

تأثیر پارامترهای فرآیندی بر اکستروژن معکوس داغ آلیاژ Al6061

عصمت بهتری پور^{۱*}، محمد محسن مشکسار^۲، رامین ابراهیمی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۰۵، ش.ص ۱۵۳-۱۶۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۲۷)

چکیده

اکستروژن معکوس، یکی از فرآیندهای شکل‌دهی فلزات می‌باشد که در سال‌های اخیر، کاربرد وسیعی یافته و برای تولید قطعات توخالی استفاده می‌شود. آلیاژهای آلومینیوم با توجه به مزایای مختلف، به صورت گسترده در صنعت خودرو و هواپیما استفاده می‌شوند. در این پژوهش تأثیر پارامترهای فرآیندی نظیر میزان کاهش سطح مقطع، دما و شرایط اصطکاکی در فرآیند اکستروژن معکوس داغ آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به صورت تجربی و به روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور اکستروژن معکوس تحت سه دمای مختلف ۴۲۰، ۳۹۰ و ۴۵۰ درجه سانتیگراد و شرایط اصطکاکی مختلف (بدون روانساز و با استفاده از روانساز) انجام شد و با داده‌های نرم افزار المان محدود DEFORM-3D مقایسه شد. برای انجام آزمایشات تجربی یک مجموعه کامل از قالب اکستروژن معکوس شامل محفظه، سنبه و قالب اکستروژن به همراه قطعات نگه دارنده و بیرون‌انداز طراحی و ساخته شد. از گریس نسوز به عنوان ماده روانساز استفاده شد. در آنالیز المان محدود کوشش شد، از فاکتور ثابت اصطکاک متعارف با تغییر شکل‌های داغ استفاده گردد. مهم‌ترین نتایج این تحقیق مربوط به مطالعه و چگونگی ارتباط نیروی اکستروژن معکوس داغ آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با جابجایی سنبه برای دماها، شرایط اصطکاکی و کاهش سطح مقطع مختلف به دست آمد. با افزایش دما، نیروی اکستروژن کاهش قابل ملاحظه‌ای یافت که نقش موثر دما در فرآیند اکستروژن معکوس داغ را نشان داد. تأثیر شدید اصطکاک در نمودارهای نیرو مشاهده شد. آنالیزها و نتایج این مقاله برای توسعه تکنولوژی اکستروژن داغ به ویژه برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ مفید خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: اکستروژن معکوس، آلومینیوم ۶۰۶۱، روش المان محدود، DEFORM-3D.

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد گرایش شکل‌دادن فلزات، دانشگاه شیراز

^۲ - استاد، مهندسی مواد، دانشگاه شیراز

*-نویسنده مسئول مقاله: e.behtary@gmail.com

پیشگفتار

پذیری ماده تاثیر می‌گذارند و باید به دقت بررسی شوند [۸ و ۹].

در این پژوهش، فرآیند اکستروژن معکوس آلیاژ Al6061 به صورت آزمایشگاهی و همچنین با استفاده از نرم‌افزار DEFORM-3D مورد بررسی قرار گرفته است و تاثیر عوامل اصطکاک، درجه حرارت و میزان کاهش سطح مقطع مورد مطالعه قرار گرفت. در سال ۲۰۱۲ لی و وانگ [۱۰] مطالعاتی روی شبیه سازی تاثیر پارامترهای فرآیند شکل‌دهی بر ارتفاع چرخ دنده از جنس آلیاژ Al6061 در فرآیند اکستروژن معکوس انجام دادند؛ اما در این پژوهش اکستروژن معکوس داغ برای یک مقطع ساده به صورت آزمایشگاهی و همچنین شبیه‌سازی برای Al6061 بررسی شد. نتایج این تحقیق برای توسعه عملیات تغییر شکل داغ آلیاژ Al6061 سودمند خواهد بود.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از ماده اولیه آلومینیوم ۶۰۶۱ با ترکیبی که در جدول ۱ نشان داده شده است، برای انجام آزمایش‌های اکستروژن داغ معکوس استفاده شده است. قطعه کار استوانه‌ای اولیه با قطر ۲۰ و ارتفاع ۱۸ میلی‌متر ماشین کاری شد. تمامی اجزا قالب و سنبه همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، طراحی و ساخته شد. قطعات قالب از فولاد گرمکار H13 ساخته شدند و در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند و سپس در روغن کوئنچ شدند.

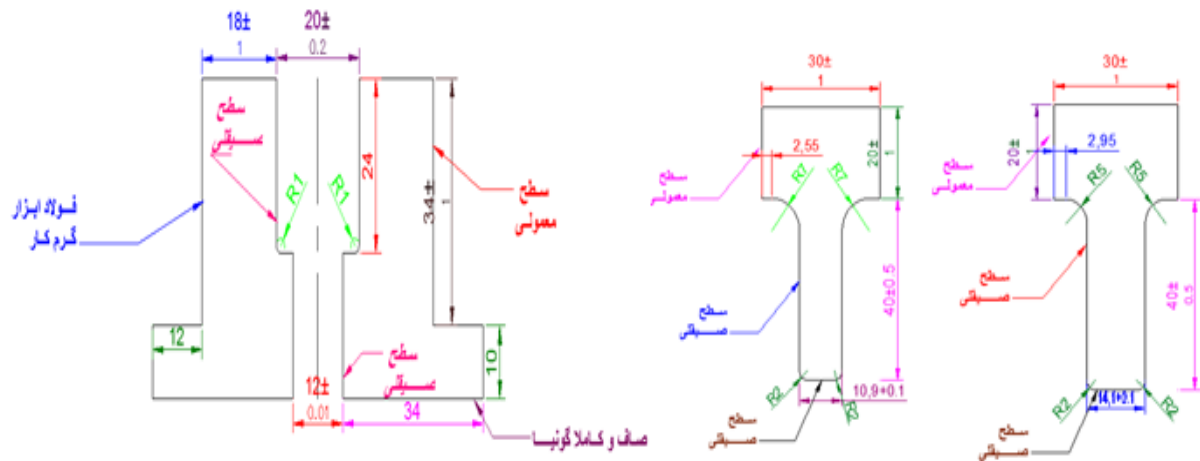
اکستروژن معکوس، روش متعارف شکل دادن فلزات است که توسط بسیاری از محققان به طور گسترده بررسی شده است [۱]. این فرآیند روشی مناسب برای تولید محصولات ته بسته است که دارای برخی مزایا نسبت به روش‌های تولید دیگر است [۲]. مصرف مواد، دقت ابعادی و کیفیت سطحی بالاتر، خواص مکانیکی و ریزساختاری مناسب و حذف عملیات بعدی تعدادی از مزایای این روش است [۳]. اکستروژن معکوس از دیدگاه صنعت قابلیت قابل توجهی دارد اگرچه محدودیت‌هایی نیز دارد. منطقه تغییر شکل ناهمگن یکی از پدیده‌هایی است که توزیع کرنش متفاوت در قطعه اکستروژن شده ایجاد می‌کند. بنابراین، خواص مکانیکی و ریزساختاری ناهمگن در محصولات اکستروژن شده قابل پیش‌بینی است [۴].

آلیاژهای آلومینیوم به طور گسترده‌ای در صنعت خودرو و هواپیما، به دلیل مزیت‌های مختلف آن‌ها از جمله سبکی، شکل پذیری، مقاومت سایشی بالا و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. آلیاژهای Al-Mg-Si در محدوده وسیعی کاربرد دارند. آلیاژهای Al6061 و Al6083 یکی از معروف‌ترین ساختارهای آلیاژهای Al استفاده شده برای کاهش وزن وسایل نقلیه هستند. فورج و اکستروژن داغ دو مورد از مهم‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی استفاده شده برای این سیستم آلیاژی است [۶]. آلیاژ Al6061، آلیاژی است با قابلیت رسوب سخت شدن، همراه با خواص مکانیکی خوب که جوش‌پذیری خوبی نیز از خود نشان می‌دهد [۷].

شرایط تغییر شکل از جمله: خواص ماده، اصطکاک و روانساز، اثر خنک کننده، سرعت سنبه، دمای اولیه قطعه کار، هندسه قالب و غیره موضوعاتی هستند که بر شکل-

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ماده اولیه Al6061

Si	Mn	Mg	Fe	Cu	Cr	Al	ترکیب
۰/۴ - ۰/۸	< ۰/۱۵	۰/۸ - ۱/۲	< ۰/۷	۰/۱۵ - ۰/۴۰	۰/۰۴ - ۰/۳۵	۹۵/۸ - ۹۸/۶	مقدار (%)



شکل ۱- نقشه بدنه اصلی قالب اکستروژن معکوس و سنبه‌ها

شدند. برای نقش تاثیر اصطکاک با توجه به اینکه فرآیند در دمای بالا انجام شد، از فاکتور ثابت اصطکاک استفاده شد. بدین منظور از سه فاکتور ثابت اصطکاک ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ به عنوان حالات مختلف اصطکاکی استفاده شد.

بحث و نتایج

مهمترین نتایج این تحقیق مربوط به مطالعه و چگونگی ارتباط نیروی اکستروژن معکوس داغ آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با جابجایی سنبه برای دماها، شرایط اصطکاکی و کاهش سطح مقطع مختلف انجام پذیرفت.

تاثیر دما بر نمودار نیرو- جابجایی

شکل ۲ و ۳، نمودار نیرو جابجایی فرآیند اکستروژن معکوس داغ در شرایط هم‌دما بودن فرآیند را برای کاهش سطح مقطع ۳۰٪ و ۵۰٪ و در شرایطی که از روانساز استفاده نشده است در دماهای مختلف نشان می‌دهد.

اول از همه به وضوح دیده می‌شود که هر چه دمای قطعه کار بیش‌تر باشد، نیروی اکستروژن کاهش می‌یابد.

به‌طور کلی برای کلیه دماها تقریباً می‌توان گفت که منحنی نیرو- جابجایی خود از سه ناحیه متفاوت تشکیل شده است. در ناحیه اول نیروی اکستروژن با شیب تندی افزایش می‌یابد و بعد از حدود ۶ میلی‌متر جابجایی سنبه شیب منحنی کم‌تر می‌شود و در واقع وارد ناحیه دوم می‌شود. در ابتدا به دلیل لقی نمونه در فضای بین حفره

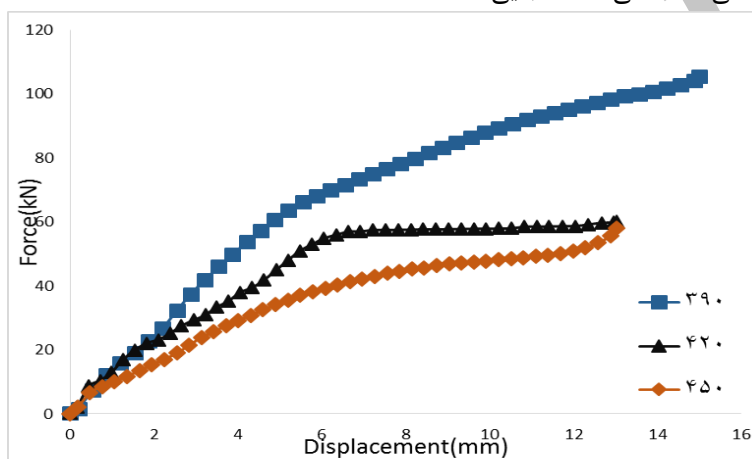
سنبه‌ها برای کاهش سطح ۳۰ و ۵۰ درصد طراحی شدند. برای انجام آزمایش، نمونه‌ها تحت سه دمای مختلف ۴۲۰، ۳۹۰ و ۴۵۰ درجه سانتیگراد درون کوره قرار داده شدند. دمای قالب نیز با استفاده از شعله به ۲۰۰ درجه سانتیگراد افزایش داده شد. فرآیند اکستروژن در این دماهای مختلف و در دو شرایط اصطکاکی مختلف برای دو کاهش سطح مقطع ذکر شده انجام شد. برای بررسی تاثیر اصطکاک در هر دما، آزمایش‌های اکستروژن در دو حالت بدون روانساز و با استفاده از روانساز گریس نسوز انجام پذیرفت. سرعت سنبه ۰/۲ میلی‌متر بر ثانیه بود و میزان جابجایی سنبه ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بعد از اتمام اکستروژن و خارج کردن نمونه اکستروژن شده از قالب، نمونه‌ها در دمای محیط سرد شدند.

شبیه‌سازی فرآیند

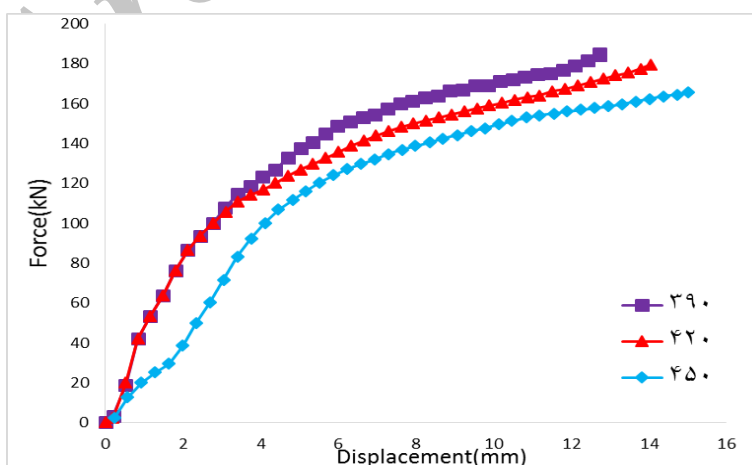
در این تحقیق برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار DEFORM-3D استفاده شد. در این شبیه‌سازی قالب و سنبه به‌عنوان جسم صلب در نظر گرفته شدند و قطعه کار تغییر شکل پذیر فرض شد. ابعاد اجزا براساس همان داده‌های آزمایشگاهی توسط نرم‌افزار Solid Work طراحی شد و در نرم‌افزار DEFORM مورد استفاده قرار گرفت. بعد از تعریف هندسه قطعه و قالب، خواص ماده نیز می‌بایست برای سیستم تعریف شد. برای ارائه خواص مکانیکی ماده اولیه از داده‌های موجود در نرم‌افزار استفاده شد. دمای قطعه کار، قالب و سنبه براساس همان داده‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار تعریف

که سطوح اصطکاک‌کی بین سنبه و قطعه کار و جداره قالب و قطعه کار به حداکثر خود می‌رسد و منحنی نیرو-جابجایی وارد مرحله دوم می‌شود. در مرحله دوم، نیروی اکستروژن به حالت تعادل پایدار خود می‌رسد و نسبت به جابجایی سنبه تغییر محسوسی ندارد. ثابت بودن یا تمایل به ثابت شدن نیرو در مرحله دوم اکستروژن نه تنها به دلیل محو شدن تاثیر افزایش سطوح اصطکاک‌کی است بلکه، تنش سیلان خود ماده نیز به دلیل بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی میل به افزایش نداشته و نیروی اکستروژن را به‌طور نسبی ثابت نگه می‌دارد. برای کاهش سطح ۳۰٪ کاملاً ثابت می‌شود.

قالب، قطعه کار فقط توسط سنبه به‌صورت تقارن محوری به میزان جزئی فشرده شده و ارتفاع آن قدری کاهش و قطر آن افزایش می‌یابد تا اینکه قطعه کار با جداره حفره قالب به‌طور کامل درگیر گردد. در این مرحله فشاری معادل با تنش سیلان فلز داغ لازم است تا تغییر شکل در قطعه کار آغاز گردد. بعد از آن با توجه به درگیری قطعه کار با بدنه قالب و آغاز اکستروژن معکوس، نیروی اکستروژن خود تحت تاثیر سه عامل تاثیرگذار قرار می‌گیرد. این عوامل عبارتند از نیروی لازم برای سیلان ماده، نیروی غلبه بر اصطکاک بین سنبه و قطعه کار و نیروی غلبه بر اصطکاک بین جداره قالب با قطعه کار. در این مرحله نیروی اکستروژن کماکان سیر صعودی خود را به دلیل افزایش سطوح اصطکاک‌کی حفظ می‌کند تا جایی



شکل ۲- مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی در کاهش سطح ۳۰٪ و بدون روانساز



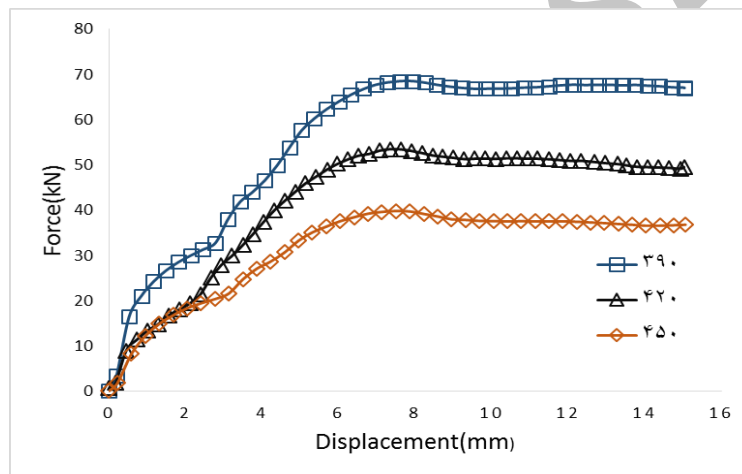
شکل ۳- مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی برای کاهش سطح مقطع ۵۰٪ و بدون روانساز

روند منحنی‌های نیرو در کاهش سطح ۵۰٪ با کاهش سطح مقطع ۳۰٪ تقریباً مشابه است. با این تفاوت که در کاهش سطح مقطع ۵۰٪ نقش سطوح اصطکاکی نسبت به کاهش سطح مقطع ۳۰٪ بسیار جدی‌تر می‌باشد، لذا منحنی‌های نیرو-جابجایی نه تنها از نظر کمی در سطح بالاتری قرار می‌گیرند، بلکه نقش سطوح اصطکاکی حتی در جابجایی‌های بزرگتر نیز محو نشده است.

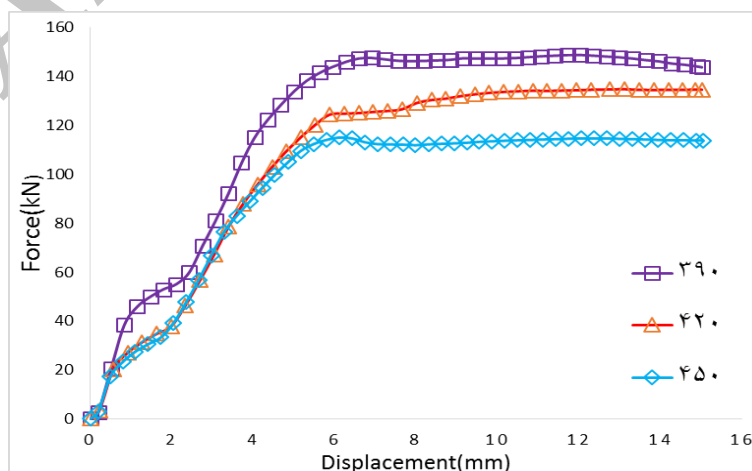
تأثیر اصطکاک بر نمودار نیرو-جابجایی

شکل ۴ و ۵ منحنی‌های نیرو-جابجایی را برای کاهش سطح ۳۰٪ و ۵۰٪ هر کدام در دماهای مختلف در شرایطی که از گریس نسوز به‌عنوان روانساز استفاده شده است، نشان می‌دهد.

برای کاهش ۵۰٪ قدری افزایش در مرحله دو کماکان مربوط به تأثیر پیچیدگی سطوح اصطکاکی بین قطعه کار با سنبه و جداره قالب است. مرحله سوم مربوط به زمانی است که ضخامت تحتانی قطعه کار به حد بحرانی خود می‌رسد و نیروی اکستروژن به دلیل تداخل حوزه‌های اصطکاکی بین ناحیه زیر سنبه و ناحیه کف محفظه قالب به شدت میل به افزایش پیدا می‌کند. با توجه به تجربه‌های قبلی، در این آزمایش‌ها کوشش بر آن بود که آزمایش اکستروژن وارد ناحیه سوم خود نشود و قبل از آن آزمایش پایان یابد. با وجود این تقریباً در بعضی از منحنی‌ها اثر میل به افزایش ناگهانی نیرو در انتهای منحنی دیده می‌شود.



شکل ۴- مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی در کاهش سطح ۳۰٪ و با استفاده روانساز



شکل ۵- مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی در کاهش سطح ۵۰٪ و با استفاده روانساز

به منظور مقایسه نتایج آزمایشگاهی با آنالیز حاصل از روش اجزا محدود از نرم افزار DEFORM-3D استفاده شد. در شبیه سازی کوشش شد که داده های آزمایشگاهی عیناً به عنوان داده های ورودی به نرم افزار باشد. تنها مساله دادن شرایط اصطکاکی بود که می بایست به شکل مناسب معرفی گردد.

به طور کلی تنش برشی حاصل از اصطکاک در ساده ترین شکل خود به دو صورت می تواند مطرح گردد. در این تحقیق از مدل ضریب اصطکاک کلمب استفاده نشده و از مدل فاکتور ثابت اصطکاک که در آن تنش برشی حاصل از اصطکاک را به صورت کسری از تنش تسلیم برشی ماده در نظر می گیرد استفاده شد. یعنی

$$\tau = mk$$

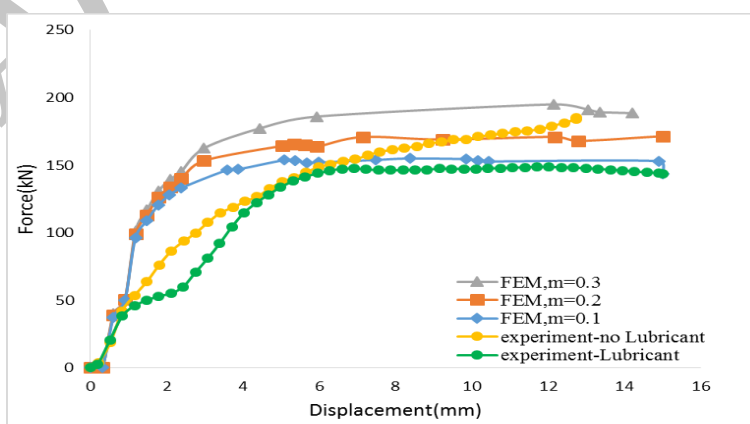
در این رابطه k تنش تسلیم برشی ماده و m فاکتور ثابت اصطکاک می باشد. این مدل بخصوص برای تغییر شکل های داغ بسیار کارا بوده، به گونه ای که با انتخاب $0 \leq m \leq 1$ یک محدوده وسیعی از شرایط اصطکاکی، بدون اصطکاک تا اصطکاک کاملاً چسبنده را می توان داشت. در نرم افزار DEFORM از مقادیر متفاوتی از فاکتور اصطکاک m استفاده شد.

در شکل های ۶ تا ۸ نمودارهای نیرو-جابجایی شبیه سازی شده برای شرایط مختلف اصطکاکی در دماهای مختلف برای کاهش سطح ۵۰٪ با نمودارهای تجربی مقایسه شدند.

به وضوح در کلیه منحنی ها دیده می شود که بعد از ۶ میلیمتر جابجایی سنبه تاثیر افزایش سطوح اصطکاکی تقریباً به طور کامل محو شده است و منحنی ها کاملاً به حالت پایدار خود تحت شرایط تبلور مجدد دینامیکی قرار گرفته اند. اعوجاج های منحنی ها در ۶ میلیمتر اول جابجایی سنبه حاصل از پیچیدگی سیلان ماده و سطوح اصطکاکی در گوشه های سنبه می باشند. تقریباً در کلیه منحنی های مربوط به عدم استفاده از روانساز سیر صعودی جزیی در نیرو نسبت به جابجایی سنبه دیده می شود؛ اما در کلیه منحنی های مربوط به استفاده از روانساز، مقدار نیرو در جابجایی های بزرگ تر از ۶ میلیمتر تقریباً ثابت باقی مانده است. این امر نشان می دهد که افزایش نیرو در حالت بدون استفاده از روانساز در جابجایی های بزرگ تر از ۶ میلیمتر فقط به دلیل نقش اصطکاک است که در این حالات به صورت چسبنده ظاهر می شود و علی رغم اینکه سطوح اصطکاکی به حداکثر خود رسیده اند؛ ولی پیچیدگی اصطکاک چسبنده بین ابزار (بخصوص سنبه) با قطعه کار همچنان تاثیر خاص خود را در افزایش نیرو می گذارد. در واقع اصطکاک در شرایط بدون روانساز در ناحیه دوم همچنان بر نرم شدن حاصل از تبلور مجدد دینامیکی غلبه کرده و باعث افزایش نیرو در این ناحیه شده است؛ اما در حالت با روانساز تبلور مجدد دینامیکی بر اصطکاک غلبه کرده است و حالت پایدار نیرو ایجاد شده است.

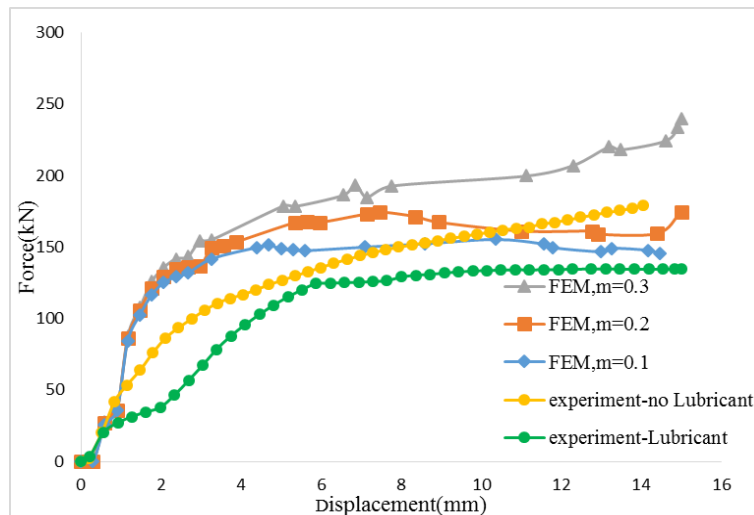
شبیه سازی اکستروژن معکوس داغ آلیاژ آلومینیوم

۶۰۶۱



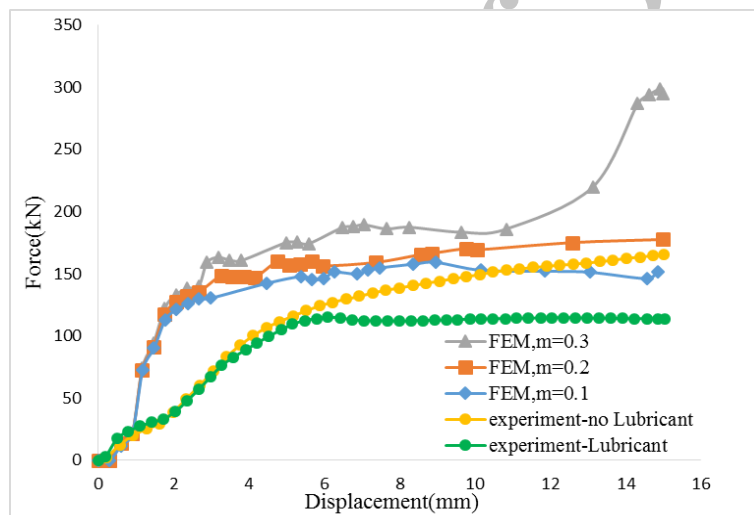
شکل ۶- مقایسه نمودارهای تجربی و شبیه سازی نیرو-جابجایی در دمای ۳۹۰°C

در شرایط اصطکاکی مختلف



شکل ۷- مقایسه نمودارهای تجربی و شبیه‌سازی نیرو- جابجایی در دمای 42°C

در شرایط اصطکاکی مختلف



شکل ۸- مقایسه نمودارهای تجربی و شبیه‌سازی نیرو- جابجایی در دمای 45°C

در شرایط اصطکاکی مختلف

که در ناحیه اول تاثیر لقی نمونه خیلی کم‌تر در نظر گرفته شده است و همچنین تمایل به پایدار شدن در ناحیه دوم بیش‌تر است و تقریباً از جابجایی ۴ میلیمتری سنبه ناحیه پایداری نیرو (یا تمایل به پایدار شدن) ظاهر شده است در حالی‌که برای منحنی‌های تجربی در ۶ میلیمتر جابجایی این اتفاق می‌افتاد. ناحیه سوم نیز در بعضی منحنی‌ها بخصوص در منحنی‌هایی با فاکتور ثابت اصطکاک بالاتر به خوبی دیده می‌شود. در نمودارهای

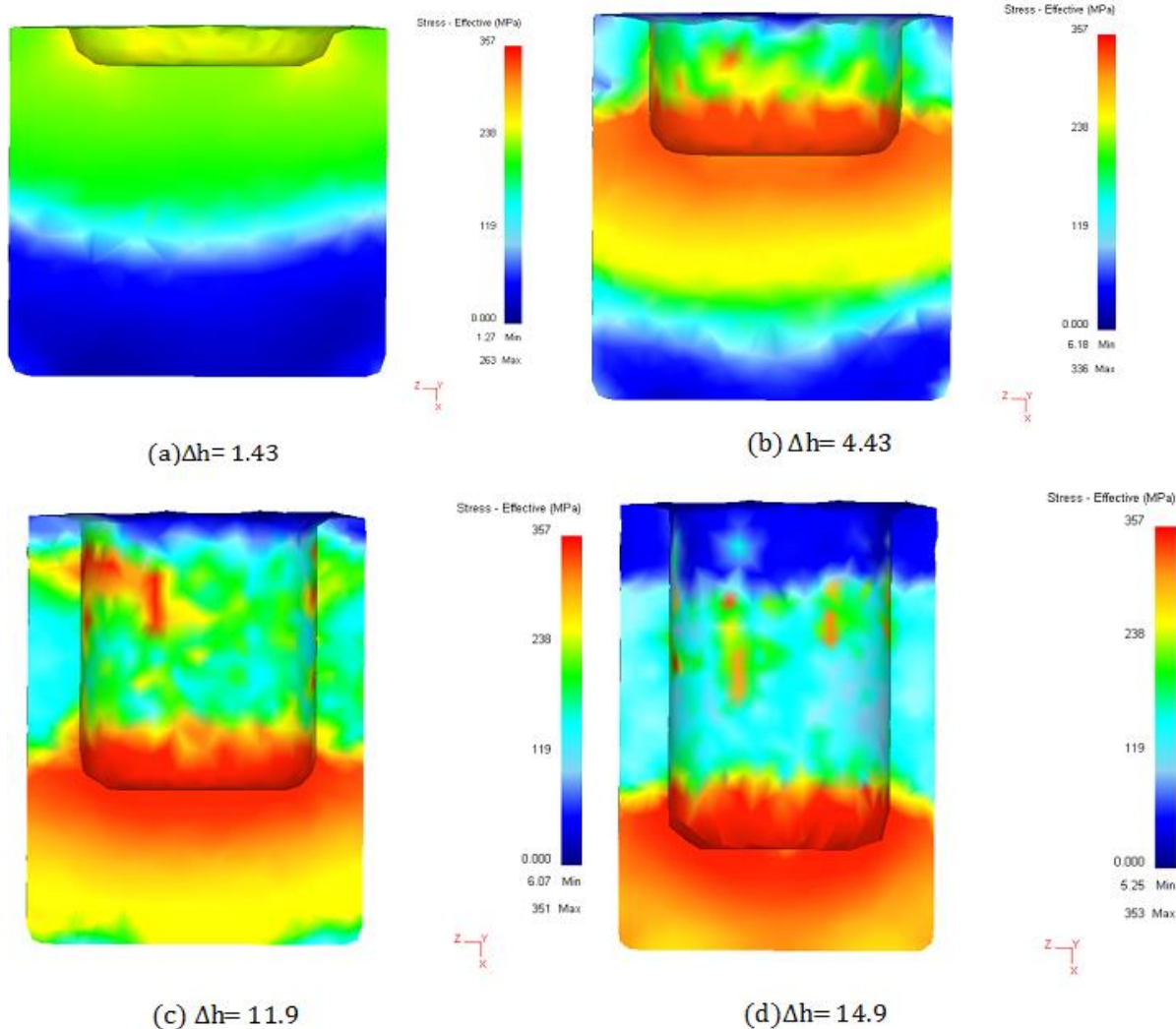
ملاحظه می‌شود که در بعضی از نمودارها منحنی‌های نیروی شبیه‌سازی شده تطابق خوبی با منحنی‌های آزمایشگاهی دارد؛ اما در بعضی اختلاف زیاد است. به نظر می‌رسد که عامل خطا عمدتاً مربوط به یکسان نبودن رفتار مکانیکی تعریف شده در نرم‌افزار با آنچه که در آزمایشگاه به دست آمده، باشد.

مشاهده می‌شود که منحنی‌های نیروی حاصل از شبیه‌سازی نیز از سه بخش تشکیل شده‌اند. با این تفاوت

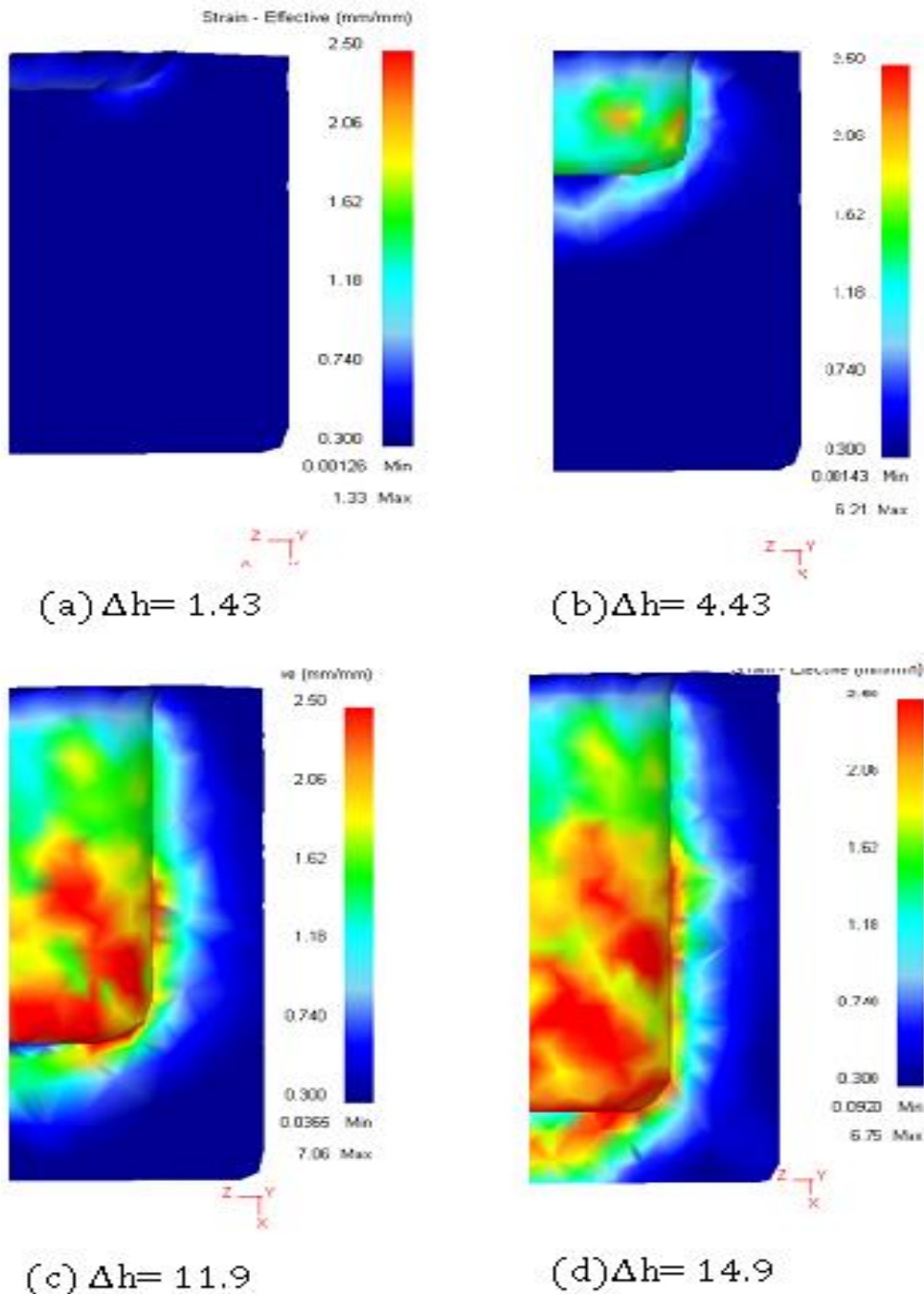
شکل ۱۰ کانتورهای کرنش موثر را برای دمای 420°C و $m=0.3$ نشان می‌دهد. می‌توان دید که در طول سطح بالایی قطعه کار تغییر شکل شدیدی داده است و توزیع کرنش موثر ناهمگن است. بیشترین مقدار کرنش در گوشه سنبه قرار دارد. بیشینه مقدار کرنش موثر تا جایی افزایش یافته و بعد کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که تغییر شکل به سمت همگن شدن برود. فلز در ناحیه بیرونی بالای قطعه کار تغییر شکل کمتری می‌بیند در نتیجه کرنش موثر کم‌تر است و خواص مکانیکی ضعیف‌تری در بالای دیواره نمونه بعد از اکستروژن معکوس ایجاد می‌شود.

شبه‌سازی شده نیز مشاهده می‌شود که با افزایش فاکتور ثابت اصطکاک نیروها افزایش یافته است.

شکل ۹ به‌عنوان یک نمونه، کانتور توزیع تنش موثر را برای تغییر شکل‌های مختلف برای دمای 420°C و $m=0.1$ را نشان می‌دهد. می‌توان دید که بیشترین مقدار تنش موثر در ماده بین گوشه سنبه و دیواره قالب قرار دارد. با حرکت سنبه، تنش موثر افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار آن از مقدار حدود 263MPa برای جابجایی $1/43$ میلی‌متر به مقدار 353MPa برای جابجایی $14/9$ میلی‌متر افزایش می‌یابد. تنش موثر با پیشروی تغییر شکل و سیلان ماده به درون دیواره، کم می‌شود و کم‌ترین مقدار تنش با پیشروی تغییر شکل کاهش می‌یابد.



شکل ۹- کانتورهای تنش موثر برای تغییر شکل مختلف



شکل ۱۰- کانتورهای کرنش موثر برای تغییر شکل مختلف

نیروی اکستروژن شدیداً وابسته به دما می‌باشد و با افزایش دما کاملاً کاهش می‌یابد. در کلیه منحنی‌های نیرو- جابجایی، نیروی اکستروژن پس از حدود ۶ میلیمتر جابجایی سنبه به دلیل تبلور مجدد دینامیکی و محو شدن تاثیر سطوح اصطکاکی ثابت می‌شوند. این

نتیجه‌گیری

در این تحقیق اکستروژن داغ آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در شرایط دمایی، اصطکاکی و کاهش سطح مقطع مختلف به دو صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مطالعه شد و نتایج زیر حاصل شد.

می‌گیرند که به دلیل عدم یکسان بودن رفتار ماده در دمای بالا در شرایط شبیه‌سازی نسبت به حالت تجربی می‌باشد. به‌علاوه نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که بیش‌ترین مقدار تنش و کرنش سیلان بین گوشه سنبه و دیواره قالب ظاهر می‌شود.

موضوع بخصوص برای حالت‌های استفاده از روانساز کاملاً محسوس است؛ اما برای کاهش سطح مقطع‌های بزرگ و عدم استفاده از روانساز تاثیر سطوح اصطکاکی کاملاً محو نمی‌شود. نتایج مربوط به شبیه‌سازی روند مشابهی را نشان می‌دهد، با این تفاوت که از نظر کمی منحنی‌های نیرو-جابجایی در شبیه‌سازی در سطح بالاتری قرار

References:

- [1] S.H. Hosseini, K. Abrinia, G. Faraji, "Applicability of a modified backward extrusion process on commercially pure aluminum", *Materials and Design*, Vol. 65, pp.521–528, 2015.
- [2] K. Abrinia, S. Orangi, "Investigation of process parameters for the backward extrusion of arbitrary-shaped tubes from round billets using finite element analysis", *J Mater Eng Perform*, Vol. 18, 1201–8, 2009.
- 3- A. Farhoumand, R. Ebrahimi, "Analysis of forward-backward-radial extrusion process", *Mater Des*, Vol. 30, 2152–7, 2009.
- 4- WB. Bae, DY. Yang, "An upper-bound analysis of the backward extrusion of tubes of complicated internal shapes from round billets", *J Mater Process Technol*, Vol. 36, 157–73, 1993.
- 5- Forging Equipment, Materials and Practices, Air Force Materials Laboratory, Metals and Ceramics Information Center, Ohio, p. 13, 1973.
- 6- Y.V.R.K. Prasad, S. Sasidhara, *Hot Working Guide*, ASM International, Materials Park, OH, 1997.
- 7- Joseph R. Davis, *Metals Handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM International, Materials Park, 1990.
- 8- S.K. Biswas, W.A. Knight, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 15, p.179–193, 1975.
- 9- Akgerman, T. Altan, *SME Technical Paper*, p. 72–110, 1972.
- 10- L. Li, F. Wang, "Simulation Study on Influence of Forming Process Parameters on Backward Extrusion Height of 6061Aluminum-Alloy Wheel", *Applied Mechanics and Materials*, 121, 363-366, 2012.