



IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

### Correlation of Microstructure, Hardness and Wear Resistance of Aluminum 3000 Series with Li Additive Fabricated by Horizontal Centrifugal Casting Method

Amir Rezaie<sup>1</sup>, Seyed Ebrahim Vahdat<sup>2\*</sup>

1. MSc Student, Department of Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

Received: 09 September 2018  
Accepted: 23 December 2018

#### Abstract:

The purpose of this study was to investigate the microstructure, hardness and wear resistance of lightweight 3000 series Al functionally graded tube containing 2.3 wt.% Li at the inner, middle and outer layers. For this purpose, an Al-8.1 wt.% Si-2.7 wt.% copper- 2.3 wt.% Li tube fabricated at a pouring temperature of 750°C and a final rotation of mould at 1000 rpm by using a horizontal centrifugal casting machine. Mould was preheated up to 150°C. Microscopic evaluation has been carried out by using VEGA2 scanning electron microscopy; micro-hardness evaluation has done by using Vickers method at 50 gr and evaluation of wear resistance has been carried out by using a pin on disc method under a stress of 7.6 MPa in a distance of 1000 m. The results indicated that the amount of Li, Si and Cu has gradually increased from the outer surface to the inner surface of the tube. Also, the sum of the existing phases in the matrix, such as  $\beta$ -intermetallic compounds (ie, Al<sub>3</sub>Li, AlSi and Al<sub>2</sub>Cu) has increased from 17 vol.% to 35 vol.% at the outer surface to the inner surface of the tube. For this reason, the hardness has increased from 95 HV at the outer surface to 251 HV at the inner layer. As a result, the wear resistance of the inner surface has increased 18 percent over the outer surface.

#### Keywords:

Functionally graded material,  
Intermetallic compound,  
Solid solution,  
Wear

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)

#### Please cite this article using:

Rezaie A., Vahdat S.E., Correlation of hardness, wear resistance and microstructure of aluminum 3000 series with Li additive fabricated by horizontal centrifugal casting method, in Persian, Founding Research Journal, 2019, 2(4) 239-249.

DOI: 10.22034/FRJ.2018.148128.1050

#### \* Corresponding Author:

Seyed EbrahimVahdat, Assistant Professor

**Address:** Department of Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, P.O. Box 678, Amol, Iran.

Tel: +98 911121 4008.

E-mail: [e.vahdat@iauamol.ac.ir](mailto:e.vahdat@iauamol.ac.ir)



فصل‌نامه علمی پژوهشی

## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

انجمن علمی ریخته‌گری ایران

### ارتباط ریزساختار، سختی و مقاومت به سایش آلومینیم سری ۳۰۰۰ با افزودنی لیتیم تولید شده به روش ریخته‌گری گریز از مرکز افقی

امیر رضایی<sup>۱</sup>، سید ابراهیم وحدت<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، واحد آیت الله املی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران. Amiriro94@gmail.com  
 ۲- استادیار، دانشکده مهندسی، واحد آیت الله املی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران. e.vahdat@iauamol.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

#### چکیده:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۱۸

پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۲

هدف از این مقاله، مطالعه ریزساختار، خواص سختی و مقاومت سایشی لایه‌های درونی، میانی و بیرونی لوله سبک از جنس آلومینیم مدرج گروه ۳۰۰۰ حاوی ۲/۳ درصد وزنی لیتیم است. به همین منظور، با استفاده از دستگاه ریخته‌گری گریز از مرکز افقی به صورت درجا، فلز مدرج آلومینیم-۸/۱ درصدوزنی سیلیسیم-۲/۷ درصدوزنی مس-۲/۳ درصدوزنی لیتیم در دمای بارریزی ۷۵۰ درجه سانتیگراد و دور نهایی قالب برابر با ۱۰۰۰ دور بر دقیقه که تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شده بود، تولید شده است. ارزیابی ریزساختار با کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی VEGA2، ارزیابی سختی با روش میکروسختی سنجی ویکرز در نیروی ۵۰ گرم و ارزیابی مقاومت به سایش با روش پین روی دیسک تحت تنش ۷/۶ مگاپاسکال در مسافت ۱۰۰۰ متر انجام شده است. نتایج حاکی از این است که از سطح بیرونی به سمت سطح درونی لوله مدرج، مقدار عناصر لیتیم، سیلیسیم و مس به تدریج زیاد شده است به طوری که مجموع فازهای موجود در زمینه مانند ترکیبات بین‌فلزی بتا (آلومینیم-لیتیم)، آلومینیم-سیلیسیم و آلومینیم-مس از ۱۷ درصد حجمی به ۳۵ درصد حجمی، افزایش یافته است. به همین دلیل، سختی سطح بیرونی از ۹۵ ویکرز به ۲۵۱ ویکرز در سطح درونی، افزایش یافته است. به تبع آن مقاومت به سایش سطح درونی نسبت به سطح بیرونی، ۱۸ درصد افزایش داشته است.

#### واژه‌های کلیدی:

فلز مدرج تابعی،  
ترکیب بین‌فلزی،  
محلول جامد،  
سایش

#### ۱- مقدمه

بالا به طور هم‌زمان نیاز است. توانایی یک فلز یا آلیاژ برای برآورد نیاز فوق با خواص فیزیکی و مکانیکی آن تعیین می‌شود. خواص فیزیکی و مکانیکی فلز یا آلیاژ، وابستگی زیادی به ریزساختار آن دارد. به همین منظور، مهندسی به تولید مواد مرکب با تقویت‌کننده‌های سخت و مقاوم به سایش روی آورده‌اند. عواملی نظیر استحکام مناسب برای فصل‌مشارکت بین تقویت‌کننده و زمینه، تولید موفقیت آمیز این نوع مواد را با مشکل مواجه نموده است. به علاوه در این نوع مواد، یکنواختی خواص ملزم به استفاده از تقویت‌کننده‌های بسیار ریز (کمتر از یک میکرومتر) و با توزیع پراکنده است که به هنگام تولید، مشکلاتی نظیر آگلومره شدن تقویت‌کننده را در بر دارد. این مشکلات سبب ظهور نوع جدیدی از مواد مرکب به نام فلز مدرج شده است. به همین دلایل، استفاده از قطعاتی که با فلز

طراحی سامانه‌های پیشرفته و جدید با بازدهی بالا، نیازمند قطعاتی است که از مواد جدید و پیشرفته (که اغلب خواص فیزیکی و یا مکانیکی آنها با هم در تقابل است) ساخته شده باشند. به عنوان مثال، نیاز هم‌زمان به مقاومت سایشی بالا در درون استوانه (بوش سیلندر) یک موتور احتراق داخلی برای تحمل سایش ناشی از حلقه‌ها (رینگ‌ها) و نیاز استحکام فشاری بالا در درون همان استوانه برای تحمل فشار ناشی از احتراق، که بسیار سبک بوده تا مصرف سوخت را کاهش دهد. مثال دیگر، لوله‌های سبک با مقاومت سایشی بالا در درون لوله و استحکام بالا در لایه بیرونی آن است [۱].

برای افزایش کارایی فلزات و آلیاژها در قطعات مهندسی خاص (مانند بوش سیلندر)، استحکام بالا و مقاومت سایشی

با فرمول شیمیایی  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ،  $\omega$  با فرمول شیمیایی  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  و  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  است. شکل فاز  $\omega$  فیبری (سوزنی) است که به سمت سطح خارجی محصول افزایش می‌یابد. مطابق نمودار فازی سه‌تایی آلومینیم-مس-آهن در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، شیب ترکیب شیمیایی از طریق نیروی گریز از مرکز شکل می‌گیرد. چگالی فاز  $\omega$ ، ۴/۳ گرم بر سانتیمتر مکعب است و چگالی فاز آلومینیم در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۲/۳۶۹ گرم بر سانتیمتر مکعب است و نقطه انجماد فازهای آلومینیم،  $\theta$ ،  $\omega$  و  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  به ترتیب ۶۶۰، ۵۹۱، ۷۲۸ و ۱۱۶۰ درجه سانتی‌گراد است. در آن پژوهش، با تغییر شرایط ریخته‌گری شامل دمای قالب، روش خنک کاری و ضریب  $G$ ، تغییرات ساختاری هدفمند انجام شده است [۱۱].

نتایج به دست آمده از ریخته‌گری گریز از مرکز عمودی آلیاژهای آلومینیم-۶ درصد آهن در سه دمای بارریزی مختلف نشان داد که تغییرات خواص مکانیکی و حرارتی در ضخامت محصول با تابعی معین بوده است [۱۲].

همچنین، به طور مشابه، نتایج به دست آمده از ریخته‌گری گریز از مرکز آلیاژهای آلومینیم-بور ۲ تا ۷/۲ درصد وزنی نشان داد که خواص مکانیکی و حرارتی در طول محصول با تابعی معین بهبود یافته است [۱۳].

کلوند و همکاران [۱۴] از طریق ریخته‌گری گریز از مرکز افقی آلیاژ پایه قلع در درون قالب فولادی (پیش‌گرم نشده) نشان دادند که توزیع فازها به صورت مدرج انجام شده به نحوی که سختی در سطح داخلی فلز مدرج حدود ۱۸ ویکرز و سختی در سطح خارجی آن حدود ۱۵ ویکرز است. به این ترتیب، به دلیل اختلاف در چگالی عناصر تشکیل دهنده آلیاژ، ترکیب شیمیایی در نزدیکی سطح خارجی فلز مدرج با ترکیب شیمیایی در نزدیکی سطح داخلی آن، متفاوت است. بنابراین منجر به تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی می‌شود. در آن پژوهش، قالب پیش‌گرم نشده بود. لذا تغییرات سختی در سطح درون و بیرون زیاد نبود. همچنین، به طور مشابه، مهدی‌تبار و همکاران [۱۵] از طریق ریخته‌گری گریز از مرکز افقی آلیاژ پایه آلومینیم-مس در درون قالب فولادی (پیش‌گرم نشده) نشان دادند که توزیع فازها به صورت مدرج انجام شده به نحوی که سختی در سطح داخلی فلز مدرج حدود ۱۵۳ ویکرز و سختی در سطح خارجی آن حدود ۱۴۹ ویکرز است. در پژوهش‌های پیشین، قالب پیش‌گرم نشده بود. لذا تغییرات

مدرج (تابعی یا هدفمند) ساخته شده‌اند، گسترش یافته است [۲].

هم‌اکنون، دو روش ریخته‌گری گریز از مرکز برای تولید فلز مدرج به نام‌های روش درجا و روش ذره جامد وجود دارد [۲]. در روش درجا، فاز تقویت کننده در حین انجماد شکل می‌یابد. لذا نقطه ذوب فاز تقویت کننده باید کمتر از دمای ریخته‌گری باشد. در حالی که در روش ذره جامد، نقطه ذوب فاز تقویت کننده از دمای ریخته‌گری بالاتر است. لذا فاز تقویت کننده در داخل مذاب غوطه‌ور است [۳-۵].

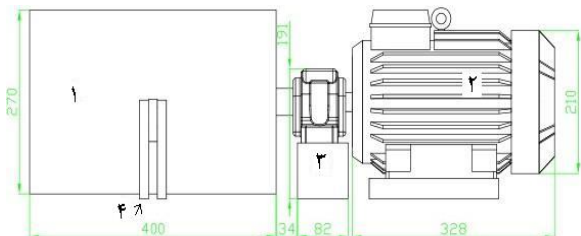
برای ساخت اسلحه تک‌تیر با تحرک پذیری زیاد و همچنین بوش سیلندر موتورهای احتراق داخلی با مصرف سوخت پایین از لوله‌های مدرج و سبک با مقاومت سایشی بالا در سطح درونی (به دلیل مقدار زیاد ترکیبات بین‌فلزی سخت) و انعطاف‌پذیری بالا در لایه بیرونی (به دلیل مقدار زیاد زمینه آلومینیم به نسبت انعطاف‌پذیر) استفاده می‌شود و حتی می‌توان با کنترل ترکیب شیمیایی و شرایط تولید، خواص را بیش از این، بهبود بخشید [۲].

محدوده نیروی گریز از مرکز ۵۰ تا ۱۰۰g برای قالب‌های فلزی و ۲۵ تا ۵۰g برای قالب‌های ماسه‌ای توصیه شده است. همچنین نیروی گریز از مرکز ۳۵g برای ریخته‌گری گریز از مرکز عمودی و نیروی گریز از مرکز ۱۵g برای ریخته‌گری نیمه گریز از مرکز توصیه شده است [۶].

نتایج به دست آمده از ساختار و توزیع فاز در آلیاژهای هیپوپوتکتیک، یوتکتیک و هایپریوتکتیک آلومینیم-مس نشان داد که اندازه ذرات به سمت سطوح داخلی محصول، بزرگ‌تر می‌شود. همچنین با افزایش غلظت مس به سمت جداره قالب، سختی افزایش یافته است. زیرا چگالی آلومینیم مذاب در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۲/۳۶۹ گرم بر سانتیمتر مکعب و در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۲/۳۱۵ گرم بر سانتیمتر مکعب و چگالی مس مذاب در دمای ۱۰۸۳ درجه سانتی‌گراد، ۷/۹۳۷ گرم بر سانتیمتر مکعب است. بنابراین جدایش عناصر مس و آلومینیم و یا جزء فاز ثانویه و مذاب، منجر به توزیع هدفمند فازها و در نتیجه خواص تابعی می‌شود [۷، ۸]. جدایش اتمی حتی در حالت جامد در مورد اتم‌های جانشینی ایندیم-سرب و آنتیموان-بیس‌موت، مشاهده شده است [۹، ۱۰].

نتایج به دست آمده از ریخته‌گری گریز از مرکز درجا آلیاژ سه‌تایی آلومینیم، ۱۳/۸ درصد مس و ۱/۶ درصد آهن نشان داد که ساختار، حاوی چهار فاز به نام‌های  $\alpha$  آلومینیم،  $\theta$

11 [۱۸] و مقدار لیتیم در کل فلز مدرج و لایه‌های بیرونی، میانی و درونی (محصول گریز از مرکز) به روش شیمی تر (ICP-OES) مطابق با استاندارد داخلی RMRC-WI-520-197 تعیین و در جدول (۱) فهرست شده است.



۱- قالب فلزی ۲- الکتروموتور و مبدل (کلنورتور) ۳- پاتاقان اصلی ۴- پاتاقان هرزگرد  
شکل ۱- اجزا دستگاه ریخته‌گری گریز از مرکز افقی، ابعاد به میلی‌متر

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مواد مورد پژوهش

عناصر تشکیل دهنده (درصد وزنی عناصر)						نام ماده
منگنز	مس	روی	آهن	سیلیسیم	آلومینیم	
۰/۰۹	۲/۷۰	۰/۱۸	۱/۳۰	۸/۱۰	بقیه	شمش آلومینیم
حداکثر یک درصد ناخالصی						شمش لیتیم
≈۰/۰۹	≈۲/۷۰	≈۰/۱۸	≈۱/۳۰	≈۸/۱۰	بقیه	کل فلز مدرج

برای ساخت آلیاژ، ابتدا ۱۰ کیلوگرم شمش آلومینیم در کوره زمینی با سوخت گاز و بوتله گرافیتی، ذوب شد. سپس، بلافاصله قبل از ذوب ریزی، یک کیلوگرم شمش لیتیم خالص در داخل فویل آلومینیم به داخل مذاب فرو برده شد. به این ترتیب، مقدار لیتیم در کل آلیاژ بایستی حدود ۱۰ درصد وزنی باشد اما لیتیم به شدت اکسید شونده است بنابراین به هنگام آلیاژسازی مقداری زیادی از آن اکسید شده و از آلیاژ به صورت سرباره خارج می‌شود. به همین دلیل، مطابق جدول (۱)، مقدار لیتیم در کل آلیاژ ۲/۳ درصد وزنی است. با توجه به جنس قالب (که فلزی است) و با توجه به نمودار فاز آلومینیم-لیتیم [۷] (شکل ۲) و نسبت وزنی شمش‌های ذوب شده، نقطه ذوب آلیاژ حاصل حدود ۶۰۰ درجه سانتیگراد خواهد بود در حالی که نقطه ذوب ترکیب بین‌فلزی آلومینیم-لیتیم (فاز بتا) نزدیک ۷۰۰ درجه سانتیگراد است. به همین دلیل، دمای ریخته‌گری مذاب ۷۵۰ درجه سانتیگراد انتخاب شد. به این ترتیب، مذاب در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد داخل قالب فلزی (پیش‌گرم شده تا دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد)

سختی در سطح درون و بیرون زیاد نبود. به همین دلیل، در این پژوهش، قالب پیش‌گرم شد. گرمای تشکیل پیوند در ترکیبات AILi نشان‌دهنده یک تعامل شیمیایی قوی بین Al و Li در تمام ترکیبات بین‌فلزی AILi است. به طور خاص، در ترکیبات بین‌فلزی AILi، پایداری ترمودینامیکی به طور خطی با افزایش غلظت Li کاهش می‌یابد. محاسبات تئوریک برای تک بلورها نشان می‌دهد که تمام چهار ترکیب بین‌فلزی AILi از لحاظ مکانیکی پایدار هستند [۱۶]. سختی فلز پایه آلومینیم حاوی ۸/۵ درصد وزنی سیلیسیم و ۳/۵ درصد وزنی مس، کمتر از ۹۰ برینل گزارش شده است که با افزودن لیتیم (حداکثر تا ۰/۱ درصد وزنی)، سختی به تدریج تا ۷۵ برینل کاهش یافته است [۱۷]. در آن پژوهش، مقدار لیتیم برای تشکیل ترکیب بین‌فلزی کافی نبوده است. به همین دلیل، سختی کاهش یافته است. در حالی که، در پژوهش حاضر، مقدار لیتیم بیشتر در نظر گرفته شد.

در این پژوهش، مطابق با نمودار فاز تعادلی آلومینیم-لیتیم، نقطه ذوب فاز تقویت‌کننده (حدود ۷۰۰ درجه سانتیگراد) بیشتر از زمینه (حدود ۶۶۰ درجه سانتیگراد) است اما دمای بارریزی (حدود ۷۵۰ درجه سانتیگراد) بالاتر از نقطه ذوب فاز تقویت‌کننده است. لذا، با افزودن لیتیم به مذاب آلومینیم گروه ۳۰۰۰ با استفاده از روش ریخته‌گری گریز از مرکز افقی، خواص فلز مدرج تولید شده به صورت درجا، بهبود می‌یابد. به همین دلیل برای مطالعه، از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای شناسایی ریزساختار استفاده شد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

برای ساخت قطعه با رفتار مدرج از دستگاه ریخته‌گری گریز از مرکز افقی، مطابق شکل (۱) استفاده شده است. به منظور کنترل سرعت دوران قالب از الکتروموتور با قدرت ۰/۵۵ کیلووات ساخت شرکت DUTCHI NL مجهز به مبدل (کنورتور) ۲۰۰ ولت ساخت شرکت TECO E310 استفاده شد. قالب از جنس فولاد ساختمانی عمومی با طول ۲۴۰ میلی‌متر، قطر داخلی ۲۰۰ میلی‌متر و قطر خارجی ۲۲۰ میلی‌متر است. با ریخته‌گری مذاب آلومینیم گروه ۳۰۰۰ تقویت شده با لیتیم، لوله گریز از مرکز با رفتار مدرج تولید شود. ترکیب شیمیایی شمش آلومینیم به روش اسپکترومتری نشری مطابق با استاندارد ASTM E1251

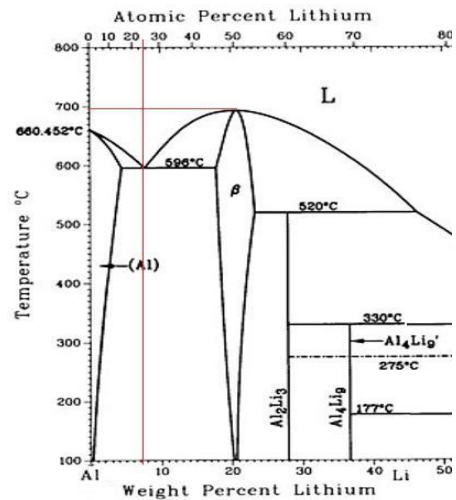
سانتیمتر مکعب و مس با چگالی ۸/۹۶ گرم بر سانتیمتر مکعب است. لذا شرایط تولید فلز مدرج در ریخته‌گری گریز از مرکز مهیا است.

دوران قالب با سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه ادامه یافت. وقتی قالب در هوا خنک شد، محصول از داخل قالب خارج شد. سپس، برای تمیزکاری و تمام کاری استوانه، ماشین کاری انجام شد. در نهایت، با استفاده از دستگاه وایرکات، برای تعیین سختی (۱ نمونه) و ریزساختار (۱ نمونه)، به ابعاد ۱۰×۱۴×۱۶ میلیمتر در راستای ضخامت از استوانه ای توخالی به قطر خارجی ۲۰۰ میلیمتر و طول ۲۰۰ میلیمتر و ضخامت ۱۶ میلیمتر با چگالی ۲/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب به دست آمده است.

مطالعه ریزساختار با میکروسکپ الکترونی روبشی VEGA2 (با دو مرتبه تکرار)، میکروسختی سنجی به روش ویکرز با نیروی فرورونده هرم الماسه برابر با ۵۰ گرم نیرو مطابق با استاندارد ASTM E384-17 [۲۰] (با سه مرتبه تکرار) و مقاومت به سایش به روش پین روی دیسک با سختی دیسک برابر با ۲۰۶۰ ویکرز در سرعت خطی برابر با ۱۰ متر بر دقیقه و تنش برابر با ۷/۶ مگاپاسکال در مسافت ۱۰۰۰ متر مطابق با استاندارد ASTM G99-17 [۲۱] در آزمایشگاه همکار اداره استاندارد ایران انجام شده است.

### ۳- نتایج و بحث

ضخامت استوانه توخالی در جهت شعاع به سه لایه درونی، میانی و بیرونی تقسیم شد و مقدار لیتیم در آنها و سختی ویکرز در فاصله‌های ۲ میلیمتری در جهت شعاع استوانه و به تناسب آن ریزساختار در جدول (۲) آورده شده است. در جدول (۱)، مقدار روی در کل آلیاژ ۰/۱۸ درصد وزنی تعیین شده است. در حالی مطابق جدول (۲)، در لایه بیرونی مقدار آن به حدود ۴ درصد وزنی رسیده است. دلیل این مسئله (و موارد مشابه) به این برمی‌گردد که برای تعیین آنالیز شیمیایی لایه‌ها، چند منطقه از لایه انتخاب شده است که به دلیل ماهیت ریخته‌گری گریز از مرکز و تفاوت عدد جرمی عناصر این پدیده اتفاق می‌افتد. مقدار درصد حجمی فازها از طریق محاسبه نسبت سطح اشغال شده توسط هر فاز به کل سطح زمینه با کمک سه تصویر میکروسکپ الکترونی در مقیاس ۲۰۰ میکرومتر (در بزرگ‌نمایی ۱۵۰ برابر) به دست آمده است.



شکل ۲- نمودار فازی آلومینیم-لیتیم [۷]

با سرعت دوران ۶۵۰ دور در دقیقه ریخته‌گری شد و سپس، بلافاصله سرعت دوران قالب به ۱۰۰۰ دور در دقیقه افزایش داده شد. طبق رابطه (۱) [۱۹]، حداقل سرعت دوران قالب بایستی ۶۰۰ دور در دقیقه باشد.

$$\omega \geq \sqrt{(g/(R-t))} = \sqrt{(9.8/(0.11-0.012))} = 600 \text{ دور در دقیقه} \quad (1)$$

g شتاب ثقل و برابر با ۹/۸ متر بر مجذور ثانیه است. R شعاع داخلی محصول (در سطح آزاد) بر حسب متر است. شعاع خارجی محصول (در تماس با قالب) بر حسب متر است. t ضخامت محصول بر حسب متر و  $\omega$  حداقل سرعت دوران قالب بر حسب دور در ثانیه برای تولید محصول سالم با ضخامت t است.

در ریخته‌گری گریز از مرکز برای پُر کردن قالب، علاوه بر نیروی ثقل از نیروی گریز از مرکز استفاده می‌شود. در این روش، سطح خارجی قطعه توسط سطح قالب شکل گرفته ولی سطح داخلی قطعه تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز، شکل می‌گیرد و پس از انجماد از قالب خارج می‌شود. سطح داخلی همواره با عنوان سطح آزاد شناخته می‌شود و شکل محصول در ریخته‌گری گریز از مرکز افقی به صورت یک استوانه توخالی است. با استفاده از نیروی گریز از مرکز، عنصر سنگین/سبک به سمت سطح خارجی/داخلی محصول رفته و به این ترتیب امکان توزیع هدفمند عنصر سنگین/سبک فراهم می‌شود. چگالی آلومینیم ۲/۷ گرم بر سانتیمتر مکعب در مقابل لیتیم با چگالی ۰/۵۳۴ گرم بر سانتیمتر مکعب و سیلیسیم با چگالی ۲/۳۳ گرم بر

جدول ۲- نتایج درصد وزنی لیتیم، میکروسختی سنجی و ویکرز و توزیع فازها در جهت شعاعی ضخامت فلز مدرج با چگالی ۲/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب

تصویر ریزساختار با فاصله از سطح بیرونی لوله (میلیمتر)															
۰-۲		۲-۴		۴-۶		۶-۸		۸-۱۰		۱۰-۱۲		۱۲-۱۴		۱۴-۱۶	
میانگین سختی ویکرز +۳٪															
۱۰۶		۹۵		۸۵		۹۲		۹۱		۱۶۲		۱۶۴		۲۵۱	
میانگین مقدار فازها (درصد حجمی) +۱۰٪															
زمینه	سایر فازها	زمینه	سایر فازها	زمینه	سایر فازها	زمینه	سایر فازها	زمینه	سایر فازها	زمینه	سایر فازها	زمینه	سایر فازها	زمینه	سایر فازها
---	---	۸۳	۱۷	۸۰	۲۰	۸۲	۱۸	۸۲	۱۸	۷۵	۲۵	۷۰	۳۰	۶۵	۳۵
تصویر نمونه ارسال شده جهت انجام آزمون							طرح‌واره جانمایی لایه‌ها در ضخامت لوله از جنس فلز مدرج								

از عناصر سبک مانند سیلیسیم است. مطابق نمودار طیف تفکیک انرژی در شکل (۳-ب)، فاز خاکستری روشن (A) حاوی آلومینیم غنی از عناصر سنگین مانند مس و گاهی سبک مانند سیلیسیم است. مطابق نمودار طیف تفکیک انرژی در شکل (۳-ت)، فاز سفید (D) حاوی ناخالصی‌های عناصر سنگین مانند آهن و منگنز است نکته اینکه طیف مربوط به آلومینیم و مس از زمینه ناشی شده و از ذره نیست. مطابق طیف تفکیک انرژی در شکل (۳-ث)، زمینه به رنگ طوسی (C)، محلول جامد آلومینیم حاوی مقدار جزئی مس و سیلیسیم و گاهی روی است. اما مطابق مطلب فوق و مقدار عنصر لیتیم شناسایی شده در لایه‌های مختلف به روش شیمی تر، فاز سیاه، ترکیب بین‌فلزی سبک بتا [۱۶] یا فاز حاوی آلومینیم غنی از عنصر بسیار سبک لیتیم است. به همین دلیل مطابق جدول (۲) یا شکل (۴) در لایه درونی بیشتر است. مابقی عنصر لیتیم در زمینه آلومینیم

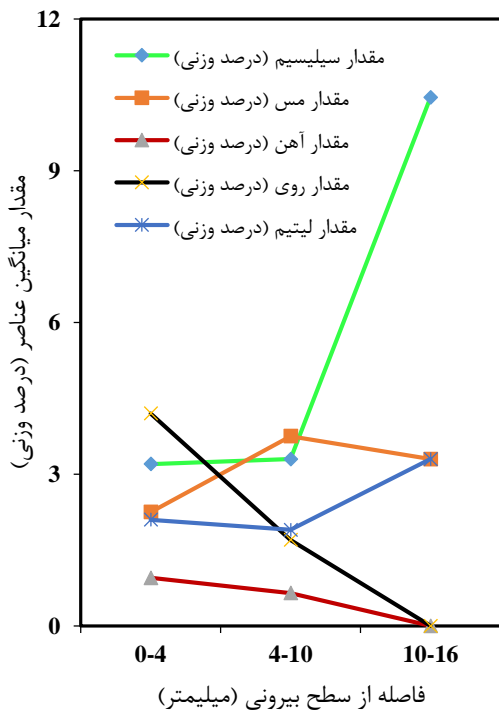
### ۳-۱- ارزیابی ریزساختار

در شکل (۳-الف)، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در حالت الکترون برگشتی از لایه میانی تهیه شده و در ادامه، طیف تفکیک انرژی فازها آورده شده است. به این دلیل، لایه میانی به نمایش گذاشته شده است که تمام فازها به جز فاز سیاه رنگ (به دلیل حضور لیتیم به روش طیف تفکیک انرژی، قابل آنالیز نیست) به وضوح در آن مشاهده می‌شود. مطابق جدول (۲) به فاصله ۱۴ تا ۱۶ میلیمتر از سطح بیرونی یعنی در لایه درونی، فاز سیاه رنگ به وضوح قابل مشاهده است.

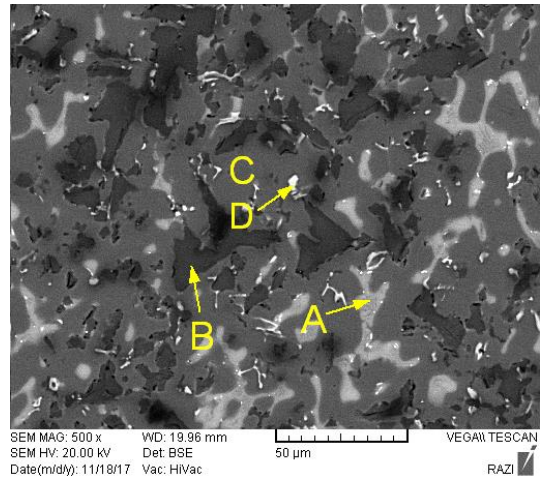
در ارزیابی فازها، برای پرهیز از خطا و اطمینان از درستی نتایج، در هر نمونه، آنالیز فازی برای فازهای مشابه، حداقل دو مرتبه انجام شد اما فقط یکی از آنها در شکل (۳) نمایش داده شد. مطابق نمودار طیف تفکیک انرژی در شکل (۳-ب)، فاز خاکستری تیره (B) حاوی آلومینیم غنی

و یا شاید در فاز خاکستری روشن قرار دارد. در شکل (۴)، توزیع مدرج سایر عناصر آلیاژی مانند سیلیسیم و مس و ناخالصی‌هایی از قبیل آهن و روی مشاهده می‌شود. مطابق جدول (۱)، مقدار سیلیسیم در کل آلیاژ (مقدار میانگین) برابر با ۸/۱ درصد وزنی است. در حالی که، مطابق نمودار فازی آلومینیم-سیلیسیم، حداکثر حد حلالیت سیلیسیم در آلومینیم، ۱/۶ درصد وزنی است. این به آن معنی است که تمام سیلیسیم در آلومینیم جامد حل نمی‌شود. از طرف دیگر، سیلیسیم، عنصر به نسبت سبک با چگالی ۲/۳۳ گرم بر سانتیمتر مکعب در مقابل آلومینیم با چگالی ۲/۷ گرم بر سانتیمتر مکعب است، لذا به سمت لایه داخلی متمایل می‌شود و مطابق شکل (۴)، مقدار عنصر سیلیسیم از لایه بیرونی به لایه داخلی به شدت روند صعودی دارد.

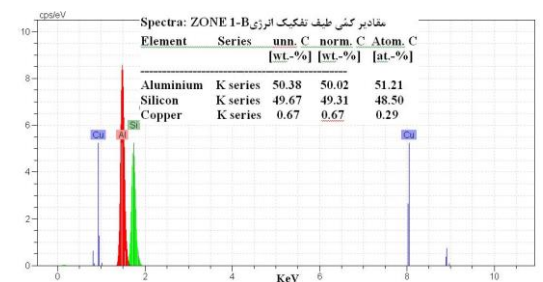
به طور مشابه، مقدار ناخالصی آهن در کل آلیاژ (یعنی مقدار میانگین) برابر با ۱/۳ درصد وزنی است. در حالی که، مطابق نمودار فازی آلومینیم-آهن، حداکثر حد حلالیت آهن در آلومینیم، صفر درصد وزنی است یعنی در آلومینیم منجمد شده حل نمی‌شود. اما، آهن، عنصر نسبتاً سنگین با چگالی ۷/۸۶ گرم بر سانتیمتر مکعب در مقابل آلومینیم با چگالی ۲/۷ گرم بر سانتیمتر مکعب است و به همین



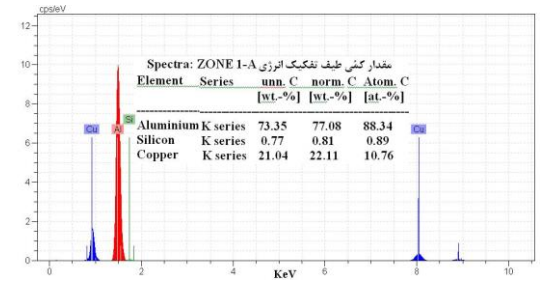
شکل ۴- توزیع مدرج عناصر آلیاژی با فاصله از لایه بیرونی لوله با چگالی ۲/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب در جهت شعاعی ضخامت



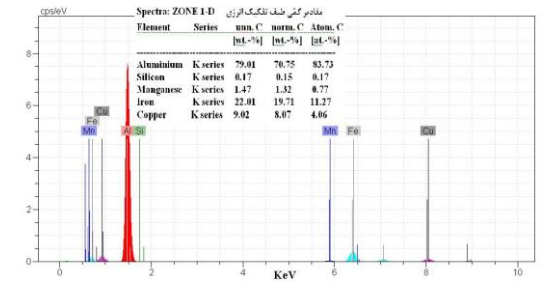
الف: تصویر میکروسکوپ الکترونی از لایه میانی ( الکترون برگشتی)



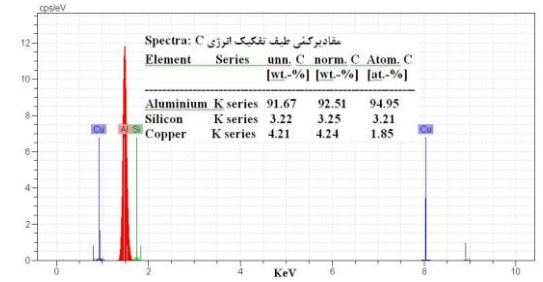
ب: نمودار طیف تفکیک انرژی از فاز خاکستری تیره B



پ: نمودار طیف تفکیک انرژی از فاز خاکستری روشن A



ت: نمودار طیف تفکیک انرژی از فاز سفید D



ث: نمودار طیف تفکیک انرژی از زمینه C

شکل ۳- الف: تصویر SEM و نمودار طیف تفکیک انرژی فازهای آن:

ب: فاز A, پ: فاز B, ت: فاز D, ث: زمینه C

به لایه داخلی روند صعودی (از ۲ به ۳/۳ درصد وزنی) دارد و لذا تشکیل ترکیب بین‌فلزی بتا در لایه درونی اتفاق می‌افتد.

برای صحنه‌گذاری ارزیابی ریزساختار، نقشه جانمایی عناصر آلومینیوم، مس و سیلیسیم در ۷ لایه به ترتیب در جدول (۳) به تصویر کشیده شده است. سیلیسیم بیشتر در فازهای خاکستری تیره متمرکز شده است. یعنی فازهای خاکستری تیره، غنی از سیلیسیم هستند. مس بیشتر در فازهای خاکستری روشن، غنی از مس هستند. به علاوه، در تطابق با شکل (۴)، مشاهده می‌شود که به طور کیفی، مقدار سیلیسیم به تدریج به سمت لایه درونی، افزایش می‌یابد. اما افزایش مقدار ترکیبات بین‌فلزی با پایه  $Al_2Cu$  (و به تبع آن مس) به نقطه ذوب پایین این ترکیب بین‌فلزی (برابر با ۵۹۰ درجه سانتیگراد) نسبت به آلومینیوم مذاب (برابر با ۶۶۰ درجه سانتیگراد)، نسبت داده می‌شود. زیرا فاز با نقطه ذوب پایین‌تر، جلوی جبهه انجماد حرکت می‌کند. به این ترتیب، از سطح بیرونی به سمت سطح درونی لوله مدرج، مقدار عناصر لیتیم، سیلیسیم و مس به تدریج زیاد شده است. در حالی که مقدار عناصر آهن و روی روند نزولی داشته است.

### ۳-۲- ارزیابی سختی

سرعت خنک‌کاری، در لایه نزدیک به قالب نسبت به سایر لایه‌ها، خیلی بیشتر است. به همین دلیل، مطابق جدول (۲)، در فاصله ۲-۰ میلیمتری از سطح بیرونی لوله، ذرات بسیار ریز هستند. زیرا با سرعت زیاد منجمد شده است. نتیجه این شده است که مطابق جدول (۲)، در اولین لایه (۲-۰ میلیمتری از سطح بیرونی لوله) سختی ۱۰۶ ویکرز و مقدار لیتیم در اولین لایه (۴-۰ میلیمتری از سطح بیرونی لوله) ۲/۱ درصد وزنی است در حالی که در لایه بعدی به ترتیب، ۹۵ ویکرز (حدود ۱۰ درصد کمتر) و ۱/۹ درصد وزنی (حدود ۱۰ درصد کمتر) است. مطابق جدول (۲)، لایه‌های بعدی، مطابق انتظار از فلز مدرج است. یعنی مقدار سیلیسیم، لیتیم و مس و به تبع آن سختی رو به افزایش است. به علاوه، در جدول (۲) مشاهده می‌شود که مقدار فاز سیاه (سبک) یعنی ترکیب بین‌فلزی آلومینیوم-لیتیم سخت [۲۳] و فاز خاکستری تیره و روشن (سبک) یعنی به ترتیب، ترکیب بین‌فلزی آلومینیوم-سیلیسیم و احتمالاً

سبب به سمت لایه بیرونی متمایل می‌شود. بنا به دلایل فوق، در شکل (۴)، مقدار عنصر آهن از لایه بیرونی به لایه داخلی، روند نزولی دارد.

مقدار ناخالصی روی در کل آلیاژ (یعنی مقدار میانگین) برابر با ۰/۱۸ درصد وزنی است. در حالی که، مطابق نمودار فازی آلومینیوم-روی، حداکثر حد حلالیت روی در آلومینیوم خیلی زیاد و برابر با ۷۰ درصد وزنی است لذا ناخالصی روی در آلومینیوم منجمد شده، حل می‌شود. از طرف دیگر، روی، عنصر به نسبت سنگین با چگالی ۷/۱۴ گرم بر سانتیمتر مکعب در مقابل آلومینیوم با چگالی ۲/۷ گرم بر سانتیمتر مکعب است. به همین سبب به سمت لایه بیرونی متمایل می‌شود. به دو دلیل اخیر، در شکل (۴)، مقدار عنصر روی از لایه بیرونی به لایه داخلی روند نزولی دارد.

مقدار عنصر مس در کل آلیاژ (یعنی مقدار میانگین) برابر با ۲/۷ درصد وزنی است. در حالی که، مطابق نمودار فازی آلومینیوم-مس، حداکثر حد حلالیت مس در آلومینیوم جامد برابر با ۵ درصد وزنی است [۲۲] لذا مس در آلومینیوم منجمد شده، حل می‌شود. از طرف دیگر، مس، عنصر به نسبت سنگین با چگالی ۸/۹۶ گرم بر سانتیمتر مکعب در مقابل آلومینیوم با چگالی ۲/۷ گرم بر سانتیمتر مکعب است. به همین سبب به سمت لایه بیرونی متمایل می‌شود. اما حضور مس در آلومینیوم موجب تشکیل ترکیبات بین‌فلزی (نامحلول) با پایه  $Al_2Cu$  نیز می‌شود که نقطه ذوب پایین‌تر (۵۹۰ درجه سانتیگراد) از آلومینیوم (برابر با ۶۶۰ درجه سانتیگراد) دارند که موجب می‌شود این ترکیبات بین‌فلزی به سمت لایه درونی متمایل شوند. زیرا در شرایطی که قالب فلزی پیش‌گرم شده باشد، این ترکیبات در جلوی جبهه انجماد قرار می‌گیرند. نتیجه بر هم‌کنش دو مسئله اخیر موجب می‌شود که در شکل (۴)، مقدار عنصر مس از لایه بیرونی به لایه داخلی به طور جزئی روند صعودی داشته باشد.

مقدار لیتیم در کل آلیاژ (یعنی مقدار میانگین) برابر با ۲/۳ درصد وزنی است. در حالی که، مطابق نمودار فازی آلومینیوم-لیتیم، حداکثر حد حلالیت لیتیم در آلومینیوم، حدود ۳ درصد وزنی است. از طرف دیگر، لیتیم عنصر بسیار سبک با چگالی ۰/۵۳۴ گرم بر سانتیمتر مکعب در مقابل آلومینیوم با چگالی ۲/۷ گرم بر سانتیمتر مکعب است. به همین سبب به سمت لایه داخلی متمایل می‌شود. بنا به دلایل فوق، در شکل (۴)، مقدار عنصر لیتیم از لایه بیرونی



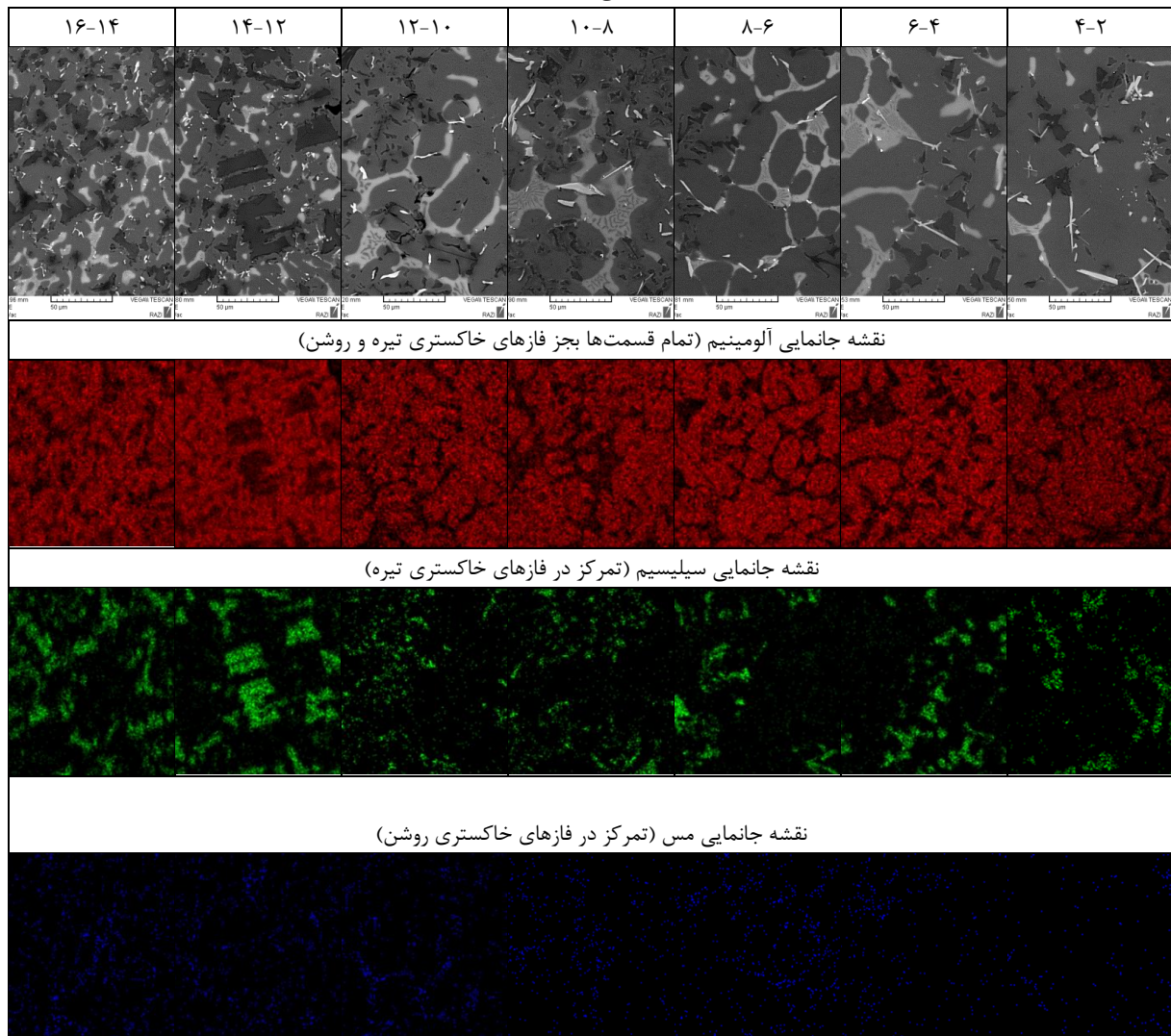
### ۳-۳- ارزیابی مقاومت سایشی

نتایج ارزیابی مقاومت به سایش سطوح درونی و بیرونی حاکی از این است که در شرایط یکسان، مقاومت به سایش سطح بیرونی از سطح درونی کمتر است. زیرا حجم کاهش یافته در سطح بیرونی و درونی به ترتیب ۸/۱۷ و ۶/۶۶ میلیمتر مکعب است. یعنی مقاومت به سایش سطح درونی (با سختی ۲۵۱ ویکرز) نسبت به سطح بیرونی (با سختی ۱۰۶ ویکرز) ۱۸ درصد بیشتر است. بنابراین، سختی با مقاومت به سایش رابطه مستقیم دارد به عبارت دیگر با افزایش مجموع مقدار فازهای محلول جامد و ترکیب بین‌فلزی از ۱۷ درصد حجمی به ۳۵ درصد حجمی، سختی و مقاومت به سایش افزایش یافته است.

لیتیم و ترکیب بین‌فلزی با پایه آلومینیم-مس با دور شدن از سطح بیرونی لوله افزایش می‌یابد. این دلیل افزایش سختی از سطح بیرونی به سطح درونی لوله است. این ارتباط در شکل (۵) رسم شده است.

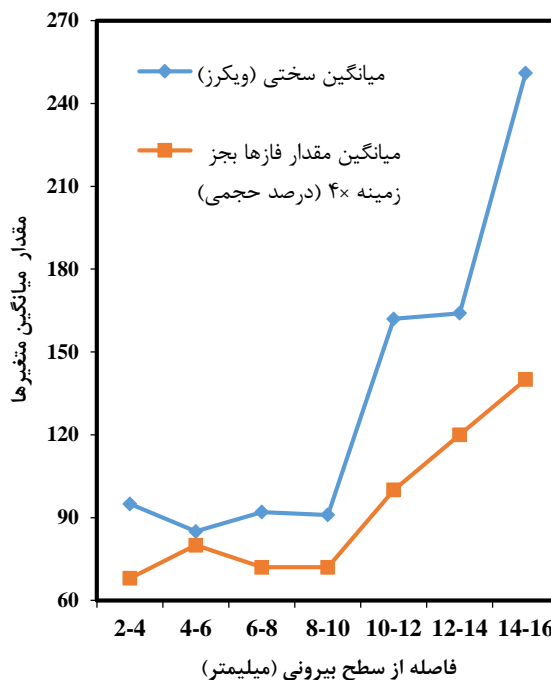
در تطابق با یافته این پژوهش، سختی در آلیاژهای آلومینیم حاوی ۰/۶۵ تا ۴/۰ درصد وزنی مس و ۱/۰ تا ۲/۶ درصد وزنی لیتیم در شرایط ریختگی، ۶۰ تا ۱۳۰ ویکرز [۲۴-۲۶] و سختی در آلیاژهای آلومینیم حاوی ۸/۵ درصد وزنی سیلیسیم و ۳/۵ درصد وزنی مس، ۹۰ برینل گزارش شده است [۱۷]. در حالی که در این پژوهش، مقدار مس ۲/۷ درصد وزنی و مقدار لیتیم ۲/۱، ۱/۹ و ۳/۳ درصد وزنی است و حداکثر سختی در شرایط ریختگی به ترتیب ۱۰۶، ۹۲ و ۲۵۱ ویکرز شده است.

جدول ۳ - نقشه جانمایی عناصر آلومینیم، مس و سیلیسیم با فاصله از سطح بیرونی لوله با چگالی ۲/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب در جهت شعاعی ضخامت (میلیمتر)



## مراجع

- [1] Challen B., Baranescu R., Diesel Engine Reference Book, Butterworth-Heinemann, UK, 1999.
- [2] Naebe M., Shirvanimoghaddam K., Functionally graded materials: A review of fabrication and properties, Applied Materials Today, 2016, 5, 223-245.
- [3] حلوانی ا.، تیمورنژاد ج.، بررسی و تحقیق بر روی تغییرات پارامترهای موثر بر تولید لوله‌های آلیاژی غیرآهنی به روش ریخته‌گری گریز از مرکز از جنس برنز، قلع و آلومینیم، طرح پژوهشی دانشگاه تهران، ۱۳۸۶.
- [4] طالبی ع.، حلوانی ا.، تاثیر پارامترهای فرآیند بر جدایش ماکروسکوپی سرب در ریخته‌گری گریز از مرکز افقی برنز قلع C۹۲۲۰۰، مهندسی متالورژی، ۱۳۷۷، ۲، ۲۳-۳۱.
- [5] طالبی ع.، حلوانی ا.، بررسی و تحقیق بر روی پارامترهای مؤثر بر ریخته‌گری بوش‌های برنزی پر آلیاژ به روش ریخته‌گری گریز از مرکز افقی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۷۷.
- [6] ASM Handbook: Casting. Volume 15, ASM International, Ohio, USA, 2008.
- [7] Davis J., Aluminum and aluminum alloys. ASM International, Handbook Committee, Ohio, USA, 1993.
- [8] شهبازی‌خانی ح.، صمدی ا.، بررسی ریزساختار و رفتار هدفمند مواد  $Al-Al_2Cu$  تولید شده به روش ریخته‌گری گریز از مرکز درجا، سومین همایش مشترک بیست و یکمین سمینار سالانه انجمن علمی ریخته‌گری ایران و سیزدهمین کنگره سالانه انجمن مهندسان متالورژی ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۸.
- [9] Campbell J., Chapter 5 - Solidification structure, in: J. Campbell (Ed.) Castings (Second Edition), Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2003, 117-177.
- [10] Campbell J., Chapter 6 - Casting alloys, in: Campbell J. (Ed.) Complete Casting Handbook, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2011, 255-390.
- [11] Watanabe Y., Kurahashi M., Kim I.S., Miyazaki S., Kumai S., Sato A., Tanaka S.I., Fabrication of fiber-reinforced functionally graded materials by a centrifugal in situ method from Al-Cu-Fe ternary alloy, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37, 2186-2193.
- [12] Mahmoodian R., Hassan M.A., Hamdi M., Yahya R., Rahbari R.G., In situ  $TiC-Fe-Al_2O_3-TiAl/Ti_3Al$  composite coating processing using centrifugal assisted combustion synthesis, Composites Part B: Engineering, 2014, 59, 279-284.
- [13] Melgarejo Z.H., Suárez O.M., Sridharan K., Microstructure and properties of functionally graded Al-Mg-B composites fabricated by centrifugal casting, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39, 1150-1158.
- [14] کلوند ج.، آقامیری س.ا.، وحدت س.ا.، ارتباط بین سختی و ریزساختار آلیاژ بابت در ریخته‌گری گریز از مرکز افقی، ریخته‌گری، ۱۳۹۳، ۱۰۶ (پاییز و زمستان)، ۴۸-۵۹.
- [15] مهدی تبار ع.، رحیمی غ.ج.، وحدت س.ا.، ارزیابی ریزساختار، خواص فیزیکی و مکانیکی فلز مدرج آلومینیم-مس تولید شده به



شکل ۵- ارتباط بین سختی و مقدار سایر فازهای موجود در زمینه: روند تغییرات مجموع مقدار فازهای محلول جامد و ترکیب بین‌فلزی با سختی مشابه است.

## ۴- نتیجه‌گیری

- مجموع فازهای موجود در زمینه به ویژه ترکیبات بین‌فلزی آلومینیم-لیتیم و آلومینیم-سیلیسیم و گاه آلومینیم-مس، از ۱۷ درصد حجمی به ۳۵ درصد حجمی از سطح بیرونی تا سطح درونی لوله مدرج، افزایش یافته است. به این ترتیب، فاز زمینه که شامل آلومینیم است در سطح بیرونی برابر با ۸۳ درصد حجمی و در سطح درونی برابر با ۶۵ درصد حجمی است.
- مقاومت به سایش سطح درونی نسبت به سطح بیرونی، ۱۸ درصد افزایش یافته است و به علاوه، سختی لوله مدرج در سطح بیرونی نسبت به سطح درونی از ۹۵ ویکرز به ۲۵۱ ویکرز افزایش یافته است. زیرا مقدار مجموع فازهای ترکیب بین‌فلزی (که نسبتاً سخت هستند) و محلول جامد (که به نسبت مستحکم هستند) از سطح بیرونی به سطح درونی از ۱۷ درصد حجمی به ۳۵ درصد حجمی افزایش یافته است.
- در لوله مدرج مورد پژوهش، مقاومت به سایش با سختی و مجموع مقدار فازهای محلول جامد و ترکیبات بین‌فلزی رابطه مستقیم دارد.

روش ریخته‌گری گریز از مرکز افقی، پژوهشنامه ریخته‌گری،  
۱۳۹۶، (۱) ۴۷-۵۸.

- [16] Yu H., Duan X.-H., Ma Y.-J., Zeng M., First Principles Study of Al-Li Intermetallic Compounds, Chinese Journal of Chemical Physics, 2012, 25(6) 659-661..
- [17] karamouz M., Azarbarmas M., Emamy M., Alipour M., Microstructure, hardness and tensile properties of A380 aluminum alloy with and without Li additions, Materials Science and Engineering: A, 2013, 582, 409-414.
- [18] ASTM:E1251-11, Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry, in, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2011.
- [19] Vahdat S.E., Tin-Copper-Lead Alloy Produced by Horizontal Centrifugal Casting, Archives of Foundry Engineering, 2016, 16, 131-137.
- [20] Herrmann K., Hardness testing: principles and applications, ASM International, Ohio, USA, 2011.
- [21] ASTM: G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017.
- [22] Watanabe Y., Sato H., Ogawa T., Kim I.-S., Density and hardness gradients of functionally graded material ring fabricated from Al-3mass%Cu alloy by a centrifugal in-situ method, Materials transactions, 2007, 48, 2945-2952.
- [23] Uesugi T., Takigawa Y., Higashi K., Elastic Constants of AlLi from First Principles, Materials Transactions, 2005, 46, 1117-1121.
- [24] Augustyn-Pieniążek J., Adrian H., Rzakosz S., Choroszyński M., Structure and mechanical properties of Al-Li alloys as cast, Archives of Foundry Engineering, 2013, 13, 5-10.
- [25] Zheng X., Luo P., Chu Z., Xu J., Wang F., Plastic flow behavior and microstructure characteristics of light-weight 2060 Al-Li alloy, Materials Science and Engineering: A, 2018, 736, 465-471.
- [26] Liu D.Y., Li J.F., Ma Y.L., Gupta R.K., Birbilis N., Zhang R., A closer look at the role of Zn in the microstructure and corrosion of an Al-Cu-Li alloy, Corrosion Science, 2018, 145, 220-231.

