



## بررسی تجربی تأثیر دمای ماده و پروفیل قالب بر خصوصیات مکانیکی و متالورژیکی محصولات آلیاژ آلومینیوم 6061 در فرآیند اکستروژن نیمه-جامد مستقیم

دانیال ابوالحسنی<sup>1\*</sup>، داریوش جواب‌ور<sup>2</sup> و حمیدرضا عزت‌پور<sup>3</sup>

<sup>1</sup> کارشناس ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول

<sup>2</sup> استادیار، دانشکده مهندسی هوا فضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

<sup>3</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: 1392/04/11؛ تاریخ بازنگری: 1392/07/02؛ تاریخ پذیرش: 1393/06/10

### چکیده

دو متغیر فرآیند اکستروژن نیمه‌جامد مستقیم شامل دمای ماده نیمه‌جامد در حین تغییر شکل و پروفیل قالب توسط آزمایشات تجربی بر روی آلیاژ آلومینیوم 6061 که کاربرد وسیعی در صنایع هوایی و مواد کامپوزیتی دارد، بررسی شد. نتایج بررسی متالورژیکی و مکانیکی محصولات نشان می‌دهند که قطعات اکستروژن شده در دمای نیمه‌جامد 620 درجه سلسیوس دارای ریزساختاری با دانه‌های کروی همراه با انعطاف پذیری بهتر از نمونه‌های اکستروژن شده در دماهای دیگر می‌باشند. همچنین بررسی‌های متالوگرافی نشان دادند که تفاوت قابل توجهی بین قطعه اکستروژن شده در قالب منحنی و قطعه اکستروژن شده در قالب مخروطی از نظر ریزساختاری وجود ندارد. اما با توجه به نتیجه آزمون کشش نمونه اکستروژن شده در قالب منحنی مشخص شد که این قطعه دارای خواص مکانیکی بهتری نسبت به قطعه اکستروژن شده در قالب مخروطی است. دلیل این موضوع وجود تمرکز تنش بالاتر در قالب مخروطی می‌باشد که باعث ایجاد تنش‌های پس‌ماند بیشتری در قطعه شده‌است.

**کلمات کلیدی:** آلیاژ آلومینیوم 6061؛ اکستروژن نیمه‌جامد مستقیم؛ دمای تغییر شکل؛ پروفیل قالب.

## Experimental investigation of effect of material temperature and die profile on mechanical and metallurgical properties of 6061 aluminum alloy in forward thixoextrusion process

D. Abolhasani<sup>1\*</sup>, D. Javabvar<sup>2</sup> and H.R. Ezatpour<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc., Manufacturing Dep., Islamic Azad University, Dezful Branch, Dezful, Iran

<sup>2</sup> Assist. Prof., Dep. of Aerospace Eng., Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Ph.D. Student, Dep. of Materials Science and Metallurgical Eng., Eng. Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### Abstract

Two thixoforming process parameters i.e. billet temperature and die profile were experimentally investigated on a commercial 6061 Aluminum alloy which is typically used in aerospace industries and composite materials. Metallurgical and mechanical results show that extruded parts in 620 °C have spherical grains and better elongation than extruded parts in other temperatures. Also, metallographical evaluations show that there is no important microstructural difference between conical and curve dies thixoformed specimens. Although, according to tensile test result, curve die thixoformed specimen show better mechanical properties than conical die thixoformed specimen. This may results because of higher residual stress resulted from higher stress concentration in the conical die.

**Keywords:** 6061 Aluminum alloy; Forward thixoextrusion; Semisolid material temperature; Die profile.

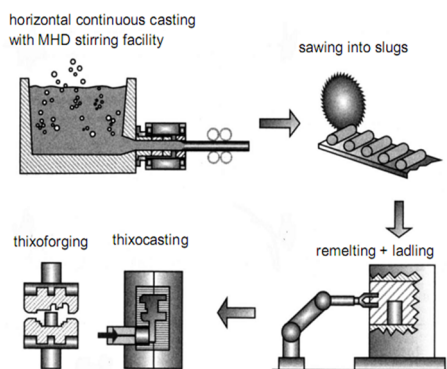
\* نویسنده مسئول؛ تلفن: 09151258313

آدرس پست الکترونیک: [daniyal.abolhasani@yahoo.com](mailto:daniyal.abolhasani@yahoo.com)

## 1- مقدمه

فرآیند شکل‌دهی نیمه‌جامد یکی از فرآیندهای تولید فلزات و آلیاژها بوده که در محدوده دمایی بین نقطه انجماد و نقطه ذوب آلیاژ صورت می‌گیرد. در این فرآیندها، مخلوطی متشکل از ذرات جامد غیردندریتی پخش شده در فاز مذاب فلزی، به عنوان ماده شروع کننده فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد [1]. به این منظور، ابتدا آلیاژ مذاب توسط فرآیندهای ریخته‌گری نیمه‌جامد، به صورت شمش ریخته می‌شود. سپس تا دمای نیمه جامد حرارت داده شده تا پس از آن تحت فرآیند شکل‌دهی قرار گیرد (شکل 1). فرآیندهای شکل‌دهی در دمای نیمه جامد تیگزوفرمینگ نام دارند. عوامل مختلفی بر فرآیند شکل‌دهی در دمای نیمه‌جامد (از جمله کسر جامد آلیاژ، زمان نگهداری آلیاژ در منطقه دو فازی، سرعت شکل‌دهی، میزان تبادل حرارتی بین ماده و قالب و خصوصیات قالب) مؤثر می‌باشند [2]. یکی از متداولترین تحقیقات صورت گرفته در فرآیندهای نیمه‌جامد، یافتن دمای مناسب ماده جهت فرآیند شکل‌دهی می‌باشد. محمدی و همکارانش [3] شرایط مناسب برای فرآیند اکستروژن نیمه‌جامد معکوس آلیاژ آلومینیوم 7075 را با تغییر در دمای تغییر شکل مورد بررسی قرار دادند. وانیتولد<sup>1</sup> و همکاران [4] به بررسی فرآیند اکستروژن معکوس آلیاژ آلومینیوم 7075 در حالت نیمه‌جامد با کسر جامد بالا، پرداخته و دمای مناسب ماده را 600 درجه سلسیوس تشخیص دادند. ریخته‌گر و کتابچی [5] نتایج فرآیند اکستروژن نیمه‌جامد مستقیم آلیاژ آلومینیوم 7075 را، تحت دمای 580 درجه سلسیوس با فرآیند اکستروژن داغ مستقیم در دمای 420 درجه سلسیوس، از نظر ریزساختار و خصوصیات مکانیکی، مقایسه کردند. همچنین دمای کامپوزیت آلومینیوم-گرافیت در فرآیند فشردن در حالت نیمه جامد توسط چن<sup>2</sup> و تسائو<sup>3</sup> [6] مورد مطالعه قرار گرفت. در تحقیقات ایشان، آلیاژ آلومینیوم 6061 به کار رفته و دو دمای تغییر شکل 620 و 630 درجه سلسیوس در طول آزمایشات منظور شده که در نهایت با مشاهده نتایج ماکروگرافی و خصوصیات مکانیکی، دمای 630 درجه

سلسیوس به عنوان دمای بهینه تغییرشکل مشخص شد [6]. عامل مؤثر دیگری که تنها در فرآیندهای شکل‌دهی حجیم مانند اکستروژن مستقیم معنا پیدا می‌کند، هندسه قالب یا پروفیل قالب می‌باشد. با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته،



شکل 1- شمانیک فرآیند شکل‌دهی نیمه جامد [1]

مشخص شد که تحقیقات محدودی در این زمینه منتشر شده است. در تحقیقاتی که تاکنون در حالت جامد روی پروفیل قالب صورت گرفته‌است، در برخی به تعیین و مقایسه نیرو و فشار موردنیاز در قالب با پروفیل دلخواه منحنی و قالب با پروفیل مخروطی پرداخت شده‌است [7، 8 و 9]. همچنین با استفاده از تحلیل المان محدود، به یکنواختی و همگنی محصول در قالب با پروفیل منحنی رسیده و از آن نتیجه گرفته‌اند که احتمالاً خصوصیات مکانیکی این محصول نیز بهتر خواهد بود [7].

در این تحقیق فرآیند اکستروژن نیمه‌جامد مستقیم آلیاژ آلومینیوم 6061 که معمولاً در صنایع هوایی و یا به عنوان ماده کامپوزیتی در ترکیب با مواد دیگر به کار برده می‌شود [6]، مورد بررسی قرار می‌گیرد. اطلاعات مربوط به شکل‌دهی نیمه‌جامد این آلیاژ بسیار محدود می‌باشد. احتمالاً به دلیل دامنه انجمادی کم (دامنه انجماد آلیاژ آلومینیوم 6061 از دمای 582 درجه سلسیوس شروع شده و به دمای 652 درجه سلسیوس ختم می‌شود) و قابلیت اکستروژن‌پذیری مناسب این آلیاژ (حدود 60 درصد در مقایسه با قابلیت اکستروژن‌پذیری 100 درصد آلیاژ آلومینیوم 6063 [6])، این پژوهش‌ها محدود شده‌اند. اما با توجه به پیشرفت‌ها و مزیت‌های فرآیند شکل‌دهی نیمه‌جامد، از جمله بهبود خواص مکانیکی و برخی خصوصیات ریزساختاری در مقایسه با شکل

<sup>1</sup> Vaneetveld

<sup>2</sup> Chen

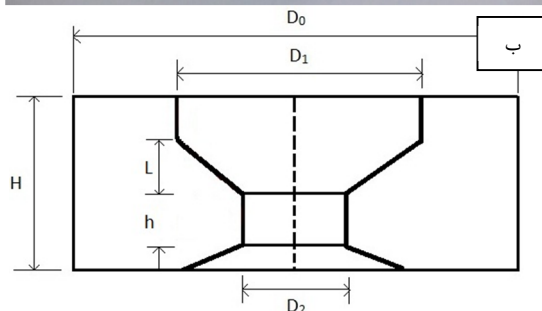
<sup>3</sup> Tsao

و به دانه‌های کروی جامد احاطه شده توسط فاز مایع (ساختار نیمه‌جامد کروی) منتج می‌شود.

جدول 1- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 6061 به کار

رفته در آزمایشات (درصد جرمی)

Mn	Cu	Fe	Si	Al
0/137	0/172	0/218	0/475	Bal.
Ti		Zn	Cr	Mg
0/026		0/035	0/159	0/844



شکل 2- الف) قالب و ب) شمانیک قالب اکستروژن مستقیم

روش سیما بالای دمای تبلور مجدد انجام پذیرفته [10] و دمای تبلور مجدد آلیاژ آلومینیوم 6061 بین 350 و 550 درجه سلسیوس می‌باشد [11]. در این پژوهش کار گرم اولیه مورد نیاز در روش سیما توسط اکستروژن داغ و در دمای 550 درجه سلسیوس بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. نمونه‌های ریخته‌شده به قطر 40 میلیمتر پس از ماشینکاری و رسیدن به قطر 35 میلیمتر، به همراه ابزار اکستروژن تا دمای 550 درجه سلسیوس در کوره پیش گرم حرارت داده شده و سپس به صورت میلگردهایی به قطر 20 میلیمتر اکستروژن گردیدند.

دهی مرسوم [5]، بررسی شکل دهی این آلیاژ پر کاربرد در صنایع گوناگون توسط این فرآیند، پژوهش جدیدی خواهد بود.

## 2- آزمایشهای اکستروژن

هدف از انجام این تحقیق، بررسی تأثیر دمای فرآیند شکل دهی نیمه‌جامد و پروفیل قالب اکستروژن بر خصوصیات مکانیکی و متالورژیکی محصولات این آلیاژ می‌باشد. نتیجه آزمایش کوانتومتری برای تعیین درصد عناصر آلیاژی، مطابق جدول 1 به دست آمد.

عملیات اکستروژن مستقیم به وسیله پرس هیدرولیکی با حداکثر ظرفیت 25 تن و با سرعت ثابت انجام شد. قالب‌هایی که برای انجام آزمایشات به کار رفتند، از جنس فولاد ابزار H13 گرم‌کار هستند. مقاطع قالب‌ها گرد انتخاب شده و نسبت اکستروژن ( $\eta$ ) در مرحله اول (روش سیما<sup>1</sup>) برابر با  $3/06 \left( \eta = \left( \frac{D_1}{D_0} \right)^2 = \left( \frac{35}{20} \right)^2 \right)$  قطر  $D_2$  و  $D_1$  قطر اولیه و  $D_0$  قطر

نهایی می‌باشد) و در مرحله دوم (اکستروژن نیمه‌جامد) برابر با  $2/04 \left( \eta = \left( \frac{20}{14} \right)^2 \right)$  می‌باشد. نوع قالب‌ها مخروطی بوده و

ارتفاع آنها 40 میلیمتر می‌باشد (شکل 2) که بر روی محفظه استوانه‌ای از جنس فولاد ابزار نصب می‌شوند. زاویه رأس قالب‌ها 90 درجه می‌باشد. ریزساختار لازم برای فرآیند نیمه‌جامد شامل ساختاری غیردندریتی همراه با دانه‌های کروی می‌باشد. روش‌های مختلفی برای رسیدن به اینچنین ریزساختار مطلوبی پیش از شکل‌دهی نیمه‌جامد (تیگزوفرمینگ) وجود داشته که روش سیما یکی از آنها می‌باشد. در این روش ماده به وسیله اکستروژن و یا فرآیندهای دیگری همچون فشار و نورد مورد تغییر شکل پلاستیک جهت ایجاد تنش پلاستیک در قطعه قرار گرفته تا با اعمال این کار مکانیکی و ذخیره کرنش در ماده، نیروی محرکه لازم جهت تبلور مجدد دانه‌های جدید در مرحله پیشگرم آلیاژ، برای شکل دهی نیمه‌جامد، فراهم شود. در این مرحله ذوب در مرزهای پر انرژی ساختار در حال تبلور مجدد، آغاز می‌شود و بدین ترتیب فلز مذاب در مرز دانه‌های متبلور شده نفوذ کرده

<sup>1</sup> Strain Induced Melt Activated (SIMA)

می‌باشند [6]. برای تعیین شرایط مناسب جهت داشتن محصولاتی با خواص مکانیکی و ریزساختاری مطلوب، آزمون‌های اکستروژن نیمه جامد در پنج دمای مختلف شامل دماهای 590، 600، 610، 620 و 630 درجه سلسیوس با کسرهای جامد 0/94، 0/86، 0/77، 0/68 و 0/56 مطابق معادله 1، در کوره پیشگرم (کوره المنی دست‌ساز) صورت گرفت. مدت زمان نگهداری در دمای نیمه‌جامد برای همگن‌سازی و رساندن اندازه دانه‌ها به کمتر از 200  $\mu\text{m}$  برای آلیاژهای مختلف، بین 5 تا 30 دقیقه می‌باشد [14]. میانگینی از این زمان به مدت 10 دقیقه برای آزمایشات این تحقیق انتخاب شد. دما به وسیله سه ترموکوپل که به نمونه و قالب متصل هستند، کنترل می‌شود. ترموکوپل‌های نمونه در قسمت فوقانی و میانی آن متصل بوده و اختلاف دمایی بین این نقاط کمتر از 4 درجه سلسیوس می‌باشد.

## 2-2- بررسی پروفیل قالب

طی فرآیند اکستروژن که یک فرآیند تغییر شکل پلاستیک است، مقطع عرضی یک قطعه فلز به وسیله اعمال نیرو و عبور از یک روزنه کاهش می‌یابد. در این فرآیند، خصوصیات مکانیکی ماده، شرایط اصطکاکی در سطح تماس قطعه کار و ابزار، نسبت اکستروژن و هندسه قالب از عوامل مهمی هستند که کیفیت محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بهینه‌سازی این عوامل از مهمترین موضوعاتی می‌باشد که توجه بیشتر محققان را به خود جلب کرده است. یکی از این عوامل، هندسه قالب بوده که تأثیر مهمی در تغییر شکل یکنواخت، کاهش نیرو، میزان سایش قالب و ساختار میکروسکوپی محصول دارد [15]. هندسه قالب اکستروژن می‌تواند به صورت مخروطی، نمایی و یا منحنی باشد. در گذشته به دلیل مشکلاتی که در ساخت قالب‌های نمایی و منحنی وجود داشت، اکثر تحقیقاتی که بر روی هندسه قالب اکستروژن صورت می‌گرفته در زمینه بهینه‌سازی هندسه قالب‌های مخروطی بوده است. امروزه با ظهور ماشین‌های کنترل عددی (CNC) مشکل ساخت قالب‌های نمایی و منحنی بر طرف شده است. از این رو در زمینه بهینه‌سازی هندسه قالب با پروفیل منحنی نیز تحقیقاتی به عمل آمده است [7، 8 و 15]. شمایی از طرح‌های مختلف قالب در فرآیند اکستروژن در شکل 4 نشان داده شده است. بر طبق

انجام عملیات حرارتی بر روی نمونه‌های ریخته‌گری شده نیمه جامد الزامی می‌باشد. در عمل مشاهده شد که در صورت عدم انجام عملیات حرارتی محلول‌سازی، پس از



شکل 3- نمونه اکستروژن شده در دمای نیمه‌جامد بدون عملیات حرارتی محلول‌سازی (عیب درخت کاجی)

اکستروژن در دمای دوفازی، ترک‌های داغ روی نمونه‌ها ظاهر شده و بیلت اکستروژن شده مشابه درخت کاج می‌باشد (عیب درخت کاجی [12]) که این عیب در شکل 3 مشاهده می‌شود. یکی از دلایل مهم وقوع این عیب ایجاد رسوب سختی در آلیاژ ریخته شده بوده که با گذشت زمان در آنها ایجاد شده و از خاصیت اکستروژن پذیری به ویژه در حالت نیمه‌جامد به شدت می‌کاهد. در این پژوهش برای جلوگیری از رسوب سختی، عملیات حرارتی محلول‌سازی<sup>1</sup> بعد از اکستروژن داغ و قبل از اکستروژن نیمه‌جامد بر روی نمونه‌ها صورت گرفت تا نمونه‌ها پس از محلول‌سازی، بلافاصله تحت اکستروژن مستقیم نیمه‌جامد قرار گرفته و فرصتی برای رسوب سختی در آنها ایجاد نشود.

## 2-1- بررسی دمای ماده نیمه‌جامد

عموماً کسر جامد ( $f_s$ ) درون محدوده انجماد و در هر دمایی ( $T$ ) با معادله اسپچیل بیان می‌شود (معادله 1). در شرایطی که فرض بر همگن‌سازی کامل مذاب و عدم نفوذ آن در فاز جامد می‌باشد [13].

$$f_s = \left( \frac{T_L - T}{T_L - T_S} \right)^{\frac{1}{2}} \times 100 \quad (1)$$

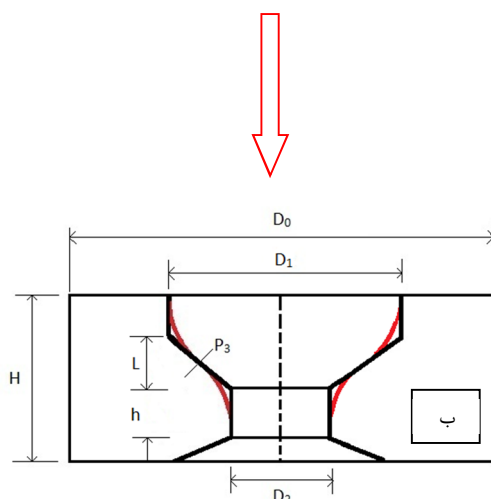
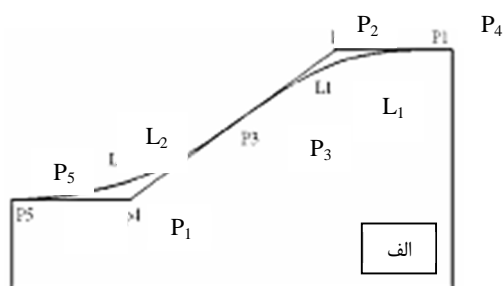
$T_S$  و  $T_L$  به ترتیب دماهای لیکوئیدوس (652 درجه سلسیوس) و سالییدوس (582 درجه سلسیوس) آلیاژ مذکور

<sup>1</sup> Solution heat treatment



### 3- نتایج

پس از انجام آزمایشات اکستروژن، خواص کششی میله‌های اکستروژد و تیگزو اکستروژد شده در قالب مخروطی به وسیله



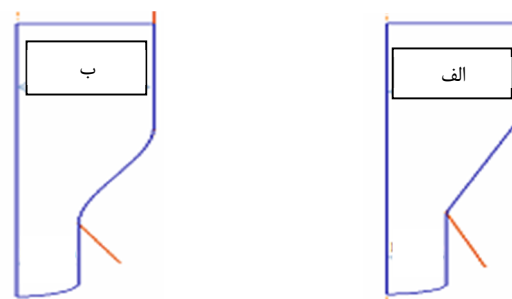
شکل 5- مدل سازی پروفیل قالب با منحنی‌های نرم افزاری

جدول 2- ابعاد قالب‌های استفاده شده برای اکستروژن

2	1	Die
50	50	$D_0$ (mm)
20	35	$D_1$ (mm)
14	20	$D_2$ (mm)
20	20	L(mm)
5	5	h(mm)
40	40	H(mm)
2/04	3/06	$\eta (D_1^2/D_2^2)$

آزمون کشش در دمای اتاق و با استفاده از ماشین آزمایشگاهی نوع Zwick 760 طبق استاندارد ASTM, B 557M-94 تعیین شد. نمونه‌های آزمایش با مقطع گرد و

آزمایشات تجربی صورت گرفته [8]، نیروی اکستروژن در قالب با پروفیل منحنی کمتر از قالب با پروفیل مخروطی



شکل 4- شمایی از طرح قالب‌ها در فرآیند اکستروژن مستقیم (الف) پروفیل مخروطی و (ب) پروفیل مرتبه سوم [7]

می‌باشد. همچنین با استفاده از تحلیل المان محدود مشخص شده‌است که قالب منحنی در مقایسه با قالب مخروطی موجب اختلاف کرنش مؤثر کمتری در محصول شده و بنابراین برای تولید محصول با خواص مکانیکی یکنواخت‌تر، مناسب‌تر از پروفیل مخروطی می‌باشد [7]. اما تحقیق تجربی کمی بر روی تفاوت‌های ساختاری و خصوصیات مکانیکی مواد تولید شده با دو پروفیل قالب منحنی و مخروطی صورت گرفته‌است. با به کارگیری نرم افزارهای طراحی می‌توان از پروفیل مخروطی قالب، شعاع‌های مورد نیاز قالب منحنی را تقریب زد. طرح تقریب قالب مخروطی به قالب منحنی به همراه منحنی‌های رسم شده و ابعاد قالب در شکل 5-ب و جدول 2 نشان داده شده‌اند. همانگونه که در شکل 5-الف نشان داده شده است، منحنی‌های  $L_1$  و  $L_2$  در نقطه  $P_3$  بر هم مماس می‌شوند. بنابراین شعاع لازم برای پروفیل قالب منحنی توسط نرم افزار مشخص شد. در این آزمایشات نیم زاویه قالب مخروطی 45 درجه می‌باشد. از آنجا که هدف از انجام این آزمون‌ها، مقایسه شرایط بهینه بین پروفیل مخروطی و منحنی می‌باشد، برای سهولت در ماشینکاری قالب‌ها، نیم زاویه هر دو قالب برابر 45 درجه منظور شدند. دقیق‌ترین روش برای ساخت قالب، تراش با دستگاه‌های کنترل عددی می‌باشد. برنامه G کدها با وارد کردن پروفیل به نرم افزار CATIA حاصل شد. سپس این برنامه به یک دستگاه تراش CNC منتقل شده و قالب منحنی مورد نظر تولید شد.

بدون هیچ گونه عملیات حرارتی آماده شده و نرخ کرنش ثابت و برابر با  $0/002 \text{ s}^{-1}$  در نظر گرفته شد. شکل 6 منحنی تنش-کرنش قطعه اکستروود شده در دمای 550 درجه سلسیوس (محدوده جامد) را نشان می‌دهد. همچنین شکل-های 7 تا 9 به ترتیب تغییرات استحکام تسلیم، استحکام نهایی کشش و ازدیادطول نسبی<sup>1</sup> نمونه‌ها را با تغییر در دمای تغییرشکل در محدوده نیمه‌جامد در مقایسه با نمونه اکستروود شده در دمای جامد (اکستروژن داغ) نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل‌ها دیده می‌شود، استحکام تسلیم و استحکام نهایی کشش با افزایش دمای تغییر شکل در محدوده نیمه جامد کاهش می‌یابند (شکل‌های 7 و 8). تغییر در استحکام تسلیم نمونه‌ها به دلیل تغییر در اندازه دانه آنها و تغییر در استحکام نهایی نمونه‌ها به دلیل ظهور تخلخل‌های انقباضی در دماهای تغییر شکل بالاتر می‌باشد [5].

ریزساختار مقطع عرضی نمونه اکستروود شده به همراه نمونه‌های تیگزواکستروود شده در شکل 10 نشان داده شده است. نمونه‌ها طبق استاندارد متالوگرافی آماده شده و در ادامه توسط محلول کِلر (محلول اسید شامل HF، HCL و HNO<sub>3</sub>) اچ شدند. ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری مشاهده شدند. این ریزساختارها شامل دانه‌هایی کروی و نسبتاً هم محور در بین فازهای مذاب در مرزخانه‌ها می‌باشند. مطابق این شکل‌ها، فازهای رسوب در مرزخانه‌ها به ندرت در دمای تغییرشکل بالا (مانند دمای 620 و 630 درجه سلسیوس) نسبت به دماهای دیگر تغییرشکل رخ می‌دهند. در این تصاویر، مناطق سفید، فاز مذاب منجمد شده می‌باشند. میانگین اندازه دانه در نمونه‌های نیمه جامد با افزایش دمای تغییرشکل افزایش یافته (شکل 11) که همین مسئله باعث کاهش استحکام تسلیم در نمونه‌ها طبق معادله هال-پچ<sup>2</sup> می‌شود [16]. بر طبق این معادله با افزایش اندازه دانه (D)، استحکام تسلیم ( $\sigma_{ys}$ ) کاهش می‌یابد (رابطه 2).

$$\sigma_{ys} = \sigma_i + KD^{-1/2} \quad (2)$$

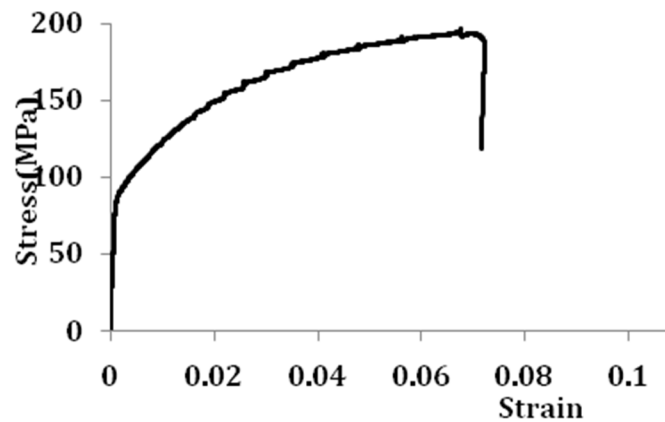
در این رابطه K ثابت قفل شدن شبکه و  $\sigma_i$  تنش اصطکاکی شبکه و جزو پارامترهای ثابت می‌باشند.

در مورد استحکام تسلیم نمونه اکستروود شده (جامد) و نمونه‌های نیمه‌جامد مقایسه‌ای صورت گرفته (شکل 7) که بر اساس اندازه دانه (شکل 11)، قابل استنباط می‌باشد. تخلخل‌های انقباضی که موجب کاهش استحکام نهایی نمونه‌ها می‌شوند، بیشتر در دماهای تغییر شکل بالا اتفاق می‌افتند. با افزایش دمای تغییرشکل، درصد مذاب در آلیاژ افزایش می‌یابد. افزایش درصد مذاب در آلیاژ، باعث افزایش تخلخل‌های انقباضی در قطعه نهایی شده و همین مسئله سبب می‌گردد که استحکام نهایی نمونه اکستروود شده در محدوده جامد نسبت به برخی نمونه‌های اکستروود شده در دمای نیمه جامد (نمونه‌های تیگزواکستروود شده در دماهای 620 و 630 درجه سلسیوس) بیشتر باشد (شکل 8). در نمونه‌های نیمه‌جامد نیز این قضیه صادق است. بر طبق شکل 8، استحکام نهایی کشش در این گروه نمونه‌ها با افزایش دمای تغییرشکل کاهش می‌یابد. همچنین ممکن است که در دماهای تغییر شکل بالا به دلیل کسر حجمی بالای مذاب و امکان روانسازی جریان تغییرشکل، ناهمگنی‌های کمتری در دانه‌های جامد ایجاد شده که موجب کاهش استحکام تسلیم و استحکام نهایی محصولات گردیده است [17]. تخلخل‌های انقباضی ممکن است در بعضی موارد موجب کاهش طول‌شدگی نمونه‌ها نیز شده [5] که این مسئله سبب گردیده تا طول‌شدگی نمونه اکستروود شده از برخی نمونه‌های تیگزواکستروود شده مانند نمونه‌های تغییرشکل یافته در دمای نیمه جامد 590، 600 و 610 درجه سلسیوس بیشتر باشد. اما از آنجا که افزایش دمای تغییرشکل باعث افزایش کسر مذاب در قطعات و متعاقباً انحلال ذرات رسوب در فاز مذاب خواهد شد [17] (شکل 10)، بنابراین انعطاف‌پذیری در نمونه‌های تیگزواکستروود شده در دماهای تغییرشکل بالا، یعنی 620 و 630 درجه سلسیوس افزایش یافته و این انحلال بر عیب ناشی از افزایش دما (ظهور تخلخل‌های انقباضی) در آلیاژ غلبه کرده و موجب شده تا این دو نمونه بیشترین مقدار ازدیادطول نسبی و انعطاف‌پذیری را نسبت به نمونه‌های دیگر داشته باشند (شکل 9).

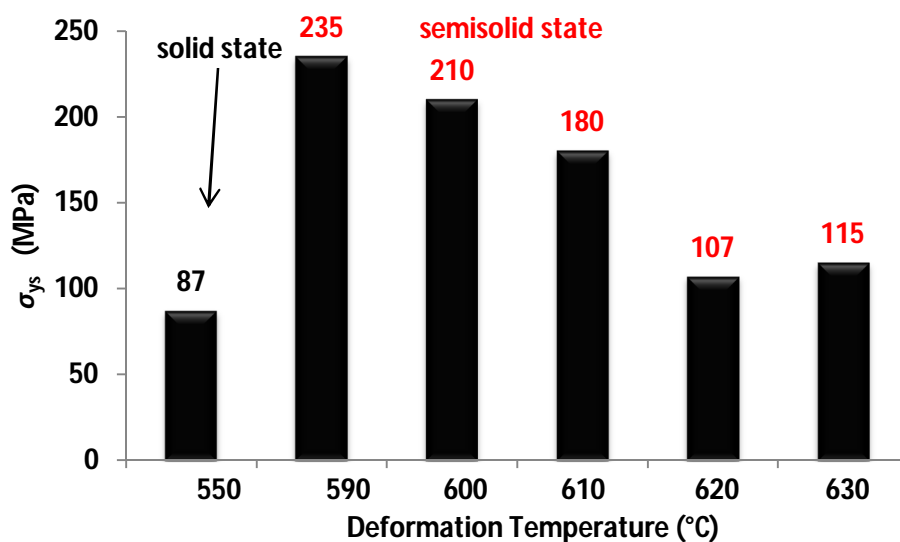
این موضوع همچنین با مشاهده نتایج عکسبرداری توسط میکروسکوپ الکترونی<sup>3</sup> قابل توضیح می‌باشد. شکل 12

<sup>1</sup> Elongation<sup>2</sup> Hall-Petch equation<sup>3</sup> Scanning Electron Microscopy (SEM)

تصویر سطح شکست نمونه‌های تیگزو اکستروژن‌شده در



شکل 6- منحنی تنش - کرنش نمونه تولیدشده با اکستروژن داغ در دمای 550 درجه سلسیوس



شکل 7- تغییرات استحکام تسلیم نمونه‌ها با تغییر دمای تغییر شکل

اند (شکست ترد) و برخی مناطق دیگر به صورت خوشه<sup>4</sup> می- باشند (شکست نرم).

با توجه به شکل 12- الف، مناطقی با تغییر شکل بسیار پائین دانه‌ها مشاهده شده که قابل ربط به دماهای تغییر شکل پائین

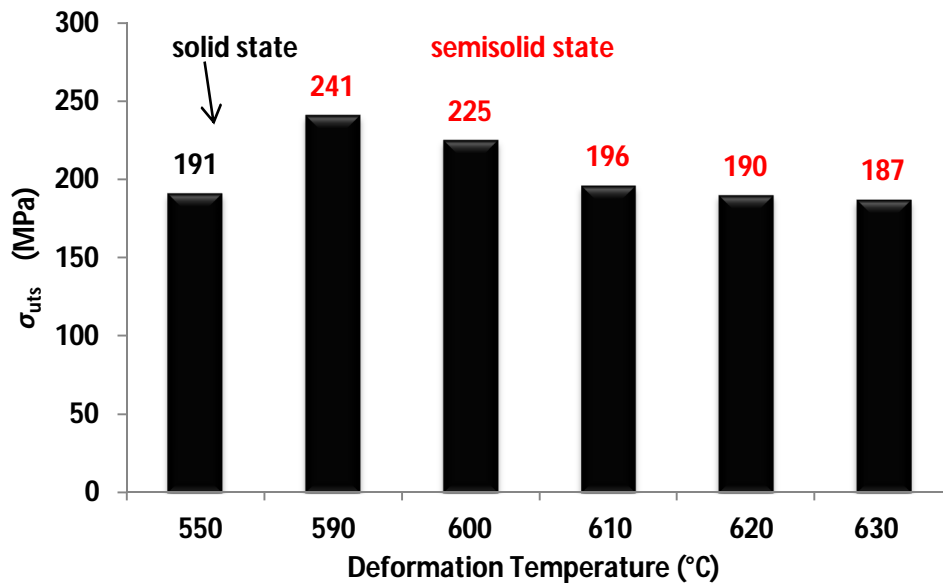
دمای 590 و 620 درجه سلسیوس را توسط میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد. ترکیبی از دو نوع شکست فنجان و مخروط<sup>1</sup> در این نمونه‌ها مشاهده شد. برخی مناطق حاوی ناخالصی‌های بین فلزی<sup>2</sup> بوده که به صورت پخ شکسته<sup>3</sup> شده

<sup>3</sup> Cleaved facet

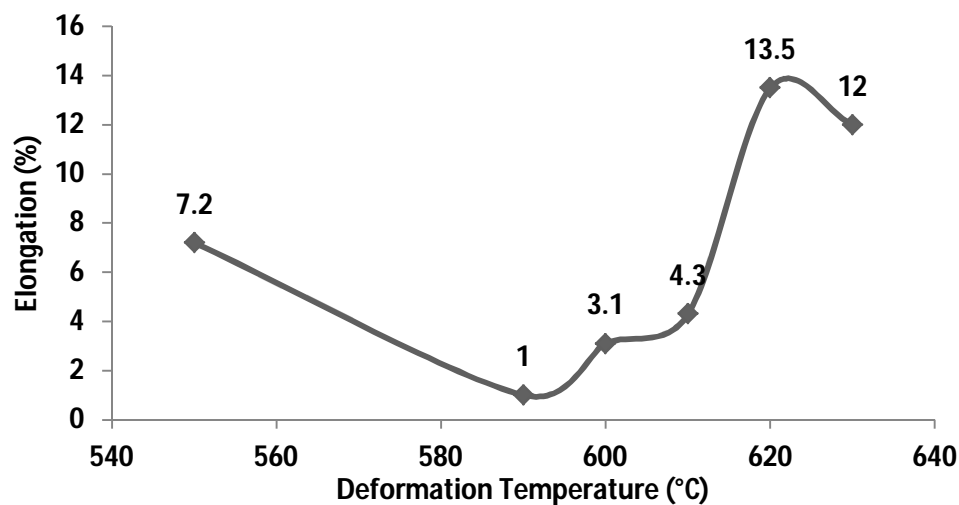
<sup>4</sup> Clusters of dimples

<sup>1</sup> Cup and Cone

<sup>2</sup> Intermetallic inclusions



شکل 8 - تغییرات استحکام نهایی کشش نمونه‌ها با تغییر دمای تغییر شکل

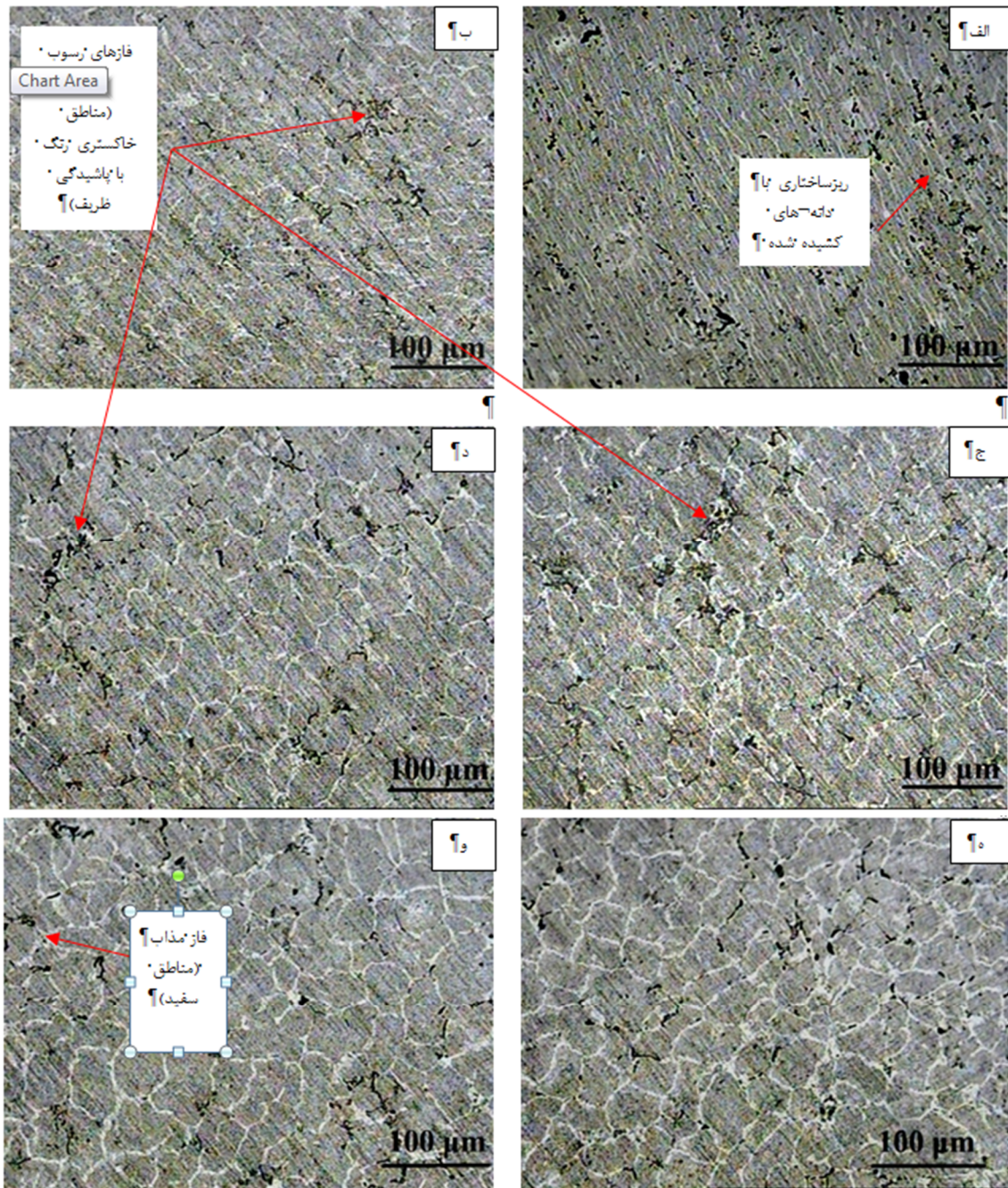


شکل 9 - تغییرات مقدار ازدیاد طول نسبی نمونه‌ها با تغییر دمای تغییر شکل

شده در دمای 620، رفتار ناهماهنگی حین آزمون کشش داشته که به دلیل کسر حجمی بسیار بالای مذاب و عیوب ریز ساختاری بیشتر مانند جدایش مذاب (شکل 13) و متعاقباً انعطاف‌پذیری کمتر در این دما می‌باشد (شکل 9). لذا دمای 620 درجه به عنوان دمای بهینه این آلیاژ در فرآیند شکل‌دهی نیمه‌جامد در نظر گرفته شد.

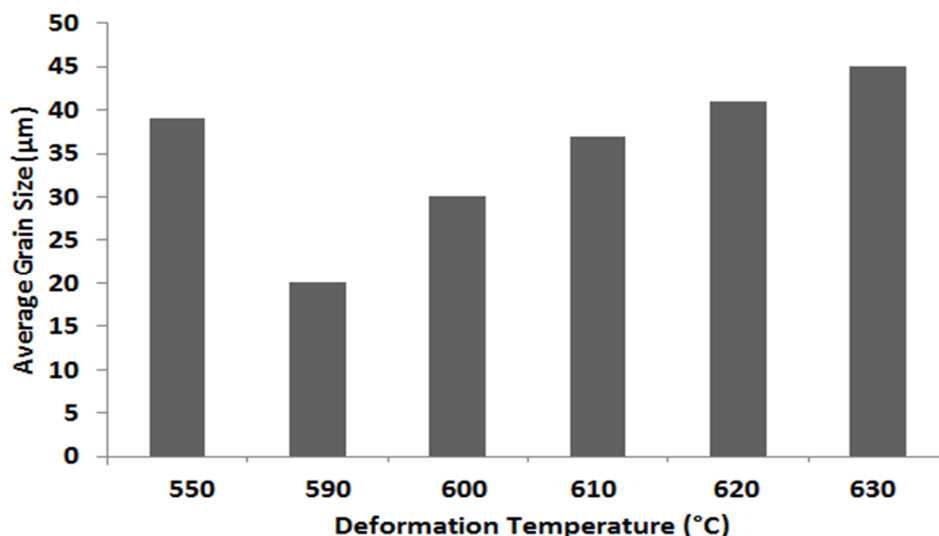
در محدوده نیمه‌جامد و متعاقباً انعطاف‌پذیری کمتر در این دماها می‌باشد.

تفاوت مهمی بین رفتار کششی نمونه‌هایی که در دو دمای نیمه‌جامد 620 و 630 درجه سلسیوس اکستروود شده‌اند، وجود ندارد. با این حال نمونه‌ای که در دمای 630 درجه سلسیوس تغییر شکل داده شده، نسبت به نمونه شکل داده

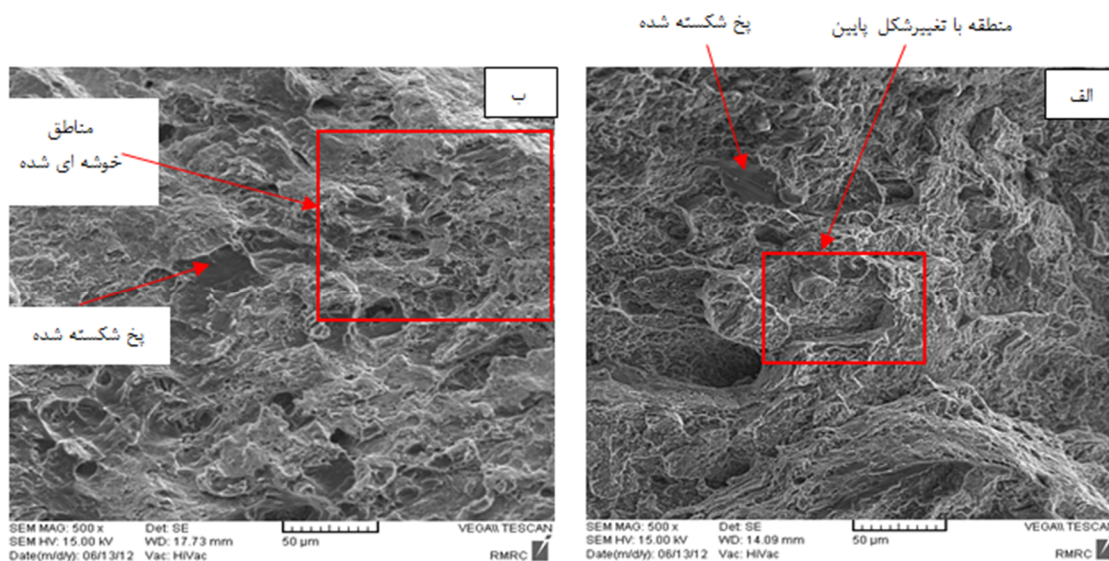


شکل 10 - ریزساختار نمونه‌های اکسترود و تیگزواکسترود شده در دماهای تغییر شکل الف) 550 (اکسترودن داغ)، ب) 590، ج) 600، د) 610، ه) 620، و) 630 درجه سلسیوس





شکل 11 - میانگین اندازه دانه نمونه‌های اکستروژن و تیگزواکستروژن شده در دمای مختلف (دمای 550 درجه سلسیوس، دمای نمونه اکستروژن شده می‌باشد)

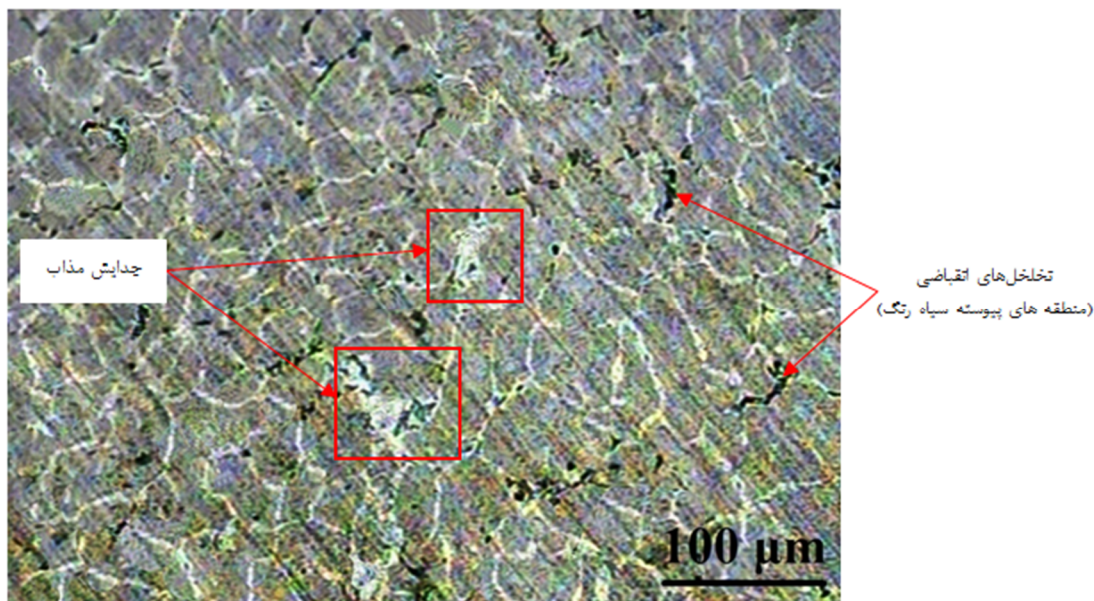


شکل 12 - عکس برداری از سطح شکست نمونه‌های کشش تیگزواکستروژن شده در دمای الف) 590 و ب) 620 درجه سلسیوس

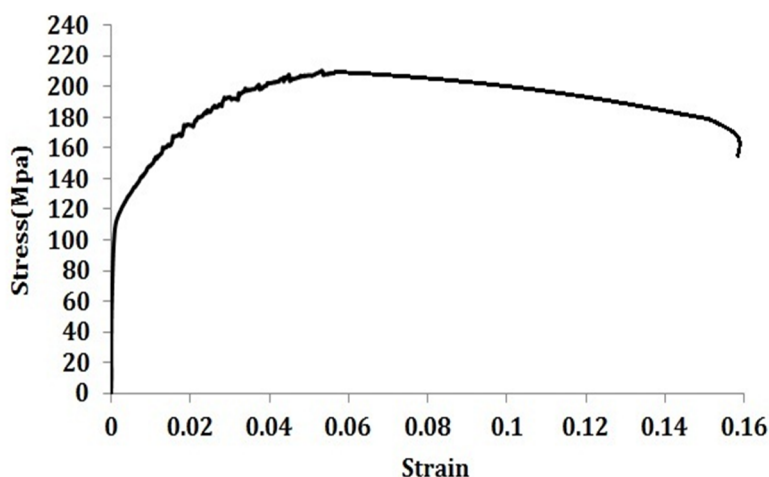
مخروطی و منحنی (قالب منحنی با نوع منحنی بزیر) نشان می‌دهند که تفاوت قابل توجهی بین این نمونه‌ها از نظر ریزساختاری وجود ندارد. اما با توجه به نتیجه آزمون کشش نمونه شکل‌دهی شده در قالب منحنی مشخص شد که این نمونه دارای استحکام تسلیم و استحکام نهایی کشش و

آزمایشات اولیه جهت تعیین دمای بهینه آلیاژ در فرآیند اکستروژن نیمه‌جامد مستقیم در قالب‌های با پروفیل مخروطی صورت گرفت. سپس آزمایش دیگری در قالب با پروفیل منحنی و دمای بهینه انجام پذیرفته و بدین ترتیب مقایسه‌ای بین نتایج دو نوع قالب در شرایط بهینه انجام شد. بررسی‌های متالوگرافی نمونه‌های تولیدشده در دو نوع قالب





شکل 13 - عیوب در نمونه‌های تیگزواکستروود شده در دمای تغییرشکل 630 درجه سلسیوس



شکل 14- منحنی تنش - کرنش قطعه تیگزواکستروود شده در دمای 620 درجه سلسیوس (شکل‌دهی در قالب منحنی)

ازدیاد طول نسبی بالاتری نسبت به نمونه شکل‌دهی شده در قالب مخروطی می‌باشد (شکل 14 و جدول 3). این رفتار از نظر مکانیکی قابل توجیه می‌باشد. در قالب مخروطی، تمرکز تنش در گوشه‌های قالب بیشتر از قالب منحنی بوده که این امر می‌تواند باعث تنش پس ماند بالاتری در قطعه حاصل از این نوع قالب شود. تمرکز تنش در قالب بر مقدار ازدیاد طول نسبی در قطعه حاصل تأثیر می‌گذارد. در نتیجه نمونه

تیگزواکستروود شده در قالب منحنی به دلیل تنش‌های پس ماند کمتر، دارای خواص مکانیکی بهتری نسبت به نمونه تغییرشکل یافته در قالب مخروطی می‌باشد.

جدول 3- نتایج مربوط به آزمون کشش نمونه

تیگزواکستروود شده در قالب منحنی

$\sigma_{ys}$ (MPa)	$\sigma_{ult}$ (MPa)	ازدیاد طول نسبی (%)
110	209	15/9

## 4- نتیجه گیری

نتیجه گیری‌های اصلی این تحقیق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- بررسی‌های مکانیکی و ریزساختاری نمونه‌های اکستروود و تیگزواکستروود شده در دماهای تغییر شکل مختلف نشان می‌دهد که نمونه اکستروود شده در محدوده دمای جامد دارای استحکام تسلیم پائین‌تری نسبت به نمونه‌های اکستروود شده در دمای نیمه جامد بوده که می‌تواند به دلیل میانگین اندازه دانه بالا در این نمونه باشد.

- در نمونه‌های تیگزواکستروود شده افزایش دما منجر به کاهش استحکام نهایی شد که می‌تواند ناشی از وجود تخلخل‌های انقباضی باشد. این امر همچنین سبب شده است تا استحکام نهایی نمونه اکستروود شده در محدوده جامد نسبت به برخی از نمونه‌های اکستروود شده در دمای نیمه جامد مانند نمونه‌های تیگزواکستروود شده در دماهای 620 و 630 درجه سلسیوس، بیشتر باشد.

- تخلخل‌های انقباضی ممکن است در بعضی موارد موجب کاهش ازدیاد طول نسبی نمونه‌ها نیز شده که این مسئله سبب گردیده تا ازدیاد طول نسبی نمونه اکستروود شده از برخی نمونه‌های تیگزواکستروود شده مانند نمونه‌های تغییر شکل یافته در دمای نیمه جامد 590، 600 و 610 درجه سلسیوس بیشتر باشد. اما از آنجا که افزایش دمای تغییر شکل باعث افزایش کسر مذاب در نمونه‌ها و متعاقباً انحلال ذرات رسوب در فاز مذاب خواهد شد، بنابراین مقدار انعطاف پذیری در نمونه‌های تیگزواکستروود شده در دماهای تغییر شکل بالا، یعنی در دمای 620 و 630 درجه سلسیوس افزایش یافته و این انحلال بر عیب ناشی از افزایش دما (ظهور تخلخل‌های انقباضی) در آلیاژ غلبه کرده و موجب شده تا این دو نمونه بیشترین مقدار ازدیاد طول نسبی و انعطاف پذیری را نسبت به قطعات دیگر داشته باشند.

- بررسی‌های متالوگرافی نشان می‌دهد که تفاوت قابل توجهی بین نمونه تیگزواکستروود شده در قالب منحنی و نمونه تیگزواکستروود شده در قالب مخروطی از نظر ریزساختاری وجود ندارد. اما با توجه به نتیجه آزمون کشش نمونه تیگزواکستروود شده در قالب منحنی مشخص شد که این نمونه دارای استحکام تسلیم و استحکام نهایی کشش و ازدیاد طول نسبی بالاتری نسبت به نمونه شکل‌دهی شده در

قالب مخروطی بوده که دلیل این امر می‌تواند ناشی از تمرکز تنش بالاتر در قالب مخروطی باشد که باعث ایجاد تنش‌های پس ماند بیشتری در نمونه شده است.

## مراجع

- [1] Fan Z (2002) Semisolid metal processing. *Inter Mater Rev* 2(47):1-30.
- [2] Lakshmi H, Vinay Kumar MC, Raghunath Kumar P, Ramanarayanan V, Murthy KSS, Dutta P (2010) Induction reheating of A356.2 aluminum alloy and thixocasting as automobile component. *Trans Nonferrous Met Soc China*: 961-967.
- [3] Mohammadi H, Ketabchi M, Kalaki A (2011) Microstructure evolution and mechanical properties of back-extruded Al 7075 alloy in the semi-solid state. *Int J Mater Form* 10: 1022-1027.
- [4] Vaneetveld G, Rassili A, Pierret JC, Lecomte-Beckers J (2010) Benefits of thixoforging hot-crack-sensitive Aluminium alloys at high solid fraction. *Int J Mater Form* 3: 783-786.
- [5] Rikhtegar F, Ketabchi M (2010) Investigation of mechanical properties of 7075 Al alloy formed by forward thixoextrusion process. *Mater Des* 31: 3943-3948.
- [6] Chen CP, Tsao C-YA (1996) Response of aluminium/graphite composite to deformation in the semi-solid state. *J Mater Sci* 31: 5027-5031.
- [7] فرشته‌صنعی ف، کریمی م، سبزی پور م (1387) بررسی عددی و تجربی تأثیر پروفیل قالب بر نیروی مصرفی در فرآیند اکستروژن میله. نهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید.
- [8] جهانی ح، علینژاد م، حسینی پور س ج، گرجی ع، بخشی م (1386) بهینه سازی پروفیل قالب در فرآیند اکستروژن سرد مستقیم. دومین کنگره بین المللی مهندسی ساخت و تولید ایران.
- [9] Noorani-Azad M, Bakhshi-Jooybari M, Hosseinipour SJ, Gorji A (2005) Experimental and numerical study of optimal die profile in cold forward rod extrusion of aluminum. *J Mater Process Technol*: 1572-1577.
- [10] Mohammadi H, Ketabchi M, Kalaki A (2010) Microstructure evolution of semi-solid 7075 Aluminum alloy during reheating process. *J. Mater Eng Per* 20: 1256-1263.
- [11] Yu D, Munroe PR, Bandyopadhyay S, Mouritz AP (1994) Recrystallization in SiC particulate reinforced 6061 aluminum metal matrix composites following low strain deformation. *Scripta Metall* 30: 927-932.

- [15] Kang CG, Kim NH, Kim BM (2000) The effect of die shape on the hot extrudability and mechanical properties of 6061 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites. *J Mater Process Technol* 100: 53–62.
- [16] Azushima A, Kopp R, Korhonen A, Yang DY, Micari F, Lahoti GD (2008) Sever Plastic Deformation (SPD) processes for metals. *Manufacturing Technology*: 716–735.
- [17] Rokni MR, Zarei-Hanzaki A, Abedi HR, Haghdaei N (2012) Microstructure evolution and mechanical properties of backward thixoextruded 7075 aluminum alloy. *Mater Des* 36: 557–563.
- [12] تویسرکانی ح (1388) شکل دادن فلزات. دانشگاه صنعتی اصفهان: 255-257.
- [13] Wang JG, Lu P, Wang HY, Jiang QC (2004) Effect of predeformation on the semisolid microstructure of Mg–9Al–0.6Zn alloy. *Materials Letters* 58: 3852–3856.
- [14] Wabusseg H, Gullo G, Uggowitz P, Steinhoff K, Kaufmann H (2002) Structure and properties of AlMgSi1 alloy tailored for semi-solid forming. *J Mater Sci* 37: 1173–1178.