



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Evaluation of Microstructure, Physical and Mechanical Properties of Functionally Graded Al-Cu Fabricated by Horizontal Centrifugal Casting

Aref Mehditabar¹, Gholam H. Rahimi², Seyed Ebrahim Vahdat^{3*}

1. PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2. Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

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

Received 09 November 2017
Accepted 31 December 2017

Abstract:

In the present study, an investigation of coefficient of thermal expansion, elastic modulus, yield strength of compression, wear resistance and hardness of 3 layers called inner, intermediate and outer are investigated for functionally graded Al based cylindrical shell containing 26 wt.% Cu and 8 wt.% Si. The microstructure is studied by using TESCAN MIRA3 field emission scanning electron microscopy (FESEM) and TITAN scanning transmission electron microscope (STEM) is revealed that intermetallic compound content reaches its maximum volume fraction at the inner layer with 33.3 Vol.% and then reduces gradually to 26.4 Vol.% at outer layer. In addition, wear rate was 5.4gr/m² and hardness was 153 HV at inner layer and then gradual increase by 7.07 gr/m² and decrease by 149 HV, respectively at outer layer. Moreover, the value of yield strength of compression is determined 275, 460 and 415 MPa at outer, intermediate and inner layers, respectively.

Keywords:

Coefficient of thermal expansion,
Elastic modulus,
Yield strength of compression,
Wear resistance.

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Mehditabar A., Rahimi G. H., Vahdat S.E., Evaluation of Microstructure, Physical and Mechanical Properties of Functionally Graded Al-Cu Fabricated by Horizontal Centrifugal Casting, in Persian, Founding Research Journal, 2017, 1(1) 47-58.
DOI: 10.22034/frj.2017.54596

* Corresponding Author:

Seyed Ebrahim Vahdat, Assistant Professor

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

Tel: +98 911 121 4008.

E-mail: e.vahdat@iauamol.ac.ir



انجمن علمی ریخته‌گری ایران

فصل‌نامه علمی پژوهشی

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

ارزیابی ریزساختار، خواص فیزیکی و مکانیکی فلز مدرج آلومینیم - مس تولید شده به روش ریخته‌گری گریز از مرکز افقی

عارف مهدی تبار^۱، غلامحسین رحیمی^۲، سید ابراهیم وحدت^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. aref6252@yahoo.com

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. rahimi_gh@modares.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران. e.vahdat@iauamol.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۱۸

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۰

در پژوهش حاضر، استحکام تسلیم فشاری، مدول الاستیک، سختی، ضریب انبساط حرارتی و مقاومت به سایش فلز مدرج پایه آلومینیم حاوی ۲۶ درصد وزنی مس و ۸ درصد وزنی سیلیسیم در لایه بیرونی، لایه میانی و لایه درونی استوانه توخالی گریز از مرکز شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعات ریزساختار با میکروسکپ الکترونی روبشی و میکروسکپ الکترونی عبوری-رویشی نشان داده است که در لایه درونی، مقدار ترکیب بین فلزی برابر با ۳۳/۳ درصد حجمی است در حالی که در لایه بیرونی به تدریج تا ۲۶/۴ درصد حجمی کاهش می‌یابد. به علاوه، در لایه درونی، سختی، ۱۵۳ ویکرز و نرخ سایش، ۵/۴۰ گرم بر متر مربع، است که تا رسیدن به لایه بیرونی به ترتیب، به ۱۴۹ ویکرز کاهش و به ۷/۰۷ گرم بر متر مربع افزایش می‌یابد. در حالی که استحکام تسلیم فشاری در لایه‌های بیرونی، میانی و درونی به ترتیب برابر با ۲۷۵، ۴۶۰ و ۴۱۵ مگاپاسکال به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی:

استحکام تسلیم فشاری،

ضریب انبساط حرارتی،

مدول الاستیک،

مقاومت سایشی.

۱- مقدمه

این مشکلات سبب ظهور نوع جدیدی از مواد مرکب به نام فلز مدرج (تابعی)^[۱] شده است. هم‌اکنون، دو روش ریخته‌گری گریز از مرکز برای تولید فلز مدرج به نام‌های روش درجا و روش ذره جامد وجود دارد [۲، ۳]. 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. در این پژوهش، از روش درجا استفاده می‌شود.

محققان محدوده نیروی گریز از مرکز ۵۰g تا ۱۰۰g را برای قالب‌های فلزی و محدوده نیروی گریز از مرکز ۲۵g تا ۵۰g را برای قالب‌های ماسه‌ای توصیه کرده است. همچنین نیروی گریز از مرکز ۳۵g را برای ریخته‌گری گریز از مرکز

برای افزایش کارایی فلزات و آلیاژها در قطعات مهندسی خاص (مانند بوش سیلندر و لوله تیربار)، استحکام بالا و مقاومت سایشی بالا بطور همزمان مورد نیاز است. توانایی یک فلز یا آلیاژ برای برآوردن 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 تقویت کننده‌های سخت و مقاوم به سایش روی آورده‌اند. عواملی نظیر استحکام مناسب برای فصل مشترک بین تقویت کننده 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 تقویت کننده‌های بسیار ریز (کمتر از یک میکرومتر) و با توزیع پراکنده است که به هنگام تولید، مشکلاتی نظیر آگلومره شدن تقویت کننده را در بر دارد.

¹ Functionally Graded Materials (FGMs)

مطالعه قرار گرفت. همچنین، در مرجع [۱۸] شرایط ریخته‌گری گریز از مرکز آلیاژهای آلومینیم-بور از ۲ تا ۷/۲ درصد وزنی مورد مطالعه قرار گرفت. هدف همه آنها بهبود خواص مکانیکی و حرارتی در طول محصول با تابعی معین بوده است.

ماهر و همکاران [۱۹] به روش ریخته‌گری گریز از مرکز افقی، یاتاقانی از جنس فولاد با پوشش ضخیم برنز را طراحی و ساختند. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که اگر چه برنز به فولاد متصل نمی‌شود اما اعمال نیروی گریز از مرکز (از طریق اعمال فشار مذاب روی جداره درونی قالب) بین فولاد و برنز حدود ۲/۴ میکرون اتصال ایجاد کند. به این ترتیب، فشار ناشی از نیروی گریز از مرکز موجب پیوستگی بیشتر در ساختار و کاهش یا حذف ناپیوستگی‌هایی نظیر حفره انقباضی و ترک می‌شود که نهایتاً استحکام را افزایش می‌دهد.

کلوند و همکاران [۱۵] 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 لایه درونی فلز مدرج حدود ۱۸ ویکرز و سختی در لایه بیرونی آن حدود ۱۵ ویکرز می‌باشد. به این ترتیب، به دلیل اختلاف در چگالی عناصر تشکیل دهنده آلیاژ، ترکیب شیمیایی در نزدیکی لایه بیرونی فلز مدرج با ترکیب شیمیایی در نزدیکی لایه درونی آن، متفاوت است. بنابراین منجر به تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی می‌گردد.

در این پژوهش، با استفاده از روش ریخته‌گری گریز از مرکز افقی آلیاژ هایپویوتکتیک آلومینیم-۲۶ درصد وزنی مس، فلز مدرج به صورت درجا تولید می‌شود که با توجه به مقدار مس موجود در آلومینیم، هیچ یک از پژوهش‌گران نامبرده به آن نپرداخته‌اند. هدف، بررسی ریزساختار و اثر آن روی خواص فیزیکی و مکانیکی در آلیاژ مورد تحقیق است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، برای ساخت قطعه جدار ضخیم با رفتار مدرج از دستگاه ریخته‌گری گریز از مرکز افقی موجود در دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت الله آملی مطابق شکل (۱) استفاده شده است.

الکتروموتور با قدرت ۰/۵۵ کیلووات ساخت شرکت DUTCHI NL مجهز به مبدل (کنورتور) ۲۰۰ ولت ساخت

عمودی و نیروی گریز از مرکز ۱۵g را برای ریخته‌گری نیمه گریز از مرکز توصیه شده است [۴-۶]. در هر صورت روابط تجربی برای ریخته‌گری گریز از مرکز بکار می‌رود. در مرجع [۷] به نمونه‌ای از ساختار و توزیع فاز در آلیاژهای هایپویوتکتیک، یوتکتیک و هایپریوتکتیک آلومینیم-مس اشاره شده است. در این مرجع، اندازه ذرات به سمت سطوح درونی 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 در طول می‌شود. جدایش اتمی حتی در حالت جامد در مورد اتم‌های جاننشینی ایندیم-سرب و آنتیموان-بیس‌موت، مشاهده شده است [۲، ۳].

آلیاژ سه تایی آلومینیم، ۱۳/۸ درصد مس و ۱/۶ درصد آهن برای تولید فلز مدرج به روش ریخته‌گری گریز از مرکز درجا استفاده شده است. ساختار، حاوی چهار فاز به نام‌های آلومینیم، θ با فرمول شیمیایی Al_2Cu ، ω با فرمول شیمیایی Al_7Cu_2Fe و $Al_{13}Fe_4$ است. شکل فاز ω فیبری (سوزنی) بوده و به سمت لایه بیرونی 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 ω ، ۴/۳ گرم بر سانتیمتر مکعب است و چگالی فاز آلومینیم در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد، ۲/۳۶۹ گرم بر سانتیمتر مکعب است. نقطه انجماد فازهای آلومینیم، θ ، ω و $Al_{13}Fe_4$ به ترتیب ۶۶۰، ۵۹۱، ۷۲۸ و ۱۱۶۰ درجه سانتی‌گراد است. در آن پژوهش، با تغییر شرایط ریخته‌گری شامل دمای قالب، روش خنک‌کاری و ضریب G، تغییرات ساختاری هدفمند انجام شده است [۸].

مشابه این عملیات بر روی آلیاژهای آلومینیم-بور [۹]، آلومینیم-کاربید سیلیسیم [۱۰-۱۴] و آلیاژ قلع-مس-سرب [۱۵] انجام شده است. در مرجع [۱۶] مدلی برای انجماد ریخته‌گری گریز از مرکز عمودی آلیاژهای آلومینیم-کاربیدسیلیسیم ارائه شده است. در مرجع [۱۷] شرایط ریخته‌گری گریز از مرکز عمودی آلیاژهای آلومینیم-۶ درصد آهن در سه دمای بارریزی مختلف، مورد

ضخامت محصول بر حسب متر و ω حداقل سرعت دوران قالب بر حسب دور در ثانیه برای تولید محصول سالم با ضخامت t است.

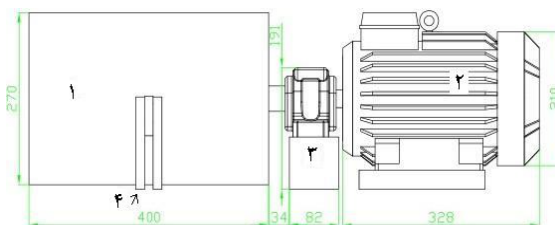
دوران قالب با سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه ادامه یافت. وقتی قالب در هوا خنک شد، محصول از داخل قالب بیرون آورده شد. سپس، برای کروی شدن مقطع استوانه، ماشینکاری انجام شد. در نهایت، با استفاده از دستگاه وایرکات، ۳ دسته ۳ تایی نمونه آزمون برای تعیین خواص فیزیکی (۱ دسته) و خواص مکانیکی (۱ دسته) و مقاومت به سایش (۱ دسته)، یکی از لایه بیرونی، یکی از لایه میانی و یکی از لایه درونی، به ابعاد $10 \times 10 \times 4$ میلی‌متر در راستای ضخامت از استوانه‌ای توخالی به قطر خارجی ۲۰۰ میلی‌متر و طول ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۲ میلی‌متر به دست آمد. برای مطالعه ریزساختار از ضخامت ۱۲ میلی‌متر، یک نمونه با برش سیمی تهیه شد.

برای اطمینان از صحت نتایج، آزمون‌ها در آزمایشگاه‌های مورد تایید اداره استاندارد ایران و یا در دانشگاه‌های معتبر انجام شد و برای اطمینان از دقت نتایج، آزمون‌ها حداقل دو مرتبه تکرار شد. آزمون سایش و مطالعه سطح سایش و آنالیز براده‌های سایش در دانشگاه تربیت مدرس، مطالعه ریزساختار با میکروسکپ الکترونی روبشی TESCAN MIRA3 و سختی‌سنجی در مرکز پژوهش متالورژی رازی و نهایتاً، مطالعه ریزساختار با میکروسکپ الکترونی عبوری- روبشی TITAN و اندازه‌گیری ضریب انبساط حرارتی و استحکام تسلیم فشاری به همراه مدول الاستیک در دانشگاه صنعتی سیلِسین، کشور لهستان^۱ انجام شد.

مقاومت به سایش فلز مدرج با دستگاه قابل برنامه‌ریزی پین روی دیسک در دمای اتاق و رطوبت نسبی ۳۵ درصد، اندازه‌گیری شده است. جنس پین از فولاد ابزار AISI52100 با سختی ۶۴ راکول-سی است که روی نمونه‌ای چهارگوش به ابعاد $2/4 \times 2/4$ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر سایش ایجاد می‌کند. آزمون سایش با نیروی ثابت عمودی (F_N) ۴۰ نیوتن و با سرعت خطی (S_V) $6/35$ سانتیمتر بر ثانیه در فاصله (S_m) ۴۴۰ متر انجام شده است. نرخ سایش بر حسب گرم بر متر مربع با کمک رابطه (۲) محاسبه شده است. به طوری که Δm جرم سایش یافته بر حسب گرم و A سطح سایش یافته (تماس) بر حسب متر مربع است.

$$W_r = \Delta m / A \quad (2)$$

شرکت TECO E310 (به منظور کنترل دور الکتروموتور)، قالب فلزی با طول ۲۴۰ میلی‌متر، قطر داخلی ۲۰۰ میلی‌متر و قطر خارجی ۲۲۰ میلی‌متر را می‌چرخاند تا با ریخته‌گری مذاب پایه آلومینیم مطابق ترکیب شیمیایی در جدول (۱)، لوله گریز از مرکز با رفتار مدرج تولید شود.



۱- قالب فلزی ۲- الکتروموتور و مبدل (کتورتور) ۳- یاتاقان اصلی ۴- یاتاقان هرزگرد

شکل ۱- اجزا دستگاه ریخته‌گری گریز از مرکز افقی (ابعاد به میلی‌متر است).

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلز مدرج آلومینیم-۲۶ درصد وزنی مس

عنصر	Al	Cu	K	S	Si	Ca	Zn	Fe
درصد وزنی	بقیه	۲۶/۰۱	۰/۵۷	۰/۱۷	۷/۸۰	۰/۳۰	۰/۱۵	۱/۳۰

برای ساخت آلیاژ، ابتدا ۵ کیلوگرم مس خالص تجارتي تا دمای ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد، فوق ذوب شد. سپس ۱۷ کیلوگرم شمش آلومینیم حاوی ۸/۲ درصد وزنی سیلیسیم و ۲/۳ درصد وزنی مس، به آن اضافه شد. با توجه به جنس قالب (که فلزی است) و با توجه به نمودار فاز آلومینیم-مس [۲۰] و نسبت وزنی شمشهای ذوب شده، نقطه ذوب آلیاژ حاصل حدود ۵۸۰ درجه سانتیگراد خواهد بود و با احتساب ۷۰ درجه سانتیگراد (۱۲ درصد) فوق ذوب، دمای ریخته‌گری مذاب ۶۵۰ درجه سانتیگراد انتخاب شد. نهایتاً، مذاب در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد داخل قالب فلزی 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 [۱۵]، حداقل سرعت دوران قالب بایستی ۶۰۰ دور در دقیقه باشد.

$$\omega \geq \sqrt{(g/(R-t))} = \sqrt{(9.8/(0.11-0.012))} = 10 \quad (1)$$

دور در ثانیه ۱۰
دور در دقیقه ۶۰۰ = ۱۰ × ۶۰

g شتاب ثقل و برابر با $9/8$ متر بر مجذور ثانیه، r شعاع داخلی محصول (در سطح آزاد) بر حسب متر، R شعاع خارجی محصول (در تماس با قالب) بر حسب متر، t

¹ Silesian University of Technology, Gliwice, Poland

۳- نتایج و بحث

نتایج مدول الاستیک بر حسب مگاپاسکال (E)، استحکام تسلیم فشاری بر حسب مگاپاسکال (σ_y)، سختی بر حسب ویکرز (HV)، مقدار ترکیب بین فلزی بر حسب درصد حجمی (V%)، ضریب انبساط حرارتی در دمای ۱۱۵ درجه سانتیگراد بر حسب درجه سانتیگراد (CTE) و نرخ سایش بر حسب گرم بر متر مربع (W_T) در ۳ لایه (مطابق شکل ۲) از راستای ضخامت تهیه و در جدول (۲)، فهرست شده است.



شکل ۲- معرفی و نمایش لایه‌ها پس از ماشینکاری و قبل از نمونه برداری

حاوی ۲۶ درصد وزنی مس است. بنابراین، فاز روشن، فاز تتا است که مطابق نمودار فازی آلومینیم-مس [۲۰]، با نقطه ذوب ۵۹۰ درجه سانتیگراد و با چگالی ۴/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب [۲۱-۲۳] یا همان Al_2Cu و مشتقات آن است و فاز تیره، زمینه است که مطابق نمودار فازی آلومینیم-مس [۲۰]، آلومینیم فوق اشباع شده از اتم‌های مس با نقطه ذوب حدود ۶۶۰ درجه سانتیگراد و با چگالی حدود ۲/۷ گرم بر سانتیمتر مکعب [۲۰] است.

در شکل (۳-الف) و شکل (۳-ب)، به طور کیفی، فاز روشن یا همان فاز تتا بیشتری مشاهده می‌شود، یعنی مقدار فاز تتا در لایه درونی، حداکثر است. از طرف دیگر در شکل (۳-ث) و شکل (۳-ج)، به طور کیفی، فاز روشن کمتری مشاهده می‌شود، یعنی مقدار فاز تتا در لایه بیرونی، حداقل است. در سایر لایه‌ها، از لایه درونی به سمت لایه بیرونی، به تدریج از مقدار فاز تتا کاسته می‌شود.

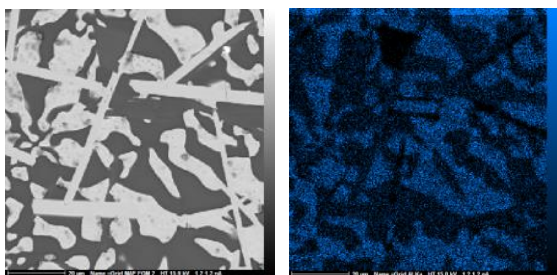
اگرچه انتظار می‌رفت که فاز تتا با چگالی بیشتری (۴/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب) نسبت به فاز زمینه در حالت مذاب (۲/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب [۲۰]) در لایه درونی کمتر باشد، اما چون نقطه ذوب فاز تتا (۵۹۰ درجه سانتیگراد) کمتر از نقطه ذوب زمینه (۶۶۰ درجه سانتیگراد) است. بنابراین در درجه حرارت ریخته‌گری (برابر با ۶۵۰ درجه سانتیگراد)، فاز تتا مذاب به سمت لایه‌های درونی محصول رانده می‌شود و فقط مقداری کمی از آن در لایه‌های انجماد یافته (که دمایی کمتر از ۵۹۰ درجه سانتیگراد دارند) محبوس می‌شود.

۳-۱- ارزیابی ریزساختار

در تصاویر الف تا ج شکل (۳)، تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی در فاصله‌های ۲ میلی‌متری از سطح داخلی به سطح خارجی به نمایش گذاشته شده است. آلیاژ، پایه آلومینیم

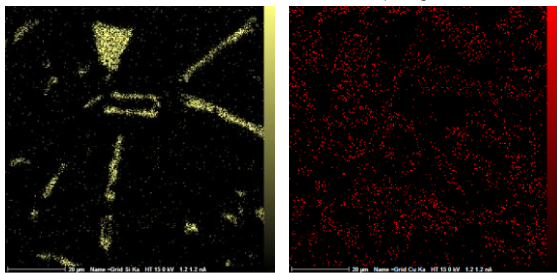
جدول ۲- نتایج مدول الاستیک (E)، استحکام تسلیم فشاری (σ_y)، سختی (HV)، مقدار ترکیب بین فلزی (V%)، ضریب انبساط حرارتی (CTE) و نرخ سایش (W_T) برای فلز مدرج آلومینیم-۲۶ درصد وزنی مس با چگالی ۳/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب

لایه‌ها (میلی‌متر)	نرخ سایش (گرم بر متر مربع)	سختی (ویکرز)	ضریب انبساط حرارتی در دمای ۱۱۵ درجه سانتیگراد $\times 10^{-6}$ (بر درجه سانتیگراد)	مقدار ترکیب بین فلزی (درصد حجمی)	استحکام تسلیم فشاری (مگاپاسکال)	مدول الاستیک (مگاپاسکال)
بیرونی ۸ تا ۱۲	۷/۰۷	۱۴۹	۱۸/۰	۲۶/۴	۲۷۵	۸۰۸۳
میانی ۸ تا ۴	۵/۹۴	۱۵۲	۱۸/۲	۳۱/۰	۴۶۰	۱۰۹۸۶
درونی* ۴ تا	۵/۴۰	۱۵۳	۱۹/۱	۳۳/۳	۴۱۵	۹۱۱۴



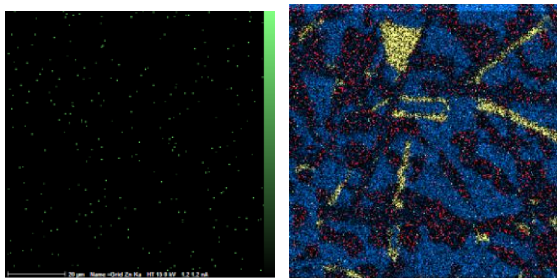
الف- تصویر ذرات

ب- آلومینیم



ب- سیلیسیم

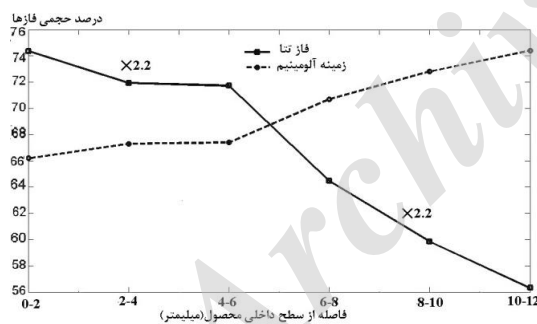
ت- مس



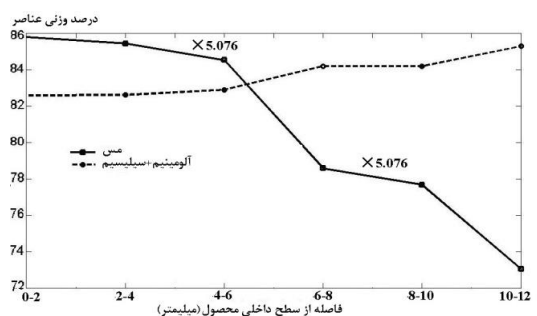
ث- روی

ج- تمام عناصر فوق

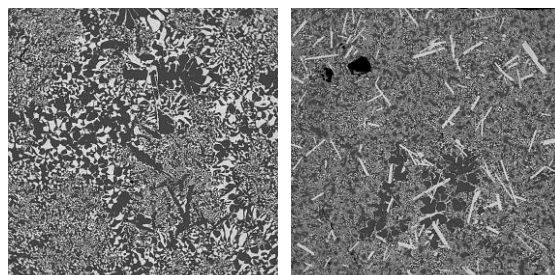
شکل ۴- تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی از توزیع عناصر در فلز مدرج



شکل ۵- درصد حجمی مقدار فاز تنا و زمینیه آلومینیم فوق اشباع از مس برای فلز مدرج آلومینیم-۲۶ درصد وزنی مس با فاصله از سطح داخلی محصول

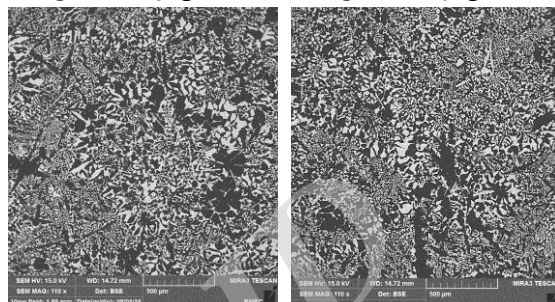


شکل ۶- درصد وزنی عناصر آلومینیم+سیلیسیم و مس برای فلز مدرج آلومینیم-۲۶ درصد وزنی مس با فاصله از سطح داخلی محصول



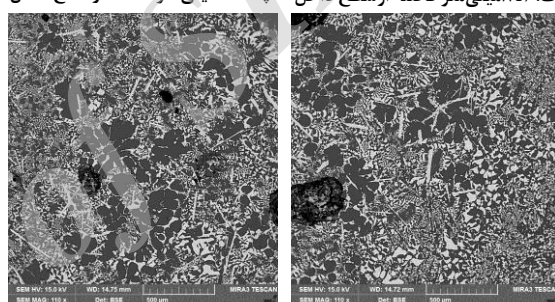
الف: تا ۲۰ میلی‌متر فاصله از سطح داخل

ب: تا ۴ میلی‌متر فاصله از سطح داخل



ب: تا ۶ میلی‌متر فاصله از سطح داخل

ت: تا ۸ میلی‌متر فاصله از سطح داخل



ت: تا ۱۰ میلی‌متر فاصله از سطح داخل

ج: تا ۱۲ میلی‌متر فاصله از سطح داخل

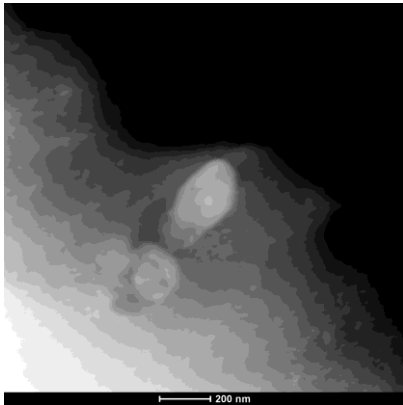
شکل ۳- تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی برای فلز مدرج آلومینیم-۲۶ درصد وزنی مس، فاز روشن، ترکیب بین فلزی و فاز تیره زمینیه آلومینیم است.

اگر چه انتظار می‌رود با افزایش مقدار فاز سخت تنا، استحکام افزایش یابد، اما در لایه درونی، ذرات فاز تنا بسیار زیاد شده‌اند که به هم پیوستند و فازهای نسبتاً بزرگ و خشن (تصاویر الف و ب در شکل (۳)) تشکیل داده‌اند که قطعاً منجر به افت استحکام خواهد شد. در حالی که در لایه میانی، ذرات فاز تنا در اندازه‌های کوچک‌تر و به طور یکنواخت‌تر توزیع شده‌اند و بنابراین پیش‌بینی می‌شود استحکام بالایی داشته باشد.

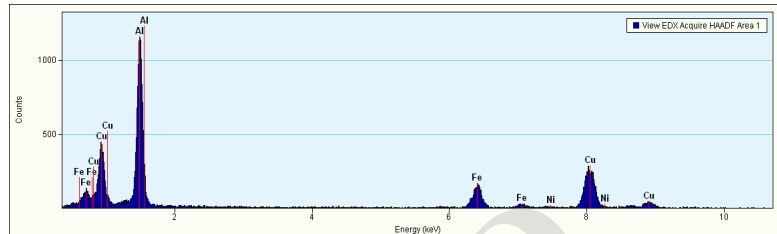
در شکل‌های (۴-الف) تا (۴-ج)، تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی از توزیع عناصر آلومینیم، سیلیسیم، مس و روی در فلز مدرج نشان می‌دهد که تعداد کمی از ذرات غنی از سیلیسیم و فقیر از مس هستند. در حالی که سایر ذرات (با تعداد زیاد) غنی از عنصر مس هستند. به علاوه، مطابق شکل (۴-الف) تا (۴-ج)، عناصر مس، سیلیسیم و روی در زمینیه هم توزیع شدند.

و شکل (۵) صحه‌گذاری شد. به این ترتیب که مقدار کمی عناصر آلومینیم+سیلیسیم و مس با فاصله از سطح داخلی محصول در شکل (۶) رسم شد. مقدار عنصر مس با مقدار فاز تتا (که حاوی ۳۳/۳ درصد اتمی مس است یعنی غنی از مس است) رابطه مستقیم دارد. این به آن معنی است که

برای مطالعه دقیق‌تر، مقادیر کمی فاز تتا و فاز زمینه بر حسب درصد حجمی با استفاده از تحلیل تصویر (میکروسکپ الکترونی) در نرم‌افزار MATLAB اندازه‌گیری و در شکل (۵) ترسیم شده است. با استفاده از نتایج کمی طیف‌سنج تفکیک انرژی (EDS) نتایج حاصل از شکل (۳)

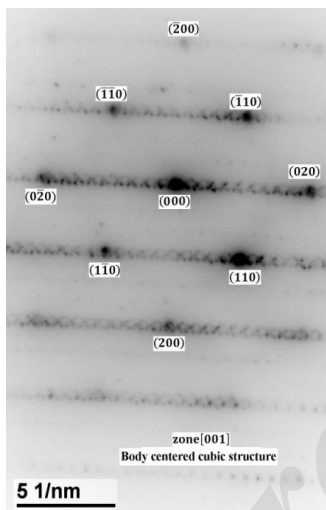


الف- ذره با اندازه حدود ۲۰۰ نانومتر

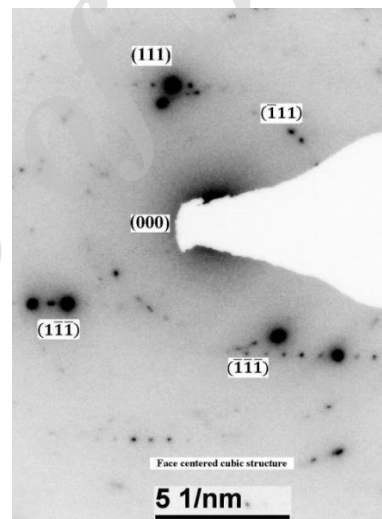


Element	Wt%	A%	Uncertainty%	Detector Correction	k-Factor
Al(K)	55.78	74.07	0.51	0.92	1.033
Fe(K)	12.91	8.28	0.29	0.99	1.357
Cu(K)	31.29	17.64	0.48	0.99	1.598

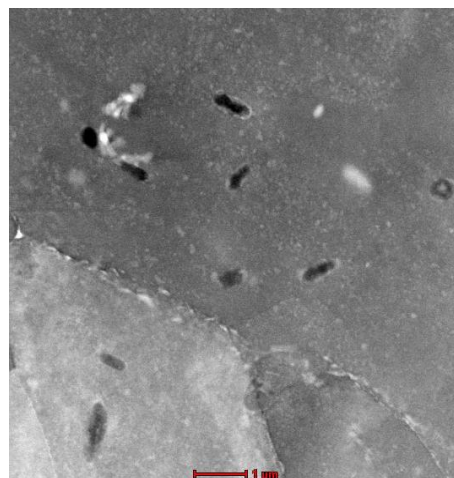
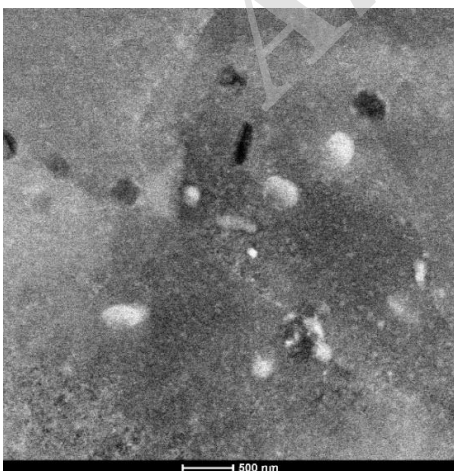
ب- EDS (طیف تفکیک انرژی) ذره تتا در شکل الف



پ- الگوی تفرق نقطه‌ای ذره الف



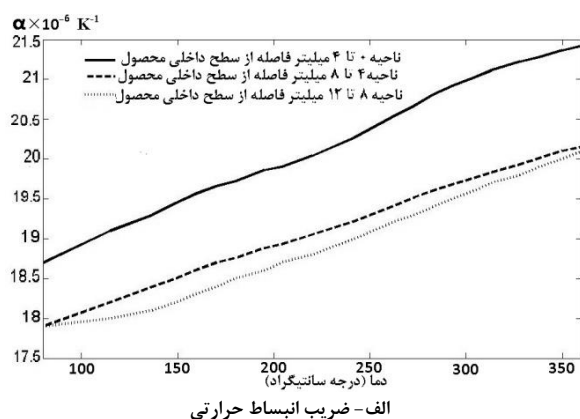
ت- الگوی تفرق نقطه‌ای زمینه در شکل الف



ث- تصویر ذرات رسوب ترکیب بین فزی (عمدتا تتا) با اندازه کمتر از ۱ میکرومتر.

شکل ۷- تصاویر میکروسکپ الکترونی عبوری-رویشی تیتان از فلز مدرج مورد تحقیق

دست می‌دهد) به دست آمده است و استحکام تسلیم فشاری در مکانی روی منحنی تنش-کرنش در نظر گرفته شده است که منحنی از حالت خطی (محدوده تغییر شکل الاستیک) به حالت غیرخطی (محدوده تغییر شکل پلاستیک) انتقال می‌یابد. نتایج استحکام تسلیم فشاری در شکل (۱۰) و نتایج مدول الاستیک در شکل (۱۱) در محدوده‌های ۰ تا ۴ میلی‌متر (لایه درونی)، ۴ تا ۸ میلی‌متر (لایه میانی) و ۸ تا ۱۲ میلی‌متر (لایه بیرونی) از سطح داخلی محصول رسم شده است.



ب- حفره‌های گازی ناشی از ریخته‌گری

شکل ۸- الف- ضریب انبساط حرارتی فلز مدرج آلومینیم-۲۶ درصد وزنی مس از دمای ۸۰ تا ۳۶۰ درجه سانتیگراد، نرخ گرمایش ۱ درجه کلونین در ثانیه بوده است. ب- نمایش حفره‌های گازی با اندازه کمتر ۲۰ میکرومتر

تشکیل فاز تتا با افزایش مقدار عنصر مس، ترغیب می‌شود. به همان صورت، مقدار عنصر آلومینیم+سیلیسیم با مقدار فاز زمینه رابطه مستقیم دارد. برای صحه‌گذاری جنس رسوبات تشکیل شده، با استفاده از میکروسکپ الکترونی عبوری-رویشی TITAN، در شکل (۷)، تصویر ذرات بسیار زیر (کمتر از ۱ میکرومتر) ترکیب بین فلزی با ساختار مکعب مرکزدار حاوی حدود ۱۸ درصد اتمی مس و زمینه به همراه الگوی تفرق نقطه‌ای آنها به نمایش گذاشته شده است.

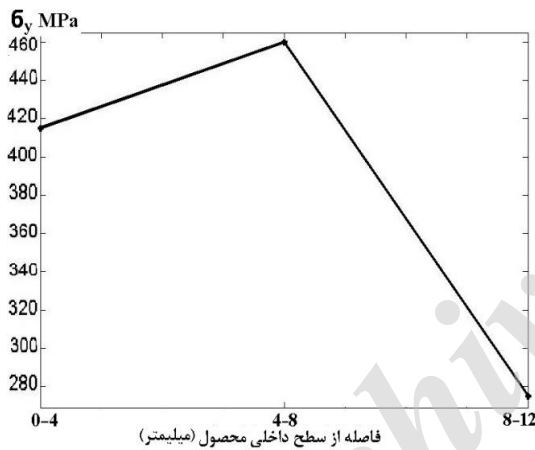
۳-۲- ارزیابی ضریب انبساط حرارتی

ضریب انبساط حرارتی فلز مدرج مورد تحقیق در محدوده‌های ۰ تا ۴ میلی‌متر (لایه درونی)، ۴ تا ۸ میلی‌متر (لایه میانی) و ۸ تا ۱۲ میلی‌متر (لایه بیرونی) از سطح داخلی اندازه‌گیری و پس از میانگین گرفتن در شکل (۸-الف) در محدوده دمای کاری فلز مدرج مورد تحقیق (۸۰ تا ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد) ترسیم شده است. ضریب انبساط حرارتی فاز تتا ۸۳×۱۰^{-۶} بر درجه کلونین [۲۳] است در حالی که ضریب انبساط حرارتی زمینه ۲۴×۱۰^{-۶} بر درجه کلونین [۲۰] است. بنابراین انتظار می‌رود که ضریب انبساط حرارتی با مقدار فاز تتا رابطه مستقیم داشته باشد. همان‌طور که پیش‌بینی شد، مطابق شکل (۸-الف) ضریب انبساط حرارتی فلز مدرج مورد تحقیق با مقدار فاز تتا رابطه مستقیم دارد، زیرا ضریب انبساط حرارتی فاز تتا (ترکیب بین فلزی) تقریباً $۳/۴$ برابر بیشتر از ضریب انبساط حرارتی زمینه آلومینیمی است. به علاوه، عدم تناسب در ضریب انبساط حرارتی اجزای تشکیل دهنده (فاز تتا و زمینه) با ضریب انبساط حرارتی فلز مدرج به دلیل وجود حفرات گازی ناشی از ریخته‌گری است. زیرا حفرات گازی (شکل ۸-ب) سبب کاهش ضریب انبساط حرارتی فلز مدرج می‌شود.

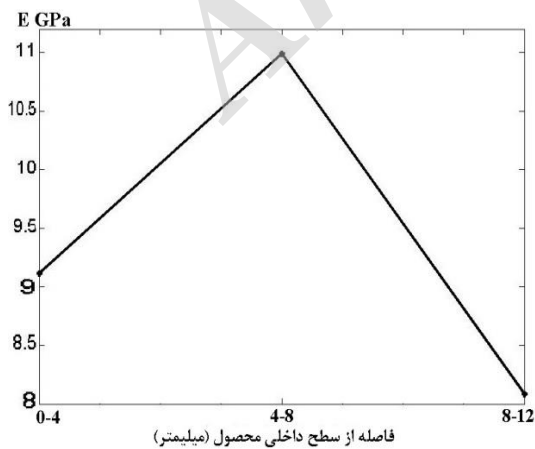
۳-۳- ارزیابی استحکام و مدول الاستیک

در شکل (۹)، منحنی تنش-کرنش فلز مدرج مورد تحقیق در محدوده‌های ۰ تا ۴ میلی‌متر (الف: لایه درونی)، ۴ تا ۸ میلی‌متر (ب: لایه میانی) و ۸ تا ۱۲ میلی‌متر (پ: لایه بیرونی) از سطح داخلی، نشان داده شده است. مدول الاستیک از طریق شیب خط در محدوده الاستیک منحنی تنش-کرنش (تا وقتی که شکل خطی خود را از

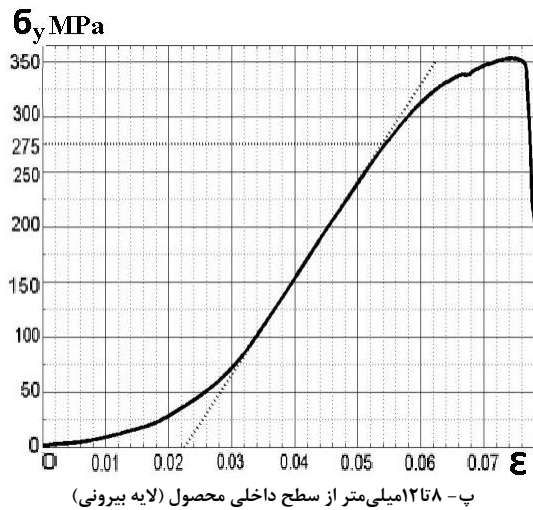
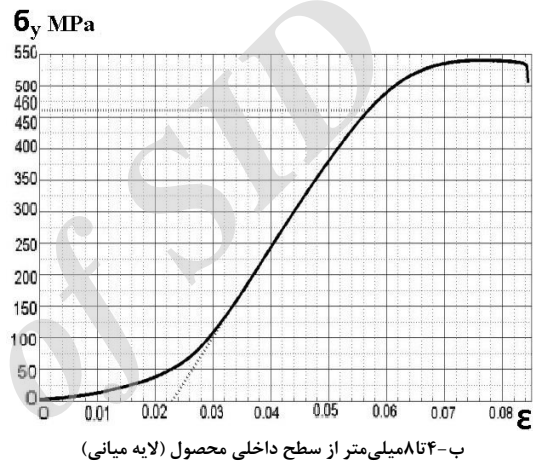
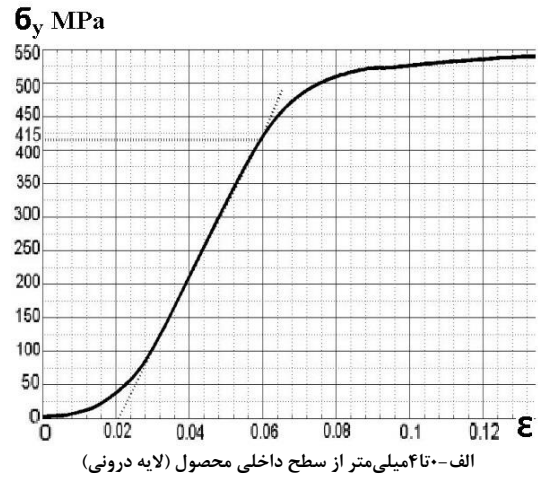
تسلیم فشاری با مقدار فاز تتا رابطه مستقیم داشته باشد. مطابق شکل (۱۰)، از لایه بیرونی تا لایه میانی این انتظار برآورده می‌شود اما از آن فاصله به بعد، استحکام فشاری در لایه درونی به ۴۱۵ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش به ریزساختار برمی‌گردد زیرا مطابق شکل (۳-الف) و شکل (۳-ب)، مقدار فاز تتا آنقدر زیاد شده است که این ذرات بهم پیوسته و تجمع یافته‌اند و به دلیل شکننده بودن (که از ویژگی‌های ترکیبات بین فلزی است) افت استحکام را سبب شده‌اند. از طرف دیگر، تجمع این فاز موجب عدم تطابق بین فاز و زمینه می‌شود یعنی فصل مشترک بین زمینه و تقویت کننده (فاز تتا) را تضعیف می‌کند [۲۴]. مطلب فوق، تطابق خوبی با نتایج مرجع [۲۵] دارد به طوری که در این تحقیق، مقدار بهینه فاز تقویت کننده (فاز تتا)، ۳۱ درصد حجمی تعیین شده است.



شکل ۱۰- استحکام تسلیم فشاری فلز مدرج آلومینیم-۲۶ درصد وزنی مس با فاصله از سطح داخلی محصول



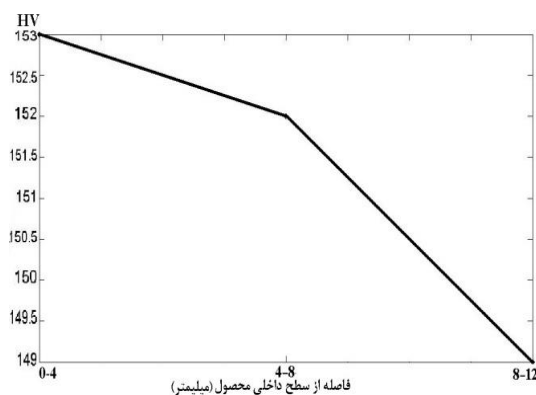
شکل ۱۱- مدول الاستیک فلز مدرج آلومینیم-۲۶ درصد وزنی مس با فاصله از سطح داخلی محصول



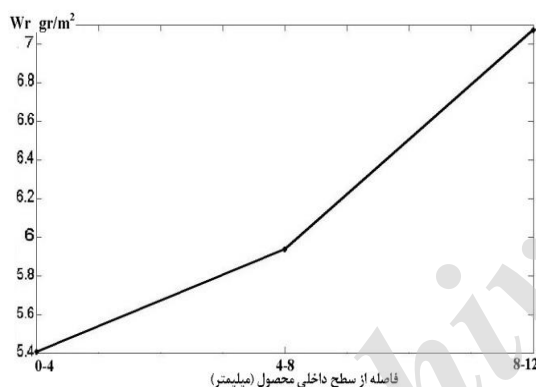
شکل ۹- منحنی‌های تنش-کرنش فلز مدرج آلومینیم-۲۶ درصد وزنی مس با فاصله از سطح داخلی محصول الف-لایه درونی ب-لایه میانی پ-لایه بیرونی

استحکام فاز تتا ۸۷۵ مگاپاسکال [۲۱, ۲۲] است در حالی که استحکام زمینه (آلومینیم فوق اشباع شده از مس) ۹۸ مگاپاسکال [۲۰] است. بنابراین انتظار می‌رود استحکام

شکل (۸-ب)، حفره‌های موجود در سطح سایش یافته، حفره‌های گازی (با اندازه حداکثر ۲۰ میکرومتر) ناشی از ریخته‌گری است.



شکل ۱۲- سختی ویکرز فلز مدرج آلومینیم-۲۶ درصد وزنی مس با فاصله از سطح داخلی محصول



شکل ۱۳- نرخ سایش فلز مدرج آلومینیم-۲۶ درصد وزنی مس با فاصله از سطح داخلی محصول

در شکل (۱۵)، تصویر براده‌های همان سطح سایش یافته (شکل ۱۴) با اندازه‌هایی بین ۵۵ تا ۱۶۲ میکرومتر، به نمایش در آمده است. در تطابق با سایش خراشان (شکل ۱۴)، شکل براده‌ها نشان می‌دهد که در سایش، تغییر شکل پلاستیک رخ نداده است.

در شکل (۱۶)، آنالیز عنصری براده‌های شکل (۱۵)، آورده شده است. مشاهده می‌شود عنصر اصلی آلومینیم بوده و مقدار جزئی نیز از عناصر مس و سیلیسیم و مقادیر ناچیزی عناصر منیزیم و پتاسیم شناسایی شده است و اکسیژن در تمام آن براده‌ها وجود دارد. به این ترتیب، این براده‌ها عمدتاً از زمینه ناشی شده‌اند که در تطابق با سایش خراشان است.

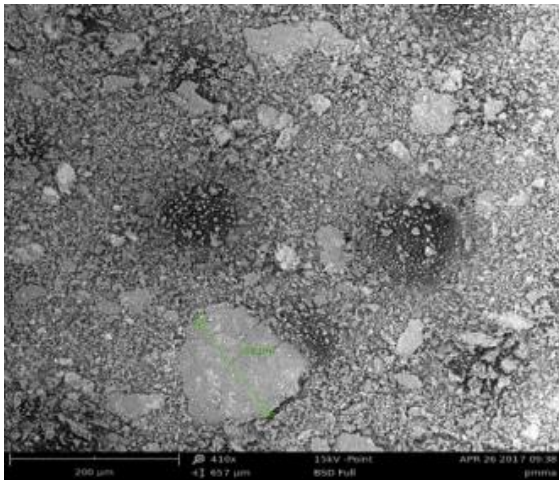
مدول الاستیک فاز تتا برابر با ۱۰۴۵۰۰ مگاپاسکال [۲۱]، و مدول الاستیک آلومینیم (زمینه) برابر با ۷۳ گیگاپاسکال [۲۰] است. بنابراین انتظار می‌رود مدول الاستیک فلز مدرج مورد تحقیق با مقدار فاز تتا رابطه مستقیم داشته باشد. به این ترتیب، پیش‌بینی می‌شود که از لایه بیرونی تا لایه درونی، مقدار مدول الاستیک افزایش یابد. مطابق شکل (۱۱)، پیش‌بینی تا لایه میانی درست است، اما از لایه میانی تا لایه درونی مطابقت ندارد. زیرا مشابه آنچه که در مورد استحکام گفته شد، مطابق شکل (۳-الف) و شکل (۳-ب)، مقدار فاز تتا در لایه درونی آن قدر زیاد شده است که این ذرات به هم پیوسته و تجمع یافته‌اند که موجب عدم تطابق بین فاز و زمینه می‌شود، یعنی فصل مشترک بین زمینه و تقویت کننده (فاز تتا) را تضعیف می‌کند.

۳-۴- ارزیابی سختی و مقاومت به سایش

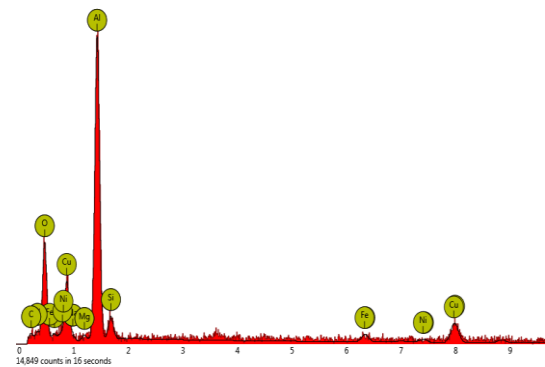
مطابق استاندارد ASTM E92، سختی ویکرز فلز مدرج مورد تحقیق در محدوده‌های ۰ تا ۴ میلی‌متر (لایه درونی)، ۴ تا ۸ میلی‌متر (لایه میانی) و ۸ تا ۱۲ میلی‌متر (لایه بیرونی) از سطح داخلی اندازه‌گیری و پس از میانگین گرفتن در شکل (۱۲) ترسیم شده است. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، سختی با مقدار فاز تتا رابطه مستقیم دارد. زیرا سختی فاز تتا (۵/۷۷ گیگاپاسکال [۲۳]) تقریباً چهار برابر بیشتر از سختی فاز زمینه آلومینیم (۱/۴۵ گیگاپاسکال [۲۰]) است.

مطابق شکل (۱۲)، پیش‌بینی می‌شود که با افزایش مقدار سختی (یا افزایش مقدار فاز تتا) از لایه بیرونی به لایه درونی، مقاومت به سایش نیز افزایش یابد و یا به عبارت دیگر، نرخ سایش کاهش یابد. نتایج نرخ سایش فلز مدرج مورد تحقیق با فاصله از سطح داخلی محصول در شکل (۱۳) ترسیم شده است و با پیش‌بینی فوق تطابق دارد.

در شکل (۱۴)، تصاویر سطح سایش با استفاده از میکروسکپ الکترونی روبشی Philips XL30 برای نمونه‌هایی که از فاصله‌های ۰ تا ۴ میلی‌متر (الف: لایه درونی)، ۴ تا ۸ میلی‌متر (ب: لایه میانی) و ۸ تا ۱۲ میلی‌متر (پ: لایه بیرونی) از سطح داخلی فلز مدرج مورد تحقیق ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در تمام نمونه‌ها، نوع سایش، خراشان است که با نتایج نرخ سایش نسبتاً کم و سختی نسبتاً بالای سطوح تطابق دارد. مطابق



شکل ۱۵- تصویر براده‌های سطح سایش یافته از شکل ۱۴، مقیاس ۲۰۰ میکرومتر



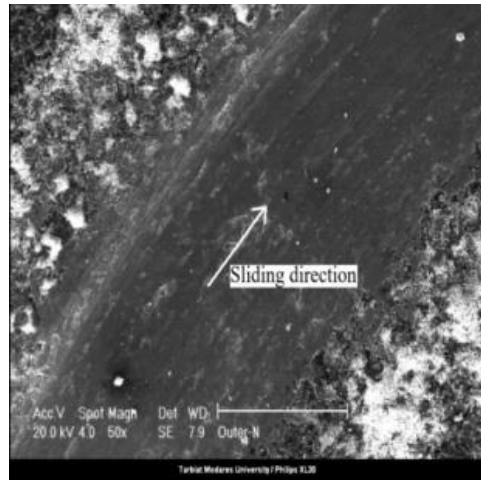
شکل ۱۶- آنالیز عنصری XRD براده‌های شکل ۱۵

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، استوانه جدار ضخیم مدرج توخالی از جنس آلیاژ آلومینیم حاوی ۲۶ درصد وزنی مس و ۸ درصد وزنی سیلیسیم و مقدار جزئی از عناصر آهن، پتاسیم، کلسیم، گوگرد و روی با استفاده از دستگاه ریخته‌گری گریز از مرکز افقی ساخته شده است. نتایج حاوی مطالب زیر است:

۱- مقدار ترکیب بین فلزی تتا (Al_2Cu) در لایه درونی برابر با ۳۳/۳ درصد حجمی است در حالی که در لایه بیرونی به تدریج تا ۲۶/۴ درصد حجمی کاهش می‌یابد. به علاوه، مقدار مس در لایه درونی محصول برابر با ۱۶/۹ درصد وزنی و در لایه بیرونی به تدریج تا ۱۴/۳ درصد وزنی کاهش می‌یابد.

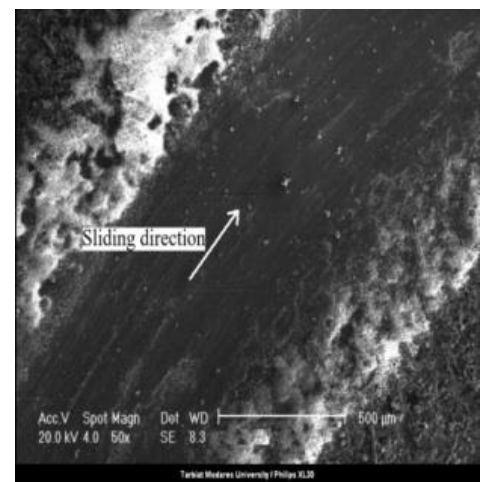
۲- حداکثر سختی (۱۵۳ ویکرز) و حداقل نرخ سایش ($5/40$ گرم بر متر مربع) در لایه درونی حاصل شده است و به تدریج تا رسیدن به لایه بیرونی به ترتیب، به ۱۴۹ ویکرز کاهش و به $7/07$ گرم بر متر مربع افزایش



الف-نمایش سطح و جهت سایش، فاصله ۰ تا ۴ میلی‌متر، مقیاس ۵۰۰ میکرومتر



ب-نمایش سطح و جهت سایش، فاصله ۴ تا ۸ میلی‌متر، مقیاس ۵۰۰ میکرومتر



پ-نمایش سطح و جهت سایش، فاصله ۴ تا ۱۲ میلی‌متر، مقیاس ۵۰۰ میکرومتر

شکل ۱۴- تصاویر سطح سایش با فاصله از سطح داخلی فلز مدرج

- Ni/Al₂O₃ functionally graded materials, *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 487(1) 524-35.
- [11] Ekici R., Apalak M.K., Yildirim M., Indentation behavior of functionally graded Al-SiC metal matrix composites with random particle dispersion, *Composites Part B: Engineering*, 2011, 42(6) 1497-1507.
- [12] Gupta M., Loke C.Y., Synthesis of free standing, one dimensional, Al-SiC based functionally gradient materials using gradient slurry disintegration and deposition, *Materials Science and Engineering: A.*, 2000, 276(1) 210-217.
- [13] Nai S.M.L., Gupta M., Influence of stirring speed on the synthesis of Al/SiC based functionally gradient materials, *Composite Structures*, 2002, 57(1-4) 227-233.
- [14] Übeyli M., Balci E., Sarikan B., Öztas M.K., Camuşcu N., Yildirim R.O., The ballistic performance of SiC-AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy, *Materials & Design*, 2014, 56, 31-36.
- [۱۴] کلوند ح.، آقامیری س. ا.، وحدت س. ا.، ارتباط بین سختی و ریزساختار آلیاژ باییت در ریخته‌گری گریز از مرکز افقی، مجله ریخته‌گری، پاییز و زمستان ۱۳۹۳، ۱۰۶، ۴۸-۵۹.
- [16] Nardone V.C., Prewo K.M., Comment on "a comparison of PM vs melted SiC/Al composites", *Scripta Metallurgica*, 1989, 23(2) 291-332.
- [17] Mahmoodian R., Hassan M.A., Hamdi M., Yahya R., Rahbari R.G., In situ TiC-Fe-Al₂O₃-TiAl/Ti₃Al composite coating processing using centrifugal assisted combustion synthesis, *Composites Part B: Engineering*, 2014, 59 (Supplement C) 279-284.
- [18] Lin X., Liu C., Xiao H., Fabrication of Al-Si-Mg functionally graded materials tube reinforced with in situ Si/Mg₂Si particles by centrifugal casting, *Composites Part B: Engineering*, 2013, 45(1) 8-21.
- [۱۹] ماهر ج.، زند ا.، کلوند ح.، بررسی ریزساختار اتصال بین لایه‌های برنز و فولاد در یاتاقان ژورنال تولید شده به روش ریخته‌گری گریز از مرکز افقی، مجله ریخته‌گری، ۱۳۹۴، ۱۱۰، ۷-۱.
- [20] Davis J., *Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM International. Handbook Committee, 1993.
- [21] Chen C.L., Richter A., Thomson R.C., Mechanical properties of intermetallic phases in multi-component Al-Si alloys using nanoindentation, *Intermetallics*, 2009, 17(8), 634-641.
- [22] Chen C.L., Richter A., Thomson R.C., Investigation of mechanical properties of intermetallic phases in multi-component Al-Si alloys using hot-stage nanoindentation, *Intermetallics*, 2010, 18(4) 499-508.
- [23] Westbrook J., Fleischer R., *Intermetallic compounds [Vol. 2], Basic mechanical properties and lattice defects of intermetallic compounds*, Wiley, 2000.
- [۲۴] وحدت س. ا.، ناطق س.، میردامادی ش.، استفاده از مدلی بر اساس مکانیزم بیرون کشیدن ذرات M₂₃C₆ در زمینه فولاد ابزار 1.2542 به منظور تخمین چقرمگی و استحکام، مهندسی متالورژی و مواد، پاییز و زمستان ۱۳۹۴، ۱، ۳۹-۵۰.
- [25] Nihilish C., Chawla K.K. *Metal matrix composites*. Springer, New York, NY, USA; 2006.
- می‌یابند. به علاوه، نوع سایش در تمام لایه‌ها، خراشان بوده است.
- ۳- مقدار بهینه ترکیب بین‌فلزی تتا برابر با ۳۱ درصد حجمی است، زیرا استحکام فشاری بیشینه در لایه میانی (در فاصله ۴ تا ۸ میلی‌متر از سطح داخلی) محصول برابر با ۴۶۰ مگاپاسکال حاصل شده است. به این ترتیب، فلز مدرج فوق، چگالی نسبتاً کم (۳/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب)، مقاومت به سایش خوب در لایه درونی (۵/۴۰ گرم بر متر مربع)، سختی مناسب در لایه درونی (۱۵۳ ویکرز) و استحکام فشاری مناسب در لایه‌های درونی و میانی (حداقل ۴۱۵ مگاپاسکال) دارد.
- ### مراجع
- [1] Naebe M., Shirvanimoghaddam K., Functionally graded materials: A review of fabrication and properties, *Applied Materials Today*, 2016, 5 (Supplement C), 223-245.
- [2] Campbell J., *Castings (Second Edition)*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003, p. 117-177.
- [3] Campbell J. *Complete Casting Handbook*, Oxford: Butterworth-Heinemann; 2011, p. 255-390.
- [۴] حلوائی ا.، تیمورنژاد ج.، بررسی و تحقیق بر روی تغییرات پارامترهای موثر بر تولید لوله‌های آلیاژی غیر آهنی به روش ریخته‌گری گریز از مرکز از جنس برنز، قلع و آلومینیم. طرح پژوهشی دانشگاه تهران. ۱۳۸۶.
- [۵] طالبی ع.، حلوائی ا.، تاثیر پارامترهای فرآیند بر جدایش ماکروسکوپی سرب در ریخته‌گری گریز از مرکز افقی برنز قلع C۹۲۲۰۰. فصل‌نامه مهندسی متالورژی، ۱۳۷۷، ۲، ۳۱-۲۳.
- [۶] طالبی ع.، حلوائی ا.، بررسی و تحقیق بر روی پارامترهای موثر بر ریخته‌گری بوش‌های برنزی پر آلیاژ به روش ریخته‌گری گریز از مرکز افقی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران. ۱۳۸۸.
- [۷] شهبازی‌خانی ح.، صمدی ا.، بررسی ریزساختار و رفتار هدف‌مند مواد Al-Al₂Cu 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 مهندسی متالورژی ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۸.
- [8] Watanabe Y., Kurahashi M., Kim I.S., Miyazaki S., Kumai S, Sato A, 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(12) 2186-2193.
- [9] 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(7) 1150-1158.
- [10] Bhattacharyya M., Kumar A.N., Kapuria S., Synthesis and characterization of Al/SiC and