Archive of SID

مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، مهر 1398، دوره 6، شماره 4، ص‌ص. 7-13

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

تولید میله‌های دو لایه آلومینیوم-مس با استفاده از فرایند اکستروژن مستقیم داغ

حمیدرضا رضایی آشتیانی[1*]، علیرضا آهاری[2]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

2- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

*اراک، صندوق پستی 38135-1177، hr_rezaei@arakut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 آذر 1397

پذیرش: 27 بهمن 1397

ارائه در سایت: شهریور 1398

کلیدواژگان:

میله دو لایه

آلیاژ آلومینیوم AA7075

مس خالص

اکستروژن داغ

خواص مکانیکی

چکیده

امروزه استفاده از قطعات فلزی روکش داده شده به‌دلیل خواص قابل توجهی که نمی‌توان از مواد تک جنسی بدست آورد، در بسیاری از صنایع به سرعت در حال گسترش است. در این پژوهش تولید میله آلومینیومیAA7075 با روکش مس خالص به روش اکستروژن مستقیم داغ مورد بررسی قرار گرفته است. برای دستیابی به کیفیت مطلوب اتصال، اکستروژن مستقیم داغ در حالت‌های مختلف انجام شد و در نهایت آزمایش اصلی با زاویه قالب 45 درجه، نسبت اکستروژن 4 و دمای 480 درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. به‌منظور بررسی خواص مکانیکی میله روکش داده شده آزمون کشش بر میله آلیاژ آلومینیوم، مس خالص و میله اکستروژن داغ شده دو لایه Al-Cu انجام گرفت. همچنین میکروسختی و میکروساختار آلومینیوم روکش شده بررسی شد. نتایج نشان داد که با استفاده از فرایند اکستروژن مستقیم داغ می‌توان میله آلومینیومی با روکش مس تولید کرد که ضمن حفظ خواص الکتریکی و حرارتی، خواص مکانیکی و نسبت استحکام به وزن مطلوب، از کیفیت اتصال مناسب نیز برخوردار باشد. تصاویر میکروسکوپی نشان داد که متوسط ضخامت لایه مرزی اتصال آلومینیوم و مس حدود 22 میکرون است، ضمن اینکه از کیفیت و سختی قابل قبولی نیز برخوردار می‌باشد که نشان دهنده نفوذ و در هم تنیدگی مناسب دو جنس در یکدیگر می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد میله روکش داده شده از استحکام تسلیم، نهایی و همچنین شکل پذیری خوبی در مقایسه با هر کدام از میله‌های تک جنسی مورد استفاده برخوردار می‌باشد که حاکی از کیفیت مناسب میله روکش‌دار می‌باشد.

Fabrication of two layer Al/Cu rods using hot forward extrusion

Hamidreza Rezaei Ashtiani[1*], Alireza Ahari[2]

Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

*P.O.B. 38135-1177 Arak, Iran, hr_rezaei@arakut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 8 December 2018

Accepted 16 February 2019

Available August 2019

Keywords:

Internal turning tool

Experimental modal analysis

Dynamic modeling

Simulation

Active vibration control

Abstract

The use of clad material as a structural material is increasing in many industries because it has material properties that cannot be obtained from a single material. For the present study, a hot forward extrusion process was applied to fabricate aluminum/copper (Al/Cu) clad composite rod. The different of extrusion ratios and die angles were applied to obtain the best extrusion condition. Finally, hot forward extrusion process was applied at a temperature of 480 ◦C with extrusion ratio of 4 and Die angle of 45 . The purpose of this paper was fabrication of Al-clad Cu rods by hot forward extrusion. Materials that used in this research were aluminum alloy of AA7075 and pure commercial copper as clad material. There were some experiments among pure copper, AA7075 (both without any extrusion and cold work) and Al-clad Cu rods that included Mechanical Tensile Tests, Micro Hardness tests and Microstructure compare. Microstructure characterizations of the Al/Cu interface and the neighboring regions revealed the formation of a suitable and adhesive bonded layer with thickness of 22 microns and acceptable Microhardness. The mechanical properties results of AA7075, copper and two layer Al/Cu rods reveal that the Yield strength, Ultimate Tensile strength and Formability of extruded Al/Cu rods are suitable in compare to single material rods consist of AA7075 and copper rods.

1- مقدمه

اخیراً استفاده از مواد دوجنسی لایه‌ای به دلیل دستیابی به خواص متنوعی از ماده که نمی‌توان آنها را از مواد تک جنس بدست آورد، افزایش چشمگیری در صنایع مختلف داشته است [1]. مس بدلیل خواص مناسب حرارتی، رسانایی الکتریکی، رسانش حرارتی، مقاومت به خوردگی، ساخت راحت و مقاومت خستگی قابل قبول بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [2]. اگرچه مس خواص الکتریکی بالایی ارائه می‌کند ولی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Rezaei Ashtiani, A. Ahari, Fabrication of two layer Al/Cu rods using hot forward extrusion, Iranian Journal of Manufacturing Engineering,Vol. 6, No. 4, pp. 7-13, 2019. (in Persian)

www.SID.ir

Archive of SID

به‌خاطر چگالی بالا مانع از استفاده در طراحی‌های سبک می‌شود. بعلاوه قیمت بالای مس با افزایش هزینه‌های طراحی و تولید می‌گردد. بنابراین، به دلیل چگالی پایین‌تر و قیمت مناسب تر تلاش می‌شود در طراحی‌ها از فلز آلومینیوم در کنار مس استفاده شود. ساختارهای دو فلزی آلومینیوم-مس روش مفیدی برای جایگزین شدن به جای مس هستند. این ساختارها از طرفی وزن سبک و هزینه ی کمتر را فراهم می‌کنند و از طرفی ویژگی‌های ذاتی و خواص فیزیکی مورد نیاز فلز تک جنسی مس را به همراه دارد [2]. استفاده از قطعات آلومینیومی با روکش مس باعث کاهش 50 درصدی وزن و کاهش حدود 30 درصدی هزینه در مقایسه با مس خواهد شد [1]. به لحاظ خواص میله‌های دو لایه کاربرد و نیاز آنها در صنایع مختلف همواره در حال افزایش است و بدلیل ویژگیهایی مطلوب از جمله مقاومت خوردگی، خواص حرارتی و الکترومغناطیسی همزمان با خواص مکانیکی مناسب در حال رقابت با مواد تک لایه می‌باشد [3، 4]. روش‌های مختلفی برای تولید ترکیبات آلومینیوم-مس موجود می‌باشد که می‌توان به فرایندهایی چون ریخته گری پیوسته، جوشکاری انفجاری، نورد داغ برای تولید ورق‌های لایه‌ای مس-آلومینیوم، اکستروژن مستقیم و هیدرواستاتیک داغ، کشش سیم و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) اشاره کرد [5- 13].

چو و همکاران [5] قطعات دو لایه را به روش پر کردن عمودی هسته با ریخته گری پیوسته[1] تهیه کردند بطوری‌که آلومینیوم مذاب به‌عنوان هسته بصورت عمودی توسط ریخته گری پیوسته با مس مذاب روکش داده می‌شود. وو و همکاران [6] با استفاده از فرایند اکستروژن مقاطع دایروی دولایه شامل هسته داخلی سخت از جنس آلیاژ آلومینیوم AA7050 و پوسته خارجی از آلیاژ منیزیم AZ31 را تبدیل به نمونه‌هایی با مقاطع مستطیلی کردند و بطور خاص میکروساختار و رفتار مکانیکی این قطعات تولید شده مورد مطالعه قرار دادند. توسلی منش و علوی‌نیا [2] تولید لوله‌های دو لایه آلومینیوم-مس را با استفاده از روش جوش اصطکاکی اغتشاشی بررسی کردند. نتایج نشان داد اتصال و در هم تنیدگی مرزهای آلومینیوم و مس در روش اصطکاکی-اغتشاشی مناسب می‌باشد بطوری‌که در سرعت‌های دورانی و پیشروی بالا حرارت بالای تولید شده موجب تخریب کیفیت سطح و استحکام اتصالات آلومینیوم و مس می‌شود. ری و همکاران [1]، به بررسی قطعات دو لایه آلومینیومی با روکش مس در دمای 320 درجه سلسیوس و نسبت‌های اکستروژن[2] و زوایای قالب مختلف با استفاده از فرایند اکستروژن هیدرواستاتیک داغ پرداختند. نتایج بررسی آنها نشان می‌دهد که با افزایش نسبت اکستروژن سختی قطعات بالاتر رفته و توزیع سختی حالت یکنواخت تری به خود می‌گیرد و با افزایش زاویه قالب، فشار اکستروژن کاهش می‌یابد. همچنین ضخامت لایه در هم تنیدگی در نسبت اکستروژن 19 و زاویه قالب 45 درجه به حداکثر مقدار خود می‌رسد و بهینه‌ترین حالت برای اکستروژن استفاده از زاویه قالب 45 درجه می‌باشد. نزویک و همکاران [7] با بررسی دو لایه‌سازی از طریق فرایند اکستروژن لوله به روش اجزاء محدود و مدل سازی پلاستیسیته چند کریستال برای بررسی اثر قالب بر رفتار مکانیکی فرایند، سه طراحی مختلف قالب را آزمایش کردند. شامل معیارهای تنش‌های وارده بر سنبه و ماتریس اکستروژن، کیفیت سطح تماس، حداکثر نیروی شکل دهی، کریستالوگرافی و الگوی سطح و ناهمگنی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آنها نشان داد که قالب طراحی شده آنها در مقایسه با قالب‌های معمول در طراحی‌های متداول، نیروی اکستروژن کمتری را نیاز خواهد داشت. در مطالعه دیگری محققان به بررسی میکروسختی و نحوه اتصال در ناحیه مرزی مفتول آلومینیومی و روکش مس که با استفاده از اکستروژن مرکب مارپیچ مستقیم با تقارن محوری تولید می‌شد، پرداختند [13].

هدف از این تحقیق بررسی نحوه اتصال و تعیین خواص مکانیکی میله آلومینیومی آلیاژی پرکاربرد AA7075 با روکش مس خالص می‌باشد که با استفاده از روش اکستروژن مستقیم داغ تولید می‌گردد. برای دستیابی به میله دولایه مرکب با خواص قابل قبول فرایند اکستروژن مستقیم داغ ابتدا آزمایش‌های مختلف در شرایط مختلف فرایندی انجام می‌شود و سپس آزمایش‌های اصلی در دمای 480 درجه سلسیوس و بصورت هم دما با نسبت اکستروژن 4 و زاویه قالب 45 درجه انجام می‌شود و خواص مکانیکی میله روکش شده و همچنین خواص مکانیکی و ساختاری سطح تماس مشترک بررسی می‌گردد.

2- آزمایش‌های تجربی

میله آلومینیوم آلیاژی AA7075 با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول 1 که به‌عنوان مغز قطعه دو لایه مورد استفاده قرار می‌گیرد با قطر 7 میلی‌متر ماشین‌کاری شده و کیفیت سطح کاملاً پرداخت‌کاری و صیقل می‌گردد. مس خالص تجاری نیز که به‌عنوان روکش بصورت یک پوسته بر مغزه آلومینیومی قرار

[1] Vertical core-filling continuous casting
[2] Extrusion Ratio

www.SID.ir

Archive of SID

می‌گیرد به ترتیب با قطر خارجی و داخلی 10 و 7 میلی‌متر ماشین‌کاری و پرداخت‌کاری می‌گردد. همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است روکش مسی بر میله آلومینیومی به صورت پرسی قرار گرفته و یک میله دو لایه با قطر خارجی 10 میلی‌متر را جهت انجام فرایند اکستروژن مستقیم داغ فراهم می‌کند.

جدول 1 ترکیبات شیمیایی آلومینیوم AA7075

Table 1. Chemical Composition of AA7075

ترکیب	درصد وزنی
Al	91/4 -87/1
Cr	0/28 -0/18
Cu	2 -1/2
Fe	حداکثر 0/5
Mg	2/9 -2/1
Mn	حداکثر 0/3
Si	حداکثر 0/4
Ti	حداکثر 0/2
Zn	6/1 -5/1

Fig. 1 Two-layer rod for hot forward extrusion

شکل 1 میله دو لایه جهت انجام اکستروژن مستقیم داغ

سنبه و ماتریس مورد نیاز جهت اکستروژن مستقیم داغ با ابعاد نشان داده شده در شکل 2، از فولاد ابزار گرم‌کار H13 ساخته شده که پس از ماشین‌کاری ابتدا در تا دمای آستنیته 1030 درجه سلسیوس گرم و در روغن گرم سرد شده و سپس عملیات حرارتی بازپخت بر آن انجام می‌گیرد. دیگر اجزای قالب اکستروژن از فولاد C60 انتخاب شده که بمنظور دستیابی به استحکام و خواص مکانیکی مطلوب پس از ماشین‌کاری تا دمای 830 درجه سلسیوس حرارت داده شده و سپس در روغن سرد شده است. همان‌طور که مشخص است مقدار قطر قطعه ورودی به قالب اکستروژن 10 میلی‌متر و قطر محصول خروجی از قالب 5 میلی‌متر با نسبت اکستروژن 4 در نظر گرفته شده است ضمن اینکه زاویه قالب نیز 45 درجه می‌باشد.

برای انجام فرایند اکستروژن مستقیم داغ و تولید میله‌های آلومینیومی روکش داده شده مسی از پرس هیدرولیکی با ظرفیت اسمی 75 تن با کورس حرکتی 500 میلی‌متر و سرعت قابل تنظیم استفاده شده است. در این آزمایش سرعت 10 میلی‌متر بر ثانیه برای انجام اکستروژن انتخاب شده است. جهت تامین حرارت مورد نیاز انجام اکستروژن از یک کوره سرامیکی با ظرفیت تولید حرارت تا 600 درجه سلسیوس با قابلیت کنترل دمای قالب استفاده شده است. در این بررسی پس از انجام آزمایشات اولیه مختلف جهت دستیابی به دمای بهینه اکستروژن، دمای قالب در حین فرایند در حدود 480 درجه سلسیوس بصورت هم دما نگاه داشته شد که در محدوده دمای کار داغ آلومینیوم و مس مورد استفاده می‌باشد. در جدول 2 مشخصات دستگاه و برخی شرایط انتخاب شده برای پارامترهای فرایند اکستروژن مستقیم داغ ارائه شده است.

برای انجام فرایند اکستروژن مستقیم داغ مجموعه قطعه کار و قالب همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است به مدت 20 دقیقه در دمای 480 درجه سلسیوس پیش گرم می‌گردد.

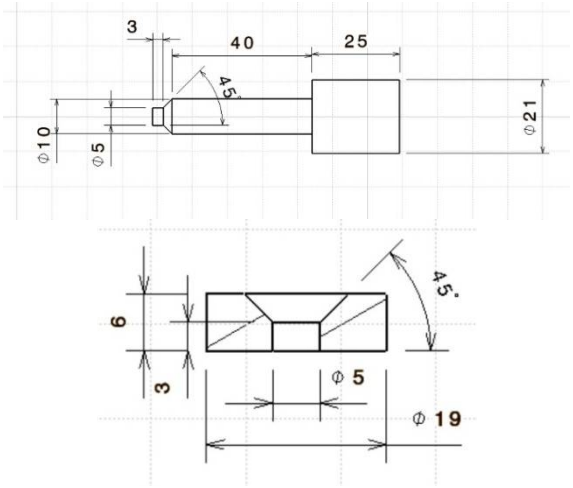

Fig. 2 Dimensions and measurements of punch and die using forward extrusion

شکل 2 ابعاد و اندازه سنبه و ماتریس مورد استفاده در اکستروژن مستقیم

جدول 2 پارامترهای تنظیم شده فرایند اکستروژن مستقیم داغ

Table 2. Setup of processing parameters of hot forward extrusion

ظرفیت پرس	75 تن
حداکثر سرعت پرس	25 میلی‌متر بر ثانیه
سرعت اکستروژن	10 میلی‌متر بر ثانیه
حداکثر مقدار جابجایی پرس	500 میلی‌متر
قطر قطعه قبل از اکستروژن	10 میلی‌متر
قطر محصول خروجی	5 میلی‌متر
دمای اکستروژن	480 درجه سلسیوس

www.SID.ir

Archive of SID

Fig. 3 Experimental setup of hot forward extrusion consists of the die, furnace and fixture

شکل 3 مجموعه قالب و قطعه در حال پیش گرم در کوره سرامیکی

با توجه به اصطکاک بالا در فرایند اکستروژن، انتخاب روان‌کار مناسب نقش مهمی در کنترل فرایند و دستیابی به خواص مطلوب قطعه خواهد داشت. در آزمایش‌های اولیه جهت بررسی عملکرد روان‌کار، از سه نوع روان‌کار گرافیت خشک، روغن صنعتی و ترکیب گرافیت-روغن استفاده شد که بهترین عملکرد با استفاده از روان‌کار ترکیبی گرافیت-روغن بدست آمد، لذا در انجام آزمایشات اصلی اکستروژن داغ از این روان‌کار استفاده شد.

برای بررسی نحوه اتصال و ضخامت این ناحیه پس از انجام فرایند اکستروژن مستقیم داغ نمونه‌ها پس از مراحل مختلف سنباده زنی و پولیش با استفاده از محلول کلر اچ انجام شده و متالوگرافی نمونه با استفاده از میکروسکوپ نوری انجام می‌گیرد. جهت بررسی کیفیت اتصال قطعه اکسترود شده و نواحی در هم تنیده سختی در موقعیت‌های مختلف نمونه اکسترود شده از مرکز نمونه تا سطح خارجی آن همان‌طور که در شکل 4 نشان داده شده است با استفاده از دستگاه میکرو سختی ویکرز اینوا انجام می‌گیرد. جهت بررسی استحکام و شکل‌پذیری قطعه آلومینیومی، مسی و و دو لایه آلومینیوم- مسی اکسترود شده از آزمایش کشش تک محوری استفاده شده است.

3- نتایج و بحث

در شکل 5 نمونه‌هایی از میله‌های دو لایه آلومینیوم-مس با قطر 5 میلی‌متر پس از فرایند اکستروژن مستقیم داغ در دمای 480 درجه سلسیوس با نسبت اکستروژن 4 و روان‌کاری گرافیت-روغن نشان داده شده است. ظاهر قطعات تولیدی از کیفیت اتصال و یکنواختی قابل قبولی برخوردار است.

Fig. 4 Innova vickers microhardness tester

شکل 4 دستگاه تست میکرو سختی ویکرز اینوا مورد استفاده

Fig. 5 Hot forward extruded Al-Cu rods

شکل 5 میله‌های دو لایه آلومینیوم-مس اکستروژن داغ مستقیم شده

همان‌طور که در شکل 6 ملاحظه می‌گردد ضخامت روکش مس بر آلیاژ آلومینیومی AA7075 در مکان‌های مختلف میله دو لایه بین 0/69- 0/55میلی‌متر است در حالی‌که قطر خارجی میله روکش شده حدود 5 میلی‌متر می‌باشد. از آنجا که ضخامت لوله مسی قبل از انجام اکستروژن 1/5 میلی‌متر بوده که بعد از آن به مقدار متوسط 0/65 میلی‌متر رسیده است پس به نسبت اکستروژن حدود 4/4 دست یافته که بسیار نزدیک به مقدار 4 بوده و نشان دهنده انجام اکستروژن بصورت یکنواخت با تغییر سطح نزدیک به هم روکش مسی با هسته آلومینیومی می‌باشد.

همچنین نتایج بررسی میکروساختاری میله دو لایه نشان می‌دهد که در هم تندیگی و اتصال میله آلومینیومی و روکش مسی بصورت مناسب و بدون درز انجام گرفته و ضخامت لایه مرزی بین هسته و پوسته همان‌طور که در شکل 7 ملاحظه

www.SID.ir

Archive of SID

می‌گردد تقریباً یکنواخت و حدود 22 میکرون می‌باشد.

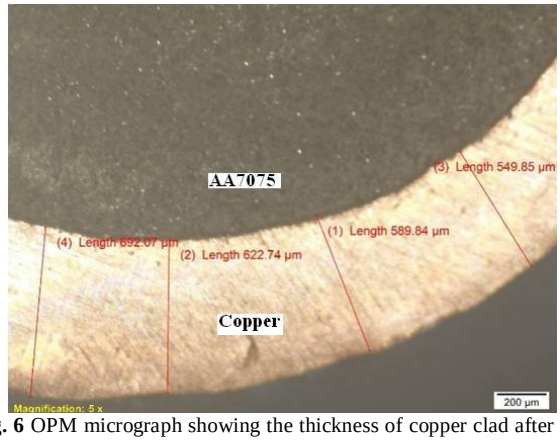

Fig. 6 OPM micrograph showing the thickness of copper clad after hot extrusion process

شکل 6 ضخامت لایه روکش مسی در نواحی مختلف اتصال با استفاده از میکروسکوپ نوری

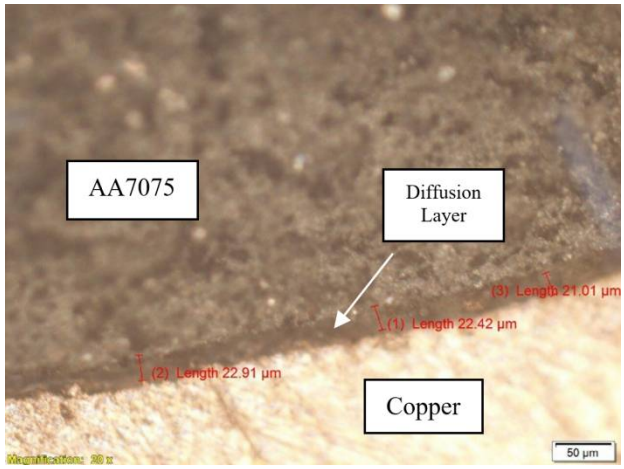

Fig. 7 OPM micrograph showing the thickness interface of AA7075/Cu after hot extrusion process

شکل 7 تصویر میکروسکوپ نوری از ضخامت لایه درهم تنیده آلومینیوم AA7075 با مس پس از اکستروژن داغ

بررسی نتایج آزمون میکرو سختی ویکرز نشان می‌دهد که میزان سختی از هسته آلومینیومی به روکش مسی کاهش می‌یابد و مقدار میکروسختی در لایه مرزی تقریباً با سختی روکش مسی برابر می‌باشد. همان‌طور که از نمودار شکل 8 مشخص می‌باشد لایه مرزی از استحکام قابل قبولی برخوردار می‌باشد.

نتایج آزمون کشش برای سه نمونه: آلومینیوم، مس و میله دولایه آلومینیوم-مس حاکی از رفتار مناسب و قابل قبول میله دو لایه اکسترود شده در مقایسه با فلزات تک جنسی می‌باشد (شکل 9). همان‌طور که از نمودار تنش-کرنش حقیقی این قطعات مشخص است ناحیه الاستیک ماده دوجنسی تا حدودی نزدیک به آلومینیوم می‌باشد، بطوری‌که مدول الاستیک مس بیشتر از آلومینیوم و مدول الاستیک میله روکش شده نزدیک به مدول الاستیک میله آلومینیومی AA7075 می‌باشد.

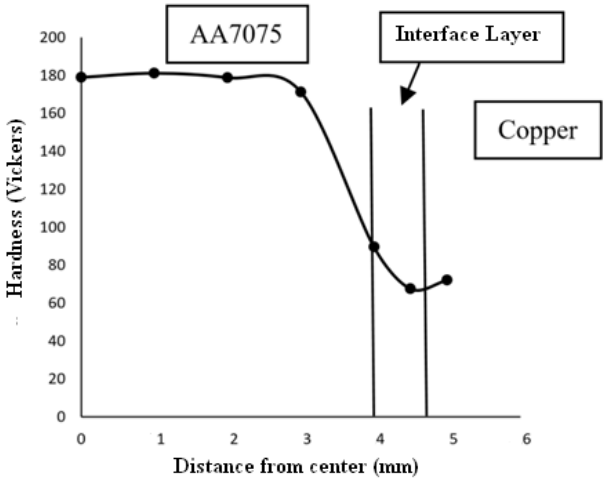

Fig. 8 Variations of rod hardness after hot forward extrusion

شکل 8 تغییرات میکروسختی با فاصله از مرکز میله

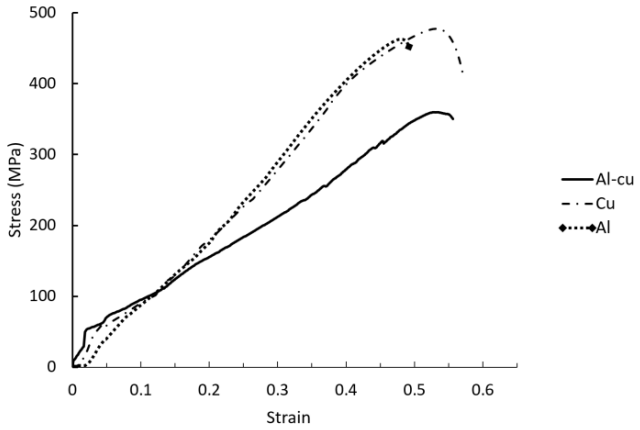

Fig. 9 The stress–strain curves for AA7075 (Al), Copper (cu) and copper clad AA7075 (Al-Cu)

شکل 9 منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی سه میله آلومینیومAA7075 (Al)، مس (Cu) و دو لایه آلومینیوم - مس (Al-Cu)

در شکل 10 استحکام تسلیم سه قطعه مس خالص، آلومینیوم AA7075 و میله دو لایه آلومینیوم-مس با یکدیگر مقایسه شده است، همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، میله روکش داده شده دارای استحکام تسلیم بیشتری از قطعه مسی و کمتر از آلیاژ آلومینیومی دارد.

بررسی نتایج استحکام کشش نهایی در شکل 11 نشان می‌دهد میله دو لایه آلومینیوم-مس دارای استحکام نهایی نزدیک به دو قطعه مسی و آلومینیومی و کمی کمتر از هر دو میله تک لایه می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

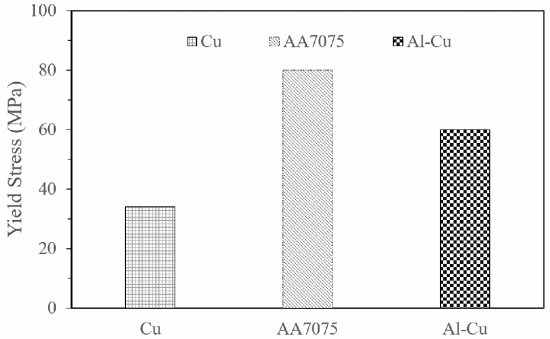

Fig. 10 Yield Stress comparison among AA7075, Copper (Cu) and copper clad AA7075 (Al-Cu) rods

شکل 10 مقایسه تنش‌های تسلیم میله‌های آلیاژ آلومینیوم (AA7075)، مس (Cu) و دو لایه آلومینیوم - مس (Al-Cu)

بررسی نتایج شکل پذیری قطعات نشان می‌دهد، آلومینیومی روکش داده شده با مس که توسط فرایند اکستروژن مستقیم داغ تولید شده از شکل پذیری بیشتری در مقایسه با میله‌های آلومینیومی و مسی تک لایه برخوردار می‌باشد (شکل 12). لذا آلومینیوم روکش داده شده توسط فرایند اکستروژن داغ قابلیت ایجاد تغییر شکل زیاد قبل از شکست را خواهد داشت که می‌تواند انتخاب مناسبی در مقایسه با فلزات تک لایه سازنده آن باشد.

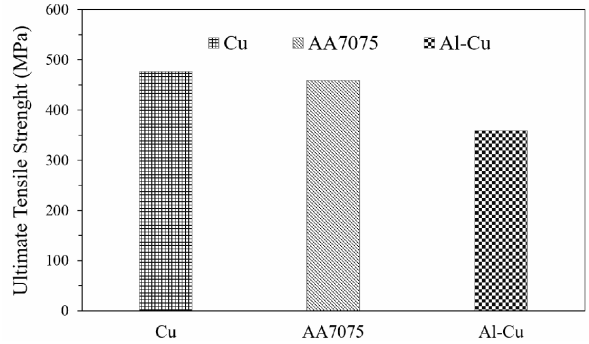

Fig. 11 Ultimate Tensile Strength comparison among AA7075, Copper (Cu) and copper clad AA7075 (Al-Cu) rods.

شکل 11 مقایسه استحکام نهایی کششی میله‌های آلیاژ آلومینیوم (AA7075)، مس (Cu) و آلومینیوم- روکش مس (Al-Cu)

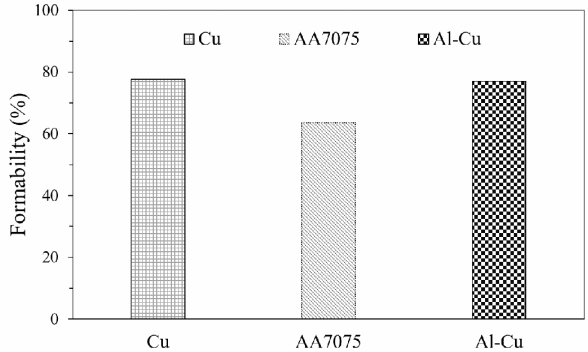

Fig. 12 Formability comparison among AA7075, Copper (Cu) and copper clad AA7075 (Al-Cu) rods.

شکل 12 مقایسه شکل پذیری میله‌های آلیاژ آلومینیوم (AA7075)، مس (Cu) و آلومینیوم با روکش مس (Al-Cu)

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش میله دو لایه آلومینیوم –مس که دارای کاربردهای صنعتی گسترده می‌باشد با استفاده از فرایند اکستروژن مستقیم داغ با کیفیت مناسب تولید شد که برای این منظور ابتدا طی انجام آزمایش‌های مقدماتی پارامترهای مختلف فرایندی از جمله دما، نسبت و زاویه قالب اکستروژن و نوع روان‌کار مورد بررسی قرار گرفت و بهترین حالت و کیفیت قطعات دو لایه تولیدی برای فرایند اکستروژن داغ در دمای 480 درجه سلسیوس، در قالبی با زاویه 45 درجه، و در نسبت اکستروژن 4 با روان‌کار گرافیت-روغن حاصل شد. همچنین کیفیت و رفتار مکانیکی میله‌های آلومینیومی AA7075 که توسط روش اکستروژن مستقیم داغ با مس خالص روکش شده است، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

- میله دولایه آلومینیوم- مس تولیدی از ظاهری مناسب با کیفیت مطلوب برخوردار می‌باشد. که نشان دهنده موفقیت آمیز بودن فرایند اکستروژن داغ در روکش کاری آلومینیوم می‌باشد.
- بررسی میکروساختاری حاکی از یکنواختی مناسب ضخامت روکش مسی در تمام محیط میله و همچنین کیفیت مناسب لایه وجه مشترک با متوسط ضخامت 22 میکرون است.
- مقدار سختی از هسته آلومینیومی به سمت روکش مسی کاهش می‌یابد و مقدار میکروسختی در لایه وجه مشترک تقریباً با سختی روکش مسی برابر می‌باشد.
- میله روکش داده شده دو لایه دارای استحکام تسلیم بیشتری از قطعه مسی است ولی مقدار آن از آلیاژ آلومینیومی کمتر می‌باشد. در حالی‌که استحکام کششی نهایی میله دو لایه از دو میله تک لایه کمتر ولی با اختلاف کم می‌باشد.
- میله روکش داده شده از شکل‌پذیری تا گسیختگی بیشتری در مقایسه با میله‌های آلومینیومی و مسی تک لایه برخوردار می‌باشد.

5- مراجع

[1] K.Y. Rhee, A., W.Y. Han, B., and H.J. Park, Fabrication of aluminum/copper clad composite using hot hydrostatic extrusion process and its material characteristics, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 384, No. 5, pp. 70–76, 2006.
[2] A. Tavassolimanesh, B. A. Alavi Nia, A new approach for manufacturing copper-clad aluminum bimetallic tubes by friction stir welding (FSW), *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 30, No. 5, pp. 374–384, 2017.
[3] S. Lee, M.G. Lee, S.P. Lee, G.A. Lee, Y.B. Kim, J.S. Lee, D.S. Bae, Effect of bonding interface on

www.SID.ir

1779-1788, 2017.

[9] M.M. Hoseini Athar, B. Tolaminejad, Weldability Window and the effect of Interface Morphology on the Properties of Al/Cu/Al Laminated Composites Fabricated by Explosive Welding, *Materials & Design*, Vol. 86, pp. 516-525, 2015.

[10] M. Akbari, R. Abdi Behnagh, A. Dadvand, Effect of materials position on frictionstir lap welding of Al to Cu, *Sci Technol Weld Join*, Vol. 17, pp. 581–588, 2012.

[11] H. Dyja, S. Mróz, A. Milenin, Theoretical and experimental analysis of the rolling process of bimetallic rods Cu-steel and Cu-Al, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.153, pp. 100-107, 2004.

[12] A. Gueydan, B. Domengès, E. Hug, Study of the intermetallic growth in copper-clad aluminum wires after thermal aging, *Intermetallics*, Vol. 50, pp. 34-42, 2014.

[13] T. Sapanathan, S. Khoddam, S. H. Zahiri, A. Zarei-Hanzaki, Strength changes and bonded interface investigations in a spiral extruded materials for bulk metal forming processes, *Materials Transactions*, Vol. 53, No. 1, pp. 201-208, 2012.

delamination behavior of drawn Cu/Al bar clad material, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, No. 3, pp. 645-649, 2012.

[4] X. Li, G. Zu, P. Wang, Effect of strain rate on tensile performance of Al/Cu/Al laminated composites produced by asymmetrical roll bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 575, pp. 61-64, 2013.

[5] Di CHU, A., Jian-yu ZHANG, B., Jin-jin YAO, C., Yan-qiu HAN, D, and Chun-jing WU, D., Cu−Al interfacial compounds and formation mechanism of copper cladding aluminum composites". *Transactions of Nonferrous Metal Society of China*, Vol. 27, pp. 2521–2528, 2017.

[6] Y. Wu, B. Feng, Y. Xin, R. Hong, H. Yu, Q. Liu, Microstructure and mechanical behavior of a Mg AZ31/Al 7050 lami- nate composite fabricated by extrusion, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 640, pp. 454–459, 2015.

[7] M. Knezevic, M. Jahedi, Y. P. Korkolis, I. J. Beyerlein, Material-based design of the extrusion of bimetallic tubes, *Computational Materials Science*, Vol. 95, pp. 63–73, 2014.

[8] T. Milan, G. Kugler, An approach to increasing the service lifetimes of nitrided dies for aluminium hot extrusion: A case study, *Wear* Vol. 376, pp.

www.SID.ir