

اثر تغییر فرآیند تولید و عملیات حرارتی بر ریزساختار، خواص و رفتار روغنکاری سمبه^۱ از جنس همبسته^۲ LM13

روح‌الله عشیری*

دانشجوی کارشناسی‌ارشد دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف
Ro_ashiri@yahoo.com

بهزاد نیرومند

استادیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

فتح‌الله کریم‌زاده

استادیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

* نویسنده مسئول

پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۸۷/۰۸/۱۴

چکیده

ضریب انبساط حرارتی کوچک، سیال‌بودن روان، مقاومت به پارگی گرم و خواص روغنکاری مطلوب همبسته^۲ LM13 سبب شده که این همبسته به طور وسیعی برای تولید سمبه به کار رود. تغییر فرآیند تولید و عملیات حرارتی بهینه از عوامل مؤثر در بهبود خواص سمبه‌های تولیدی است. در این پژوهش سعی شده که اثر تغییر فرآیند تولید قطعه از ریخته‌گری ثقلی به ریخته‌گری کوبشی و عملیات حرارتی مناسب بر ریزساختار، خواص و رفتار روغنکاری همبسته^۲ LM13 بررسی و مقایسه شود. پس از تهیه نمونه‌ها که از لحاظ شکل و ابعاد، نزدیک به سمبه^۲ خودرو پژو ۲۰۶ طراحی شدند و اندازه‌گیری چگالی^۳ نمونه‌ها و بررسی خواص ریختگی، عملیات حرارتی بهینه، تعیین و بر روی نمونه‌ها اعمال گردید و رفتار سایشی این همبسته، در دو حالت کوبشی و ثقلی در شرایط لغزشی خشک، بررسی و مقایسه شد.

نتایج ارزیابی سختی و کشش نشان داد که خواص مکانیکی نمونه‌های کوبشی بمراتب بهتر از نمونه‌های ثقلی است. نمونه کوبشی دارای چگالی بیشتری است و در زمان‌ها و دماهای پیرسازی کمتری به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد. در نمونه‌های کوبشی میزان SDAS کمتر است و ذرات فاز دوم در این نمونه‌ها شکل و توزیع بهتری دارند. 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 که نمونه کوبشی، رفتار روغنکاری بهتری دارد. خواص مکانیکی مطلوب‌تر و رفتار روغنکاری بهتر سمبه‌های کوبشی، ضریب اطمینان کاری این نوع را نسبت به سمبه‌های ثقلی که هم‌اکنون در کشور تولید می‌شوند، تقویت می‌کند و از طرف دیگر با توجه به ضریب اصطکاک کمتر و کیفیت سطحی بهتر نمونه‌های کوبشی، تلفات مکانیکی (اصطکاک مضر) در این نمونه، نسبت به نمونه‌های ثقلی بسیار کمتر است و سبب کاهش میزان مصرف سوخت خودرو می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: همبسته^۲ LM13، ریخته‌گری کوبشی، ریخته‌گری ثقلی، سمبه، عملیات حرارتی بهینه، سایش، ضریب اصطکاک، مصرف سوخت

۱ - مقدمه

ضریب انبساط حرارتی کوچک، ضریب انتقال حرارت بزرگ، استحکام در دمای گرم، مقاومت به پارگی گرم و خواص روغنکاری مطلوب، به طور وسیعی برای تولید سمبه به کار می‌روند [۳ و ۲].

فلزات و همبسته‌های سبک نظیر همبسته‌های آلومینیوم به علت داشتن خواص منحصر به فردی چون نسبت استحکام به وزن بزرگ، شکل‌پذیری عالی، مقاومت زیاد در برابر خوردگی، قابلیت ریخته‌گری خوب، قابلیت بازیابی آسان و جوشکاری آسان، کاربردهای فراوان و روزافزونی در صنایع بزرگی چون خودروسازی و هوافضا پیدا کرده‌اند [۲ و ۱]. همبسته‌های آلومینیوم - سیلیسیم، خصوصاً LM13 علاوه بر خواص یادشده به دلیل

1- Piston

3- Density

2- Alloy

[۷، ۶] استفاده از نانوتریبولوژی^۶ [۸]، عملیات حرارتی مناسب قطعه [۹، ۱۰] و تغییر فرایند تولید قطعه به نحوی که خواص مکانیکی بهتری پدید می‌آید، [۷] اشاره کرد. در این پژوهش سعی شده که اثر تغییر فرایند تولید قطعه از ریخته‌گری کوبشی به ریخته‌گری تکی و عملیات حرارتی مناسب بر رفتار روغنکاری همبسته LM13 بررسی شود.

۲- روش پژوهش

۲-۱- شکل نمونه ریختگی و تجزیه و تحلیل شیمیایی همبسته ریختگی

در این پژوهش سعی شد که نمونه‌های مورد مطالعه از لحاظ شکل و ابعاد نزدیک به سمبۀ خودرو پژو ۲۰۶ باشند که شکل (۱) نمونه واقعی ریخته‌شده را نشان می‌دهد. برای تهیه سمبه باید محور سمبه را که در طراحی‌های نمونه‌ها به علت سادگی حذف شده بود، در نظر گرفت.

برای این پژوهش از همبسته LM13 استفاده شد که تجزیه و تحلیل شیمیایی همبسته مصرفی در جدول (۱) آمده است.

۲-۲- شرایط تهیه نمونه‌ها

برای تولید همه نمونه‌ها از دمای ذوب‌ریزی ۶۸۰°C و دمای پیش‌گرم قالب ۲۵۰°C استفاده شد. برای تهیه تمامی نمونه‌های کوبشی از فشار اعمالی 83 MPa استفاده شد.

۲-۳- اندازه‌گیری چگالی و میزان تخلخل

برای اندازه‌گیری چگالی از روش غوطه‌ور کردن نمونه‌ها در آب استفاده شد (طبق معادله (۱)). این آزمایش قبل از عملیات حرارتی صورت گرفت تا تغییرات احتمالی حجم فازهای همبسته و تغییرات احتمالی حجم حفره‌های گازی نمونه‌ها که در حین عملیات حرارتی ممکن است رخ دهد، بر روی چگالی تأثیر نگذارد.

$$\rho = \frac{W_p \rho_w}{(W - W')} \quad (1)$$

که در این معادله، ρ چگالی نمونه، ρ_w چگالی سیال (آب)، W وزن نمونه در حالت خشک و W' وزن نمونه در حالت غوطه‌وری است. درصد تخلخل نمونه‌ها با استفاده از معادله (۲) محاسبه شد که در آن ρ_T چگالی قطعه بدون تخلخل و ρ_0 چگالی قطعه تولیدی است.

$$\%porosity = \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_T} \quad (2)$$

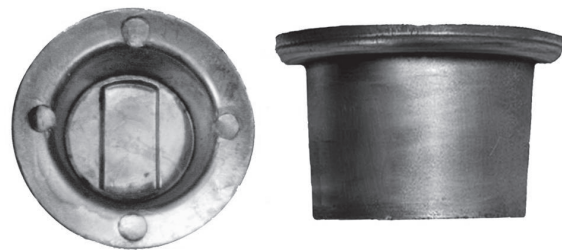
۲-۴- عملیات حرارتی نمونه‌ها

همبسته LM13 به علت داشتن مقداری مس و منیزیم در ترکیب خود، قابلیت عملیات حرارتی رسوب سختی را دارد. پس از تولید، از حلقه بالای نمونه‌ها برای آزمایش عملیات حرارتی استفاده گردید. برای عملیات حرارتی نمونه‌ها از کوره موفلی^۷ استفاده شد که آهنگ گرم شدن از دمای محیط برای تمام نمونه‌ها آهنگ متوسط ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه انتخاب شد. برای تابیدگی همه نمونه‌ها پس از خروج از کوره از آب با دمای ۶۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد استفاده گردید. برای آنیل انحلالی، همه نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت

در ریخته‌گری کوبشی^۱ پس از ریختن مذاب در محفظه قالب، مذاب تحت فشار (پانچ)، منجمد می‌گردد. اعمال فشار بر مذاب، سبب افزایش سرعت سردکردن و اصلاح‌سازی حرارتی می‌شود. روش ریخته‌گری کوبشی یکی از روش‌هایی است که اخیراً برای تولید قطعات با خواص عالی و نزدیک به شکل نهایی^۲ بشدت مورد توجه قرار گرفته و علاوه بر آن یکی از بهترین روش‌ها برای تولید مواد مرکب با زمینه فلزی^۳ است. مهمترین ویژگی‌های مثبت این روش، رفع یا کاهش تخلخل‌های انقباضی یا گازی، تولید قطعه نزدیک به شکل نهایی، خواص مکانیکی خوب، نزدیک به قطعه کار شده، سرعت تولید، افزایش بازده تولید از طریق حذف راهگاه و تغذیه، دقت ابعادی عالی و قابلیت استفاده برای فلزاتی که قابلیت ریخته‌گری خوب (سیال‌بودن خوب) ندارند، است [۴ و ۵].

با تولید انبوه، علاوه بر خواص ذکر شده، سرعت تولید، افزایش پیدا می‌کند و قیمت تمام‌شده قطعه، کاهش. این مزیت‌ها سبب شده که این روش ریخته‌گری نظر بسیاری از پژوهشگران را به سوی خود جلب کند.

اهمیت بررسی و پژوهش در زمینه روغنکاری و سایش از دو جنبه، بسیار مهم‌تر از جنبه‌های دیگرست، یک جنبه، کاهش مصرف سوخت و دیگری جلوگیری از تخریب قطعات است. دید کمی به این قضیه نشان می‌دهد که هزینه مستقیم خسارت‌هایی که از این طریق متوجه هر کشوری می‌شود، حدود ۱ تا ۴ درصد درآمد ناخالص ملی^۴ است [۳]. تحقیقات نشان داده که هر ۱۰ درصد کاهش اصطکاک مضر معادل ۱/۵ درصد صرفه‌جویی در میزان سوخت است. این موضوع اهمیت مضاعف نیز پیدا می‌کند زیرا با کاهش مصرف سوخت میزان آلودگی نیز کاهش می‌یابد [۶]. مثال مناسب در این زمینه، آمریکاست. تنها در این کشور، با کاهش اصطکاک مضر بین قطعات درگیر و بهبود شرایط روغنکاری در اجزای موتور خودروها و قطارها می‌توان سالانه ۱۲۰ میلیارد دلار صرفه‌جویی کرد [۶]. علت این امر را می‌توان به این صورت شرح داد که ۱۵ درصد انرژی سوخت صرف اصطکاک غیرضروری در بین قطعات درگیر در موتور یا تلفات مکانیکی موتور احتراقی می‌شود [۷ و ۶]. از بین قطعات موتور، سمبه یکی از مهم‌ترین قطعاتی است که ۴۵ درصد از تلفات مکانیکی موتور احتراقی در اثر اصطکاک آن رخ می‌دهد. این امر سبب شده که رفتار روغنکاری سمبه مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد.



شکل ۱ - نمونه تولیدی در این پژوهش

بهبود وضع روغنکاری در موتور، مزایای فراوانی دارد که مهم‌ترین آن‌ها کاهش مصرف روغن موتور، کاهش آلودگی هوا، افزایش عمر موتور، ضریب اطمینان بزرگتر موتور و افزایش بازه زمانی برای تعمیر و نگهداری موتور است [۶]. چون صنعت خودرو یکی از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین صنایع است با کوچک‌ترین بهبود در وضع روغنکاری، بخش چشمگیری از هزینه‌ها و میزان سوخت صرفه‌جویی می‌شود.

عوامل متعددی می‌توانند در بهبود شرایط روغنکاری موتور و اجزای آن، تأثیر داشته باشند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به استفاده از فلزات و همبسته‌های سبک، نظیر همبسته‌های منیزیم و آلومینیوم و مواد مرکب آن‌ها به جای فلزات و همبسته‌های سنگین در اجزای موتور، استفاده از مواد روانکار^۵ مرغوب، بهبود کیفیت سطحی قطعات درگیر، انجام عملیات سطحی و استفاده از پوشش‌های مناسب، شبیه‌سازی رفتار سایشی

- | | |
|----------------------------------|-------------------|
| 1- Squeeze casting | 5- Lubricant |
| 2- Near net shape | 6- Nanotribology |
| 3- Metal Matrix Composites (MMC) | 7- Muffle furnace |
| 4- Gross national product | |

جدول ۱- تجزيه و تحليل شيميايي همبسته LM۱۳ مورد استفاده

Element	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Sn
Percentage	Bulk	11.5	1	1.1	0.4	1.2	1.5	0.5	0.2	0.1

در دماي ۵۲۵°C حرارت داده شدند. براي عمليات رسوب سختي مصنوعي^۱ دماي °C ASTM-E112 استفاده شد.

۲-۶- ارزيابي خواص مكانيكي

براي ارزيابي سختي نمونه‌ها از روش سختي سنجي برنيل با فرورونده كروي با قطر ۲/۵ ميلي متر و نيروي 62/5 KN استفاده شد و نمونه‌هاي آزمايش كشي مطابق استاندارد ASTM-B557M-94 تهيه شدند. سرعت حركت فك‌هاي دستگاه كشي، min1/mm بود.

۲-۷- روش آزمايش سايش و بررسي‌هاي SEM

پس از توليد، نمونه‌ها از كف تحت برشكاري قرار گرفتند. تعدادي قرص نمونه به قطر ۵۰ mm و ضخامت ۵ mm تهيه شد و پس از آن نمونه‌ها تحت عمليات حرارتي بهينه قرار گرفتند. سطح همه نمونه‌هاي آزمايش قبل از آزمايش تا سنباده با شماره ۴۰۰۰ سنباده زده، صيقلی شدند. نمونه و خار (بين) آزمايش قبل از هر آزمايش با استون شست‌وشو و خشك مي‌شدند.

براي آزمايش سايش از شرايط تمام لغزشي خشك و بدون ماده روانكار در جو معمولي استفاده گرديد (روش سايش تحت شرايط لغزشي خشك^۲). براي سطح مقابل سايش از يك خار فولادي كه از جنس فولاد بلبرينگ ۵۲۱۰۰ در حالت عمليات حرارتي شده، استفاده شد كه نوک خار به صورت نيم كره به قطر ۵ mm بود كه در تماس با نمونه قرار داشت. سرعت خطي چرخش نمونه در همه نمونه‌ها با توجه به دور موتور و قطر شيار سايش ۷ cm/sec بود. در شكل ۲ و ۳ شكلي از طرز كار دستگاه سايش و نحوه انجام آزمايش آورده شده است.

يكي از راه‌هاي تجزيه و تحليل داده‌هاي آزمايش سايش علاوه بر کاهش وزن، بررسي سرعت سايش براي نمونه‌ها و مقايسه آن‌ها با يكدیگر است. سرعت سايش را مي‌توان با روابط مختلف و متنوع نشان داد. يكي از اين معادله‌ها سرعت کاهش حجم است كه در آن تغييرات حجم، ρ چگالي و t زمان لغزش است.

$$W(t) = \frac{\Delta w}{\rho t} \quad (3)$$

براي بررسي‌هاي سطوح و خرده‌هاي سايش و رفتار روغنكاري و تشخيص سازوكارهاي حاكم از ميكروسكوپ الكتروني روبشي (SEM) استفاده شد.

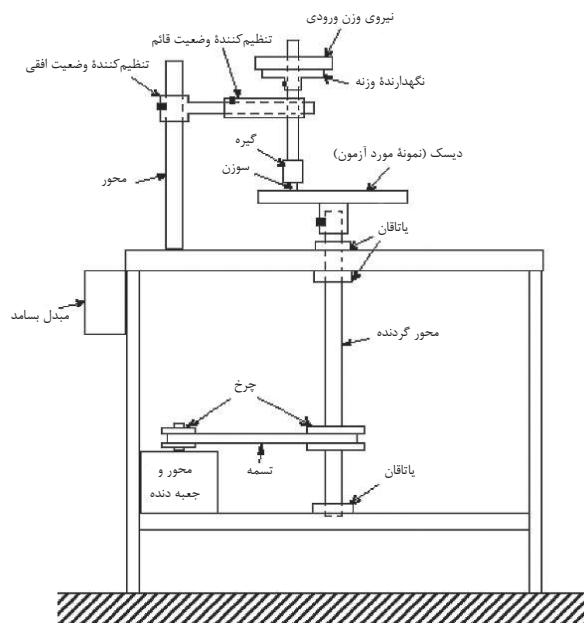
۳- نتايج و بحث

۳-۱- نتايج حالت ريختگي نمونه‌ها

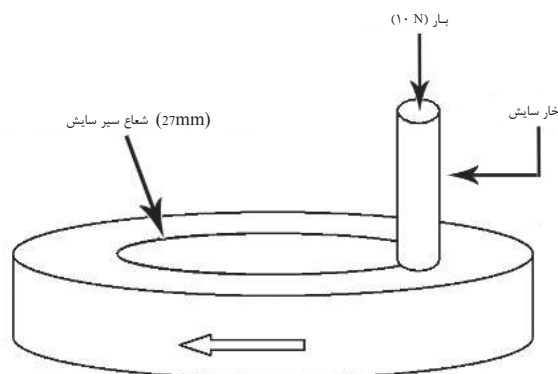
وجود پراكنده تخلخل‌هاي سطحي ريز و عيب فرورفتگي سطحي (شكل ۴) در نمونه ثقلی نشان مي‌دهد كه قطعات كوبيشي از لحاظ كيفيت سطحي بمراتب بهتر است.

كيفيت عالي سطحي نمونه‌هاي كوبيشي در مقايسه با نمونه‌هاي ثقلی را مي‌توان به اين ترتيب شرح داد كه اعمال فشار در حین انجماد سبب مي‌شود كه مذاب در حین انجماد در تماس دايم با قالب قرار گيرد و بسته به كيفيت سطحي قالب، كيفيت مطلوب را پيدا كند. در نمونه‌هاي ثقلی، سطح نمونه داراي تخلخل‌هاي ريز و پراكنده است؛ ولي با توجه

- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1- Artificial aging | 4- Liner intercept method |
| 2- Image Analysis | 5- Wear under dry sliding condition |
| 3- Secondary Dendrite Arm Spacing (SDAS) | 6- Counter face |



شكل ۲ - طرز كار دستگاه سايش مورد استفاده در اين پژوهش [۳]



شكل ۳ - شكلي از نحوه آزمايش سايش [۱۰]

۲۵۰ انتخاب شد.

۲-۵- بررسي‌هاي كمي و كيفي ريزساختاري

براي بررسي‌هاي ريزساختاري، اندازه‌گيري بازوهاي دندريتي، شكل و توزيع فاز دوم آزمايش‌هاي فلزنكاري (متالوگرافي) بر روي همه نمونه‌ها انجام شد. ابتدا سطح نمونه‌ها با سنباده ۴۰۰۰ سنباده زده شد و سپس با استفاده از گرد آلومينا با دانه‌بندی ۳ ميكرون صيقلی شد و با استفاده از محلول اچ ميكروسكوپی استاندارد آلومينيوم اچ گرديد، براي بررسي‌هاي كمي ريزساختاري از نرم‌افزار تجزيه و تحليل تصويري^۲ Image Tool استفاده شد. براي اندازه‌گيري فاصله بين بازوهاي دندريتي ثانويه^۳ كه معياري براي خواص مكانيكي و سرعت سردشدن است از روش تقاطع خطی^۴ مطابق استاندارد

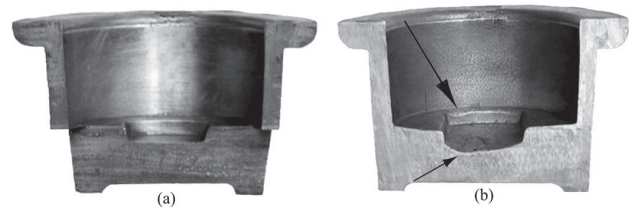
به این که در هر دو نمونه از یک قالب برای ریخته‌گری استفاده شد، در نمونه کوبشی این تخلخل‌ها وجود ندارند. اعمال فشار سبب می‌شود گازها بین مذاب و دیواره قالب محبوس نشوند. از طرفی اگر مذاب در بعضی جاها دیواره قالب را بخوبی تر نکند؛ با اعمال فشار این ترکندگی قالب بخوبی رخ می‌دهد و یک سطح نهایی مطلوب به دست می‌آید. در مورد وجود تخلخل‌ها و فرورفتگی سطحی در نمونه‌های ثقلی در مقایسه با نمونه‌های کوبشی، می‌توان گفت با اعمال فشار در نمونه‌های کوبشی سازوکارهای مختلف تغذیه فعال شده [۱۱]، باعث کاهش حفره‌های انقباضی می‌شوند و چون این همبسته، انجماد خمیری دارد یا به عبارت دیگر انجماد آن در یک محدوده دمایی رخ می‌دهد؛ اعمال فشار اثر مضاعف پیدا می‌کند؛ زیرا که در مقیاس کلان (ماکروسکوپی)، مذاب را به محلی که انقباض دارد، هدایت می‌کند. از طرف دیگر در مقیاس خرد (میکروسکوپی) از تشکیل تخلخل‌های ریز در حین انجماد دندریتی جلوگیری می‌کند. اعمال فشار سبب افزایش میزان انحلال گازها در مذاب می‌شود؛ یعنی گازهایی که در ساختار باقی می‌مانند و تبدیل به عیوب ریخته‌گری می‌شوند، با اعمال فشار در مذاب حل می‌شوند و دیگر آن اثر مخرب را ندارند. اعمال فشار پایداری حباب‌هایی را که در ساختار باقی مانده، تبدیل به تخلخل گازی می‌شوند، از بین می‌برد [۱۲]. تمامی مواردی که بحث شد، سبب می‌شود که میزان تخلخل‌های گازی و انقباضی کاهش یابد. عدم تخلخل‌ها در سطح قطعه، کیفیت مطلوب سطحی را به همراه دارد و عدم این عیوب در داخل قطعه، سبب افزایش چگالی می‌شود. عدم تخلخل در نمونه کوبشی و یا حتی کاهش آن می‌تواند اثر چشمگیری بر خواص مکانیکی قطعه داشته باشد.

در جدول ۲ خواص نمونه‌های ثقلی و کوبشی در حالت ریختگی آورده شده و در شکل های ۵ و ۶ ریزساختارهای این نمونه‌ها و شکل و نحوه توزیع ذرات سیلیسیم (ذرات فاز یوتکتیک) مقایسه شده است.

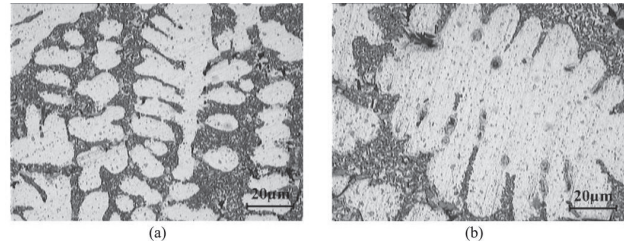
با کاهش تخلخل در نمونه‌های کوبشی، چگالی این نمونه نسبت به نمونه‌های ثقلی افزایش بیشتری پیدا می‌کند. ملاحظه می‌شود که نمونه‌های کوبشی ساختار ریزتر دارند، شکل ذرات فاز دوم در نمونه کوبشی کروی‌تر یا اصلاح شده‌تر هستند؛ ولی در نمونه ثقلی تا حدودی حالت تیغه‌ای دارند. همچنین سختی در نمونه‌های کوبشی بیشتر است. باید گفت اعمال فشار در حین انجماد باعث می‌شود که فاصله هوایی بین فلز و قالب پس از تشکیل اولین لایه جامد کاهش یابد و یا حتی حذف شود [۱۱]. این امر سبب می‌شود که انتقال حرارت بین فلز و قالب بشدت افزایش یابد. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های روش کوبشی همین موضوع است؛ زیرا با افزایش سرعت سرد شدن در اثر افزایش انتقال حرارت [۱۳] میزان فواصل بین بازوهای دندریتی کاهش می‌یابد [۱۴] که کاهش اثر چشمگیری بر خواص مکانیکی قطعه دارد. همچنین اعمال فشار باعث اصلاح‌سازی حرارتی (کاهش مقدار نسبت (a/b) معرف اصلاح‌سازی بهتر ذرات فاز دوم است). ساختار می‌شود و سبب می‌شود که ساختار تیغه‌ای ذرات سیلیسیم در نمونه ثقلی به سمت ساختار کروی ذرات در نمونه کوبشی برود که این امر سبب بهبود چقرمگی قطعه می‌شود و قطعه می‌تواند نیروهای ضربه‌ای بزرگ را تحمل نماید [۱۵]. در جمع‌بندی می‌توان گفت که اعمال فشار در حین انجماد سبب می‌شود که ساختار ریز هم‌محور و اصلاح‌شده در نمونه‌های کوبشی پدید آید که میزان میانگین $SDAS$ و نسبت طول به عرض ذرات سیلیسیم (نسبت (a/b)) برای حالت کوبشی کمتر از نمونه‌های ثقلی شود که این موضوع خود تاییدکننده خواص مکانیکی بهتر نمونه‌های ریخته‌گری کوبشی شده است [۱۶].

۳-۲- نتایج عملیات حرارتی نمونه‌ها

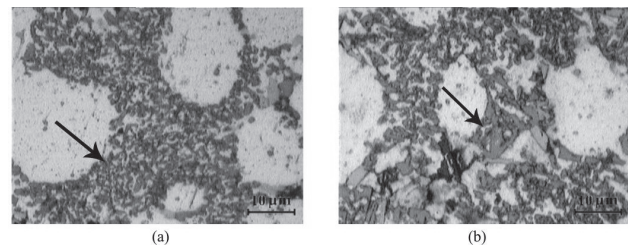
نتایج حاصل از اعمال عملیات آنیل انحلالی بر روی سختی نمونه‌ها در جدول (۳) و نحوه توزیع ذرات سیلیسیم (ذرات فاز یوتکتیک) این نمونه‌ها در شکل (۷) آورده شده است.



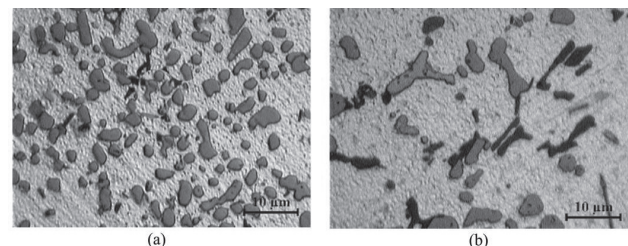
شکل ۴ - مقایسه کیفی سمبه‌های تولیدی در دو حالت: (a) کوبشی، (b) ثقلی از نظر وجود عیب فرورفتگی سطحی



شکل ۵ - مقایسه ریزساختار ریختگی نمونه‌های (a) کوبشی و (b) ثقلی



شکل ۶ - مقایسه شکل و نحوه توزیع ذرات سیلیسیم (ذرات فاز یوتکتیک) در نمونه‌های ریختگی: (a) کوبشی و (b) ثقلی



شکل ۷ - مقایسه شکل و نحوه توزیع ذرات سیلیسیم در نمونه: (a) کوبشی و (b) ثقلی بعد از آنیل انحلالی

جدول ۲- مقایسه خواص نمونه‌های کوبشی (Squeeze) و ثقلی (Gravity) در حالت ریختگی

Quantity	Squeeze	Gravity
Density(gr/cm^3)	2.7	2.68
% Porosity	0	0.75
Hardness(HBN)	126	109
SDAS(m_{μ})	15	23
(a/b)	1.4	2.3

جدول ۳- مقایسه خواص نمونه‌های کوبشی و ثقلی بعد از آنیل انحلالی

Quantity	Squeeze	Gravity
Hardness(HBN)	84	82
SDAS(m_{μ})	19	33
(a/b)	1.3	1.8

پس از آنیل انحلالی، ساختار درشت‌تری حاصل می‌شود و ساختارهای تیغه‌ای ذرات فاز دوم در نمونه‌های ثقلی تا حدودی از بین می‌رود که با درشت‌شدن ساختار خواص مکانیکی کلیه نمونه‌ها در این حالت بشدت افت می‌نماید. دمای گرم عملیات حرارتی انحلالی سبب می‌شود که شرایط نفوذی بسیار خوبی فراهم شود؛ از این رو انتظار می‌رود که پس از عملیات انحلالی ساختار درشت‌تر نسبت به حالت ریختگی حاصل گردد. از طرفی رسوبات فاز دوم در نتیجه فراهم‌شدن شرایط نفوذی مناسب بتدریج از ساختارهای تیغه‌ای به سمت ساختارهای کروی می‌روند؛ زیرا که نفوذ از نوک تیغه به سمت مرکز تیغه هم‌زمان با نفوذ و حل‌شدن ذرات در زمینه، رخ می‌دهد که با افزایش زمان آنیل انحلالی تیغه‌ها از مکان‌های نازک خود به دو یا چند قسمت تقسیم می‌شوند و به این ترتیب با افزایش زمان آنیل انحلالی، ذرات فاز دوم کروی‌تر و بتدریج درشت‌تر می‌گردند [۱۵]. البته میزان کروی‌شدن ذرات فاز دوم برای نمونه کوبشی بمراتب بیشتر از نمونه ثقلی است که این واقعیت نیز به غیرتصادفی‌تر بودن انجماد نمونه‌های کوبشی برمی‌گردد که سبب می‌شود در شرایط یکسان دما و زمان، سرعت نفوذ در این نمونه‌ها بیشتر باشد.

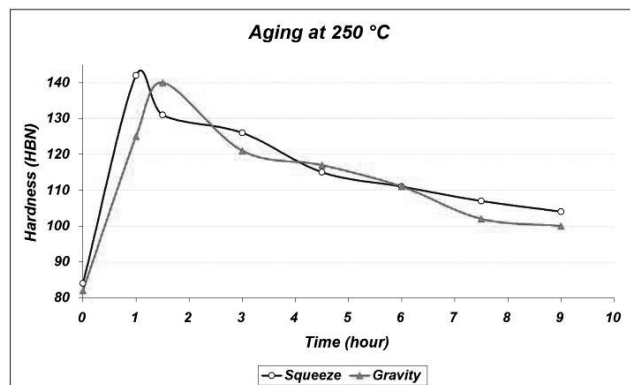
نتایج رسوب سختی در دمای 250°C درجه سانی‌گراد در نمودار شکل ۸ آورده شده است. مشاهده می‌شود که نمونه کوبشی در مدت یک ساعت به بیشترین سختی خود رسیده، در حالی که نمونه ثقلی در زمان $1/5$ ساعت به سختی بیشینه رسیده است. بررسی‌های رسوب سختی در دمای 235°C نشان داد که نمونه کوبشی در $1/5$ ساعت به استحکام بیشینه می‌رسد.

در رسوب سختی نمونه‌ها مشاهده شد که در نمونه کوبشی رسیدن به استحکام بیشینه و تشکیل رسوبات مناسب نسبت به نمونه ثقلی در شرایط یکسانی دمایی در زمان کمتری رخ می‌دهد. این امر را می‌توان به این ترتیب تشریح کرد که در نمونه‌های کوبشی به علت اعمال فشار در حین انجماد حالت غیرتصادفی‌تری نسبت به نمونه‌های ثقلی از لحاظ شرایط سردشدن وجود دارد. این امر سبب می‌شود تمایل بیشتری در این حالت برای رسیدن به حالت تعادلی و کاهش انرژی اضافی مجموعه وجود داشته و در نتیجه مانع انرژی کمتری بر سر راه تشکیل رسوبات وجود داشته باشد و رسوبات در زمان کوتاه‌تر و دماهای خنک‌تری نسبت به حالت ثقلی در ساختار تشکیل شوند که این روند در نمودارهای سختی بر حسب زمان به این صورت دیده می‌شود که برای این نمونه‌ها سختی بیشینه به سمت زمان‌های کوتاه‌تر و دماهای خنک‌تر می‌رود [۱۵].

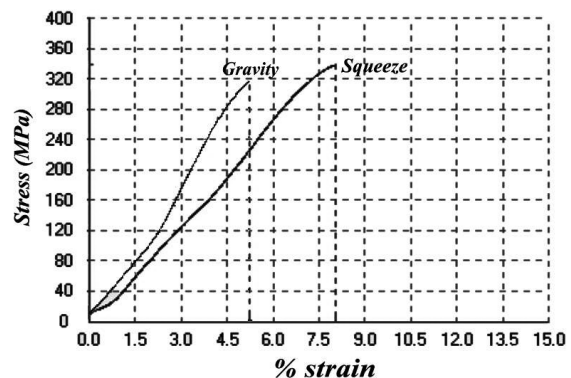
در نمونه‌های کوبشی مشاهده شد که سختی بیشینه تقریباً با حداکثر سختی نمونه‌های ثقلی برابرست. این امر به مدت زمان کوتاه عملیات آنیل انحلالی بر می‌گردد. هر چه ساختار تک‌فاز همگن‌تر باشد؛ یعنی در زمان‌های بیشتری آنیل شود، میزان رسوبات تشکیل شده در مرحله پیرسازی بیشترند و ریزتر و در کل ساختار به طور یکنواخت پراکنده می‌شوند که این امر، بشدت سختی را افزایش می‌دهد [۱۵]. چون در نمونه کوبشی سد انرژی کمتری برای تشکیل رسوبات وجود دارد، در صورتی که در زمان طولانی‌تری آنیل شود، این اختلاف سختی نسبت به نمونه ثقلی بیشتر می‌گردد. و چون هدف این پژوهش تولید محصول است، از زمان‌های آنیل طولانی به دلیل غیرمهندسی بودن اجتناب شد.

همان‌طوری که در جدول ۴ و شکل ۹ آورده شده، بررسی و مقایسه خواص مکانیکی نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی نشان داد نمونه کوبشی استحکام شکست، سختی و چقرمگی بیشتری نسبت به نمونه ثقلی دارد و شکست نمونه کوبشی در کرنش‌های بزرگ‌تری صورت می‌گیرد. در توجیه این مطلب علاوه بر موارد یادشده باید گفت که در نمونه‌های کوبشی تشکیل رسوبات بیشتر، ریزتر، با توزیع همگن در کل ساختار پس از عملیات رسوب سختی، سبب بهبود خواص مکانیکی می‌شود.

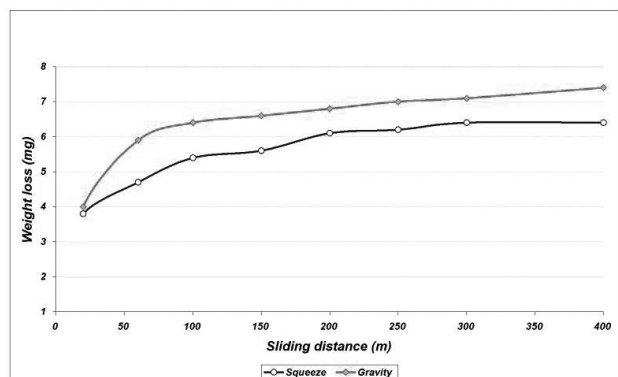
۳-۳- نتایج بررسی‌های سایش



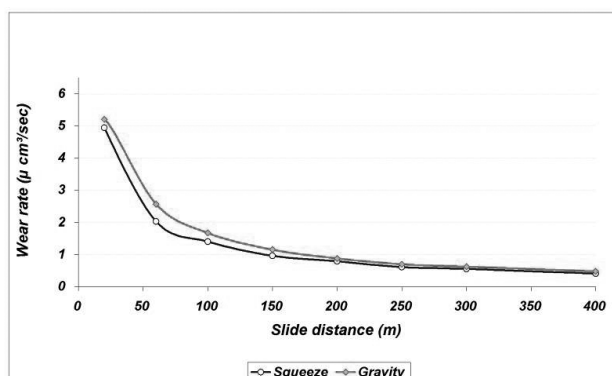
شکل ۸ - مقایسه نمودار عملیات رسوب سختی نمونه کوبشی و نمونه ثقلی در دمای 250°C



شکل ۹ - مقایسه منحنی تنش - کرنش نمونه‌های کوبشی (Squeeze) و ثقلی (Gravity)



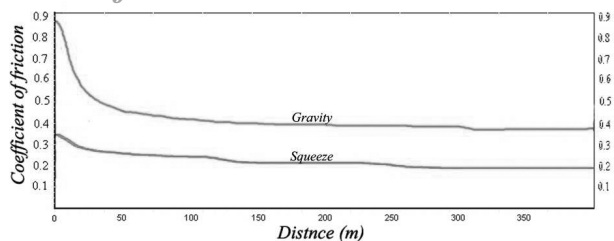
شکل ۱۰ - مقایسه آزمایش کاهش وزن نمونه‌های کوبشی و ثقلی



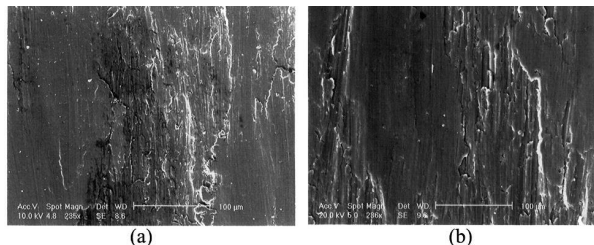
شکل ۱۱ - مقایسه سرعت سایش نمونه‌های ثقلی و کوبشی

جدول ۴ - مقایسه خواص نمونه‌های کوبشی و ثقلی بعد از عملیات حرارتی

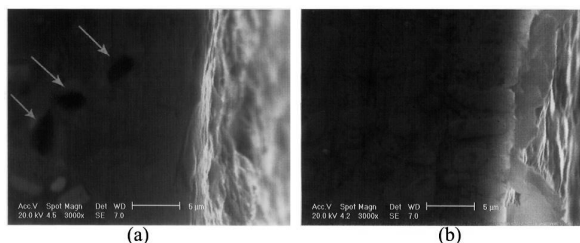
Quantity	Squeeze	Gravity
Hardness(HBN)	142	140
Strength(MPa)	340	310



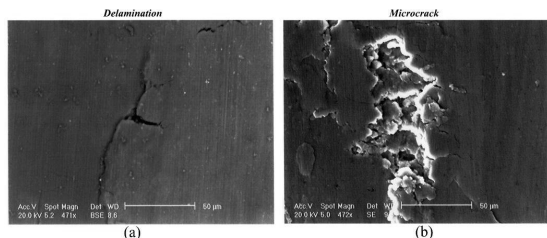
شکل ۱۲ - بررسی تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش برای نمونه‌های کوبشی و ثقلی



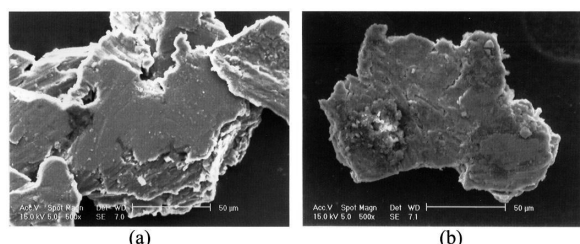
شکل ۱۳ - مقایسه تصویر SEM سطوح سایش برای نمونه: (a) کوبشی و (b) ثقلی در بزرگ‌نمایی ۲۳۶ برابر



شکل ۱۴ - مقایسه تصویر SEM سطح مقطع سایش برای نمونه: (a) کوبشی و (b) ثقلی در بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر



شکل ۱۵ - تصویر SEM از تورق در نمونه (a) کوبشی و میکرو ترک در نمونه (b) ثقلی در بزرگ‌نمایی ۴۷۲ برابر



شکل ۱۶ - مقایسه تصویر SEM خرده‌های سایش برای نمونه: (a) کوبشی و (b) ثقلی در بزرگ‌نمایی ۵۰۰ برابر

۱۵ که تورق را در نمونه کوبشی نشان می‌دهد و دیگری شکل ۱۶ که خرده‌های ورقه‌ای شکل را برای این نمونه نشان می‌دهد.

اعمال فشار در حین انجام سبب می‌شود که در نمونه کوبشی در مقایسه با نمونه ثقلی در حین عملیات رسوب سختی، مقدار بسیار بیشتری رسوب ریزتر با توزیع همگن تر

در شکل ۱۰ 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 ۱۱) هر دو نمونه نیز در ابتدا زیاد است و با افزایش مسافت و زمان لغزش کاهش می‌یابد و در پایان تقریباً ثابت می‌شود که نمونه کوبشی سرعت کاهش وزن کمتری دارد. در مورد ضریب اصطکاک می‌توان گفت (شکل ۱۲) که در ابتدای تماس خار با سطح نمونه، ضریب اصطکاک بزرگ است و بتدریج 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. علت این امر را به این صورت می‌توان شرح داد که در ابتدای آزمایش سطح مقابل در تماس با لایه اکسیدی که بر روی آلومینیوم و کلیه همبسته‌های آن وجود دارد، قرار می‌گیرد و به علت ترد بودن این لایه و شکست آن، کاهش وزن، سرعت کاهش وزن و اصطکاک در ابتدا زیاد است و نیز خرده‌های ایجاد شده در ابتدا درشت است ولی با افزایش بیشتر مسافت و زمان لغزش سطح مقابل در تماس با خود همبسته 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 همه موارد نمونه کوبشی در شرایط مناسب‌تری قرار دارد که می‌توان گفت رفتار سایشی مطلوب‌تر نمونه‌های کوبشی به خواص مکانیکی بهتر این نمونه‌ها وابسته است. در مورد ضریب اصطکاک کوچک‌تر نمونه‌های کوبشی باید گفت که از یک طرف کیفیت سطحی بهتر این نمونه‌ها سبب کاهش ضریب اصطکاک می‌شود و وجود تخلخل‌های ریز سطحی پراکنده در نمونه ثقلی، سبب می‌شوند که به عنوان برآمدگی و فرورفتگی عمل نکند و در حالت اغراق‌آمیز سبب می‌شوند که سطح نمونه ثقلی، سطحی خشن به نظر برسد. وجود تخلخل‌های ریز زیرسطحی پراکنده در نمونه ثقلی سبب می‌شوند که با رسیدن خار به آن‌ها به عنوان چاله عمل کنند و حرکت خار را با مشکل مواجه نمایند.

در شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود که در هر دو نمونه کوبشی و ثقلی در سطح سایش، شیارهایی به موازات خط سایش وجود دارد که این واقعیت را نشان می‌دهد که در هر دو نمونه، یکی از سازوکارهای حاکم سایش، سازوکار سایش خراشان است. از طرفی برای هر دو نمونه، مشاهده شد که سطح مقابل سایش (پین) با افزایش وزن همراه است که بر این اساس می‌توان گفت که هر دو نمونه کوبشی و ثقلی یکی از سازوکارهای دیگر حاکم، سازوکار سایش چسبان است.

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 بزرگ خار این واقعیت غیر منتظره نیست. در حین لغزش خار، تنش اعمالی در این مواضع درگیر به شدت افزایش می‌یابد که سبب تغییر شکل خمیری و گسیختگی می‌شود. نرمی نسبی همبسته نسبت به خار سبب می‌شود که در حین اعمال نیرو و همچنین کندن خرده‌ها مقداری از همبسته به سطح مقابل منتقل شود.

تصویر سطح سایش نمونه کوبشی (شکل ۱۳) مکان‌هایی را نشان می‌دهد که ماده از سطح به صورت ورقه‌ای جدا شده، شکل ۱۴ وجود حفره در نمونه کوبشی در زیر سطح سایش را نشان می‌دهد که با به هم پیوستن این حفره‌ها خرده‌های سایش به صورت ورقه‌ای جدا می‌گردند. علاوه بر آن، تغییر شکل خمیری را برای این نمونه نشان می‌دهد. برای تایید آن چه درباره نمونه کوبشی گفته شد، دو شاهد دیگر وجود دارد: یکی شکل

۴- نتایج

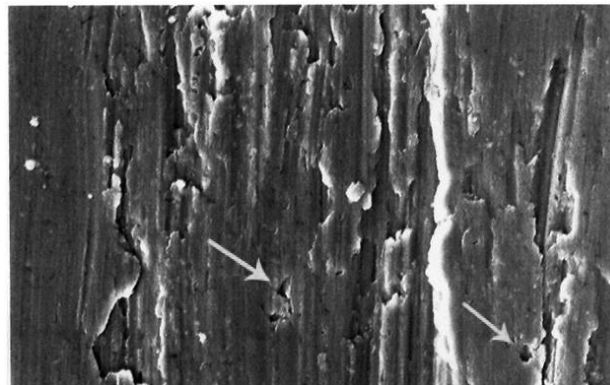
مهم‌ترین نتایجی که از این پژوهش حاصل شد، عبارتند از: قطعات کوبشی از لحاظ کیفیت سطحی به مراتب بهترند و وجود پراکنده تخریفات سطحی ریز و عیب فرورفتگی سطحی که در نمونه‌های ثقیلی مشاهده می‌شد، در این نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. این نکته، مزیت تولید قطعات نزدیک به شکل نهایی را با این روش تایید می‌کند. چگالی نمونه‌های کوبشی از نمونه‌های ثقیلی بیشتر است. نمونه‌های کوبشی نسبت به نمونه‌های ثقیلی چه در حالت ریختگی و چه در حالت عملیات حرارتی شده، خواص مکانیکی بهتر و ساختار ریزتر و اصلاح‌شده‌تری دارند. میزان میانگین SDAS و نسبت طول به عرض ذرات سیلیسیم (نسبت (a/b)) نمونه‌های کوبشی کمتر از نمونه‌های ثقیلی است و ذرات فاز دوم در این نمونه‌ها شکل و توزیع بهتری دارند. ذرات فاز دوم در نمونه‌های ثقیلی حالت تیغه‌ای دارند؛ اما در نمونه‌های کوبشی به حالت کروی نزدیک‌ترند.

در مورد آزمایش‌های عملیات حرارتی، نمونه‌های کوبشی سریع‌تر از نمونه‌های ثقیلی به سختی بیشینه خود می‌رسند. به بیان دیگر، رسیدن به رسوبات بهینه و بیشینه سختی در این نمونه‌ها در دمای خنک‌تر و زمان‌های کوتاه‌تر متری به وقوع می‌پیوندد و اعمال فشار زمان رسیدن به بیشینه سختی را از ۱/۵ ساعت در نمونه‌های ثقیلی به یک ساعت در نمونه‌های کوبشی تقلیل می‌دهد.

بررسی‌های سایش نشان داد که با افزایش فاصله لغزش، میزان کاهش وزن افزایش ولی سرعت سایش کاهش می‌یابد. مشاهده شد که نمونه‌های کوبشی کاهش وزن، سرعت کاهش وزن و ضریب اصطکاک کمتری نسبت به نمونه‌های ثقیلی دارند که بر این اساس می‌توان گفت که نمونه کوبشی رفتار روغنی‌کاری بهتری نسبت به نمونه ثقیلی دارد.

بررسی سازوکار سایش نمونه‌ها نشان داد که سازوکارهای حاکم برای نمونه‌های کوبشی سایش خراشان، ورقه‌ای شدن و سایش چسبان و برای نمونه‌های ثقیلی سازوکارهای سایش خراشان، خستگی سطحی و سایش چسبان است.

پس از این پژوهش مشخص شد که نمونه‌های کوبشی خواص مکانیکی بهتر، کیفیت سطحی بهتر، خواص سایشی بهتر و عیوب کمتری دارند و به طور کلی خواص سمبه‌های تولیدشده به این روش از سمبه‌هایی که در حال حاضر در کشور به روش ریخته‌گری ثقیلی تولید می‌شوند، به مراتب بهتر و مطلوب‌ترند. در صورت تولید انبوه، با توجه به سرعت (سرعت تولید و همچنین زمان کوتاه‌تر مورد نیاز برای عملیات حرارتی) و بازده تولید بزرگ‌تر (عدم نیاز به تغذیه و راهگاه) و عملیات نهایی مورد نیاز کمتر برای نمونه‌های کوبشی، هزینه‌های تولید سمبه ریخته‌گری کوبشی شده از سمبه‌های ثقیلی کمتر می‌شود. با توجه به خواص مکانیکی و خواص سایشی بهتر سمبه‌های کوبشی ضریب اطمینان کاری این نوع بسیار بزرگ‌تر از سمبه‌های ثقیلی است و از طرف دیگر با توجه به ضریب اصطکاک کوچک‌تر نمونه‌های کوبشی، تلفات مکانیکی (اصطکاک مضر) در این نمونه نسبت به نمونه‌های ثقیلی بسیار کمتر است که سبب کاهش میزان مصرف سوخت خودرو می‌شود.



شکل ۱۷ - تصویر SEM سطح سایش برای نمونه‌های ثقیلی در بزرگ‌نمایی ۴۷۲ برابر

در ساختار ایجاد شود [۱۵]. با اعمال نیرو از طرف خار، سامانه‌های لغزش فعال شده، نابجایی‌هایی در زیر سطح شروع به حرکت نموده، با رسیدن به رسوبات متوقف می‌شود و اعمال نیروی بیشتر در اثر افزایش فاصله لغزش، سبب تجمع بیشتر نابجایی‌ها در پشت این رسوبات می‌شود و تنش اعمالی از طرف نابجایی‌های تجمع‌یافته به حدی می‌رسد که از استحکام زمینه فراتر می‌رود که با تغییر شکل خمیری و ایجاد حفره‌های زیر سطحی در اطراف رسوبات سخت، انرژی خود را تخلیه می‌کنند (شکل ۱۴). با افزایش فاصله لغزش این حفره‌ها از یک طرف بزرگ‌تر می‌شوند و از طرف دیگر حفره‌های جدیدتر ایجاد می‌شوند که با به هم پیوستن این حفره‌ها، ترک‌های موازی سطح ایجاد می‌شود که زمانی که طول ترک به حد بحرانی برسد، خرده ورقه‌ای از سطح جدا می‌شود.

در نمونه‌های ثقیلی همان‌طوری که در شکل ۱۷ نشان داده شده، در سطح سایش ترک‌های ریزی مشاهده می‌شود که بررسی لایه زیرین سطح سایش (شکل ۱۴) حاکی از عدم حفره و تغییر شکل خمیری است. شکل ۱۵ نیز وجود ریزترک‌هایی را برای نمونه ثقیلی نشان می‌دهد. شکل ۱۶ نیز وجود برآمدگی را در خرده‌های به دست آمده از آزمایش سایش نشان می‌دهد. از جمع‌بندی شواهد می‌توان گفت دیگر سازوکار حاکم در این نمونه‌ها، خستگی سطحی است. پیشتر اشاره شد که نمونه‌های ثقیلی به حداکثر چگالی خود نمی‌رسند و مقداری تخلخل ریز و پراکنده سطحی و زیرسطحی دارند. این تخلخل‌ها اثر خود را در اینجا نشان می‌دهند؛ زیرا عامل اساسی پدید آمدن خستگی سطحی در نمونه‌های ثقیلی، وجود همین تخلخل‌هاست. وجود تخلخل ریز و پراکنده سطحی و زیرسطحی سبب می‌شود که به عنوان جوائه ترک و در صورت بزرگ‌بودن به عنوان ترک، عمل کند (شکل ۱۵). در اثر تنش‌های متناوب لغزشی ترک‌های سطحی رشد می‌کنند و سبب جدا شدن خرده‌های سطحی می‌شوند و همچنین تخلخل‌های زیرسطحی با رشد به سطح می‌رسند و سبب جدا شدن ماده می‌شوند. باید توجه داشت که خستگی سطحی برای نمونه‌ها بسیار مضر است؛ زیرا وقوع آن وابسته به رشد ترک است، لذا ناگهانی و در تنش‌های ضعیف رخ می‌دهد و سبب تخریب قطعه می‌شود.

منابع

- 1- Cole, G., and Sherman, A. "Light Weight Materials for Automotive Applications", Materials Characterization, Vol. 35, (1995): 3-9.
- 2- Miller, W., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A., De Smet, P. Haszler, A., and Vieregge, A. "Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry", Materials Science and Engineering, Vol. A280, (2000): 37-49.
- 3- Yasmin, T., Khalid, A., and Haque, M. "Tribological (wear) Properties of Aluminum-Silicon Eutectic Base BIlloy under Dry Sliding Condition", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153-154, (2004): 833-838.
- 4- Ghomashchi, M., and Vikhrov, A. "Squeeze Casting: An Overview", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 101, (2000): 1-9.
- 5- Franklin, J., and Das, A. "Squeeze Casting - A Review of the Status",

- British Foundryman, Vol. 77, No.3, (1984): 150-158.
- 6- Tung, S., and McMillan, M. "Automotive Tribology Overview of Current Advances and Challenges for the Future", Tribology International, Vol. 37, (2004): 517-536.
- 7- Taylor, C. "Automobile Engine Tribology—Design Considerations for Efficiency and Durability", Wear, Vol. 221, (1998): 1-8.
- 8- Bhattacharya, V., and Chattopadhyay, K. "Microstructure and Wear Behaviour of Aluminium Alloys Containing Embedded Nanoscaled Lead Dispersoids", Acta Materialia, Vol. 52, (2004): 2293-2304.
- 9- Haque, M., and Sharif, A. "Study on Wear Properties of Aluminium-Silicon Piston Alloy", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 118, (2001): 69-73.
- 10- Sharma, R., Anesh, and Dwivedi, D. "Influence of Silicon (wt. %) and Heat Treatment on Abrasive Wear Behavior of Cast Al-Si-Mg Alloys", Materials Science and Engineering, Vol. A408, (2005): 274- 280.
- 11- Lee, J., Kim, H., Hong, S., Won, C., Cho, S., and Chun, B. "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, (1999): 188-197.
- 12- Flemings, M. Solidification Processing, New York: McGraw-Hill, 1974.
- 13- Lee, J., Kim, H., Won, C., and Cantor, B. "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, (2002): 182-190.
- 14- Kim, S., Kim, D., Kim, W., and Woo, K. "The Study on Characteristics of Heat Treatment of the Direct Squeeze Cast 7075 Wrought Al alloy", Materials Science and Engineering, Vol. A304-306, (2001): 721- 726.
- 15- Abou El-khair, M. "Microstructure Characterization and Tensile Properties of Squeeze-cast AlSiMg alloys", Materials Letters, Vol. 59, (2005): 894 - 900.
- 16- Haque, M., Maleque, M. "Effect of Process Variables on Structure and Properties of Aluminium-Silicon Piston Alloy", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 77, (1998): 122-128.
- 17- Gur, C., and Yildiz, I. "Non-Destructive Investigation on the Effect of Precipitation Hardening on Impact Toughness of 7020 Al-Zn-Mg Alloy", Materials Science and Engineering, Vol. A382, (2004): 395-400.