



## تأثیر پوشش دهی آستر چدنی بر ایجاد پیوند با بدنه آلومینیومی با استفاده از فرایند آلفین

سجاد مطلبی<sup>۱</sup>، علیرضا حاجی علی محمدی<sup>۲\*</sup>، محمد کامیاب<sup>۳</sup>، مهدی میرزایی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۴- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: ahajiali@semnan.ac.ir

## اطلاعات مقاله

## چکیده

## مقاله پژوهشی

دریافت: ۷ فروردین ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۳ مرداد ۱۴۰۳

## کلیدواژگان:

فرایند آلفین

پوشش مس

فلاکس

ریخته‌گری مرکب

بدنه موتور با استوانه چدنی یکپارچه یک طرح کارآمد و مفید در کاهش وزن موتور، کاهش زمان و هزینه ماشین‌کاری و رفع آلایندگی ناشی از به‌کارگیری چدن است. با الگو برداری از فرایند آلفین که در تولید پیستون با رینگ چدنی یکپارچه به کار می‌رود، پژوهشی در ارتباط با استحکام پیوند بدنه آلومینیومی و استوانه چدنی با سطح خارجی متخلخل انجام شد، با توجه به این فرایند برای ایجاد پیوند بین دو جنس متفاوت در ریخته‌گری مرکب قطعه چدنی و بدنه آلومینیومی باید بهینه‌ترین حالت پارامترهای فرایند تولید مانند دمای حمام مذاب و زمان غوطه‌وری مناسب و ترکیبات عناصر حمام مذاب اتخاذ شود تا پیوندی مطمئن ایجاد گردد. از دیگر عوامل تأثیرگذار در برقراری این پیوند پوشش موجود بر روی قطعه چدنی قبل از غوطه‌وری در مذاب آلومینیوم می‌باشد تا برقراری پیوند متالورژیکی و مکانیکی را تسهیل کند. در این مقاله تأثیر پوشش مس به روش الکتروپلیتینگ و پوشش فلاکس بر روی استوانه چدنی با انجام تست کشش بر روی نمونه بررسی شده است. نتایج حاکی از استحکام پیوند بالاتر بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی در نمونه استوانه چدنی پوشش داده شده با عنصر مس به روش الکتروپلیتینگ می‌باشد.

## The effect of pre-coating porous surface cast iron cylinder of ALFIN process to create bonding with aluminum cylinder block

Sajad Motalebi<sup>1</sup>, Alireza Hajjalimohammadi<sup>2\*</sup>, Mohamad Kamyab<sup>3</sup>, Mahdi Mirzaei<sup>4</sup>

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- PhD Candidate, Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

4- PhD Candidate, Department of Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: ahajiali@semnan.ac.ir

## Article Information

## Original Research Paper

Received: 26 March 2024

Accepted: 13 August 2024

## Keywords:

Alfin Process

Copper Coating

Flux

Composite Casting

## Abstract

The cylinder block with an integrated cast iron cylinder is an efficient and useful design in reducing the weight of the engine, reducing the time and cost of machining and removing the pollutants caused by using cast iron. By modeling the Alfin process, which is used in the production of a piston with an integrated cast iron ring, a research was conducted on the strength of the bond between the aluminum cylinder block and the cast iron cylinder with a porous outer surface, considering this process to create a bond between two different materials in composite casting. The cast iron part and the aluminum cylinder block should be adopted in the most optimal state of the parameters of the production process, such as the temperature of the molten bath and the appropriate immersion time, and the composition of the elements of the molten bath, in order to create a reliable bond. Another factor influencing the establishment of this bond is the coating on the cast iron part before immersion in the melt. It is aluminum to facilitate metallurgical and mechanical bonding. In this article, the effect of copper coating by electroplating method and flux coating on cast iron cylinder has been investigated by performing a tensile test on the sample. The results indicate a higher bond strength between the cast iron cylinder and the aluminum cylinder block in the sample of the cast iron cylinder coated with copper element by electroplating method.

## Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Motalebi S, Hajjalimohammadi A, Kamyab M, Mirzaei M. The effect of pre-coating porous surface cast iron cylinder of ALFIN process to create bonding with aluminum cylinder block. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jul 22;11(5):24-31. doi: 10.22034/IJME.2024.449505.1940 [In Persian]

## ۱- مقدمه

با توجه به این که بدنه‌های چدنی به دلیل وزن زیاد آن‌ها، آلودگی‌های زیست محیطی چدن، انتقال حرارت ضعیف‌تر، افزایش زمان و هزینه ماشین کاری و تلفات بیشتر انرژی و مصرف ابزار جایگاه خود را در صنعت خودرو از دست داده‌اند، نیاز روز افزون کاهش مصرف چدن در بدنه موتور در طرح‌های جدید توسعه قوای محرکه بیش از پیش نمود پیدا می‌کند. توسعه بدنه آلومینیومی با استوانه چدنی یکپارچه<sup>۱</sup> در طراحی محصولات جدید ویژگی‌هایی دارد که به صورت همزمان مباحث مربوط به کاهش وزن، بهبود انتقال حرارت و حفظ استحکام سایشی در مقایسه با بدنه‌های چدنی قابل دستیابی خواهد کرد. در تولید بدنه سیلندر آلومینیومی با استوانه چدنی یکپارچه چالش‌هایی وجود دارد که مانع از اتصال قوی استوانه چدنی به بدنه آلومینیومی می‌شود؛ از جمله این چالش‌ها، تفاوت عناصر آلیاژی هر دو جنس، تفاوت نقطه ذوب، تفاوت در ریز ساختار و شبکه بلوری آن‌ها می‌باشد [۱-۶].

به منظور افزایش قدرت اتصال در ریخته‌گری مرکب دو فلزی، بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی با توجه به الگوبرداری از محصولات سایر شرکت‌ها از انواع طرح سطح خارجی مختلفی برای استوانه چدنی استفاده شده است و با توجه به نتایج پژوهش ادمو و همکاران [۷]، الگوی سطح خارجی متخلخل بهترین نتیجه را حاصل می‌کند و با توجه به نتایج در این پژوهش، از استوانه چدنی با سطح خارجی متخلخل استفاده شده است.

با هدف ایجاد پیوند بین فلزی دو جنس متفاوت استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی با الگوبرداری از فرایند تولید پیستون آلومینیومی با رینگ چدنی یکپارچه یا به اصطلاح پروسه تولید آلفین، با غوطه‌وری قطعه چدنی در مذاب آلیاژ آلومینیوم لایه بین فلزی بین آلومینیوم و چدن برقرار می‌شود که ایجاد پیوند فلزی بین دو جنس متفاوت می‌کند [۸-۹].

با توجه به نتایج مقالات مولا و همکاران [۱۰]، پیتروسکی و همکاران [۱۱] و لی و همکاران [۱۲]، برای غوطه‌وری قطعه چدنی در مذاب آلیاژ آلومینیوم دمای غوطه‌وری بازه بین ۷۳۰ تا ۷۵۰ درجه می‌تواند مناسب باشد. همان‌طور که در مقالات ذکر شده است، در دمای بالاتر ضخامت تشکیل لایه بین فلزی دو قطعه ناهم‌جنس بیشتر می‌شود. با الگو برداری از مقالات، بازه زمان غوطه‌وری بین ۳ تا ۲۰ دقیقه را می‌توان انتخاب کرد. طبق نتایج به دست آمده، افزایش زمان ضخامت تشکیل لایه بین فلزی را افزایش می‌دهد؛ اما در پژوهش حاضر با توجه به پوششی که بر روی استوانه چدنی اعمال شده زمان زیاد ممکن است باعث بی اثر شدن پوشش شود.

راجا و همکاران [۱۳]، تأثیر چهار نوع پوشش مختلف (مس، نقره، برنج، کادمیوم) بر روی استوانه‌های فولادی در تشکیل پیوند متالورژیکی در ریخته‌گری مرکب استوانه فولادی و بدنه آلومینیومی را بررسی کردند. نتایج آزمون پانچ برشی از نمونه‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌ی استوانه فولادی پوشش داده شده با عنصر مس بیشترین استحکام را ایجاد می‌کند. سلیمی و همکاران [۱۴] اثر پوشش دهی آلومینیوم به روش غوطه‌وری در مذاب و پوشش دهی مس به روش التروپلیتینگ بر روی قطعه فولادی در ایجاد پیوند متالورژیکی در ریخته‌گری دو فلزی بین فولاد و آلومینیوم (ریز ساختار و خواص مکانیکی لایه واکنش بوجود آمده) را بررسی کردند. نتایج حاصل از آزمون فشار بر روی نمونه‌ها نشان می‌دهد که قطعات استوانه‌ای فولادی پوشش دهی شده به روش الکتروپلینگ با فلز مس استحکام برشی بیشتری نسبت به قطعات پوشش دهی شده به روش غوطه‌وری در مذاب آلومینیوم را داشته‌اند. با توجه به نتایج این مقالات یکی از مواد انتخابی به عنوان پوشش بر روی استوانه چدنی، عنصر مس می‌باشد؛ همچنین مقاله یوسفی و دوست محمدی [۱۵] و افشاری و همکاران [۱۶] نشان می‌دهد که آلومینیوم میل به ترکیب با عنصر مس دارد.

یک راه مناسب جهت افزایش کیفیت اتصال بین فلزی افزایش خاصیت ترشوندگی سطح استوانه چدنی است که در مذاب غوطه‌ور می‌شود، افزایش خاصیت ترشوندگی سطح باعث افزایش تماس مذاب به سطح جامد استوانه چدنی می‌شود؛ به همین دلیل از فلاکس جهت ایجاد یک لایه بسیار نازک پوشش بر روی سطح استوانه با هدف افزایش خواص ترشوندگی سطح استفاده می‌شود، از ویژگی‌های فلاکس مورد استفاده نقطه ذوب پایین تر نسبت به دمای مذاب استفاده شده در غوطه‌وری داغ می‌باشد [۱۷-۱۹]. با توجه به پژوهش یانگ و همکاران [۱۸] و با توجه به آن که قطعه چدنی به کار برده شده در ریخته‌گری مرکب پژوهش ایشان نزدیک‌ترین شباهت ترکیبات عنصری را با استوانه چدنی مورد استفاده در این مقاله دارد، از فلاکس پیشنهاد شده ایشان در این مقاله استفاده شد.

<sup>1</sup> Cast-in Liner Cylinder Block

باتوجه به پژوهش‌های صورت گرفته، سعی شده است در این مقاله تأثیر دو نوع پوشش مختلف، پوشش مس به روش الکتروپلینگ و استفاده از فلاکس در ایجاد پیوند متالورژیکی و پیوند مکانیکی در ریخته‌گری بدنه آلومینیومی با استوانه چدنی یکپارچه با الگوبرداری از فرایند تولید پیستون آلومینیومی با رینگ چدنی یک پارچه یا به اصطلاح آلفین مورد بررسی قرار گیرد.

## ۲- مواد و روش

از آلیاژ GLC1 برای ساخت استوانه چدنی با سطح خارجی متخلخل استفاده شده و  $AlSi_8Cu_3$  به عنوان آلیاژ بدنه آلومینیومی انتخاب شده است. در شکل ۱ نمونه استوانه چدنی با سطح خارجی متخلخل به کار برده شده در فرایند قابل مشاهده می‌باشد.



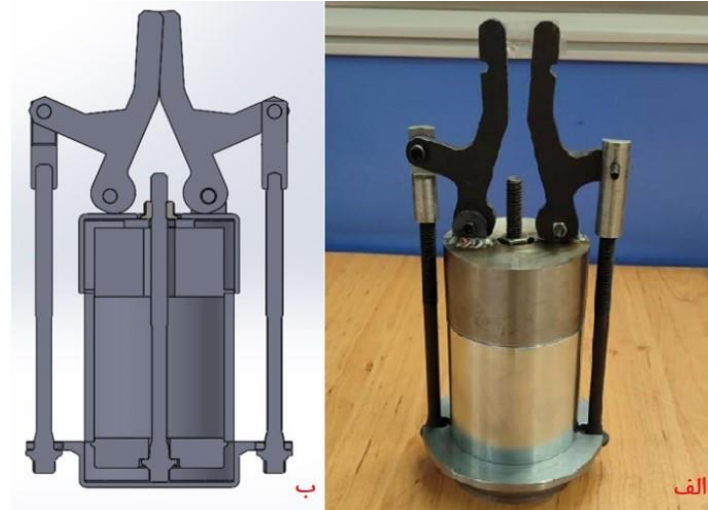
شکل ۱ استوانه با سطح خارجی متخلخل [۲۰]

دو نمونه استوانه با سطح خارجی متخلخل یکی پوشش‌دهی شده با عنصر مس به روش الکتروپلینگ و دیگری با یک لایه بسیار نازک پوشش فلاکس در ریخته‌گری دو فلزی به کار برده شد. فلاکس مورد استفاده با الگوبرداری از مقاله یانگ و همکاران [۱۸] حاوی ۵۴ گرم  $KCl$  و ۴۶ گرم  $KF$  به صورت محلول در یک لیتر آب در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد با مدت زمان غوطه‌وری استوانه چدنی در محلول فلاکس به مدت ۱۰ دقیقه با هدف ایجاد لایه‌ای از ترکیبات فلاکس بر روی سطح به کار گرفته شد. پس از تولید نمونه استوانه‌های چدنی همراه با دو پوشش مس به روش الکتروپلینگ و پوشش فلاکس نمونه‌ها با توجه به الگوبرداری از مقالات در بازه دمایی بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش گرم شدند تا احتمال شکست و خرابی استوانه‌ها ناشی از شوک حرارتی کاهش یابد [۱۰-۱۲]؛ سپس نمونه‌ها در مذاب  $AlSi_8$  در مدت زمان ۸ دقیقه غوطه‌ور شدند و به منظور جلوگیری از تشکیل لایه اکسیدی استوانه‌های غوطه‌ور شده در مذاب، فوراً به قالب شکل ۲ منتقل شده و عملیات ریخته‌گری انجام شد.



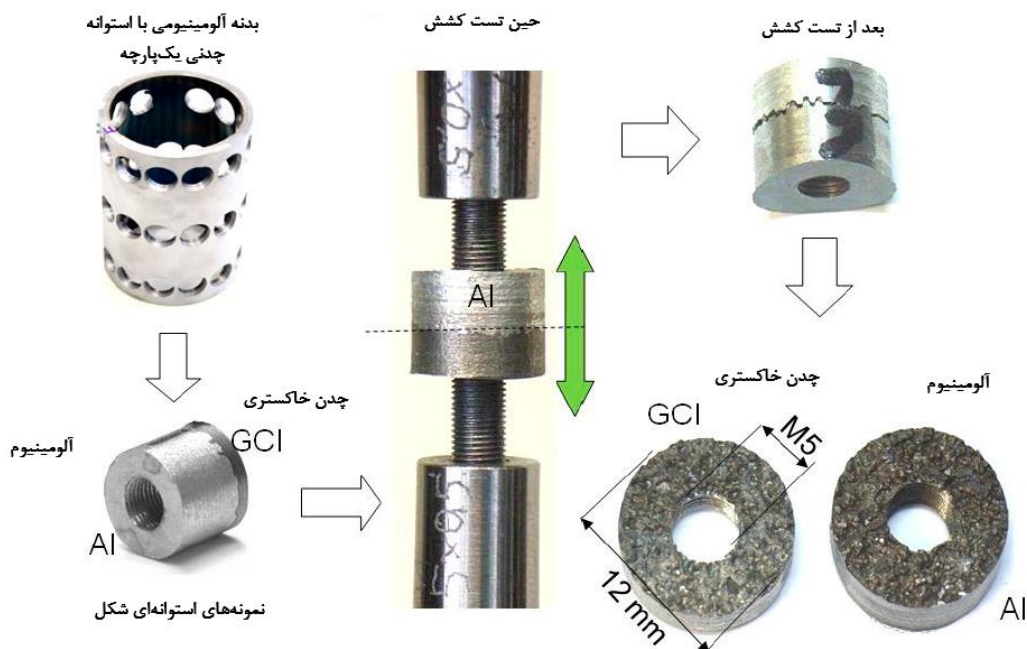
شکل ۲ قالب فولادی استفاده شده در ریخته‌گری

جهت جلوگیری از ورود مذاب به فضا داخلی لاینر، پس از فروری در مذاب داغ و همچنین قرارگیری مناسب آن در درون قالب، نیاز به نگهدارنده به عنوان یکی از تجهیزات ریخته‌گری احساس شد. طراحی‌های اولیه و نسخه‌های بعدی با توجه به نتایج و بازخورد تیم ریخته‌گری، طراحی و اصلاح شد. شکل ۳، فیکسچر نهایی طراحی و ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳ فیکسچر فروری در مذاب به همراه پوش چدنی، (الف) فیکسچر طراحی شده، (ب) مجموعه ساخته شده

با الگوبرداری از مقالات ادمو و همکاران [۷] و همچنین رجوسکی و همکاران [۲۱]، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۲ میلی‌متر و سوارخ M5 تهیه شدند (مطابق شکل ۴). از هر استوانه تعداد چهار نمونه تست کشش تهیه شده، این نمونه‌ها از نقاط مختلف قطعه حاصل شده تا بررسی شود در نقاط مختلف، اختلاف بین نیروهای پیوند چه مقدار است.

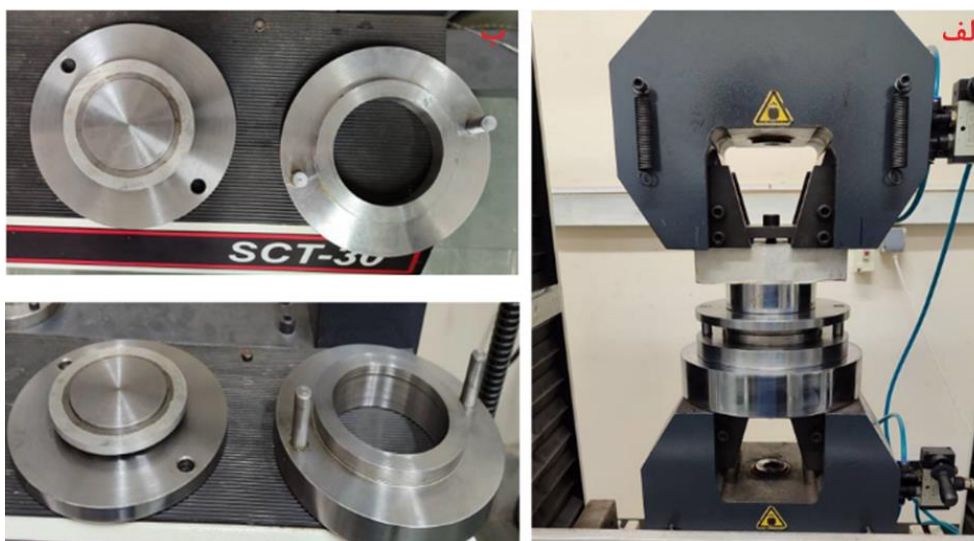


شکل ۴ ابعاد و شرایط تهیه نمونه‌های آزمون کشش جهت بررسی اتصال بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی [۷]



شکل ۵ الف) نمونه تهیه شده از بدنه سیلندر ساده‌سازی شده جهت آزمون کشش، ب) نمونه قطعات ریخته‌گری شده بدنه سیلندر ساده‌سازی شده پس از تهیه نمونه‌های آزمون کشش

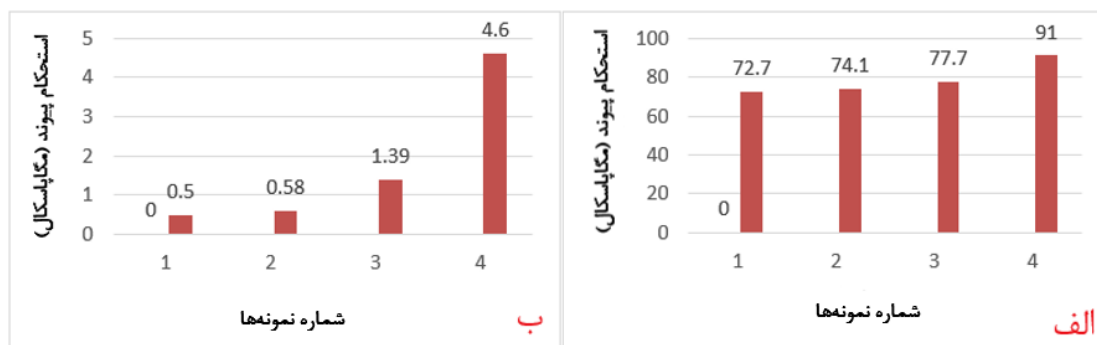
به منظور انجام آزمون استحکام برشی، فیکسچر خاص مبتنی بر دستگاه آزمون کشش- فشار طراحی شده است. تصویر این فیکسچر طراحی و ساخت شده، در شکل ۶ نشان داده شده است. در این آزمون استحکام برشی سطح تماس دو جنس چدن- آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفته و این استحکام ایجاد شده به صورت برشی با مطالعات پیشین [۱۴] مقایسه شد و در محدوده قابل قبول قرار گرفت. جهت آماده‌سازی نمونه برای اجرا این آزمون نمونه‌های واقعی از مجموعه ریخته‌گری شده به ارتفاع ۵ میلی‌متر جدا شده و با قرار دادن در فیکسچر و با اجرا آزمون فشار، استحکام برشی اتصال بین دو ماده سنجیده شده است.



شکل ۶ فیکسچر و نمونه دیسکی برای آزمون استحکام برشی، الف) فیکسچر و نمونه دیسکی تحت انجام آزمون استحکام برشی، ب) فیکسچر ساخته شده به همراه نمونه تست برشی

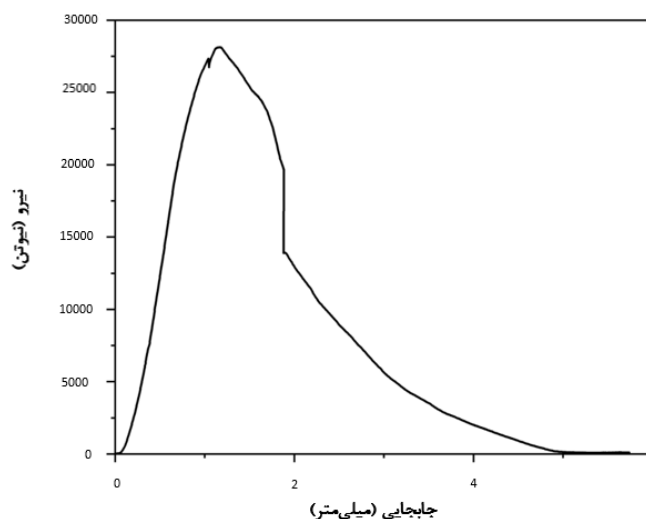
### ۳- نتایج و بحث

نتایج آزمون کشش با توجه به نمونه‌های تست کشش تهیه شده جهت سنجش استحکام پیوند بین بدنه آلومینیومی و استوانه چدنی در دو سری نمونه‌های پوشش‌دهی شده با عنصر مس و نمونه‌های فلاکس‌زنی شده در شکل ۸ و ۹، نمایش داده شده است. استحکام ایجاد شده با مقایسه مطالعات پیشین [۷، ۲۱]، نشان دهنده استحکام مطلوب بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی است.



شکل ۷ استحکام پیوند نمونه های تست کشش پوشش دهی شده، (الف) با عنصر مس، (ب) با فلاکس

شکل ۸ نمودار حاصل از آزمون استحکام برشی با توجه به نمونه دیسکی آماده‌سازی شده که تجهیزات مورد استفاده آن در شکل ۶ اشاره شده را نشان می‌دهد. آزمون فشار در آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشکده مواد و متالورژی دانشگاه سمنان و با استفاده از دستگاه آزمون کشش- فشار شرکت سنتام انجام شد. براساس خروجی این آزمون، حداکثر نیروی برشی برابر  $28073$  نیوتن و مقدار تنش برشی تقریبی در حدود  $21$  مگاپاسکال می‌باشد.



شکل ۸ نمودار استحکام برشی نمونه دیسکی چسبندگی بین بدنه آلومینیومی با استوانه چدنی یک‌پارچه

در پژوهش قبلی [۲۰]، استوانه چدنی تنها پس از پوشش دهی عنصر مس به روش الکتروپلیتینگ و بعد از پیش گرم، در قالب قرار گرفته و ریخته‌گری انجام شد. اضافه کردن فرایند غوطه‌وری در مذاب آلومینیوم و بررسی نتایج آزمون کشش نشان دهنده ارتقا فرایند و بهبود کیفیت اتصال استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی است. در نقاط مختلف قطعه نتایج متفاوتی از نیروی پیوند مشاهده می‌شود و دلیل آن حفره‌های ناشی از انقباضات ایجاد شده ناشی از جهت‌گیری‌های انجماد در قسمت‌های مختلف است و تأثیر این پوشش‌ها در کاهش این حفره و تخلخل‌ها می‌باشد. میانگین استحکام پیوند نمونه‌های تست کشش پوشش داده شده با عنصر مس  $78.87$  مگاپاسکال و میانگین استحکام پیوند نمونه های تست کشش با پوشش فلاکس  $7.07$  مگاپاسکال می‌باشد. این اختلاف شدید نشان دهنده برتری پوشش مس به روش الکتروپلیتینگ نسبت به پوشش فلاکس می‌باشد. کمتر بودن تأثیر پوشش فلاکس بر روی استحکام کششی و نیز اختلاف نسبتاً زیاد نتایج در چهار نمونه مختلف می‌تواند نشان دهنده این مفهوم باشد که پوشش فلاکس به طور یک‌نواخت بر روی سطح متخلخل استوانه چدنی توزیع نشده است و به همین دلیل در نمونه‌های تهیه شده در نقاط مختلف قطعه نتایج با یکدیگر اختلاف زیادی دارند؛ همچنین می‌توان نتیجه گرفت که دلیل ایجاد این نیروی پیوند ضعیف وجود تخلخل و حفره‌های کوچک بین استوانه جامد و بدنه آلومینیومی است.

## ۴- نتیجه‌گیری

با آن‌که سطح متخلخل ریخته‌گری استوانه چدنی خود یک پیوند مکانیکی بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی ایجاد می‌کند، اما نیروی این پیوند کافی نیست و با توجه به فضای خالی که بین دو جنس متفاوت در ریخته‌گری مرکب ایجاد شده انتقال حرارت بین قطعه چدنی و آلومینیومی کاهش می‌یابد، با هدف افزایش چسبندگی بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی در ریخته‌گری مرکب و کاهش تخلخل بین دو جنس متفاوت روشی تحت عنوان آلفین با امتیاز ایجاد لایه واکنش بین دو جنس متفاوت اعمال شد. پوشش‌دهی بر روی استوانه چدنی باعث افزایش خاصیت ترشوندگی سطح و افزایش واکنش بین دو قطعه مجزا در عملیات غوطه‌وری داغ خواهد شد. با علم بر این موضوع، دو پوشش مس و فلاکس بر روی استوانه‌های چدنی اعمال شد و نتایج تست کشش برتری پوشش مس به روش الکتروپلیتینگ با کمترین استحکام پیوند مشاهده شده، ۷،۷ مگاپاسکال نسبت به بیشترین استحکام مشاهده شده در پوشش‌دهی با فلاکس ۴،۶ مگاپاسکال در ایجاد پیوند و اتصال با کیفیت و مطمئن را نشان می‌دهد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی خود را از شرکت تحقیق و طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) به واسطه حمایت‌های بی‌دریغشان در تهیه این مقاله را اعلام می‌دارند. نویسندگان خود را ملزم می‌دانند از شرکت رینگ خودرو پارس که در خصوص تهیه قطعات استوانه چدنی مساعدت نمودند تشکر و قدردانی نمایند. همچنین از شرکت صنعت گستران شریف بابت همکاری ایشان در تهیه نمونه‌های ریخته‌گری و انجام پوشش قطعات تشکر و قدردانی می‌گردد.

## References

- [1] Salonitis K, Jolly M, Pagone E, Papanikolaou M. Life-cycle and energy assessment of automotive component manufacturing: The dilemma between aluminum and cast iron. *Energies*. 2019 Jul 3;12(13):2557. doi: 10.3390/en12132557
- [2] Salonitis K, Jolly M, Zeng B. Simulation based energy and resource efficient casting process chain selection: A case study. *Procedia Manufacturing*. 2017 Jan 1;8:67-74. doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.008
- [3] Ferro P, Fabrizi A, Bonollo F, Berto F. Influence of aluminum casting alloys chemical composition on the interaction with a 304L stainless steel insert. *Procedia Structural Integrity*. 2021 Jan 1;33:189-97. doi: 10.1016/j.prostr.2021.10.023
- [4] Yu H, Zhang G, Lv W, Xu H, Xu C. Improved microstructure and shear strength of the Al/steel bimetal prepared by compound casting under magnetic field. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023 Jan 15;932:167343. doi: 10.1016/j.jallcom.2022.167343
- [5] Mao F, Zhang P, Wei S, Chen C, Zhang G, Xiong M, Wang T, Guo J, Wang C. Interface Microstructure and Mechanical Properties of Al/Steel Bimetallic Composites Fabricated by Liquid-Solid Casting with Rare Earth Eu Additions. *Materials*. 2022 Sep 20;15(19):6507. doi: 10.3390/ma15196507
- [6] Saligheh A, Hajjalimohammadi A, Abedini V. Cutting forces and tool wear investigation for face milling of bimetallic composite parts made of aluminum and cast iron alloys. *International Journal of Engineering*. 2020 Jun 1;33(6):1142-8. doi: 10.5829/IJE.2020.33.06C.12
- [7] Soares E, Rejowski E, Maurizi M. Cast-In Cylinder Liners Designs to Improve Bonding and Shear Strength for Aluminum Block. *SAE Technical Paper*; 2012 Oct 2. doi: 10.4271/2012-36-0449
- [8] Manasijević S, Radiša R, Brodarac ZZ, Dolić N, Djurdjevic M. Al-Fin bond in aluminum piston alloy & austenitic cast iron insert. *International Journal of Metalcasting*. 2015 Oct;9:27-32. doi: 10.1007/BF03356037
- [9] Acar AF, Ozturk F, Bayrak M. Effects of variations in alloy content and machining parameters on the strength of the intermetallic bonding between a diesel piston and a ring carrier. *Mater. Technol*. 2010 Nov 1;44(6):391-5.
- [10] Mola R, Depczyński W. Characterization of coatings on grey cast iron fabricated by hot-dipping in AlSi11 alloy. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2014 Jul;68(1):20-3.
- [11] Pietrowski S, Szymczak T. Effect of silicon concentration in bath on the structure and thickness of grey cast iron coating after aluminizing. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2007 Jul;28(7):437-40.
- [12] Li CA, Xiong J, Sun L, Liao Z, Peng MC. Effect of Si content in hot dipping aluminium bath on Al-Fe bonding layer of aluminium piston with reinforced cast iron ring. *Materials science and technology*. 2012 Aug;28(8):953-8. doi: 10.1179/1743284712Y.0000000034

- [13] Raja V, Kavitha M, Chokkalingam B, Ashraya TS. Effect of interlayers on mechanical properties of aluminium casting over stainless steel pipe for heat exchanger applications. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2020 Jun;73:1555-60. doi: [10.1007/s12666-020-01937-5](https://doi.org/10.1007/s12666-020-01937-5)
- [14] Salimi M, Malekan M, Nami B, Hoseiny H. Microstructure characteristics and mechanical properties of the interface layer of coated steel insert-aluminum bimetals. *Journal of Materials Research*. 2017 Feb;32(4):874-82. doi: [10.1557/jmr.2017.32](https://doi.org/10.1557/jmr.2017.32)
- [15] Yousefi M, Doostmohammadi H. Fabrication and characterization of functionally graded in-situ Al/Al-Cu-Cr composite by centrifugal casting process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Nov 21;7(9):52-64. [In Persian]
- [16] Afshari D, Modaresinia H, Karimi Ivanaki M, Entezarian MM. Experimental investigation on mechanical properties affected by dissimilar friction stir spot welding of aluminum 6061-T6 alloy to copper. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Aug 23;10(6):53-64. doi: [10.22034/ijme.2023.413891.1824](https://doi.org/10.22034/ijme.2023.413891.1824) [In Persian]
- [17] Wu M, Yang J, Huang F, Hua L, Xiong S. Bonding of cast iron-aluminum in bimetallic castings by high-pressure die casting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022 May;120(1):537-49. doi: [10.1007/s00170-022-08816-x](https://doi.org/10.1007/s00170-022-08816-x)
- [18] Liu Y, Bian X, Yang J, Zhang K, Feng L, Yang C. An investigation of metallurgical bonding in Al-7Si/gray iron bimetal composites. *Journal of Materials Research*. 2013 Nov;28(22):3190-8. doi: [10.1557/jmr.2013.328](https://doi.org/10.1557/jmr.2013.328)
- [19] Zhang J, Fan Y, Zhao X, Ma R, Du A, Cao X. Influence of duty cycle on the growth behavior and wear resistance of micro-arc oxidation coatings on hot dip aluminized cast iron. *Surface and Coatings Technology*. 2018 Mar 15;337:141-9. doi: [10.1016/j.surfcoat.2017.12.064](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.12.064)
- [20] Kamyab M, Hajjalimohammadi A, Motalebi S, Jadali A. Investigating the effect of the coating process on improving the quality of mechanical bonding in the casting of aluminum cylinder block with cast-in iron liner. *The Journal of Engine Research*. 2023 Jun 22;70(2):80-98. doi: [10.22034/er.2023.2014449.1017](https://doi.org/10.22034/er.2023.2014449.1017) [In Persian]
- [21] Rejowski E, de Souza JP, Rabello RB. New Coated Cast-In Liner to Improve Heat Transfer on Aluminum Blocks. *SAE Technical Paper*; 2016 Oct 25. doi: [10.4271/2016-36-0262](https://doi.org/10.4271/2016-36-0262)