

## تحلیل تجربی و اجزاء محدود فرآیند اکستروژن معکوس گرم پریفرم مخزن فولادی میکروآلیاژی وانادیم‌دار برای تعیین دمای پیشگرم بهینه

محمد حسین آذرمی<sup>۱</sup>، محمد بیات<sup>۲</sup>، مجید بلباسی<sup>۳\*</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۲، ش.ص: ۱۷۲-۱۵۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۴)

### چکیده

در این پژوهش تاثیر دمای پیشگرم بیلت بر نیروی انجام فرآیند اکستروژن معکوس گرم یک مخزن از جنس فولاد میکروآلیاژی وانادیم‌دار، مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا رفتار تغییر شکل پلاستیک فولاد مورد نظر توسط آزمون فشار گرم در دماهای ۸۵۰ تا ۱۲۵۰ °C تحت نرخ کرنش‌های مختلف به دست آمد. سپس با کمک این داده‌ها فرآیند اکستروژن معکوس برای مخزن مورد نظر با روش اجزاء محدود در محدوده دمایی ذکر شده شبیه‌سازی شد. نتایج آزمون فشار گرم و اجزاء محدود نشان داد که با افزایش دمای پیشگرم از ۸۵۰ به ۱۲۵۰ °C، مقدار تنش بیشینه از ۲۰۰ به ۴۲ MPa کاهش می‌یابد و نیروی انجام فرآیند اکستروژن معکوس گرم از ۲۴۷ به ۴۳ Ton کاهش پیدا می‌کند. در ادامه، ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت که هیچ‌گونه عیبی در ریزساختار آن‌ها مشاهده نگردید. در نهایت با توجه به نیروی محاسبه شده وارد به سنبه در فرآیند اکستروژن معکوس گرم در دمای ۱۲۰۰ °C به مقدار ۴۸ Ton و تنش بیشینه به دست آمده در آزمون فشار گرم به مقدار ۵۳ MPa، فرآیند اکستروژن معکوس گرم بر روی بیلت فولادی در دمای پیشگرم ۱۲۰۰ °C در کارگاه انجام شد که تغییر شکل بیلت به پریفرم مخزن بدون ایجاد انحراف ابعادی، چین خوردگی و ترک صورت گرفت.

**واژه‌های کلیدی:** آزمون فشار گرم، روش اجزاء محدود، اکستروژن معکوس گرم، پریفرم، دمای پیشگرم.

<sup>۱</sup> - کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، تهران، ایران

<sup>۲</sup> - استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، تهران، ایران

<sup>۳</sup> - استادیار، گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

\*-نویسنده مسؤل مقاله: [Dr.belbasi@gmail.com](mailto:Dr.belbasi@gmail.com)

## پیشگفتار

دمای پیشگرم یکی از متغیرهای مهم در شکل‌دهی داغ فولادها می‌باشد. کاهش دمای پیشگرم از مقدار بهینه، سبب افزایش نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی و کاهش شکل پذیری فلز می‌شود که این دو پدیده در برخی موارد منجر به ایجاد ترک در قطعه نهایی می‌شوند. از طرفی افزایش دمای پیشگرم از حد مجاز به همراه گرمای ایجاد شده در اثر تغییر شکل پلاستیک، سبب افزایش شدید دمای برخی نقاط قطعه می‌شود که می‌تواند سبب پدید آمدن عیوب در ریزساختار و اکسیداسیون شدید گردد.

فولادهای با حداقل استحکام تسلیم  $1380 \text{ MPa}$  را معمولاً فولادهای فوق مستحکم می‌نامند. کاربرد این فولادها در موارد حساس مانند مخازن تحت فشار، ارباه فرود هواپیما، پوسته موتور راکت و موتورهای توربین می‌باشد. به منظور کنترل شرایط تغییر شکل گرم این فولادها در فرآیندهایی مانند اکستروژن، نورد و فورج و دستیابی به خواص نهایی مطلوب، تعیین اثر متغیرهای موثر در فرآیند شکل‌دهی گرم که مهم‌ترین آن‌ها دما و نرخ کرنش هستند، ضروری است. یکی از فرآیندهای شکل‌دهی داغ فولادها، اکستروژن معکوس است که در حین انجام آن دمای قطعه به شدت افزایش می‌یابد [۱].

ابراهیمی و همکاران [۲] اثر دمای پیشگرم را بر روی افزایش دمای قطعه در حین فرآیند جدایش عناصر آلیاژی و احتمال ایجاد ذوب موضعی یا ذوب مرز دانه‌ای در فرآیند اکستروژن معکوس گرم آلیاژ آلومینیوم ۲۱۲۴ مورد بررسی قرار دادند. برای درک بهتر نحوه جریان فلز در منطقه تغییر شکل، افزایش دمای قطعه و نیروی لازم برای اکستروژن از تحلیل عددی به کمک نرم افزار ABAQUS استفاده گردید.

عنایتی و همکاران [۳] فرآیند اکستروژن معکوس گرم آلیاژ Ti-6Al-4V را با استفاده از روش اجزاء محدود و انجام آزمایش‌های عملی بررسی کردند. تاثیر کاهش سطح مقطع و دمای اولیه بیلت بر روی متغیرهایی مانند نیروی پرس و کرنش موضعی نقاط مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزایش دمای قطعه، در کاهش‌های سطح مقطع زیاد، قابل توجه است و به

خصوص در فصل مشترک بین سنبه و بیلت تا  $150^\circ \text{C}$  می‌رسد. به علاوه حداکثر کرنش پلاستیک اعمال شده به قطعه نیز در این نقاط مشاهده شد که در مجموع این دو عامل می‌توانند باعث ایجاد ترک‌های سطحی در قطعه نهایی شوند. تاثیر دمای اولیه بیلت بر نیروی پرس نیز به-دست آمد [۳].

پرویزیان و همکاران [۴] شبیه سازی عملیات اکستروژن را بر روی آلیاژهای آلومینیوم سری ۶۰۰۰ و ۷۰۰۰ انجام دادند. در این تحقیق بر روی فرآیند ترمومکانیکی اکستروژن بحث شد. با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود، تبادل حرارتی داخلی بیلت، تبادل حرارتی بین قطعه کار و قالب، اتلاف در اثر سایش، انرژی مکانیکی و تشعشع حرارتی سطوح مورد بررسی قرار گرفت.

می و همکاران [۵] رفتار آلیاژ آلومینیوم در فرآیند اکستروژن معکوس به روش اجزاء محدود را بررسی نمودند. با انجام آزمون فشار بر روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۸۵، نمودار تنش کرنش را برای چهار دمای مختلف و با نرخ کرنش‌های مختلف بدست آورده و با استفاده از اطلاعات آن‌ها و توسط روش‌های اجزاء محدود یک شبیه سازی از فرآیند تغییر شکل آلیاژ توسط روش اکستروژن معکوس انجام شده است.

میثمی و همکاران [۶] رفتار کار گرم فولاد میکرو آلیاژی استحکام بالای وانادیم‌دار را بررسی نمودند. ماده مورد استفاده در این تحقیق، فولاد میکروآلیاژی وانادیم‌دار کربن متوسط می‌باشد که با استفاده از آزمون فشار گرم در محدوده دمایی  $850^\circ \text{C}$  تا  $1100^\circ \text{C}$  و تحت نرخ کرنش  $0.01 \text{ s}^{-1}$  تا  $0.5 \text{ s}^{-1}$  اثر دما بر رفتار تغییر شکل گرم فولاد با استفاده از نمودارهای تنش-کرنش، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ریزساختار فولاد مذکور نیز توسط محلول‌های حکاکی مختلف بررسی شده است.

پویامنش و همکاران [۷] رفتار تغییرشکل گرم دو نوع فولاد زنگ نزن دوفازی ریختگی را بررسی نمودند. فولادها در سه دمای  $900^\circ \text{C}$ ،  $1000^\circ \text{C}$  و  $1100^\circ \text{C}$  و نرخ کرنش-های  $0.01 \text{ s}^{-1}$  و  $0.1 \text{ s}^{-1}$  با استفاده از آزمون فشار گرم مورد تغییر شکل گرم قرار گرفتند. منحنی‌های سیلان بدست آمده از هر دو فولاد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

فولاد مورد مطالعه، یک فولاد کربن متوسط کم آلیاژی است که دارای عنصر وانادیم می‌باشد. نتایج حاصل از تعیین ترکیب شیمیایی به روش کوانتومتری در جدول ۱ آورده شده است. با مقایسه جدول ۱ و ترکیب شیمیایی فولادهای فوق مستحکم [۹]، ملاحظه می‌شود که فولاد مورد مطالعه از لحاظ ترکیب شیمیایی تقریباً شبیه به فولاد کم آلیاژی استحکام بالای ۴۱۳۰ می‌باشد که با عنصر وانادیم میکروآلیاژ شده است.

### انجام آزمون فشار گرم

نمونه‌های آزمون فشار گرم از میلگرد موجود مطابق با استاندارد ASTM E209 [۱۰] با ارتفاع ۱۲ میلی‌متر و قطر ۸ میلی‌متر با رعایت نسبت ارتفاع به قطر برابر ۱/۵، مطابق شکل ۱ از طریق ماشین کاری و وایرکات تهیه شدند.

آزمون فشار گرم بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با استفاده از دستگاه فشار هیدرولیک مجهز به کوره مقاومتی که دارای سه کانال کنترل کرنش، جابجایی و بار اعمالی می‌باشد، انجام گردید. ابتدا نمونه‌ها بر روی فک پایینی دستگاه قرار داده شد. جهت جلوگیری از چسبندگی آن‌ها به فک‌ها، زیر و روی آن‌ها ورق مقاوم در برابر حرارت<sup>۱</sup> قرار داده شد. سپس فک بالایی تا حد امکان به سطح بالای نمونه نزدیک گردید. پس از آن درجه‌های استوانه‌ای کوره مقاومتی بسته شد. کنترلر دمایی کوره دستگاه جهت انجام آزمون برای دماهای ۸۵۰، ۹۵۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۲۵۰ °C تنظیم گردید. نمونه‌ها در دماهای انجام آزمون به مدت ۵ دقیقه نگه داشته شده تا هرگونه گرادیان دمایی از بین برود. سپس آزمون فشار گرم با نرخ کرنش ۰/۰۰۱ تا ۰/۵ S<sup>-1</sup> در دمای ثابت و با مقدار کرنش ۰/۵ انجام شد و در پایان تغییر شکل، نمونه‌ها بلافاصله در آب سرد شدند تا ساختار حاصل از فرایند حرارتی- مکانیکی در نمونه‌ها باقی بماند و دچار فرایندهایی مانند تبلور مجدد شبه دینامیکی نگردند. جدول ۲ نمونه‌های فشرده شده را پس از انجام آزمون فشار گرم در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف نشان می‌دهد.

نتایج بدست آمده بیانگر آن است که رفتار تغییر شکل گرم این دو فولاد به شدت تابع دما و نرخ اعمال کرنش می‌باشد.

اگاوا و همکاران [۸] محدوده‌ی دمای انجام عملیات اکستروژن معکوس گرم را برای یک آلیاژ منیزیم به دست آوردند. نمونه‌های آماده شده توسط دستگاه فشار گرم در محدوده‌ی دمایی ۱۰۰ تا ۵۰۰ °C با کاهش سطح مقطع- های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌های با دمای بیش‌تر از ۴۰۰ °C دچار اکسیداسیون شدید شده و نمونه‌های با دمای کم‌تر از ۲۵۰ °C به دلیل ایجاد ترک داخلی شکستند. محدوده‌ی دمای مناسب برای انجام فرآیند اکستروژن معکوس گرم ۲۵۰ تا ۴۰۰ °C مشخص شده است. عمده تحقیقات انجام شده در مورد دمای پیشگرم و شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن معکوس گرم بر روی مواد فلزی غیر آهنی نظیر آلومینیوم، منیزیم و تیتانیوم صورت گرفته است.

تحقیق حاضر بر روی یک فولاد میکروآلیاژی وانادیم- دار کربن متوسط انجام شده است که تاکنون تحقیقاتی بر روی رفتار تغییر شکل گرم این فولاد در دمای بالاتر از ۱۱۰۰ °C مشاهده نشده است. در این پژوهش با استفاده از آزمون فشار گرم در محدوده دمایی ۸۵۰ تا ۱۲۵۰ °C و تحت نرخ کرنش‌های ۰/۰۱ تا ۰/۵ S<sup>-1</sup>، اثر دما و نرخ کرنش بر رفتار تغییر شکل گرم فولاد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری بررسی شده است. سپس دمای پیشگرم بهینه برای انجام فرآیند اکستروژن معکوس گرم پریفرم مخزن تحت فشار مورد نظر، به کمک تحلیل اجزاء محدود و نتایج حاصل از آزمون فشار گرم مختلف بدست آمد. در ادامه، فرآیند کارگاهی اکستروژن معکوس گرم برای دو نمونه از بیلت‌های فولادی در دماهای پیشگرم ۱۲۰۰ و ۱۲۵۰ °C انجام گرفته و نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

#### مواد اولیه مورد استفاده

<sup>۱</sup> -mica

استفاده شد [۱۱]. در این رابطه  $\varepsilon$  ضریب صدور و  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن است.  $T_s$  و  $T_\infty$  به ترتیب دمای جسم و دمای محیط و  $q''$  نیز مقدار حرارت منتقل شده بر واحد سطح می باشد.

$$q'' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad \text{و} \quad \varepsilon = 0.6 \sim 0.8, \quad (1)$$

$$\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

برای محاسبه انتقال حرارت بین ابزار و قطعه از رابطه (۲) استفاده شد [۱۲].

$$q'' = K'(T_\infty - T_s) \quad (2)$$

در این رابطه  $K'$  ضریب انتقال حرارت تماسی یا بین سطحی می باشد که عکس مقاومت حرارتی تماسی ( $R''$ ) است. مقدار مقاومت حرارتی تماسی به متغیرهایی مانند جنس قطعه، صافی دو سطح، فشار بین دو سطح و سیالی که بین دو سطح قرار می گیرد وابستگی زیادی دارد.

### انجام فرآیند کارگاهی اکستروژن معکوس گرم

جهت بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش ها و تحلیل-های اجزاء محدود، دو نمونه از بیلت های فولادی توسط کوره القایی در دماهای پیشگرم  $1200^\circ\text{C}$  و  $1250^\circ\text{C}$  قرار گرفتند. سپس بیلت های پیشگرم شده توسط ماشین پرس مکانیکی  $650$  تن، پس از روانکاری مناسب با استفاده از مخلوط گریس و گرافیت، با کنترل دمای عملیات با ترمومتر لیزری، طی یک مرحله انجام فرآیند اکستروژن معکوس گرم، تبدیل به پریفرم های شکل ۴ شدند.

### نتایج و بحث

#### اثر دمای پیشگرم بر نمودار تنش- کرنش

نمودارهای تنش-کرنش در دماهای مختلف و تحت نرخ کرنش  $0.5 \text{ S}^{-1}$  مطابق شکل ۵ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل ملاحظه می گردد، اثر دما بر منحنی تنش-کرنش فشاری قابل توجه می باشد و در شرایط نرخ کرنش ثابت، با افزایش دمای تغییر شکل از  $850^\circ\text{C}$  به  $1200^\circ\text{C}$ ، سطح منحنی تنش-کرنش و به عبارت دیگر تنش بیشینه ( $\sigma_p$ ) و کرنش بیشینه ( $\varepsilon_p$ ) کاهش یافته است که نشان دهنده تسریع فرآیندهای کارنرمی با

### آماده سازی نمونه ها برای مشاهده ریزساختار با میکروسکوپ نوری

جهت بررسی ریزساختاری نمونه ها با سنباده های با مش ۸۰، ۲۴۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ سنباده زنی و پس از آن با پودر آلومینا پولیش شدند. سپس از محلول شیمیایی پیکرال<sup>۱</sup> ۴ درصد جهت مشاهده ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری استفاده گردید.

### شبیه سازی فرآیند اکستروژن معکوس گرم با نرم افزار

#### اجزاء محدود ABAQUS

برای انجام شبیه سازی فرآیند اکستروژن معکوس گرم توسط نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS باید تمامی خواص مکانیکی، فیزیکی و حرارتی این آلیاژ در محدوده دمایی شکل دهی وارد نرم افزار گردد. به علاوه انتقال حرارت نیز باید در مساله در نظر گرفته شود و رفتار الاستیک و پلاستیک فولاد مورد مطالعه در محدوده دمایی  $850^\circ\text{C}$  تا  $1250^\circ\text{C}$  با استفاده از نتایج آزمون فشار گرم شامل چهار پارامتر تنش، کرنش، نرخ کرنش و دما و استفاده از مرجع [۶] وارد نرم افزار گردد. ابعاد قطعه نهایی که پس از ماشینکاری قرار است حاصل شود، پس از طراحی مخزن تحت فشار بدست آمد. برای اینکه ابعاد قطعه نهایی حاصل شود، باید ابعاد پریفرم نیز پس از فرآیند اکستروژن معکوس مشخص گردد. با مشخص بودن ابعاد پریفرم، ابعاد ماتریس و سنبه نیز برای تولید این پریفرم بدست خواهد آمد. شکل ۲ نقشه دو بعدی پریفرم مخزن تحت فشار را نشان می دهد. شکل ۳ نیز وضعیت سنبه، قالب و بیلت مش بندی شده را قبل از انجام شبیه سازی فرآیند اکستروژن معکوس گرم نشان می دهد.

فرآیند شبیه سازی انجام شده از نوع مکانیکی و حرارتی می باشد، لذا برای مدل سازی از یکسری خواص فیزیکی و حرارتی فولاد ۴۱۳۰ مطابق با جدول ۳ استفاده شد. سنبه و ماتریس فولادی نیز به صورت اجسام صلب در نظر گرفته شدند و خواص مکانیکی و حرارتی آن ها طبق جدول ۴ می باشد. برای محاسبه انتقال حرارت تشعشی در نرم افزار ABAQUS برای مدل سازی انتقال حرارت جابه جایی، تشعشی و رسانشی از رابطه (۱)

به منظور بررسی اثر نرخ کرنش تغییرشکل داغ بر منحنی‌های تنش-کرنش، آزمون فشار گرم در دمای ثابت  $1200^{\circ}\text{C}$  و نرخ کرنش های  $0.1$ ،  $0.1$  و  $1 \text{ S}^{-1}$  انجام شده است که در شکل ۶ آمده است. مطابق شکل، در دمای ثابت، با افزایش نرخ کرنش، سطح منحنی تنش-کرنش و به عبارت دیگر تنش بیشینه ( $\sigma_p$ ) و کرنش بیشینه ( $\epsilon_p$ ) افزایش یافته است. افزایش تنش بیشینه با افزایش نرخ کرنش، قابل توجه است. دلیل این امر آن است که با افزایش نرخ کرنش، بر طبق رابطه زهر-هولومان (۱)، متغیر  $Z$  افزایش یافته و با توجه به اینکه  $Z$  با تنش طبق رابطه (۲) ارتباط مستقیم دارد، بنابراین با افزایش نرخ کرنش، سطح نمودار تنش-کرنش افزایش می‌یابد. دلیل دیگر آن است که با افزایش نرخ کرنش در دمای ثابت، میزان سخت‌شوندگی ناشی از افزایش تغییرشکل بیشتر از نرم‌شوندگی حاصل از تبلور مجدد دینامیک می‌باشد، بطوریکه با افزایش نرخ کرنش از  $0.1$  به  $1 \text{ S}^{-1}$  مقدار تنش بیشینه از  $21$  به  $53 \text{ MPa}$  افزایش یافته است. در جدول ۵ مقادیر تنش بیشینه در دماها و نرخ کرنش های مختلف تغییرشکل آمده است. از نتایج موجود در این جدول مشاهده می‌گردد که با افزایش دما و همچنین با کاهش نرخ کرنش مقادیر تنش بیشینه به شدت کاهش پیدا می‌کنند.

افزایش دما می‌باشد. با افزایش دما بدلیل فعال شدن پدیده‌های بازگشت انرژی کاهش می‌یابد، لذا تحرک مرزها برای جوانه‌زنی و رشد دانه‌های تبلور مجدد یافته و حذف نابجایی‌ها افزایش می‌یابد، در نتیجه سطح تنش کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به اینکه تبلور مجدد از جمله فرآیندهای فعال‌شونده با دما می‌باشد، با افزایش دما نیروی محرکه بیشتری برای وقوع آن وجود خواهد داشت، به طوری که افزایش دما شرایط مناسبی برای وقوع فرآیندهای ترمیم و رقابت آن‌ها با سخت‌شوندگی فراهم می‌آورد [۱۳]. با افزایش دما از  $1200$  به  $1250^{\circ}\text{C}$  کاهش محسوسی در مقدار تنش بیشینه مشاهده نمی‌شود که می‌تواند ناشی از این واقعیت باشد که در دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  نیروی محرکه لازم برای وقوع پدیده تبلور مجدد تامین شده و تبلور مجدد بطور کامل به وقوع پیوسته است. روابط ۳ و ۴ روابط بنیادین زهر-هولومان را نشان می‌دهد که جهت پیش بینی رفتار تغییرشکل گرم فلزات و آلیاژها می‌توان از آن استفاده نمود. به کمک این روابط می‌توان تنش سیلان فلز را به پارامترهای فرآیند از جمله نرخ کرنش و دما مرتبط نمود. طبق رابطه زهر-هولومان (۳)، می‌توان گفت که متغیر  $Z$  با دما رابطه معکوس دارد، بنابراین با افزایش دما،  $Z$  کاهش می‌یابد و از طرفی بین تنش با  $Z$  یک ارتباط مستقیم طبق رابطه (۲) وجود دارد، در نتیجه با افزایش دمای تغییرشکل، متغیر  $Z$  کاهش یافته و در نهایت تنش کاهش یافته و سطح نمودار پایین می‌آید، لذا با افزایش دما از  $850$  به  $1250^{\circ}\text{C}$  مقدار تنش بیشینه ( $\sigma_p$ ) از  $200$  به  $42 \text{ MPa}$  رسیده است.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

$$Z = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (4)$$

در این روابط، متغیر  $Q$ ، انرژی فعال‌سازی<sup>۱</sup> یا انرژی که از بالا رفتن دما در عملیات کارگرم به دست می‌آید،  $R$  ثابت بولتزمن<sup>۲</sup>،  $T$  دما برحسب درجه سانتی‌گراد و  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش،  $A$  و  $\alpha$  ضریب و  $n$  توان می‌باشد.

اثر نرخ کرنش ( $\dot{\epsilon}$ ) بر نمودار تنش-کرنش

<sup>۱</sup> -Activation Energy

<sup>۲</sup> -Boltzmann


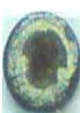





## جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد مطالعه

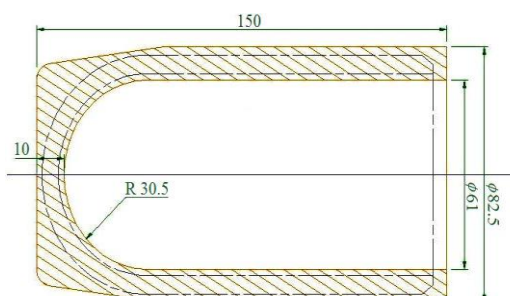
عنصر شیمیایی	کربن	کروم	نیکل	منگنز	سیلیسیم	وانادیم	مس	فسفر	گوگرد	آهن
درصد وزنی (%)	۰/۳	۱	۱/۵	۱	۱	۰/۱	۰/۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۵	مابقی



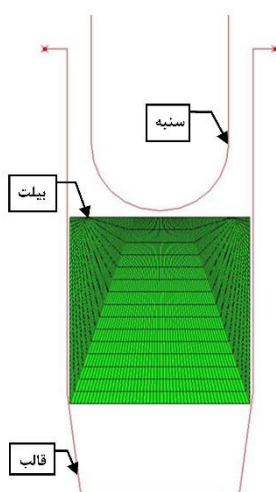
شکل ۱- نمونه‌های آماده شده قبل از آزمون فشار گرم

## جدول ۲- نمونه‌های فشرده شده پس از انجام آزمون فشار گرم در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
دمای آزمون (°C)	۸۵۰	۹۵۰	۱۱۰۰	۱۲۵۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰
نرخ کرنش ( $S^{-1}$ )	۰.۵	۰.۵	۰.۵	۰.۵	۰.۱	۰.۱	۰.۵
سرعت فک (mm/min)	۲۷۰	۲۷۰	۲۷۰	۲۷۰	۵۴	۵۴	۲۷۰
نمونه بعد از آزمون							



شکل ۲- نقشه دو بعدی پرفرم مخزن تحت فشار پس از ماشینکاری



شکل ۳- بیلت فولادی مش بندی شده برای شبیه سازی فرآیند اکستروژن معکوس گرم

جدول ۳- خواص مکانیکی و حرارتی فولاد مورد مطالعه

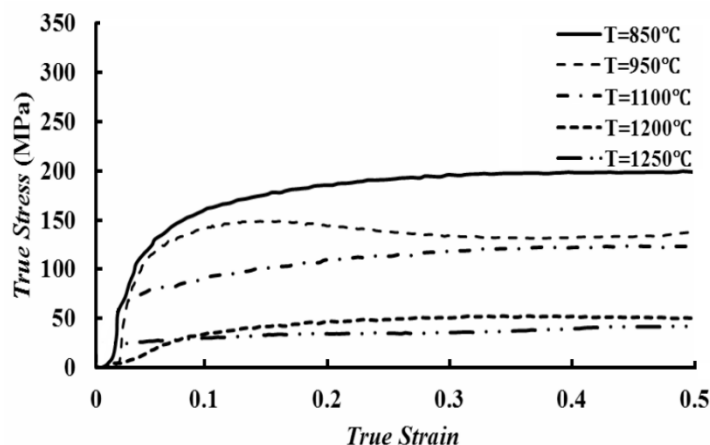
ردیف	گروه	عنوان خاصیت (انگلیسی)	عنوان خاصیت (فارسی)	واحد	مقدار
۱	General	density	چگالی	Kgr/m <sup>3</sup>	۷۸۴۵
۲	Mechanica	Thermal Expansion	ضریب انبساط حرارتی خطی	1/C	طبق نمودار ضریب انبساط حرارتی [۱۰]
۳		modulus Of Elasticity	مدول الاستیک	Pa	طبق نمودار مدول الاستیک [۱۰]
۴		Plastic behavior	رفتار پلاستیک	-	طبق نتایج آزمون فشار گرم
۵	Thermal	conductivity	ضریب انتقال حرارتی	W/m.K	طبق نمودار ضریب انتقال حرارتی [۱۰]
۶		Specific Heat	گرمای ویژه	Joule/Kg.K	طبق نمودار نمودار گرمای ویژه [۱۰]
۷	Thermal Contact	R"	مقاومت حرارتی تماسی	m <sup>2</sup> .K/W	[۱۱] ۰,۷
۸		K'=1/R"	ضریب انتقال حرارت تماسی	W/m <sup>2</sup> .K	[۱۱] ۱,۴۲
۹		μ	ضریب اصطکاک	-	۰,۰۷
۱۰		h	ضریب انتقال حرارت جابجایی	W/m <sup>2</sup> .K	۱۰۰
۱۱		Sink temperature	دمای محیط	°C	۲۷
۱۲		Absolute zero temperature	دمای صفر مطلق	°C	-۲۷۳,۱۵
۱۳	Stefan Boltzmann Constant	ضریب استفان بولتزمن	-	۵,۶۶۹E-۰۰۸	

جدول ۴- خواص حرارتی فولاد سمبه و ماتریس [۱۱]

ردیف	خاصیت (انگلیسی)	خاصیت (فارسی)	واحد	مقدار
۱	Heat Capacitance	ظرفیت گرمایی	Joule/Kg.K	۴۸۰
۲	Mass	جرم	kg	۸



شکل ۴- پرفرم بدست آمده پس از انجام فرآیند اکستروژن معکوس گرم در دماهای پیشگرم الف)  $1250^{\circ}\text{C}$  و ب)  $1200^{\circ}\text{C}$



شکل ۵- اثر دمای تغییر شکل بر نمودار تنش- کرنش فشاری تحت نرخ کرنش  $5\text{ S}^{-1}$

طبق رابطه (۲) ارتباط مستقیم دارد، بنابراین با افزایش نرخ کرنش، سطح نمودار تنش-کرنش افزایش می‌یابد. دلیل دیگر آن است که با افزایش نرخ کرنش در دمای ثابت، میزان سخت‌شوندگی ناشی از افزایش تغییرشکل بیش‌تر از نرم‌شوندگی حاصل از تبلور مجدد دینامیک می‌باشد، به طوری که با افزایش نرخ کرنش از  $0.1$  به  $5\text{ S}^{-1}$  مقدار تنش بیشینه از  $21$  به  $53\text{ MPa}$  افزایش یافته است. در جدول ۵ مقادیر تنش بیشینه در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف تغییر شکل آمده است. از نتایج موجود در این جدول مشاهده می‌گردد که با افزایش دما و

#### اثر نرخ کرنش ( $\dot{\epsilon}$ ) بر نمودار تنش-کرنش

به منظور بررسی اثر نرخ کرنش تغییرشکل داغ بر منحنی‌های تنش-کرنش، آزمون فشار گرم در دمای ثابت  $1200^{\circ}\text{C}$  و نرخ کرنش‌های  $0.1$ ،  $0.01$  و  $0.5\text{ S}^{-1}$  انجام شده است که در شکل ۶ آمده است. مطابق شکل، در دمای ثابت، با افزایش نرخ کرنش، سطح منحنی تنش-کرنش و به عبارت دیگر تنش بیشینه ( $\sigma_p$ ) و کرنش بیشینه ( $\epsilon_p$ ) افزایش یافته است. افزایش تنش بیشینه با افزایش نرخ کرنش، قابل توجه است. دلیل این امر آن است که با افزایش نرخ کرنش، بر طبق رابطه زنگر-هولومان (۱)، متغیر  $Z$  افزایش یافته و با توجه به اینکه  $Z$  با تنش



بالا بودن تنش در قسمت‌های تحتانی پریفرم پیش‌بینی می‌شود که پس از انجام فرآیند در کارگاه در این نواحی پریفرم‌ها عیوب ایجاد شود.

### تأثیر دمای پیشگرم بر نیروی وارده به سنبه در شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن معکوس گرم با نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS

تأثیر دمای پیشگرم بر نیروی وارده به سنبه در شکل ۱۰ نشان داده است. در این نمودار نیروی وارد به سنبه بر حسب جابجایی سنبه برای دماهای پیشگرم ۸۵۰، ۹۰۰، ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰، ۱۱۰۰، ۱۱۵۰، ۱۲۰۰ و ۱۲۵۰ °C رسم شده است. در جدول ۶ نیز مقدار ماکزیمم نیروی وارده بر سنبه برای دماهای پیشگرم درج شده است. مقادیر این جدول مشخص کننده این می‌باشد که در هر دمای پیشگرم، بیلت با چه نیرویی از طرف سنبه در حین فرآیند اکستروژن معکوس به پریفرم تبدیل می‌شود. همان‌گونه که از این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش دمای پیشگرم از ۸۵۰ به ۱۲۵۰ °C، نیروی لازم برای انجام فرآیند از ۲۴۷ به ۴۳ Ton کاهش پیدا کرده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اعداد بدست آمده از آزمون فشار گرم که با افزایش دما از ۸۵۰ به ۱۲۵۰ °C، مقدار تنش بیشینه از ۲۰۰ به ۴۲ Mpa کاهش یافته است مطابقت دارد. اگرچه با افزایش دما، نیروی مورد نیاز به شدت کاهش می‌یابد؛ اما همان‌گونه که ذکر شد، افزایش دما می‌تواند اثرات مخربی مانند اکسیداسیون شدید که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، همچنین عیوب در ریزساختار را به وجود آورد.

### تأثیر دمای پیشگرم بر افزایش دمای پریفرم در شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن معکوس گرم با نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS

در شکل ۱۲ کانتور دما برای دمای پیشگرم ۸۵۰ °C رسم شده است. افزایش دمای قطعه پس از تغییر شکل در دو دمای پیشگرم ۸۵۰ و ۱۲۵۰ °C به ترتیب معادل ۹۳ و ۲ °C پیش بینی شده است. نتایج بررسی کانتورهای دما در دماهای پیشگرم ۸۵۰ تا ۱۲۵۰ °C در جدول ۷ آورده شده است.

همچنین با کاهش نرخ کرنش مقادیر تنش بیشینه به شدت کاهش پیدا می‌کنند.

### بررسی ریزساختاری نمونه‌ها

ریزساختار نمونه‌های آزمون فشار گرم در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف پس از طی مراحل فرآیند متالوگرافی توسط میکروسکوپ نوری طبق استاندارد ASTM E883 [۱۴] مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۷ ریزساختار نمونه‌های آزمون فشار گرم در نرخ کرنش ثابت  $S^{-1} 0.5$  و دماهای ۸۵۰ تا ۱۲۵۰ °C را نشان می‌دهد. شکل ۸ ریزساختار نمونه‌های آزمون فشار گرم در دمای ثابت ۱۲۰۰ °C و نرخ کرنش‌های  $0.001$  تا  $S^{-1} 0.5$  را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در تصاویر شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، با توجه به دیانگرم آهن-کربن زمانی که فولاد مورد نظر با  $0.3$  درصد کربن به دمای بالای فاز آستنیتی می‌رسد، ریزساختار آن تبدیل به آستنیت خواهد شد و با سرد کردن سریع استحاله فاز مارتنزیت اتفاق می‌افتد؛ ولی مرزخانه‌های آستنیت آن باقی می‌ماند. در نتیجه در برخی مناطق دانه‌های آستنیت اولیه آشکار شده است و تیغه‌های مارتنزیتی هم داخل مرزخانه‌ها مشاهده می‌گردد. با توجه به هدف اصلی بررسی ریزساختار نمونه‌ها که مشاهده عیوب احتمالی در ریزساختار بود، پس از بررسی تصاویر بدست آمده مشخص گردید که هیچ‌گونه عیبی در ریزساختار نمونه‌ها در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف مشاهده نگردید.

### تأثیر دمای پیشگرم بر کانتور تنش وون میزز در شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن معکوس گرم با نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS

شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن گرم با نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS در دماهای پیشگرم ۸۵۰ تا ۱۲۵۰ °C انجام گردید. به عنوان نمونه کانتور تنش موثر وون میزز پریفرم مخزن در شکل ۹ برای دمای پیشگرم ۱۲۰۰ °C نشان داده شده است. طبق شکل بیش‌ترین مقدار تنش در قسمت‌های تحتانی پریفرم مخزن ایجاد می‌شود که در دمای پیشگرم ۱۲۰۰ °C معادل ۴۴MPa و در دمای پیشگرم ۸۵۰ °C معادل ۲۱۴ MPa می‌باشد. با توجه به

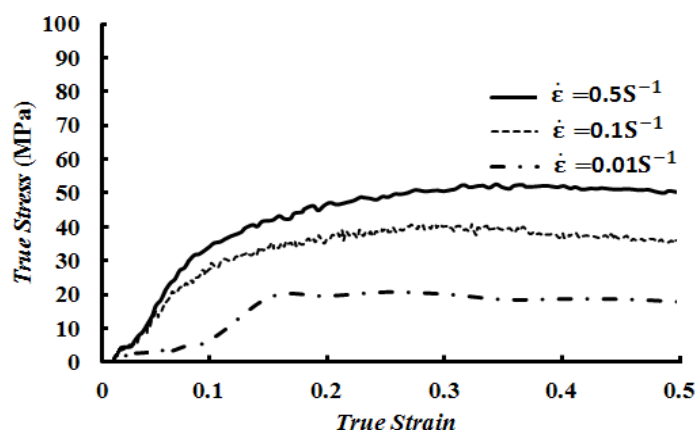
شکل ۳ مطابقت دارد و ماشین پرس با تناژ مذکور در انجام فرآیند هیچ گونه مشکلی از جمله گیر کردن سنبه و بیلت در ماتریس و غیره را نداشت و هیچ اثری از اکسیداسیون شدید و ایجاد شکل هندسی نامنظم و چین خوردگی در پرفرم کارگاهی دیده نمی شود.

پرفرم به دست آمده در دمای پیشگرم  $1250^{\circ}\text{C}$ ، با نقشه پرفرم شکل ۳ مطابقت نداشته و همان طور که از شکل ۱۳ مشخص می باشد، لبه های خارجی پرفرم دارای شکل هندسی نامنظمی است و طبق شکل اکسیداسیون شدیدی در قسمت پایینی پرفرم ایجاد شده است و یک سمت از پرفرم دارای چین خوردگی می باشد.

با توجه به وجود افزایش دما در سطوح قسمت های تحتانی پرفرم، پیش بینی می شود که ایجاد عیوب احتمالی از جمله ترک های ریز سطحی در پرفرم های حاصل از فرآیند کارگاهی، در این ناحیه ها و در دماهای پیشگرم پایین تر مانند  $850^{\circ}\text{C}$  که کرنش پلاستیک بیشتری به آن ها وارد شده است و یا به عبارت دیگر تحت کار مکانیکی بیشتری قرار گرفته اند، مشاهده گردد.

### بررسی پرفرم های حاصل از فرآیند کارگاهی اکستروژن معکوس گرم

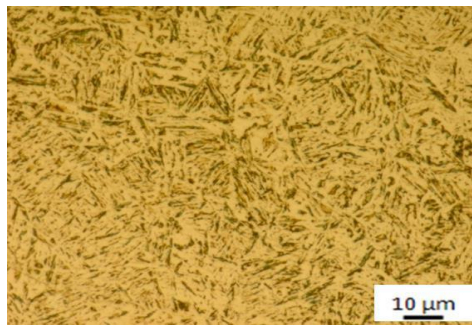
همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می شود، پرفرم به دست آمده در دمای پیشگرم  $1200^{\circ}\text{C}$ ، با نقشه پرفرم



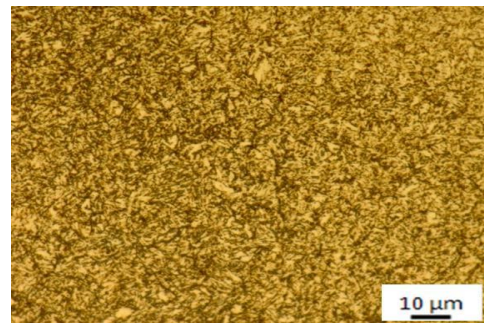
شکل ۶- اثر نرخ کرنش بر نمودار تنش-کرنش فشاری در دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  تحت نرخ کرنش های  $0.1$ ،  $0.01$  و  $0.5 \text{ S}^{-1}$ .

جدول ۵- تنش بیشینه در دما و نرخ کرنش های مختلف

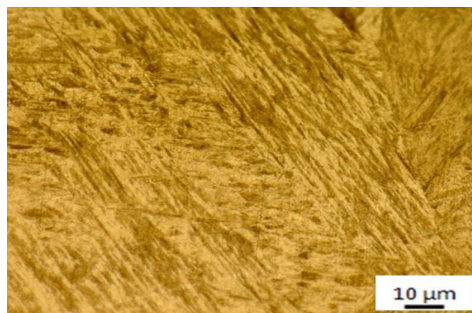
تنش بیشینه ( $\sigma_p$ ) (MPa)	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )	نرخ کرنش ( $\dot{\epsilon}$ ) ( $\text{S}^{-1}$ )
۲۰۰	۸۵۰	۰/۵
۱۴۹	۹۵۰	
۱۲۵	۱۱۰۰	
۵۳	۱۲۰۰	
۴۲	۱۲۵۰	
۵۳	۱۲۰۰	۰/۵
۴۱		۰/۱
۲۱		۰/۰۱



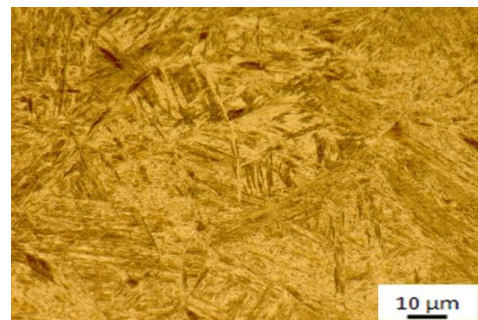
(ب)



(الف)

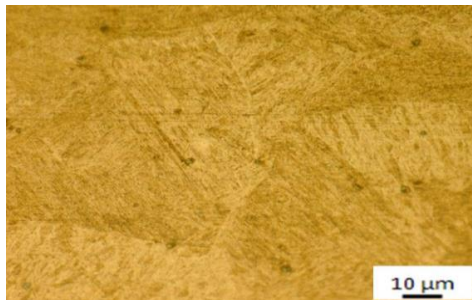


(د)

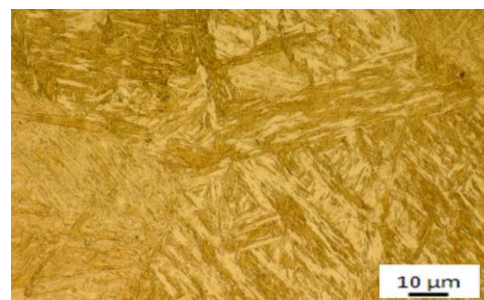


(ج)

شکل ۷- ریزساختار نمونه‌های تحت آزمون فشار گرم در نرخ کرنش ثابت  $S^{-1}$  و  $0.5$  و دماهای (الف)  $850^{\circ}C$ ، (ب)  $950^{\circ}C$ ، (ج)  $1100^{\circ}C$  و (د)  $1250^{\circ}C$



(ب)



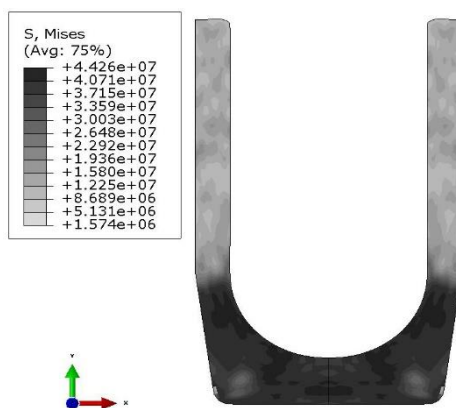
(الف)



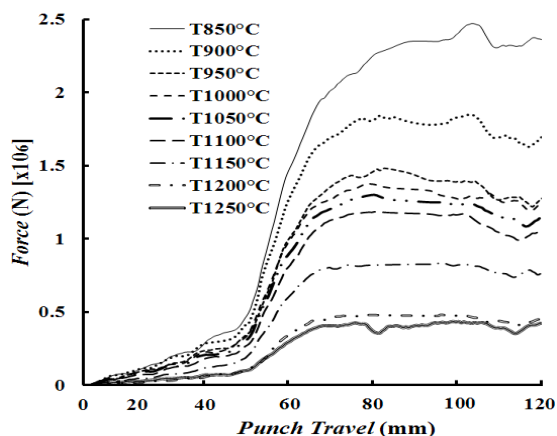
(ج)

شکل ۸- ریزساختار نمونه‌های آزمون فشار گرم تحت دمای پیشگرم ثابت  $1200^{\circ}C$  در نرخ کرنش‌های

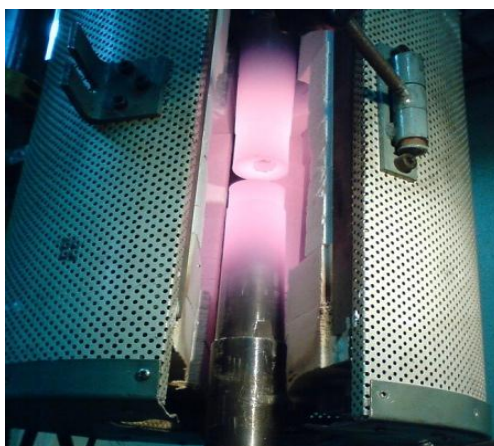
(الف)  $S^{-1}$ ، (ب)  $0.1 S^{-1}$  و (ج)  $0.01 S^{-1}$



شکل ۹- کانتور های تنش وان میزز بیلت فولادی بعد از فرآیند اکستروژن معکوس گرم در دمای پیشگرم ۱۲۰۰ °C



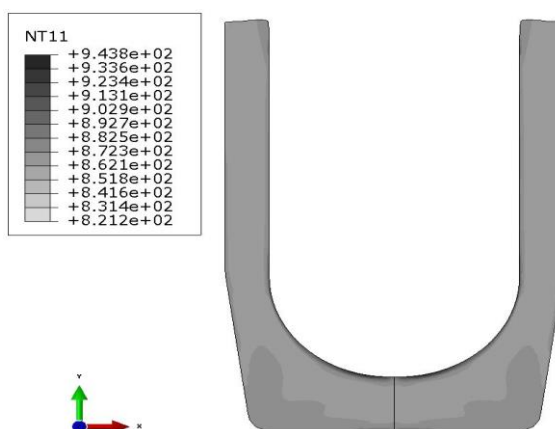
شکل ۱۰- تاثیر دمای پیشگرم بر نیروی وارده به سنبه در نمودار نیرو-جابجایی



شکل ۱۱- اکسیداسیون شدید نمونه فشار گرم در دمای ۱۲۵۰ °C

جدول ۶- نیروی مورد نیاز برای انجام فرآیند اکستروژن معکوس گرم در دماهای مختلف پیشگرم

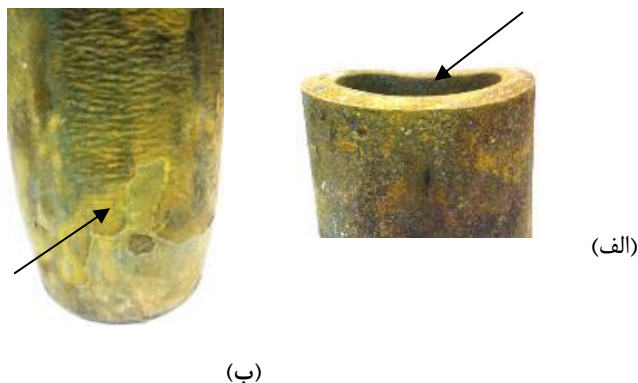
نیروی وارده به سنبه (Ton)	دمای پیشگرم بیلت (°C)
۱۹۸	۸۵۰
۱۸۶	۹۰۰
۱۴۷	۹۵۰
۱۳۷	۱۰۰۰
۱۳۰	۱۰۵۰
۱۱۸	۱۱۰۰
۸۳	۱۱۵۰
۴۸	۱۲۰۰
۴۳	۱۲۵۰



شکل ۱۲- کانتور های دمای بیلت بعد از فرآیند اکستروژن معکوس گرم با دمای پیشگرم ۸۵۰ °C

جدول ۷- افزایش دمای پریفرم در حین فرآیند اکستروژن معکوس گرم

افزایش دمای قطعه (°C)	دمای پیشگرم بیلت (°C)
۹۳	۸۵۰
۶۳	۹۰۰
۵۰	۹۵۰
۲۷	۱۰۰۰
۲۳	۱۰۵۰
۱۹	۱۱۰۰
۴	۱۱۵۰
۳	۱۲۰۰
۲	۱۲۵۰



شکل ۱۳- پرفرم ایجاد شده با فرآیند اکستروژن معکوس گرم در دمای پیشگرم  $1250^{\circ}\text{C}$  (الف) قسمت فوقانی شامل تغییر شکل هندسی نامنظم لبه‌های خارجی و (ب) بدنه دارای اکسیداسیون شدید

### نتیجه گیری

۴- نتایج تصاویر ریزساختاری نشان داد که هیچ‌گونه عیبی در ریزساختار نمونه‌های با دماهای پیشگرم  $850^{\circ}\text{C}$  تا  $1250^{\circ}\text{C}$  مشاهده نگردید.  
۵- اکسیداسیون شدید در نمونه آزمایشی و پرفرم کارگاهی و ایجاد شکل هندسی نامنظم و چین خوردگی در پرفرم کارگاهی، نشان داد که دمای  $1250^{\circ}\text{C}$  دمای پیشگرم مناسبی برای انجام فرآیند اکستروژن معکوس گرم نمی‌باشد و دمای بهینه پیشگرم  $1200^{\circ}\text{C}$  می‌باشد به طوری که در این دما نیروی وارد به سنبه در شبیه سازی فرآیند اکستروژن معکوس گرم مقدار  $48\text{ Ton}$  و تنش بیشینه در آزمون فشار گرم مقدار  $53\text{ MPa}$  می‌باشد.

۱- با افزایش دمای پیشگرم نمونه‌ها در آزمون فشار گرم از  $850^{\circ}\text{C}$  به  $1250^{\circ}\text{C}$ ، مقدار تنش بیشینه از  $200$  به  $42\text{ MPa}$  کاهش یافت.  
۲- با افزایش دمای پیشگرم از  $850^{\circ}\text{C}$  به  $1250^{\circ}\text{C}$  در شبیه سازی فرآیند اکستروژن معکوس گرم، نیروی وارد به سنبه از  $247$  به  $43\text{ Ton}$  کاهش یافت. به عبارتی تناژ پرس مورد نیاز  $83\%$  کاهش پیدا کرد.  
۳- با کاهش دمای پیشگرم از  $1250^{\circ}\text{C}$  به  $850^{\circ}\text{C}$  در شبیه سازی فرآیند اکستروژن معکوس گرم، افزایش دمای قطعه حین تغییر شکل پلاستیک از  $2$  به  $93^{\circ}\text{C}$  رسید.

### References:

- [1] B. Eghbali, A. Abdollah-Zadeh, "Strain-induced transformation in a low carbon microalloyed steel during hot compression testing", J. Scrip. Mater. Vol. 54, pp. 1205-1209, 2006.
- [2] S. M. Ebrahimi, "Investigation on the effects of preheat temperature on the microstructure of the backward extrusion of Al2124", International Aluminum Conference 2009, 2009, Tehran, Iran.
- [3] S. Enayati, S. A. A. Mousavi, S. M. Ebrahimi, M. Belbasi, M. S. Bayazidi, "Effects of temperature and effective strain on the flow behavior of Ti-6Al-4V", Journal of the Franklin Institute, Vol. 348, No. 10, pp. 2813-2822, 2011.
- [4] F. Parvizian, T. Kayser, C. Hortig, B. Svendsen, "Thermomechanical modeling and simulation of aluminum alloy behavior during extrusion and cooling", Journal of materials processing technology, Vol. 209, No. 2, pp. 876-883, 2009.
- [5] R. Mei, Y. Du, L. Bao, X. Zhang, B. Zhang, Z. Zhou, "Study on hot deformation behavior of 7085 aluminum alloy during backward extrusion process, Modelling and Simulation in Engineering", Vol. 2015, pp. 4, 2015.



[۶] مجید میسمی، بررسی رفتار کارگرم فولاد کم آلیاژ استحکام بالا میکروآلیاژ شده با وانادیم (H250) ، دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۹ .

[۷] محبوبه پویامنش، بیت اله اقبالی، غلامرضا ابراهیمی، محمد سعادت، مقایسه رفتار تغییرشکل گرم دو نوع فولاد زنگ نزن دوفازی ریختگی، مجله مواد نوین، جلد ۱ شماره ۲، صفحه ۴۹-۵۴ .

[8] N. Ogawa, M. Shiomi, K. Osakada, "Forming limit of magnesium alloy at elevated temperatures for precision forging", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 5, pp. 607-614, 2002.

[9] T. Philip, T. McCaffy, *Metals handbook*, ASM International Materials Park, OH, 1990.

[10] ASTM E209, Standard practice for compression tests of metallic materials at elevated temperatures with conventional or rapid heating rates and strain rates, 1981.

[11] T.L. Bergman, and F.P. Incropera, *Introduction to heat transfer*, John Wiley & Sons, 2011.

[12] W.F. Brown, C. Ho, H. Mindlin, *Aerospace Structural Metals Handbook*, Handbook operations, 1979.

[13] Y.-C. Lin, M.-S. Chen, J. Zhang, "Modeling of flow stress of 42CrMo steel under hot compression", *Sci. Eng.*, Vol. A 499 pp. pp. 88-92, 2009.

ASTM E 883, Standard Guide for [14] Reflected-Light Photomicrography, 2002.

