

تأثیر فرآیند تولید بر رفتار تریبولوژیکی آلیاژ LM13

روح‌اله عشیری، فتح‌اله کریمزاده و بهزاد نیرومند

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

ضریب انبساط حرارتی کم، سیالیت بالا و مقاومت به پارگی گرم خوب آلیاژ LM13 سبب شده است که از این آلیاژ به طور وسیعی برای تولید پیستون استفاده شود. با توجه به کاربرد خاص پیستون که عمدتاً در شرایط سایشی است، هر گونه بهبود در رفتار تریبولوژیکی این قطعه باعث افزایش عمر و عملکرد آن می‌شود. در این تحقیق سعی شده که اثر تغییر پروسه تولید قطعه از ریخته‌گری ثقلی به ریخته‌گری کوبشی بر رفتار تریبولوژیکی آلیاژ LM13 مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد. بدین منظور ابتدا نمونه‌هایی به روش‌های ریخته‌گری کوبشی و ثقلی تهیه گردید. سپس بر روی نمونه‌ها سیکل مناسب حرارتی اعمال گردیده و رفتار سایشی این آلیاژ در دو حالت کوبشی و ثقلی در شرایط لغزشی خشک بررسی شد. نتایج آزمون‌های سختی و کشش نشان داد که خواص مکانیکی نمونه‌های کوبشی بهتر از نمونه‌های ثقلی می‌باشد. نتایج آزمایش‌های سایش نشان داد که در کلیه نمونه‌ها با افزایش مسافت لغزش میزان کاهش وزن افزایش ولی سرعت سایش و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. در این راستا نمونه ریخته‌گری کوبشی شده رفتار تریبولوژیکی بهتری از خود نشان داد. با تغییر فرآیند تولید ضریب اصطکاک نمونه ریخته‌گری کوبشی شده به نصف ضریب اصطکاک نمونه ریخته‌گری ثقلی شده تقلیل پیدا کرد و همچنین میزان کاهش وزن در این نمونه‌ها کاهش یافت. نمونه‌های ریخته‌گری کوبشی شده همچنین کیفیت سطحی بهتری داشته و بررسی مکانیزم سایش نمونه‌ها نشان داد که مکانیزم‌های حاکم برای این نمونه‌ها سایش خراشان، ورقه‌ای شدن و سایش چسبان و برای نمونه ریخته‌گری ثقلی شده مکانیزم‌های سایش خراشان، خستگی سطحی و سایش چسبان می‌باشند.

کلمات کلیدی: آلیاژ LM13، رفتار تریبولوژی، ریخته‌گری کوبشی، ریخته‌گری ثقلی، پیستون

Effect of production process variation on wear behavior of LM13 alloy

R. Ashiri, F. Karimzadeh and B. Niroumand

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

Abstract: LM13 alloy is widely used for piston production due to its low thermal expansion coefficient, high fluidity and good hot tear resistance. Optimization of production process and heat treatment are two effective factors in improvement of produced piston properties. In this research effect of change of casting process from gravity casting to squeeze casting on wear behavior of LM13 alloy was investigated. First the samples were cast using the two casting processes and heat treated. Then wear behavior of the alloy in two states of squeeze and gravity casting under dry sliding condition was examined and compared.

Results of hardness and strength tests indicate that squeeze cast specimens have higher mechanical properties. The wear experiment results show that in both squeeze and gravity cast specimens, the amount of weight loss increases as the sliding distance increase, but the wear rate and the friction coefficient reduces. Comparing the properties of the two samples indicate that squeeze sample has better tribological behavior. Change of production process causes a decrease in friction coefficient from 0.4 to 0.2 for squeeze cast samples and also decreases the weight loss of the samples. Furthermore squeeze cast samples have better surface quality. In squeeze cast samples, abrasive, adhesive and delamination and in gravity cast samples, abrasive, adhesive and surface fatigue were recognized as the dominant wear mechanisms.

Keywords: LM13 alloy, squeeze casting, gravity casting, tribological behavior, piston

E-mail of corresponding author (s): ro_ashiri@yahoo.com

مقدمه

فلزات و آلیاژهای سبک نظیر آلیاژهای آلومینیوم به علت داشتن خواص منحصر به فردی چون نسبت استحکام به وزن بالا، شکل پذیری خوب، مقاومت خوردگی مناسب، قابلیت ریخته‌گری بالا و قابلیت بازیابی آسان کاربردهای فراوان و روز افزونی در صنایع بزرگی هم‌چون خودروسازی و هوافضا پیدا کرده‌اند [۱, ۲]. آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیم خصوصاً آلیاژ LM13 علاوه بر خواص بالا به خاطر ضریب انبساط حرارتی کم، ضریب انتقال حرارت بالا، استحکام در دمای بالا، مقاومت به پارگی گرم و خواص تریبولوژیکی مطلوب به طور وسیعی برای تولید پیستون به کار رفته است [۲, ۳].

روش ریخته‌گری کوبشی یکی از روش‌هایی است که اخیراً برای تولید قطعات با خواص برتر و نزدیک به شکل نهایی به شدت مورد توجه قرار گرفته است و علاوه بر آن یکی از روش‌های مناسب برای تولید کامپوزیت‌های با زمینه فلزی می‌باشد. اعمال فشار بر مذاب در ریخته‌گری کوبشی سبب افزایش سرعت سرد کردن و انجام اصلاح‌سازی حرارتی می‌شود. علاوه بر این اعمال فشار موجب کاهش تخلخل‌های انقباضی و گازی، تولید قطعه نزدیک به شکل نهایی، خواص مکانیکی بالا نزدیک به قطعه کار شده، سرعت تولید بالا، افزایش راندمان تولید از طریق حذف راه‌گاه و تغذیه، دقت ابعادی بالا و قابلیت استفاده برای فلزاتی که قابلیت ریخته‌گری خوب (سیالیت خوب) ندارند، می‌باشد [۴, ۵]. این مزیت‌ها سبب شده است که این روش ریخته‌گری نظر بسیاری از محققین را به سوی خود جلب کند. اهمیت بررسی و تحقیق در زمینه تریبولوژی و سایش از دو جنبه بسیار مهم است، که یک جنبه کاهش مصرف سوخت و دیگری جلوگیری از تخریب قطعات می‌باشد. آمار نشان می‌دهد که هزینه مستقیم خساراتی که از این طریق متوجه هر کشوری می‌شود حدود ۱ تا ۴ درصد درآمد ناخالص ملی می‌باشد [۳]. تحقیقات گویای آن است که هر ۱۰ درصد کاهش اصطکاک مضر معادل ۱/۵ درصد صرفه‌جویی در میزان

سوخت است. این موضوع یک اهمیت مضاعف نیز پیدا می‌کند زیرا که با کاهش مصرف سوخت میزان آلودگی نیز کاهش می‌یابد [۶]. تنها در کشور آمریکا با کاهش اصطکاک مضر بین قطعات درگیر و بهبود شرایط تریبولوژیکی در اجزاء موتور اتومبیل‌ها و قطارها می‌توان سالانه ۱۲۰ بیلیون دلار صرفه‌جویی اقتصادی کرد [۶]. علت این امر آن است که ۱۵ درصد انرژی سوخت صرف اصطکاک غیر ضروری در بین قطعات درگیر در موتور یا تلفات مکانیکی موتور احتراقی می‌شود [۶, ۷]. بهبود وضعیت تریبولوژیکی در موتور مزایای فراوانی دارد که مهم‌ترین آنها کاهش مصرف روغن موتور، کاهش آلودگی هوا، افزایش عمر موتور، ضریب اطمینان بیشتر موتور و افزایش بازه زمانی برای سرویس مجدد موتور می‌باشند [۶]. از آنجائی که صنعت خودرو یکی از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین صنایع می‌باشد، با کوچک‌ترین بهبود در وضعیت تریبولوژیکی صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه و سوخت می‌شود.

عوامل متعددی می‌توانند در بهبود شرایط تریبولوژیکی موتور و اجزاء آن تاثیر داشته باشند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به استفاده از فلزات و آلیاژهای سبک نظیر آلیاژهای منیزیم و آلومینیوم و کامپوزیت‌های آنها به جای فلزات و آلیاژهای سنگین در اجزای موتور، استفاده از مواد روانکار مرغوب، بهبود کیفیت سطحی قطعات درگیر، انجام عملیات سطحی و استفاده از پوشش‌های مناسب، شبیه‌سازی رفتار سایشی [۶, ۷]، استفاده از نانوتریبولوژی [۸]، انجام عملیات حرارتی مناسب قطعه [۹, ۱۰] و تغییر پروسه تولید قطعه به نحوی که خواص مکانیکی بهتری پدید می‌آید [۷] اشاره کرد. از بین قطعات موتور، پیستون یکی از مهم‌ترین قطعات می‌باشد. ۴۵ درصد از تلفات مکانیکی موتورهای احتراقی در اثر اصطکاک آن رخ می‌دهد. این امر سبب شده است رفتار تریبولوژیکی پیستون مورد توجه محققین قرارگیرد.

هر چند تحقیقات قابل توجهی در مورد ارزیابی رفتار تریبولوژیکی کامپوزیت‌های ریخته‌گری زمینه آلومینیوم که از

جهت آزمایشات سایش، یک سری نمونه دیسکی به قطر ۵۰mm و ضخامت ۵mm از کف نمونه تهیه شده و تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. سطح کلیه نمونه‌ها قبل از آزمایش سایش تا سنباده شماره ۴۰۰۰ سنباده زده و پولیش شدند. نمونه و پین آزمایش قبل از آزمایش با استون شستشو و خشک شد. برای انجام آزمایش‌های سایش از بار ۱۰ N تحت شرایط تمام لغزشی خشک و بدون ماده روانکار در اتمسفر معمولی استفاده گردید که سرعت چرخش نمونه در محل تماس با پین ۷cm/sec بود. برای سطح مقابل سایش از یک پین فولادی که از جنس فولاد بلبرینگ ۵۲۱۰۰ در حالت عملیات حرارتی شده استفاده شد. در شکل ۱ نمایی گرافیکی از طرز کار دستگاه سایش و نحوه انجام آزمایش آورده شده است.

علاوه بر آزمایش کاهش وزن یکی از راه‌های تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش سایش، بررسی سرعت سایش برای نمونه‌ها و مقایسه آنها با یکدیگر می‌باشد. سرعت سایش را می‌توان با روابط مختلف و متنوع نشان داد یکی از این رابطه‌ها سرعت کاهش حجم، $W(t)$ ، می‌باشد که در آن Δw تغییرات حجم، ρ چگالی و t زمان لغزش می‌باشد.

$$W(t) = \frac{\Delta w}{\rho t} \quad (1)$$

برای بررسی‌های سطوح و خرده‌های سایش و رفتار تریبولوژیکی و تشخیص مکانیزم‌های حاکم از میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد.

نتایج و بحث

۱- ریزساختار ریختگی نمونه در شکل ۲ ریز ساختار ریختگی نمونه‌های کوبشی و ثقلی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود نمونه کوبشی ریزساختار ریزتری دارد و ذرات فاز دوم (سیلیسیوم) نیز در آنها اصلاح شده ترند و حالت تیغه‌ای ندارند. در نمونه‌های ثقلی پس از تشکیل اولین لایه جامد، این لایه در اثر انقباض از دیواره قالب فاصله می‌گیرد و فاصله هوایی ایجاد

روش ریخته‌گری کوبشی ساخته شده اند انجام گردیده ولی نتایج زیادی در مورد رفتار سایشی آلیاژهای آلومینیم ریخته‌گری کوبشی شده بدون ذرات تقویت‌کننده ارایه نشده است [۱۱-۱۴].

در این تحقیق سعی شده که اثر تغییر پروسه تولید قطعه از ریخته‌گری ثقلی به ریخته‌گری کوبشی و انجام عملیات حرارتی مناسب بر رفتار تریبولوژیکی آلیاژ LM13 مورد بررسی قرار گیرد.

روش تحقیق

۱- شکل نمونه و آنالیز شیمیایی آلیاژ ریختگی

در این تحقیق سعی شد که نمونه‌های مورد مطالعه از لحاظ شکل و ابعاد نزدیک به پیستون اتومبیل پژو ۲۰۶ باشند که جزئیات آن در مراجع [۱۵ و ۱۶] آورده شده است. آلیاژ مورد تحقیق LM13 بود که آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است.

۲- شرایط تهیه نمونه‌ها

شرایط تولید نمونه‌ها بر اساس شرایط بهینه به دست آمده از تحقیق دیگری [۱۵] انتخاب شد. برای تولید تمامی نمونه‌ها از دمای ذوب ریزی 680°C در قالب فلزی از جنس آلیاژ H13 و دمای پیشگرم قالب 250°C استفاده شد. برای تهیه تمامی نمونه‌های کوبشی از فشار اعمالی ۸۳MPa استفاده گردید.

۳- عملیات حرارتی نمونه‌ها

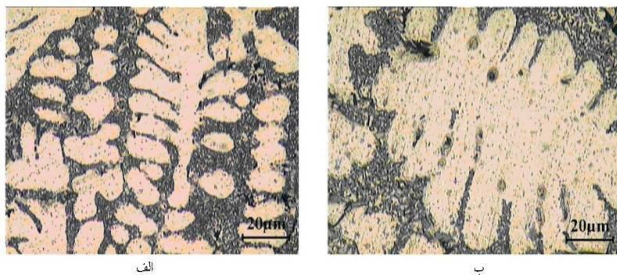
برای عملیات حرارتی نمونه‌ها از کوره موفلی استفاده گردید که آهنگ گرم شدن از دمای محیط برای تمام نمونه‌ها آهنگ متوسط ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه بود. نمونه‌ها پس خروج از کوره در آب با دمای ۶۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد کوئنچ و سپس به مدت ۶ ساعت در دمای 525°C آنیل انحلالی شدند. برای عملیات رسوب سختی مصنوعی دمای 250°C انتخاب گردید [۱۷].

۴- روش انجام آزمایش سایش و بررسی مکانیزم‌های حاکم

جدول ۱- آنالیز شیمیایی آلیاژ LM13 مورد استفاده.

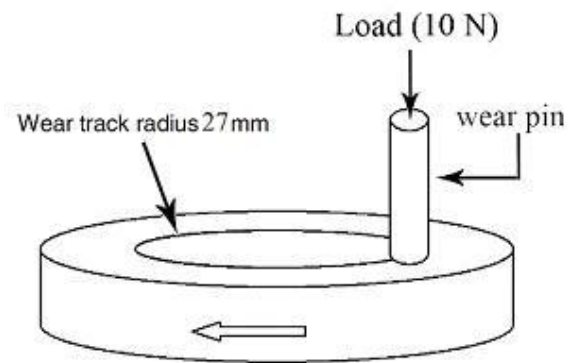
عنصر	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Sn
درصد	Bal.	۱۱/۵	۱	۱/۱	۰/۴	۱/۲	۱/۵	۰/۵	۰/۲	۰/۱

اعمال فشار در حین انجماد سبب می‌شود که مذاب در حین انجماد در تماس کامل و دائم با قالب قرار گیرد و با توجه به کیفیت سطحی بالای قالب، کیفیت مطلوب را پیدا کند. در نمونه‌های ثقلی سطح نمونه دارای تخلخل‌های ریز و پراکنده می‌باشد ولی با توجه به اینکه در هر دو نمونه از یک قالب برای ریخته‌گری استفاده شد در نمونه کوبشی این تخلخل‌ها وجود ندارند. اعمال فشار سبب می‌شود که حباب‌های گازی که بین مذاب و دیواره قالب محبوس نشوند. از طرفی اگر مذاب در بعضی جاها دیواره قالب را به خوبی تر نکند با اعمال فشار این ترکندگی قالب به خوبی رخ داده و یک سطح نهائی مطلوب به دست می‌آید.



شکل ۲- مقایسه ریزساختار ریخته‌گری نمونه‌ها در دو حالت: الف کوبشی، ب ثقلی.

در مورد وجود تخلخل‌ها و فرورفتگی سطحی در نمونه‌های ثقلی در مقایسه با نمونه‌های کوبشی می‌توان گفت با اعمال فشار در نمونه‌های کوبشی مکانیزم‌های مختلف تغذیه فعال شده [۲۰ و ۲۱] و باعث کاهش حفرات انقباضی می‌شوند. از آنجا که انجماد این آلیاژ در یک محدوده دمائی رخ می‌دهد اعمال فشار اثر مضاعف پیدا می‌کند زیرا که در مقیاس میکروسکوپی مذاب را به محلی که انقباض دارد هدایت می‌کند. از طرف دیگر در مقیاس میکروسکوپی از تشکیل تخلخل‌های ریز در حین انجماد دندریتی جلوگیری می‌کند. اعمال فشار سبب افزایش میزان انحلال گازها در مذاب می‌شود یعنی گاز هائی که در ساختار باقی می‌مانند و



شکل ۱- نمائی گرافیکی از نحوه انجام آزمایش سایش [۱۰].

شده به عنوان عایق حرارتی عمل کرده، سبب می‌شود که حرارت با سرعت کمتری منتقل شود و ساختار فرصت رشد پیدا کرده و در نتیجه ریز ساختار درشت‌تری ایجاد می‌شود. اعمال فشار در حین انجماد سبب می‌شود که فاصله هوایی بین لایه منجمد شده و دیواره قالب کاهش یابد [۱۸ و ۱۹]. این امر سبب می‌شود که سرعت انتقال حرارت در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های ثقلی بیشتر شود و در نتیجه ریز ساختار ریزتر و اصلاح شده‌تری ایجاد گردد. ریزساختار ریزتر سبب بهبود خواص مکانیکی شده و اصلاح شده تر بودن شکل ذرات فاز دوم بهبود چقرمگی را برای نمونه‌های کوبشی به همراه دارد.

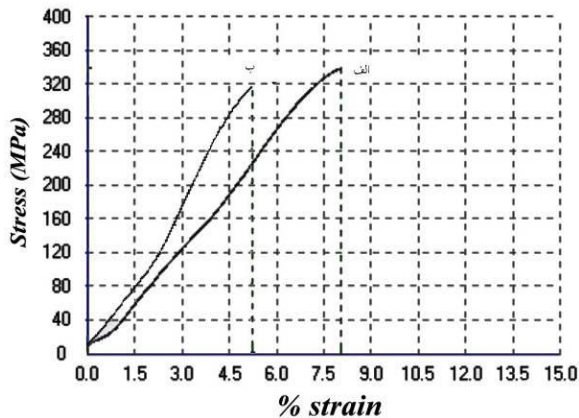
۲- کیفیت سطحی نمونه‌ها قبل از عملیات حرارتی در شکل ۳ نمونه‌های حاصل از فرآیندهای ریخته‌گری ثقلی و کوبشی به نمایش گذاشته شده است همان‌طور که ملاحظه می‌گردد تخلخل‌های سطحی ریز پراکنده و عیب فرورفتگی سطحی در نمونه ثقلی وجود دارد که حاکی از کیفیت ضعیف‌تر نمونه‌های ریخته‌گری ثقلی شده نسبت به نمونه‌های ریخته‌گری کوبشی شده است. فلش‌ها عیب فرورفتگی سطحی را در نمونه ثقلی نشان می‌دهد.

کیفیت بالای سطحی نمونه‌های کوبشی در مقایسه با نمونه‌های ثقلی را می‌توان به این ترتیب تشریح کرد که



شکل ۳. مقایسه کیفی پیستون‌های تولیدی در دو حالت: الف کوبشی، ب ثقلی از نظر وجود عیب فرورفتگی سطحی.

همان طوری که در نمودار ۴ و جدول ۲ آورده شده است، بررسی و مقایسه خواص مکانیکی نمونه‌ها پس از انجام عملیات حرارتی رسوب سختی نشان می‌دهد که نمونه کوبشی استحکام شکست و سختی بالاتری نسبت به نمونه ثقلی داراست و علاوه بر آن شکست در این نمونه در کرنش‌های بالاتری رخ می‌دهد [۲۲]. در توجیه این مطلب علاوه بر موارد ذکر شده در بالا باید گفت در نمونه‌های کوبشی تشکیل رسوبات بیشتر، ریزتر، با توزیع همگن در کل ساختار پس از عملیات رسوب سختی سبب بهبود خواص مکانیکی می‌شود.



شکل ۴ - مقایسه منحنی تنش - کرنش نمونه‌ها در دو حالت: الف) کوبش و ب) ثقلی.

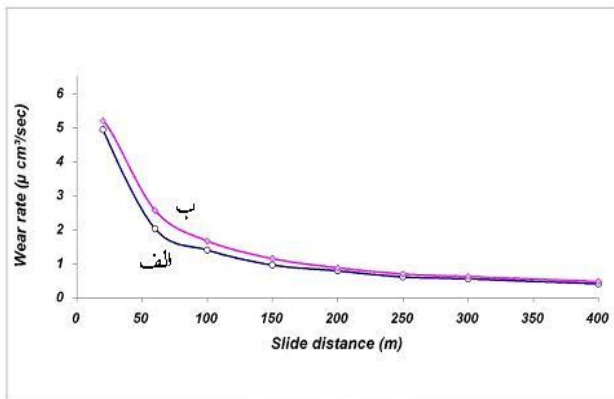
جدول ۲: مقایسه خواص نمونه‌های کوبشی و ثقلی بعد از عملیات حرارتی رسوب سختی.

	نمونه کوبشی	نمونه ثقلی
چگالی (gr/cm^3)	۲/۷	۲/۶۸
سختی (HBN)	۱۴۲	۱۴۰
استحکام (MPa)	۳۴۰	۳۱۰

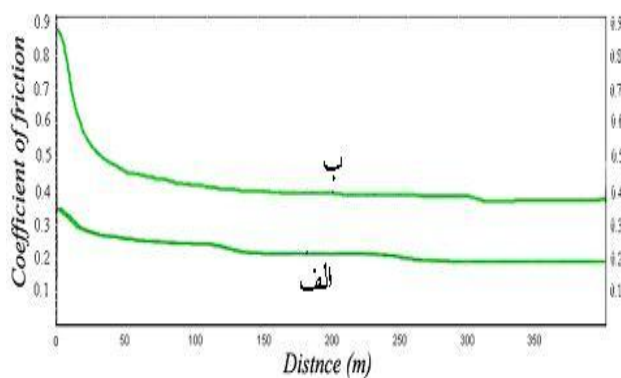
تبدیل به عیوب ریخته‌گری می‌شدند با اعمال فشار در مذاب حل شده و دیگر اثر مخرب را ندارند. اعمال فشار پایداری حباب‌هایی را که در ساختار باقی مانده و تبدیل به مک‌گازی می‌شدند را از بین می‌برد [۲۳ و ۲۲]. تمامی مواردی که در بالا بحث شد سبب می‌شود که میزان تخلخل‌ها گازی و انقباضی کاهش یابد. عدم وجود این عدم وجود این تخلخل‌ها در سطح قطعه کیفیت مطلوب سطحی را به همراه دارد و عدم وجود این عیوب در داخل قطعه سبب افزایش چگالی می‌شود. عدم وجود تخلخل و یا کاهش آن در نمونه کوبشی می‌تواند اثر قابل ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی قطعه داشته باشد.

۳- خواص مکانیکی و دانسیته نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی

در مقاله دیگری توسط نویسندگان [۱۷] نشان داده شد که در مرحله رسوب سختی در نمونه کوبشی رسیدن به استحکام ماکزیمم نسبت به نمونه ثقلی در شرایط یکسان دائمی در زمان کمتری رخ می‌دهد [۲۲]. این امر به این ترتیب توضیح داده شد که در نمونه‌های کوبشی به دلیل اعمال فشار در حین انجماد و سرعت سرد شدن بالاتر حالت غیر تعادلی تری نسبت به نمونه‌های ثقلی از لحاظ شرایط سرد شدن وجود دارد این امر سبب می‌شود که تمایل بیشتری در این حالت برای رسیدن به حالت تعادلی و کاهش انرژی اضافی سیستم وجود داشته باشد که باعث کاهش مانع انرژی بر سر راه تشکیل رسوبات خواهد شد و رسوبات در زمان و دماهای کمتری نسبت به حالت ثقلی در ساختار تشکیل می‌شوند [۱۷ و ۲۲].



شکل ۶- مقایسه سرعت سایش نمونه‌های الف) کوبشی و ب) ثقلی.



شکل ۷- بررسی تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش برای نمونه‌های الف) کوبشی و ب) ثقلی

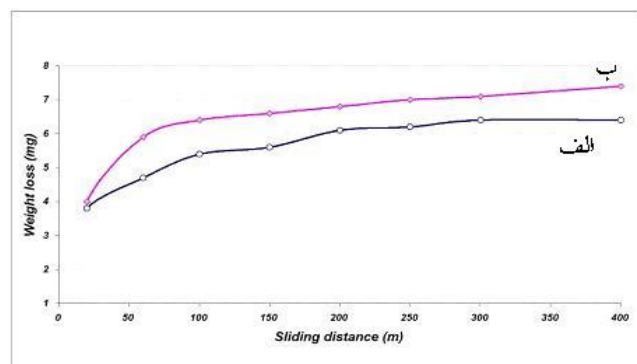
سطح مقابل در تماس با خود آلیاژ قرار می‌گیرد که ضریب اصطکاک کمتری دارد این امر سبب می‌شود که در ادامه، میزان سرعت کاهش وزن و اصطکاک کاهش یابد و خرده‌های ایجاد شده در این مرحله ریزتر شوند. در کلیه موارد بالا نمونه ریخته‌گری کوبشی شده در شرایط مناسب‌تری قرار دارد که می‌توان گفت رفتار سایشی مطلوب‌تر نمونه ریخته‌گری کوبشی شده با خواص مکانیکی بالاتر این نمونه‌ها در ارتباط است. در مورد ضریب اصطکاک کمتر نمونه ریخته‌گری کوبشی شده باید گفت که از یک طرف کیفیت سطحی بالاتر این نمونه‌ها سبب کاهش ضریب اصطکاک می‌شود از طرف دیگر وجود تخلخل‌های ریز سطحی پراکنده در نمونه ثقلی سبب می‌شوند که به عنوان برآمدگی و فرورفتگی عمل نموده و سبب می‌شوند که سطح نمونه ثقلی یک سطح خشن به نظر برسد. وجود تخلخل‌های ریز زیرسطحی پراکنده در

۴- بررسی خصوصیات سایشی نمونه‌ها

در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش زمان و مسافت سایش کاهش وزن هر دو نمونه کوبشی و ثقلی افزایش می‌یابد و نمونه کوبشی کاهش وزن کمتری دارد. سرعت سایش (شکل ۶) هر دو نمونه نیز در ابتدا زیاد بوده و با افزایش مسافت و زمان لغزش کاهش می‌یابد و در نهایت تقریباً ثابت می‌شود که نمونه کوبشی نرخ کاهش وزن کمتری دارد.

تغییرات ضریب اصطکاک نمونه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. در مورد ضریب اصطکاک می‌توان گفت که در ابتدای تماس پین با سطح نمونه ضریب اصطکاک بالا بوده و به تدریج کاهش می‌یابد و در نهایت تقریباً ثابت می‌شود که ضریب اصطکاک نمونه کوبشی کمتر از نمونه ثقلی است. سطح مقابل سایش (پین) در تمامی آزمایش‌های سایش افزایش وزن اندکی داشت.

از جمع‌بندی مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مسافت و زمان لغزش در کلیه نمونه‌ها در اثر نیروهای وارده از طرف سطح مقابل، میزان کاهش وزن افزایش می‌یابد ولی سرعت سایش و میزان ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که در ابتدای انجام آزمایش، سطح مقابل در تماس با لایه اکسیدی که بر روی آلومینیوم و کلیه آلیاژهای آن وجود دارد قرار می‌گیرد و به دلیل ترد بودن این لایه و شکست آن، کاهش وزن، سرعت کاهش وزن و اصطکاک در ابتدا زیاد بوده و خرده‌های ایجاد شده در ابتدا درشت هستند ولی با افزایش بیشتر مسافت و زمان لغزش،



شکل ۵- مقایسه آزمایش کاهش وزن نمونه‌های الف) کوبشی و ب) ثقلی.

که در نمونه کوبشی در مقایسه با نمونه ثقلی در حین عملیات رسوب سختی مقدار بسیار بیشتری رسوب ریزتر با توزیع همگن تر در ساختار ایجاد شود [۲۲]. با اعمال نیرو از طرف پین، سیستم‌های لغزش فعال شده و نابجایی‌های در زیر سطح شروع به حرکت نموده با رسیدن به رسوبات متوقف شده اعمال نیروی بیشتر در اثر افزایش فاصله لغزش سبب تجمع بیشتر نابجایی‌ها در پشت این رسوبات می‌شود و تنش اعمالی از طرف نابجایی‌های تجمع یافته به حدی می‌رسد که از استحکام زمینه فراتر رفته که با تغییر شکل پلاستیک و ایجاد حفره‌های زیر سطحی در اطراف رسوبات سخت انرژی خود را تخلیه می‌کنند (شکل ۹-الف). با افزایش فاصله لغزش، این حفرات از یک طرف بزرگ‌تر شده و از طرف دیگر حفرات جدید تر ایجاد می‌شوند که با هم پیوستن این حفرات ترک‌های موازی سطح ایجاد شده که زمانی که طول ترک به حد بحرانی برسد خورده‌ورقه‌ای از سطح جدا می‌شود [۲۴].

در نمونه‌های ثقلی همان طوری که در شکل ۸-ب نشان داده شده است در سطح سایش ترک‌های ریزی مشاهده می‌شود و بررسی لایه زیرین سطح سایش (شکل ۹-ب) حاکی از عدم وجود حفره و تغییر شکل پلاستیک می‌باشد. شکل ۱۰-ب نیز وجود میکروتُرک‌های را برای نمونه ثقلی نشان می‌دهد. از جمع بندی شواهد می‌توان گفت مکانیزم دیگر حاکم در این نمونه‌ها خستگی سطحی می‌باشد. قبلاً اشاره شد که نمونه‌های ثقلی به حداکثر دانسیته خود نمی‌رسند و مقداری تخلخل ریز و پراکنده سطحی و زیر سطحی دارند. این تخلخل‌ها اثر خود را در اینجا نشان داده‌اند زیرا که عامل اساسی پدید آمدن خستگی سطحی در نمونه‌های ثقلی وجود همین تخلخل خستگی سطحی در نمونه‌های ثقلی وجود همین تخلخل‌ها می‌باشد. وجود تخلخل ریز و پراکنده سطحی و زیر سطحی سبب می‌شود که آنها به عنوان جوانه ترک و در صورت بزرگ بودن به عنوان ترک عمل نمایند (شکل ۱۰-ب). در اثر تنش‌های متناوب لغزشی ترک‌های

نمونه ثقلی سبب می‌شوند که با رسیدن پین به آنها به عنوان چاله عمل کرده و حرکت پین را با مشکل مواجه نمایند.

شکل ۸ سطح سایش دو نمونه را نشان می‌دهد. همان طوری که در این شکل ملاحظه می‌شود در هر دو نمونه کوبشی و ثقلی در سطح سایش شیارهایی به موازات خط سایش ملاحظه می‌شود که این واقعیت را نشان می‌دهد که در هر دو نمونه یکی از مکانیزم‌های حاکم سایش، مکانیزم سایش خراشان می‌باشد. از طرفی برای هر دو نمونه مشاهده شد که سطح مقابل سایش (پین) با کمی افزایش وزن همراه است که بر این اساس می‌توان گفت که در هر دو نمونه کوبشی و ثقلی یکی از مکانیزم‌های دیگر حاکم، مکانیزم سایش چسبان می‌باشد.

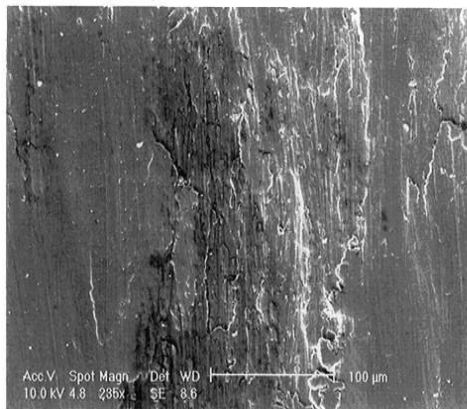
در تحلیل این نتایج باید گفت که سایش خراشان زمانی رخ می‌دهد که اختلاف سختی سطح سایش و سطح مقابل سایش (پین) بسیار زیاد باشد با توجه به سختی بسیار بالای پین این واقعیت غیر منتظره نمی‌باشد. در حین لغزش پین تنش اعمالی در این مواضع درگیر به شدت بالا رفته که سبب تغییر فرم پلاستیکی و گسیختگی می‌شود. نرمی نسبی آلیاژ نسبت به پین سبب می‌شود که در حین اعمال نیرو و همچنین کندن خرده‌ها مقداری از آلیاژ به سطح مقابل منتقل شود.

تصویر سطح سایش نمونه کوبشی (شکل ۸-الف) مکان‌هایی را نشان می‌دهد که ماده از سطح به صورت ورقه‌ای جدا شده است و شکل ۹-الف وجود حفره در نمونه کوبشی در زیر سطح سایش را نشان می‌دهد که با هم پیوستن این حفرات خرده‌های سایش به صورت ورقه‌ای جدا می‌گردند. این شکل علاوه بر آن تغییر شکل پلاستیک را برای این نمونه نشان می‌دهد. شکل ۱۰-الف تورق را در نمونه کوبشی و شکل ۱۱-الف خرده‌های ورقه‌ای شکل را برای این نمونه نشان می‌دهد. این چهار تصویر به خوبی نشان می‌دهد که یکی از مکانیزم‌های اصلی سایش در این نمونه ورقه‌ای شدن است. نشان داده شده است که اعمال فشار در حین انجماد سبب می‌شود

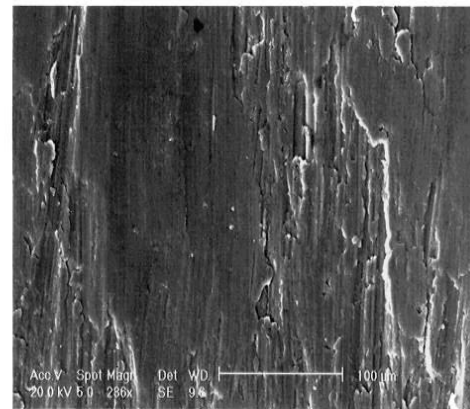
(سرعت تولید و همچنین زمان کمتر مورد نیاز برای عملیات حرارتی) و راندمان تولید بیشتر (عدم نیاز به تغذیه و راه‌گاہ) و عملیات نهایی مورد نیاز کمتر برای نمونه‌های کوبشی، هزینه‌های تولید پیستون ریخته‌گری کوبشی شده از پیستون‌های ریخته‌گری ثقلی شده کمتر می‌شود. با توجه به خواص مکانیکی و خواص سایشی بهتر پیستون‌های ریخته‌گری کوبشی شده ضریب اطمینان کاری این نوع پیستون بالاتر از پیستون‌های ریخته‌گری ثقلی شده می‌باشد و از طرف دیگر با توجه به ضریب اصطکاک کمتر نمونه‌های ریخته‌گری کوبشی شده، تلفات مکانیکی

سطحی رشد نموده و سبب جدا شدن خرده‌های سطحی می‌شوند و همچنین تخلخل‌های زیر سطحی با رشد به سطح می‌رسند و سبب جدا شدن ماده می‌شوند [۲۴]. باید توجه داشت که خستگی سطحی برای نمونه‌ها بسیار مضر می‌باشد زیرا که وقوع آن وابسته به رشد ترک است پس و در تنش‌های پایین رخ می‌دهد و سبب تخریب قطعه می‌شود.

در نهایت با توجه به نتایج ارایه شده در این مقاله می‌توان پیش‌بینی نمود که در صورت تغییر روش ساخت پیستون اتومبیل به ریخته‌گری کوبشی، خواص پیستون‌های تولیدی

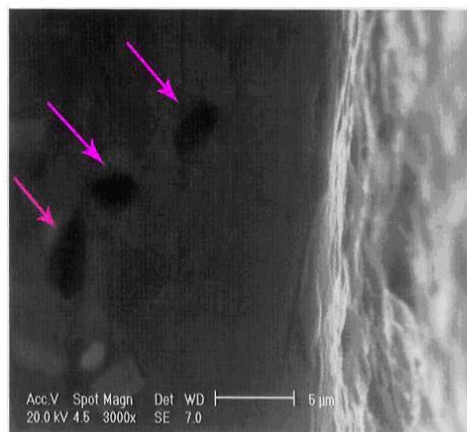


الف

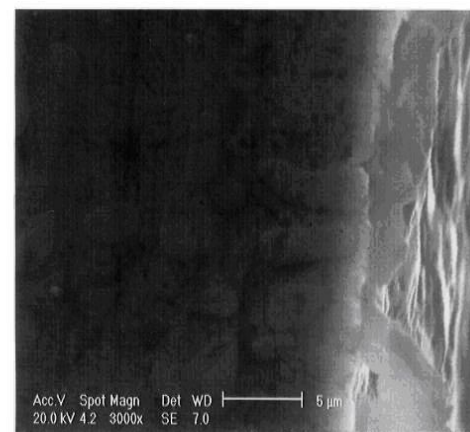


ب

شکل ۸- مقایسه تصویر SEM سطوح سایش برای نمونه: الف) کوبشی و ب) ثقلی.



الف

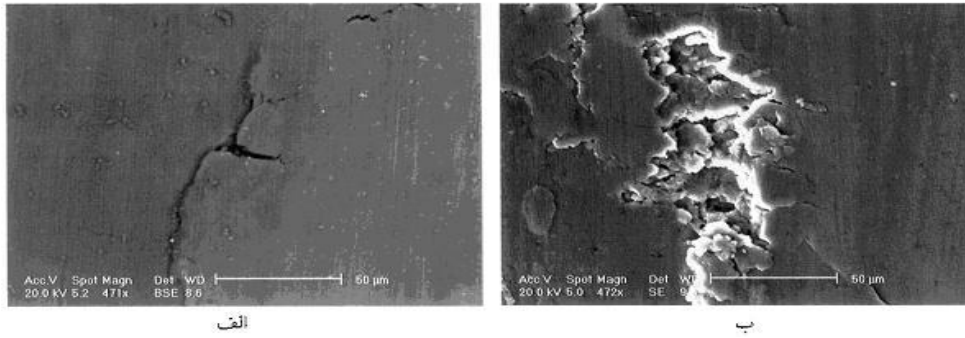


ب

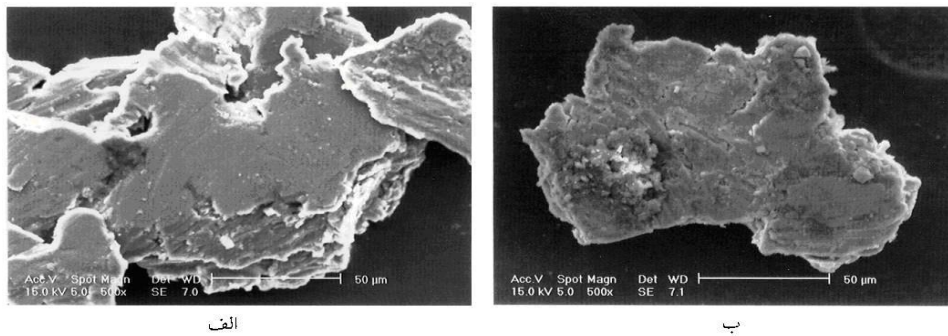
شکل ۹- مقایسه تصویر SEM زیر سطح مقطع سایش برای نمونه: الف) کوبشی و ب) ثقلی.

(اصطکاک مضر) در این نمونه نسبت به نمونه‌های ریخته‌گری ثقلی شده بسیار کمتر بوده که سبب کاهش میزان مصرف سوخت اتومبیل می‌شود.

به طور کلی از پیستون‌های که در حال حاضر در کشور به روش ریخته‌گری ثقلی تولید می‌شوند بهتر و مطلوب‌تر خواهد بود. در صورت تولید انبوه با توجه به سرعت



شکل ۱۰- تصویر SEM از الف) تورق در نمونه کوبشی و ب) میکروتکر در نمونه ثقلی.



شکل ۱۱- مقایسه تصویر SEM خرده‌های سایش برای نمونه: الف) کوبشی و ب) ثقلی.

۵- به نظر می‌رسد که مکانیزم‌های حاکم برای نمونه ریخته‌گری کوبشی شده سایش خراشان، ورقه‌ای شدن و سایش چسبان و برای نمونه ریخته‌گری ثقلی شده مکانیزم‌های سایش خراشان، خستگی سطحی و سایش چسبان می‌باشند.

مراجع

1. G. Cole, A. Sherman, *Light weight materials for automotive applications*, Materials Characterization, Vol. 35, pp. 3-9, 1995.
2. W. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, A. Viergge, *Recent development in aluminium alloys for the automotive industry*, Materials Science and Engineering, Vol. A280, pp. 37-49, 2000.
3. T. Yasmin, A. Khalid, M. Haque, *Tribological (wear) properties of aluminum-silicon eutectic base alloy under dry sliding condition*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153-154, pp. 833-838, 2004.

نتایج

مهم‌ترین نتایجی که از این تحقیق حاصل شد عبارتند از:

۱- قطعه ریخته‌گری کوبشی شده دارای ساختاری ریزتر و اصلاح شده‌تر از قطعه تولیدی به روش ریخته‌گری ثقلی است.

۲- قطعات ریخته‌گری کوبشی شده از لحاظ کیفیت سطحی به مراتب بهتر از نمونه‌های ریخته‌گری ثقلی شده بوده و وجود پراکنده تخلخل‌های سطحی ریز و عیب فرورفتگی سطحی که در نمونه‌های ثقلی مشاهده می‌شود در این نمونه‌ها مشاهده نمی‌گردد.

۳- دانسیته و خواص مکانیکی نمونه‌های کوبشی از نمونه‌های ثقلی بیشتر می‌باشد.

۴- با افزایش فاصله لغزش، میزان کاهش وزن افزایش ولی سرعت سایش کاهش می‌یابد. مشاهده شد که نمونه ریخته‌گری کوبشی شده کاهش وزن، سرعت کاهش وزن و ضریب اصطکاک کمتری نسبت به نمونه ریخته‌گری ثقلی شده دارند که بر این اساس می‌توان گفت نمونه ریخته‌گری کوبشی شده رفتار تریبولوژیکی بهتری نسبت به نمونه ثقلی دارد.

4. M. Ghomashchi, A. Vikhrov, *Squeeze casting: an overview*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 101, pp.1-9, 2000.
5. J. Franklin, A. Das, *Squeeze casting- a review of the status*, British foundryman, Vol. 77, No.3, pp. 150-158, 1984.
6. S. Tung, M. McMillan, *Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future*, Tribology International, Vol. 37, pp. 517-536, 2004.
7. C. Taylor, *Automobile engine tribology-design considerations for efficiency and durability*, Wear, Vol. 221, pp. 1-8, 1998.
8. V. Bhattacharya, K. Chattopadhyay, *Microstructure and wear behaviour of aluminium alloys containing embedded nanoscaled lead dispersoids*, Acta Materialia, Vol. 52, pp. 2293-2304, 2004.
9. M. Haque, A. Sharif, *Study on wear properties of aluminium-silicon piston alloy*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 118, pp. 69-73, 2001.
10. R. Sharma, Anesh, D. Dwivedi, *Influence of silicon and heat treatment on abrasive wear behaviour of cast Al-Si-Mg alloys*, Materials Science and Engineering, Vol. A408, pp. 274-280, 2005.
11. H. Mindivan, E. S. Kayali and H. Cimenoglu, *Tribological behavior of squeeze cast aluminum matrix composites*, Wear, Vol. 265, pp. 645-654, 2008.
12. M.T. Abou El-Khair, A. Abdel, *Erosion-corrosion and surface protection of A356 Al/ZrO₂ composites produced by vortex and squeeze casting*, Materials Science and Engineering: A, Vol. 454-455, pp. 156-163, 2007.
13. G. E. Kiourtsidis, S. M. Skolianos, *Wear behavior of artificially aged AA2024/40 μm SiCp composites in comparison with conventionally wear resistant ferrous materials*, Wear, Vol. 253, pp. 946-956, 2002.
14. S. W. Kim, D. Y. Kim, W. G. Kim, K. D. Woo, *The study on characteristics of heat treatment of the direct squeeze cast 7075 wrought Al alloy*, Materials Science and Engineering A, Vol. 304-306, pp 721-726, 2001.
۱۵. م. هامانی، بررسی اعمال فشار حین انجماد بر ساختار و خواص پیستون از جنس آلیاژ LM13، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۳.
۱۶. ر. عشیری، ف. کریم زاده و ب. نیرومند، بررسی رفتار تریبولوژیکی آلیاژ LM13، سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت ۱۳۸۵.
۱۷. عشیری، ر.، ب. نیرومند و ف. کریم زاده، تاثیر عملیات حرارتی آلیاژ LM13 در حالت ریخته گری کوبشی و ثقلی و بررسی اثر آن بر ریز ساختار، خواص مکانیکی و الکتریکی، سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت ۱۳۸۵.
18. J. Lee, H. Kim, S. Hong, C. Won, S. Cho, B. Chun, *Effect of die geometry on the microstructure of indirect squeeze cast and gravity die cast 5083 wrought Al alloy and numerical analysis of the cooling behavior*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 96, pp. 188-197, 1999.
19. J. Lee, H. Kim, C. Won, B. Cantor, *Effect of the gap distance on the cooling behavior and the microstructure of indirect squeeze cast and gravity die cast 5083 wrought Al alloy*, Materials Science and Engineering, Vol. A338, pp. 182-190, 2002.
20. A. Maleki, B. Niroumand, A. Shafyei, *Effects of squeeze casting parameters on density, macrostructure and hardness of LM13 alloy*, Materials

- Science and Engineering A 428, pp. 135–140, 2006.
21. M. Flemings, *Solidification processing*, McGraw-Hill, New York, 1974.
 22. M. Abou El-khair, *Microstructure characterization and tensile properties of squeeze-cast AlSiMg alloys*, Materials Letters, Vol. 59, pp. 894–900, 2005.
 23. S. W. Kim, D. Y. Kim, W. G. Kim, K. D. Woo, *The study on characteristics of heat treatment of the direct squeeze cast 7075 wrought Al alloy*, Materials Science and Engineering A, Vol. A304–306, pp. 721–726, 2001.

۲۴. م. صالحی و ف. اشرفی زاده، متالورژی سطح

و تریبولوژی، انجمن علوم و تکنولوژی سطح

ایران، ۱۳۷۴.