



Experimental and Numerical Investigation of Isothermal Hot Forging of a Complex Industrial Part of AA6061 Aluminum Alloy

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ahmadi M.¹ MSc,
Rezaei Ashtiani H.R.*¹ PhD

How to cite this article

Ahmadi M. Rezaei Ashtiani H.R. Experimental and Numerical Investigation of Isothermal Hot Forging of a Complex Industrial Part of AA6061 Aluminum Alloy. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(9):2343-2354.

ABSTRACT

The isothermal forging process has the ability to produce complex industrial parts from alloys that do not have high formability, such as aluminum alloys. Eliminating the temperature difference between the part and the die in this method eliminates the problem of cooling the part due to heat transfer to the die. In this study, the hot isothermal forging of AA6061 aluminum alloy in different conditions of process including lubricant type, dimensions and size of primary ingot, temperature and rate of deformation, to produce a complex industrial part numerically and experimentally was investigated. Deform 3D software was used to simulate this process. Comparison of experimental and numerical results showed a good agreement of results. The best dimension of the primary ingot for the studied piece is cylindrical with an initial diameter of 35mm and an initial height of 32mm. Increasing the temperature, reducing the deformation rate and using the appropriate lubricant reduced the amount of required forging force. Reducing the deformation rate from 25-2.5mm/s reduced the required forging force to 1.8 times. Increasing the forging temperature from 380 to 530°C reduced the amount of forging force about 3.5 times and reducing the hardness of the part about 20%. The results showed that due to the complexity of the forging part, different areas of the part were affected by different strain values, which changes the percentage of secondary phases such as Mg₂Si phase in these areas.

Keywords Isothermal Forging; AA6061; Forging Force; Microhardness; Microstructure; Mg₂Si Secondary Phase

CITATION LINKS

[1] Material & processes [2] Forming & forging [3] Forging & casting [4] Aluminum forging design manual [5] Cold and hot forging: Fundamentals and applications [6] CAD/CAM of dies [7] Forging design Handbook [8] Analysis and design for aluminum forging process [9] Flow lines control of disk structure with complex shape in isothermal precision forging [10] simulation and manufacturing of a connecting rod from ultra-fine grained material and isothermal forging [11] Effects of surface finish and die temperature on friction and lubrication in forging [12] Microstructure and mechanical properties of a thixoforged (semi solid state forged) Al-Cu-Mg alloy [13] Design and optimization of the dies for the isothermal forging of a cam [14] Multi-scale hot working tool damage (X40crmv5-1) analysis in relation to the forging process [15] Numerical simulation and physical analysis for dynamic behaviors of P/M tial alloy in hot-packed forging process [16] Influence of forging parameters on the mechanical behavior and hot forgeability of Aluminium alloy [17] Hot forging design and microstructure evolution of a high Nb containing tial alloy [18] Design for isothermal forging of Ti-46.5a1-2.5v-L.0cr-0.3ni alloy [19] A process/shape-decomposition modeling method for deformation force estimation in complex forging processes [20] Effect of cooling rate and Vanadium content on the microstructure and hardness of medium Carbon forging steel [21] Design and optimization of Al2024 siemens generator fan blade forging process [22] Super plasticity behavior of mdfed Sn-1Bi alloy determined by shear punch test [23] Prevention of lap formation in near net shape isothermal forging technology of part of irregular shape made of AL alloy A92618 [24] Materials modeling and simulation of isothermal forging of rolled AZ31B magnesium alloy anisotropy of flow [25] The flow behavior and constitutive equations in isothermal compression of 7050 Aluminum alloy [26] Effects of hot ring forging on microstructure texture and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy

¹Solid Mechanics Department, Mechanical Engineering Faculty, Arak University of Technology, Arak, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Arak University of Technology, Arak, Iran. Postal Code: 3818141167
Phone: +98 (86) 33400671
Fax: +98 (86) 33670021
hr_rezaei@arakut.ac.ir

Article History

Received: May 30, 2020
Accepted: July 19, 2020
ePublished: September 20, 2020

بررسی تجربی و عددی آهنگری گرم همدمای قطعه پیچیده صنعتی از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

مهدی احمدی MSc

گروه جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

حمیدرضا رضایی آشتیانی* PhD

گروه جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

چکیده

فرآیند آهنگری همدمای قابلیت تولید قطعات پیچیده صنعتی از آلیاژهایی که دارای قابلیت شکل‌پذیری بالایی نیستند مانند آلیاژهای آلومینیوم را دارا است. حذف اختلاف دمایی بین قطعه و قالب در این روش، باعث از بین بردن مشکل سرد شدن قطعه در اثر انتقال حرارت به قالب‌ها می‌شود. در این پژوهش آهنگری همدمای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در شرایط مختلف فرآیندی شامل نوع روانکار، ابعاد و اندازه شمش اولیه، دما و سرعت تغییر شکل، برای تولید یک قطعه صنعتی پیچیده به صورت عددی و تجربی بررسی شد. برای انجام شبیه‌سازی این فرآیند از نرم‌افزار المان محدود Deform 3D استفاده شد. مقایسه نتایج تجربی و عددی آهنگری همدمای تطابق خوب نتایج را نشان داد. بهترین ابعاد شمش اولیه برای قطعه مورد مطالعه، استوانه‌ای با قطر اولیه ۳۵ و ارتفاع اولیه ۳۲ میلی‌متر است. افزایش دما، کاهش سرعت تغییر شکل و استفاده از روانکار مناسب مقدار نیروی لازم برای آهنگری را کاهش داد. کاهش سرعت تغییر شکل از ۲۵ به ۲/۵ میلی‌متر بر ثانیه، نیروی لازم جهت آهنگری را تا ۱/۸ برابر کاهش داد. افزایش دمای آهنگری از ۳۸۰ به ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد مقدار نیروی آهنگری را تا حدود ۳/۵ برابر و سختی قطعه را تا حدود ۲۰٪ کاهش داد. نتایج نشان داد به دلیل پیچیدگی قطعه آهنگری‌شده، نواحی مختلف قطعه تحت تاثیر مقادیر کرنش مختلف قرار می‌گیرد که این امر موجب تغییر درصد فازهای ثانویه همچون فاز Mg₂Si در این نواحی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: آهنگری همدمای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، نیروی آهنگری، میکروسختی، میکروساختار، فاز ثانویه Mg₂Si

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۹

*نویسنده مسئول: hr_rezaei@arakut.ac.ir

مقدمه

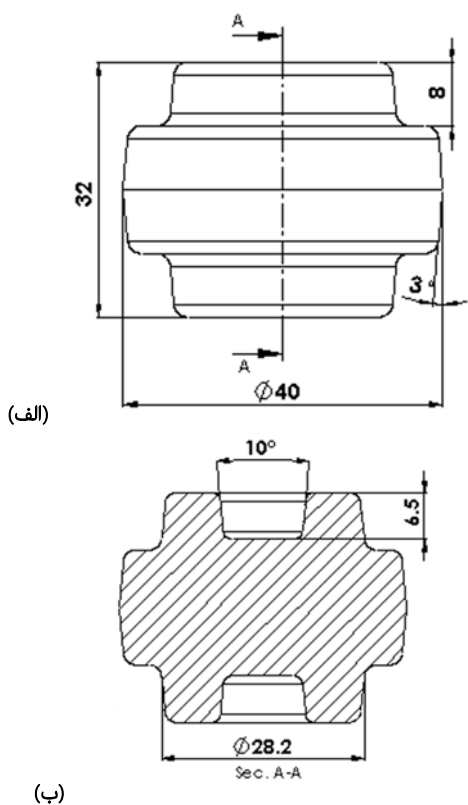
آلومینیوم بعد از فولاد پرکاربردترین فلز در صنعت بوده و حجم تولید آن بیشتر از حجم تولید کلبه فلزات غیرآهنی دیگر است. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل دارا بودن وزن کم و نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت خوردگی مناسب، نقش مهمی را در ساخت قطعات در صنایع هوافضا، خودروسازی، غذایی و غیره دارا است. تنوع آلیاژهای آلومینیوم و خواص مکانیکی و میکروساختاری آن زیاد و در نتیجه کاربردهای آن در صنعت قابل ملاحظه و متنوع است. آلیاژهای آلومینیوم معمولاً ۹۰ تا ۹۶٪ آلومینیوم و دارای یک یا چند عنصر اصلی دیگر به منظور بهبود خواص هستند. یکی از مهم‌ترین گروه آلیاژهای آلومینیوم سری ۶۰۰۰ است که ضمن عملیات حرارت‌پذیری، دارای کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوافضا و نظامی است. آلیاژ ۶۰۶۱ که منیزیم و سیلیسیم عناصر اصلی تشکیل‌دهنده آن در کنار آلومینیوم است، یکی از آلیاژهای پرکاربرد این گروه بوده و دارای قابلیت مناسب جوش‌کاری و اکستروژن

است. آهنگری آلیاژ ۶۰۶۱ به دلیل چگالی پایین و نسبت استحکام به وزن بسیار خوب برای ساخت قطعات آهنگری که قبلاً با روش ریخته‌گری تولید می‌شدند کاربرد وسیعی پیدا کرده است [1-3].

آهنگری فرآیند شکل‌دهی حجمی از فلز، تحت فشار یا ضربه به منظور تولید قطعه با شکل هندسی و خواص مطلوب است. در فرآیند آهنگری کاهش دورریز مواد و کاهش زمان تولید از اهداف اصلی است. در شرایط آهنگری همدمای قالب و شمش در دمای یکسان قرار دارند. آهنگری همدمای در ساخت قطعات صنایع خودرو و هوافضا، از آلیاژهای تیتانیوم و آلومینیوم کاربرد وسیعی دارد. به دلیل حذف سردشوندگی ناشی از قالب در روش آهنگری همدمای ساخت قطعات با رواداری بسته‌تر نسبت به سایر روش‌های آهنگری معمول فراهم شده که در نتیجه آن هزینه ماشین‌کاری و ضایعات مواد کاهش چشمگیری خواهد داشت. حذف مرحله پیش‌شکل‌دهی و امکان کاهش سرعت تغییر شکل نیز موجب کاهش تنش سیلان ماده در آهنگری می‌شود [4-8].

پژوهش‌های مختلفی در زمینه آهنگری همدمای انجام شده است. ژانگ و همکاران [9] بررسی کنترل خطوط سیلان آهنگری دیسک با هندسه پیچیده آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به روش آهنگری همدمای پرداختند. نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که خطوط سیلان آهنگری بستگی به خطوط سیلان آهنگری شمش اولیه دارد، خطوط جریان شعاعی نسبت به خطوط جریان محوری در امتداد قطعه آهنگری به راحتی جریان یافته و توزیع می‌شوند. شکست لایه‌ها و خطوط به علت جریان بسیار سریع مواد در امتداد شعاعی در مرحله نهایی شکل‌دهی، ایجاد می‌شود. فورتنس و همکاران [10] طراحی، شبیه‌سازی و ساخت قالب آهنگری همدمای شاتون با دو نوع شمش ریخته‌گری و شمش با میکروساختار فوق‌العاده ریز را مقایسه کردند. نتایج حاکی از آن است که سختی نهایی قطعه با شمش ریز دانه به میزان ۲۰٪ نسبت به قطعه با شمش ریخته‌گری‌شده افزایش داشته و ریزدانه‌گی به علت تبلور مجدد مشاهده شده است. کیم و آلتان [11] به بررسی اثر کیفیت سطح و دما بر اصطکاک و روانکاری در آهنگری پرداختند. آنها جهت تعیین اصطکاک از مدل اصطکاک متغیر، وابسته به فشار که در حین شکل‌دهی بر اساس جابه‌جایی و تغییرات سطح تماس قالب و قطعه است، استفاده کردند. در نتیجه مقدار دقیق‌تری از اصطکاک جهت انجام شبیه‌سازی به دست آمد. پرابهو [12] به بررسی آهنگری نیمه‌جامد آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیوم پرداخت که نتایج این بررسی نشان داد تبلور مجدد و لغزش مرزانه‌ای موجب شده میکروساختار آلیاژ نیمه‌جامد ریزدانه‌تر شده و همچنین استحکام و سختی در آهنگری نیمه‌جامد از آهنگری جامد بالاتر رفته است. سالدو و همکاران [13] طراحی و بهینه‌سازی قالب آهنگری گرم همدمای میل بادامک پرداختند که شامل تعیین نیروی مورد نیاز برای آهنگری و پرشدن صحیح قالب بود. الیمی و همکاران [14] آسیب‌های قالب در آهنگری گرم را بررسی کردند. نتایج نشان داد که اکسیداسیون سطحی قالب، خستگی حرارتی و مکانیکی موجب

اندازه طول مش تجاوز نماید [17]. علاوه بر بررسی پرشدن کامل حفره قالب و شکل‌گیری صحیح قطعه، بررسی عدم تشکیل عیوب در قطعه آهنگری نیز یکی از نتایج مهم شبیه‌سازی فرآیند آهنگری است. پس از تایید مراحل طراحی باید نیروی لازم جهت آهنگری تعیین و در نهایت پرس با ظرفیت مناسب انتخاب شود. با توجه به استفاده از پرس هیدرولیک ۳ تن جهت آزمون تجربی اندازه‌گیری نیروی آهنگری با استفاده از سنسور وزن مناسب انجام می‌شود. به دلیل محدودیت‌های دستگاه پرس هیدرولیک از ۸۰٪ ظرفیت اسمی پرس به منظور تعیین حداکثر نیروی آهنگری استفاده می‌شود. در نتیجه ماکزیمم تناژ لازم برای آهنگری نباید بیش از ۵۰ تن باشد. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است روند طراحی قالب و تحلیل فرآیند آهنگری قطعه به منظور ساخت قالب نهایی مناسب از نتایج شبیه‌سازی دقیق فرآیند و تحلیل نتایج آن حاصل می‌شود. پس از انجام شبیه‌سازی‌های مختلف در شرایط کاری مختلف، شبیه‌سازی فرآیند آهنگری در دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت حرکت قالب ۸ میلی‌متر بر ثانیه و ضریب اصطکاک ۰/۳ انجام شد. بررسی نتایج شبیه‌سازی در این شرایط کاری نشان می‌دهد، پرشدن قالب به طور کامل و صحیح انجام شده و حجم پلیسه مناسب است یعنی ضمن اینکه قالب به طور کامل توسط آلومینیوم پر می‌شود کمتر از ۳٪ از آلومینیوم نیز به عنوان پلیسه از داخل قالب خارج می‌شود که نشان‌دهنده اطمینان از پرشدن قالب و تولید قطعه فاقد هر گونه عیب تورفتگی یا کماتش است [18, 19].



شکل ۱) ابعاد و اندازه قطعه‌کار مورد آهنگری آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱: (الف) طرح کلی، (ب) نمای برش‌خورده مقطع AA

شکست قالب شده و ترک‌های سطحی به دلیل تنش‌های الاستو-پلاستیک در اثر بارهای مکانیکی ایجاد می‌شوند. ژانگ و همکاران [15] در مورد رفتار دینامیکی آهنگری پودر آلیاژ TiAl در فضای پوسته پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که آلیاژ زیر دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد تغییر شکل نمی‌دهد. آحیت بابو و همکاران [16] تاثیر پارامترهای آهنگری و شکل‌پذیری گرم آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ را بررسی کردند و دریافتند که بهترین شرایط آهنگری در وضعیتی است که نرخ کرنش ۲/۳ مقدار کاهش سطح مقطع باشد. در تحقیقات انجام‌شده، پارامترهای آهنگری همدمای آلیاژ آلومینیوم و اثر آن بر میکروساختار و سختی نهایی قطعه کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است.

پژوهش حاضر به بررسی و تحلیل عددی و تجربی اثر پارامترهای مختلف از جمله دما، سرعت تغییر شکل، ابعاد شمش، روانکار مصرفی در آهنگری داغ همدمای قطعه پیچیده صنعتی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با نسبت استحکام به وزن بسیار خوب، پرداخته است. تحلیل عددی و شبیه‌سازی فرآیند آهنگری همدمای با استفاده از نرم‌افزار Deform 3D به منظور اطمینان از پرشدن صحیح قالب و صحت طراحی قالب انجام شده است. در نهایت آزمایشات تجربی با ساخت قالب و انجام آهنگری همدمای به کمک پرس هیدرولیکی و ارزیابی اثر دما، سرعت تغییر شکل و بررسی میکروساختار در شرایط مختلف آهنگری بررسی و مقایسه شد.

شبیه‌سازی فرآیند آهنگری

ابعاد و اندازه‌های قطعه‌ای که قرار است آهنگری همدمای شده و پارامترهای فرآیندی بر آن بررسی شود، در شکل ۱ ارایه شده است. ابتدا جهت اطمینان از مراحل طراحی قالب، شبیه‌سازی آهنگری در نرم‌افزار Deform 3D انجام شد. در شبیه‌سازی با فرض عدم تغییر شکل قالب، قالب‌ها به صورت صلب در نظر گرفته شدند. جهت مش‌بندی شمش با در نظر گرفتن انواع مش در نرم‌افزار Deform از نوع مش مطلق استفاده شد که در این نوع مش، ابتدا اندازه حداقل مش تعیین و سپس نرم‌افزار با توجه به تغییر شکل و پیچیدگی شکل قطعه در حین تغییر شکل، تعداد مش‌های بهینه را جهت تحلیل درست مساله تنظیم می‌کند. در مش مطلق با افزایش میزان تغییر شکل و تغییر در هندسه قطعه، به منظور جلوگیری از به وجود آمدن خطا تعداد المان‌ها مورد نیاز افزایش می‌یابد. در این تحلیل اندازه مش حداقل برابر با نصف کوچک‌ترین اندازه در قالب آهنگری تعیین می‌شود. تعداد کل مش انتخاب‌شده اولیه برای نمونه قطعه آهنگری ۶۸۷۴ عدد در نظر گرفته می‌شود. نحوه مش‌بندی شمش در شکل ۲ نشان داده شده است. برای رفتار مکانیکی ماده در دمای بالا از اطلاعات موجود در خود نرم‌افزار مربوط به رفتار مکانیکی در دمای بالای آلیاژ آلومینیومی ۶۰۶۱ استفاده شده است. جدول ۱ شرایط آهنگری را برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار Deform 3D ارایه می‌کند. تعداد گام لازم جهت شبیه‌سازی با توجه به جابه‌جایی قالب و اندازه مش تعیین می‌شود. در هر مرحله تغییر مکان مش‌ها نباید از ۱/۳

آزمون تجربی فرآیند آهنگری

شمش‌های مورد نیاز جهت آزمون تجربی از میلگرد اکستروژده آلایژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تهیه شد. در جدول ۲ درصد عناصر آلایژی آلایژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نشان داده شده است. قالب آهنگری با توجه به نتایج اولیه شبیه‌سازی و بررسی نحوه سیلان ماده همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، از فولاد گرم کار H13 با سختی ۴۵~۴۸ راکول سی جهت آهنگری داغ شمش‌های آلومینیومی ساخته شد. چرخه عملیات حرارتی جهت سخت‌کاری شامل نگهداری قالب در کوره گازی در دمای ۱۰۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۵ دقیقه جهت آستنیت‌کردن کامل، سپس آبدهی در هوا و در نهایت عملیات بازپخت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد جهت رسیدن به سختی مورد نیاز انجام شد [18].

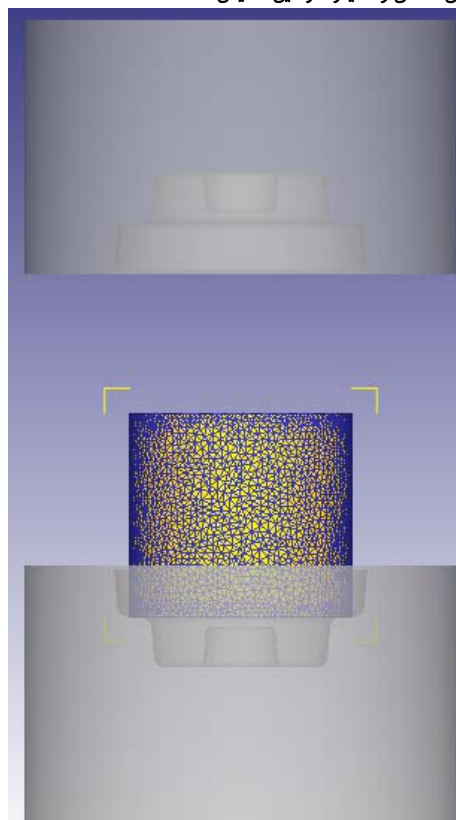
جدول ۲) ترکیب شیمیایی آلایژ آلومینیوم ۶۰۶۱ (اعداد برحسب درصد هستند)

عناصر	مقدار
Al	۹۷/۶
Si	۰/۵۷
Fe	۰/۵۴
Mg	۰/۹۵
Cu	۰/۱۹
Zn	۰/۰۳
Mn	۰/۰۵



شکل ۴) نیمه بالا و نیمه پایین قالب آهنگری ساخته شده

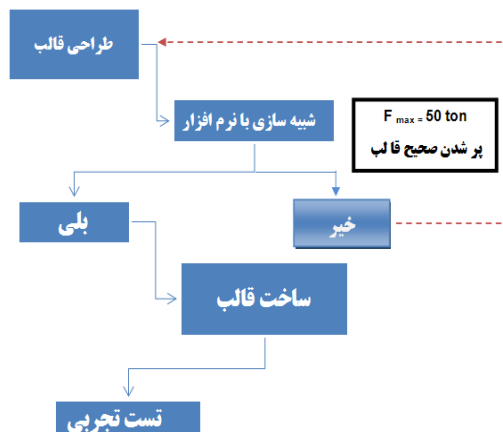
از سنسور وزن ۷۵ تن شرکت Interface با دقت مناسب و خطای کمتر از ۰/۰۵٪ جهت اندازه‌گیری نیروی آهنگری در حین تغییر شکل و استخراج نمودار نیرو- جابه‌جایی استفاده شد. موقعیت نصب قالب و سنسور وزن را روی میز پرس هیدرولیک در شکل ۵ نشان داده شده است. جهت گرم‌کردن قالب‌ها از المنت‌های میله‌ای با پوشش فولاد ضدزنگ به قطر ۶/۵ میلی‌متر و توان ۱۰۰۰ وات استفاده شد. کنترل دمای المنت‌ها با استفاده از ترموستات با دقت ۱± درجه سانتی‌گراد نصب شده در بدنه قالب انجام می‌گیرد [19-22]. همزمان با گرم‌شدن قالب‌ها، شمش در قالب و شمش، این مجموعه به مدت ۲۰ تا ۲۵ دقیقه در این دما نگه داشته می‌شود. علاوه بر استفاده از ترموستات مناسب جهت حفظ شرایط هم‌دمایی و ثابت نگه‌داشتن دما از ترمومتر لیزری نیز



شکل ۲) مش‌بندی شمش و موقعیت قرارگیری آن در قالب آهنگری شبیه‌سازی

جدول ۱) پارامترهای شبیه‌سازی آهنگری برای دو نوع شمش در نرم‌افزار DEFORM 3D

پارامتر	ابعاد شمش	
	۲۸×۵۲/۵	۳۵×۳۲
دمای آهنگری (°C)	۴۸۰	۴۸۰
ضریب اصطکاک	۰/۳	۰/۳
سرعت قالب (mm/s)	۸	۸
جابه‌جایی قالب (mm)	۳۳	۱۶
سایز مش (mm)	۰/۴	۰/۴
تعداد گام حل مساله	۱۸۰	۸۵



شکل ۳) تحلیل شبیه‌سازی فرآیند آهنگری قطعه جهت ساخت قالب مناسب

انتخاب ابعاد شمش اولیه دارای اهمیت به‌سزایی است. برای این منظور در این بررسی از دو شمش با ابعاد قطری و ارتفاعی مختلف استفاده شده است. ابعاد مورد نیاز جهت تهیه شمش از میلگرد بریده‌شده، سپس با تراشکاری نمونه‌ها با دقت ابعادی ± 0.05 میلی‌متر در قطر و طول مد نظر همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، از دو شمش با ابعاد 32×35 و 28×52 میلی‌متر استفاده شد.

پس از آهنگری نمونه‌ها در شرایط مختلف کاری و ثبت داده‌های مربوط به هر یک، بررسی میکروساختار و سختی‌سنجی نیز بر قطعات آهنگری‌شده انجام گرفت. به‌کمک دستگاه برش آزمایشگاهی نمونه‌ها از وسط بریده و به دقت پولیش‌کاری شده، سپس اچ کردن نمونه با استفاده از محلول هیدروفلوئوریک اسید به مدت ۲ دقیقه انجام شد. اندازه‌گیری میکروسختی در نمونه‌های آهنگری برحسب HV0.3 و مطابق استاندارد ISO 6507 انجام گرفت. طبق استاندارد مدت‌زمان اعمال نیرو ۱۰ و زمان نگه‌داری ۴ ثانیه جهت اندازه‌گیری سختی مورد نیاز است [16, 24]. از میکروسکوپ نوری مدل Nikon- E200 جهت بررسی میکروساختار در نواحی مورد نظر استفاده شد.

بحث و نتایج

با توجه به نتایج که نشان‌دهنده پرشدن کامل قالب توسط ماده آلیاژ آلومینیوم است، مشخص می‌شود که طراحی قالب به‌طور مناسب انجام گرفته است و جهت ادامه بررسی‌ها قابل قبول است. اندازه‌گیری نیروی آهنگری در حین شبیه‌سازی نشان می‌دهد برای دو شمش با قطرهای ۳۵ و ۲۸ میلی‌متر نیروی آهنگری به‌ترتیب $43/2$ و $45/8$ تن خواهد بود. مراحل مختلف تغییر شکل شمش ۳۵ میلی‌متری در نرم‌افزار Deform 3D در شکل ۷ نشان داده است.

جهت تعیین تغییرات کرنش موثر در نواحی مختلف قطعه آهنگری‌شده مطابق شکل ۸ چهار ناحیه دارای اهمیت از لحاظ توزیع کرنش در قطعه آهنگری انتخاب و مشخص شدند. تغییرات کرنش موثر پلاستیک در نواحی مختلف تعیین‌شده در قطعه آهنگری با توجه به تقارن هندسی قطعه با استفاده از شبیه‌سازی مشخص شد. توزیع مقادیر کرنش موثر پلاستیک در قطعه آهنگری‌شده با قطر شمش اولیه ۳۵ میلی‌متر در دمای آهنگری 380°C درجه سانتی‌گراد، در شکل ۹ نشان داده شده است.

تغییرات کرنش موثر در آهنگری شمش ۳۵ میلی‌متر با شرایط دمایی 380°C درجه سانتی‌گراد، سرعت ۸ میلی‌متر بر ثانیه و ضریب اصطکاک 0.3 ، در نمودار ۱ نشان داده شده است. بررسی نمودار نشان می‌دهد که بیشترین مقدار کرنش در ناحیه ۳ به مقدار $1/72$ و کمترین مقدار کرنش در ناحیه یک به مقدار 0.02 است. در ناحیه ۲ نزدیک به سوراخ نیز مقدار حداکثر کرنش موثر پلاستیک به مقدار 0.82 خواهد رسید. مقایسه نتایج حاصل از آزمون تجربی فرآیند با نتایج حاصل از انجام شبیه‌سازی حاکی از مدل‌سازی

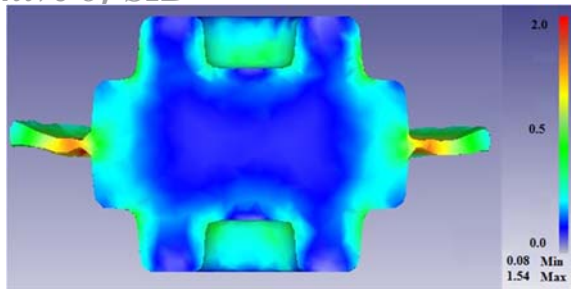
جهت کنترل دمای شمش استفاده می‌شود. در ابتدا انجام آزمایشات تجربی، ارزیابی اثر روانکار بر آهنگری همدمای شمش انجام گرفت در حالی که تغییر شکل در حالت خشک و بدون استفاده از روانکار با حالت استفاده از روانکار مقایسه شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که گرافیت پایه روغن می‌تواند به‌عنوان یک روانکار مناسب در آهنگری داغ آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به‌کار گرفته شود [23].



شکل ۵) دستگاه پرس هیدرولیک ۶۳ تن مورد استفاده جهت آهنگری و موقیعت سنسور وزن، قالب و تجهیزات گرمایشی مورد استفاده بر میز دستگاه

بررسی اثر دما و سرعت تغییر شکل آهنگری هم‌دما، در شرایط دمایی مختلف با دمای کاری 380°C ، 430°C ، 480°C و 530°C درجه سانتی‌گراد و سرعت‌های تغییر شکل ۲، $1/5$ و ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه انجام شد. اثر ابعاد شمش نیز در آهنگری آلیاژ آلومینیوم نیز با دو نوع شمش مختلف از لحاظ قطر و طول انجام شد. ارزیابی انتخاب شمش مناسب جهت آهنگری با توجه به مقدار دورریز مواد و همچنین احتمال ایجاد عیوب آهنگری است. با توجه به هندسه قطعه نهایی آهنگری‌شده جهت پرشدن مناسب و یکنواخت قالب

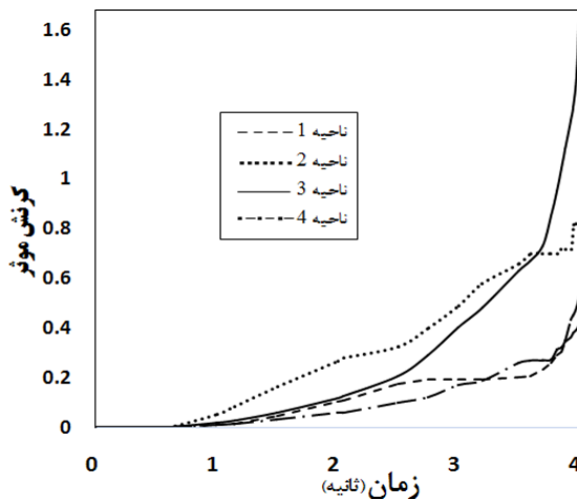
مناسب فرآیند آهنگری داغ همدمای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از نرم افزار Deform دارد. به طوری که مدل توسعه داده شده می تواند به درستی رفتار ماده را در حین شکل دهی پیش بینی کند.



شکل ۹) توزیع کرنش شبیه سازی در قطعه آهنگری شده با قطر شمش ۳۵ میلی متر در ضریب اصطکاک ۰/۳ و دمای ۳۸۰ درجه سانتی گراد



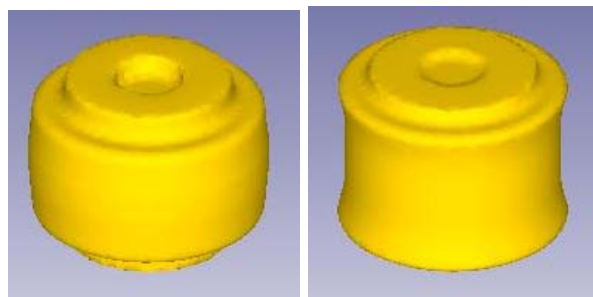
شکل ۶) آماده سازی شمش های اولیه با قطرهای ۳۵ و ۲۸ میلی متر جهت انجام آهنگری همدمای



نمودار ۱) نتایج شبیه سازی تغییرات کرنش موثر در نواحی مختلف قطعه در حین انجام آهنگری شمش در دمای ۳۸۰ درجه با سرعت حرکت قالب ۸ میلی متر بر ثانیه و ضریب اصطکاک ۰/۳

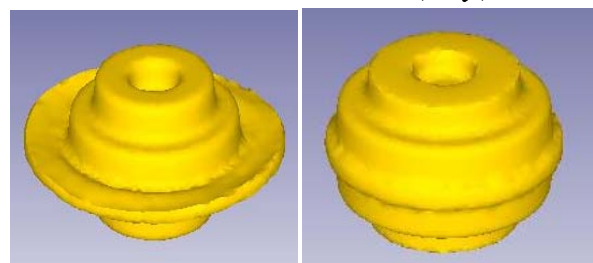
نحوه جریان حجمی مواد و شکل گیری قطعه نهایی و پلیسه در دو حالت تجربی و شبیه سازی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است تطابق ظاهری خوبی بین نتایج سیلان ماده در نمونه آهنگری به صورت تجربی و شبیه سازی آن از نظر شکل گیری قطعه نهایی و پلیسه وجود دارد. همچنین بررسی نتایج شبیه سازی و تجربی نیروی آهنگری نشان می دهند که منحنی نیروی آهنگری تجربی با منحنی نیروی شبیه سازی تطابق خوبی با هم دارند و دو منحنی تقریباً بر روی هم منطبق هستند. برای نمونه مقایسه نمودار نیرو- جابه جایی قالب، برای شبیه سازی و آزمون تجربی آهنگری داغ همدمای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در شرایط دمایی ۴۸۰ درجه سانتی گراد، سرعت حرکت قالب ۸ میلی متر بر ثانیه و شمش اولیه با ابعاد ۳۲×۳۵ میلی متر در نمودار ۲ نشان داده شده است. همان طور که از نتایج این نمودار مشخص است، ماکزیمم نیروی آهنگری در شبیه سازی ۲۵/۸۳ تن است در حالی که این نیرو به وسیله سنسور وزن در روش تجربی ۲۸/۷۲ تن اندازه گیری شده است.

یکی از مزایای مهم فرآیندهای شکل دهی در دمای بالا کنترل سیلان مواد در حین شکل دهی جهت دستیابی به خواص میکروساختاری و مکانیکی بهینه و حذف اثرات میکروساختاری



(مرحله ۲)

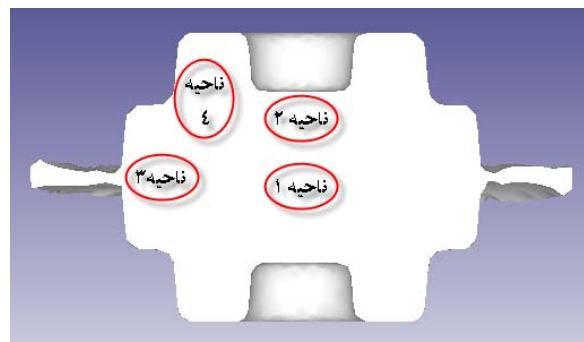
(مرحله ۱)



(مرحله ۴)

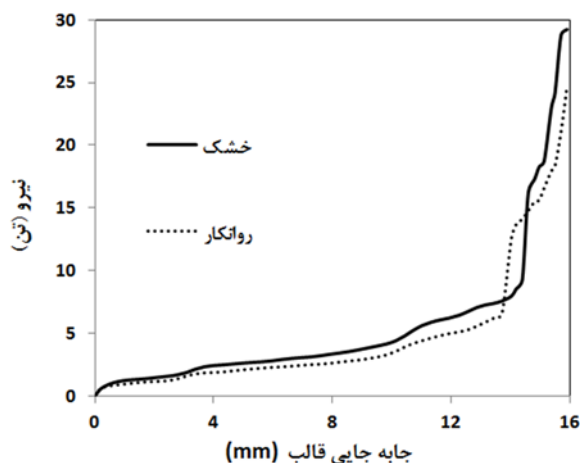
(مرحله ۳)

شکل ۷) مراحل مختلف تغییر شکل شمش با قطر ۳۵ میلی متر در دمای ۳۸۰ درجه سانتی گراد با سرعت حرکت قالب ۸ میلی متر بر ثانیه و ضریب اصطکاک ۰/۳ با حرکت قالب



شکل ۸) نمایش موقعیت نواحی مختلف در نمونه آهنگری جهت بررسی تغییرات کرنش موثر در نرم افزار Deform- 3D

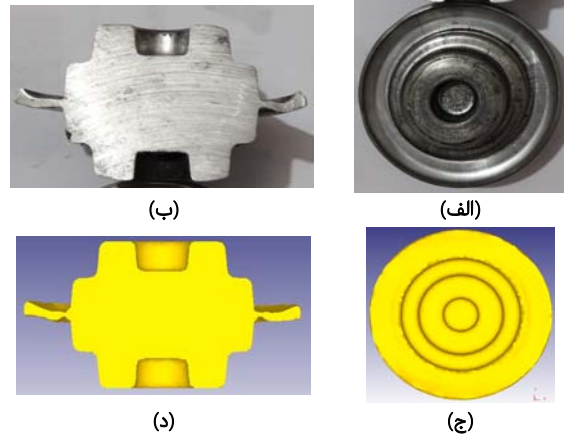
به منظور بررسی اثر روانکار در آهنگری همدمای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ آزمون تجربی آهنگری شمش با قطر اولیه ۳۵ میلی‌متر، در دمای ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت پرس ۸ میلی‌متر انجام شد که نتایج نیروی مورد نیاز آهنگری آن در دو حالت آهنگری با روانکار و بدون روانکار در نمودار ۳ ارایه شده است. همان طور که از این نمودار مشخص است، مقدار نیروی آهنگری بدون روانکار حدود ۳۰٪ تا اندازه‌گیری شده است در حالی که در صورت استفاده از روانکار مناسب مقدار این نیرو با مقدار قابل توجه حدود ۲۴٪ کاهش بسیار محسوس در مقدار نیروی آهنگری، نقش بسیار مهمی در جلوگیری از چسبندگی قطعه آهنگری شده به خصوص در مورد قطعات با شکل پیچیده به محفظه داخل قالب آهنگری دارد که در نتیجه استفاده از روانکار خروج قطعه آهنگری شده از قالب را تسهیل می‌کند. بررسی نتایج تجربی نشان داد که در روش آهنگری بدون استفاده از روانکار مناسب قطعات آهنگری شده به راحتی از داخل محفظه قالب خارج نمی‌شوند و باعث صدمه زدن به قالب آهنگری می‌شود. بررسی‌های تجربی انجام شده نشان داد ترکیب مناسب گرافیت (۸۰٪) با روغن K68 (۲۰٪) می‌تواند بهترین عملکرد را در روانکاری آهنگری داغ آلومینیوم مورد بررسی داشته باشد. بررسی‌های دیگر محققان نیز استفاده از روانکار گرافیتی پایه روغن در آهنگری آلیاژهای آلومینیوم مورد تایید قرار داده‌اند [25]. بنابراین استفاده از روانکار مناسب به منظور کاهش نیرو آهنگری و سیلان بهتر مواد به داخل قالب و شکل‌گیری نهایی قطعه آهنگری شده و همچنین تسهیل در خارج کردن قطعه آهنگری شده از قالب ضروری است.



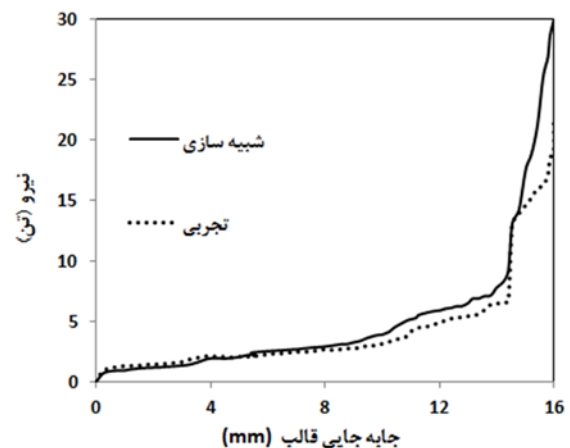
نمودار ۳) تاثیر روانکار بر نیروی آهنگری در دمای ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت تغییر شکل ۸ میلی‌متر بر ثانیه

همان طور که اشاره شد انتخاب بهینه شکل و ابعاد شمش اولیه نقش تاثیرگذاری بر خواص و کیفیت قطعه نهایی آهنگری شده خواهد داشت. با توجه به هندسه قطعه آهنگری شمش‌ها با ابعاد ۳۵×۳۲ و ۲۸×۵۲/۵ میلی‌متر آماده و آهنگری همدمای

نامطلوب است. شکل ۱۱ نحوه سیلان آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در آهنگری داغ همدمای در شرایط دمایی ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد که پس از آماده‌سازی نمونه ماکروچاش شده را نشان می‌دهد که تاییدکننده سیلان بهینه مواد و طراحی مناسب قالب و پارامترهای فرآیندی آهنگری داغ است.



شکل ۱۰) مقایسه نحوه جریان حجمی مواد و شکل‌گیری قطعه نهایی و پلیسه در دو حالت تجربی؛ (الف) نمای بالا، (ب) نمای برش‌خورده قطعه آهنگری شده و شبیه‌سازی، (ج) نمای بالا، (د) نمای برش‌خورده شمش ۳۵×۳۲ آهنگری شده در دمای ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد

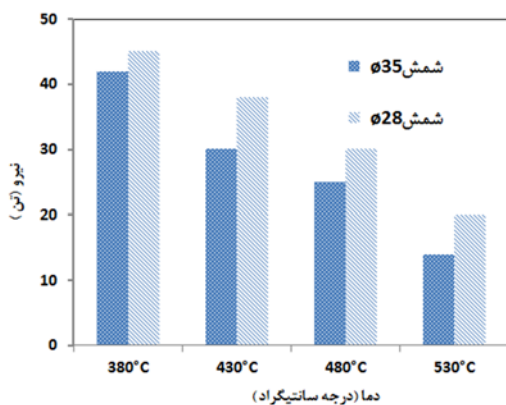


نمودار ۲) منحنی مقایسه نیروی آهنگری در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی برای شمش ۳۵×۳۲ میلی‌متری در دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت تغییر شکل ۸ میلی‌متر بر ثانیه

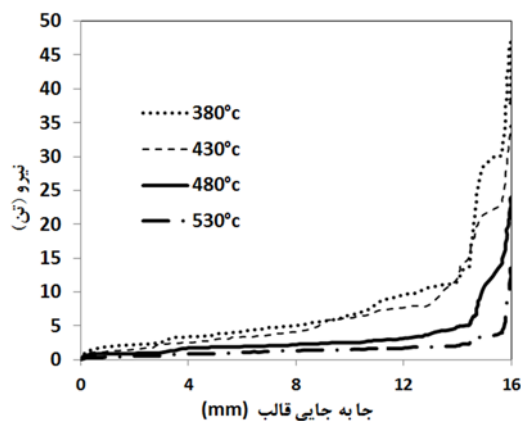


شکل ۱۱) نمایش نحوه سیلان مواد در آهنگری داغ همدمای آلومینیوم ۶۰۶۱

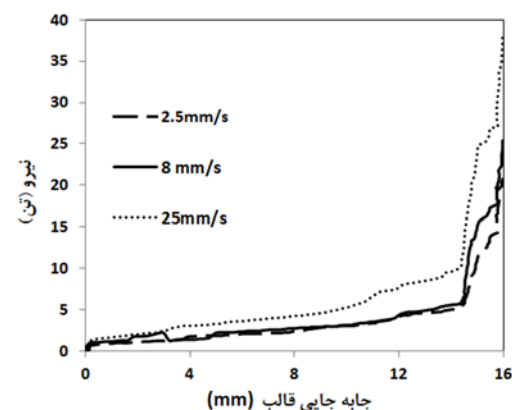
افزایش می‌دهد. افزایش سرعت تغییر شکل موجب افزایش دمای قطعه آهنگری شده و این افزایش دما در دماهای تغییرشکل بالا موجب ذوب موضعی در قطعه شده و عیوب آهنگری را افزایش می‌دهد. آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نیز به تغییرات دمایی در اثر تغییر شکل گرم حساس است، بنابراین کنترل سرعت تغییر شکل در آهنگری هم‌دما در دماهای بالا بسیار اهمیت دارد. در نتیجه در روش آهنگری هم‌دما استفاده از پرس‌های هیدرولیک برای آهنگری کاربرد وسیعی دارد.



نمودار ۴) تأثیر ابعاد شمش ۳۵×۳۲ و ۲۸×۲۷/۵ بر نیروی آهنگری در دماهای مختلف و سرعت تغییر شکل ۸ میلی‌متر بر ثانیه



نمودار ۵) تغییرات نیروی آهنگری با تغییر دما آهنگری هم‌دما در سرعت تغییر شکل ۸ میلی‌متر بر ثانیه



نمودار ۶) تغییرات نیروی آهنگری با تغییر سرعت تغییر شکل در دما آهنگری هم‌دما ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد

۳۸۰، ۴۳۰، ۴۸۰ و ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت پرس ۸ میلی‌متر بر ثانیه با استفاده از روانکار انجام شد. منحنی نیروی آهنگری برای هر دو نوع شمش با ابعاد مورد اشاره در نمودار ۴ نشان داده شده است. بررسی نمودار نشان می‌دهد، مقدار نیروی آهنگری لازم برای شمش با قطر اولیه ۳۵ میلی‌متری در دماهای مختلف نسبت به شمش ۲۸ میلی‌متری به مراتب کمتر است. افزایش نیرو در آهنگری شمش ۲۸ میلی‌متری به دلیل حجم سیلان بیشتر مواد نسبت به شمش ۳۵ میلی‌متری جهت پرسیدن کامل محفظه قالب است. همچنین اضافه حجم بیشتر مواد، موجب افزایش نیروی آهنگری در انتهای جابه‌جایی قالب می‌شود. استفاده از شمش ۲۸ میلی‌متری با ارتفاع بیشتر موجب افزایش دورریز مواد می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهند که احتمال افزایش عیوب در قطعه آهنگری شده که در آن شمش اولیه دارای ارتفاع بیشتری است زیادتر خواهد بود و احتمال عیب تاخوردگی افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج حاصل از تاثیر نوع روانکار و ابعاد شمش اولیه در آزمون تجربی، جهت ارزیابی اثرات دما و سرعت تغییر شکل در آهنگری هم‌دما در ادامه بررسی‌ها از روانکار گرافیت-روغنی و با در نظر گرفتن شمش اولیه با قطر ۳۵ میلی‌متر جهت آزمون آهنگری داغ استفاده می‌شود.

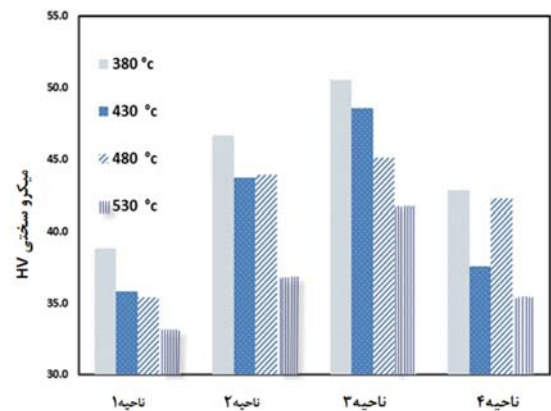
اثر دما بر آهنگری هم‌دما شمش ۳۵ میلی‌متری در شرایط دمایی ۳۸۰ تا ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت تغییر شکل ۸ میلی‌متر بر ثانیه، در نمودار ۵ نشان داده شده است. طبق نمودار افزایش دمای شکل‌دهی موجب کاهش نیروی آهنگری می‌شود. نیروی آهنگری در دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً ۷۴ تن و در دمای ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد نیروی آهنگری تقریباً ۴۷ تن اندازه‌گیری شد. افزایش دما از ۳۸۰ به ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد، یعنی با افزایش دمایی در حدود ۴۰٪، مقدار نیروی آهنگری تقریباً ۳/۵ برابر کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده تاثیر بسیار زیاد دما در نیروی شکل‌دهی مورد نیاز است. تحقیقات نشان می‌دهد که افزایش دما موجب بهبود سیلان مواد به داخل محفظه قالب و کاهش نیروی آهنگری می‌شود که در نتیجه آن آهنگری قطعات با هندسه پیچیده و نزدیک به شکل نهایی امکان‌پذیر می‌شود. همچنین در آهنگری هم‌دما به علت حفظ دمای شمش اولیه، شکل‌دهی با سرعت تغییر شکل‌های کم، احتمال افزایش حرارت ناشی از تغییر شکل که عاملی برای ایجاد ترک در قطعه است را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. از طرف دیگر استفاده از دمای بالا در آهنگری هم‌دما امکان استفاده از پرس‌های سبک‌تر را برای تولید قطعات فراهم کرده که کاهش هزینه‌های تولید را به همراه دارد.

اثر سرعت تغییر شکل برای آهنگری هم‌دما شمش ۳۵ میلی‌متری در دمای ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت پرس ۲/۵ تا ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه، در نمودار ۶ نشان داده شده است. نتایج حاصل از نمودار نشان می‌دهد که افزایش سرعت پرس موجب افزایش نیروی آهنگری می‌شود به‌طوری که افزایش سرعت تغییر شکل از ۲/۵ به ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه، نیروی آهنگری را تا ۱/۸ برابر

دمای ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت پرس ۸ میلی‌متر بر ثانیه در شکل ۱۳ آورده شده است. مقدار درصد فاز Mg_2Si در نواحی یک، ۲ و ۳ به ترتیب ۵/۶۳، ۱۰/۳۵ و ۱۳/۰۸٪ است. ناحیه ۳ بالاترین درصد فاز ثانویه را دارد، مقدار میکروسختی متوسط این ناحیه نیز ۴۱/۸ ویکرز است و ناحیه یک با کمترین میزان درصد فاز ثانویه دارای مقدار سختی متوسط ۳۶/۵ ویکرز است [2, 26].

درصدهای مختلف فازهای ثانویه در نواحی مختلف قطعه آهنگری‌شده برای آهنگری نمونه در شرایط دمایی ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت پرس ۸ میلی‌متر بر ثانیه، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از میکروساختاری نواحی مختلف قطعه آهنگری‌شده مشخص است مقدار درصد فاز ثانویه Mg_2Si در نواحی مختلف یک، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب عبارتند از ۱۱/۷، ۱۱/۰۴، ۲۴/۲ و ۱۱/۲۴٪ است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بالاترین درصد فاز ثانویه در این شرایط نیز در ناحیه ۳ با میانگین سختی ۵۰/۳ ویکرز وجود دارد. بررسی میکروساختار و سختی‌سنجی از نمونه‌ها نشان می‌دهد که فاز ثانویه Mg_2Si در فاز زمینه α مانع از حرکت ناب‌جایی‌ها شده و در نتیجه باعث افزایش استحکام و سختی قطعه می‌شود. می‌توان گفت استحکام و سختی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تا حدود زیادی به مقدار و اندازه فاز ثانویه Mg_2Si وابسته است، به‌طوری که افزایش درصد این فاز موجب افزایش سختی و استحکام در آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ می‌شود.

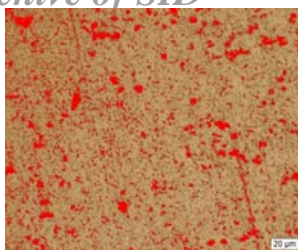
همان‌طور که نتایج میکروساختاری نشان می‌دهند با افزایش میزان کرنش موثر در هر ناحیه از قطعه آهنگری‌شده میزان کار انجام‌شده و در نتیجه چگالی ناب‌جایی افزایش می‌یابد. همچنین درصد تشکیل فازهای ثانویه نیز تا حدودی زیادی در این نواحی با کرنش بالا افزایش پیدا می‌کند. از طرف دیگر حضور فازهای ثانویه نیز در هر ناحیه باعث کاهش چم‌شگیری تحرک ناب‌جایی و افزایش استحکام و سختی آن ناحیه می‌شود. مجموعه این عوامل یعنی افزایش چگالی ناب‌جایی و افزایش درصد فازهای ثانویه (هر دو عامل کاهش تحرک ناب‌جایی را به همراه دارد) که در اثر افزایش تغییر شکل پلاستیک یا کرنش موثر در نواحی مختلف به‌وجود می‌آید موجب افزایش استحکام و سختی آن ناحیه می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای آهنگری درصد فازهای ثانویه تشکیل‌شده در نواحی مختلف قطعه تغییر شکل‌داده‌شده به سرعت کاهش می‌یابد که این مطلب نشان‌دهنده انحلال و جلوگیری از تشکیل حجم زیاد فاز ثانویه‌ای است که می‌توانست در دمای پایین آهنگری در قطعه شکل‌داده‌شده به‌وجود آید. برای مثال چنان‌چه دمای آهنگری داغ همدمای قطعه از ۳۸۰ به ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد، میزان درصد فاز ثانویه در ناحیه ۳ قطعه تغییر شکل‌داده‌شده که بیشترین میزان کرنش را تحمل می‌کند از ۲۴/۲ به ۱۳/۰۸٪ تقلیل پیدا می‌کند و در نتیجه میزان میکروسختی این ناحیه نیز از حدود ۵۱ به حدود ۴۲ ویکرز کاهش پیدا می‌کند.



نمودار ۱۴ تغییرات میانگین میکروسختی در نواحی مختلف قطعه آهنگری همدماشده در دماهای مختلف آهنگری و سرعت تغییر شکل ۸ میلی‌متر بر ثانیه

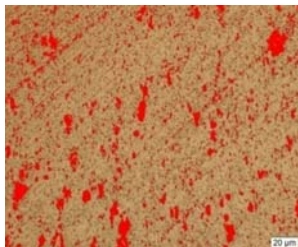
میکروسختی نمونه‌های آهنگری با توجه به نتایج حاصل از بررسی تغییرات کرنش موثر در چهار ناحیه نشان‌داده‌شده بر قطعه آهنگری‌شده در شکل ۶ انجام شد. جهت کاهش خطای اندازه‌گیری سختی‌سنجی در هر ناحیه از قطعه آهنگری‌شده سه بار در بخش‌های مختلف هر ناحیه انجام گرفته و میانگین آن به‌عنوان سختی آن ناحیه در نظر گرفته شده است. نتایج میانگین سختی در نمودار ۱۵ نشان داده شده است. نمودار، مربوط به آهنگری شمش با قطر اولیه ۳۵ میلی‌متری در شرایط آهنگری با سرعت ۸ میلی‌متر بر ثانیه و نرخ دمایی ۳۸۰ تا ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد است. بررسی نمودار نشان می‌دهد که بیشترین مقدار سختی در شرایط مختلف فرآیندی مربوط به ناحیه ۳ است. بررسی‌های نتایج عددی و شبیه‌سازی نیز نشان داد که ناحیه ۳ بیشترین مقدار کرنش موثر را از بین دیگر نواحی قطعه آهنگری‌شده تجربه می‌کند. بنابراین با توجه به نتایج حاصل از بررسی کرنش موثر و سختی می‌توان نتیجه‌گیری کرد در نواحی با بیشترین مقدار کرنش موثر، مقدار سختی نمونه نیز بیشتر است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که کمترین مقدار سختی در نمونه‌ها مربوط به ناحیه یک در مرکز قطعه است که مقدار کرنش موثر در آن کمترین مقدار را دارا است. بررسی انجام‌شده بر تاثیر دمای آهنگری همدمای بر سختی نواحی مختلف قطعه آهنگری‌شده نشان می‌دهد که بیشترین مقدار سختی در نواحی مختلف قطعه آهنگری‌شده در آهنگری با دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد در نمونه به‌وجود می‌آید. به‌طوری که با افزایش دمای آهنگری سختی در نواحی مختلف قطعه آهنگری‌شده نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

میکروساختار قطعه آهنگری‌شده در دمای ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت پرس ۸ میلی‌متر بر ثانیه، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ذرات درشت دایره‌ای شکل، فاز ثانویه منیزیم سیلیسید (Mg_2Si) است که در کل زمینه ساختار پراکنده شده است. بررسی میکروساختار نشان می‌دهد بیشترین تجمع فاز Mg_2Si در ناحیه ۳ است. جهت اندازه‌گیری درصد فازهای ثانویه نمایش دقیق میکروساختاری برای هر ناحیه برای همان شرایط آهنگری در

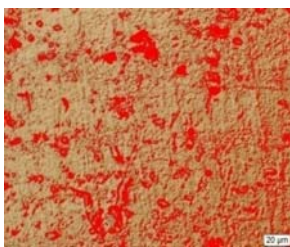


(ب)

(الف)

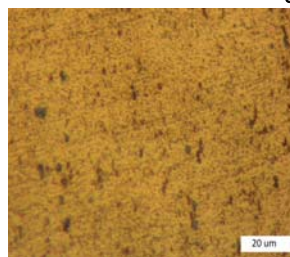


(د)

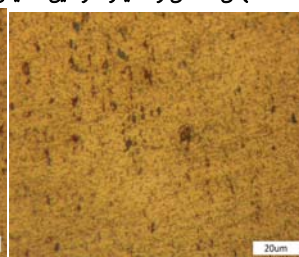


(ج)

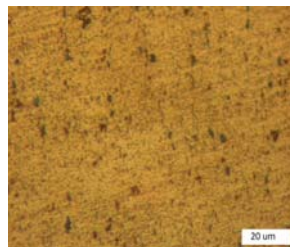
شکل ۱۴ نمایش فازهای ثانویه در میکروساختار قطعه آهنگری شده در دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت تغییر شکل ۸ میلی‌متر بر ثانیه در ناحیه؛ الف) یک، ب) ۲، ج) ۳، د) ۴ قطعه



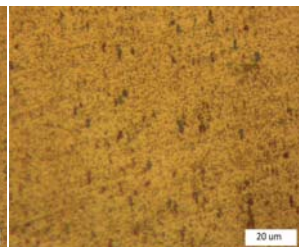
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۲ میکروساختار نواحی مختلف، الف) یک، ب) ۲، ج) ۳، د) ۴ قطعه آهنگری شده در دمای ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت تغییر شکل ۸ میلی‌متر بر ثانیه

نتیجه‌گیری

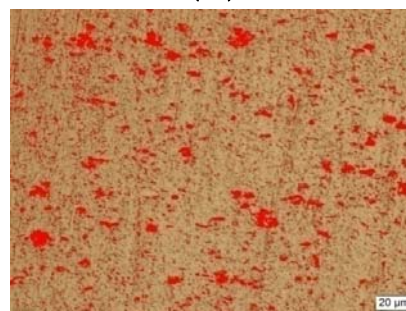
به بررسی عددی و تجربی فرآیند آهنگری هم‌دمای قطعه‌ای صنعتی از آلیاژ آلومینیوم عملیات حرارتی پذیر ۶۰۶۱ پرداخته شده که در آن اثر پارامترهای مختلف این فرآیند مانند نوع روانکار، ابعاد شمش اولیه، دما و سرعت تغییر شکل بر نحوه پرشدن قالب، توزیع کرنش و نیروی آهنگری در حین فرآیند و میکروساختار و سختی قطعه آهنگری شده پرداخته شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی و آزمون‌های تجربی آهنگری هم‌دما در زیر آورده شده است:

۱- استفاده از روانکار در فرآیند آهنگری هم‌دما از اهمیت بالایی برخوردار است به طوری که انتخاب مناسب روانکار ضمن اینکه موجب کنترل مناسب جریان مواد و بهبود سیلان آن به داخل محفظه قالب و کمک به پرشدن درست قالب می‌شود، کاهش اصطکاک و در نتیجه کاهش نیروی آهنگری مورد نیاز را در حین آهنگری به همراه داشته و جداسازی راحت‌تر قطعه آهنگری شده از قالب و افزایش عمر قالب را در پی دارد. نتایج نشان داد بهترین روانکار برای این منظور برای ماده و شرایط آهنگری مورد اشاره گرافیت-روغن است.

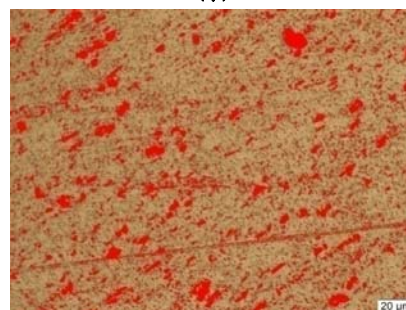
۲- انتخاب ابعاد و هندسه مناسب شمش اولیه آهنگری به جهت اثرات مستقیم آن بر نحوه سیلان مواد به داخل محفظه قالب و کمک به پرشدن درست قالب، احتمال ایجاد و افزایش عیوب آهنگری و همچنین نیروی لازم جهت آهنگری دارای اهمیت بسیار تأثیرگذاری است. گرچه در نظر گرفتن حجم بیشتر مواد جهت اطمینان از پرشدن قالب مفید به نظر می‌رسد اما افزایش بیش از حد مجاز مواد موجب افزایش دورریز مواد، افزایش غیرضروری نیروی آهنگری و کاهش عمر قالب می‌شود که بررسی متعدد عددی و تجربی بهترین ابعاد شمش اولیه را برای قطعه مورد



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۳ فازهای ثانویه در میکروساختار قطعه آهنگری شده در دمای ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت تغییر شکل ۸ میلی‌متر بر ثانیه در ناحیه؛ الف) یک، ب) ۲، ج) ۳ قطعه

منابع

- 1- Yang James F. Material & processes. Cleveland: ASM; 1998.
- 2- Davis Joseph R. Forming & forging. Cleveland: ASM; 1998.
- 3- Lyman T. Forging & casting. Cleveland: ASM; 1970.
- 4- Anderson K. Aluminum forging design manual. Arlington County: Aluminum Association; 1967.
- 5- Altan T, Ngaile G, Shen G. Cold and hot forging: Fundamentals and applications. Cleveland: ASM International; 2005.
- 6- Gunasekera JS. CAD/CAM of dies. International Journal of Production Research. 1990;28(1):218-219.
- 7- Sheridan SA. Forging design Handbook. Cleveland: American Society for Metals; 1972.
- 8- Hüseydn O. Analysis and design for aluminum forging process. Ankara: Middle East Technical University; 2008.
- 9- Zhang Y, Shan D, Xu F. Flow lines control of disk structure with complex shape in isothermal precision forging. Journal of Materials Processing Technology. 2008;209(2):745-753.
- 10- Fuertes JP, Luis CJ, Luri R, Salcedo D, Leon J, Puertas I. Design, simulation and manufacturing of a connecting rod from ultra-fine grained material and isothermal forging. Journal of Manufacturing Processes. 2015;21:56-68.
- 11- Kim H, Altan T. Effects of surface finish and die temperature on friction and lubrication in forging. Procedia Engineering. 2014;81:1848-1853.
- 12- Prabhu TR. Microstructure and mechanical properties of a thixoforged (semi solid state forged) Al-Cu-Mg alloy. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2016;16(3):335-343.
- 13- Salcedoa D, Luisa CJ, Luri R, Leon J, Puertas I, Fuertes JP. Design and optimization of the dies for the isothermal forging of a cam. Procedia Engineering. 2015;132:1069-1076.
- 14- Alimi A, Fajoui J, Kchaou M, Branchu S, Elleuch R, Jacquemin F. Multi-scale hot working tool damage (X40crmov5-1) analysis in relation to the forging process. Engineering Failure Analysis. 2015;62:142-155.
- 15- Zhang W, Liu Y, Wang L, Liu B. Numerical simulation and physical analysis for dynamic behaviors of P/M tial alloy in hot-packed forging process. Transactions of Nonferrous Metals Society Of China. 2012;22(4):901-906.
- 16- Ajeet Babua PK, Saraf MR, Vora KC, Chaurasiya SM, Kuppan P. Influence of forging parameters on the mechanical behavior and hot forgeability of Aluminium alloy. Materials Today Proceedings. 2015;2(4-5):3238-3244.
- 17- Tang B, Cheng L, Kou H, Li J. Hot forging design and microstructure evolution of a high Nb containing tial alloy. Intermetallics. 2014;58:7-14.
- 18- Si JY, Han PB, Zhang J. Design for isothermal forging of Ti-46.5a1-2.5v-L.0cr-0.3ni alloy. Journal of Iron and Steel Research International. 2010;17:67-73.
- 19- Lu XJ, Zou W, Huang MH, Deng K. A process/shape-decomposition modeling method for deformation force estimation in complex forging processes. International Journal of Mechanical Sciences. 2015;90:190-199.
- 20- Hui W, Zhang Y, Shao C, Chen S, Zhao X, Dong H. Effect of cooling rate and Vanadium content on the

مطالعه استوانه‌ای با قطر ۳۵ و ارتفاع ۳۲ میلی‌متر (۳۵×۳۲) به‌دست آورد.

۳- افزایش سرعت تغییر شکل موجب افزایش نیروی آهنگری می‌شود به‌طوری که افزایش ۱۰ برابر سرعت پرس از ۲/۵ به ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه موجب افزایش حدود ۱/۸ برابر نیروی آهنگری می‌شود. آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به تغییرات دمایی در اثر تغییر شکل گرم حساس است، به‌دلیل هم‌دمای بودن این فرآیند آهنگری، انتخاب سرعت مناسب تغییر شکل در آهنگری جهت جلوگیری از افزایش بیش از حد دما مهم است. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های آهنگری هم‌دمای استفاده از پرس‌های هیدرولیک به‌دلیل کنترل دقیق سرعت تغییر شکل در مراحل مختلف شکل‌دهی قطعه پیچیده است.

۴- افزایش دمای آهنگری موجب افزایش قابلیت سیلان ماده، کاهش تنش سیلان و نیروی آهنگری می‌شود. افزایش دما به‌دلیل افزایش قابلیت شکل‌پذیری، امکان تولید قطعات با هندسه پیچیده و نزدیک به شکل نهایی را در آهنگری هم‌دمای فراهم می‌کند. ضمن اینکه تاثیرات عمده‌ای بر خواص میکروساختاری و مکانیکی قطعه آهنگری‌شده خواهد داشت. نتایج نشان داد افزایش دمای آهنگری از ۳۸۰ به ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد نیروی آهنگری از حدود ۴۷ به حدود ۴۱٪ کاهش می‌یابد، یعنی افزایش ۴۰٪ دمای آهنگری، باعث کاهش ۳/۵ برابر نیروی آهنگری می‌شود. ضمن اینکه افزایش دمای آهنگری موجب کاهش درصد فازهای ثانویه تشکیل‌شده در نواحی مختلف قطعه آهنگری‌شده می‌شود.

۵- نتایج نشان داد به‌دلیل پیچیدگی قطعه آهنگری‌شده، نواحی مختلف قطعه تحت تاثیر مقادیر کرنش مختلف قرار می‌گیرد که این امر موجب تغییر درصد فازهای ثانویه همچون فاز Mg_2Si در این نواحی مختلف می‌شود. بررسی میکروساختار نشان داد به‌دلیل تجمع فاز ثانویه فاز Mg_2Si سختی این نواحی افزایش پیدا می‌کند. نتایج شبیه‌سازی، میکروساختاری و میکروسختی نشان داد در نواحی با مقدار کرنش موثر بیشتر، درصد فازهای ثانویه و مقدار سختی بیشتر است و ناحیه ۳ که در گوشه قطعه و نزدیک به محل محفظه پلیسه است، دارای بیشترین میزان کرنش، فاز ثانویه و سختی است و ناحیه ۳ در مرکز قطعه آهنگری‌شده دارای کمترین مقادیر کرنش، درصد فاز ثانویه و در نتیجه سختی است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

تأییدیه اخلاقی: تا پایان بررسی و حصول نتیجه قطعی در این مجله، برای هیچ مجله دیگری ارسال نخواهد شد و نویسندگان در صورت پذیرش نهایی برای انتشار، موظف به همکاری با ویراستاران تا مرحله صفحه‌بندی و انتشار مقاله هستند.

تعارض منافع: تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: مهدی احمدی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ حمیدرضا رضایی آشتیانی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪).

A92618. Journal of Materials Processing Technology. 2006;177(1-3):218-223.

24- Rao KP, Prasad YVRK, Suresh K. Materials modeling and simulation of isothermal forging of rolled AZ31B magnesium alloy anisotropy of flow. Material and Design. 2011;32(5):2545-2553.

25- Wu B, Li MQ, Ma DW. The flow behavior and constitutive equations in isothermal compression of 7050 Aluminum alloy. Materials Science and Engineering: A. 2012;542:79-87.

26- Zhang J, Huang H, Yang C. Effects of hot ring forging on microstructure texture and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy. Materials Science and Engineering: A. 2017;679:20-27.

microstructure and hardness of medium Carbon forging steel. Journal of Material Science & Technology. 2016;32(6):545-551.

21- Saeedi R, Sadeghi MH, Rezaee A. Design and optimization of Al2024 siemens generator fan blade forging process. Modares Mechanical Engineering. 2013;13(8):108-122. [Persian]

22- Akbaripناه F, Moradi Y. Super plasticity behavior of mdfed Sn-1Bi alloy determined by shear punch test. Malayer Mechanical Engineering. 2016;46(4):27-32. [Persian]

23- Petrov P, Perfilov V, Stebunov S. Prevention of lap formation in near net shape isothermal forging technology of part of irregular shape made of AL alloy