فصلنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک جامدات

www.jsme.ir

فصلنامه علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک جامدات

بررسی تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود عوامل موثر در فرآیند تیگزوفورجینگ قطعه درپوش گیربکس

امین کلاه‌دوز[۱]، سلمان نوروزی[۲*]، محمد بخشی جویباری[۳]، سید جمال حسینی‌پور[۴]

* نویسنده مسئول: s-nourouzi@nit.ac.ir

چکیده

فرآیند شکل‌دهی نیمه‌جامد در ساخت قطعات نزدیک به شکل نهایی به‌ویژه در صنایع خودروسازی و هواپیما سازی استفاده می‌شود. به‌دلیل این‌که رفتار آلیاژهای نیمه جامد به صورت غیرنیوتنی بوده و وابستگی سیلانی این آلیاژها به پارامترهای زیادی مانند سیکل حرارت‌دهی مجدد، روش تولید شمشال اولیه، وغیره می‌باشد، شبیه‌سازی آن‌ها یکی از مشکل‌ترین مسایل مهندسی می‌باشد. یکی از فرآیندهای شکل‌دهی نیمه جامد، روش تیگزوفورجینگ است که بین دمای خط مذاب (لیکوئیدوس[۵]) و خط انجماد (سالیدوس[۶]) ماده انجام می‌گیرد و نرخ کرنش، اصطکاک و دمای قالب از جمله عوامل تاثیر گذار بر فرآیند هستند. در این تحقیق به شبیه سازی فرایند تیگزوفورجینگ و بررسی اثر پارامترهای وابسته به آن از جمله ضریب اصطکاک، دمای فرآیند و سرعت حرکت پرس با استفاده از نرم‌افزار Deform-3D پرداخته شده‌است. جهت بررسی صحت شبیه‌سازی، آزمایش‌های عملی تیگزوفورجینگ در حالت‌های مختلف و درحالت ایزوترمال بر روی آلیاژ A356 انجام شده است. مقایسه نتایج عددی با تجربی نشان داده است که در کسرهای جامد مختلف، شبیه‌سازی‌های مذکور به خوبی رفتار سیلان را مدل‌سازی می کنند. همچنین نتایج نشان داده است که افزایش دمای قطعه باعث کاهش سختی و نیروی شکل‌دهی قطعه می‌گردد که دلیل این امر رشد دانه‌ها خواهد بود. در ضمن با کاهش دمای قالب به علت ریزشدن دانه‌ها و با افزایش نیروی پرس، به علت تراکم فاز آلفا اولیه در دانه‌ها، سختی افزایش یافته است. دمای قالب بالاتر باعث بروز ریزساختاری درشت‌تر و ناهمگن در آلیاژ گردید. این امر به نوبه خود باعث کاهش تقریبی ۱۲/۵٪ در میزان سختی و ۲۰/۶٪ در مقدار تناژ پرس شد.

واژه‌های کلیدی

شکل‌دهی نیمه‌جامد، تیگزوفورجینگ، آهنگری هم‌دما، آلیاژ Al-A356

۱-دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳-استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۴-دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

5 -liquidus
6 -solidus

۱- مقدمه

آلیاژهای آلومینیم به دلیل دارا بودن وزن کم و نسبت استحکام به وزن بالا نقش مهمی را در ساخت قطعات در صنایع هوایی و خودروسازی به دلیل اهمیت کاهش وزن و صرفه‌جویی در مصرف سوخت ایفا می‌کنند [۱ و ۲]. در حال حاضر در حدود ۸۵٪ تولیدات قطعات آلومینیمی به روش ریخته‌گری تحت‌فشار انجام می‌شود. در عین حال، وجود تخلخل، کاربرد این روش را در مواردی که نیاز به کیفیت بالا وجود داشته باشد، محدود می‌سازد و بعلاوه، امکان بهبود خواص را به کمک عملیات حرارتی از بین می‌برد [۳ و ۴]. قطعات ساختاری هواپیما مثل ناودان تخلیه سیستم سوخت، قطعاتی هستند که نیاز به پایداری بالا در مقابل گسترش ترک خستگی دارند. این قطعات توسط فرآیندهای ماشینکاری و آهنگری تولید می‌شوند [۵]. تا چند سال گذشته عملیات آهنگری تنها راه تولید قطعات سبک و مطمئن بود، اما مصرف انرژی بالا، عدم توانایی تولید با شکل نهایی، هزینه بالای ماشین آلات و نرخ تولید کم از مشکلات این روش تولید محسوب می‌شود [۶ و ۷]. واضح است که افزایش روز افزون استفاده از آلومینیم در صنعت، نیاز به توسعه تکنولوژی‌های پیشرفته دارد [۱ و ۲]. این موضوع تصویر کلی فرآیند شکل‌دهی نیمه‌جامد می‌باشد [۳-۷].

فرآیند شکل‌دهی نیمه‌جامد، فن‌آوری نسبتاً جدیدی است که با روش‌های معمول شکل‌دهی فلزات که در آن از فلز مذاب (ریخته‌گری) و یا فلز جامد (آهنگری)، به عنوان مواد اولیه استفاده می‌شود، متمایز است. در فرآیندهای نیمه‌جامد از مخلوط مذاب و جامد به عنوان ماده اولیه برای شکل‌دهی استفاده می‌شود. مخلوط مذاب و جامد ایده‌آل به صورت حجم مناسبی از ذرات جامد ریز با مورفولوژی کروی که به طور یکنواخت در زمینه‌ای از فاز مذاب پراکنده است، تعریف می‌شود [۸ و ۹].

تلاشهای فراوانی که در سالهای اخیر در جهت صنعتی کردن فرآیندهای نیمه جامد صورت گرفته است و برای همین منظور نیاز به شبیه‌سازی و مدلسازی جریان خمیری شکل به داخل قالب را آشکار می‌سازد. بدلیل عدم حالت مذاب و یا جامد کامل در فرآیندهای نیمه جامد، نمی‌توان مستقیماً قوانینی را که در طراحی قالب و شرایط فرآیند در قالب‌های دایکاست و یا آهنگری به کار می‌رود را به فرآیند تیگزوفورمینگ اعمال نمود [۱۰ و ۱۱].

تاکنون تحقیقات مختلفی بر روی روش تیگزوفورجینگ برای قطعات ساده ارایه شده است. در آهنگری دقیق مواد نیمه‌جامد آگاهی از دانش رفتار مواد با تغییر نرخ کرنش ضرورت دارد. کنگ و همکاران [۱۲] گزارش کرده است که رفتار آلیاژهای آلومینیم A357، A319 و A380 در حالت نیمه جامد وابسته به مقدار تنش و مورفولوژی فاز هنگام تغییر از ساختار دندریتی به ساختار کروی می باشد. بنابراین برای بررسی اثر سرعت فشاری تغییر شکل آلیاژ آلومینیم با ریزساختار کروی، آزمایش تست فشار را انجام داده و رفتار آلیاژ را در کسرهای جامد مختلف و سرعت‌های قالب متفاوت بحث کرده است. همچنین ایشان و همکاران [۱۳ و ۱۴] فرآیند آهنگری با مخلوط مذاب و جامد (رئوفورجینگ) را برای آلیاژهای آلومینیم مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به بررسی خواص مکانیکی و سایشی ماده تحت آزمایش‌های خراش و سختی پرداخته و با بهینه کردن شرایط انتقال حرارت آلیاژ توانستند به ساختار و خواص بهتری از آلیاژ دستیابی پیدا کنند.

پویافر و همکاران [۱۵] با استفاده از روش طراحی آزمایشات به تعیین پارامترهای مختلف روی مشخصات مکانیکی قطعات تولید شده در روش اکستروژن نیمه‌جامد پرداخته‌اند. در میان این پارامترها، دما و سرعت شکل‌دهی، زمان‌های نگهداری و عملیات حرارتی اثرات زیادی را بر روی مشخصات مکانیکی قطعات خواهند داشت. بنابراین ایشان در تحقیق خود، تاثیر پارامترهای بیلت تولیدی به صورت غیردندریتی، سرعت شکل‌دهی، دما و زمان نگهداری بیلت را روی مشخصات نمونه‌های تولیدی توسط روش اکستروژن نیمه‌جامد بررسی کرده‌اند.

فدوی و همکاران [۱۶-۱۸] ویژگی‌های ریزساختاری آلیاژ A356 را در روش آهنگری نیمه‌جامد مورد بررسی قرار

داده‌اند. ایشان این روش را با روش ریخته‌گری نیمه‌جامد و ثقلی مورد مقایسه قرار داده‌اند. آلیاژ مورد نظر توسط روش SSR تولید شده است. حرارت‌دهی مجدد در دماهای ۶۰۰°C و ۶۱۰°C با مدت زمان نگهداری ۱۰mm انجام پذیرفته است. در نهایت خواص قطعه و سطح شکست نمونه‌ها توسط آزمایش تست کشش مورد بررسی قرار گرفته است.

در تحقیق حاضر، تاثیر متغیرهای مختلف مانند دمای قطعه و قالب، اصطکاک و سرعت حرکت پرس بر روی فرآیند تیگزوفورجینگ برای قطعه درپوش گیربکس حلزونی مدل ۶۲ مورد بررسی قرار گرفته و صحت نتایج شبیه‌سازی با استفاده از تست‌های عملی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق سعی بر آن شده است که شبیه‌سازی‌ها و تست‌های تجربی در شرایط یکسانی مورد آزمایش و بررسی قرار بگیرند.

۲- روش تحقیق

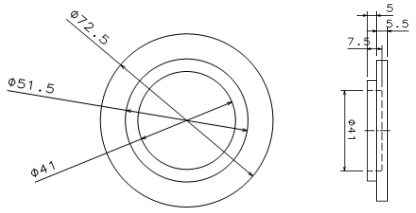
۲-۱- مراحل آزمایشگاهی

به منظور انجام تحقیق، درپوش گیربکس پس از انجام مشاوره با صنعت همکار، شرکت قطعه‌سازی نوین، انتخاب گردید. شکل(۱) هندسه قطعه مورد بررسی در این پژوهش را نشان می‌دهد. جنس آن از آلیاژ آلومینیم A356 با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول (۱) می‌باشد. با استفاده از امکانات تهیه شده در آزمایشگاه مواد پیشرفته دانشگاه صنعتی بابل توسط نویسندگان مقاله و به منظور تهیه شمشال جهت انجام آزمایش‌ها میزان ۲/۵Kg کیلوگرم از آلیاژ فوق در بوته‌ای ذوب گردیده و پس از آن روی سطح شیبداری از جنس مس جریان یافته و در انتها به درون قالب استوانه‌ای هدایت شده‌است.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده (درصد وزنی)

Al	Si	Mg	Fe	Ti	Other
۹۲/۱۴	۷/۱	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۱	۰/۰۸<

پس از اتمام مذاب‌ریزی و خنک‌شدن نمونه در دمای محیط، برش آن در فاصله ۶۰mm و ۱۵۰mm از قسمت تحتانی آن صورت پذیرفت. و سپس نمونه‌ها در ابعاد لازم ماشینکاری گردیدند. در مرحله بعد، فرآیند آهنگری نمونه‌ها در قالب به صورت هم‌دما انجام شد. در شکل (۲) نحوه انجام آزمایش و قراگیری قالب بر روی پرس نشان داده شده است.



شکل (۱) هندسه قطعه مورد آزمایش

شکل (۲) نحوه قرار گیری اجزای قالب و پرس، (الف) دستگاه پرس، (ب) نحوه قرارگیری ترموکوپل و المنت حرارتی، (ج) سیستم کنترل دما، (د) تغییر شکل شمشال اولیه با دمای ۵۹۰°C به مدت ۱۰mm قبل از فرایند تیگزوفورجینگ

۲-۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

شبیه‌سازی عددی فرآیند تیگزوفورجینگ همواره با موضوعات عددی بسیار مشکل مانند سطوح متحرک، سطوح تماسی، اصطکاک، سرعت حرکت پرس همراه می‌باشد. در این تحقیق، شبیه‌سازی برای حالت هم‌دما و هم برای حالت غیر هم‌دما مورد انجام گرفته‌است. مشخصات ماده که در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است، به صورت تجربی و با انجام یکسری آزمایشات مانند آزمون فشار به دست آمده است. این خصوصیات در جدول (۲) نشان داده شده است. جهت حصول اطمینان بیشتر، نتایج با داده‌های دیگر محققان مورد مقایسه قرار گرفته است [۱۹-۲۱].

جدول (۲) مشخصات ماده و دیگر پارامترها

متغیر	واحد	مقدار
دمای لیکوئیدوس	°C	۶۱۶
دمای سالیدوس	°C	۵۶۸
ظرفیت گرمایی ویژه ماده	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	۱۰۸۲
ضریب انتقال حرارت	$W.m^{-2}.K^{-1}$	۱۰۰۰۰
ضریب انتقال حرارت سطح آزاد	$W.m^{-2}.K^{-1}$	۲۶
رسانایی گرمایی ماده در حالت جامد	$W.m^{-1}.K^{-1}$	۶۰
رسانایی گرمایی ماده در حالت مذاب	$W.m^{-1}.K^{-1}$	۱۶۰
چگالی ماده در حالت جامد	$kg.m^{-3}$	۲۴۹۵
چگالی ماده در حالت مذاب	$kg.m^{-3}$	۲۴۹۵
ویسکوزیته مذاب ماده	$kg.m^{-1}.s^{-1}$	۰/۰۰۱۱۳
گرمای نهان ذوب ماده	$J.kg^{-1}$	۳۹۷۷۰۰

پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، اصطکاک و روانکارها ، درجه حرارت قالب و قطعه، نرخ کرنش، فورج پذیری ماده و سیالیت آن در هنگام خمیری شکل بودن و نحوه پر شدن قالب می‌باشد.

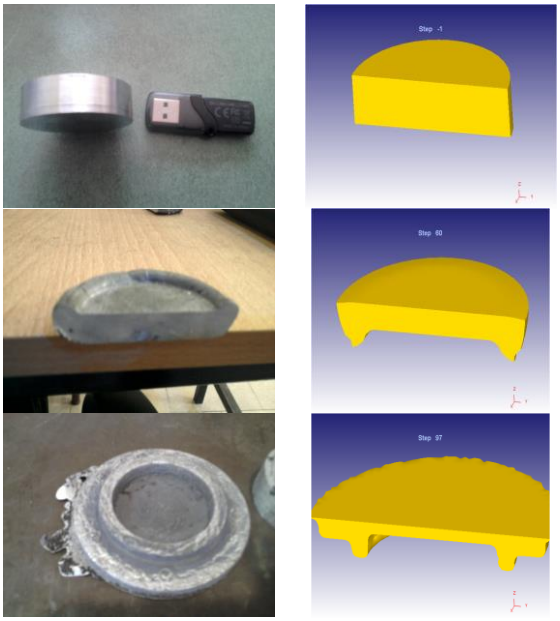
روانکارها جهت کاهش نیروها و ایجاد یکنواختی در تغییر شکل در تیگزوفورجینگ به کار برده می شوند. همچنین، باعث سهولت جدا شدن قطعه از قالب نیز می‌شوند. از مناسبترین روانکارها در فورجینگ آلیاژهای آلومینیم، گرافیت است. گرافیت از جمله روانکارهای پایه روغنی است و دامنه اصطکاک به دست آمده از گرافیت از ۰/۱ تا ۰/۴ متغیر است [۲۲ و ۲۳]. نکته مهمی که باید در این راستا به آن توجه شود آن است که روانکارهایی که در فورج با قالب باز یا حتی قالب بسته استفاده می‌شوند ممکن است در تیگزوفورجینگ نتایج خوبی نشان ندهند. در این تحقیق به مقایسه آهنگری قطعه مورد بررسی هنگامی که ضریب اصطکاک از ۰/۱ به ۰/۴ افزایش می‌یابد پرداخته می‌شود. همچنین افزایش دمای قالب در آهنگری باعث پر شدن بهتر قالب و نیز کاهش نیروها می‌شود. هر چه دمای قالب به دمای قطعه کار نزدیک‌تر باشد، چون سطح قطعه‌کار دیرتر سرد می‌شود، نتایج مطلوب‌تری به دست می آید. هنگامی که از پرس‌های کندتر مانند پرس هیدرولیکی در آهنگری استفاده شود، به دلیل سرعت کاری اینگونه پرس‌ها، گرم کردن قالب ضرورت بیشتری پیدا می‌کند. زیرا در این پرس‌ها سرعت کم پرس باعث سریعتر سرد شدن قطعه‌کار می‌گردد. بدین منظور تاثیر دمای قالب بر نیروهای شکل‌دهی و فرم قطعه در دماهای قالب مختلف مقایسه می‌شود.

از مهمترین متغیرهایی که تاثیر زیادی بر تیگزوفورجینگ دارد، دمای اولیه قطعه‌کار می‌باشد. اهمیت این متغیر از آن جهت است که تعیین‌کننده درصد نسبی فاز جامد و مایع می‌باشد. با افزایش دما، از درصد فاز جامد نیز کاسته می‌شود. با کاهش درصد فاز جامد نیروهای شکل‌دهی نیز کاهش می‌یابند. به خصوص در آهنگری، از آن جهت که کاهش نیروها بسیار مورد اهمیت است، دمای قطعه نقش مهمی در فرآیند ایفا می‌کند. البته بالا بردن درجه حرارت محدودیت‌هایی نیز خواهد داشت. از جمله این محدودیت‌ها، مشکلات جابه‌جایی قطعات خام به درون قالب پیش از انجام عملیات آهنگری و پیدایش عیبی موسوم به ترک مرکزی در مرکز قطعات است. ترک مرکزی در اثر افزایش بیش از اندازه دمای اولیه، به صورت گسیختگی در مرکز قطعات خام به وجود می‌آید. در اثر گرم‌کردن سریع قطعه، عیب دیگری موسوم به ترک حرارتی نیز ممکن است به وجود آید. این عیب در اثر انقباض و انبساط و اختلاف دمای مرکز و سطح بیرونی قطعه پیش می‌آید. از طرفی کنترل دما جهت دستیابی به دانه‌بندی مناسب بسیار ضروری است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- درست‌آزمایی نتایج شبیه‌سازی

جهت شبیه‌سازی فرآیند تیگزوفورجینگ از نرم‌افزار Deform-3D استفاده شده است. شکل (۳) مراحل تبدیل قطعه‌خام به قطعه‌نهایی را در نرم‌افزار و در تست‌های تجربی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص می‌باشد مراحل تولید قطعه در شبیه‌سازی با تست تجربی در بخش‌های مختلف تولید روند یکسانی را طی می‌کند.



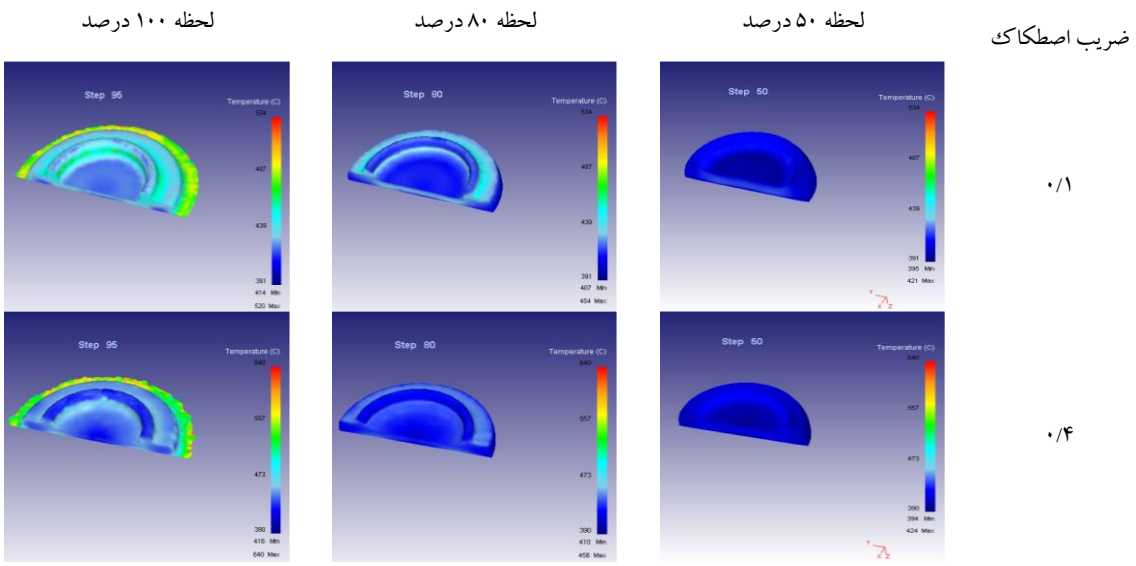
شکل (۳) مراحل انجام فرآیندی شبیه‌سازی و آزمایش

۳-۱- بررسی تاثیر اصطکاک

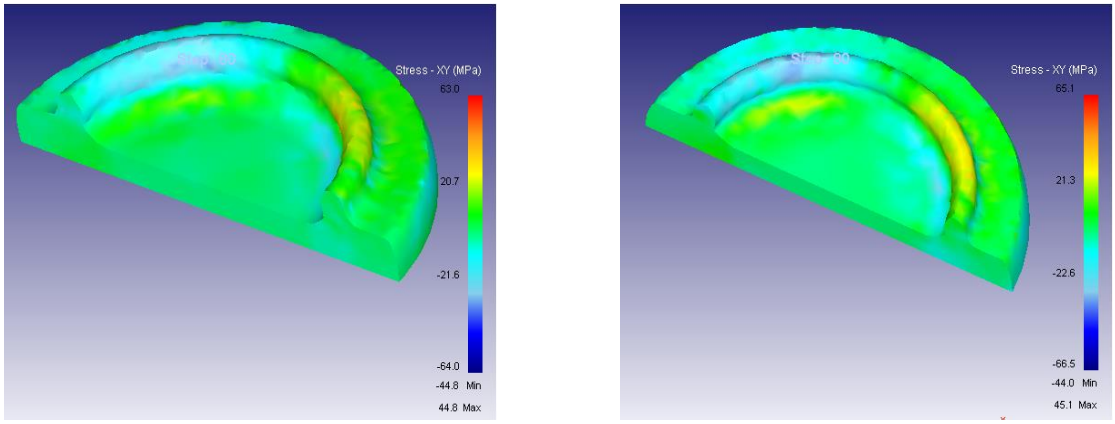
برای شبیه‌سازی شرایط تماسی، مدل قالب‌ها صلب فرض شده و از مدل تنش برشی اصطکاکی مطابق رابطه (۱) استفاده شده است. با توجه به اینکه در فرآیند آهنگری، این مدل نتایج بهتری را نسبت به مدل اصطکاکی کلمب دارد [۲۲ و ۲۳].

$$\tau = f\bar{\sigma} = \frac{m}{\sqrt{3}}\bar{\sigma} = mk \quad (۱)$$

برای یک حالت بدون اصطکاک، m=0 و در شرایط اصطکاک چسبنده، m=1 می‌باشد. اصطکاک بر روی پارامترهایی مانند دمای قطعه و تنش‌های وارده بر روی قطعه و قالب تاثیر می‌گذارد. با افزایش اصطکاک تا لحظه ۶۵٪ دمای قطعه تغییر محسوسی نداشته ولی پس از آن، دما با افزایش نسبی همراه است(شکل ۴). همچنین با افزایش اصطکاک، تنش موثر بر روی قالب و قطعه افزایش پیدا می‌کند(شکل ۵). رابطه تنش با اصطکاک در صفحه XY در شکل (۶) آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در لحظات ۴۰ و ۶۰ درصد از انجام فرآیند، مقداری کاهش در تنش بوجود می‌آید که دلیل این امر را می‌توان به گسیختگی دیواره‌های قطعه ارتباط داد. در فرآیند تیگزوفورجینگ، قطعه دارای فازهای جامد و مذاب می‌باشد. وقتی قطعه درون قالب قرار می‌گیرد و به آن فشار اعمال می‌شود تنش افزایش یافته و این افزایش تا زمانی که فاز مذاب بتواند از دیواره‌ی جامد به بیرون نفوذ کند ادامه پیدا می‌کند. در این مرحله بدلیل خروج فاز مذاب تنش کاهش نسبی دارد و بعد از خروج مذاب دوباره افزایش پیدا می‌کند.



شکل(۴) تاثیر اصطکاک بر روی دما



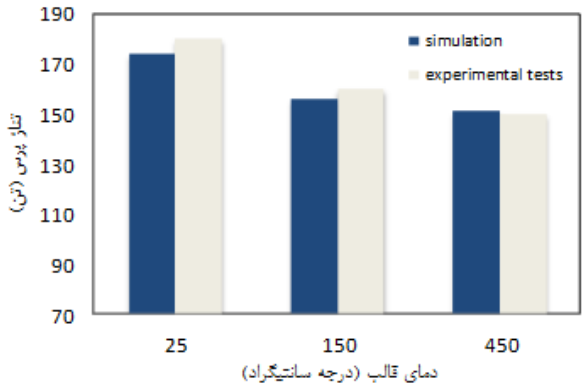
اصطکاک ۰/۴ اصطکاک ۰/۱

شکل(۵) تاثیر اصطکاک بر روی تنش‌های وارده بر قالب و قطعه در لحظه ۸۰٪

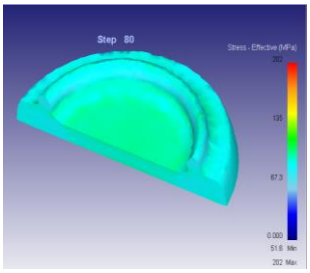
شکل(۶) رابطه تنش با اصطکاک در صفحه XY – دمای قطعه ۵۸۰°C و سرعت حرکت پرس ۲۵۰mm/s

۳-۲- تاثیر دمای قالب

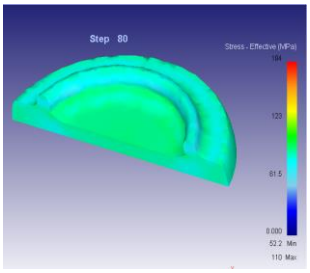
افزایش دمای قالب در فورجینگ، باعث پر شدن بهتر قالب و همچنین کاهش نیروها می‌شود. جهت بررسی دمای قالب، آزمایشات مشابهی با شرایط مشابه با دمای قطعه ۵۸۰°C و دماهای قالب ۲۵°C، ۱۵۰°C و ۴۵۰°C صورت پذیرفته است. شکل‌های (۷-۹) نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. افزایش دمای قالب موجب افزایش سیالیت ماده و کاهش ویسکوزیته آن می شود. در نتیجه آن، ماده توسط نیروهای کمتری جریان می‌یابد. با کاهش دمای قالب ، نیروهای لازم جهت شکل دهی افزایش می‌یابد. با افزایش نیروها فشار لازم جهت شکل دهی نیز افزایش خواهد یافت. همچنین با توجه به آن که سرعت سرد شدن قطعه در پرس‌ها هیدرولیک به علت سرعت کم زیاد است. کاهش نرخ سرد شدن قطعه تاثیر زیاری بر خصوصیات مکانیکی و شرایط آزمایش‌ها خواهد گذاشت. به خصوص درسطح تماس قطعه و قالب، دمای قطعه متاثر از دمای قالب است. با افزایش دمای قالب سرعت سرد شدن قطعه نیز کاهش خواهد یافت (شکل ۱۰).



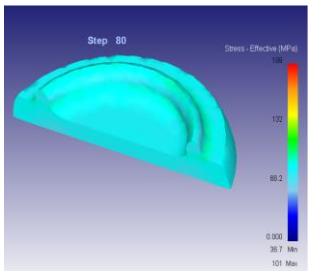
شکل(۷) تاثیر دمای قالب بر روی نیروی فورج



دمای قالب ۲۵°C

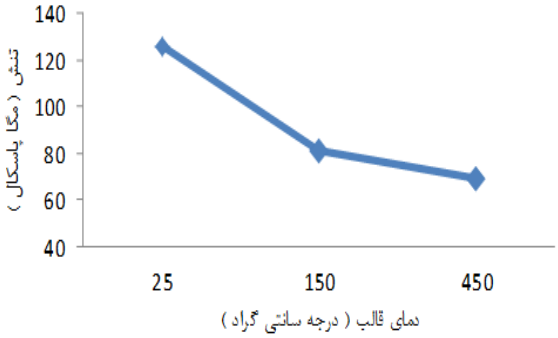


دمای قالب ۱۵۰°C

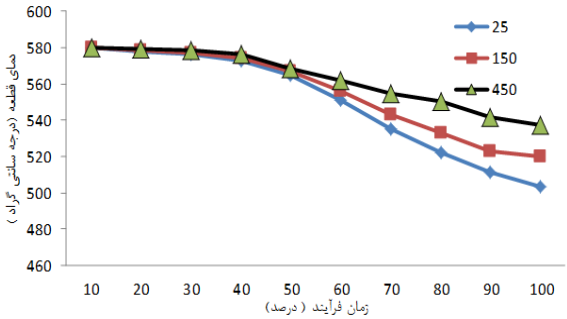


دمای قالب ۴۵۰°C

شکل(۸) تاثیر دمای قالب بر روی تنش‌های وارده بر قطعه، دمای قطعه ۵۸۰°C



شکل(۹) تاثیر دمای قالب بر روی تنش‌های وارده بر قطعه



شکل(۱۰) تاثیر دمای قالب بر روی زمان سرد شدن قطعه

۳-۳- تاثیر دمای قطعه

در جدول (۳) نیز مقادیر کسر جامد را بر حسب دمای آلیاژ که از معادله شل[1] بدست آمده است نشان می‌دهد.

در جدول (۳) نیز مقادیر کسر جامد را بر حسب دمای آلیاژ که از معادله شل[2] بدست آمده است نشان می‌دهد. با افزایش دما، درصد فاز جامد کاهش یافته و درنتیجه آن سیالیت قطعه نیز افزایش می‌یابد. افزایش سیالیت قطعه موجب آن می‌شود تا قطعه تحت نیروهای کمتری شکل بگیرد و تنش‌های وارد بر آن در حین شکل‌دهی نیز کاهش یابد. شکل (۱۱) تاثیر دما را بر روی تنش‌های وارده بر قطعه‌کار نشان می‌دهد. مقدار تغییر در تناژ پرس در شکل (۱۲) آورده شده است. همانطور که ملاحظه می شود مقادیر شبیه سازی با مقادیر به دست آمده در تست تجربی تطابق مناسبی را دارند.

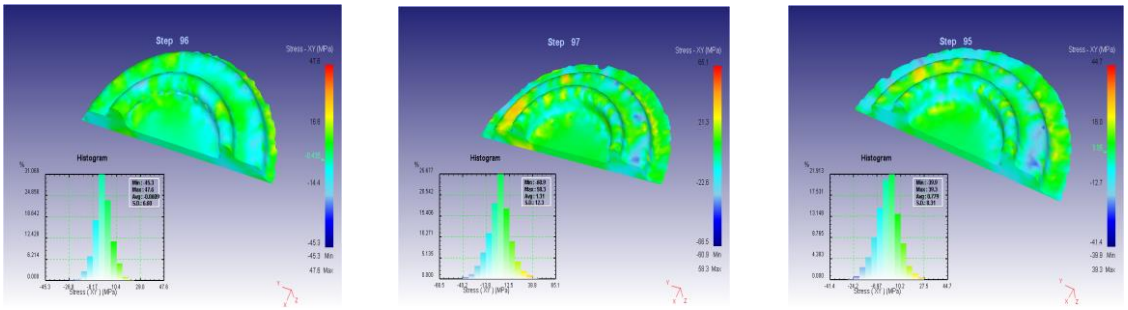
جدول (۳) مقادیر کسر جامد نسبت به دما

دما (°C)	۵۷۰	۵۸۰	۵۹۰	۶۰۰
کسر جامد (%)	۹۷	۷۲	۵۵	۴۳

۳-۴-تاثیر سرعت حرکت پرس (نرخ کرنش)

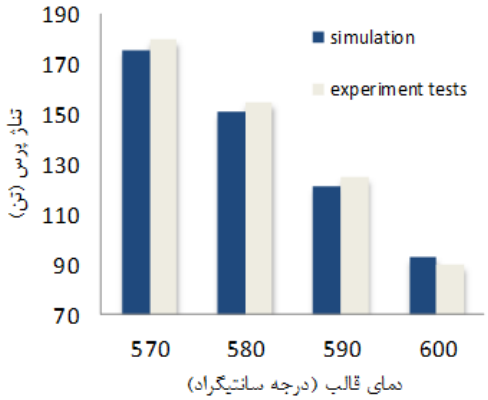
هرچه سرعت حرکت پرس زیاد باشد تاثیر بیشتری بر دمای قطعه خواهد داشت و در لبه‌های قطعه در سرعت کمتر دما بیشتر افزایش می یابد. همچنین تنشهای وارده در صفحه XY در سرعت حرکت پرس کمتر بیشتر می باشد. زیرا در سرعت کمتر سطح بیشتری از قطعه در مدت طولانی‌تری بین دو قالب بوده و به همین دلیل تنش ها نسبت به سرعت حرکت بالاتر بیشتر است. برای بررسی نرخ کرنش، آزمایش‌های مشابه در دمای قطعه ۵۸۰°C و دمای قالب ۱۵۰°C با دو نرخ کرنش ۱۵۰mm/s و ۲۵۰mm/s صورت پذیرفت. شکل‌های (۱۳-۱۴) تاثیر این افزایش را بر روی دمای قطعه و تنش‌های وارده بر آن در دو نرخ کرنش مختلف نشان می‌دهد.

1 -schiel
2 -schiel

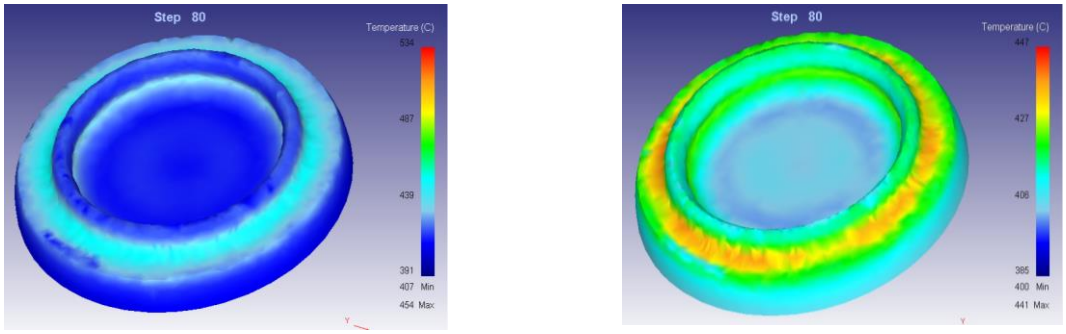


(ج) (ب) (الف)

شکل(۱۱) تاثیر دما بر روی تنش وارده بر قطعه، (الف) ۵۷۰°C (ب) ۵۸۰°C (ج) ۵۹۰°C

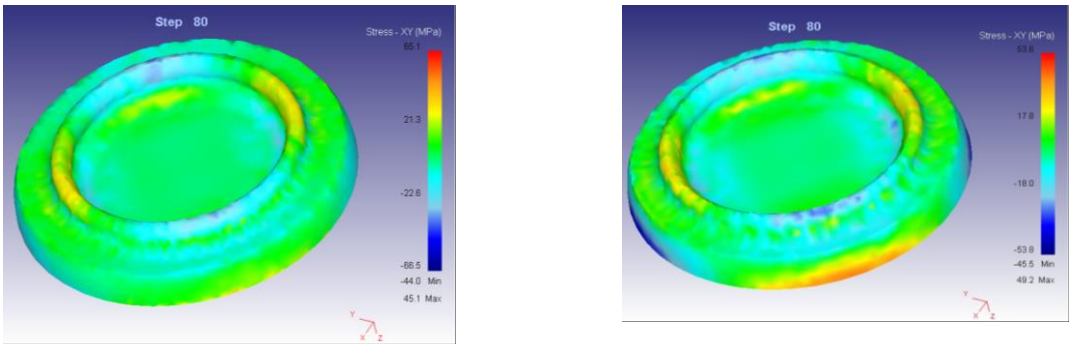


شکل (۱۲) تاثیر دما بر روی تناژ پرس، دمای قالب ۴۵۰°C



(ب) (الف)

شکل (۱۳) تاثیر نرخ کرنش بر روی دمای قطعه‌کار (الف) ۱۵۰mm/s (ب) ۲۵۰mm/s



(ب) (الف)

شکل (۱۴) تاثیر نرخ کرنش بر روی تنش های وارده بر قطعه‌کار (الف) ۱۵۰mm/s (ب) ۲۵۰mm/s

۴- نتیجه گیری

نتایج شبیه‌سازی فرآیند تیگزوفورجینگ آلومینیم A356 برای تولید قطعه درپوش گیربکس به صورت زیر قابل ارائه می‌باشد.

شبیه سازی انجام گرفته و ارائه پارامترهای وابسته به نرم افزار مربوطه به خوبی سیلان آلیاژ را در حالت نیمه جامد تقریب زده است. نتایج نشان داده که هنگامی که ماده در حالت خمیری شکل باشد، نیروهای شکل‌دهی کاهش یافته که در این صورت هزینه تولیدی برای قطعه نیز کاهش خواهد یافت. کاهش اصطکاک تا لحظه ۳۵٪ تغییر در دمای قطعه اتفاق نمی‌افتد اما پس از آن تغییری در حدود ۲٪ را بوجود می‌آید. همچنین با کاهش اصطکاک بدلیل کاهش نیروهای وارد بر قطعه، جریان یافتن ماده به صورت آرام می‌گردد که این امر باعث کاهش عیوبی از قبیل رویهم افتادگی لبه‌ها می‌گردد. با افزایش نرخ کرنش در ابتدا نیروهای لازم برای شکل‌دهی کاهش می‌یابد و سپس بدلیل پدیده کار سختی، نیرو افزایش می‌یابد.

مراجع:

[1] Chou H.N., Govender G., Ivanchev L., Opportunities and challenges for use of SSM forming in the aerospace industry, *TTP, solid state phenomena*, vol. 116-117, 2006, pp. 92-95.

[2] Jaffari M.R., Zebarjad S.M., Kolahan F., Simulation of A356 Aluminium Alloy Using finite element method, *Matertials science engineering A*, vol. 2007, 454-455.

[3] Motegi T., Tanabe F., sugiura E., Continuous casting of semisolid aluminium alloys, *Material Science Forum*, vol.1, 2002, pp. 203–208.

[4] Shiomi M., Takano D., Osakada K., Otsu M., Forming of aluminum alloy at temperatures just below melting point, *Internatinal Journal Machine Tool Manufacture*, 2003, pp. 229–235.

[5] Giordano P., Chiarmetta G., Thixo and rheo casting: comparison on a high production volume component, *Proceedings of the 7th international conference on semisolid processing of alloys and composites, Japan*, vol. 2002, pp. 665–670.

[6] S.M. Ghavamodini, S. Nourouzi, H. Baseri , A. Kolahdooz, S. Kaboli, M. Botkan, A Study of the Effects of Semi-solid Casting Parameters on the Microstructure and Hardness of Al-A356 Alloy, *Advances in Materials and Processing Technologies*, Istanbul, Turkey , July 2011.

[7] Nourouzi S. Ghavamodini S.M. Baseri H. Kolahdooz A., Botkan M., Microstructure evolution of A356 aluminum alloy produced by cooling slope method, *Advanced Material Research* vol. 402, 2012, pp.272-276.

[8] Tzimas E., Zavaliangos A., Evolution of near-equiaxed microstructure in the semisolid state, *Material Science Engineering A*, vol. 289, 2000, pp. 228–240.

[9] Nourouzi S., Bakhshi M., Kolahdooz A., Hosseinipour S.J., *Effect of temperature on the Microstructure of semi-solid casting in cooling slope method, Aerospace Mechanics Journal, under Published*, vol. 19(3), 2012, pp. 55-65, Persian Language.

[10] Bames H.A., Thixotropy−a review, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanic*, Vol. 70, 1997, pp. 1-3.

[11] Nourouzi S., Kolahdooz A., Botkan M., Behaviour of A 356 alloy in semi-solid state produced by mechanical stirring, *Advanced Material Research*, vol. 402, 2012, pp.331-336.

[12] Kang C.G., Cho J.S., Kim K.H., The effect of strain rate on macroscopic behavior in the compression forming of semi-solid aluminum alloy, *Journal of material Process Technology*, 88, 1999, pp. 159–168.

[13] Kang C.G., Kim H.H., Cho S.H., Evaluation of microstructure and mechanical properties by using nano/micro-indentation and nanoscratch during aging treatment of rheo-forged Al 6061 alloy, *Material Science and Engineering A*, vol. 485, 2008, pp. 272–281.

[14] Kang C.G., Bae J.W., Seol D.Y., Lee S.M., Die life prediction considering thermal fluid flow and solidification phenomenon in rheology process, *Journal of material Process Technology*, vol. 201, 2008, pp. 336–341.

[15] Pouyafar V., Sadough S.A., Hosseini F., Rahmani M.R., Design of experiments for determination of influence of different parameters on mechanical properties of semi-solid extruded parts, *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*, vol. 20, 2010, PP.794-797.

[16] Fadavi Boostani A., Tahamtan S., Microstructure and mechanical properties of A356 thixoformed alloys in comparison with gravity cast ones using new criterion, *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*, vol. 20, 2010, pp. 1608-1614.

[17] Fadavi Boostani A., Tahamtan S., Effect of a novel thixoforming process on the microstructure and fracture behavior of A356 aluminum alloy, *Materials and Design*, vol. 31, 2010, pp. 3769–3776.

[18] Fadavi Boostani A., Tahamtan S., Microstructural characteristics of thixoforged A356 alloy in mushy state, *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*, vol. 20, 2010, pp. 781-787.

[19] Martin C., Kumar P., Brown S.B., Shear rate thickening flow behavior of semi-solid slurries, *Matallurgical Transaction A*, vol. 4, 1993, pp. 1107-1116.

[20] llegbusi O.J., Brown S., Mold filling of semisolid metal slurries, *Journal of Material Engineering Perform*, vol. 4, 1995, pp. 486-493.

[21] Zavaliangos A., Lawley A., Numerical-simulation of Thixoforming, *Journal of Material Engineering Perform*, Vol. 4, 1995, pp. 40-47.

[۲۲] حجتی م.ح.، بخشی م.، حسینی پور س.ج.، *مبانی و کاربرد آهنگری سرد و گرم*، چاپ اول، انتشارات مازندران، بابلسر، ۱۳۸۵.

[23] Hasford W.F. Caddell R.M., Metal forming (mechanics and metallurgy), *second edition, prentice hall*, 1993.