



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

Mohamad Kamyab^{1,2}, Alireza Hajjalimohammadi^{1*}, Sajad Motalebi¹, Ali Jadali¹

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

² Irankhodro Powertrain Company (IPCo), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Cast-in Liner
Mechanical Bonding
Bonding Strenght
Coating
External Surface Pattern

ABSTRACT

Cast-in liner cylinder block, a crankcase with an integrated cast iron cylinder into the cylinder block, is an efficient and useful design in reducing the weight of the engine, reducing the time and cost of machining, and eliminating the environmental emission caused by the use of cast iron. The purpose of this article is to investigate the issues and challenges in the manufacturing process of this product. The most important issue in making an appropriated product is the bonding strength between the cast iron cylinder and the aluminum body, which is responsible for heat transfer between these two components. In this article, only the mechanical strength between the cast iron cylinder and the aluminum body is discussed. To achieve this goal, measures have been devised including the use of different coating methods, coating with different materials, and using different patterns such as grooves and porous casting surface (as cast) on the external surface of the cylinder to create a reliable and mechanical connection against the incoming forces caused by the piston movements and the difference is in the expansion of aluminum and cast iron components during engine operation. This study shows how a cylinder with a porous outer surface coated with zinc by melt immersion method produces a better bond quality than other tested designs concerning the bonding force of 320 N which is higher than other samples, also considering the Penetration liquid test determined that the thickness and length of cracks observed in the sample coated with zinc element is less than others.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: ahajiali@semnan.ac.ir (A. Hajjalimohammadi)

Received 27 October 2023; Accepted 26 Decmber 2023

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: 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 June 22;70(2):80-98. doi: [10.22034/ER.2023.2014449.1017](https://doi.org/10.22034/ER.2023.2014449.1017)

بررسی تأثیر فرآیند پوشش دهی در بهبود کیفیت اتصال مکانیکی در ریخته گری بدنه آلومینیومی با استوانه چدنی یکپارچه

محمد کامیاب^۱، علیرضا حاجی علی محمدی^{۱*}، سجاد مطلبی^۱، علی جدلی^۱

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
^۲ شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

استوانه چدنی یکپارچه
اتصال مکانیکی
استحکام اتصال
پوشش
الگوی سطح خارجی

چکیده

بدنه موتور با استوانه چدنی یکپارچه یک طرح کارآمد و مفید در کاهش وزن موتور، کاهش زمان و هزینه ماشینکاری و رفع آلاینده‌های ناشی از بکارگیری چدن است. هدف از این مقاله تحقیق در مورد مسائل و چالش‌های پیشرو در فرایند ساخت این محصول است. مهم‌ترین مسائل در ساخت محصول بی‌عیب، قدرت پیوند بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی است که وظیفه انتقال حرارت بین این دو جزء را دارد. در این مقاله تنها بر روی استحکام پیوند مکانیکی بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی بحث می‌شود. برای احقاق این هدف تدابیری اندیشه شده شامل بکارگیری روش‌های متفاوت پوشش دهی، پوشش‌هایی از مواد مختلف و استفاده از الگوهای متفاوت نظیر شیاردار و سطح متخلخل ریخته‌گری در سطح خارجی استوانه برای ایجاد پیوند مکانیکی مطمئن در برابر نیروهای وارده ناشی از حرکات سنبه و اختلاف در انبساط جزء، آلومینیومی و چدنی حین کارکرد موتور است. این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه استوانه با سطح خارجی متخلخل با پوشش روی با روش غوطه‌وری در مذاب با توجه به نیروی پیوند ۳۲۰ نیوتونی که بیشتر از سایر نمونه‌ها است کیفیت اتصال بهتری نسبت به سایر طرح‌های آزمایش شده ایجاد می‌کند، همچنین با توجه به آزمون مایع نافذ معین شد که در نمونه پوشش داده شده با عنصر روی، مقدار ضخامت و طول شکاف‌های مشاهده شده کمتر از سایرین است.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: ahajiali@semnan.ac.ir (علیرضا حاجی علی محمدی)

دریافت ۵ آبان ۱۴۰۲؛ پذیرش ۵ دی ۱۴۰۲

شاپای الکترونیکی: ۲۳۴۵-۴۱۲۱ / شاپای چاپی: ۱۷۳۵-۵۲۱۴

Cite this article: Kamyab M, Hajialimohammadi 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 June 22;70(2):80-98. doi: 10.22034/ER.2023.2014449.1017.

۱- مقدمه

با توجه به اینکه بدنه‌های چدنی به دلیل وزن زیاد آن‌ها، آلودگی‌های زیست‌محیطی چدن، انتقال حرارت ضعیف‌تر، افزایش زمان و هزینه ماشینکاری و تلفات بیشتر انرژی و مصرف ابزار جایگاه خود را در صنعت خودرو از دست داده‌اند و همچنین مشکلاتی که در طراحی بدنه موتور با استوانه تر^۱ وجود دارد 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^۲ در طراحی محصولات جدید ویژگی‌هایی دارد که به‌صورت همزمان هم مباحث مربوط به کاهش وزن، بهبود انتقال حرارت و حفظ استحکام سایشی در مقایسه با بدنه‌های چدنی قابل دستیابی خواهد کرد. در تولید بدنه استوانه 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 همبسته‌ای هر دو جنس، تفاوت نقطه ذوب، تفاوت در ریزساختار و شبکه بلوری آن‌ها می‌باشد [۸-۱].

برای ایجاد اتصال مطمئن، دو نوع پیوند مکانیکی و موادی باید ایجاد گردد. در ایجاد پیوند مکانیکی ایده‌هایی همچون بوش با سطح ماشین‌کاری شده دندانه‌دار^۳ و بوش با سطح ریخته‌گری متخلخل مطرح است که با قرارگیری اینسرتی بوش در قالب و سپس ریخته‌گری، جریان مذاب آلومینیوم وارد مک و حفره‌ها روی سطح خارجی بوش شده و با پرشدن این حفره‌ها با مذاب آلومینیوم اتصال مکانیکی بین این دو جنس متفاوت صورت می‌گیرد [۹].

سینا کیانفر و همکاران [۱۰]، در مطالعه خود تنش پسماند در بدنه یک موتور خطی چهار استوانه با استوانه چدنی یکپارچه که با روش ریخته‌گری تحت فشار بالا تولید شده بود را بررسی کردند نتایج آزمون ایشان نشان داد که بالا و پایین بوش چدنی تحت تنش فشاری ۴۵۰ مگاپاسکال در راستای محوری بوده است که از جمله دلایل ایجاد این تنش پسماند تفاوت در ضریب انقباض حرارتی آلومینیوم و چدن است، زیرا ضریب انقباض حرارتی آلومینیوم حدوداً دو برابر چدن است و دلیل دیگر ایجاد این تنش پسماند تفاوت در نرخ انجماد و انتقال حرارت در این نواحی است، با این وجود این تنش پسماند خود عاملی در ایجاد پیوند مکانیکی بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی است که در این طرح می‌تواند کارآمد باشد.

در نهایت از ویژگی‌های این طرح باید گفت که بدنه آلومینیومی موتور با استوانه چدنی یکپارچه، یک ساختار ترکیبی با مخلوط دو ماده که تحت عنوان ریخته‌گری مرکب شکل می‌گیرد می‌تواند خواص ایده آلی از خود ارائه دهد، خواصی که یک ماده منفرد نمی‌تواند از خود نشان دهد، به بیان دیگر همراه بودن خاصیت وزن سبک آلومینیوم و استحکام و مقاومت به سایش بالا چدن در یک مجموعه به روش ریخته‌گری مرکب حاصل می‌شود [۱۱، ۱۲].

باک^۴ و همکاران [۱۳]، در مطالعه خود ریخته‌گری مرکب قطعه‌ای از دو جنس A356 و St37 را از طریق ریخته‌گری تحت فشار پایین انجام دادند. آن‌ها در طرح خود لوله‌های فولادی را به روش غوطه‌وری در مذاب فلز روی پوشش دهی کردند سپس قبل از جای گذاری لوله‌های فولادی در قالب ریخته‌گری آن‌ها را تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش گرم کردند درحالی‌که دمای پیش گرم قالب ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است، دمای مذاب آلومینیوم در ریخته‌گری تحت فشار ۷۱۱ تا ۷۱۳ درجه سانتی‌گراد بوده است. آن‌ها پیوند موادی شکل گرفته در اثر ریخته‌گری مرکب را با استفاده از میکروسکوپ نوری، ذره‌بین روبشی و طیف‌سنج پراکنده انرژی اشعه ایکس و آزمون میکرو سختی ویکرز بررسی کردند، نتایج پیوند موادی موفق را بین آلومینیوم و فولاد گالوانیز شده نشان می‌دهد.

سلیمی و همکاران [۱۴]، اثر پوشش دهی آلومینیوم به روش غوطه‌وری در مذاب و پوشش دهی مس به روش

¹ Wet Liner

² Cast-in Liner Cylinder Block

³ Thread

⁴ Bakke

آبکاری روبشی^۱ بر روی قطعه فولادی در ایجاد پیوند موادی بین فولاد و آلومینیوم (ریزساختار و خواص مکانیکی لایه واکنش به وجود آمده) را بررسی کردند. نتایج حاصل از ذره‌بین نوری و ذره‌بین روبشی پیوند موادی موفق را گزارش می‌دهد. نتایج حاصل از آزمون فشار بر روی نمونه‌ها نشان می‌دهد که قطعات استوانه‌ای فولادی پوشش دهی شده به روش آبکاری روبشی با فلز مس استحکام برشی بیشتری نسبت به قطعات پوشش دهی شده به روش غوطه‌وری در مذاب آلومینیوم را داشتند.

جیانگ^۲ و همکاران [۱۵]، تأثیر پوشش دهی آلیاژ روی حاوی ۰٫۱ درصد وزنی نیکل به روش غوطه‌وری در مذاب را در تشکیل لایه بین فلزی در ریخته‌گری مرکب استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی بررسی کردند، آن‌ها نمونه‌های ریخته‌گری بدون پوشش دهی و با پوشش دهی را بررسی کردند و دریافتند که در نمونه‌های بدون پوشش دهی، شکاف‌ها و لایه‌های اکسیدی بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی به وجود می‌آید و در نمونه‌های پوشش دهی شده به روش غوطه‌وری در مذاب آلیاژ روی ضخامت لایه واکنش به بیشتر از ۵۳ میکرومتر می‌رسد.

راجا^۳ و همکاران [۱۶]، تأثیر چهار نوع پوشش مختلف (مس، نقره، برنج، کادمیوم) بر روی استوانه‌های فولادی در تشکیل پیوند موادی در ریخته‌گری مرکب استوانه فولادی و بدنه آلومینیومی را بررسی کردند. نتایج آزمون پانچ برشی از نمونه‌ها نشان می‌دهد، نمونه استوانه فولادی پوشش داده شده با عنصر مس بیشتر استحکام را ایجاد می‌کند.

سوارز^۴ و همکاران [۱۷]، با استفاده از طراحی یک قالب ریخته‌گری پرفشار^۵ ساده‌سازی شده و بررسی پیوند مکانیکی در چهار نوع مختلف الگوی سطح خارجی استوانه در یک بدنه آلومینیومی با استوانه چدنی یکپارچه دو استوانه‌ای ساده‌سازی شده به این نتیجه رسیدند که استوانه سطح خارجی متخلخل ریخته‌گری^۶ پیوند مکانیکی مستحکم‌تری را نسبت به سایر الگوهای سطح ایجاد می‌کند.

جیانگ و همکاران [۱۸]، به این نتیجه رسیدند، پوشش دهی فلز روی باعث افزایش خواص ترشوندگی سطح شده و با نتیجه‌گیری از آزمایش ایشان، به‌منظور بهبود پیوند بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی از پوشش دهی استوانه چدنی به روش غوطه‌وری در مذاب فلز روی استفاده شد.

با توجه به تحقیقات صورت گرفته، در این مطالعه سعی شده است تأثیر دو نوع پوشش مختلف، پوشش مس به روش الکتروپلینگ و پوشش روی به روش غوطه‌وری در مذاب در ایجاد پیوند موادی و پیوند مکانیکی در ریخته‌گری بدنه آلومینیومی با استوانه چدنی یکپارچه مورد بررسی قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

چدن خاکستری GL C1، به‌عنوان ماده آلیاژی بوش اینستری و (AlSi8Cu3) به‌عنوان آلیاژ بدنه آلومینیومی انتخاب شده است که در جدول ۱ جزئیات خواص متالورژیکی آلیاژ آلومینیوم آورده شده است [۱۹]. همچنین در فرایند ریخته‌گری در مورد بوش اینستری تنها ضریب انتقال حرارت بوش اینستری دارای اهمیت بوده است که مقدار آن با توجه به دما تغییر کرده که در شکل ۱، روند تغییرات آن قابل مشاهده است. ابعاد استوانه چدنی مورد استفاده در این طرح با قطر خارجی ۸۵، قطر داخلی ۷۵ و ارتفاع ۸۴ میلی‌متر بوده است. همچنین در جدول ۲ ترکیب شیمیایی مربوط به آلیاژ آلومینیوم AlSi8Cu3 و چدن GL C1 آورده شده است.

¹ Electroplating

² Jiang

³ Raja

⁴ Soares

⁵ HPDC (High Pressure Die Cast)

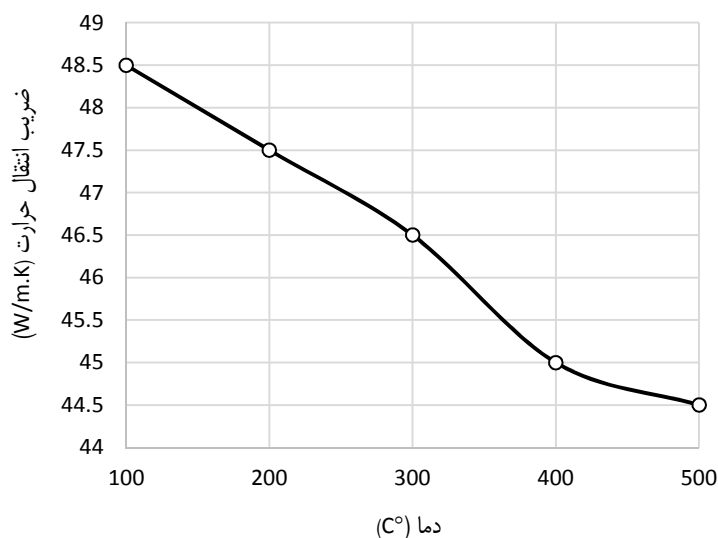
⁶ As-Cast

جدول ۱ متغیرهای مربوط به فرایند ریخته‌گری آلیاژ بدنه استوانه (AlSi8Cu3) [۱۹]

متغیر	مقدار	واحد
دمای ذوب	۵۶۳	°C
چگالی	۲,۵۱	$\frac{g}{cm^3}$
لزجت	۰,۸۶	mPa · s
ضریب انتقال حرارت	۷۶,۲	$\frac{W}{mK}$

جدول ۲ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم AlSi8Cu3 و چدن GL C1 [۱۹]

AlSi8Cu3								عنصر
Ti	Zn	Ni	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	درصد وزنی
۰,۲	۱,۲	۰,۳۵	۰,۳۵	۰,۴	۲,۷۵	۰,۷	۸,۵	
GL C1								عنصر
Cr	P	S	Mn	Si	C			درصد وزنی
۰,۵	۰,۴	<۰,۱۲	۰,۹	۲,۴	۳,۳۵			



شکل ۱ تغییرات ضریب انتقال حرارت برای چدن خاکستری GL C1 [۲۰]

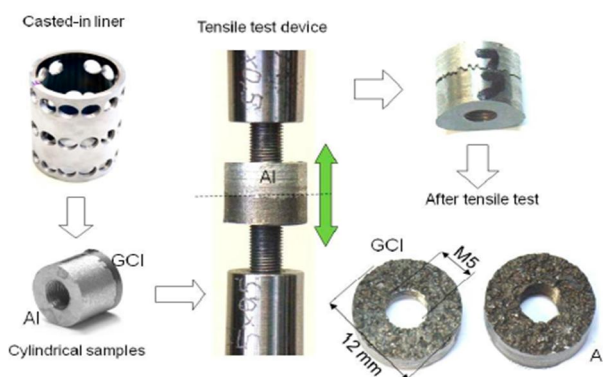
به‌منظور بررسی قدرت اتصال بین قطعه ورودی^۱ و بدنه آلومینیومی مطابق با آزمون انجام شده توسط سوارز و همکاران [۱۷] و همچنین رجوسکی^۲ و همکاران [۲۱]، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۲ میلی‌متر و سوراخ M5 تهیه می‌شدند (شکل ۲).

در ابتدا چند نمونه قطعه با استوانه شیاردار و پوشش آلومینیوم - سیلیسیوم با روش پاشش فلز مذاب^۳ پوشش دهی و ریخته‌گری شدند. با توجه به اینکه در قطعه با استوانه شیاردار و پوشش آلومینیوم - سیلیسیوم با روش پاشش فلز مذاب چسبندگی قطعات به‌صورت ظاهری نامناسب ایجاد شده است و فاصله بین مواد آلومینیومی و چدنی با چشم غیرمسلح به‌راحتی مشخص و قابل دیدن است.

¹ Insert Part

² Rejowski

³ Metal Spray

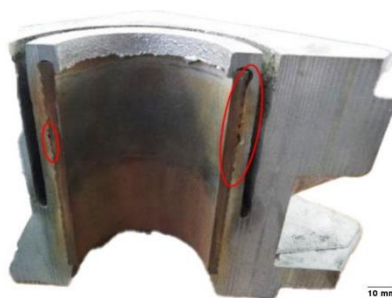


شکل ۲ تهیه نمونه‌های کشش برای بررسی قدرت اتصال بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی [۱۷]

پس از بررسی قطعات برش خورده نمونه‌های شیاردار مشخص گردید که با توجه به مناسب نبودن نوع پوشش، لایه اکسیدی تشکیل شده باعث عدم ایجاد اتصال مکانیکی مناسب گردیده است. با توجه به اینکه در ریخته‌گری این قطعه دمای پیش گرم مناسب انتخاب نشده است و سطح پوشش خارجی قطعه چدنی با حذف لایه اکسیدی آلومینیوم فعال نشده است، جدایش بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی به دلیل عدم ترکندگی مناسب سطح استوانه مشاهده شد. از طرفی با توجه به اینکه حذف لایه اکسید آلومینیوم مستلزم عملیات مکانیکی، شیمیایی و یا حرارت حدود ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. راه دیگری که برای عدم ایجاد لایه اکسیدی بر روی پوشش‌های آلومینیوم گرم (پاشش مذاب و یا غوطه‌وری در مذاب) وجود دارد جلوگیری از ایجاد لایه اکسیدی است. با توجه به اینکه سایت پوشش دهی و ریخته‌گری در یک محل نیست باید قطعه پس از پوشش دهی در زمان کوتاهی داخل یک محفظه محافظت‌شده با گاز بی‌اثر آرگون قرار گیرد و به محل ریخته‌گری انتقال یابد که انجام این فعالیت‌ها بر روی قطعه مذکور در فرآیند تولید قطعه توجه اقتصادی ندارد.



شکل ۳ نمونه استوانه شیاردار پوشش دهی و ریخته‌گری شده



شکل ۴ چسبندگی نامناسب در بدنه آلومینیومی با استوانه چدنی شیاردار و پوشش آلومینیوم - سیلیسیوم با روش پاشش مذاب

با توجه به موارد فوق پوشش‌های دیگری که مشکل تشکیل لایه اکسیدی قوی ندارند بررسی گردید و آزمون غیر مخرب مایع نافذ و آزمون کشش بر روی آن‌ها انجام گردید که در ادامه به بررسی نتایج آن‌ها پرداخته می‌شود. تعدادی نمونه استوانه با سطح خارجی متخلخل ریخته‌گری تهیه شد و نمونه‌ها به‌منظور پاک‌سازی و آماده‌سازی سطح ساچمه‌زنی^۱ شدند، در فرایند ساچمه‌زنی از ساچمه ۰٫۳ میلی‌متر استفاده شد تا به تمام فرورفتگی‌ها نفوذ کرده و باعث کاهش ارتفاع زبری تخلخل‌ها نشوند.



شکل ۵ استوانه با سطح خارجی متخلخل ریخته‌گری

سه نمونه استوانه متخلخل ریخته‌گری بدون پوشش، همراه با پوشش مس به روش آبکاری رویشی و پوشش دهی روی به روش غوطه‌وری^۲ تهیه شده و ریخته‌گری شدند. شکل ۶ نمونه قطعات پوشش شده با پوشش مس با روش آبکاری رویشی و پوشش روی با روش غوطه‌وری در مذاب را نشان می‌دهد. پوشش مس به دلیل درصد انحلال شیمیایی بالای آن‌ها نسبت به سایر عناصر جدول ۳ به‌عنوان پوشش بر روی استوانه چدنی انتخاب شد، دلیل عدم انتخاب عنصر منیزیم به‌عنوان پوشش با این وجود که حلالیت بالاتری از مس دارد نداشتن توجه فنی و اقتصادی استفاده از عنصر منیزیم است [۲۰].

برای بررسی کیفیت چسبندگی پوشش عنصر روی به روش غوطه‌وری در مذاب بر روی زیر لایه مطابق با استاندارد ASTM A153-2023 [۲۲]، روش برش چاقوئی اتخاذ شد [۲۳].

جدول ۳ محدودیت حلالیت اجزای آلیاژی انتخابی در محلول مایع و جامد آلومینیوم [۲۴]

عنصر	دما (°C)	آلیاژ مذاب در $L/\alpha Al$	انحلال جامد αAl در $L/\alpha Al$	بیشترین انحلال‌پذیری بر حسب درصد
سیلیسیوم	۵۷۷	۱۲٫۶	۱٫۶۵	۰٫۰۰۸
تیتانیوم	۶۶۵	۰٫۱۵-۰٫۱۲	۱	۰
کروم	۶۶۰	۰٫۴۱	۰٫۸۶۶-۰٫۷۷°C	۰
			۰٫۳۰۴۳°C	
منگنز	۶۶۰	۱٫۹۵	۱٫۸۲	۰٫۰۲
آهن	۶۶۵	۱٫۸۷	۰٫۰۵۲	۰٫۰۳
نیکل	۶۴۰	۶٫۱۲	۰٫۰۵	۰
کوبالت	۶۶۰	۱	۰٫۰۲	۰
مس	...	۳۳٫۱۵	۵٫۶۷	۰
منیزیم	...	۳۵	۱۴٫۹	۰

^۱ Shot Blast

^۲ Hot Dip



شکل ۶ استوانه‌های پوشش داده‌شده با پوشش مس و پوشش روی

در ریخته‌گری مرکب چدن - آلومینیوم به دلایل عمده‌ای نیاز به پیش گرم کردن قطعه چدنی و قالب وجود دارد. از جمله این دلایل پیشگیری از آسیب به قطعه ورودی چدنی با حذف رطوبت و کاهش ضربه گرمایی، سیالیت بهتر مذاب و تنظیم نرخ انجماد است.

۳- شبیه‌سازی فرآیند ریخته‌گری

شبیه‌سازی فرآیند ریخته‌گری در این مقاله در دو حالت قالب ساده‌سازی شده و قالب اصلی انجام گرفت. شکل‌های ۷ و ۸، به ترتیب مدل‌های دوبعدی مربوط به مدل شبیه‌سازی شده قالب ساده‌سازی شده و قالب اصلی نرم‌افزار Procast را نشان می‌دهد. نقشه موجود در شکل ۷ قالب ساده‌سازی شده را نشان می‌دهد که فرایند استقلال از دانه و تعیین مقدار دمای پیش گرم با استفاده از این الگو انجام شده است و بعد از انتخاب دمای پیش گرم همین متغیر بر روی قالب اصلی (شکل ۸) اعمال شده است و فرایند شبیه‌سازی انجام شده است. برای تحلیل نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری از معیارهای ضریب حرارتی و تحلیل نقاط گرم استفاده شده است. ضریب حرارتی نسبت حجم به سطح خارجی یک قطعه یا قالب است که در فرایند ریخته‌گری اهمیت دارد. این ضریب می‌تواند نشان‌دهنده نرخ سرد شدن قطعه و همچنین زمان جامد شدن آن باشد [۲۵، ۲۶].

$$M = \frac{V}{A} \quad (۱)$$

که M ضریب حرارتی، V حجم قسمت ریخته‌گری و A مساحت سطح قطعه ریخته‌گری است. برای رویکرد ضریب حرارتی، ابتدا یک شبیه‌سازی انجماد از ریخته‌گری اجرا می‌شود. هنگامی که شبیه‌سازی کامل شد، ضریب در فرایند ریخته‌گری را می‌توان بر اساس زمان انجماد از قانون چوورینوف^۱ محاسبه کرد. ضریب معادل محاسبه شده با استفاده از این روش ضریب حرارتی نامیده می‌شود. قانون چوورینوف معادله‌ای برای زمان انجماد می‌دهد و ضریب آن را می‌توان بدین صورت نوشت [۲۵]:

$$t = B \left(\frac{V}{A} \right)^n \quad (۲)$$

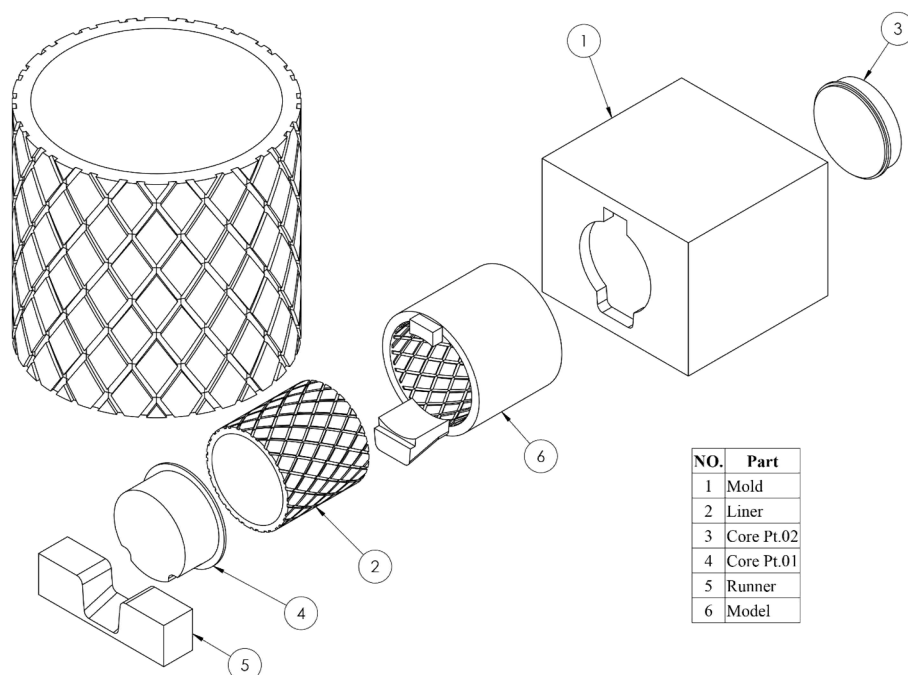
که t زمان انجماد ریخته‌گری، n یک ثابت ست (معمولاً برابر با ۲) و B ، ثابت قالب است. ثابت B بدین شکل محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$B = \left(\frac{\rho m}{T_m - T_0} \right)^2 \left(\frac{\pi}{4k\rho c} \right) [L + c m (T_{pour} - T_m)]^2 \quad (۳)$$

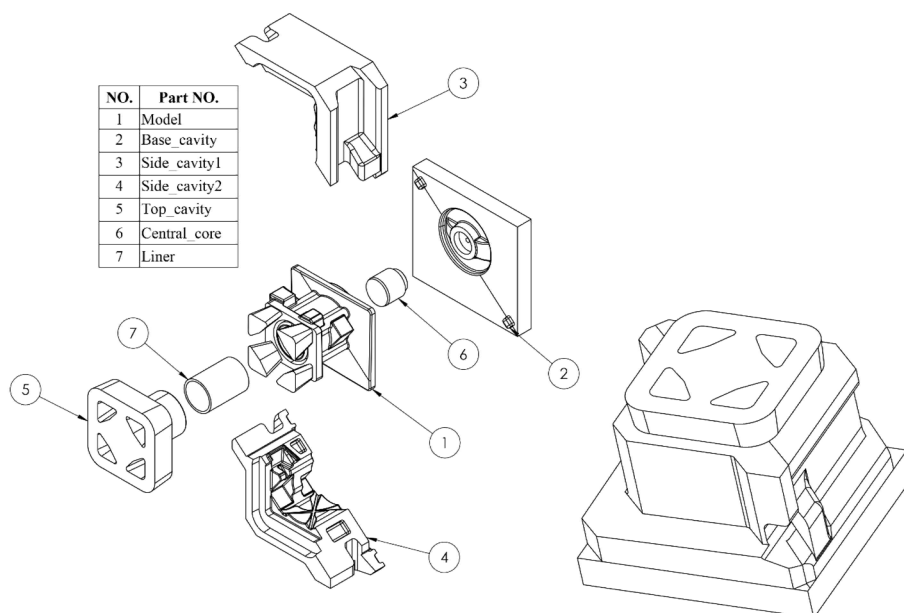
که ρ_m چگالی فلز، T_m دمای ذوب یا انجماد فلز، T_0 دمای اولیه قالب، k هدایت حرارتی قالب، ρ چگالی قالب، c گرمای ویژه قالب، L گرمای نهان همجوشی فلز، C_m گرمای ویژه فلز، T_{pour} دمای ریختن فلز است.

¹ Chvorinov Rule

نقاط گرم به موقعیت‌هایی اشاره دارد که در فرآیند جامدسازی در ریخته‌گری‌ها ایجاد می‌شوند. این نقاط گرم معمولاً در نقاطی از قالب که حرارت بیشتری جذب می‌کنند و فرآیند جامدسازی آن‌ها به تأخیر می‌افتد گفته می‌شود [۲۷، ۲۸].



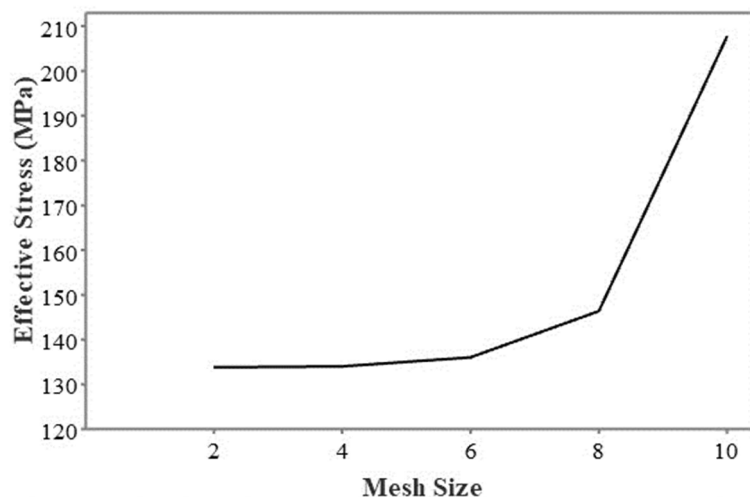
شکل ۷ نقشه دوبعدی قالب ساده‌سازی شده



شکل ۸ نقشه دوبعدی قالب اصلی

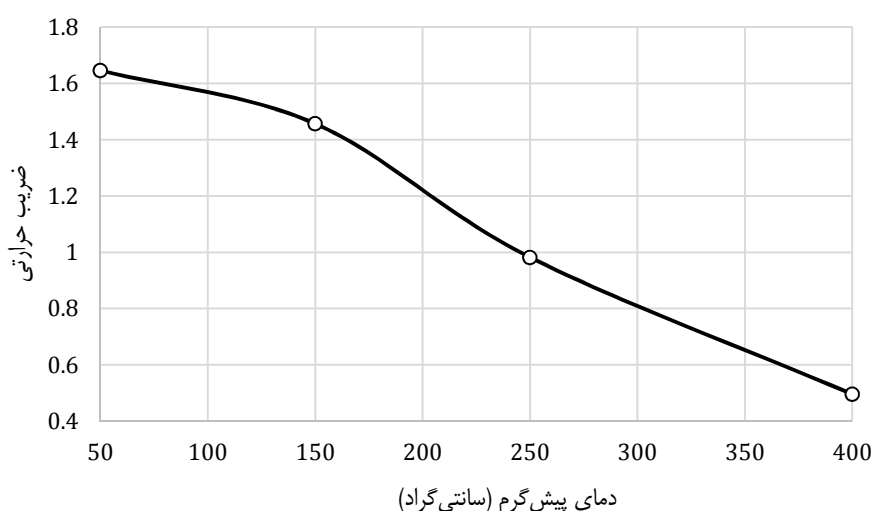
عملیات دانه‌بندی توسط خود نرم‌افزار بر روی تمامی قطعات قالب انجام شده است. به منظور صحت‌سنجی فرآیند دانه‌بندی، همگرایی و استقلال نتایج از اندازه دانه با تنش مؤثر میان استوانه و بدنه استوانه، انجام شده و بر اساس نتایج حاصل در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است از اندازه دانه ۲ برای دانه‌بندی بدنه استوانه، ماهیچه‌ها، راهگاه مذاب،

استوانه و قالب‌ها استفاده شده است. در این تحلیل بدنه استوانه با استفاده از دانه مثلی و تعداد کل ۳۱۹۳۷۷ جزء، دانه‌بندی شده است که از این مقدار، ۳۹۷۰۵ جزء دوبعدی و ۲۷۹۶۷۲ جزء، سه‌بعدی است.

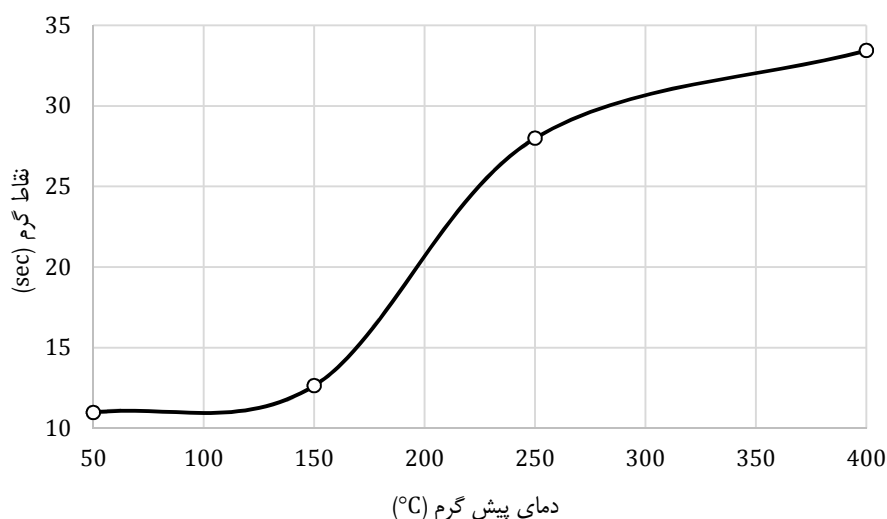


شکل ۹ بررسی همگرایی و استقلال از دانه بر مبنای تنش مؤثر میان بدنه استوانه

با توجه به تحلیل‌های انجام شده در نرم‌افزار Procast و با توجه به روند کاهشی ضریب حرارتی در نمودار شکل ۱۰ و روند افزایشی نقاط گرم در نمودار شکل ۱۱ دمای پیش گرم ۱۵۰ تا ۲۵۰ درجه برای این فرایند مناسب است [۲۹]، همچنین با توجه به اینکه در دمای ۲۵۰ درجه ضریب حرارتی مربوطه به مقداری کمتر از ۱ سانتی‌متر در بحرانی‌ترین نقطه رسیده، دمای پیش گرم ۲۵۰ درجه برای قالب مورد بررسی مناسب بوده و همین دما برای این پژوهش انتخاب شده است. در فرایند تحلیل، پوشش دیواره در روند شبیه‌سازی اعمال نشده است چراکه هدف از این فرایند ریخته‌گری ایجاد اتصال مکانیکی بین آلومینیوم و چدن بوده است و فرایند پوشش دهی تنها برای بهبود شرایط ریخته‌گری اعمال شده است.



شکل ۱۰ روند کاهشی ضریب حرارتی (به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری)



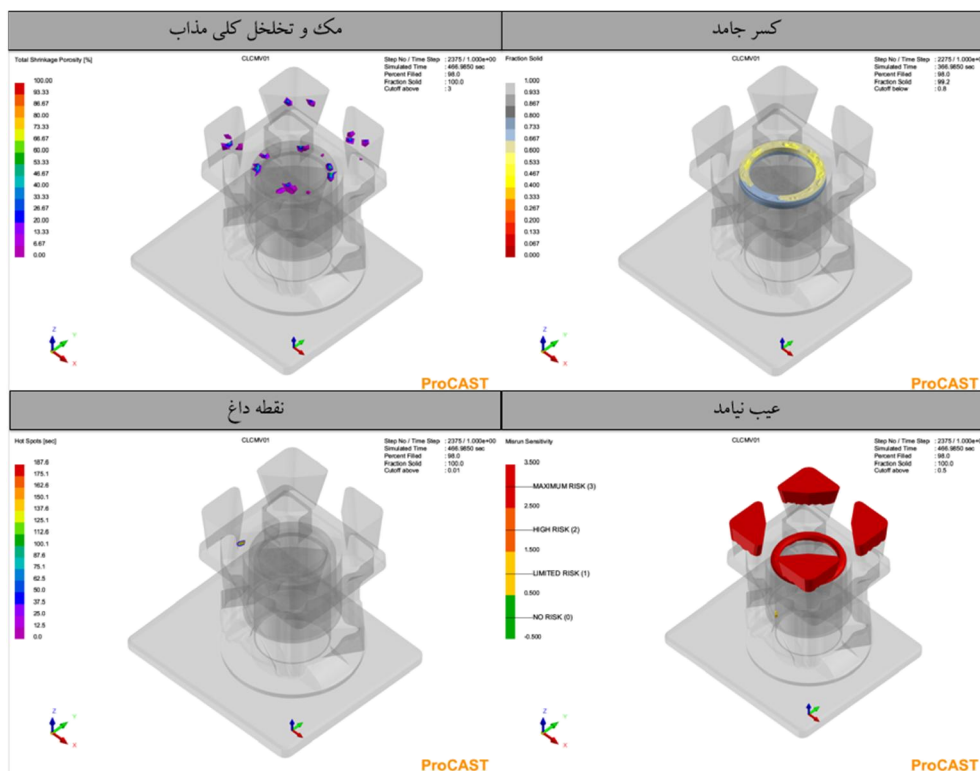
شکل ۱۱ روند صعودی نقاط گرم (به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری)

در نتیجه در ریخته‌گری قطعات برای قالب و قطعات استوانه چدنی دمای پیش گرم حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شده و با توجه به انتخاب این دما تحلیل ریخته‌گری با نرم‌افزار Procast انجام شده است که نتایج مرتبط با سلامت قطعه ریخته‌گری شده پس از انجماد در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.

نتایج تحلیل ریخته‌گری نشان می‌دهد که قطعات پس از انجماد در قسمت‌های پایینی با عیوب ریخته‌گری کمتری تولید خواهند شد، به همین دلیل در تهیه قطعات نمونه آزمون کشش و آزمون مایع نافذ از قسمت‌های پایینی قطعات نمونه‌برداری شده است. این نکته در هنگام تهیه نمونه‌های آزمون کشش نیز به‌وضوح مشاهده شد، به‌نحوی که قطعات نمونه تهیه‌شده از قسمت‌های بالایی به‌مراتب بیشتر از قطعات پایینی در مرحله ایجاد سوراخ مرکزی و قلاویز کاری خراب شدند.

پس از تهیه نمونه‌های ریخته‌گری از آن‌ها نمونه‌های کشش مطابق ابعاد مورد اشاره در شکل ۱۳ (قطر خارجی ۱۲ میلی‌متر و قلاویز M5) با استفاده از فرآیندهای برش سیمی، سوراخکاری و قلاویزکاری تهیه گردید. به‌منظور اینکه برآورد بهتری از نتایج آزمون کشش حاصل گردد در یکی از قطعات نمونه‌های کشش در یک خط از پایین تا قسمت‌هایی نزدیک به بالای قطعه تهیه شد و نتایج مقایسه گردید. در شکل ۱۴ تصاویر نمونه‌ها با قالب اصلی پس از ریخته‌گری نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که با توجه به اینکه شبیه‌سازی در این مقاله تنها برای بهینه‌سازی فرایند ریخته‌گری و اطمینان از برقراری پیوند مکانیکی بین بوش و استوانه مورد استفاده قرار گرفته است از اثرات پوشش در شبیه‌سازی صرف نظر شده است. صحنه‌گذاری با نتایج تجربی محل عیوب نیز با نمونه‌های بدون پوشش انجام شده است.

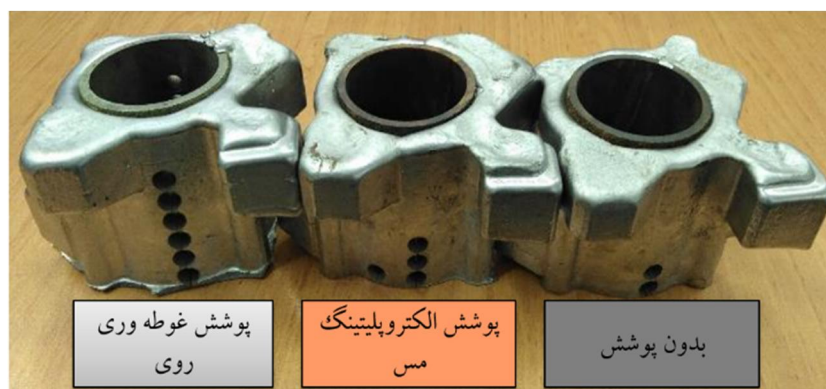
برای صحنه‌گذاری نتایج مربوط به متغیرهای متغیر با دمای پیش‌گرم، روش تطبیق نتایج تجربی و شبیه‌سازی استفاده شد. با توجه به شکل ۱۵ که برای قالب ساده‌سازی شده است، مشاهده می‌شود که دمای پیش‌گرم ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد کمترین مقدار جزیره کسر جامد را نشان نتیجه می‌دهد که همین شرایط با توجه به نمودارهای شکل‌های ۱۰ و ۱۱ انتظار می‌رفت. با توجه به شکل‌های ۱۶ و ۱۷ دو معیار کسر جامد و نیاما یک ناحیه مشترک را گزارش می‌دهند که با توجه به این آن‌ها می‌توان انتظار داشت که در ناحیه راهگاه و تغذیه احتمال تشکیل عیوب وجود دارد که در نمونه ریخته‌گری همین بحث استناد می‌شود (شکل ۱۸). به‌عبارت‌دیگر محل تشکیل عیوب در نمونه واقعی با نتایج شبیه‌سازی بر هم منطبق بوده است.



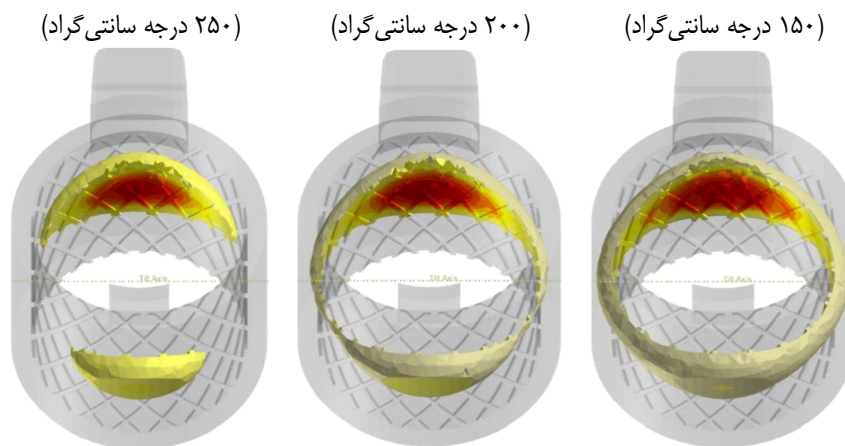
شکل ۱۲ نتایج ریخته گری نرم افزاری در دمای پیش گرم قالب و قطعه استوانه ای در دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد قالب اصلی



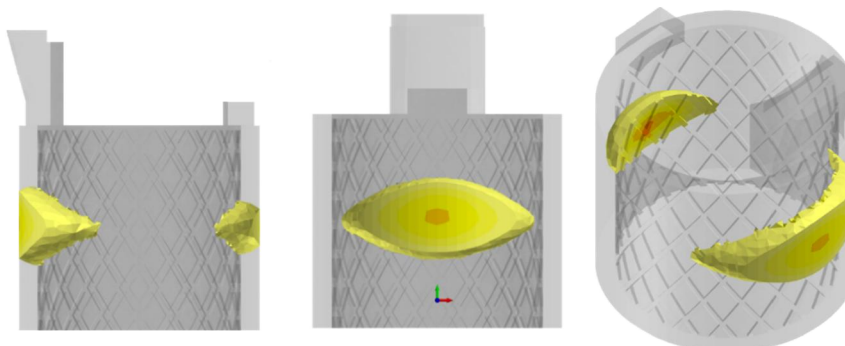
شکل ۱۳ نمونه تهیه شده از بدنه استوانه ساده سازی شده برای آزمون کشش



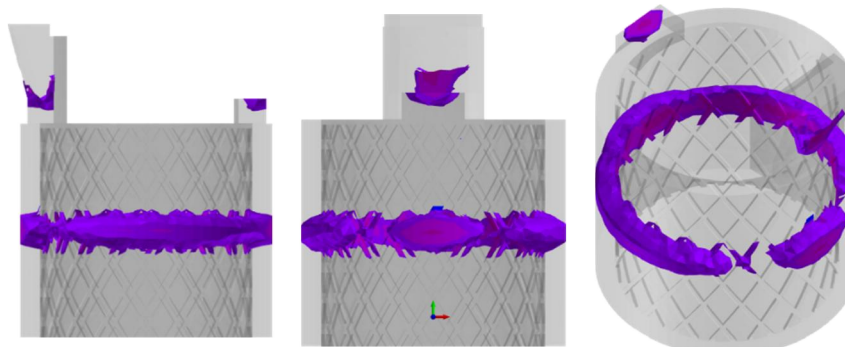
شکل ۱۴ نمونه های ریخته گری شده با قالب اصلی به ترتیب از راست به چپ بدون پوشش، همراه با پوشش مس و پوشش روی



شکل ۱۵ نتایج حاصل از درصد کسر جامد در دماهای مختلف پیش گرم



شکل ۱۶ سه نمای کسر جامد شبیه‌سازی ریخته‌گری برای دمای پیش گرم ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد (قالب ساده‌سازی شده)



شکل ۱۷ سه نمای نتیجه معیار نیاما شبیه‌سازی ریخته‌گری برای دمای پیش گرم ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد (قالب ساده‌سازی شده)



شکل ۱۸ نتایج پیش‌بینی عیوب ریخته‌گری در قطعه واقعی ریخته‌گری شده با قالب ساده‌سازی شده و دمای پیش گرم ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد

همان‌طور که ذکر شد قطعاتی که برای نمونه‌های آزمون کشش آماده شد در قسمت‌های بالایی بیشتر دچار خرابی حین تهیه نمونه‌ها شدند، همچنین نتایج آزمون کشش نیز نشان داد که نمونه تهیه‌شده از قطعه پوشش دهی شده با روی به روش غوطه‌وری نتایج بهتری در قسمت‌های پایینی نسبت به قسمت‌های بالایی دارد. به همین دلیل در سایر قطعات فقط از قسمت‌های پایینی نمونه آزمون کشش تهیه شد.

۴- آزمون‌های تجربی

همان‌طور که گفته شد برای بررسی کیفیت چسبندگی پوشش بر روی زیر لایه روش برش چاقوئی^۱ بر روی یک نمونه بوش با سطح ماشین‌کاری شده استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که هیچ‌گونه پوسته شدگی و یا عدم چسبندگی در پوشش ایجاد نشده است (شکل ۱۹). این موضوع بیانگر این است که فرآیند پوشش دهی روی به‌درستی انجام شده است. این مورد همچنین در تصاویر سطح متخلخل نمونه‌های چدنی تهیه شده از قطعات پس از جدا کردن آن‌ها از قسمت آلومینیومی ریخته‌گری شده نیز مشاهده شد که تأییدکننده کیفیت مطلوب پوشش‌دهی است. وضعیت سطح متخلخل برای نمونه‌های بدون پوشش و دارای پوشش‌های مس و روی در شکل ۲۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص شده است، پس از آزمون کشش، پوشش روی سطح بوش برجا مانده است که نشان از چسبندگی و اتصال قابل قبول پوشش دارد.



شکل ۱۹ نتیجه آزمون برش چاقوئی انجام شده بر روی نمونه پوشش داده شده به روش غوطه‌وری



شکل ۲۰ پوشش باقیمانده در قسمت چدنی نمونه‌ها پس از ریخته‌گری آلومینیوم و جدا کردن قسمت چدنی از آلومینیومی

¹ Knife Cut

با انجام آزمون غیرمخرب مایع نافذ مطابق شکل ۲۱ مقدار چسبندگی بین نیمه چدنی و آلومینیومی آزمایش می‌شود، شکاف مشاهده شده در آزمون مایع نافذ عدم چسبندگی را آشکار می‌کند. آزمون مایع نافذ نشان می‌دهد که بیشترین فاصله بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی در حالت بدون پوشش دهی استوانه رخ داده که نمایانگر عدم اتصال و به هم پیوستگی مناسب بین دو جز مجزا است که این فاصله بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی در حالت پوشش دهی استوانه با مس کمتر و در پوشش دهی با روی به کمترین مقدار خود رسیده است.

به بیان دیگر نتایج حاصل از آزمون غیرمخرب مایع نافذ و آزمون کشش نشان می‌دهد که پوشش فلز روی با روش غوطه‌وری، نسبت به حالت بدون پوشش و پوشش مس با روش آبکاری روشی تأثیر بسیار مناسبی در ایجاد پیوندی قدرتمند دارد. به نحوی که فاصله ایجاد شده در مرز قسمت چدنی و آلومینیومی هم از لحاظ مقدار و هم از لحاظ طول در قطعه پوشش داده شده با روی به روش غوطه‌وری در مذاب کمتر است.

با توجه به اینکه نمونه پوشش دهی شده با فلز روی شکاف کمتری نسبت به قطعه پوشش داده شده با مس دارد این موضوع بیانگر این است که هرچند میل ترکیبی مس با مذاب آلومینیوم با توجه به انحلال پذیری شیمیایی مس در آلومینیوم زیاد است اما به دلیل اینکه خاصیت ترکندگی سطح در پوشش روی در مواجهه با مذاب آلومینیوم بیشتر است، نفوذپذیری مذاب در خلل و فرج تخلخل‌ها بیشتر است.



شکل ۲۱ آزمون غیر مخرب مایع نافذ بر روی سطوح نمونه‌های بدون پوشش، همراه با پوشش مس و همراه با پوشش روی

نمودارهای شکل ۲۲ و ۲۳ به خوبی تفاوت طول و ضخامت شکاف‌های نمایان شده توسط آزمون مایع نافذ در نمونه‌های ریخته‌گری را نشان می‌دهند. با استفاده از نرم‌افزار (image j)، مقادیر گفته شده در نمودارها از روی تصاویر اندازه‌گیری شده است. نمودارها نشان می‌دهند که در نمونه ریخته‌گری بدنه آلومینیومی با استوانه چدنی پوشش دهی شده با فلز روی به روش غوطه‌وری در مذاب شکاف‌ها طول و پهنای کمتری دارند، در نتیجه نمونه پوشش دهی شده با فلز روی با استناد بر اینکه در محل اتصال بدنه آلومینیومی به استوانه چدنی شکاف کمتری مشاهده شده، کیفیت اتصال بهتری را ایجاد می‌کند.

با انجام آزمون کشش از نمونه‌ها مطابق با الگو برداری از آزمون کشش ادمو و همکاران [۱۷]، قدرت اتصال بین قطعه چدنی و بدنه آلومینیومی سنجیده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲۴ نیرو جدایش قطعات نشان داده شده است قدرت پیوند در نمونه بدنه آلومینیومی همراه با استوانه چدنی پوشش داده شده با فلز روی بیشترین مقدار است که نشان‌دهنده تأثیر پوشش روی بر جریان مذاب آلومینیوم بر روی سطح متخلخل و افزایش خاصیت ترشوندگی سطح مطابق با تحقیقات جیانگ و همکاران [۱۸]، است که نتیجه آن کیفیت اتصال بهتر بین بدنه آلومینیومی و استوانه چدنی است.



شکل ۲۲ نمودار بررسی مجموع طول شکاف‌ها در نمونه‌های تحت آزمون مایع نافذ



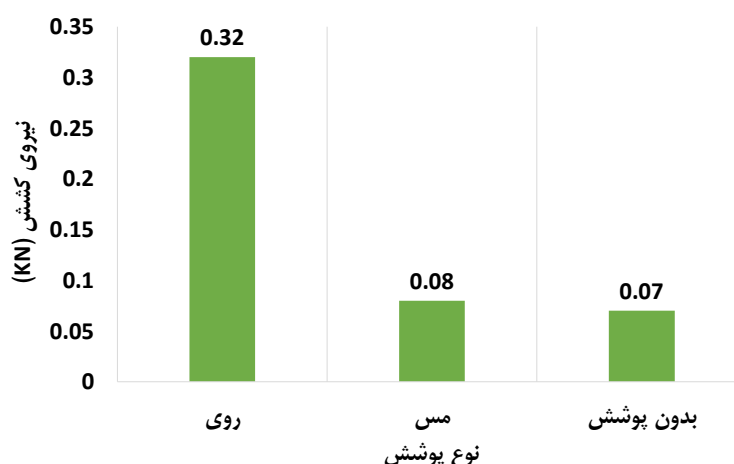
شکل ۲۳ نمودار بررسی میانگین ضخامت شکاف‌های آزمون مایع نافذ در نمونه‌های ریخته‌گری



شکل ۲۴ نتایج نمونه‌های کشش قطعات با شرایط مختلف بدون پوشش، با پوشش مس و پوشش روی

نمودار شکل ۲۵ نتایج آزمون کشش انجام شده بر روی قطعات نمونه تهیه شده را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر نوع پوشش در ایجاد پیوند بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی قابل ملاحظه است. نمونه بدون پوشش با نیروی کششی ۷۰ نیوتن، قطعه با پوشش مس به روش آبکاری روبشی با نیروی کششی ۸۰ نیوتن و قطعه با پوشش روی در کمترین حالت که از قسمت‌های بالایی قطعه تهیه شده است (نمونه با شماره ۳۳۹۰۳-۴) با نیروی کششی ۸۰ نیوتن و در بهترین وضعیت که از قسمت‌های پایینی و متناظر با سایر شرایط پوشش تهیه شده است (نمونه با شماره ۳۳۹۰۳-۳)

با نیروی کششی ۳۲۰ نیوتن از همدیگر جدا شدند. این نتایج بیانگر این موضوع است که نمونه‌های تهیه شده از قسمت‌های پایینی قطعات که متناظر یکدیگر می‌باشند در حالتی که از پوشش روی با روش غوطه‌وری در مذاب استفاده شده است نسبت به سایر شرایط به مراتب استحکام کششی بالاتری دارند، به نحوی که نمونه پوشش داده شده با پوشش روی به روش غوطه‌وری در مذاب استحکام کششی به مراتب بیشتری (۴ برابر بیشتر) در مقایسه استوانه بدون پوشش و استوانه پوشش داده شده با مس با روش آبکاری روبشی دارد.



شکل ۲۵ نمودار مقدار نیروی کششی در شرایط مختلف پوشش

با مقایسه نمونه تهیه شده از قسمت‌های پایینی قطعات (نمونه با شماره ۳-۳۳۹۰۳) در مقایسه با قسمت‌های بالایی (نمونه با شماره ۴-۳۳۹۰۳) در قطعه پوشش شده با روی به روش غوطه‌وری در مذاب مشخص گردید که نمونه‌های تهیه شده از قسمت‌های پایینی به دلیل عیوب ریخته‌گری کمتر و حجم ماده آلومینیومی بیشتر پیوند مکانیکی قوی‌تری نسبت به نمونه‌های تهیه‌شده از قسمت‌های بالایی دارند. لذا در سایر قطعات فقط از قسمت‌های پایینی نمونه آزمون کشش تهیه شد.

همان‌طور که وو^۱ و همکاران [۳۰]، نیز معتقدند نزدیک‌تر بودن شعاع اتم مس به اتم آهن در مقایسه با شعاع اتم آلومینیوم انتشار عنصر مس به لایه نفوذی را تسهیل می‌کند. به همین دلیل نفوذ عناصر آلومینیوم در لایه نفوذی بین قطعه چدنی و بدنه آلومینیومی کمتر اتفاق می‌افتد و بنابراین پیوند ضعیف‌تری بین آلومینیوم و چدن شکل خواهد گرفت. با توجه به محدودیت‌های موجود در این مقاله، مطالعه تکرارپذیری نتایج تجربی مربوط به آزمون‌ها انجام نشده است و در پژوهش‌های آتی به آن پرداخته خواهد شد.

۵- نتیجه‌گیری

مطالعات و نتایج تجربی نشان می‌دهد که به‌طور کلی استفاده از استوانه با سطح خارجی متخلخل نسبت به نوع شیاردار کیفیت اتصال بهتری دارد و استحکام کششی بیشتری را در ایجاد پیوند مکانیکی مطمئن بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی از خود نشان می‌دهد.

نتایج آزمون کشش نشان داد قسمت‌های پایینی قطعات در مقایسه با قسمت‌های بالایی آن‌ها به دلیل عیوب ریخته‌گری کمتر و حجم ماده آلومینیومی بیشتر پیوند مکانیکی قوی‌تری دارند.

¹ Wu

نتایج نشان می‌دهد که تأثیر نوع پوشش در ایجاد پیوند بین استوانه چدنی و بدنه آلومینیومی قابل ملاحظه بوده به نحوی که قطعه پوشش‌دار با پوشش روی به روش غوطه‌وری در مذاب استحکام کششی به مراتب بزرگ‌تری (۴ برابر بیشتر) در مقایسه با استوانه بدون پوشش و استوانه پوشش داده‌شده با مس با روش آبکاری روبشی دارد. افزایش استحکام کششی از نیروهای ۷۰ و ۸۰ نیوتن برای قطعات بدون پوشش و با پوشش مس با روش آبکاری روبشی نشان‌دهنده این است که تأثیر پوشش به تنهایی در افزایش استحکام اتصال چندان مؤثر نخواهد بود و نیازمند این است که در روش پوشش‌دهی، آماده‌سازی سطح و دمای پیش‌گرم قطعه قبل از مذاب ریزی کار بیشتری انجام شود تا اتصال مستحکم‌تری به دست آید.

افزایش استحکام اتصال به مقدار ۳۲۰ نیوتون در قطعه پوشش شده با روی با روش فروبری در مذاب تأییدکننده این موضوع است که استفاده از روش و دمای پیش‌گرم بهینه و همگن می‌تواند در افزایش استحکام اتصال مؤثر باشد؛ که این موضوعات در فعالیتهای آتی دنبال خواهد شد.

نتایج حاصل از آزمون غیرمخرب مایع نافذ و آزمون کشش نشان می‌دهد که پوشش فلز روی با روش غوطه‌وری، نسبت به حالت بدون پوشش و پوشش مس با روش آبکاری روبشی تأثیر بسیار مناسبی در ایجاد پیوندی قدرتمند دارد. به نحوی که فاصله ایجادشده در مرز قسمت چدنی و آلومینیومی هم از لحاظ مقدار و هم از لحاظ طول در قطعه پوشش داده شده با روی به روش غوطه‌وری در مذاب کمتر است.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو) 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 به‌ویژه آقای دکتر مهدی میرزایی 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 Components Manufacturing: the Dilemma Between Aluminium and Cast Iron. Energy Efficiency of Manufacturing Processes and Systems. 2019 July 03;2-1. 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 Manuf. 2017 February 08. doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.008
- [3] Ferro P, Fabrizia 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 November 23;33. 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 January 15. doi: 10.1016/j.jallcom.2022.167343
- [5] Feng Mao, Po Zhang, Shizhong Wei, Chong Chen, Guoshang Zhang, Mei Xiong, Tao Wang, Junliang Guo, Changji Wang. Interface Microstructure and Mechanical Properties of Al/Steel Bimetallic Composites Fabricated by Liquid-Solid Casting with Rare Earth Eu Additions. Materials. 2022 September 20. doi: 10.3390/ma15196507
- [6] Heshmati N. Effect of cast iron surface treatment on interfacial adhesion of Al/Fe compound cast structure [Master's thesis]. Department of Industrial and Materials Science CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Gothenburg, Sweden 2020.
- [7] 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 May 06; 33:1. doi: 10.5829/ije.2020.33.06c.12
- [8] Bako V, Usman T, Bori I, Nasir A. Simulation of a Wet Cylinder Liner. SSRG International Journal

- of Mechanical Engineering.2019 April. Volume 6 Issue 4:1-2. doi: [10.14445/23488360/IJME-V6I4P103](https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V6I4P103)
- [9] Yamagata H. The science and technology of materials in automotive engines. Cambridge England. Woodhead Publishing limited; 2005.
- [10] Kianfar S, Aghaie E, Stroh J, Sediako C, Tjong J. Residual Stress, Microstructure, and Mechanical Properties Analysis of HPDC Aluminum Engine Block with Cast-In Iron Liners. Journal Pre-proof.2020 October 23:4. doi: [10.1016/j.mtcomm.2020.101814](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101814)
- [11] Papis K JM, LOEFFLER J F, UGGOWITZER J, Light P. metal compound casting. SCIENCE IN CHINA PRESS.2009 Jan;vol 52:1. doi: [10.1007/s11431-008-0345-9](https://doi.org/10.1007/s11431-008-0345-9)
- [12] Valizadeh A. A study of the bonding of aluminium alloys to mild steel prepared by an overcasting process[A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy]. Department of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering Brunel Centre for Advanced Solidification Technology (BCAST), Brunel University London.2020.
- [13] Opsal Bakke A, Arnberg L, Løland J, Jørgensen S, Kvinge J. Formation and evolution of the interfacial structure in al/steel compound castings during solidification and heat treatment. Journal of Alloys and Compounds. 2020 August 10;849. doi: [10.1016/j.jallcom.2020.156685](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156685)
- [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 January 11;849. doi: [10.1557/jmr.2017.32](https://doi.org/10.1557/jmr.2017.32)
- [15] Jiang W, Fan Z, Li G, Liu X, Liu F. Effects of hot-dip galvanizing and aluminizing on interfacial microstructures and mechanical properties of aluminum/iron bimetallic composites. Journal of Alloys and Compounds. 2016 July 07;688. doi: [10.1016/j.jallcom.2016.07.085](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.07.085)
- [16] Raja V, Kavitha M, Chokkalingam B, Ashraya T. 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 March 04. doi: [10.1007/s12666-020-01937-5](https://doi.org/10.1007/s12666-020-01937-5)
- [17] Soares E, Rejowski E, Maurizi M. Cast-in cylinder liner designs to improve bonding and shear strength for aluminum block. SAE international. 2012 October 02. doi: [10.4271/2012-36-0449](https://doi.org/10.4271/2012-36-0449)
- [18] Jiang W, Fan Z, Li G, Li C. Effects of zinc coating on interfacial microstructures and mechanical properties of aluminum/steel bimetallic composites. Journal of Alloys and Compounds.2016 March 31. doi: [10.1016/j.jallcom.2016.03.276](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.03.276)
- [19] Sklyarchuk V, Plevachuk Y, Yakymovych A, Eckert S, Gerbeth G, Eigenfeld K. Structure Sensitive Properties of Liquid Al-Si Alloys. International of thermophysics.2009 May 9. doi: [10.1007/s10765-009-0585-3](https://doi.org/10.1007/s10765-009-0585-3)
- [20] Angus HT, M.Sc, Ph.D. cast iron: physical and engineering properties. British cast iron research association.1960.
- [21] REJOWSKI E, DE SOUZA J, RABELLO R. New coated cast-in liner to improve heat transfer on aluminum blocks. SAE international.2016 October 27. doi: [10.4271/2016-36-0262](https://doi.org/10.4271/2016-36-0262)
- [22] ASTM A153-2023. Standard Specification for Zinc Coating (Hot-Dip) on Iron and Steel Hardware1. American Association State Highway and Transportation Officials Standard: ASTM; 2009
- [23] Maxwell, A S (2001) Review of test methods for coating adhesion. NPL Report. MATC(A)49.
- [24] Warmuzek M. Aluminum-Silicon Casting Alloys: Atlas of Microstructures. Detroit, Michiga 2016. doi: [10.21203/rs.3.rs-1002236/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1002236/v1)
- [25] Lizarralde I, Niklasl A, Fernandez-Calvol AI, Lacaze J. Effect of the thermal modulus and mould type on the grain size of als17mg alloy.2013. doi: [10.1007/978-3-319-65136-1_57](https://doi.org/10.1007/978-3-319-65136-1_57)
- [26] Yana X, Kaib Z, Hongliang Z, Yuchengd S and Xuelel T. An Improved Geometric Model to Predict Hot Spots of Castings. 2011. Vol. 689. doi: [10.4028/www.scientific.net/MSF.689.29](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.689.29)
- [27] William E. Warriner and Charles A. Monroe. locating solidification hot spots and feeder positions in casting geometries by image analysis.2017. doi: [10.1007/s40962-017-0167-2](https://doi.org/10.1007/s40962-017-0167-2)
- [28] Zhou J, Wang M, Yin Y, Shen X, Chen X, Li W, Zhang D. Feed paths and hot spots computation based on a time gradient method in casting.2015 september 23. doi: [10.1007/s00170-016-8932-6](https://doi.org/10.1007/s00170-016-8932-6)
- [29] Mousavian A. Study of compound casting of aluminum alloy/ductile iron bimetal. Jonkoping University. 2020.
- [30] Wu M, Yang J, Huang F, Hua L, Xiong S. Bonding of Cast Iron-Aluminum In Bimetallic Castings By High Pressure Die Casting Process. Research square. 2022 Feb 02.