مطابقت خوبی را نتایج تحریی به دست آمده در محدوده وسیر	مدل کراس
	شکل دهی نیمه جامد
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.	

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

Ramin Meshkabadi¹, Ghader Faraji^{1*}, Vahid Pouyafar², Akbar Javdani²

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

ABSTRACT

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

ب کان ک

Keywords: 7075 minum Allov Compression Between Parallel Plate Backward Extrusion Test Cross Model Semi-Solid Forming

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.

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

1- مقدمه

فرایندهای شکل دهی نیمه جامد¹ یک روش نسبتا" جدید برای شکل دادن

¹ 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 SID in backward extrusion experiments, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 9, pp. 97-106, 2016 (in Persian)

بین دمای حد انجماد (سالیدوس^۱) و حد مذاب (لیکویدوس²) انجام می شود. اولین مرحله در انجام این فرایند به دست آوردن ساختار تا حد ممکن کروی و بدون مذاب حبس شده می باشد. 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 شكل دهي مي شود [1].

داشتن دانش مناسب از مدل سیلانی ماده برای مدل سازی عددی فرایند شکلدهی بسیار ضروری است و منجر به انجام موفقیت آمیز فرایند شکل دهی می گردد. با توجه به اینکه فرایند شکل دهی نیمه جامد در کسر بسیار کوچکی از زمان انجام می گیرد امکان بررسی خواص سیلانی 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 سیلانی آلیاژهای نیمه جامد گسترش یافته است چرا که با استفاده از آنها میتوان به بهینه سازی پارامترهای فرایند و مطالعه تئوریک فرایند پرداخت [2].

براي توصيف رفتار سيلاني آلياژهاي نيمه جامد معادلات ساختاري متعددی ارائه شده است. بیشترین معادلات استفاده شده عبارتند از مدل توانی³ و مدل بینگهام پلاستیک⁴ که هر کدام از آنها دارای دو پارامتر قابل تنظيم هستند [4,3]. مدل تواني توصيف كننده رفتار رقيق شونده 5 و غليظ شونده برشی⁶بوده و مدل بینگهام پلاستیک تنش تسلیم آلیاژ را در بر می گیرد [5]. در این دو مدل امکان توصیف تمام خواص رئولوژیکی ماده به ویژه در محدوده وسیعی از نرخ برش وجود ندارد.

مدل های رئولوژیکی دیگری نیز وجود دارند که دارای سه پارامتر قابل تنظیم هستند. با استفاده از این مدل ها می توان سیلان ماده را در نرخهای برشی بالا و پایین و نیز محدوده مدل توانی توصیف نمود. مدل هرشل بالکلی⁷ 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 وسيعي از نرخهاي برش سيلان ماده را پيش بيني نمايند. يكي از این نوع مدلها مدل کراس⁸ میباشد که سیلان شبه پلاستیک ماده را با در نظر گرفتن ویسکوزیته در نرخهای برشی کم (η_0) و نرخهای برشی بالا بیان می کند. به طور کلی امکان برازش منحنی جهت تعیین (η_{∞}) پارامترهای مدلهای چهار پارامتری به دلیل نبود دادههای کافی وجود ندارد اما در عوض این مدل ها می توانند 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 عموما" 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 می گیرند کمتر مورد توجه قرار گرفته اند. بنابرین تحقیقات در خصوص شکل دهی نیمه جامد این آلیاژها دارای اهمیت زیادی است [7]. از طرفي بررسي خواص رئولوژيکي آلياژ آلومينيوم 7075 در منابع کمتري صورت گرفته است و بیشتر تحقیقات صورت گرفته در حوزه تولید بیلت اولیه

با ساختار تیگزوتروپیک⁹ تمرکز پیدا کرده است و در خصوص ارائه مدلهای مناسب برای بیان رفتار سیلانی ماده در داخل قالب تحقیقات کمتری صورت گرفته است.

با توجه به اینکه اکثر مدل های 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 می گردد 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 معکوس¹⁰ برای اعمال نرخهای برش بالا میباشد. در این آزمون پاسخ نیروی وارده بر ماده نیمه جامد در حین فرایند اکستروژن معکوس در مقابل جابجائی صورت گرفته، توسط سیستم داده برداری سریع اندازه گیری می شود. دسته دوم آزمون ها شامل تست فشار در صفحات موازی¹¹ برای اعمال نرخهای کرنش کم میباشد. از روی نتایج این دسته از آزمون میتوان مقادیر ویسکوزیته در نرخهای برش کم را اندازه گیری نمود.

2- مواد و روشها 2-1- تهيه ريز ساختار نيمه جامد

آلياژ مورد بررسي در اين تحقيق آلومينيوم 7075 ميباشد كه تركيب شیمیایی آن در جدول 1 نشان داده شده است. برای تهیه ماده اولیه با 12 ساختار کروی از فرایند پرسکاری در کانالهای زاویهای با مقطع یکسان استفاده گردید [8]. برای رسیدن به ریز ساختار بهینه، نمونهها در دمای اتاق از طریق مسیر B_A تحت پنج پاس فرایند ECAP قرار گرفتند و سپس جهت کروی شدن ریزساختار در داخل کوره مقاومتی به مدت 15 دقیقه نگهداری

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 می شود [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 MoS₂ 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 جابجائی رم اندازه گیری می شود. ملزومات چنین سیستمی عبارتند از سنسور اندازه گیری نیرو، سنسور اندازه گیری جابجائی و نیز نرم افزار همزمان سازی ثبت دادهها که بتواند داده برداری

جدول 1 تركيب شيميايي آلياژ آلومينيوم 7075 (درصد جرمي)
 Table 1 Chemical composition of Al 7075 (mass fraction, %)

Table		n compos	nuon or A	17075 (1	nass nac	11011, 70)	
Si	Fe	Mn	Cr	Cu	Mg	Zn	Al
0.333	0.405	0.139	0.229	1.51	2.25	5.27	فلز پايه

Solidus

² Liquidus Power-Law Model

Bingham Plastic Model

Shear Thinning

Shear Thickening Herschel-Bulkley Model

⁸ Cross Model

⁹ Thixotropic ¹⁰ Backward Extrusion

Compression Between Parallel Plate

¹² Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

جدول 2 شرایط انجام آزمون فشار و پارامترهای مربوطه

Table	2 Compression test con	ditions and related	l parameters
	سرعت رم (mm/s)	کسر جامد (%)	نرخ برش (1/s)
	500	50,60	0.01, 0.1, 1

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 z (برابر تغییر ارتفاع از ارتفاع اولیه h_0 به ارتفاع لحظه ای h_{ε} (ویسکوزیته ظاهری η_{app} را میتوان با در دست داشتن F_{ε} (نیروی لحظهای) و h_{ε} (رتفاع لحظهای) با استفاده از رابطه (1) تعیین کرد [10]:

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

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

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

2-3- آزمون اکستروژن معکوس

رفتار تغییر شکل ماده نیمه جامد در نرخهای برشی بالا توسط فرایند اکستروژن معکوس مورد مطالعه قرار می گیرد [10]. در این آزمون پاسخ نیروی وارده بر ماده نیمه جامد در حین فرایند اکستروژن معکوس در مقابل جابجائی صورت گرفته، توسط سیستم داده برداری سریع اندازه گیری می شود. 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 هم دما نگهداری شده و سپس تحت شکل دهی قرار می گیرد. 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

خطی با طول اکسترود شده افزایش می ابد که دلیل آن افزایش سطح تماس بین سنبه و سیال می باشد. در حالتی که سرعت اکستروژن ثابت باشد و یسکوزیته ظاهری سیال را می توان 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 – جابجائی (dF/dt) فرایند اکستروژن معکوس با استفاده از رابطه (3) تعیین کرد [10]:

$$\eta_{\rm app} = \frac{1}{2\pi\lambda C_{\rm e}V} \cdot \frac{dF}{dt} = \frac{1}{2\pi\lambda C_{\rm e}} \cdot \frac{dF}{dx}$$
(3)

که در آن λ نسبت اکستروژن می باشد که بر اساس شعاع محفظه R_c و شعاع سنبه R_p توسط رابطه (4) تعیین می گردد، V_r سرعت رم c_1 ثابتی است که توسط رابطه (5) تعیین می گردد.

$$\lambda = \frac{R_c^2}{R_c^2 - R_p^2} \tag{4}$$

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

$$C_{2} = \frac{V_{r} \cdot (2 \ln \frac{C}{R_{p}} - 1)}{(R_{c}^{2} + R_{p}^{2}) \cdot \ln \frac{R_{c}}{R_{p}} - (R_{c}^{2} - R_{p}^{2})}$$
(6)

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

$$\dot{v}_{av} = \frac{C_1 \cdot \left\{ \ln\left(\frac{-C_1}{2C_2R_cR_p}\right) - \mathbf{1} \right\} - C_2 \cdot \left(R_c^2 + R_p^2\right)}{R_c - R_p}$$
(7)

روابط فوق به طور تجربی در تستهای اکستروژن معکوس روغنهای نیوتنی با مقادیر مشخص ویسکوزیته و در محدوده گستردهای از نرخهای برشی مورد صحه 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 قطرهای مختلف و نیز نمونه اکسترود معکوس شده نشان داده شده است. در جدول 3 شرایط فیزیکی انجام آزمایش و نیز نرخهای برش متناسب با هر گدام نشان داده شده است.



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

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





Fig. 2 (a) Designed mold and (b) Extruded part شكل 2 (a) قالب طراحى شده و (b) نمونه اكسترود 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

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

3- نتايج و بحث

1-3- ريز ساختار ماده اوليه

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 می گردد ریز ساختار ماده اولیه شامل ذرات بسیار ریز پراکنده در ساختار دانهای می باشد که از ویژگیهای اصلی این آلیاژ می باشد. ریز ساختار نیمه جامد شامل فاز جامد کروی شکل پراکنده در فاز مایع می باشد که دارای فاکتور شکل و عدد اندازه دانه مناسب برای فرایند شکل دهی نیمه جامد می باشد و وجود چنین ریز ساختاری باعث کاهش میزان نیروی مورد نیاز برای شکل دهی می شود.

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 می اشد: در مرحله اول که ساختار دانه بندی فاز جامد کاملا مستحکم

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- منحنى هاى نيرو - جابجائى آزمون اكستروژن معكوس

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 می گردد منحنی نیرو - جابجائی را از لحظه تماس سنبه با نمونه می توان 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 می سد که علت این امر اوزایش مقدار کم جابجائی کاهش می یابد که علت آن می تواند به شکست افزایش مقدار کم جابجائی کاهش می یابد که علت آن می تواند 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 [1]. با استفاده از اطلاعات به دست آمده از منحنی تنش- کرنش هر دو آزمون و با استفاده از روابط (1) و (3) می توان مقادیر ویسکوزیته متناظر با نرخهای برشی اعمال



Fig. 3 Microstructure of (a) raw material and (b) ECAPed semi-solid alloy alloy شکل **3** ریز ساختار (a) ماده اولیه و (b) آلباژ 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 (b) $f_s=0.6$ (a) تغییرات تنش واقعی -کرنش واقعی آلیاژ در نرخهای برشی مختلف حاصل از آزمون فشار (b) م



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 a-15 mm, b-16 mm, c-17 mm, d-18 mm: شكل 5 تغييرات نيرو بر حسب جابجائي رم در كسر جامد 0.5 درصد و قطرهاي سنبه: a-15 mm, b-16 mm, c-17 mm, d-18 mm

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

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.



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 a-15 mm, b-16 mm, c-17 mm, d-18 mm

3-4- 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 $(_0 0 \ m)$ را در نظر می گیرد [15]:

$$\eta - \eta_{\infty} = \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{\mathbf{1} + k\dot{\boldsymbol{\chi}}^n} \tag{8}$$

که در آن $\dot{\gamma}$ نرخ برش، k مقداری ثابت با واحد زمان و n یک ثابت بدون بعد است که معمولا دارای مقدار بین 2/3 الی 1 میباشد و به ترتیب مقادیر ویسکوزیته در نرخهای برشی پایین و بالا میباشند. این مدل وقتی $\eta \to \bullet$ به مدل به معادله سیال نیوتنی و در حالتهایی که $\eta_0 \ll \eta$ یا $\eta_0 \gg \eta$ به مدل توانی ساده تبدیل میشود. هرچند کراس ادعا کرد که مقدار 2/3n = n 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].

3-5- پیدا کردن پارامترهای مدل

برای تعیین پارامترهای مدل ارائه شده لازم است قبل از تعیین پارامترهای $1/(\eta - \eta_{\infty})$ مقدار پارامتر n تعیین گردد. ابتدا میتوان نمودا $\eta_{0}(\eta_{0} - \eta_{\infty})$

برحسب ⁿ $\dot{\gamma}$ (ا برای توانهای مختلف n رسم نمود به طوریکه با در نظر گرفتن تغییرات زیر مقدار $(\eta - \eta_{\infty})$ بر حسب $\dot{\gamma}^{n}$ باید رابطهای خطی داشته باشد. $\frac{1}{\eta - \eta_{\infty}} = \frac{1 + k\dot{\gamma}^{n}}{\eta_{0} - \eta_{\infty}} = \frac{1}{\eta_{0} - \eta_{\infty}} + \frac{k}{\eta_{0} - \eta_{\infty}}\dot{\gamma}^{n}$ (9) لازم به ذکر است که در معادله کراس تابع $\dot{\gamma}^{n}$ یک تابع زوج می,باشد و

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

$$1.E+07$$

$$1.E+06$$

$$f_{s}=0.5$$

$$f_{s}=0.6$$



که این رابطه زمانی صادق است که مقدار n یک عدد زوج باشد و با توجه به اینکه $\mathbf{1} \ge n$ است بنابرین n مقداری کسری به صورت p/q میباشد که برای تامین شرط (10) باید q عددی زوج و p فرد باشد [51]. بنابراین مقادیر متناسب با n عبارتند از ..., r < 2/3, 4/5, 6/7 که با رسم نمودار اشاره شده در شکل 8 مشاهده می گردد که به ازای مقدار r = 6/7 خط عبوری از نقاط مختلف به خط کامل نزدیک تر است و بنابرین مقدار r < 6/7 برای تخمین مناسب سیستم مناسب است. با توجه به اینکه m < 0 ویسکوزیته در مقادیر بالای مناسب سیستم مناسب است. با توجه به اینکه m < 0 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 η صرفنظر کرد. از طرف دیگر با اعمال تغییراتی مطابق با معادلات (11) و (12) در معادله کراس خواهیم داشت:

$$-\eta_{\infty} = \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{k\dot{\nu}^n} \tag{11}$$

(12)

$$\log(\eta - \eta_{\infty}) = \log(\frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{4}) - n\log(\eta_0 - \eta_{\infty})$$

η

با رسم نمودار $(\eta - \eta_{\infty})$ او **ا**و با در نظر گرفتن محدوده نرخهای برشی بالا که در آن $\mathbf{1} \ll h \dot{\gamma}^n$ و با توجه به توضیحات داده شده رابطه بین η او در برابر $\dot{\gamma}$ **ا**و رابطه ای 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 می، اشد. با در دست داشتن



مقدار *n* سه پارامتر بعدی معادله را میتوان توسط روشهای گرافیکی به
دست آورد. در مقادیر بالای نرخ برشی که **1** *
$$k\dot{\gamma}^n$$
 باشد معادله کراس را
میتوان به شکل زیر نوشت:
 $\eta = \eta_{\infty} + \left(\frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{r}\right)\dot{\gamma}^{-n}$ (13)

(13) $\eta = \eta_{\infty} + \left(\frac{\eta_0 - \eta_0}{k}\right) \dot{\gamma}^{-n}$ (13) So we have a solution in the probability of the proba

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

در نرخهای برش پایین که **1** $\gg (\eta_{\infty}/\eta_{0})k\dot{\gamma}^{n} \ll 1$ میباشد خواهیم داشت:

$$\frac{\eta_0}{\eta} = \mathbf{1} + k\dot{\gamma}^n \to \frac{\mathbf{1}}{\eta} = \frac{\mathbf{1}}{\eta_0} + \frac{k}{\eta_0}\dot{\gamma}^n \tag{15}$$

بنابرین نمودار η بر حسب γ^n باید خطی بوده و عرض از مبدا آن برابر $1/\eta_0$ و شیب آن برابر k/η_0 خواهد بود. در شکل 11 نحوه بکارگیری رابطه (15) در تعیین پارامترهای η_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. همچنان که مشاهده می گردد مقدار پارامتر n برای این آلیاژ، مستقل از میزان کسر



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

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





Fig. 11 Determining η_0 and k values (a) $f_s=0.5$, (b) $f_s=0.6$ $f_s=0.6$ (b) $f_s=0.5$ (a) شمکل 11 تعیین پارامترهای η_0 و λ برای (b) $f_s=0.5$

جدول 4 مقادیر پارآمترهای به دست آمده مدل در کسرهای جامد مختلف Table 4 Obtained values of model parameters in different solid fractions



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



Fig. 10 Calculation of η_{∞} value based on equation (13) (a) $f_s=0.5$, (b) $f_s=0.6$

 f_{s} =0.6 (b) محاسبه مقدار η_{∞} بر اساس معادله (13) f_{s} =0.5 (b) محاسبه مقدار η_{∞}

جامد می باشد 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 آزمون های تغییرات یلهای نرخ برش به عدد n=4/3 رسیدهاست که عموما برای بررسی ویسکوزیته حالت پایدار و تیگزوتروپی اکثر محلولهای نیمه جامد مقداری ثابت میباشد [19]. با در دست داشتن پارامترهای η_{∞} ،k، η_{∞} ، دست آمده ای 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 می گردد معادله کراس برازش شده دارای مطابقت بسیار خوبی با نتایج تجربی به دست آمده از دو سری آزمونها می باشد. 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 سیلانی جدید فرايند اكستروژن معكوس طبق شرايط مربوط به آزمون تجربى شبيه سازى گردید. نتایج شبیه سازی صورت گرفته برای دو حالت از نرخ های 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 می باشند.

4- نتیجه گیری

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



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

- أزمونهای 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 – جابجائی برای محاسبه ویسکوزیته آلیاژ در محدوده وسیعی از نرخهای برش استفاده گردید.
- 2- رفتار سیلانی 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 می کند.
- 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 می باشد.
- 5- از معادلات ویسکوزیته به دست آمده میتوان برای شبیه سازی نحوه پرشدن قالب در نرم افزارهای CFD استفاده نمود.

5- مراجع

- 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.
- 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.
 S. Z. Shang, J. J. Wang, G. M. Lu, X. L. Tang, Study on the semi-solid thixo-
- [5] S. Z. Shang, J. J. Wang, G. M. Lu, X. L. Tang, Study on the semi-solid thixodiecasting 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 nonograined 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.

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. *Lournal of Alloys and Community Vol.* 674, pp. 26-36, 2016.
- 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,