



تولید ورق منیزیمی با لایه کامپوزیت سطحی پایه منیزیمی به منظور بهبود خواص سختی و سایشی

محمد صدیقی^{1*}، محمدرضا فاضلی²، امیرحسین جباری مستحسن³

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 163-16765، sedighi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: 96/6/29

تاریخ پذیرش: 96/8/8

کلیدواژگان:

منیزیم

کامپوزیت پایه منیزیمی

کامپوزیت سطحی

نورد گرم

سختی

آزمون سایش

چکیده

منیزیم و آلیاژهای آن به عنوان سبک‌ترین فلز تجاری با نسبت استحکام به چگالی بسیار بالا، مورد توجه روزافزون قرار گرفته است. با این حال، خواص نامطلوبی از قبیل سختی و مقاومت سایشی پایین، سبب محدودیت در کاربردهای این فلز منحصربه‌فرد شده است. تبدیل منیزیم به کامپوزیت پایه منیزیمی علاوه بر افزایش استحکام، سبب بهبود میزان سختی و مقاومت به سایش می‌گردد. از آنجا که تبدیل کامل یک قطعه فلزی به کامپوزیت ممکن است سبب تردی و همچنین افزایش هزینه‌های تولید شود، ایجاد کامپوزیت سطحی می‌تواند به عنوان راهکاری مناسب مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله با استفاده از فرآیند نورد گرم و لایه واسطی از فلز روی، یک لایه کامپوزیت سطحی پایه منیزیمی (تهیه شده به روش ریخته‌گری هم‌زنی) به زیرلایه منیزیمی اتصال داده شده و ورق منیزیمی با پوشش کامپوزیتی تهیه گردیده است. استفاده از این روش می‌تواند سبب تولید ورق‌های منیزیمی با لایه کامپوزیت سطحی با سرعت تولید بالاتر و هزینه کمتر شود. لایه روی استفاده شده علاوه بر اتصال دو لایه به یکدیگر، سبب حفاظت سطح آن‌ها از اکسیداسیون در طول فرآیند نورد گرم شده و نیاز به استفاده از اتمسفر کنترل شده را برطرف می‌نماید. نتایج نشان دهنده ایجاد اتصالی مناسب بین کامپوزیت سطحی و زیرلایه منیزیمی می‌باشد. طبق آزمون میکروسختی، مقدار سختی در کامپوزیت سطحی نسبت به لایه منیزیمی در سطح مقطع نمونه 23٪ و بر روی سطح آن حدود 52٪ افزایش یافته است. همچنین مقاومت به سایش در لایه کامپوزیتی نسبت به زیرلایه منیزیمی بهبود قابل توجهی به میزان 43٪ داشته است. نرخ سایش نیز در لایه کامپوزیتی با کاهش مواجه شده است.

Fabrication of magnesium sheet with magnesium matrix surface composite to improve hardness and wear properties

Mohammad Sedighi*, Mohammad Reza Fazeli, Amirhossein Jabbari Mostahsan

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16765-163, Tehran, Iran, a_jabbari@mecheng.iust.ac.ir

Keywords

Magnesium
Magnesium matrix composite
Surface composite
Hot rolling
Hardness
Wear test

Abstract

Nowadays, there is an increasing demand for magnesium and its alloys as the lightest commercial metal with a high strength to density ratio. Nevertheless, a few undesirable properties, such as low hardness and poor wear resistance, have limited the applications of this exclusive metal. Fabrication of magnesium matrix composite could improve hardness and wear resistance in addition to strength increasing. Since converting all of a metal piece to composite could make it more brittle and increase the costs, fabrication of surface composite could be a solution. In this paper, a magnesium sheet with a surface composite has been fabricated by applying warm rolling process. Indeed, a layer of magnesium matrix composite (which has been fabricated by stir-casting) has been conjoined to a magnesium substrate layer using a zinc interlayer. This method could increase the production speed and decrease the costs. In addition to the connection of two layers together, the zinc interlayer would preserve the surfaces of the layers from oxidation without using any controlled atmosphere. The results show a proper connection between the surface composite and the substrate. According to the microhardness results, the hardness of surface composite increased about 23% and 52% in the cross-section and the surface, respectively. Moreover, wear resistance of surface composite improved about 43% in comparison to magnesium substrate. Also, wear rate decreased in the surface composite.

کم به خوردگی و سایش اشاره نمود. ساخت کامپوزیت پایه منیزیمی از جمله

روش‌های کارآمد در بهبود خواص یاد شده می‌باشد.

اگرچه کامپوزیت‌های پایه فلزی دارای خواص مکانیکی بسیار مطلوبی همچون

تنش تسلیم، استحکام نهایی، مدول الاستیسیته و سختی بالا و نیز مقاومت به

1- مقدمه

فلز منیزیم با دارا بودن چگالی بسیار پایین و نسبت استحکام به وزن بالا، در

سال‌های اخیر به صورت روزافزون مورد توجه قرار گرفته است. در کنار

خواص مطلوب این فلز، می‌توان به مشکلاتی همچون سختی پایین و مقاومت

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Sedighi, M., Fazeli, M.R. and Jabbari-Mostahsan, A.H., "Fabrication of magnesium sheet with magnesium matrix surface composite to improve hardness and wear properties", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 575-582, 2019.

سطحی AZ31/TiC را ایجاد کردند. نتایج بدست آمده نشان دهنده افزایش سختی و استحکام تسلیم لایه کامپوزیتی به ترتیب به میزان 1/5 برابر و 1/3 برابر آلیاژ پایه بود. همچنین اندازه دانه بندی از مقدار 40 μ m به 3 μ m کاهش یافت. دادایی دهکردی و همکاران [9] به بررسی سطح شکست در کامپوزیت پایه منیزیم ساخته شده از آلیاژ AZ91 و ذرات تقویت کننده Al₂O₃ و SiC پرداختند.

همانطور که ذکر شد، استفاده از فرآیند لیزر جهت سینتر کردن سطح نمونه و ذوب موضعی، از دیگر روش‌های پرکاربرد در تولید آلیاژ و کامپوزیت سطحی می‌باشد. در سال 2002 میلادی ماجومدار و همکاران [10]، از لیزر به عنوان عاملی جهت ایجاد ذوب سطحی استفاده نموده و با اضافه نمودن ذرات تقویت کننده به منطقه ذوب، کامپوزیت پایه منیزیم MEZ تقویت شده با ذرات SiC تولید نمودند. در این آزمایش از لیزر CO₂ با موج پیوسته استفاده شد. سختی و مقاومت به سایش کامپوزیت سطحی تولید شده با این روش به طرز چشمگیری افزایش یافت. ماجومدار و همکاران [11] در پژوهشی دیگر با استفاده از تکنیک لیزر، کامپوزیت سطحی پایه آلومینیم تقویت شده با پودر SiC را تولید نمودند و به بررسی خواص سایشی لایه تولید شده پرداختند. ژنگ و همکاران [12] توسط لیزر پالسی Nd-YAG، با پودر Al+SiC روی سطح آلیاژ AZ91D لایه نشانی کرده و خواص آن را مورد مطالعه قرار دادند. در این روش ابتدا یک دوغاب کامپوزیتی روی سطح آلیاژ اعمال شده و سپس این لایه با استفاده از لیزر به سطح زیرین زینتر گردید. طبق نتایج بدست آمده، خواص سختی و سایش لایه تشکیل شده بهبود پیدا کرده بود. وزیری و همکاران [12] با استفاده از روش آبکاری، یک لایه نیکل روی سطح آلومینیم نشاندند و با استفاده از لیزر، آلیاژ سازی سطحی انجام دادند. در این پژوهش ریزساختار، خواص سختی و سایشی سطح نمونه تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. لین و همکاران [14]، با استفاده از پودر آلومینیم خالص روی فلز پایه از جنس آلیاژ منیزیم AZ91، لایه آلیاژی تشکیل داده و به بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی از قبیل میکروسختی، خواص سایشی، خواص کششی و ریزساختار پرداختند. لین و همکاران [15] در پژوهشی دیگر با استفاده از توان‌های مختلف لیزر و سرعت‌های مختلف پیشروی، سطح آلیاژ AZ91 را ذوب نموده و با استفاده از روش ذوب مجدد سطح، خواص سختی و سایش سطح ماده را افزایش دادند. تالتاوال و همکاران [16] با استفاده از تکنیک ذوب مجدد توانستند خواص سطحی آلیاژ AM60B را بهبود ببخشند. در سال 2014 میلادی منگ و همکاران [17] با استفاده از تکنیک تزریق مذاب توسط لیزر⁵ توانستند یک لایه کامپوزیتی تقویت شده با پودرهای آلومینیم، آهن، نیکل، کبالت، کروم و مس را روی سطح آلیاژ AZ91 تشکیل دهند. در این روش پودرهای تقویت کننده⁶ توسط یک نازل به سطح قطعه پاشیده می‌شدند که همزمان تحت تابش لیزر CO₂ با موج پیوسته قرار داشته و مذاب مستقیماً روی سطح چسبانده می‌شد. در سال 2015 میلادی رن و همکاران [18] با استفاده از روش شوک حرارتی به کمک لیزر، سطح آلیاژ AZ91 را نانو ساختار کرده و به بررسی ریزساختار و خواص سختی سطحی آن پرداخته شد. در سال 2016 میلادی ریکلمه و همکاران [19] با استفاده از پودر آلومینیم و SiC یک لایه کامپوزیتی توسط لیزر روی سطح آلیاژ ZE41 اعمال کرده و شرایط بهینه لیزر برای ایجاد لایه کامپوزیتی را بدست آوردند. از دیگر روش‌های تولید کامپوزیت سطحی، استفاده از فرآیند TIG است. مشکل اصلی این روش عدم حصول کیفیت سطحی مناسب می‌باشد. یزدی و

خوردگی و سایش بهبود یافته می‌باشند، اما امکان کاهش شکل پذیری و نیز افزایش قیمت تمام شده محصول از معایب آن‌ها به شمار می‌آید. از اینرو ایجاد یک لایه سطحی از کامپوزیت‌های پایه فلزی بر روی فلز پایه مشترک، سبب دستیابی همزمان به خواص سطحی بهبود یافته و نیز کاهش هزینه تولید می‌گردد. در مقایسه با روش‌هایی نظیر پوشش دهی سطح، ایجاد لایه کامپوزیت فلزی سطحی سبب حفظ خواص اصلی فلز پایه همچون قابلیت انتقال جریان الکتریسیته و انرژی حرارتی بوده و به علت نزدیکی مدول الاستیسیته و ضریب انبساط حرارتی، احتمال جدایش لایه سطحی و لایه زیرین به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

در زمینه تشکیل کامپوزیت‌های سطحی، روش‌های متعددی از قبیل استفاده از فرآیندهای همزنی اصطکاکی-اختلاطی¹، لیزر² و جوش تیگ³ وجود دارد. در زمینه فرآیند همزن اصطکاکی، شفییعی و همکاران [1] با استفاده از این روش بر روی آلومینیم سری 6082 با ذرات تقویت کننده آلومینا⁴ لایه‌ای کامپوزیتی ایجاد نمودند. نتایج این مطالعه که در آن به بررسی میکروساختار و خواص سختی و سایش کامپوزیت سطحی پرداخته شد، نشان دهنده افزایش قابل توجه خواص سختی و سایش در لایه کامپوزیتی بود. احمدی فرد و همکاران [2] کامپوزیت سطحی پایه آلومینیم 5083 تقویت شده با میکروذرات SiC را به روش همزنی اصطکاکی-اختلاطی تولید نمودند. نتایج نشان دهنده افزایش میکروسختی و استحکام کششی نسبت به فلز پایه بود. بشارتی گیوی و همکاران [3] با استفاده از روش همزن اصطکاکی بر روی نمونه منیزیمی از جنس آلیاژ AZ91 و با استفاده از ذرات SiC، کامپوزیت پایه منیزیم تولید کرده و به بررسی اثر سرعت دورانی، تعداد پاس و جهت دوران بر روی اندازه دانه ناحیه کامپوزیتی پرداختند. فرجی و همکاران [4] با استفاده از روش همزن اصطکاکی بر روی آلیاژ AZ91، لایه نانو کامپوزیتی تقویت شده با پودر آلومینا تشکیل دادند. نتایج نشان دهنده افزایش میزان میکروسختی از 60HV به 110HV بود. همچنین مقدار مقاومت به سایش در لایه کامپوزیتی به میزان قابل توجهی افزایش یافت. عزیزیه و همکاران [5] به بررسی اثر سرعت دورانی و هندسه ابزار روی سختی و میکروساختار نانو کامپوزیت AZ31/Al₂O₃ تولید شده به روش همزنی اصطکاکی پرداختند. طبق نتایج بدست آمده در این تحقیق، اگرچه ابعاد ساختار توده‌ای آلومینا با افزایش سرعت دورانی کاهش یافت، ولی به دلیل بالا رفتن دما در سرعت های بالاتر، ساختار نهایی درشت دانه تر گردید. از طرفی مشخص شد که با افزایش تعداد پاس‌های عملیات می‌توان به ریزدانه شدن ساختار کمک کرد. علیدخت و همکاران [6] به بررسی رفتار سایشی در کامپوزیت پایه آلومینیمی تولید شده به روش همزن اصطکاکی پرداختند. در این مطالعه از آلیاژ A356 به عنوان فلز پایه و از ذرات SiC و MoS₂ به عنوان ذرات تقویت کننده استفاده شد. بررسی رفتار سایشی در کامپوزیت تولید شده نشان دهنده افزایش قابل توجه خواص سایشی بود.

خیامین و همکاران [7] به بررسی پارامترهای فرآیند همزن اصطکاکی بر روی ریزساختار، سختی و رفتار کششی کامپوزیت پایه منیزیمی AZ91 با ذرات تقویت کننده SiO₂ پرداختند. در این مطالعه با افزایش تعداد پاس و سرعت خطی ابزار، خواص سختی و کششی کامپوزیت تولیدی افزایش یافت. صلی و همکاران [8] با استفاده از فرآیند همزن اصطکاکی، نانو کامپوزیت

¹ Friction stir process

² Laser

³ TIG

⁴ Alumina

⁵ Laser melt injection (LMI)

⁶ Reinforcement

دمای 70 درجه سانتیگراد قرار داده شدند. برای ایجاد اتصال مناسب بین دولایه، از یک لایه از پودر فلز روی بین دو لایه استفاده شد. نمونه نهایی پس از قرار دادن دولایه روی یکدیگر و بکارگیری لایه واسط، توسط یک لاستیک حجیم و پرس هیدرولیک فشرده شد. ضخامت نهایی لایه واسط بعد از اعمال فشار بر روی نمونه برابر با $40\mu\text{m}$ شد. با توجه به حساسیت بالای منیزیم به اکسید شدن در دمای بالا، لایه روی استفاده شده سبب حفاظت دو لایه اصلی از ایجاد اکسیداسیون در طول فرآیند نورد گرم شده و نیاز به استفاده از اتمسفر کنترل شده را برطرف می‌نماید. پس از این مرحله، نمونه در دمای 400 درجه سانتیگراد، تحت فرآیند نورد گرم قرار گرفت. میزان کاهش ضخامت در فرآیند نورد برابر با 50٪ در یک پاس بود. در شکل 1، فرآیند به کار گرفته شده برای تولید نمونه نهایی به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

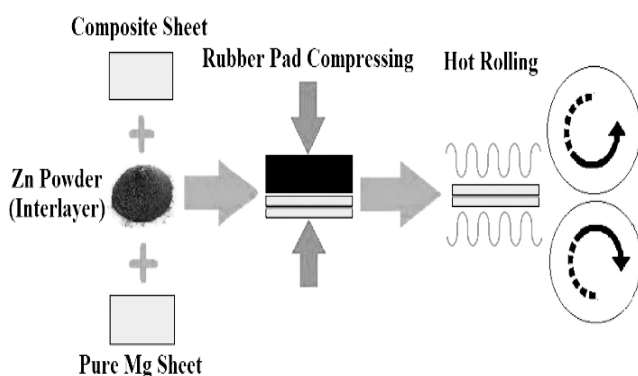


Fig. 1 Schematic of the applied procedure

شکل 1 شماتیک فرآیند به کار رفته برای تولید نمونه

جهت بررسی فازهای تشکیل شده در میان‌لایه، از آزمون EDS^2 استفاده گردید. برای بررسی ریزسختی در زیرلایه منیزیمی و لایه کامپوزیتی، از سختی‌سنجی در مقیاس میکرو-ویکرز با بار اعمالی 200 گرم به مدت 10 ثانیه استفاده شد. برای آزمون سایش نیز از سیستم پین و دیسک استفاده گردید. در این آزمون بار اعمالی پین برابر با 5N، سرعت خطی 0/08 m/s و میزان مسافت طی شده 300m بود. همچنین سطح نمونه پس از آزمون سایش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت.

3- نتایج

3-1- نتایج ریزساختار

در شکل 2 مقطع نمونه نهایی نمایش داده شده است. با توجه به دمای فرآیند نورد و نیز فشار اعمال شده بر نمونه طی فرآیند، لایه میانی، یک لایه نفوذی با ترکیبات منیزیم و روی می‌باشد. برای بررسی میزان درصد عناصر موجود در ناحیه اتصال، از آزمون EDS استفاده شد. در شکل 3 مناطق بررسی شده به همراه نتایج حاصل از آزمون EDS نمایش داده شده است.

کاشانی بزرگ [20] با استفاده از تکنیک TIG و پودر BN بر روی سطح تیتانیوم خالص فرآیند آلیاژسازی انجام داده و به بررسی ریزساختار، خواص میکروسختی و سایشی سطح تولید شده پرداختند. نتایج این آزمایش حاکی از بهبود خواص سطحی بود. الهی و همکاران [21] با استفاده از تکنیک TIG، آلیاژ سازی سطحی را روی آلیاژ منیزیمی AZ91 و با پودرهای آلومینیم و نیکل انجام دادند. در این آزمایش سختی لایه سطحی به 162 HV رسید که در مقایسه با سختی آلیاژ AZ91 که برابر با 80 ویکرز بود، مقدار قابل توجهی افزایش نشان می‌داد. در این پژوهش به دلیل به وجود آمدن فاز بین فلزی AlNi_3 و $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ در لایه سطحی، ساختار ریز دانه‌تر شده و خواص سختی و مقاومت به سایش سطح، افزایش یافت. لطفی و همکاران [22] توسط فرآیند TIG، کامپوزیت Al/SiC_p را روی سطح آلومینیم A380 اعمال کرده و بهبود خواص سطحی پس از ایجاد لایه کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار دادند. مظاهری و همکاران [23] به بررسی ریزساختار و رفتار تریبولوژیکی لایه کامپوزیتی ایجاد شده حاوی ذرات SiC روی فولاد ASTM A106 به روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز پرداختند. مطابق نتایج بدست آمده، خواص میکروسختی و سایشی بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده بود.

در این پژوهش برای اولین بار با استفاده از فرآیند نورد گرم و بکارگیری لایه واسطی از جنس فلز روی، یک لایه کامپوزیت سطحی پایه منیزیمی به زیرلایه از منیزیم اتصال داده شده و در نهایت ورق منیزیمی با پوشش کامپوزیت سطحی تهیه گردیده است. با توجه به آنکه هر دو زیرلایه منیزیمی و کامپوزیت پایه منیزیمی با استفاده از فرآیند ریخته‌گری تولید شده‌اند، طی فرآیند نورد گرم علاوه بر اتصال دو لایه مورد نظر، خواص مکانیکی آنها نظیر سختی و مقاومت به سایش نیز افزایش می‌یابد. این روش می‌تواند امکان تولید ورق‌های منیزیمی با لایه کامپوزیت سطحی را با سرعت تولید بالاتر و هزینه کمتر فراهم آورد. استفاده از لایه واسط روی سبب اتصال بهتر دو لایه و جلوگیری از اکسید شدن سطح اتصال آنها طی فرآیند نورد گرم می‌شود. در نهایت نحوه اتصال دو لایه اصلی با استفاده از لایه واسط و نیز خواص سختی و سایش کامپوزیت سطحی و زیرلایه منیزیمی مورد بررسی قرار گرفته است.

2- روش کار

برای تولید ورق منیزیمی با لایه کامپوزیت سطحی، از یک ورق منیزیمی خالص به عنوان زیرلایه استفاده گردید. این ورق به ضخامت 2 mm از شمش منیزیم خالص بریده شد. در جدول 1 ترکیب شیمیایی شمش منیزیم مورد نظر نمایش داده شده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی منیزیم استفاده شده به عنوان زیر لایه

Table 1 Chemical composition of the substrate magnesium layer

Fe	Zn	Pb	Nd	Si	Mn	Al	Ce	Mg
<0.00	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.06	Base
3								

جهت لایه کامپوزیت سطحی، از یک کامپوزیت پایه منیزیمی تقویت شده با ذرات آلومینا ($<10\mu\text{m}$) به میزان 2/5٪ وزنی استفاده شد. زمینه کامپوزیت از منیزیم خالص با ترکیب نشان داده شده در جدول 1 بوده و کامپوزیت به روش ریخته‌گری هم‌زنی تهیه گردید. سپس یک لایه کامپوزیتی به ضخامت 2mm از نمونه ریخته‌گری شده بریده شد. به منظور تمیز کردن سطوح لایه‌ها، دو لایه به مدت 15 دقیقه در محلول 10٪ وزنی سود سوزآور¹ و در

² Energy Dispersive Spectroscopy

¹ NaOH

ایجاد اتصال مناسب بین لایه‌ها و نفوذ فلزات روی و منیزیم در یکدیگر می‌باشد.

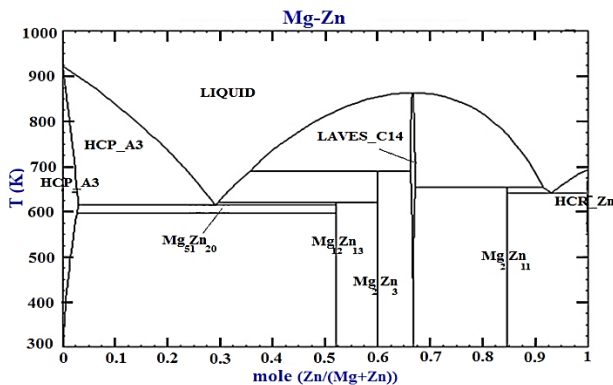


Fig. 4 Phase diagram of magnesium zinc [24]

شکل 4 نمودار تعادلی روی-منیزیم [24]

3-2- نتایج میکروسختی

آزمون میکروسختی در سطح مقطع نمونه (نقاط نشان داده شده در شکل 5) و نیز در سطح نمونه (از هر دو سمت لایه منیزیمی و لایه کامپوزیت سطحی) صورت پذیرفت.



Fig. 5 Schematic of the microhardness tested points in the cross-section
شکل 5 شماتیک نقاط سختی سنجی شده در سطح مقطع نمونه

نتایج مربوط به آزمون میکروسختی سطح مقطع نمونه (در نقاط نشان داده شده در شکل 5) در جدول 2 آمده است. نتایج ارائه شده برای هر نقطه میانگین نتایج سه آزمون میکروسختی انجام گرفته در آن سطح می‌باشد.

جدول 2 نتایج مربوط به آزمون میکروسختی در سطح مقطع نمونه

Table 2 Microhardness results for the cross-section of the specimen

نقطه مورد بررسی	لایه کامپوزیتی	میان لایه	لایه منیزیم خالص
1	2	3	4
64.05	64.1	115.3	53
			50.87

(HV)

مطابق نتایج جدول 2، میانگین میکروسختی در سطح مقطع لایه منیزیم خالص برابر با 51/9HV به دست آمده است، در حالی که این مقدار در سطح مقطع لایه کامپوزیت سطحی برابر با 64/07HV و در میان لایه برابر با 115/3HV بوده است. همچنین میزان میکروسختی بر روی سطح لایه منیزیمی 55/6 HV و بر روی سطح لایه کامپوزیتی 84/5 HV بوده است.

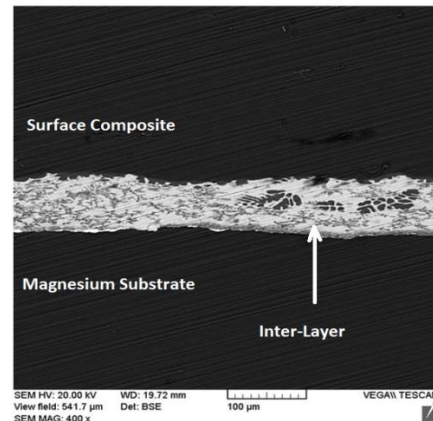


Fig. 2 Cross section of final specimen

شکل 2 سطح مقطع نمونه نهایی

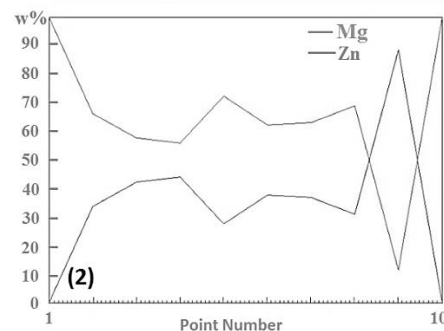
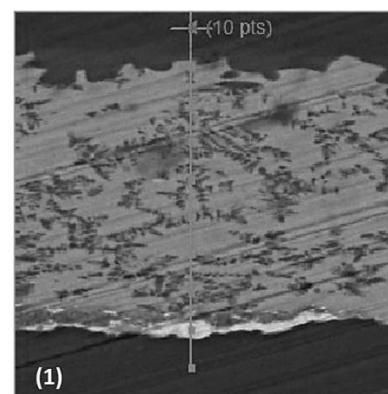


Fig. 3 EDS test results in the interlayer: 1) Investigated points, 2) weight fraction of elements

شکل 3 نتایج آزمون EDS در لایه میانی: 1) نقاط بررسی شده، 2) درصد وزنی عناصر

نوع مکانیزم اتصال بین لایه‌ها، ترکیبی از اتصال مکانیکی و شیمیایی می‌باشد. به این صورت که با آماده سازی و زبرسازی سطوح اولیه و سپس اعمال نیروی فشاری با پرس سرد و در نهایت انجام فرآیند نورد گرم، زمینه اتصال مکانیکی بین لایه‌ها فراهم می‌شود. همچنین با نفوذ اتم‌ها در لایه میانی و تشکیل فازهای بین‌فلزی، نوع دیگری از اتصال به صورت شیمیایی رخ می‌دهد.

جهت بررسی ترکیبات فلزی تشکیل شده در لایه میانی، از نمودار تعادلی روی-منیزیم مطابق شکل 4 استفاده شده است. با توجه به درصد وزنی فلزات در لایه میانی (مطابق با نتایج شکل 3)، احتمال تشکیل فازهای بین فلزی Mg_5Zn_{20} (مناطق سیاه رنگ) و Mg_2Zn_{11} (مناطق سفید رنگ) در سطح اتصال لایه‌ها) در این ناحیه وجود دارد. تشکیل فازهای مذکور نشان دهنده‌ی

ماده) اشاره نمود. بنابر رابطه آرچارد¹، مواد سخت تر در مقابل سایش مقاومت بهتری از خود نشان می دهند [26]. با توجه به نتایج آزمون سختی، لایه کامپوزیتی که نسبت به زیرلایه منیزیمی دارای سختی بیشتری است، از مقاومت به سایش بالاتری نیز برخوردار بوده است. همچنین ذرات تقویت کننده با توجه به برخورداری از مقاومت به سایش بسیار بالا، علاوه بر افزایش مقاومت به سایش کامپوزیت، به مرور زمان در بستر منیزیمی فرو رفته و سبب ایجاد کرنش سختی موضعی می شوند. در نتیجه به مرور زمان نرخ سایش نیز نسبت به لایه منیزیمی کاهش می یابد.

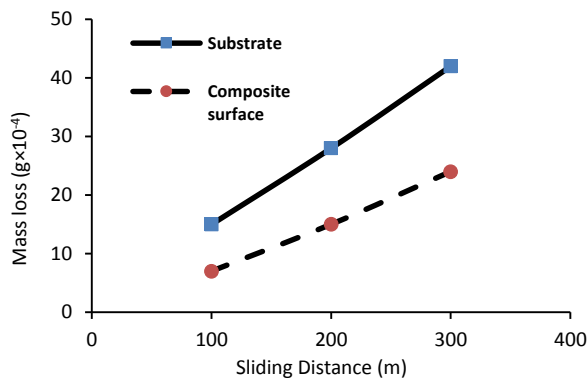


Fig. 6 Comparison between the wear of magnesium substrate and surface composite layer

شکل 6 مقایسه میزان سایش در زیرلایه منیزیمی و لایه کامپوزیت سطحی

برای بررسی مکانیزم سایش در دولایه منیزیم خالص و کامپوزیت سطحی، ناحیه تحت سایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی به لحاظ ریزساختاری مورد بررسی قرار گرفت. در شکل 7 و 8 ناحیه سایش در دو لایه منیزیمی خالص و کامپوزیت سطحی نشان داده شده است. با توجه به شکل های 7 و 8 می توان گفت که مکانیزم اصلی سایش در نمونه ها، سایش خراشان² می باشد. ویژگی های معمول سایش خراشان عبارتست از ایجاد سطوح ناهموار بر روی نمونه یا ایجاد شخم زدگی که بر اثر نفوذ پین در قطعه کار و یا وجود ذرات سخت بین پین و قطعه کار ممکن است رخ دهد.

این نوع سایش معمولاً به صورت حذف ماده به صورت نوار مانند خود را نشان می دهد. مطابق شکل 7، در نمونه منیزیم خالص خطوط سایشی نظم کمتری داشته و در بعضی از مناطق له شدگی مشاهده می شود که حاکی از تغییر شکل پلاستیک در این نواحی است. این پدیده به دلیل نرمی فلز منیزیم رخ داده است. اما همانطور که در شکل 8 مشاهده می شود، خطوط سایشی منظم تری وجود داشته و اصطلاحاً نواحی شخم زده³ قابل رویت است. این خطوط در منطقه سایش مانند دایره های متحد المركز می باشد. علت اصلی این پدیده گیر افتادن ذرات ساینده میان پین و قطعه کار بوده که باعث خراش افتادن روی سطح نمونه می شود [27].

در خصوص لایه کامپوزیتی، با توجه به تقویت زمینه منیزیم خالص با استفاده از ذرات تقویت کننده آلومینا، میکروسختی نسبت به لایه منیزیم خالص در حدود 23٪ در سطح مقطع و 52٪ در سطح افزایش یافته است. از دلایل این افزایش سختی می توان به احتمال ریزدانه شدن نمونه کامپوزیتی در مقایسه با منیزیم خالص اشاره نمود [25]. در واقع حضور ذرات سرامیکی آلومینا در زمان انجماد مذاب کامپوزیت از افزایش بیش از حد اندازه دانه بندی جلوگیری می کند. همچنین عدم یکسان بودن ضریب انبساط حرارتی و نیز مدول الاستیسیته در فاز زمینه و فاز تقویت کننده سبب ایجاد نابجایی در زمینه شده و افزایش چگالی نابجایی ها منجر به افزایش سختی خواهد شد. از طرف دیگر علاوه بر آنکه ذرات تقویت کننده مانند سدی در برابر حرکت نابجایی ها عمل می کنند، خود مانعی برای تغییر شکل پلاستیک موضعی در هنگام آزمون سختی سنجی نیز به حساب می آیند. علاوه بر آن ذرات تقویت کننده در تحمل نیروی خارجی اعمال شده به کامپوزیت نیز مشارکت دارند [25]. لازم به ذکر است میزان سختی در سطح نمونه نسبت به سطح مقطع آن با توجه به تماس با غلتک ها در هنگام نورد به میزان بیشتری افزایش یافته است.

نتایج میکروسختی در لایه میانی (با توجه به اختلاف قابل توجه با سختی لایه کامپوزیتی، زیرلایه منیزیمی و فلز روی در میان لایه) از دیگر نشانه های احتمال وجود فازهای بین فلزی در این ناحیه می باشد. در واقع افزایش چشمگیر سختی در این منطقه ناشی از تشکیل فازهای ترد و سخت بین فلزی است که در قسمت بررسی ریزساختار بوسیله آزمون EDS مشاهده شد.

3-3- نتایج آزمون سایش

نمونه استفاده شده برای آزمون سایش دارای جرم اولیه 4/2350 g بود. ابتدا لایه منیزیم خالص مورد سایش قرار گرفت که در پایان 300 m، جرم نمونه به میزان 4/2308 g رسید. پس از این مرحله ن لایه کامپوزیت سطحی تحت آزمون سایش قرار گرفت که پس از انجام آزمون به مسافت 300m، جرم نهایی نمونه به 4/2284 g کاهش یافت. در جدول 3 نتایج حاصل از کاهش وزن نمونه در هر 100 متر از آزمون سایش، آورده شده است.

جدول 3 نتایج مربوط به آزمون سایش

Table 3 Wear test results

لایه مورد بررسی	جرم اولیه (g)	پس از 100m	پس از 200m	پس از 300m
لایه منیزیمی	4.2308	4.2322	4.2335	4.2350
لایه کامپوزیتی	4.2284	4.2293	4.2301	4.2308

با توجه به داده های جدول 3 می توان این نکته را متوجه شد که میزان کاهش جرم نمونه در حالتی که لایه منیزیمی خالص تحت سایش قرار گرفته بود، میزان 0/0042 g بوده است. در حالی که میزان سایش لایه کامپوزیتی در زمان آزمون سایش به 0/0024 g کاهش یافته است. کمتر بودن کاهش جرم لایه کامپوزیتی نسبت به کاهش جرم لایه منیزیم خالص حاکی از افزایش مقاومت به سایش در لایه کامپوزیت سطحی به میزان 43٪ می باشد. در شکل 6 نتایج مربوط به آزمون سایش نمایش داده شده است. همانطور که در شکل 6 مشاهده می شود، در لایه کامپوزیتی علاوه بر کاهش میزان سایش، نرخ سایش نیز کاهش یافته است.

از دلایل افزایش مقاومت ماده به سایش می توان به افزایش سختی لایه کامپوزیتی به خصوص بر روی سطح ماده (و به تبع آن افزایش تنش تسلیم

¹ Archard
² Abrasive wear
³ Plough

ایجاد اکسیداسیون در طول فرآیند نورد گرم (بدون استفاده از اتمسفر کنترل شده) می‌گردد. طبق نتایج آزمون میکروسختی انجام گرفته، مقدار سختی در کامپوزیت سطحی نسبت به لایه منیزیم خالص در سطح مقطع نمونه در حدود 23٪ و بر روی سطح آن در حدود 52٪ افزایش یافته است. بعلاوه در لایه کامپوزیتی نسبت به زیرلایه منیزیمی مقاومت به سایش به میزان 43٪ افزایش داشته است، در حالی که نرخ سایش با کاهش مواجه شده است. بررسی سطح سایش نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده وجود مکانیزم کلی سایش خراشان در سطح نمونه‌ها است. در نمونه منیزیم خالص خطوط سایش با نظم کمتری بوده و نیز مناطق له‌شدگی در سطح منیزیم قابل مشاهده می‌باشد. در حالی که سطح سایش نمونه کامپوزیتی به علت سختی بالاتر لایه کامپوزیتی و وجود ذرات تقویت کننده با مقاومت سایشی بالا، به شکل خطوط منظم نمایان شده است.

5- مراجع

- [1] Shafiei-Zarghani, A., Kashani-Bozorg, S.F. and Zarei-Hanzaki, A., "Microstructures and Mechanical Properties of Al/Al₂O₃ Surface Nano-Composite Layer Produced by Friction Stir Processing", Materials Science and Engineering A, Vol. 500, No. 1-2, pp. 84-91, 2009.
- [2] Ahmadifard, S., Shahin, N., Kazemi, S., Heidarpour, A. and Shirazi, A., "Fabrication of A5083/SiC Surface Composite by Friction Stir Processing and its Characterization", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 31-36, 2016. (In Persian)
- [3] Besharati Givi, M. K., Faraji, G. and Asadi, P., "Fabrication of Fine Grained Magnesium Matrix Composite by FSP Method" 10th international conference of manufacturing engineering of Iran, March 2010. (In Persian)
- [4] Faraji, G. and Asadi, P., "Characterization of AZ91/alumina Nanocomposite Produced by FSP", Materials Science and Engineering A, Vol. 528, No. 6, pp. 2431-2440, 2011.
- [5] Azizeh, M., Kokabi, A. H. and Abachi, P., "Effect of Rotational Speed and Probe Profile on Microstructure and Hardness of AZ31/Al₂O₃ Nanocomposites Fabricated by Friction Stir Processing", Materials and Design, Vol. 32, No. 32, pp. 2034-2041, 2011.
- [6] Ahmadalidokht, S., Abdolazadeh, A., Soleymani, S. and Asadi, H., "Investigating the Wear Behaviour of Hybrid Aluminum Based Composite Produced by FSP", 5th conference of metalurgy engineering of Iran, 2012. (In Persian)
- [7] Khayyamin, D., Mostafapour, A. and Keshmiri, R., "The Effect of Process Parameters on Microstructural Characteristics of AZ91/SiO₂ Composite Fabricated by FSP", Materials Science & Engineering A, Vol. 559, pp. 217-221, 2013.
- [8] Solbi, E. and Kashani Bozorg, F., "Investigating the Mechanical Properties of Nano Surface AZ31/TiC Composite Produced by FSP Method", Paper of material and advanced technologies, Vol 2, No 4, 2014 (In Persian)
- [9] Dadaei Dehkordi, M., Alimirzaei, F. and Omidvar, H., "Investigation of Fracture in AZ91 Based Surface Composite Produced by FSP", 2nd Annual national conference of mechanical engineering and industrial strategies, 2016. (In Persian)
- [10] Dutta Majumdar, J., Ramesh Chandra, B., Galun, R., Mordike, B. L. and Manna, I., "Laser Composite Surfacing of a Magnesium Alloy with Silicon Carbide", Composites Science and Technology, Vol. 63, No. 6, pp. 771-778, 2003.
- [11] Dutta Majumdar, J., Ramesh Chandra, B. and Manna, I., "Friction and Wear Behavior of Laser Composite Surfaced Aluminium with Silicon Carbide", Wear, Vol. 262, No. 5-6, pp. 641-648, 2007.
- [12] Zheng, B. J., Chen, X. M. and Lian, J. S., "Microstructure and Wear Property of Laser Cladding Al+SiC Powders on AZ91D Magnesium Alloy", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 48, No. 5, pp. 526-532, 2010.
- [13] Vaziri, S. A., Shahverdi, H. R., Shabestari, S. G., Hazeli, K. and Torkamany, M. J., "Effect of Re-scanning on Tribological

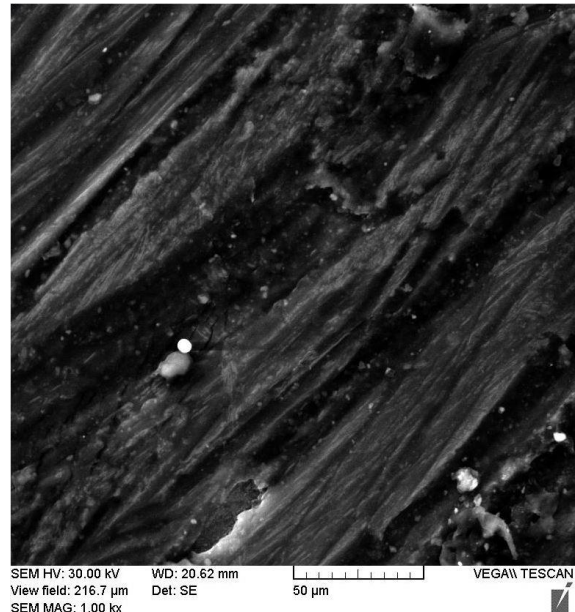


Fig. 7 Worn area of pure magnesium layer

شکل 7 ناحیه تحت سایش در لایه منیزیمی

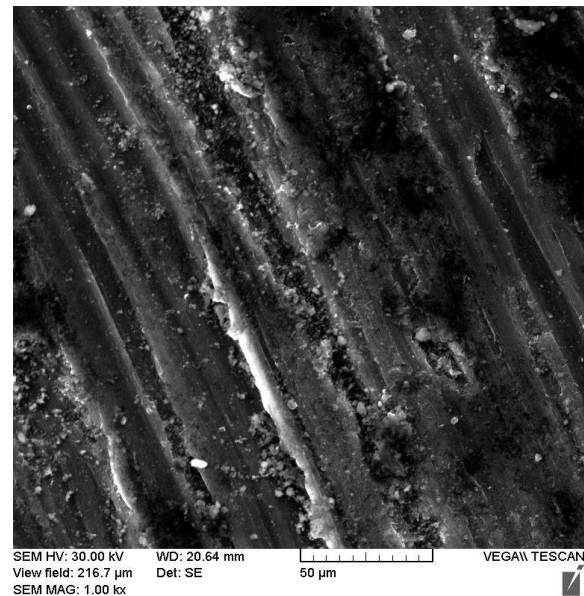


Fig. 8 Worn area of surface composite layer

شکل 8 ناحیه تحت سایش در لایه کامپوزیتی

4- جمع بندی

در این پژوهش یک لایه کامپوزیت سطحی پایه منیزیمی به زیرلایه‌ای از جنس منیزیم با استفاده از فرآیند نورد گرم و بکارگیری لایه واسطی از جنس فلز روی اتصال داده شد. روش پیشنهاد شده در این پژوهش می‌تواند امکان تولید ورق‌های منیزیمی با لایه کامپوزیت سطحی را با سرعت تولید بالاتر و هزینه کمتر فراهم آورد. بررسی ترکیب شیمیایی لایه میانی نشان دهنده تشکیل فازهای بین فلزی در این ناحیه بوده است. فازهای مذکور حاکی از ایجاد اتصال مناسب بین لایه‌ها و نفوذ فلزات روی و منیزیم در یکدیگر می‌باشد. همچنین لایه روی استفاده شده سبب حفاظت دو لایه اصلی از

- Characterization of Laser Surface Alloyed Layers", *Materials and Design*, Vol. 31, No. 8, pp. 3875–3879, 2010.
- [14] Lin, P., Zhang, Zh. and Ren, L., "The Mechanical Properties and Microstructures of AZ91D Magnesium Alloy Processed by Selective Laser Cladding with Al Powder", *Optics & Laser Technology*, Vol. 60 pp. 61–68, 2014.
- [15] Zhang, Zh., Lin, P. and Ren, L., "Wear Resistance of AZ91D Magnesium Alloy Processed by Improved Laser Surface Remelting", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 55, pp. 237–242, 2014.
- [16] Taltavull, C., López, A. J., Torres, B. and Rams, J., "Dry Sliding Wear Behaviour of Laser Surface Melting Treated AM60B Magnesium Alloy", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 236, pp. 368–379, 2013.
- [17] Meng, G., Yue, T. M., Lin, X., Yang, H., Xie, H. and Ding, X., "Laser Surface Forming of AlCoCrCuFeNi Particle Reinforced AZ91D Matrix Composites", *Optics & Laser Technology*, Vol. 70, pp. 119–127, 2015.
- [18] Ren, X. D., Huang, J. J., Zhou, W. F., Xu, S. D. and Liu, F. F., "Surface nano-crystallization of AZ91D magnesium alloy induced by laser shock processing", *Materials and Design*, Vol. 86, pp. 421–426, 2015.
- [19] Riquelme, A., Rodrigo, P., Dolores Escalera-Rodríguez, M. and Rams, J., "Analysis and Optimization of Process Parameters in Al–SiCp Laser Cladding", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 78, pp. 165–173, 2016.
- [20] Yazdi, R. and Kashani Bozorg, F., "Pure Titanium Surface Alloying with BN Powder by Using TIG Method", 7th national seminar of surface engineering and heat treatment, 2006. (in Persian فارسی)
- [21] Elahi, M. R., Heydarzadeh Sohi, M. and Safaei, A., "Liquid Phase Surface Alloying of AZ91D Magnesium Alloy with Al and Ni Powders", *Applied Surface Science*, Vol. 258, No. 15, pp. 5876–5880, 2012.
- [22] Lotfi, B., Rostami, M. and Sadeghian, Z., "Effect of Silicon Content on Microstructure of Al–Si/SiCp Composite Layer Cladded on A380 Al Alloy by TIG Welding Process", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 24, No. 9, pp. 2824–2830, 2014.
- [23] Mazaheri, H., Fazel Najafabadi, M. and Alaei, A., "Study of Microstructure and Tribological Behavior of the Composite Layer Produced of Silicon Carbide Particles on a Steel ASTM A106 GTAW Welding Method" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 1, pp. 65–72, 2015. (In Persian)
- [24] Schneider, C. and Enzinger, N., "Characterisation of Interface of Steel/Magnesium FSW", *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 16, No. 1, pp. 100–107, 2013.
- [25] Mohammadi, S., Jabbari, A. H. and Sedighi, M., "Mechanical Properties and Microstructure of Mg–SiCp Composite Sheets Fabricated by Sintering and Warm Rolling", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 26, No. 7, pp. 3410–3419, 2017.
- [26] Archard, J. F., "Contact and Rubbing of Flat Surfaces", *Journal of Applied Physics*, Vol. 24, No. 8, pp. 981–988, 1953.
- [27] Srinivasan, M., Loganathan, C., Kamaraj, M., Nguyen, Q. B., Gupta, M. and Narayanasamy, R., "Sliding wear Behaviour of AZ31B Magnesium Alloy and Nano-Composite", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, No. 1, pp. 60–65, 2012.

