ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2023;23(02):67-79

Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Preform on Hot Forging of Bimetallic Components from Aluminum and Brass

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Mirnia M.J.[1*]
Fallah A.[1],
Elyasi M.[1]

How to cite this article
Mirnia M.J, Fallah A, Elyasi M. Experimental and numerical investigation of the effect of preform on hot forging of bimetallic components from aluminum and brass. Modares Mechanical Engineering. 2023;23(02):67-79.

ABSTRACT

In forging of bimetallic components, products with a high strength to weight ratio can be obtained. The purpose of this research is to forge a bimetallic component made from aluminum and brass alloys as the inner and outer parts, respectively. The forging temperature for the brass and aluminum alloys is considered in the hot work range as 700 °C and 450 °C, respectively. First, the forging of a single component is investigated numerically and experimentally. After validating the finite element model, bimetallic components are forged in single stage. The effect of brass ring thickness and height difference between aluminum core and brass ring is studied on the success of the single-stage hot forging process. The results show that the thickness and height of the brass ring do not have a significant effect on the success of the process in terms of complete covering of the core by the ring. In the following, to solve this problem, non-simple geometries are designed for the core and ring as a preform, then forging of the second stage are numerically investigated. The results show that in order to produce a bimetallic component with a complete covering of the aluminum core by a brass ring, a two-stage forging is needed using a suitable non-simple preform. Finally, the preform approved by the FEM is experimentally produced and hot forging is performed on it. The experimental results confirm the numerical results. SEM images show that an appropriate metallurgical bonding is created at the interface of two metals.

Keywords Hot forging, Bimetal, FEM, SEM

[1] Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology

Correspondence
Address: Mechanical Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
mirnia@nit.ac.ir

Article History
Received: September 13, 2022
Accepted: November 17, 2022
ePublished: February 19, 2023

CITATION LINKS

1- An investigation into the forging of Bi-metal gears. 2- Investigation on metal flow and forming load of bi-metal gear hot forging process. 3- Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process. 4- Optimization of process parameters on engine exhaust valves using Taguchi method in friction welding process. 5- Metallic forging using electrical flow as an alternative to warm/hot working. 6- Constitutive modeling of hot deformation behavior of H62 brass. 7- Effect of chemical composition and processing variables on the hot flow behavior of leaded brass alloys. 8- Characterization of hot deformation behavior of AA2014 forging aluminum alloy using processing map. 9- Upsetting of bi-metallic ring billets. 10- Process chain for the production of a bimetal component from Mg with a complete Al cladding. 11- ASM Handbook, Vol. 14A, Metalworking: Bulk Forming. 12- Investigation into constitutive equation and hot compression deformation behavior of 6061 al alloy. 13- Cross-wedge rolling of a 4Cr9Si2 hollow valve: explorative experiment and finite element simulation. 14- Extrusion of 7075 aluminum alloy through double-pocket dies to manufacture a complex profile. 15- High temperature wear and frictional properties of duplex-treated tool steel sliding against a two phase brass.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مطالعه تجربی و عددی تاثیر پیش‌فرم بر آهنگری داغ قطعات دوفلزی از جنس آلومینیوم و برنج

محمدجواد میرنیا[1]*، آتنا فلاح[1]، مجید الیاسی[1]
[1] گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیرانی ، بابل ، ایران

چکیده
در تولید قطعات دوفلزی با استفاده از فرآیند آهنگری، می‌توان قطعات با نسبت استحکام به وزن بالاتر را به دست آورد. هدف از این پژوهش آهنگری قطعه دوفلزی است به‌طوری‌که برای بخش داخلی از آلیاژ آلومینیوم و بخش بیرونی از آلیاژ برنج استفاده شده است. دمای آهنگری برای آلیاژهای برنج و آلومینیوم در محدوده کار داغ به ترتیب برابر ۷۰۰ و ٤٥٠ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. ابتدا آهنگری قطعه تک‌فلزی به‌صورت عددی و تجربی بررسی می‌شود. پس از صحت‌سنجی مدل اجزا محدود، به آهنگری قطعات دوفلزی در یک مرحله پرداخته می‌شود. تاثیر ضخامت پوسته برنجی و نیز اختلاف ارتفاع هسته آلومینیومی و پوسته برنجی بر موفقیت‌آمیز بودن فرایند آهنگری داغ تک مرحله‌ای مطالعه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که ضخامت و ارتفاع پوسته برنجی تاثیر چشمگیری بر موفقیت‌آمیز بودن فرایند بر پوشش‌دهی کامل هسته توسط پوسته ندارد. در ادامه برای حل این مشکل، هندسه‌های غیرساده برای هسته و پوسته به عنوان پیش‌فرم، طراحی و آهنگری مرحله دوم بصورت عددی بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که جهت تولید قطعه دوفلزی با پوشش کامل هسته آلومینیومی توسط پوسته برنجی به دو مرحله آهنگری توسط یک پیش‌فرم مناسب غیرساده نیاز است. در نهایت پیش‌فرم تاییدشده توسط مدل اجزا محدود، به‌صورت تجربی تولید و آهنگری داغ بر روی آن انجام می‌شود. نتایج تجربی تاییدکننده نتایج عددی می‌باشند. با استفاده از تصاویر SEM نشان داده می‌شود که اتصال متالورژیکی مناسبی نیز در مرز دو فلز ایجاد می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: آهنگری داغ، دوفلزی، شبیه‌سازی اجزای محدود، SEM

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۶
*نویسنده مسئول: mirnia@nit.ac.ir

۱- مقدمه
امروزه استفاده از قطعات دوفلزی به دلیل کاهش وزن و هزینه بسیار مورد توجه قرار گرفته است و کاربردهای گسترده‌ای در صنایع نفت و گاز، صنایع هوا و فضا، خودروسازی و ... دارد [1]. به همین منظور پژوهش‌های بسیاری در زمینه تولید این قطعات با استفاده از روش‌های آهنگری[2]، نوردکاری [3]، جوشکاری اصطکاکی[4] انجام گرفته است. فرآیند آهنگری، یکی از روش‌های قدیمی و پرکاربرد در صنعت بوده که علاوه بر سرعت تولید بالا، استحکام و خواص قطعه را نیز ارتقا می‌دهد. بدین منظور محققان مختلفی آهنگری قطعات دوفلزی را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

به منظور شکل‌دهی بهتر قطعات و همچنین کاهش نیرو در فرآیند آهنگری، قطعات تا دمای مشخصی گرم می‌شوند. روش‌های مختلفی برای گرم کردن وجود دارد که پرکینز و همکاران [5] در زمینه آهنگری داغ با استفاده از جریان الکتریکی مطالعاتی انجام دادند. آنها به‌جای استفاده از کوره، جهت گرم کردن قطعه از جریان الکتریکی استفاده نمودند. آنها عواملی همچون دقت ابعادی قطعه آهنگری شده، خواص مکانیکی و میزان نیروی آهنگری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که جریان الکتریکی بر روی برخی از خواص مکانیکی قطعه اثر می‌گذارد و موجب کاهش انرژی شکل‌دهی و افزایش شکل‌پذیری قطعه خواهد شد.

شیائو و همکاران [6] مطالعاتی در زمینه ریزساختار و رفتار تغییرشکل در دمای بالا قطعه برنجی H62 انجام دادند. نتایج شامل منحنی‌های تنش-کرنش در دما و نرخ کرنش‌های متفاوت با استفاده ازعوامل زنر-هالومان می‌باشد که درنهایت رفتار این آلیاژ را در اثر تغییر شکل داغ پیش‌بینی و با روش آزمایشگاهی مقایسه نمودند.

مومنی و همکاران [7] دو نمونه استوانه‌ای با آلیاژ مختلف از جنس برنج CuZn39Pb2 و CuZn39Pb3 در محدوده دمایی۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش ۰/۰۰۱ تا ۱ در واحد معکوس ثانیه را با استفاده از آزمون فشار داغ مورد مطالعه قرار دادند. نمودارهای تنش-کرنش مربوط به آلیاژ برنج در دما و نرخ کرنش‌های مشخص به صورت کاملا صعودی بود و با افزایش دما، تنش افزایش چشمگیری داشت. علاوه بر دما، افزایش نرخ کرنش نیز افزایش تنش را نشان داده است.

لی و همکاران [8] مطالعاتی در زمینه ریزساختار و رفتار تغییرشکل داغ قطعه آلومینیوم AA2014 انجام دادند. دمای قطعه ۳۵۰ تا ۴۸۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش ۰/۰۰۱ تا ۱ در واحد معکوس ثانیه برای انجام تست فشار هم‌دما انتخاب شده است. درنهایت، عوامل بهینه برای فرآیند تغییرشکل داغ آلیاژ آلومینیوم AA2014 دمای۳۷۰ تا ۴۲۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش ۰/۰۰۸ تا ۰/۰۸ در واحد معکوس ثانیه به دست آمد.

ایسا و همکاران[9] رفتار شکل‌دهی یك قطعه دوفلزی در فرآیند کاهش ارتفاع سرد را مورد بررسی قرار دادند. قطعه دوفلزی شامل هسته داخلی از جنس فولاد C15E بوده که توسط پوسته‌ای با جنس فولاد C45E احاطه شده است. نتایج نشان می‌دهد که هرچقدر کاهش ارتفاع بیشتر شود، اتصال در مرز بین هسته و پوسته بهبود می‌یابد. درنتیجه با کاهش بیشتردرارتفاع، نیروی آهنگری نیز افزایش می‌یابد.

پولیتیس وهمکاران [1] آهنگری چرخ‌دنده‌های دوفلزی را به دو روش تجربی و شبیه سازی مورد مطالعه قرار دادند. دراین پژوهش، هسته از جنس سرب و پوسته از جنس مس انتخاب شده است. ضخامت‌های مختلف پوسته به صورت تجربی و عددی بررسی شد. همچنین اثر اصطکاک بر جریان مواد دوفلزی مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه آزمایش‌های تجربی و شبیه سازی نشان داد که ضخامت نازک پوسته به شدت بر روی ساختار چرخ‌دنده تاثیر

می‌گذارد و اصطکاک ابزار و تنش جریان بر جریان مواد پوسته و هسته تاثیر دارد.

پنگفی و همکاران [2] آهنگری داغ چرخ‌دنده دوفلزی شامل هسته آلومینیومی و پوسته فولاد را به صورت تجربی و عددی بررسی نمودند. دمای آهنگری برای قالب، هسته آلومینیوم و پوسته فولاد به ترتیب ۱۵۰، ۴۲۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد انتخاب شد. فاصله بین هسته و پوسته و ضخامت پوسته به عنوان متغیر در این پژوهش در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش فاصله بین هسته و پوسته، نیروی بیشینه تغییرشکل کاهش می‌یابد. همچنین افزایش ضخامت اولیه پوسته موجب افزایش نیروی آهنگری می‌شود.

فورستر وهمکاران [10] تولید قطعه دوفلزی با هسته‌ای از جنس منیزیم و پوسته آلومینیوم را بررسی کردند. منیزیم دارای وزن کم بوده ولی نسبت به خوردگی مقاومت کمی دارد لذا پوسته آلومینیوم موجب افزایش مقاومت به خوردگی قطعه خواهد شد. با استفاده از فرآیند آهنگری دومرحله‌ای شکل نهایی حاصل شد. دمای آهنگری ۳۵۰ درجه سانتیگراد و مقدار نیروی آهنگری بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلونیوتن محاسبه شد. بررسی ریزساختاری پیوند بین دو فلز حاکی از اتصال قابل قبول است.

بر اساس مرور انجام شده در بالا، آهنگری قطعات دوفلزی به صورت محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور در این پژوهش تولید یک قطعه صنعتی به نام گلند به صورت دوفلزی بررسی شده است. در این راستا آهنگری قطعه گلند با پوسته از جنس برنج و هسته از جنس آلومینیوم به صورت عددی و تجربی بررسی می‌شود. برخی عوامل ابعادی مانند تغییر ضخامت پوسته و تغییرات مربوط به اختلاف ارتفاع هسته و پوسته بر موفقیت‌آمیز بودن فرایند بررسی می‌شود. در ابتدا بررسی‌ها با استفاده از شبیه سازی انجام می‌گردد. سپس بر اساس مدل‌های شبیه سازی، نمونه تجربی تولید و مقایسه ابعادی صورت می‌گیرد. همچنین تاثیر هندسه‌های پیش‌فرم متفاوت برای آهنگری دو مرحله‌ای بررسی می‌شود که در کارهای تحقیقاتی قبلی بررسی نشده است.

۲- آزمون تجربی

ابتدا آهنگری داغ قطعه گلند از تک‌فلزات برنج و آلومینیوم بررسی می‌شود. سپس مراحل انجام آزمون تجربی مربوط به قطعه دوفلزی ارائه خواهد شد.

۲-۱- مواد اولیه

برای جنس هسته از آلیاژ آلومینیوم AA6063 و برای جنس پوسته از آلیاژ برنج CuZn39Pb2 استفاده شده است. در جداول ۱ و ۲ به ترتیب، درصد عناصر آلیاژ برنج و آلومینیوم مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است.

جدول ۱) درصد وزنی عناصر آلیاژ برنج مورد استفاده

Cu	Zn	Pb	Ni	Fe	Sn	Al
59-60	38.5	1.6-2.5	0.3	0.3	0.3	**0.05**

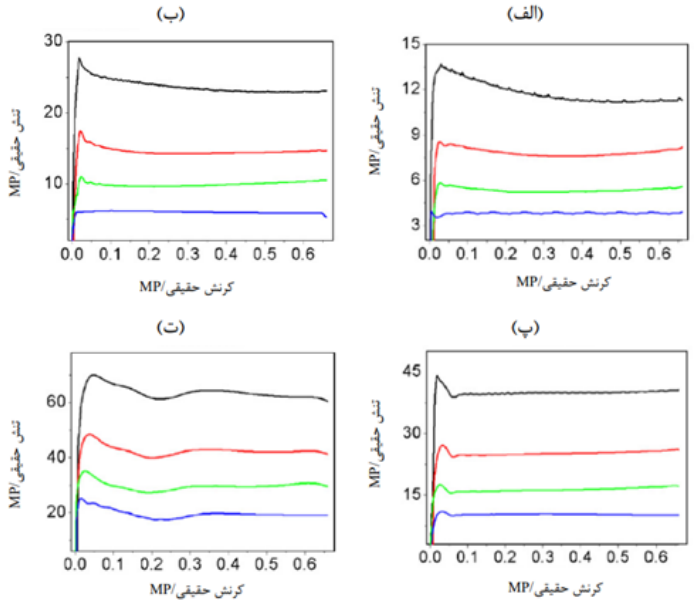
جدول ۲) درصد وزنی عناصر آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده

Al	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti
97.5	0.45-0.9	0.2-0.6	0.35	0.1	0.1	0.1	0.1	**0.1**

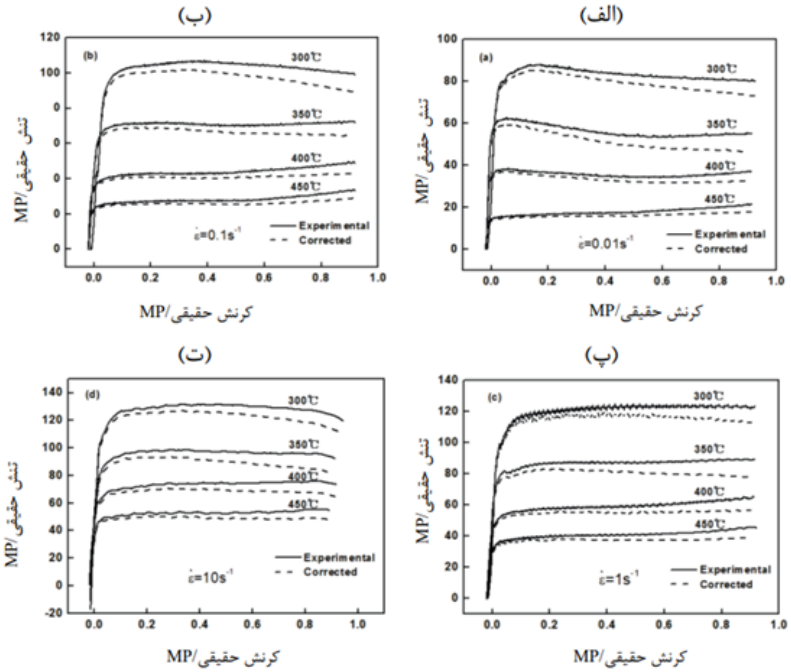
در این پژوهش از آهنگری داغ به منظور شکل‌دهی قطعات استفاده شده است. دمای آهنگری برای فلز برنج ۷۰۰ و برای فلز آلومینیوم ٤٥٠ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است [11]. از آنجایی‌که تعیین خواص در دمای بالا بسیار سخت و پرهزینه است، بنابراین خواص مربوط به تنش و کرنش به صورت وابسته به نرخ کرنش از کارهای قبلی گرفته شده است. پس از مطابقت درصد عناصر فلزات، داده‌های تنش-کرنش فلز برنج از مرجع[6] و برای فلز آلومینیوم از مرجع[12] استخراج شده است. شکل ۱ خطوط قرمز رنگ نمودارهای تنش-کرنش حقیقی فلز برنج در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. شکل ۲ نمودار تنش-کرنش حقیقی فلز آلومینیوم در دمای ٤٥٠ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. شکل ۱ و ۲- الف، ب، پ و ت به ترتیب مربوط به نرخ کرنش‌های ۰/۰۱، ۱،۰/۱ و ۱۰ واحد معکوس ثانیه برای هر دو فلز می‌باشد.

۲-۲- آهنگری تک فلز

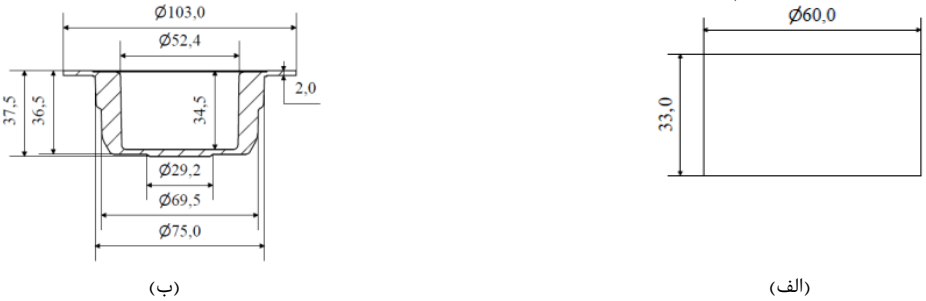
ابعاد قطعه قبل و بعد از فرآیند آهنگری در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳- الف آمده، قطعه اولیه به صورت استوانه توپر به قطر ۶۰ و ارتفاع ۳۳ میلی‌متر برش داده می‌شود. پس از انجام آهنگری، شکل نهایی مطابق شکل ۳- ب به دست می‌آید. متناسب با شکل نهایی قطعه گلند، قالب دو کفه‌ای شامل سنبه و ماتریس تولید شده است. در شکل ۴ تجهیزات مورد استفاده در آزمون تجربی آورده شده است. شکل ۴- الف دستگاه پرس پیچی و شکل ۴- ب مجموعه قالب و بیلت اولیه را نشان می‌دهد. قالب مورد نظر جهت انجام فرآیند آهنگری داغ به صورت قالب بسته و بدون پلیسه طراحی شده است. بخش ابعادی قالب به گونه‌ای طراحی شده است که شکل سنبه به صورت یک استوانه و ماتریس به صورت پله‌دار در نظر گرفته شده است. با حرکت سنبه به سمت سطح قطعه کار، کاملا آن را فشرده کرده و در نهایت شکل قالب را به خود می‌گیرد. قالب از جنس فولاد گرم‌کار تولید شده و روی دستگاه پرس پیچی ۲۵۰۰ کیلونیوتن بسته می‌شود تا فرآیند آهنگری انجام شود. پیش از شروع آهنگری، قالب تا دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد گرم می‌شود تا از شوک حرارتی جلوگیری شود.



شکل ۱) نمودار تنش – کرنش حقیقی آلیاژ برنج در دماهای ۶۵۰℃ ، ۷۰۰℃، ۷۵۰℃ و ۸۰۰℃ و نرخ کرنش‌های، الف) s^{-1} ۰/۰۱،ب) s^{-1} ۰/۱، پ) s^{-1} ۱ ت) s^{-1} ۱۰ [6]



شکل ۲) نمدار تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم در دماهای ۳۰۰℃ ، ۳۵۰℃، ۴۰۰℃ و ۴۵۰℃ و نرخ کرنش‌های، الف) s-1 ۰/۰۱،ب) s-1 ۰/۱، پ) s-1 ۱ ت) s-1 ۱۰[12]



شکل ۳) ابعاد قطعه تک فلز، الف) قبل از آهنگری، ب) بعد از آهنگری (ابعاد به میلی‌متر)

(الف)

(ب)

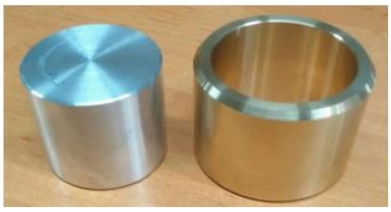
شکل ٤) تجهیزات مورد استفاده در آهنگری الف)دستگاه پرس پیچی، ب) مجموعه قالب بالا و پایین و بیلت اولیه

قبل از قرار دادن قطعه در داخل قالب جهت انجام آهنگری، قطعه داخل کوره تا رسیدن به دمای موردنظر گرم می‌شود. کوره‌ای که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته از نوع گازی بوده و قطعه در مجاورت با شعله مستقیم قرار می‌گیرد. به همین دلیل دمای آنها با دقت بالایی کنترل می‌شود تا کمتر یا بیشتر از دمای آهنگری نباشد. کنترل دما به کمک دماسنج لیزری انجام شده است. روش کنترل دما به این صورت است که پس از ۲ دقیقه، قطعه با انبر مخصوص از کوره خارج می‌شود و دمای آن اندازه‌گیری می‌شود. در صورت مطابقت اندازه گرفته شده توسط دماسنج و دمای آهنگری، قطعه بلافاصله داخل قالب قرار می‌گیرد و با حرکت سنبه به سمت پایین، شکل‌دهی تکمیل می‌شود. زمان انجام فرآیند۱ ثانیه می‌باشد. پس از تکمیل عملیات شکل‌دهی دکمه پران فعال شده و قطعه نهایی از قالب پایین جدا می‌شود. از آنجایی‌که قطعه نهایی هنوز گرم است تا رسیدن به دمای محیط صبر می‌شود.

۲-۳- آهنگری دوفلزی

جهت تولید قطعات دوفلزی تمامی مراحل از مدل تک‌فلزی آن الگوبرداری شده است. لذا ابعاد نهایی قطعه دوفلزی تغییرشکل یافته با ابعاد نهایی قطعه تک‌فلز یکسان خواهد بود. در حالت دوفلزی هندسه هسته استوانه‌ای بوده و پوسته به صورت استوانه توخالی روی هسته قرار می‌گیرد. شکل ۵ هندسه قطعه اولیه قبل از شکل‌دهی در آزمون تجربی را نشان می‌دهد. در شکل ۵- الف هسته آلومینیومی و پوسته برنجی را به‌صورت مجزا و شکل ۵- ب هسته داخل پوسته را نشان می‌دهد. روش کار آزمون تجربی برای دوفلزی مشابه تک‌فلزی است با این تفاوت که به جای یک فلز، دو فلز مربوط به هسته و پوسته برش داده می‌شود.

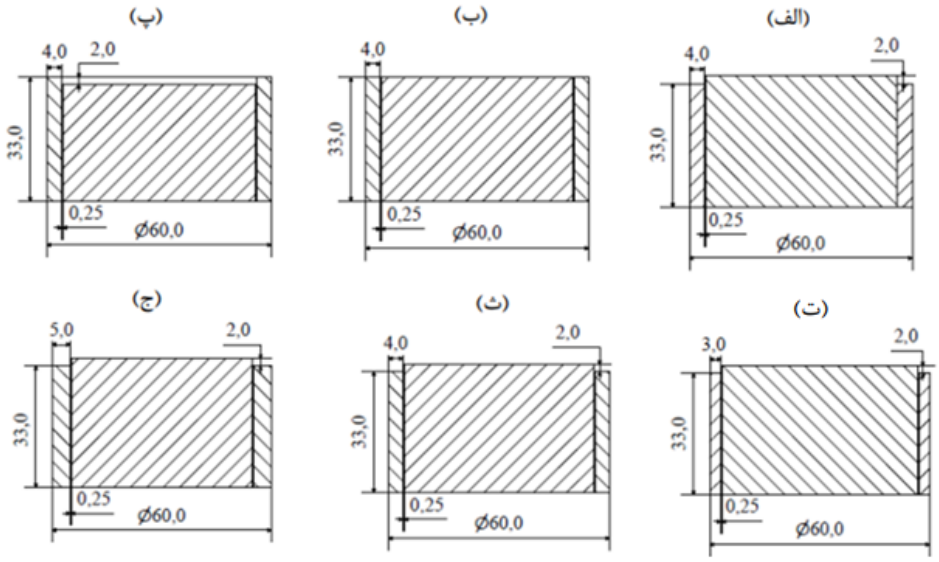
(الف)



(ب)

شکل ۵) قطعه اولیه هسته و پوسته در آزمون تجربی الف) هسته آلومینیوم و پوسته برنج مجزا، ب) هسته و پوسته مونتاژ شده

در این پژوهش تاثیر اختلاف ارتفاع هسته و پوسته و ضخامت پوسته بر شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۶ مقطع برش خورده از هندسه اولیه قطعات دوفلزی جهت انجام فرآیند آهنگری را نشان می‌دهد. شکل ۶-الف، ب و پ به ترتیب نمای برش خورده از قطعات دوفلزی با اختلاف ارتفاع‌های ۲+، صفر و ۲- میلی‌متر را نشان می‌دهد. در اختلاف ارتفاع ۲+ میلی‌متر، ارتفاع هسته آلومینیومی به اندازه ۲ میلی‌متر از ارتفاع پوسته برنجی بیشتر است. در اختلاف ارتفاع صفر، ارتفاع هسته و پوسته برابر است. در اختلاف ارتفاع ۲- میلی‌متر، ارتفاع هسته به اندازه ۲ میلی‌متر از ارتفاع پوسته کمتر است. طبق شکل، مابقی اندازه‌ها مانند ضخامت پوسته، اختلاف قطر داخلی پوسته و قطر بیرونی هسته ثابت در نظر گرفته شده است. علاوه بر اختلاف ارتفاع، تاثیر ضخامت پوسته بر شکل‌دهی مورد بررسی قرارگرفته است. شکل۶- ت، ث و ج به ترتیب نمای برش خورده از مقاطع هندسه اولیه قطعات دوفلزی برای ضخامت‌های پوسته ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این سه شکل مشاهده می‌شود، تمام عوامل به جز ضخامت پوسته ثابت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است در تمامی موارد جهت چسبندگی مناسب هسته و پوسته، اختلاف قطر هسته و پوسته ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد و ثابت است. در تمام موارد دمای آهنگری قطعات نیز به عنوان عامل ثابت معرفی شده است.

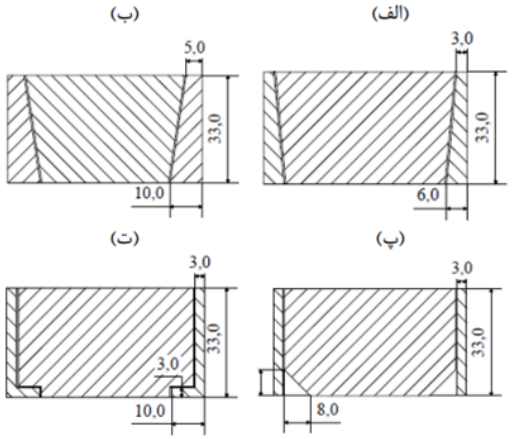


شکل ۶) شکل شماتیک از مقطع برش خورده هندسه اولیه قطعه دوفلزی الف) اختلاف ارتفاع ۲+ ، ب) اختلاف ارتفاع صفر و پ) اختلاف ارتفاع ۲- ، ت) ضخامت پوسته ۳، ث) ضخامت پوسته ۴ ، ج) ضخامت پوسته ۵ (ابعاد به میلی‌متر)

علاوه بر هندسه‌های ساده که در بررسی عوامل استفاده شد، در انتها به بررسی هندسه‌های غیرساده به‌عنوان پیش‌فرم در آهنگری تک مرحله‌ای پرداخته شده است. شکل ۷- الف، ب، پ و ت مدل‌های غیرساده از هسته و پوسته اولیه را نشان می‌دهد. هرکدام از هندسه‌های پیش‌فرض، در نرم افزار اجزا محدود مدل‌سازی شده و شکل نهایی آن پیش‌بینی شده است. به کمک این روش می‌توان پیش‌فرم قابل تایید را انتخاب نمود. پس از انتخاب پیش‌فرم مناسب، نوبت به طراحی و تولید قالب پیش‌فرم می‌باشد. واضح است که در صورت استفاده از قالب پیش‌فرم، فرآیند آهنگری به صورت دومرحله‌ای انجام می‌شود.

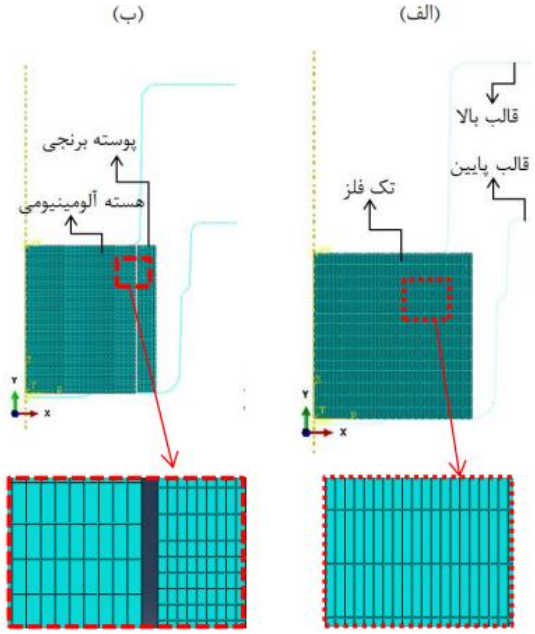
۳- شبیه‌سازی اجزا محدود آهنگری گلند

برای شبیه سازی آهنگری قطعه تک فلزی و دوفلزی، از نرم افزار اجزای محدود آباکوس نسخه ۲۰۱۷ استفاده شده است. شکل ۸



شکل ۷) سطح مقطع برش خورده از هندسه‌های غیرساده به عنوان پیش¬فرم برای قطعات دوفلزی الف) هندسه مخروطی کوچک ، ب) هندسه مخروطی بزرگ ، پ) هندسه پخ یکطرفه و ت) هندسه L شکل

مدل اجزا محدود قطعه آهنگری گلند به همراه بزرگ‌نمایی دانه‌بندی را نشان می‌دهد که شکل ۸- الف مربوط به قطعه تک فلزی است و برای هر دو فلز آلومینیوم و برنج از نظر هندسی مشترک است. شکل ۸- ب مربوط به قطعه دوفلزی با هسته آلومینیومی و پوسته برنجی را نشان می‌دهد. به دلیل متقارن بودن قطعه، مدل هندسی از مجموعه قالب و قطعه اولیه به صورت متقارن محور ایجاد شده است. مجموعه قالب بالا و پایین به صورت صلب گسسته (RAX2) و قطعه اولیه در تک فلز و هسته و پوسته در دوفلزی به صورت تغییرشکل‌پذیر CAX4R در نظر گرفته شده که یک جزء ۴ گره‌ای متقارن محوری و دارای فرمول‌بندی کاهش یافته با قابلیت کنترل پدیده ساعت شنی می‌باشد.



شکل ۸) مدل المان محدود آهنگری گلند با جزئیات دانه‌بندی، الف) تک فلزی، ب) دوفلزی

همان‌طور که قبلا نیز اشاره شد، مدل هندسی برای هر دو فلز، مشترک تعریف شده است و تفاوت در خواص فلزات می‌باشد. به همین منظور از نمودارهای تنش-کرنش مربوط به مطالعات پیشین استفاده شده است. این نمودارها بر اساس یکسری از معادلات به دست آمده که در مراجع ذکر شده، ارائه شده است. مطابق این معادلات، داده‌های تنش و کرنش در نرخ کرنش‌های ۰/۰۱، ۰/۱، ۱ و ۱۰ در واحد معکوس ثانیه در دماهای مورد نظر برای هر یک از آلیاژهای برنج و آلومینیوم محاسبه شده است. سپس داده‌ها به صورت وابسته به نرخ کرنش در بخش مربوط به خواص، وارد نرم‌افزار گردید. همچنین خواص فیزیکی و مکانیکی در دمای مشخص شده بر اساس جدول ۳ وارد نرم افزار شده است.

جدول ۳) خواص فیزیکی و مکانیکی مربوط به فلز برنج و آلومینیوم جهت ورودی نرم افزار

ورودی نرم افزاری	آلیاژ برنج در دمای ۷۰۰°C	آلیاژ آلومینیوم در دمای ۴۵۰°C
چگالی (Kg/m^3)	۸,۵۰۰	۲,۶۰۰
مدول یانگ (GPa)	۸۰	۲۷
ضریب پواسون	۰/۳۳	۰/۳۳

در فرآیند آهنگری داغ قطعات دو فلزی، اصطکاک به عنوان نامشخص‌ترین عامل معرفی می‌شود. به دلیل تغییرشکل پلاستیک قابل توجهی که در آهنگری اتفاق می‌افتد لذا در این پژوهش، اصطکاک به صورت برشی درنظر گرفته شده است [13]. در تک فلزی، از روان‌کننده گرافیتی استفاده شده لذا در شبیه سازی، تماس بین قطعه و قالب‌ها به صورت سطح به سطح و از نوع پنالتی برای آلیاژ آلومینیوم و برنج به ترتیب با ضریب اصطکاک ۰/٤[14] و ۰/۵[15] تعریف شده است. در قطعه دوفلزی نیز تماس بین قطعه و قالب‌ها مانند تک فلزی تعریف شده که در آن علاوه بر تعریف تماس بین قطعات و قالب‌ها، تماس بین هسته و پوسته نیز به دلیل تماس کشویی به صورت پنالتی با ضریب اصطکاک ۰/۸[14] تعریف شده است. قالب پایین ثابت و همچنین چرخش و جابجایی محور تقارن بجز در جهت Y در سایر محورها مقید شد. در نهایت، جابجایی قالب بالا به نقطه مرجع اختصاص داده شد. در این تحلیل از حل‌گر دینامیک صریح استفاده شده است و زمان انجام تحلیل ۱ ثانیه وارد شده که برابر زمان انجام فرایند در آزمون تجربی است. به منظور کاهش زمان تحلیل از مقیاس‌دهی جرمی استفاده شده که این روش مختص حل‌گرهای صریح می‌باشد که با استفاده از آن، زمان حل مساله کاهش می‌یابد. در این روش، به جرم اجزا مقیاس داده می‌شود تا زمان پایداری حل کاهش یابد [6]. در این پژوهش، برای تمام موارد مقیاس جرمی ۱۰۰۰ وارد شده است. با بررسی نتایج، همواره انرژی جنبشی کمتر از ۵٪ انرژی داخلی به‌دست آمده است. در قطعات تک فلز اندازه اجزا ۰/۰۰۰۴ در ۰/۰۰۲۲ می‌باشد. در قطعات دوفلزی به دلیل تغییرشکل شدید، از روش پارتیشتن‌بندی استفاده شد به طوریکه اجزای بالای هسته و پوسته نسبت به اجزای پایینی کشیده‌تر در نظر گرفته شده است. اندازه اجزا در بالا و پایین خط پارتیشن در هسته ۰/۰۰۰۴۵ در ۰/۰۰۱۳ و ۰/۰۰۱۱ است همچنین در پوسته ۰/۰۰۰۳ در ۰/۰۰۰۷۷ و ۰/۰۰۰۵ می‌باشد.

۴-نتایج و بحث

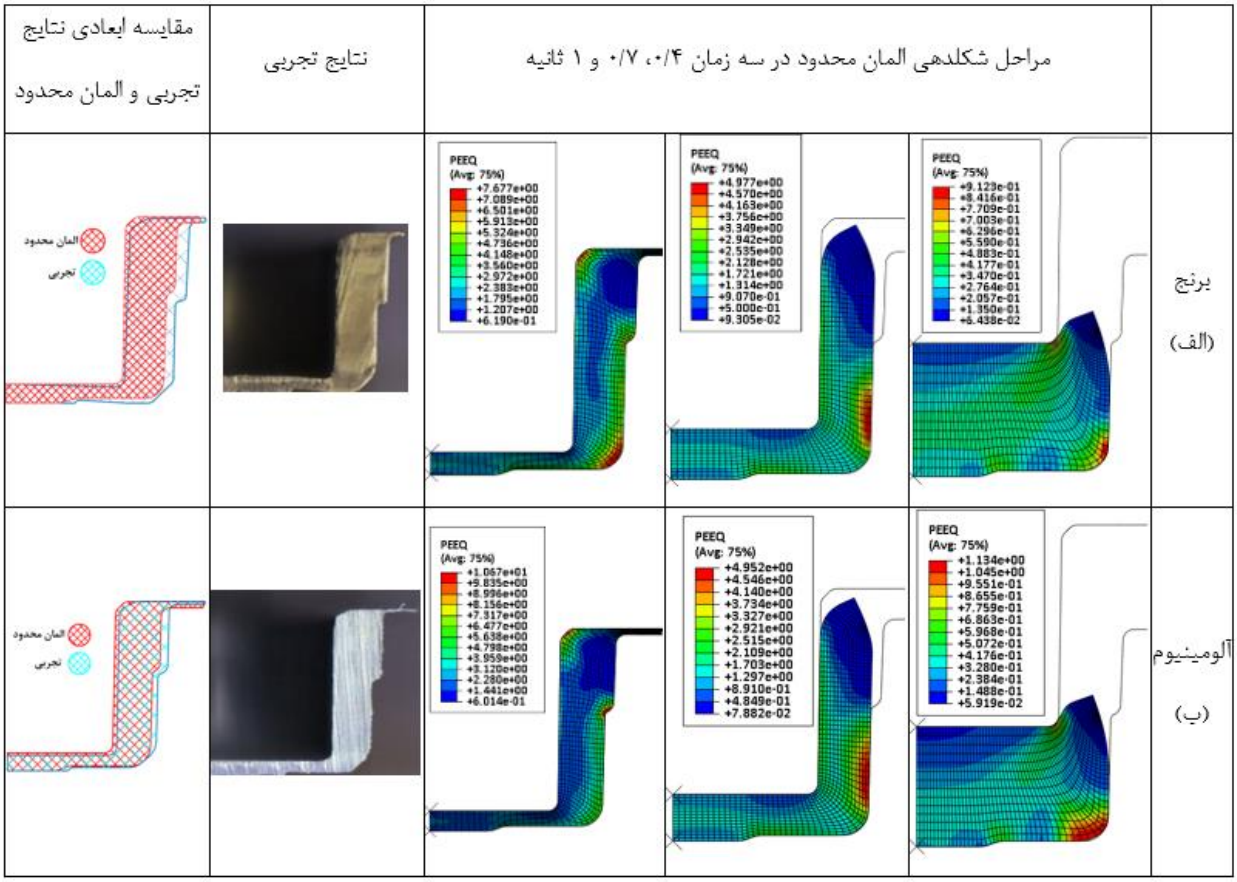
جهت صحت سنجی نتایج شبیه سازی، شکل‌دهی تك فلز برنج و تك فلز آلومینیوم در ابتدا مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از تایید صحت سنجی، به بررسی عملیات آهنگری قطعات دوفلزی با پوسته برنجی و هسته آلومینیومی پرداخته شده و عوامل مورد نظر توسط شبیه سازی عددی بررسی می‌گردند.

۴-۱- صحت سنجی مدل اجزا محدود عملیات آهنگری

به منظور صحت‌سنجی مدل اجزا محدود از آزمون تجربی استفاده گردید. همان‌طور که قبلا هم توضیح داده شد، قطعه دوفلزی شامل دو فلز از جنس‌های متفاوت است. در همین راستا تک فلزات آلومینیوم و برنج به صورت مجزا تولید و با مدل اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۹ نتایج اجزا محدود از مراحل شکل‌دهی در زمان‌های ۰/٤، ۰/۷ و ۱ ثانیه به همراه نمونه تجربی و همچنین، مقایسه ابعادی مدل اجزا محدود و تجربی را نشان می‌دهد. شکل ۹- الف و ب به ترتیب مربوط به فلز برنج و آلومینیوم می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، برای هر کدام از فلزات برنج و آلومینیوم، ابتدا شکل‌دهی قطعه آهنگری در مدل اجزامحدود انجام شده است. سپس نمونه تجربی با استفاده از تجهیزات تعریف شده، تولید گردید. در نهایت، جهت تایید آزمون، نتایج اجزا محدود و تجربی مورد مقایسه ابعادی قرار گرفته است.

مطابق شکل ۹ که مراحل شکل‌دهی در ۰/۴، ۰/۷ و ۱ ثانیه را نشان می‌دهد، مقدار کرنش پلاستیک معادل در قسمت‌های مختلف قطعه و همچنین در مراحل مختلف شکل‌دهی متفاوت است. در شبیه‌سازی فرآیند آهنگری، اجزای قطعه دچار تغییرشکل شدید می‌شوند. معمولا اجزای موجود در گوشه‌های قالب و یا بخش‌هایی از قالب که به دلیل اصطکاك، جابجایی مواد کندتر است، اجزا تحت کشش بیشتری قرارگرفته لذا مقدار کرنش پلاستیک معادل آنها بیشتر از سایر اجزا می‌باشد. همچنین در انتهای شکل‌دهی که قالب کاملا پر شده است، به دلیل کمبود فضای خالی، مقدار کرنش معادل به حداکثر رسیده است.

با استفاده از رابطه (۱) درصد اختلاف سطح بین نتیجه آزمون تجربی و نتیجه پیش‌بینی شده از مدل اجزا محدود محاسبه شده است. مساحت سطح مقطع نتایج تجربی و اجزا محدود با استفاده از نرم افزار اینونتور محاسبه شده است و مقادیر به‌دست آمده در رابطه (۱) قرار داده شده و درصد اختلاف بین سطوح به دست آمده

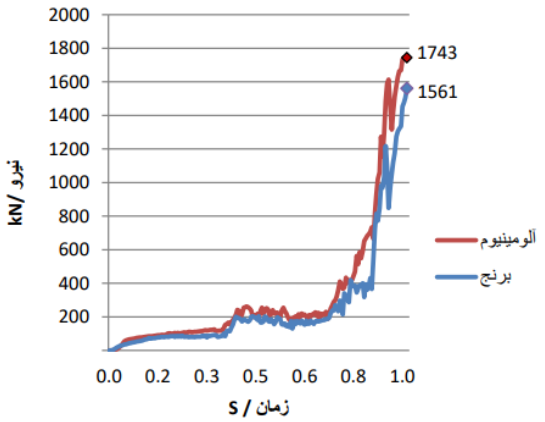


شکل ۹) مراحل شکل‌دهی مدل المان‌محدود در زمان‌های ۰/۴، ۰/۷ و ۱ ثانیه، نتایج تجربی و مقایسه ابعادی نتایج تجری و المان‌محدود تک‌فلز، الف) برنج، ب) آلومینیوم

است. حداکثر خطا برای فلز برنج ۲/۵٪ و برای فلز آلومینیوم ۱/۵٪ به دست آمده است.

$$\frac{\text{مساحت مقطع عددی} - \text{مساحت مقطع تجربی}}{\text{مساحت مقطع تجربی}} \times 100 \quad (1)$$

با مقایسه ابعادی نمونه تجربی و شبیه سازی، نتایج صحت‌سنجی قابل قبول است. ولی یکی از عوامل مهم در فرآیند آهنگری پیش‌بینی مقدار حداکثر نیرو جهت انتخاب نوع دستگاه پرس است. لذا تغییرات نیروی شکل‌دهی تک‌فلزات برنج و آلومینیوم در فرآیند آهنگری توسط شبیه سازی عددی به دست آمد. شکل۱۰ نمودارهای تغییرات نیروی شکل‌دهی تک فلزات برنج و آلومینیوم در فرایند آهنگری را توسط شبیه‌سازی عددی در زمان معین نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل آمده است، هر دو نمودار نیرو در واحد زمان، صعودی است. از لحظه شروع شکل دهی تا زمان تقریبا ۰/۸ ثانیه، افزایش نیرو کمتر بوده و از زمان ۰/۸ ثانیه تا تکمیل فرآیند آهنگری، سرعت افزایش نیرو بیشتر می‌شود. مقدار حداکثر نیرو برای فلز برنج مقدار ۱۵۶۱ کیلونیوتن و برای فلز آلومینیوم ۱۷۴۳ کیلونیوتن پیش‌بینی شده است. همان‌طور که قبلا اشاره شد، نیروی دستگاه پرس مورد استفاده جهت آزمون تجربی حدودا ۲۵۰۰ کیلونیوتن می‌باشد که همواره بیشتر از نیروی مورد نیاز برای فلزات برنج و آلومینیوم می‌باشد.



شکل ۱۰) نمودار پیش‌بینی شده تغییرات نیروی شکل‌دهی تک فلزات برنج و آلومینیوم در فرایند آهنگری توسط شبیه‌سازی

۴-۲- عملیات آهنگری قطعه دوفلزی

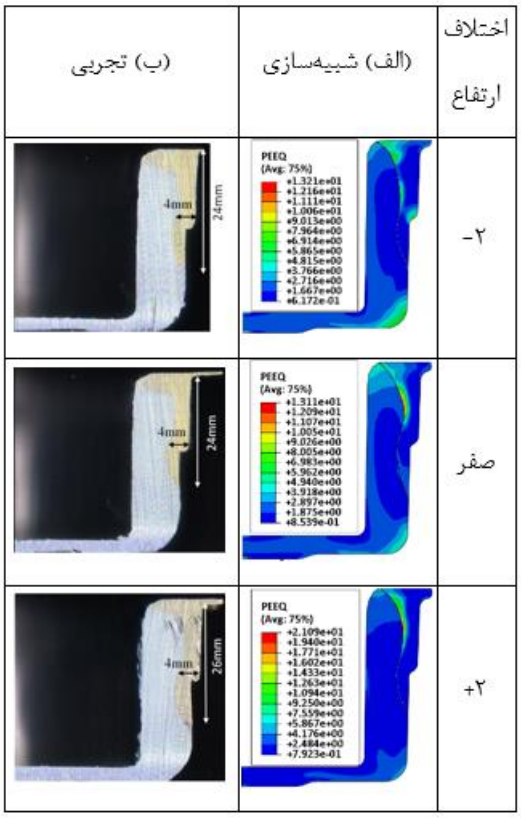
پس از مقایسه و مطابقت آزمون تجربی و نتایج اجزا محدود عملیات آهنگری تک فلزات و تایید ابعاد قالب و سایر مشخصات شبیه سازی، به آهنگری قطعه دوفلزی پرداخته می‌شود. در ابتدا عوامل ارتفاع و ضخامت برای هندسه‌های ساده بررسی گردید. سپس به دلیل عدم پوشش سطح بیرونی هسته توسط پوسته، تاثیر هندسه‌های پیش‌فرم با الگوهای مختلف برای هندسه هسته

و پوسته با استفاده از روش اجزا محدود در نظر گرفته شد و تاثیر هندسه قطعه اولیه بر شکل نهایی مورد بررسی قرار گرفت.

۴-۲-۱- بررسی اثر اختلاف ارتفاع هسته و پوسته

شکل ۱۱- الف و ب به ترتیب نتایج پیش‌بینی شده اجزا محدود و نتایج تجربی قطعات دوفلزی برای اختلاف ارتفاع ۲-، صفر و ۲+ میلی‌متر را نشان می‌دهد. شکل ۱۱- الف نتایج پیش بینی شده در شبیه‌سازی عددی قطعات دوفلزی به همراه کانتور کرنش پلاستیک معادل برای اختلاف ارتفاع های مذکور را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل آمده است برای هر سه مدل، اجزای موجود در مرز بین هسته و پوسته دارای بیشترین مقدار کرنش پلاستیک معادل هستند. بنابراین در این قسمت اجزا به شدت تحت کشش قرار دارند و احتمال پارگی وجود دارد. همچنین یکی دیگر از دلایل افزایش کرنش پلاستیک معادل در اجزا، افزایش اصطکاک است. در این آزمون بین هسته و پوسته از هیچ روان‌کاری استفاده نشده است پس حین تغییرشکل، این قسمت از قطعه اصطکاک بالایی را تحمل می‌کند. زمانی‌که ارتفاع هسته برابر و کمتر از ارتفاع پوسته درنظر گرفته شده است، مقدار کرنش پلاستیک معادل تقریبا برابر و مناسب حدود ۱۳ پیش بینی شده است ولی در اختلاف ارتفاع ۲+ که ارتفاع هسته بیشتر از ارتفاع پوسته است، مقدار کرنش پلاستیک در ۳ یا ٤ المان در مرز بین هسته و پوسته، بسیار زیاد است. با توجه به این بررسی می‌توان دریافت افزایش ارتفاع هسته موجب تجمع بیشتر مواد در قالب شده است. در نتیجه فضا برای جابجایی مواد محدود شده است. به دنبال این موضوع، درگیری اجزا با یکدیگر بیشتر می‌شود که درنهایت کرنش پلاستیک معادل افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج اجزا محدود که در شکل ۱۱- الف آمده است، ارتفاع نهایی پوسته پس از شکل‌دهی در هیچکدام از اختلاف ارتفاع‌های درنظر گرفته شده، کامل نبوده و پوسته به طور کامل هسته را در برنگرفته است. لذا پس از پیش‌بینی‌های انجام شده با روش اجزا محدود، مدل اولیه با هندسه ساده با اختلاف ارتفاع‌های ذکر شده جهت آزمون تجربی آماده گردید. همان‌طور که در شکل ۱۱- ب مشخص شده است، در هیچکدام از حالت‌ها، پوسته به طور کامل هسته را در برنگرفته است. بنابراین پیش‌بینی توسط روش اجزا محدود به درستی انجام شد.

به منظور مقایسه نتایج آزمون تجربی و اجزا محدود از روش مقایسه ابعادی استفاده شده است که درصد خطا برای سه حالت طبق رابطه (۱) محاسبه شده است. درصد خطا در اختلاف ارتفاع ۲- میلی‌متر، حدود ۹٪ محاسبه شده است. در ارتفاع برابر هسته و پوسته حدود ۴٪ و در اختلاف ارتفاع ۲+ میلی‌متر تقریبا ۱۰٪ به دست آمده است.



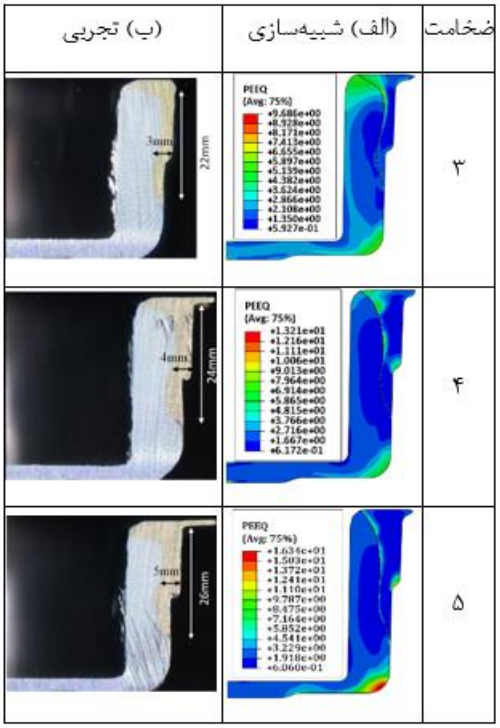
شکل ۱۱) قطعات دوفلزی در اختلاف ارتفاع‌های ۲-، صفر و ۲+ میلی‌متر الف) نتایج شبیه‌سازی به همراه کانتور کرنش پلاستیک معادل، ب) نتایج تجربی

۴-۲-۲- بررسی اثر ضخامت

نتایج اجزا محدود درشکل ۱۲- الف ضخامت پوسته قبل و بعد از شکل‌دهی ثابت باقی می‌ماند. علاوه بر ضخامت، ارتفاع پوسته نیز با افزایش ضخامت هندسه اولیه، اندکی افزایش یافته است. علاوه بر این، نتایج تجربی که در شکل ۱۲- ب آورده شده است، مطابقت خوبی با نتایج اجزا محدود داشته است. همان‌طور که از نتایج اجزا محدود پیش‌بینی شده بود، در هیچکدام از مدل‌ها هسته به طور کامل پوسته را در برنگرفته است. در نتیجه، علاوه بر اختلاف ارتفاع هسته و پوسته، افزایش ضخامت پوسته نیز تاثیر چشمگیری بر پوشش‌دهی کامل پوسته بر هسته ندارد.

مقدار حداکثر کرنش پلاستیک معادل برای ضخامت ۳mm کمتر از دو مدل دیگر پیش‌بینی شده است. در مجموع تعداد اجزایی که با رنگ قرمز نمایش داده شده خیلی کم و کوچک است که حتی در شکل مشاهده نمی‌شود. بیشتر اجزایی که در هر شکل مشاهده می‌شود با رنگ‌های آبی و سبز است که مقدار کرنش پلاستیک معادل آن کمتر است. مانند توضیحات مربوط به بخش قبل (بررسی اختلاف ارتفاع هسته و پوسته) همچنان بیشترین مقدار کرنش پلاستیک مربوط به المان‌های موجود در مرز بین هسته و پوسته و گوشه های قالب می‌باشد.

بر اساس مقایسه ابعادی انجام شده، درصد خطا برای سه حالت طبق رابطه (۱) محاسبه شده است. برای ضخامت ۳ میلی‌متر خطای محاسبه شده حدود ۱۱٪ و برای ضخامت ۵ میلی‌متر تقریبا ۱۰٪ است. دلایل ایجاد خطای ابعادی بین نتایج آزمون تجربی و نتایج پیش‌بینی شده از اجزا محدود می‌تواند مربوط به عوامل تولید یا شبیه سازی عددی باشد. این عوامل شامل: ورودی‌های تنش-کرنش در شبیه سازی، دمای آهنگری، فرسایش قالب و غیره باشد.

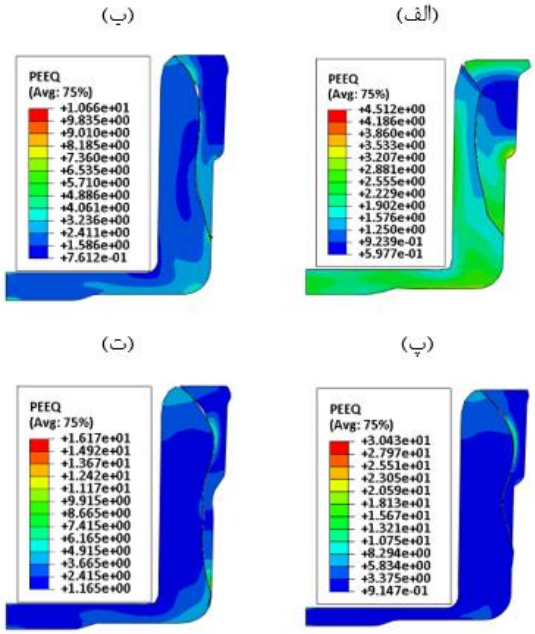


شکل ۱۲) قطعات دوفلزی در ضخامت پوسته ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر الف) نتایج شبیه‌سازی به همراه کانتور کرنش پلاستیک معادل، ب) نتایج تجربی

۴-۲-۳- بررسی اثر پیش‌فرم

با بررسی‌هایی که در هندسه ساده برای مواد اولیه انجام شد مانند تغییر ارتفاع هسته و پوسته و تغییر ضخامت پوسته مشکل عدم پوشش‌دهی برطرف نشد. به همین دلیل، هندسه‌های متفاوت دیگری برای قطعه اولیه به عنوان پیش‌فرم درنظر گرفته شده که در ادامه به بررسی آن پرداخته می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۷ آورده شد، هندسه‌های غیرساده فرضی به عنوان پیش‌فرم درنظر گرفته شده است. در این بررسی، سعی شده است به تحلیل هندسه پیش‌فرم‌هایی پرداخته شود که کمبود مواد برنج در پوسته را جبران کند. به منظور پیش‌بینی مدل نهایی قطعه، عملیات آهنگری با هندسه‌های فرض شده با استفاده از نرم افزار آباکوس، شبیه‌سازی شد. شکل ۱۳ نمای سطح مقطع از نتایج پیش‌بینی شده مربوط به قطعات دوفلزی با پیش‌فرم غیرساده در شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد. شکل ۱۳- الف، ب، پ و ت به ترتیب نتایج اجزا محدود برای هندسه مخروطی کوچک، هندسه مخروطی بزرگ، هندسه پخ یک‌طرفه و هندسه L شکل است.



شکل ۱۳) نمای سطح مقطع پیش‌بینی شده از قطعات دوفلزی با پیش‌فرم غیرساده در شبیه‌سازی عددی الف) هندسه مخروطی کوچک، ب) هندسه مخروطی بزرگ، پ) هندسه پخ یکطرفه و ت) هندسه L شکل

همان‌طور که در شکل ۱۳- الف مشاهده می‌شود، هندسه مخروطی در قطعه تاثیری بر ارتفاع نهایی پوسته ندارد و همچنان هسته به طور کامل پوسته را دربرنگرفته است. با مقایسه قطعه با هندسه اولیه ساده و مخروطی می‌توان دریافت که ضخامت پوسته بعد از شکل‌دهی در مدل مخروطی نسبت به مدل ساده افزایش می‌یابد. حین انجام فرایند شکل‌دهی، سنبه روی هسته قرار داشته و تا پایان شکل‌دهی فقط بر هسته فشار وارد می‌کند. به همین دلیل بر اثر فشار وارده بر هسته، مواد آلومینیوم از انتهای قالب به بخش پایینی پوسته فشار وارد کرده و از آنجا که فضا برای خروج پوسته در بالای قالب باز است لذا پوسته برنجی حرکت رو به بالا دارد و بیشتر مواد برنج در بخش بالایی قالب جمع می‌شود. به دنبال این موضوع، مدل شکل ۱۳- ب با همان هندسه مخروطی ولی با ضخامت بیشتر تحلیل شده است. در این مدل سعی شده است ضخامت پوسته تا حدی زیاد شود که سنبه به پوسته برخورد داشته باشد تا از فرار آن جلوگیری شود. از نتایج پیش‌بینی شده اجزا محدود می‌توان دریافت که هندسه مخروطی قابل قبول نبوده و هرچقدر ضخامت افزایش داده شود تاثیری بر افزایش ارتفاع پوسته نهایی جهت پوشش‌دهی پوسته ندارد. در مدل هندسی شکل ۱۳- پ به دلیل کمبود مواد هسته، قالب پر نشده است ولی می‌توان پیش‌بینی کرد که هندسه‌های از این نوع نیز تاثیری بر ارتفاع

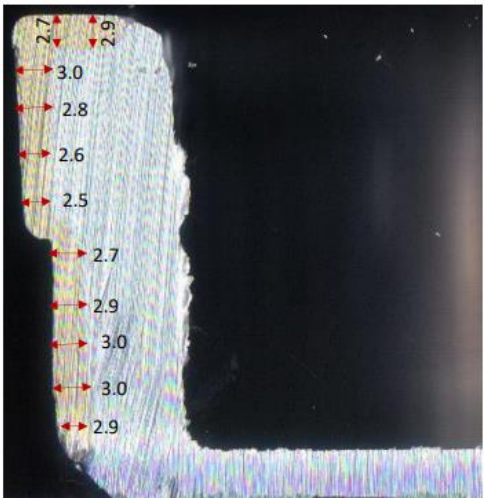
پوسته بعد از شکل‌دهی ندارد. در پیش‌فرم چهارم با هندسه L شکل، نتیجه تحلیل کاملا قابل قبول بوده و پوشش کامل پوسته بر محیط هسته در شکل ۱۳- ت مشهود است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، هندسه L شکل مقدار سطح بیرونی پوسته را افزایش داده است و درنتیجه با حرکت سنبه و جابجایی مواد هسته آلومینیومی از مرکز قالب به سمت اطراف، موجب حرکت پوسته برنجی شده و تا پرشدن قالب، مواد پوسته در بخش انتهای قالب باقی خواهد ماند. مطابق فرضی که در پیش‌فرم L شکل شده بود، این فرم هندسه اولیه موجب قرارگیری مواد هسته در داخل پوسته شده است. به عبارت دیگر، در قطعه اولیه، هسته توسط پوسته از انتها و مجاور در برگرفته شده است. با توجه به مراحل تدریجی شکل‌دهی می‌توان دریافت که جابجایی پوسته به گونه‌ای است که لبه افقی پوسته در اواسط شکل‌دهی به سمت اطراف حرکت می‌کند و قسمتی از دیواره می‌شود. در نهایت با مشاهده نتیجه اجزا محدود مشخص است که پوسته به طور کامل هسته را در برگرفته است.

طبق بررسی‌هایی که برای پیش‌فرم‌های غیرساده انجام شد، می‌توان پیش‌بینی کرد که مدل L شکل بهترین حالت برای پوشش‌دهی کامل هسته توسط پوسته خواهد بود. به همین منظور، آزمون تجربی مطابق این مدل انجام شده است. شکل ۱۴ تصویر برش خورده از نتیجه آزمون تجربی قطعه دوفلزی با پیش‌فرم L شکل به همراه توزیع ضخامت پوسته را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌بینی شده بود، سطح بیرونی هسته به طور کامل توسط پوسته پوشیده شده است. ضخامت پوسته در تمام قسمت‌های قطعه تقریبا یکنواخت می‌باشد. بنابراین، انجام شکل‌دهی با پیش‌فرم، نیاز به دو مرحله آهنگری دارد. در مرحله اول، از پیش‌فرم مناسب برای شکل‌دهی قطعه اولیه هسته و پوسته استفاده می‌شود. در مرحله دوم، شکل‌دهی نهایی انجام می‌شود که قطعه آهنگری شده با پوشش کاملا برنجی به دست می‌آید. به منظور تایید نتیجه اجزا محدود، مقایسه ابعادی بین نتایج پیش‌بینی شده از شبیه‌سازی عددی و آزمون تجربی صورت گرفته است. خطای محاسبه شده مطابق رابطه (۱) حدود ۱۵٪ می‌باشد.

طبق بررسی‌هایی که انجام شد، می‌توان دریافت که عامل تاثیرگذار بر شکل نهایی قطعات دوفلزی، هندسه اولیه هسته و پوسته است. یافتن هندسه اولیه مناسب به ویژه در قطعات با شکل نهایی پیچیده بسیار دشوار و پرهزینه است ولی به کمک نرم افزار اجزا محدود می‌توان با صرفه‌جویی در زمان و هزینه، مدل‌های مختلف و زیادی را تحلیل کرد تا به نتیجه مطلوب رسید و درنتیجه مدل تایید شده را تولید کرد.

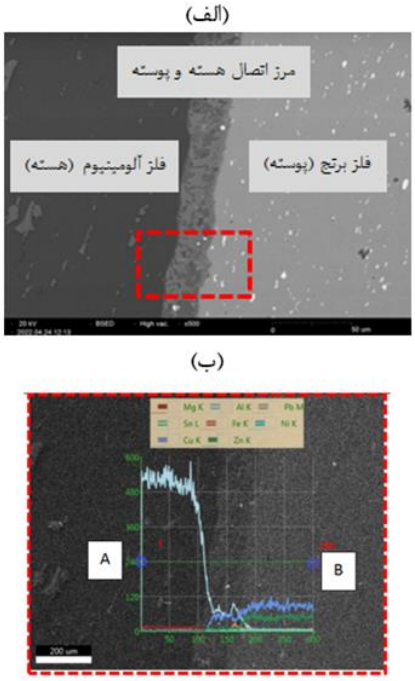
۴-۲-۴-بررسی میکروسکوپی

با استفاده از تصاویر SEM، اتصال بین هسته و پوسته در قطعه دوفلزی با هندسه اولیه L شکل، مورد بررسی قرار گرفت. آماده



شکل ۱۴) نمونه تجربی از نمای برش خورده قطعه دوفلزی با هندسه اولیه L شکل به همراه توزیع ضخامت پوسته (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

سازی قطعه برای تهیه تصویر SEM شامل ۷ مرحله پولیش با استفاده از سنباده می‌باشد تا سطح قطعه کاملا صاف و سیقلی شود. قطعه به ترتیب با سنباده‌های به تعداد دانه‌های ۱۲۰، ۲۴۰، ۳۶۰، ۸۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۵۰۰ پولیش شد. در مرحله آخر پولیش، قطعه با استفاده از پارچه و محلول حاوی آب و آلومینا کاملا صیقلی شد. شکل ۱۵- الف تصویر SEM از مرز اتصال هسته و پوسته با بزرگ‌نمایی ۵۰ میکرون را نشان می‌دهد. ناحیه مربوط به فلز برنج، ناحیه مربوط به فلز آلومینیوم و مرز اتصال دوفلز در این شکل کاملا مشهود است. همچنین، شکل۱۵- ب مقدار و نوع عناصر موجود در



شکل ۱۵) تصویر SEM الف) از مرز اتصال هسته و پوسته با بزرگنمایی ۵۰ میکرون، ب) مقدار و نوع عناصر در امتداد خط AB

هسته، پوسته و مرز اتصال با پیشروی از ناحیه مربوط به فلز آلومینیوم به سمت فلز برنج را نشان می‌دهد. در مسیر خط AB با شروع از نقطه A و حرکت به سمت نقطه B مقدار و نوع عناصر مشخص شده است. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد بیشترین مقدار عناصر موجود در هسته، مربوط به عنصر آلومینیوم و در ناحیه پوسته، عنصر مس و روی است. همچنین بیشترین عناصر موجود در مرز اتصال هسته و پوسته، آلومینیوم و مس بوده که تقریبا برابر نشان داده شده است.

۵-نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شبیه سازی تجربی و اجزا محدود قطعات دوفلزی با استفاده از فرآیند آهنگری داغ مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا مدل اجزا محدود توسط آهنگری داغ تک فلزات برنج و آلومینیوم مورد تایید قرار گرفت و سپس به بررسی و مطالعه تاثیر ضخامت پوسته برنجی، اختلاف ارتفاع پوسته و هسته و هندسه پیش‌فرم بر موفقیت آمیز بودن آهنگری داغ قطعه دوفلزی پرداخته شد. برخی از نتایج این پژوهش در ادامه بیان شده است:

- اولین عاملی که برای بررسی شکل‌دهی مناسب قطعه دوفلزی مورد بررسی قرار گرفته است، ضخامت پوسته می‌باشد. در هر سه ضخامت بررسی شده، مشکل عدم پوشش دهی هسته توسط پوسته مشاهده می‌شود. عامل دوم برای بررسی شکل‌دهی، بررسی اختلاف ارتفاع هسته و پوسته می‌باشد. ولی در این مورد نیز، مشکل عدم پوشش‌دهی هسته توسط پوسته مشاهده می‌شود.
- در ادامه هندسه‌های غیرساده یا پیش‌فرم برای هسته و پوسته اولیه در نظر گرفته شده است. در این بررسی، ۴ مدل پیش‌فرم فرض شده که در تمام موارد تلاش برای جبران کمبود مواد در بخش پایین پوسته است. بطوریکه یک پوشش کامل و یکنواخت از فلز برنج در سطح بیرونی قطعه ایجاد شود. در نهایت بر اساس شبیه‌سازی اجزا محدود پیش‌فرم با هندسه L شکل توانست هسته را به طور کامل پوشش دهد.
- جهت بررسی اتصال بین هسته آلومینیومی و پوسته برنجی، تصویر SEM از مرز بین دو فلز تهیه شد. نتایج نشان می‌دهد، در مرز اتصال بین هسته و پوسته، فلز جدید ایجاد شده است که بیشتر عناصر تشکل دهنده آن مس و آلومینیوم می‌باشد. بنابراین، پیوند مناسب در مرز بین هسته و پوسته تشکیل شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده، در ادامه، می‌بایست بررسی جامعی بر روی کیفیت و استحکام اتصال ایجاد شده بین دو فلز صورت گیرد و تاثیر عوامل مختلف هندسی و فرایندی مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین به‌منظور بهینه‌سازی پیش‌فرم، در ادامه یک خانواده هندسی از پیش‌فرم به‌صورت عامل محور باید تعریف گردد و سپس توسط روش‌های طراحی آزمایش به مطالعه تاثیر عوامل هندسی پرداخته خواهد شد.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

منابع مالی: هزینه‌های این پژوهش و یافته‌ها توسط شرکت ماشین سازی شمال پیروز پشتیبانی شده است.

منابع

1- Politis DJ, Lin J, Dean TA, Balint DS. An investigation into the forging of Bi-metal gears. Journal of Materials Processing Technology. 2014;214(11):2248-60.

2- Wu P, Wang B, Lin J, Zuo B, Li Z, Zhou J. Investigation on metal flow and forming load of bi-metal gear hot forging process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017;88(9):2835-47.

3- Abbasi M, Taheri AK, Salehi MT. Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process. Journal of Alloys and Compounds. 2001;319(1-2):233-41.

4- Nagasankar P, Gurusamy P, Gopinath S, Gnanaprakash K, Pradeep G. Optimization of process parameters on engine exhaust valves using Taguchi method in friction welding process. Materials Today: Proceedings. 2020; 33:3212-7.

5- Perkins TA, Kronenberger TJ, Roth JT. Metallic forging using electrical flow as an alternative to warm/hot working. Journal of Manufacturing Science and Engineering 2007;129(1):84-94.

6- Xiao YH, Guo C, Guo XY. Constitutive modeling of hot deformation behavior of H62 brass. Materials Science and Engineering: A. 2011;528(21):6510-8.

7- Momeni A, Ebrahimi GR, Faridi HR. Effect of chemical composition and processing variables on the hot flow behavior of leaded brass alloys. Materials Science and Engineering: A. 2015; 626:1-8.

8- Li PW, Li HZ, Huang LA, Liang XP, Zhu ZX. Characterization of hot deformation behavior of AA2014 forging aluminum alloy using processing map. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2017;27(8):1677-88.

9- Essa K, Kacmarcik I, Hartley P, Plancak M, Vilotic D. Upsetting of bi-metallic ring billets. Journal of Materials Processing Technology. 2012;212(4):817-24.

10- Förster W, Binotsch C, Awiszus B. Process chain for the production of a bimetal component from Mg with a complete Al cladding. Metals. 2018;8(2):97.

11- Kestens L, Jonas JJ. ASM Handbook, Vol. 14A, Metalworking: Bulk Forming. Materials Park: ASM International. 2005:685-700.

12- Zhang X, Wang X, Zhang D. Investigation into constitutive equation and hot compression

deformation behavior of 6061 al alloy. Tehnički vjesnik. 2019;26(5):1376-82.
13- Ji H, Liu J, Wang B, Zheng Z, Huang J, Hu Z. Cross-wedge rolling of a 4Cr9Si2 hollow valve: explorative experiment and finite element simulation. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015;77(1):15-26.
14- Fang G, Zhou J, Duszczyk J. Extrusion of 7075 aluminum alloy through double-pocket dies to manufacture a complex profile. Journal of materials processing technology. 2009; 209(6):3050-9.
15- Ebrahimzadeh I, Ashrafizadeh F. High temperature wear and frictional properties of duplex-treated tool steel sliding against a two phase brass. Ceramics International. 2014; 40(10):16429-39.