

بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تاثیر دما در فرآیند تیگزوفورجینگ، مطالعه موردی: تولید درپوش گیربکس حلزونی مدل ۶۲

امین کلاه‌دوز^۱ و ساسان امینیان دهکردی^۲

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی‌شهر

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۵)

چکیده

برای تولید قطعاتی که دارای خواصی مناسب و در نزدیک‌ترین حالت تولید به شکل نهایی باشند می‌توان از انواع فرآیندهای شکل‌دهی نیمه‌جامد استفاده نمود. تیگزوفورجینگ به مجموعه‌ای از فرآیندهای نیمه‌جامد گفته می‌شود که در آن عملیات شکل‌دهی برای موادی با کسر جامد کمتر از ۵۵٪ صورت بگیرد. هدف از این مقاله بررسی تاثیر دما (یعنی دمای قالب و قطعه خام) برای تولید قطعه‌ای نسبتاً پیچیده است. خروجی‌های مورد بررسی نیز ریزساختار و مشخصات مکانیکی قطعه تولیدی در نظر گرفته شده است. برای این منظور یک‌سری آزمایشات عملی صورت گرفته است. همچنین داده‌های حاصل در این آزمایشات با مقادیر استخراجی از شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای قالب، ریزساختار درشت‌تر می‌شود. همچنین در این حالت ساختار غیر همگنی به وجود می‌آید. نتیجه این اتفاق کاهش سختی به مقدار ۱۲/۵٪ است. البته نیروی شکل‌دهی نیز کاهش یافته که مقدار ۲۰/۶٪ گزارش شده است. همچنین رشد دانه‌ها با افزایش دمای قطعه و مدت زمان نگهداری نشان داده شده است. می‌توان گفت برای مدت زمان نگهداری ۵ min دقیقه، چنانچه دما از ۵۷۰°C به ۶۰۰°C افزایش یابد، مقدار اندازه دانه ۵/۳٪ افزایش می‌یابد. یا برای دمای ۵۷۰°C افزایش زمان نگهداری از ۵ min به ۳۰ min موجب افزایش ۷۳/۹٪ در اندازه دانه می‌گردد. در ادامه برای بهبود سختی نمونه‌ها از عملیات T6 استفاده شده است. با استفاده از این عملیات، میزان سختی ۱۷/۳٪ افزایش یافت. دلیل این امر شکسته شدن فاز یونکتیک و تبدیل آن به ساختار همگن و کروی است.

واژه‌های کلیدی: تیگزوفورجینگ، آهنگری غیر هم‌دما، دمای قالب، دمای قطعه، مدت زمان نگهداری

Experimental Study and Simulation of the Effect of Temperature in Thixoforging Process, Case Study: Producing of the 62 Model Helical Gearbox Cap

A. Kolahdooz and S. Aminian-Dehkordi

Young Researchers and Elite Club

Islamic Azad University, Khomeinishahr Branch

(Received: 25/April/2017 ; Accepted: 06/December/2017)

ABSTRACT

Semi-solid metal (SSM) processing has been used to produce of the engineering components with the suitable properties and at the closet form of the final part. Thixoforging is one of SSM processes that in this process the forming operation is performed on materials with the solid fraction of less than 55%. The purpose of this paper is to discuss on the temperature (mold and specimen temperature and holding time) for the producing of a relatively complex piece. The characteristics of the microstructures and mechanical properties of thixoforged Al-A356 alloy were studied. For this aim, some experimental tests were done. Also the results of these tests are compared with the results of simulations. The results showed that by increasing mold temperature, causes more inhomogeneous microstructure and therefore the hardness and forming force decreased %12.5 and %20.6 respectively. Also the results showed that increasing the specimen temperature and holding time, the grain size of primary α -al phase increased. For example in holding time of 5 min, by increasing the temperature from 570°C to 600°C, the grain size of primary α -al increased 3.5 percent. Also in the temperature from 570°C, by increasing holding time of 5 min to 30 min, the grain size of primary α -al increased 73.9 percent. In this work, the T6 heat treatment process was used for improving the hardness. The hardness was increased %17.3, because of changing in primary α -al phase and produced the homogeneous microstructure.

Keywords: Thixoforging, Non-Isothermal Forging, Mold Temperature, Slug Temperature, Holding Time

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): aminkolahdooz@iaukhsh.ac.ir

۲- کارشناس ارشد: sasanaminian@iaukhsh.ac.ir

۱- مقدمه

طریق کاهش یا حذف نقص‌های حجمی مانند تخلخل، پارگی داغ، حفره‌های انقباضی، جدایش و اصلاح میکروساختار به‌وسیله افزایش همگن‌سازی شیمیایی، بهبود می‌بخشد. با این حال، او همچنین اشاره می‌کند که فرآیند تیگزوفورجینگ تاکنون توجه محدودی را به خود جلب کرده است.

موسچینی [۸] در تحقیقات خود بیان می‌کند که در صورت استفاده از فرآیند تیگزوفورجینگ در تولید قطعات سیستم سوخت خودرو کاهش ۵۰٪ در هزینه را می‌توان در مقایسه با فرآیندهای تولید متعارف به‌دست آورد. کنی و همکاران [۹] نیز نشان دادند که استفاده از فرآیند تیگزوفورجینگ برای تولید قطعه‌ای از جنس آلومینیوم با آلیاژ A357 بهبود خواص مکانیکی و صرفه‌جویی بیشتری در ماده مصرفی نسبت به ریخته‌گری ثقلی معمولی حاصل می‌شود.

پویافر و همکاران [۱۰] به بررسی تاثیر پارامترهای فرآیندی در این روش پرداخته است. برای این کار از روش طراحی آزمایشات و در جهت کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نظر خود بهره برده است. زیرشاخه مورد بررسی ایشان در فرآیند تیگزوفورجینگ، روش اکستروژن نیمه‌جامد بود که دما، سرعت شکل‌دهی، زمان نگه‌داری و عملیات حرارتی را به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفت. فدوی بوستانی و تهمتن [۱۱-۱۳] ویژگی‌های ریزساختاری آلیاژ A356 را در این روش مورد بررسی قرار دادند و در نهایت کار خود را با روش‌های ریخته‌گری نیمه‌جامد و ثقلی مورد مقایسه و ارزیابی قرار دادند.

نوروزی و همکاران [۱۴] به بررسی تاثیر پارامترهای هم‌دمای همزن مکانیکی بر ساختار آلومینیوم A356 پرداختند. ایشان تاثیر سرعت همزن مکانیکی، کسر جامد و دمای قالب را بر ریزساختار و سختی نمونه‌ها بررسی نمودند. این تحقیق در دماهای ۶۰۳، ۶۰۸، ۶۱۳ °C با سرعت هم‌زدن ۲۴۰، ۳۰۰، ۳۹۰ RPM و زمان ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ S انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش دما از ۶۱۳ °C به ۶۰۳ °C خواص مکانیکی افزایش می‌یابد ولی به‌علت ویسکوزیته بالا در دمای ۶۰۳ °C، دمای ۶۰۸ °C برای مذاب‌ریزی مناسب‌تر می‌باشد. با افزایش سرعت همزن از ۲۴۰ RPM به ۳۰۰ RPM مشاهده شد ساختار شاخه‌ای بیشتر شکسته می‌شود ولی با

به‌دلیل افزایش استفاده از آلومینیوم و آلیاژهایش، نیاز به خلق و توسعه تکنولوژی‌های پیشرفته روز به روز بیشتر می‌شود. هدف تولید این فرآیندها به‌جز کاهش هزینه و افزایش سرعت تولید بایستی توانایی تولید قطعات با شکل پیچیده و با کیفیت نیز باشد. تولید قطعات آلومینیومی در سیستم سنتی به‌روش ریخته‌گری تحت فشار انجام می‌شود. در این روش به‌دلیل وجود تخلخل در قطعه، کیفیت محصول نهایی کاهش می‌یابد که این امر باعث محدود نمودن کاربرد آن می‌شود. همچنین برای تولید این قطعات بایستی ترکیبی از فرآیندهای آهنگری و ماشین‌کاری مورد استفاده قرار گیرد. از سوی دیگر نیز فرآیند آهنگری به‌دلیل بیشتر بودن مصرف انرژی، کمتر بودن نرخ تولید، عدم امکان تولید قطعات پیچیده و با شکلی نزدیک به‌شکل نهایی، هزینه بیشتر ماشین‌آلات دارای محدودیت‌هایی بود [۱-۲].

تیگزوفورجینگ به فرآیند تولید یک قطعه از شمش آماده اطلاق می‌شود که به‌صورت جزئی ذوب گردیده و سپس تحت فرآیند آهنگری قرار می‌گیرد. در این فرآیند شمش مورد استفاده که به‌صورت نیمه‌جامد تهیه شده، حاوی ذرات جامد با ساختار کرووی شکل می‌باشد. تیگزوفورجینگ به‌عنوان روشی ممتاز شناخته می‌شود که به نوعی مزیت‌های هر دو روش آهنگری و ریخته‌گری را دارد. در این روش، از طرفی نیروی لازم برای شکل‌دهی نسبت به آهنگری کمتر بوده و از طرف دیگر خواص مکانیکی بهتری نسبت به قطعات حاصل از ریخته‌گری دارد [۳-۵].

لذا تحقیقات گوناگونی بر روی این فرآیند و در جهت تولید قطعات مختلفی ارائه شده است. کنگ و همکاران [۶] گزارش کرده‌اند که با تغییر دادن ریزساختار از حالت شاخه‌ای به کرووی شکل و همچنین اعمال تنش به آلیاژ می‌توان رفتار آلیاژها را در حالت نیمه‌جامد تغییر داد. بنابراین، به بررسی اثر سرعت فشردگی آلیاژ آلومینیوم در کسرهای جامد کنترل شده پرداخته‌اند.

فن [۷] در یک مقاله مروری خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیم A356 و A357 تولیدشده از طریق فرآیند تیگزوفورجینگ، ریخته‌گری ماسه‌ای و ریخته‌گری قالب‌های دائمی را با هم مقایسه کرد. وی نشان داد که تیگزوفورجینگ به‌وضوح استحکام کششی و خستگی و داکتیلیته آلیاژ را از

مجموعه‌ای از آزمون‌های آزمایشگاهی توسط دستگاه‌های ساخته شده توسط نویسنده صورت پذیرفته و در مرحله دیگر مراحل شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲-۱-۱- مراحل آزمایشگاهی

در این بخش هدف ارائه شرایط و کارهای صورت پذیرفته برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی می‌باشد. این بخش به بررسی نوع آلیاژ، دستگاه و شرایط آزمون‌های آزمایشگاهی می‌پردازد.

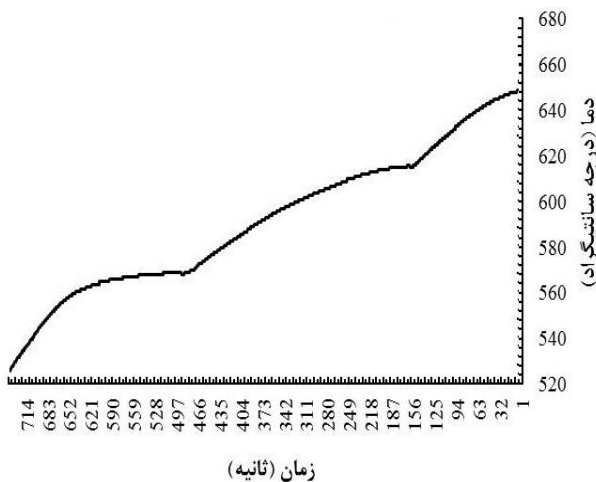
۲-۱-۱-۱- انتخاب آلیاژ

ماده‌ای که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، آلیاژ آلومینیوم A356 می‌باشد که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

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

Fe	Cu	Mg	Si	Al	ترکیب شیمیایی
۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۴۱	۷/۱	باقی مانده	درصد وزنی

شکل ۱ نمودار انجماد آلیاژ مورد نظر را نشان می‌دهد که با انجام آزمایش به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود منحنی رسم شده در دو زمان تغییر شیب می‌دهد. این تغییر شیب بیانگر رسیدن به دماهای خطوط مذاب و جامد آن آلیاژ است که به ترتیب 616°C و 568°C می‌باشد. کسر جامدهای مختلف را می‌توان با استفاده از دیاگرام تعادلی آلومینیوم-سیلیسیوم و یا با استفاده از قانون اهرم با تقریب خوبی به دست آورد.



شکل (۱): نمودار انجماد آلیاژ آلومینیوم A356

افزایش سرعت همزن به 390RPM و 490RPM مخلوط متلاطم گردید.

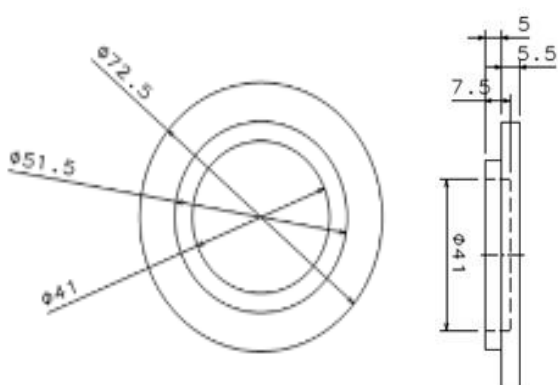
کازمی و همکاران [۱۵] به بررسی تاثیر پارامترهای تیکسوفورمینگ آلیاژ آلومینیوم A356 بر ریزساختار و خواص مکانیکی فلنج پمپ‌های گریز از مرکز پرداختند. در این تحقیق تاثیر پارامترهای شکل‌دهی نظیر کسر جامد، دما، فشار، سرعت پانچ و عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه بررسی گردید.

کلاه‌دوز و همکاران [۱۶] شبیه‌سازی فرآیند تیگزوفورجینگ را با استفاده از نرم‌افزار Deform-3D انجام دادند. ایشان در تحقیق خود به بررسی اثر پارامترهایی از قبیل ضریب اصطکاک، دمای فرآیند، فشار اعمالی به قطعه و سرعت حرکت پرس پرداخته‌اند. در تحقیق ایشان آزمایشات معدودی در جهت صحت شبیه‌سازی خود گزارش داده‌اند. ایشان گزارش کرده‌اند که شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در کسرهای جامد مختلف، به خوبی رفتار سیلان را مدل‌سازی می‌کند.

پژوهش‌های انجام گرفته پیشین در زمینه تیگزوفورجینگ به‌طور کلی به قطعات ساده محدود بوده و پارامترهای مربوطه برای آزمایش‌های ساده مانند آزمون فشار مورد بررسی قرار گرفته است. به‌علاوه جهت انجام تحلیل در آن پژوهش‌ها از هیچ نرم‌افزار شبیه‌سازی استفاده نشده است. در تحقیق حاضر، که ادامه کار نویسنده با مقاله مرجع [۱۶] می‌باشد، در ابتدا با انتخاب قطعه درپوش گیربکس حلزونی مدل ۶۲ که به دلیل داشتن دیواره‌های صاف و نازک قطعه‌ای نسبتاً پیچیده محسوب می‌شود، تاثیر دمای قالب در حالت غیر هم‌دما در این فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله دوم، داده‌های حاصل در این آزمایشات با مقادیر استخراجی از شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته شد. در انتها تاثیر دمای قطعه و مدت زمان نگهداری به‌صورت هم‌دما مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در نهایت اثر تغییر تمامی پارامترهای ذکر شده بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی در فرآیند مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته است. از دیگر تفاوت این کار با کار قبلی نویسنده در این است که بررسی عملیات حرارتی T6 نیز مورد بررسی قرار گرفته است. این امر در جهت بهبود مشخصه سختی نمونه‌های تولیدی صورت پذیرفته است.

۲- روش تحقیق

برای انجام تست‌های مورد نظر همان‌طور که گفته شد، دو مرحله اساسی در نظر گرفته شده است. در یک بخش



شکل (۲): قطعه درپوش گیربکس حلزونی مدل ۶۲، (ابعاد برحسب میلی‌متر می‌باشد).

جدول (۲): پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق.

مقدار	پارامتر
۴۵۰، ۱۵۰، دمای محیط	دمای قالب (°C)
۵۷۰، ۵۸۰، ۵۹۰، ۶۰۰	دمای شمشال (°C)
۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰	مدت زمان نگهداری (دقیقه)

شکل ۳ شماتیکی از نحوه کار و دستگاه‌های مورد نظر را نشان می‌دهد. برای پیش‌گیری از چسبندگی آلومینیوم به قالب به‌طور مستمر از مخلوط گرافیت در روغن معدنی استفاده شده است. همچنین سطوح قالب‌های آهنگری با دقت پرداخت شده تا از چسبندگی قطعه به قالب جلوگیری شود. برای اندازه‌گیری دمای قالب و قطعه کار از یک ترموکوپل نوع k استفاده شد. به‌منظور اندازه‌گیری دمای مرکز قطعه‌کار، سوراخ کوچکی به قطر ۲/۵ mm در مرکز هر قطعه ایجاد گردید و ترموکوپل در آن قرار داده شد.

۲-۱-۲- تجهیزات مورد نیاز و مراحل انجام آزمایش

شکل ۲ نمونه‌ای از قطعه انتخابی و همچنین اندازه‌های آن را بعد از ساده‌سازی نشان می‌دهد. این قطعه یک درپوش گیربکس حلزونی مدل ۶۲ است. وظیفه آن علاوه بر ایجاد محیط آب‌بندی برای گیربکس، مکان قرارگیری بلبرینگ نیز می‌باشد. در ابتدا و برای انجام آزمایش‌ها لازم است تا قالب مناسبی از قطعه طراحی و ساخته شود. در این راستا، ابتدا قطعه انتخابی در نرم‌افزار Catia به‌صورت سه‌بعدی ایجاد شد. پس از محاسبه پارامترهای لازم، مانند ابعاد و جرم قطعه خام اولیه و... قالب مورد نظر طراحی گردید. قبل از ساخت قالب نیز باید از عملکرد مناسب قالب در تولید قطعه مورد نظر اطمینان حاصل شود. بنابراین، شبیه‌سازی فرآیند مورد نظر با قالب طراحی شده در نرم‌افزار Deform-3D، صورت پذیرفت. آهنگری آلیاژهای آلومینیوم با پرس‌های هیدرولیک صورت می‌پذیرد. به‌منظور تسهیل در انجام عملیات، قالب‌ها باید حرارت داده شوند و تقریباً همان درجه حرارت فلز را کسب نمایند. در واقع در طراحی و ساخت قالب‌های آهنگری برای قطعات و آلیاژهای آلومینیومی، این قالب‌ها در حین فرایند گرم شده و حرارت می‌بینند. به این دلیل باید دارای مقاومت و استحکام لازم در برابر فشارها و حرارت‌دهی را داشته باشند [۱۷-۱۸]. در این تحقیق، قالب از جنس فولاد گرم کار H13 ساخته شد. این فولاد قابلیت تحمل شوک‌های حرارتی را دارا می‌باشد و همچنین سختی آن در دماهای بالا تغییر کمی پیدا می‌کند.

برای تولید قطعه لازم است شمشال با ریزساختاری غیردندریتی و در ابعاد مورد نیاز فراهم گردد. برای این منظور از دستگاه سطح شیب‌دار خنک‌شونده موجود در دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی‌شهر کمک گرفته شد [۲ و ۱۹]. به‌کمک این دستگاه، شمشال اولیه با ساختار مورد نظر تولید گردید. نحوه تولید این شمشال در مقاله [۱۹] به‌طور مفصل آورده شده است. در مرحله بعد و با توجه به اندازه‌های قطعه خام به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی‌ها، نمونه‌ها بایستی در ابعاد لازم ماشین‌کاری شوند. حال فرآیند تیگزوفورجینگ نمونه‌ها در قالب و تحت شرایط مندرج در جدول ۲ صورت می‌پذیرد. برای حصول اطمینان بیشتر در آزمایشات تجربی، هر یک از آزمایش‌ها، ۳ بار انجام و متوسط این نتایج گزارش گردید.

در مرحله بعد، نمونه‌ها به دقت شستشو شده تا تمام ذرات فلزی به‌جامانده، از روی سطح خارج گردند. سپس عمل صیقل‌کاری با استفاده از خمیر الماسه ۰/۵ میکرون با دقت زیاد انجام شد و بعد از انجام صیقل‌کاری و شستشوی کامل سطح در مجاورت هوای گرم، خشک شدند. جهت حکاکی کردن نمونه‌ها، از محلول رنگی وک^۱ با ترکیب ۱۰۰ ml آب، ۴ gr KMnO₄ و ۱ gr NaOH استفاده گردید. نمونه‌ها بعد از حکاکی با الکل شستشو شده و در مجاورت هوای گرم خشک شدند. در انتها ریزساختار نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ نوری قابل مشاهده می‌باشند.

۲-۱-۳- طراحی کویل و سیستم حرارت‌دهی

با توجه به این‌که در این پژوهش، بیشینه اختلاف دما در نقاط مختلف قطعه نباید از ۳۰ بیشتر باشد لازم است تا ارتباط مناسبی بین طول قالب و قطعه کار و طول کویل برقرار گردد. به بیان دیگر، باید کوره‌ای با ابعاد مناسب طراحی نمود. کوره‌های مقاوم‌تری بیش از ۸۶٪ از انرژی حرارتی به صورت تشعشعی به قطعه اعمال می‌شود. در نتیجه سطح قطعه خام بیشتر حرارت دیده و گرما در آن متمرکز می‌شود [۱۴ و ۲۰]. با توجه به شرایط آزمایش و اندازه قطر شمشال خام، در صورتی که H طول بهینه کویل، D_i قطر داخلی کویل، P_a چگالی انرژی باشد، طراحی کوره مناسب به این شرح می‌باشد [۱۴ و ۲۰].

$$\delta_f = \sqrt{\frac{2P_a}{\mu a}} \quad (1)$$

در این رابطه δ_f عمق نفوذ جریان، μ ثابت مغناطیسی و P_a مقاومت قطعه کار است. در خصوص A356 با توجه به رابطه زیر می‌توان چگالی انرژی را محاسبه نمود:

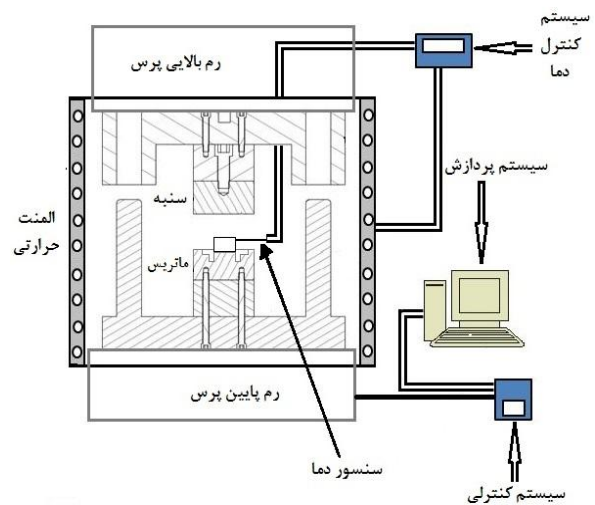
$$P_a = \frac{P_s (\theta_s - \theta_c)_i}{\theta_s - \theta_c} = \frac{7.01 \kappa (\theta_s - \theta_c)}{d} \quad (2)$$

در این رابطه، ω فرکانس زاویه‌ای، K ضریب هدایت حرارتی و $\theta_s - \theta_c$ بیشینه اختلاف دمای مرکز و سطح قطعه کار می‌باشد. اگر در رابطه بالا فرض شود:

$$\frac{(\theta_s - \theta_c)}{(\theta_s - \theta_c)_i} = \kappa$$

در این صورت می‌توان k را با استفاده از نسبت شعاع قطعه به عمق نفوذ ($d/2\delta_f$) محاسبه نمود.

با توجه به جداول مربوطه که رابطه بین قطر و دمای قطعه و میزان فرکانس لازم برای حرارت‌دهی را نشان می‌دهد و با



شکل (۳): شماتیک نحوه قرارگیری تجهیزات بر روی دستگاه پرس.

به‌منظور بررسی ریزساختار قطعات تولید شده، پس از خنک‌شدن، قطعات تولیدی از وسط برش داده شدند. سپس گوشه‌های آن‌ها با استفاده از سوهان از حالت تیزی خارج شده و سپس سطح مورد نظر به‌وسیله سمباده‌های شماره ۱۸۰، ۳۲۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ سنباده‌کاری شدند. شکل ۴ برخی از نمونه‌های تولیدشده و همچنین موقعیت‌های مختلفی از قطعه تولیدی را که برای بررسی‌های ریزساختاری و سختی مورد استفاده قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد.



شکل (۴) برخی از نمونه‌های تولیدی و موقعیت‌های انتخابی برای مطالعه ریزساختار و سختی.

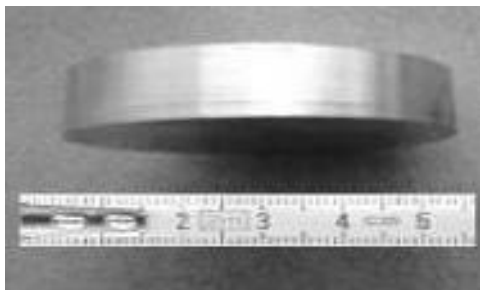
صحت آزمایشات و مقادیر به دست آمده حاصل گردد [۱۵، ۲۲-۲۱].

همچنین برای شبیه سازی شرایط تماسی، مدل قالبها صلب فرض شده و از مدل اصطکاک برشی مطابق رابطه ۵ استفاده شده است. دلیل استفاده از این مدل، ارائه نتایج بهتری نسبت به مدل اصطکاک کلمب در فرآیند آهنگری بود [۱۷]. در این مدل، حالت بدون اصطکاک و $m=1$ حالت اصطکاک چسبیده را معرفی می کند. در فرآیند آهنگری، اصطکاک روی عواملی از جمله دمای قطعه و تنش های وارده بر روی قطعه و قالب تاثیر می گذارد.

$$\tau = mk = \frac{\sqrt{3}}{3} m \bar{\sigma} \quad (5)$$

۳- نتایج و بحث

در این بخش به بررسی نتایج آزمایشگاهی و مقایسه برخی از نتایج مانند دمای قالب با استفاده از شبیه سازی پرداخته می شود. شکل ۵ روند تبدیل قطعه خام به قطعه نهایی را در شبیه سازی و در حالت آزمایشگاهی نشان می دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵: روند انجام فرآیند در آزمون های آزمایشگاهی در (الف): قطعه خام (ب): بعد از حرکت ۳۰٪ کورس پرس و (ج): در انتهای کار.

توجه به این که ظرفیت گرمایی آلومینیوم 1450 KW(h/t) است، مقدار A_s ، سطح مقطع کمینه طول حرارت دیده (l_w) از روابط زیر به دست می آید:

$$A_s = \frac{P_t}{P_a} = \frac{P_r Q}{P_a} \quad (3)$$

$$l_w = \frac{A_s}{\pi d} \quad (4)$$

در نهایت، مقادیر مورد نظر برای طراحی کوپل مورد نظر به صورت جدول ۳ به دست آمده است.

جدول (۳): مشخصات المنت طراحی شده.

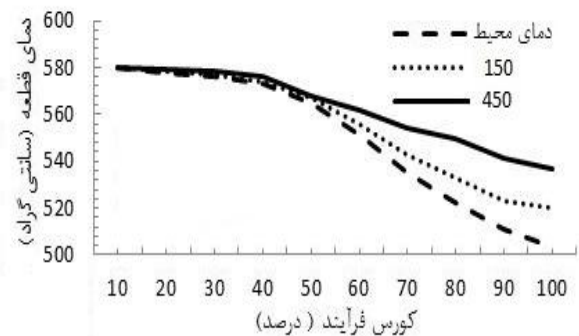
آلیاژ	قطر قطعه خام	طول بهینه کوپل	کمینه طول حرارت دهی	قطر داخلی کوپل
A356	۵۰	۱۱۵	۸۷	۸۴

۲-۲- شبیه سازی فرآیند تیگزوفورجینگ

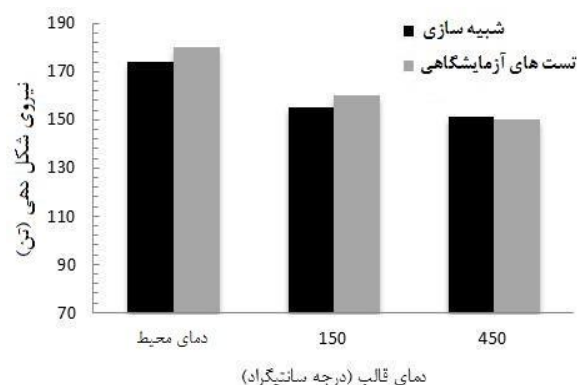
شبیه سازی فرآیند تیگزوفورجینگ به دلیل مباحثی مانند وجود هم زمان چند فاز مختلف حین فرآیند، سطوح متحرک، سطوح تماسی، اصطکاک، سرعت حرکت پرس و ... مشکل می باشد. شبیه سازی انجام شده در این تحقیق در ابتدا به منظور داشتن عملکرد مناسب قالب در تولید قطعه مورد نظر و ایجاد اطمینان از طراحی قالب قبل از ساخت صورت پذیرفت اما در ادامه کار، پارامترهای فرآیند با استفاده از یک سری ساده سازی های منطقی در حالت هم دما و غیرهم دما مورد بررسی قرار گرفت. جهت شبیه سازی فرآیند تیگزوفورجینگ از نرم افزار Deform 3D استفاده گردید. مشخصات ماده که در شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است، به صورت تجربی و با انجام یک سری آزمایشات مانند آزمون فشار به دست آمده است. این خصوصیات در مقاله مرجع [۱۶] که مقاله قبلی این نویسنده می باشد آورده شده است. برای این که بتوان شرایط صحیحی را بین مدل سازی و نتایج تجربی داشت، رفتار آلیاژ مورد نظر را در دماهای مورد آزمایش در بخش فورجینگ با استفاده از آزمایش فشار حلقه به دست آمد و در معادلات حاکم برای رفتار آلیاژ مربوطه قرار داده شد. لازم به ذکر است که نرم افزار Deform قابلیت وارد نمودن آلیاژ مربوطه را به صورت فایل *.key دارا می باشد. همچنین برای مشخص کردن چگالی از آزمون ارشمیدس استفاده شد. ذکر این نکته هم لازم است که برای داشتن دقت بیشتر در داده های آزمایشگاهی در این بخش خصوصیات به دست آمده با مقادیر مربوطه از دیگر محققان مورد ارزیابی قرار گرفته تا

۳-۱- اثر دمای قالب

دمای قطعه متاثر از دمای قالب به‌خصوص در سطح تماس قطعه و قالب است. جهت بررسی اثر دمای قالب، آزمایشاتی در شرایط یکسان با دمای قطعه 580°C و در دماهای محیط، 150°C و 450°C برای قالب صورت پذیرفته است. شکل ۶ تاثیر دمای قالب را روی دمای قطعه در حین فرآیند تیگزوفورجینگ که از شبیه‌سازی به‌دست آمده است، نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، افزایش دمای قالب موجب افت کمتر دمای میانگین قطعه می‌گردد. کاهش مقدار افت دما، باعث کاهش مقاومت سیلان ماده می‌شود و به‌دنبال آن فشار لازم جهت شکل‌دهی و نیروی شکل‌دهی کاهش پیدا خواهد کرد (شکل ۷).



شکل ۶: تاثیر دماهای مختلف قالب بر روی نحوه سرد شدن قطعه در حین فرآیند.



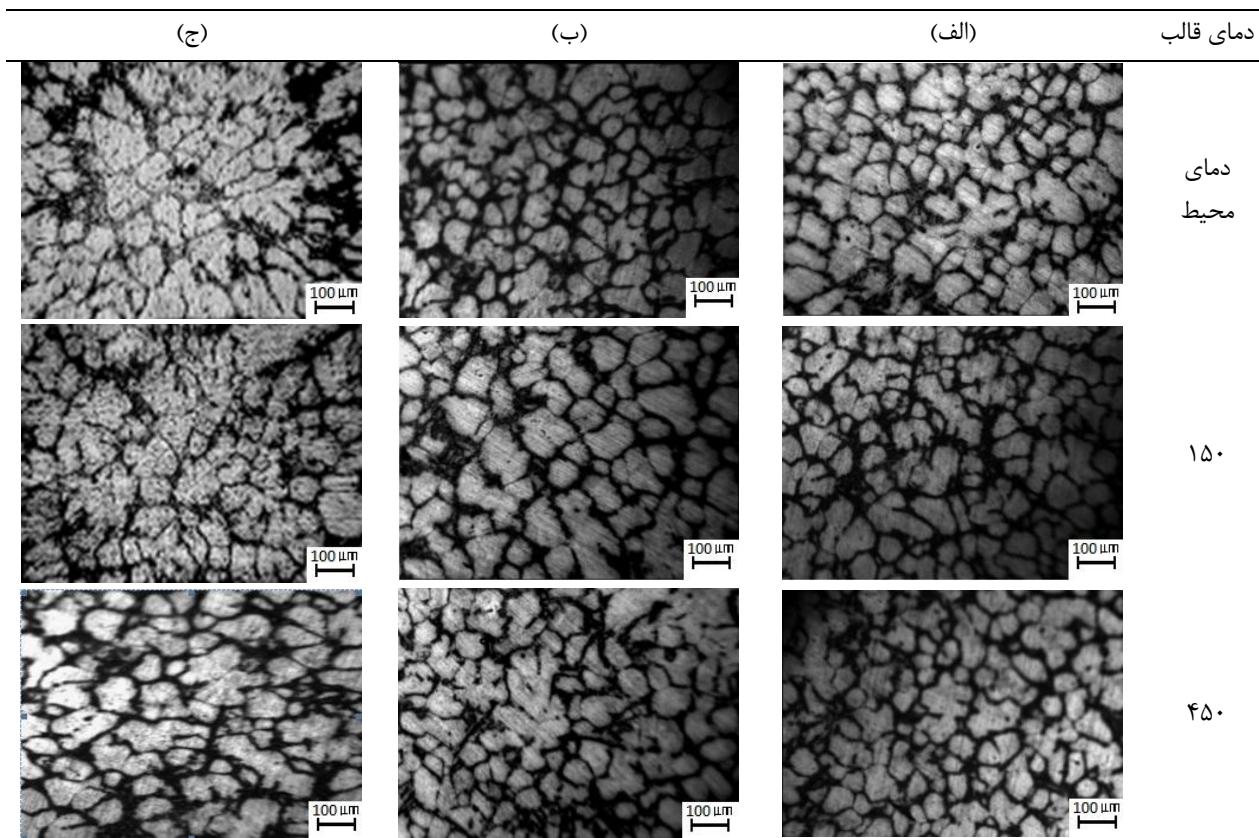
شکل ۷: تاثیر دمای قالب روی نیروی شکل‌دهی.

انجماد نمونه‌های نیمه‌جامد می‌گردد. نتیجه این اتفاق تغییر در ریزساختار که شامل تغییر در اندازه دانه، مورفولوژی فازهای یوتکتیکی، فاصله بین بازوهای دندردیتی و فازهای بین فلزی می‌باشد. با افزایش دمای قالب، نرخ انجماد کاهش یافته لذا فرصت برای جابجایی و نفوذ نسبت به حالت قبل بیشتر فراهم می‌شود و استحاله یوتکتیکی با تاخیر اتفاق می‌افتد، در نتیجه ذرات فاز α اولیه فرصت کافی برای رشد و درشت‌تر شدن را پیدا می‌کنند.

البته افزایش بیش از حد دما نیز باعث رشد بیش از حد اندازه ذرات فاز α اولیه و کاهش فاکتور شکل آن‌ها می‌گردد که دلیل آن به‌خاطر این است که با افزایش بیشتر دمای قالب، انجماد فازهای حاصل از یوتکتیک با سرعت کمتر نسبت به دیگر دماهای قالب صورت می‌گیرد در ضمن ذرات جامد فاز α اولیه نیز از طریق پیوستن ذرات جامد معلق و همچنین ذرات α ثانویه به آن درشت می‌شود. به بیان دیگر، پایین بودن سرعت انجماد، شرایط مناسبی را برای استحاله نفوذ فراهم ساخته تا ذرات جامد α اولیه به‌عنوان مراکز جوانه‌زنی برای ذرات α ثانویه و همچنین پیوستن این ذرات به هم عمل کرده و موجب افزایش اندازه ذرات و کاهش فاکتور شکل آن‌ها می‌شود. همچنین همان‌طور که در شکل مشخص است، هنگامی که دمای قالب در مرکز قطعه کاهش می‌یابد، ریزساختار دارای توزیع فاز مایع کمتری می‌گردد. علت این امر کاهش سرعت افت دمای شمشال و در نتیجه سیلان یکنواخت‌تر در قسمت‌های مختلف قطعه می‌باشد. شکل ۹ ریزساختار قطعه حاصل از تیگزوفورجینگ را برحسب تغییر میزان فشار شکل‌دهی نشان می‌دهد. این شکل تغییرات در اندازه و شکل ذرات α اولیه را با افزایش فشار به‌طور واضح نشان می‌دهد. همچنین با افزایش فشار ریزساختار دارای توزیع یکنواخت‌تری از اندازه دانه‌ها را در زمینه ریزتری از ساختار یوتکتیک دارا می‌گردد. در مطالعه ریزساختاری کریستال‌های Si درشت مشاهده نشد که دلیل این امر ذوب کامل یوتکتیک در حین فرآیند بود.

جدول ۴ اثر تغییرات فشار اعمالی را بر روی مقدار اندازه دانه و فاکتور شکل نمونه‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشخص است، با افزایش فشار از ۱۰۰ به ۱۵۰ MPa میزان اندازه دانه از مقدار $82\ \mu\text{m}$ به $77\ \mu\text{m}$ کاهش و فاکتور شکل از ۶۵٪ به ۷۲٪ افزایش پیدا می‌کند.

شکل ۸ ریزساختار قسمت‌های مختلف نمونه با دمای قطعه 590°C و در دماهای مختلف قالب را نشان می‌دهد. سرعت سرد شدن به‌عنوان یک پارامتر مهم در شکل‌دهی قطعات گرم می‌باشد. افزایش دمای قالب موجب کاهش سرعت

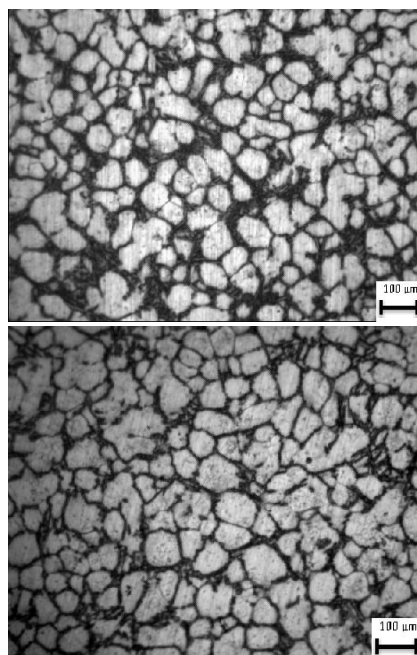


شکل (۸): ریزساختار نواحی مختلف قطعه در دماهای مختلف قالب، دمای قطعه ۵۹۰°C، فشار ۱۰۰ Mpa و سرعت حرکت پرس ۲۰ mm/s.

جدول (۴): اثر فشار اعمالی بر روی اندازه دانه و فاکتور شکل ذرات α اولیه.

فشار اعمالی (Mpa)		پارامترها
۱۵۰	۱۰۰	
$77^{\pm 5}$	$82^{\pm 3}$	میانگین اندازه دانه (میکرومتر)
$0.72^{\pm 0.06}$	$0.65^{\pm 0.05}$	میانگین فاکتور شکل

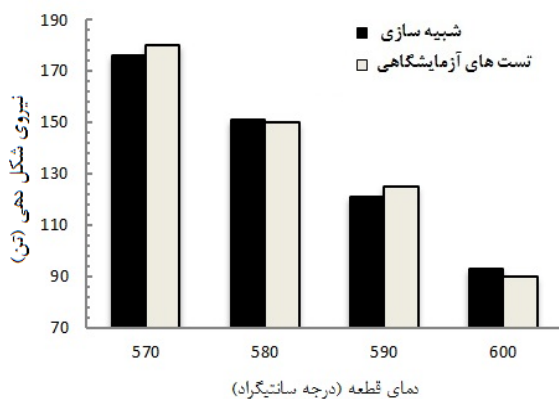
چو و همکار [۲۳] گزارش کرده‌اند که با افزایش فشار، اندازه ریزساختار کاهش می‌یابد که باعث بهبود مشخصات مکانیکی می‌گردد. به هر حال، در این مطالعه، اثر واضحی از تاثیر فشار روی مشخصات مکانیکی دیده نشد، به طوری که با افزایش فشار، بیشترین اختلاف بین دو نمونه در تست فشار حدود ۵ MPa به دست آمد. دلیل این امر را می‌توان به علت افت دمای شمشال در حین تغذیه در قالب بیان نمود. در این تحقیق حدود ۱۰S طول می‌کشید تا قطعه از درون کوره به درون قالب قرار گیرد که این امر باعث کاهش دما و در نتیجه افزایش کسر جامد شمشال می‌شد. به هر حال، انجماد سریع



شکل (۹): ریزساختار ناحیه به قطعه در فشارهای (الف) ۱۵۰ MPa (ب) ۱۰۰ MPa، دمای قطعه ۵۹۰°C، دمای قالب ۲۵°C و سرعت حرکت پرس ۲۰ mm/s.

۲-۲- اثر دمای قطعه و مدت زمان نگهداری

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. در جدول ۵ مقادیر کسر جامد را برحسب دمای آلیاژ که از معادله اسپچیل و با استفاده از دیاگرام تعادلی به دست آمده است نشان می‌دهد. با افزایش دما، از درصد فاز جامد نیز کاسته می‌شود. با کاهش درصد فاز جامد نیروهای شکل‌دهی نیز کاهش می‌یابند. البته بالا بردن درجه حرارت محدودیت‌هایی نیز خواهد داشت. از جمله این محدودیت‌ها، مشکلات جابجایی 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، به‌صورت گسیختگی در مرکز قطعات خام به‌وجود می‌آید. در اثر گرم‌کردن سریع قطعه، عیب دیگری موسوم به ترک حرارتی نیز ممکن است به‌وجود آید. این عیب در اثر انقباض و انبساط و اختلاف دمای مرکز و سطح بیرونی قطعه پیش می‌آید [۲۴-۲۵]. از طرفی کنترل دما جهت دستیابی به دانه‌بندی مناسب بسیار ضروری است. در واقع با افزایش دمای شمشال، درصد جامد کاهش یافته که موجب افزایش عیوب داخلی مانند تخلخل در قطعه نهایی می‌شود و افزایش درصد مایع موجب کاهش ویسکوزیته و اصطکاک ماده حین شکل‌گیری در قالب و در نتیجه سهولت شکل‌دهی می‌گردد. مقدار تغییر در تناژ پرس در شکل ۱۲ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر به‌دست‌آمده در آزمایش تجربی تطابق مناسبی را دارند.

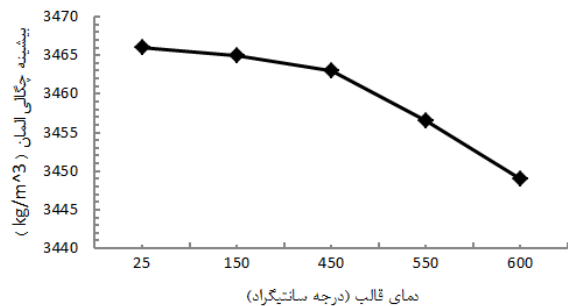


شکل (۱۲): تاثیر دمای قطعه روی نیروی شکل‌دهی، دمای قالب ۴۵۰°C

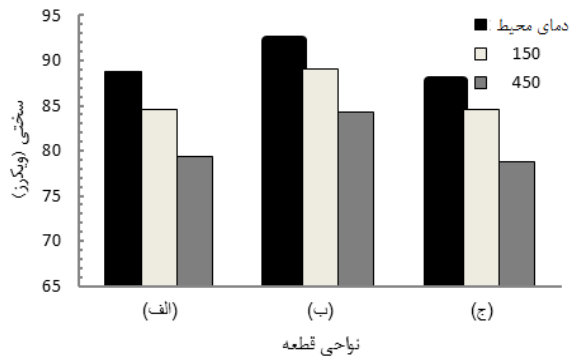
که قبل از اعمال فشار اتفاق می‌افتد تاثیر زیادی روی ریزساختار می‌گذارد.

در تفسیر دیگر می‌توان میزان سختی قطعه تولیدی را برحسب بیشینه چگالی المان در شبیه‌سازی بیان نمود. از آنجایی که با کاهش چگالی المان، فشردگی ذرات نیز کاهش می‌یابد، در نتیجه سختی قطعه تولیدی کاهش خواهد یافت.

شکل ۱۰ رابطه چگالی المان با دمای قالب را برای مرکز قطعه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است میزان چگالی المان‌ها با افزایش دمای قالب کاهش می‌یابد. جهت بررسی سختی در نمونه‌های آزمایش شده از دستگاه سختی‌سنجی avery denison مدل eseway با اعمال کننده نیروی ویکرز استفاده شد. در شکل ۱۱ تاثیر دمای قالب را بر سختی نمونه نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است مرکز نمونه دارای بیشترین مقدار سختی می‌باشد که این امر به دلیل تماس مستقیم با نیروی پرس می‌باشد. همچنین می‌توان گفت که با کاهش دمای قالب، به علت ریزتر شدن دانه‌ها، سختی افزایش می‌یابد (شکل ۸).



شکل (۱۰): اثر تغییرات دمای قالب بر روی بیشینه چگالی المان



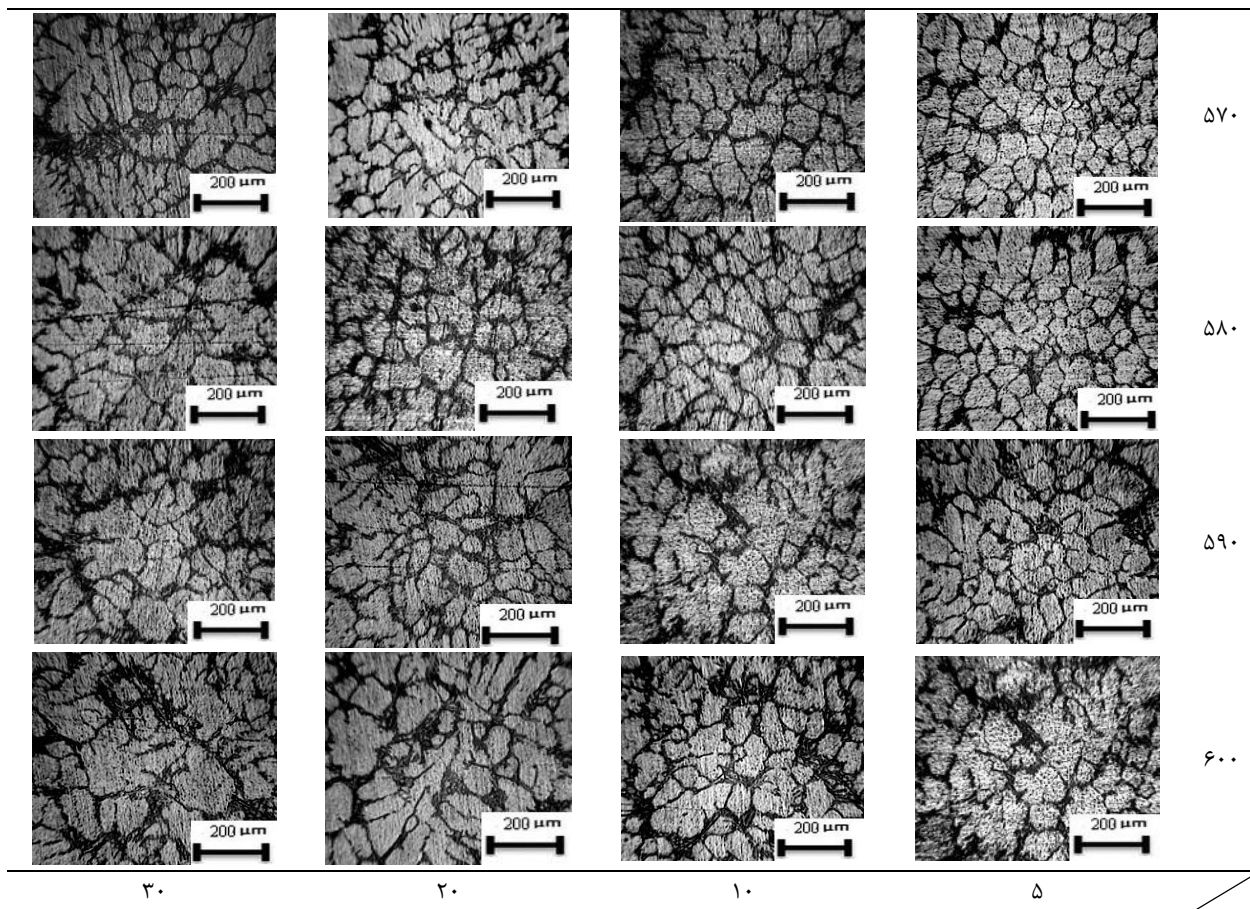
شکل (۱۱): تاثیر دمای قالب روی سختی در نواحی مختلف قطعه نشان داده شده در شکل ۴

جدول (۵): مقادیر کسر جامد نسبت به دما.

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

شرایط یکسان و با مدت زمان‌های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min صورت پذیرفت. در شکل ۱۳ به‌طور واضح مشخص است که با افزایش مدت زمان حرارت‌دهی، دانه‌بندی درشت‌تری حاصل می‌شود. در بررسی اثر مدت زمان حرارت دهی می‌توان گفت که اگر این مدت کوتاه باشد (کمتر از ۳ min)، به دلیل فقدان زمان کافی برای جداسازی فاز جامد از مذاب، ریزساختار کروی حاصل نمی‌شود. در ضمن اگر مدت زمان حرارت‌دهی بیش از اندازه زیاد باشد، ریسک درشت شدن دانه‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث به هم پیوستن نواحی جامد (درشت شدن دانه‌ها) و کاهش در ناحیه مایع می‌گردد. همچنین در شکل ۱۳ می‌توان به این اثر پی برد که در دمای ذوب مجدد جزئی ۵۷۰ °C در ۵ min ابتدایی، ریزساختار از حالت دندردستی به چهارگوش تغییر شکل پیدا کرده و با بالا رفتن مدت زمان نگهداری، ذرات چهارگوش به علت نفوذ مایع، به ذرات جدا از یکدیگر تبدیل شده است. هرچه دما بالاتر باشد، جدا شدن ذرات از یکدیگر در زمان کوتاه‌تری اتفاق می‌افتد و فاز مایع محبوس کمتری قابل مشاهده است.

افزایش دمای شمشال و همچنین مدت زمان نگهداری در آن دما روی توزیع و اندازه دانه ریزساختار تاثیر می‌گذارد که به دنبال آن مشخصات مکانیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در حالتی که کسر جامد کمتر از ۵۰٪ باشد، به دلیل فروپاشی دیواره‌های شمشال بر اثر وزنش، قابلیت جابجایی کمی داشته و در نتیجه به‌طور مناسب در داخل قالب تغذیه نشده و نتایج مناسبی را نشان نمی‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است، با افزایش کسر جامد میزان دقت در کرویت دانه‌ها بهتر شده و مرز دانه‌ها بین نواحی جامد و مایع به‌طور واضح‌تری نشان داده شده است. به هر حال نمونه‌ها در کسر جامد بالاتر دارای ریزساختاری ریزتر خواهند بود. در واقع با افزایش دما، انرژی بین وجهین میان فاز جامد و مایع برای جهت‌های مختلف کریستالی تغییر کرده که با پدیده نفوذ مایع به شکل ذرات شبه کروی در خواهد آمد [۲]. همچنین برای بررسی رابطه بین اندازه دانه و زمان حرارت‌دهی نیز آزمایشاتی در



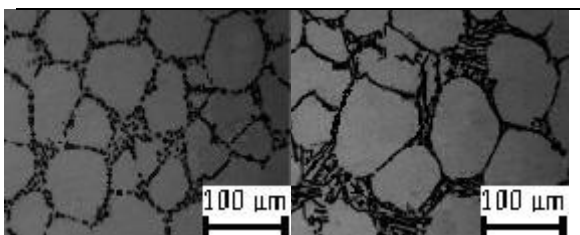
شکل (۱۳): تاثیر دمای قطعه و مدت زمان نگهداری روی ریزساختار قطعه تولیدی.

جهت رفع این عیب (وجود عناصر آلیاژی در مرز دانه‌ها) می‌توان از عملیات حرارتی T6 استفاده نمود که باعث می‌شود تا عناصر آلیاژی به صورت یکنواخت توزیع شده و از صورت متمرکز خارج شوند [۲۹].

با انجام عملیات حرارتی T6، فاز یوتکتیک ترد و شکننده از حالت سوزنی به کروی و صفحه‌ای شکل، تغییر شکل می‌دهد (شکل ۱۵). به طوری که با افزایش زمان پیرسازی، از میزان فاز یوتکتیک کاسته شده و فاز یوتکتیک با کرویت بیشتر حاصل می‌شود. تغییر حالت فاز یوتکتیک ترد و شکننده از سوزنی به کروی و صفحه‌ای شکل، منجر به کاهش تمرکز تنش و بهبود خواص مکانیکی می‌شود [۳۰].

سختی نمونه‌ها قبل از فرآیند تیگزوفورجینگ برابر VHN^{±۲} ۷۸ به دست آمده است. شکل ۱۶ تاثیر افزایش دمای قطعه را روی سختی قبل و بعد از عملیات حرارتی T6 نشان می‌دهد. این عملیات حرارتی شامل قرار دادن نمونه در دمای ۵۰۰ °C درجه به مدت ۸ Hr و خنک‌سازی سریع و بعد از آن نگهداری در دمای ۱۶۰ °C به مدت ۵ Hr بود. سختی برای نمونه‌های تیگزوفورج شده بعد از عملیات حرارتی T6 بهبود پیدا کرده است. دلیل بهبود خواص مکانیکی و سختی سطح را می‌توان به این صورت بیان نمود که انجام عملیات پیرسازی بعد از عملیات محلول‌سازی، منجر به شتاب‌گیری تشکیل هسته و رشد فاز رسوبی سخت کننده Mg₂Si شد [۲۸-۲۹].

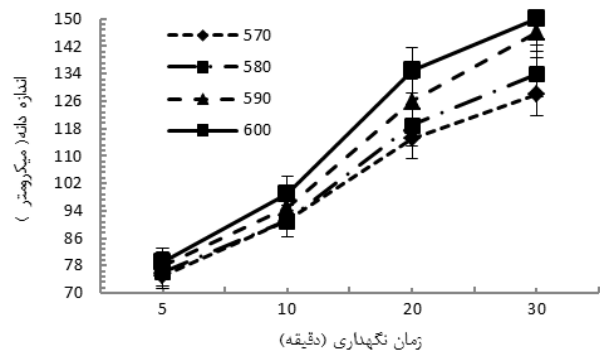
لازم به ذکر است که عملیات کوینچ کردن باید خیلی سریع صورت گیرد تا از شکل‌گیری رسوب‌های نامطلوب جلوگیری شود. همچنین کوینچ سریع منجر به حفظ و بقای جاهای خالی از دمای بالای محلول‌سازی می‌شود که می‌تواند نرخ نفوذ را افزایش دهد [۲۸].



شکل (الف) (ب)

شکل (۱۵): ریزساختار نمونه تحت فشار ۱۰۰ MPa در دمای ۵۷۰ (الف) قبل (ب) بعد از عملیات حرارتی T6.

در شکل ۱۴ تغییرات اندازه دانه نمونه‌ها در فرآیند تیگزوفورجینگ با تغییرات دما و مدت زمان نگهداری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان ریزدانه‌گی و چگونگی توزیع فازها به شدت وابسته به دما و زمان نگهداری است و با افزایش مدت زمان نگهداری، اندازه دانه‌ها در همه دماها افزایش می‌یابد. می‌توان تغییر در اندازه دانه‌ها را با پدیده نفوذ عنصر سیلیسیم به صورت نفوذ در خود و از طریق طی شدن مسیر مرز دانه، به هم پیوستن این ذرات و کاهش انرژی سطحی از طریق به هم پیوستن ذرات سیلیسیم یا کاهش انرژی فصل مشترک بین فازها توجیه نمود [۲۶-۲۷].



شکل (۱۴): تغییرات اندازه دانه با تغییرات دما و زمان نگهداری، دمای قالب ۴۵۰ °C.

همچنین در آلیاژ آلومینیوم A356 عناصر فلزی مانند منیزیم تمایل به توزیع در مرز دانه‌های بیشتری را در دماهای بالا دارند. از آنجا که تبلور مجدد در دمای حدود ۴۹۰ °C تا ۵۰۰ °C در این آلیاژ آغاز می‌شود، می‌توان گفت که میزان منیزیم رسوبی در مرز دانه‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش در دماهای بالاتر مثلاً ۵۸۰ °C به مراتب بیشتر خواهد شد با افزایش زمان نگهداری تجمع ناخالصی‌ها و فازهای یوتکتیکی سیلیسیم در مرزها افزایش پیدا کرده و مانع حرکت مرزها می‌شوند لذا تحرک آن‌ها را تحت تاثیر قرار داده و کاهش می‌دهند [۲۶]. این امر باعث کاهش میزان سختی در نمونه می‌گردد. البته این پدیده در دماهای پایین‌تر بیشتر اتفاق می‌افتد، اما با افزایش زمان، تحرک اتم‌ها و نفوذ آن‌ها و نیز میزان تأثیرشان در تحرک مرز دانه‌ها تغییر می‌کند، لذا تحرک به شدت وابسته به زمان می‌باشد [۲۷]. ضمن این که افزایش اندازه دانه هم در این راستا به کاهش این مقادیر کمک می‌کند [۲۷-۲۸].

ابعادی بهتری صورت گرفت. توزیع و اندازه دانه‌ها در این فرآیند، بر روی خصوصیات مکانیکی قطعه تاثیر ویژه‌ای داشت. در خصوص آلیاژ مورد استفاده، در دماهای مختلف نیمه‌جامد و مدت زمان‌های نگهداری بین ۵ min تا ۳۰ min ریزساختار مورد بررسی قرار گرفت. که مطلوب‌ترین مقدار حاصل برای دمای 580°C و مدت زمان ۱۰ min با توجه به مقادیر حاصل از نیروی لازم برای شکل‌دهی و مقدار سختی نمونه بوجود آمده ارزیابی شد.

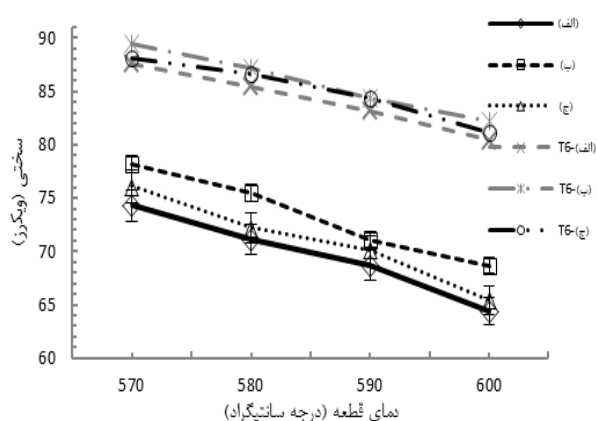
در بررسی سختی قطعات حاصل از فرآیند، مشاهده شد که سختی در مرکز قطعه بیشتر می‌باشد که علت این امر وجود فاز جامد بیشتر در حین شکل‌دهی در این ناحیه می‌باشد. همچنین با کاهش دمای قالب به علت ریزش دانه‌ها و با افزایش نیروی پرس، به علت متراکم شدن دانه‌ها، سختی افزایش یافت. مقدار سختی برای نمونه تیگزوفورج شده به دلیل رشد دانه‌ها بعد از فرآیند کاهش پیدا کرد. این میزان کاهش با افزایش دما شدت بیشتری را دارا بود. برای بهبود سختی نمونه‌ها از عملیات T6 استفاده شد که در این صورت به دلیل شکسته شدن فاز یوتکتیک و تبدیل به ساختار همگن و کروی میزان سختی در حدود ۱۷/۳٪ افزایش یافت.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر بابت حمایت‌های خود تشکر و قدردانی نمایند.

۶- مراجع

1. Chou, H.N., Govender, G., and Ivanchev, L. "Opportunities and Challenges for Use of SSM Forming in the Aerospace Industry", TTP, So. St. Ph., Vol. 116-117, pp. 92-95, 2006.
2. Nourouzi, S., Bakhshi-juybari, M., Kolahdooz, A., and Hosseinipour, S.J., "Effect of Temperature on the Microstructure of Semi-Solid Casting in Cooling Slope Method, Aer. Mech. J., Vol. 9, No. 3., pp. 55-65, 2013. (In Persian).
3. Flemings, M.C. "Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State", Metall. Mater. Trans. A., Vol. 22, pp. 957-81, 1991.
4. Haga, T. and Kapranos, P. "Billetless Simple Thixoforming Process", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 130-131, pp. 581-586, 2002.



شکل (۱۶): تاثیر دمای قطعه و عملیات حرارتی T6 بر روی میزان سختی در نواحی مختلف قطعه نشان داده شده در شکل (۴).

۴- نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق صورت گرفته به صورت زیر قابل ارائه می‌باشد:

در این تحقیق، قطعه درپوش گیربکس حلزونی مدل ۶۲ با استفاده از فرآیند تیگزوفورجینگ تولید شد. در بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که مقدار نیروی مورد نیاز جهت شکل‌دهی وابسته به مقدار دمای قطعه، دمای قالب و مدت زمان نگهداری قطعه در دمای مورد نظر می‌باشد. این پارامترها با استفاده از میزان اندازه دانه و سختی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. دمای قالب تاثیر زیادی بر این فرآیند دارد. دمای قالب پایین موجب افت شدیدتر دمای شمشال و در نتیجه کاهش سیالیت آلیاژ در حین فرآیند شده که افزایش مقدار نیروی لازم برای شکل‌دهی را به همراه دارد. به طوری که با افزایش دما از محیط به 450°C ، مقدار تناژ پرس ۲۰/۶٪ کاهش پیدا می‌کند. همچنین دمای قالب بالاتر باعث بروز ریزساختاری درشت‌تر و ناهمگن در آلیاژ می‌گردد که این امر باعث کاهش تقریبی ۱۲/۵٪ میزان سختی در نمونه‌ها شد.

دمای اولیه شمشال و همچنین مدت زمان نگهداری قطعه در این دما بر روی ریزساختار و مشخصات مکانیکی نمونه تاثیر گذار بود. به طوری که مقدار اندازه دانه‌ها برای مدت زمان نگهداری ۵ min، با افزایش دما از 570°C تا 600°C به میزان ۵/۳٪ و با افزایش زمان نگهداری از ۵ min تا ۳۰ min برای دمای 570°C به میزان ۷۳/۹٪ افزایش یافت. همچنین هنگامی که مقدار اندازه دانه کمتر از ۱۰۰ میکرون بود، دانه‌بندی به صورت یکنواخت‌تر بود و پرس شدن قالب نیز با دقت

- Aluminum (A360) Processed by Thixoforming”, *Int. J. Math. & Com. Simul.*, Vol. 2, pp. 152-157, 2008.
19. Raki, N., and Kolahdooz, A., “An Investigation on the Parameters of the Cooling Slope Method on the Microstructure and the Hardness of Al-A380 Alloy”, *Fou. Res. J.*, In Press, Accepted Manuscript, Available Online from 28 April 2018. DOI: 10.22034/FRJ.2018.106034.1009 (In Persian)
 20. Jung, H.K. and Kang, C.G. “Induction Heating Process of an Al-Si Aluminum Alloy for Semi-Solid Die Casting and its Resulting Microstructure”, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 120, pp. 355-364, 2002.
 21. Martin, C., Kumar, P., and Brown, S.B. “Shear Rate Thickening Flow Behavior of Semi-Solid Slurries”, *Metall. Trans. A.*, Vol. 24, pp. 1107-1116, 1993.
 22. Ilegbusi, O.J. and Brown, S. “Mold Filling of Semisolid Metal Slurries”, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 4, pp. 486-493, 1995.
 23. Cho, W.G. and Kang, C.G. “Mechanical Properties and their Microstructure Evaluation in the Thixoforming Process of Semi-Solid Aluminum Alloys”, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 105, pp. 269-277, 2000.
 24. Kolahdooz, A., Nourouzi, S., Bakhshi-juybari, M., and Hosseinipour, S.J. “Experimental Investigation of the Effect of Temperature in Semisolid Casting using Cooling Slope Method, Proc”, *Int. Mech. Eng.; Part E, J. Proc. Mech. Eng.*, Vol. 230, No. 4, pp. 316-325, 2016.
 25. Nourouzi, S., Bakhshi-juybari, M., Kolahdooz, A., and Hosseinipour, S.J., “Effect of Temperature on the Microstructure of Semi-Solid Casting in Cooling Slope Method, *Aer. Mech. J.*, Vol. 9, No. 3, pp. 55-65, 2013. (In Persian)
 26. Kim, I.J. and Kim, D.H. “Semi-solid State Forming in Hypereutectic Al-Si Alloy”, *J. Korean Foun. Soc.*, Vol. 17, pp. 311-318, 1997.
 27. Kurz, W. and Fisher, D.J. “Fundamentals of Solidification”, *Tran. Tech. Pub.*, Switzerland, pp. 34-43, 1984.
 28. Dewhirst, B.A. “Optimization of the Heat Treatment of Semi-Solid Processed A356 Aluminum Alloy”, *Master’s Thesis*, Worcester Polytechnic Institute, 2005.
 29. Pearce, J.T.H. and Chairuangri, T. “Age Hardening and Precipitation Behavior of an Experimental Cast Al-Mg-Si Alloy Treated by T6 and T6I6 Heat Treatments”, *Chiang Mai J. Sci.*, Vol. 37, pp. 269-281, 2010.
 30. Rosso, M. “Thixocasting and Rheocasting Technologies, Improvements Going on”, *J. Ach. Mat. & Manu. Eng.*, Vol. 54, pp. 110-119, 2012.
 5. Atkinson, H.V. “Modelling the Semisolid Processing of Metallic Alloys”, *Prog. in Mat. Sci.*, Vol. 50, pp. 341-412, 2005.
 6. Kang, C.G., Cho, J.S., and Kim, K.H. “The Effect of Strain Rate on Macroscopic Behavior in the Compression Forming of Semi-Solid Aluminum Alloy”, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 88, pp. 159-168, 1999.
 7. Fan, Z. “Semisolid Metal Processing”, *Int. Mat. Re.*, Vol. 47, pp. 49-85, 2002.
 8. Moschini, R. “Production of Automotive Components by Pressure Die-Casting in the Semi-Liquid State”, *Proc. Int. Conf. Aluminium Alloys: New Process Technologies*, Italy, 1993.
 9. Kenney, M.P., Courtois, J.A., Evans, R.D., Farrior, G.M., Kyonka, C.P., Koch, A.A., and Young, K.P. “Semisolid Metal Casting and Forging”, 9th ed., *ASM Int.*, Metals Park, Ohio, USA, 1988.
 10. Pouyafar, V., Sadough, S.A., Hosseini, F., and Rahmani, M.R. “Design of Experiments for Determination of Influence of Different Parameters on Mechanical Properties of Semi-Solid Extruded Parts”, *T. Nonferr. Metal. Soc.*, Vol. 20, pp. 794-797, 2010.
 11. Fadavi Boostani, A. and Tahamtan, S. “Microstructure and Mechanical Properties of A356 Thixoformed Alloys in Comparison with Gravity Cast ones Using New Criterion”, *T. Nonferr. Metal. Soc.*, Vol. 20, pp. 1608-1614, 2010.
 12. Fadavi Boostani, A. and Tahamtan, S. “Effect of a Novel Thixoforming Process on the Microstructure and Fracture Behavior of A356 Aluminum Alloy”, *Mater. Design*, Vol. 31, pp. 3769-3776, 2010.
 13. Tahamtan, S. and Fadavi Boostani, A. “Microstructural Characteristics of Thixoforged A356 Alloy in Mushy State, *T. Nonferr. Metal. Soc.*, Vol. 20, pp. 781-787, 2010.
 14. Nourouzi, S., Kolahdooz, A., and Botkan, M. “Behavior of A356 Alloy in Semi-Solid State Produced by Mechanical Stirring”, *Ad. Mat. Res.*, Vol. 402, pp. 331-336, 2012.
 15. Kazemi, A., Nourouzi, S., Kolahdooz, A., and Gorji, A. “Experimental Investigation of Thixoforming Process on Microstructure and Mechanical Properties of the Centrifugal Pump Flange”, *J. Mech. Sci. Tech.*, Vol. 29, No. 7, pp. 2957-2965, 2015.
 16. Kolahdooz, A., Nourouzi, S., Bakhshi-juybari, M., and Hosseinipour, S.J. “Experimental Study and FEM Simulation of the Effect of Significant Parameters in the Thixoforming of the Gearbox Cap”, *J. Sol. Mech. Eng.*, Vol. 5, No. 1, pp. 47-56, 2012. (In Persian)
 17. Hasford, W.F. and Caddell, R.M. “Metal Forming (Mechanics and Metallurgy)”, *Sec. Ed.*, Prentice Hall, Cambridge Uni. Press, UK, 1993.
 18. Besharati, M.K., Davami, K., and Shaygan, M. “An Investigation of Eemperature Effect on Microstructure and Mechanical Properties of

