



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Effect of Squeeze Casting Parameters on Mechanical Properties and Wear Behavior of A356 Aluminium Alloy

Seyed Abbas Hassasi¹, Majid Abbasi^{2*}, Seyed Jamal Hosseinipour³

1. MSc student, in Materials Engineering, 2 &3. Associate Professor,
Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran.

Received: 17 July 2018
Accepted: 10 November 2018

Abstract:

In this study, effects of main squeeze casting parameters, including squeezing pressure, super-heat and the duration of pressure on the microstructure, mechanical properties and wear behavior of A356 aluminum alloy were investigated. For this purpose, the parameters were evaluated in three levels on the hardness, yield strength, ultimate tensile strength, elongation and weight loss were examined. Squeeze casting process was performed using 20 Ton hydraulic press equipped with a tool steel die having cylindrical cavity. Microstructural studies were evaluated by optical and electron microscopy. The wear test was performed by a pin on disk unit to 2000m wear distance at constant condition. The results showed that the squeezing pressure causes the alpha-aluminum dendrites and eutectic cells to be finer in the microstructure and reduce the casting defects. Also, the squeezing pressure, the duration of pressure and the super heat, have the most influence on the mechanical properties and wear resistant, respectively. By increasing the pressure from 60 to 90 MPa and above, the adhesive wear- mechanism is weaker compared to the abrasive and the wear type is found to convert the low stress wear from high stress state, which improves the wear resistance. At least 90 MPa squeezing pressure, at least 30 seconds duration for applying the pressure and a super-heat of 50 to 100 °C are the recommended ranges for achieving the best wear resistance and mechanical properties.

Keywords:

Squeeze casting,
A356 Alloy,
Parametric investigation,
Wear resistant,
Mechanical properties

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Hassasi S.A., Abbasi M., Hosseinipour S.J., Effect of squeeze casting parameters on mechanical properties and wear behavior of A356 aluminium alloy, in Persian, Founding Research Journal, 2018, 2(4) 263-273.
DOI: 10.22034/FRJ.2018.141181.1046

* Corresponding Author:

Majid Abbasi, Associate Professor

Address: Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran,
P.O. Box 47148-71167, Tel.: +98 11 35501806, Fax: +98 11 35501801.

E-mail: abbasim@nit.ac.ir



انجمن علمی ریخته‌گری ایران

فصل‌نامه علمی پژوهشی

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

بررسی اثر متغیرهای ریخته‌گری کوبشی بر خواص مکانیکی و رفتار سایشی آلیاژ آلومینیم A356

سید عباس حساسی^۱، مجید عباسی^{۲*}، سید جمال حسینی پور^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، Hasasabbas@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، abbasim@nit.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، j.hosseini@nit.ac.ir

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹

در این پژوهش اثر متغیرهای اصلی فرایند ریخته‌گری کوبشی شامل فشار کوبش، دمای فوق ذوب و مدت زمان اعمال فشار بر ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت به سایش آلیاژ آلومینیم A356 مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور اثر متغیرهای مذکور هر کدام در سه سطح روی سختی، استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی، ازدیاد طول نسبی و جرم از دست رفته در اثر سایش مورد ارزیابی قرار گرفتند. ریخته‌گری کوبشی با استفاده از یک پرس ۲۰ تنی با قالب فلزی با محفظه‌ای به شکل استوانه انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش سایش به روش پین روی دیسک در شرایط ثابت تا مسافت ۲۰۰۰ متر بررسی شد. نتایج نشان داد که اعمال فشار کوبش موجب می‌شود که دندریته‌های فاز آلفا آلومینیم و سل‌های یوتکتیک در ریزساختار ظریف‌تر شده و عیوب ریختگی کاهش یابد. همچنین متغیرهای فشار کوبش، مدت زمان اعمال فشار و دمای فوق ذوب به ترتیب بیشترین اثر را بر خواص مکانیکی و سایش دارند. با افزایش فشار کوبش از ۶۰ به ۹۰ MPa و بالاتر، مکانیزم سایش چسبان در مقایسه با خراشان ضعیف‌تر شده و نوع سایش از سایش شدید به سایش ضعیف تغییر می‌یابد که این موضوع موجب بهبود مقاومت به سایش می‌شود. فشار کوبش حداقل ۹۰ MPa، مدت زمان اعمال فشار حداقل ۳۰ ثانیه و دمای فوق ذوب در مقدار ۵۰ تا ۱۰۰°C، محدوده پیشنهادی برای دستیابی به مناسبترین مقاومت به سایش و خواص مکانیکی است.

واژه‌های کلیدی:

ریخته‌گری کوبشی،

آلیاژ A356،

بررسی متغیرها،

سایش،

خواص مکانیکی

۱- مقدمه

و سختی بیشتر برخی از آلیاژهای مابعدیوتکتیک مانند A390 نسبت به آلیاژهای ماقبل‌یوتکتیک مانند A356 شده است، مقدار سیلیسیم بیشتر این آلیاژها است [۴]. آلیاژهای ماقبل‌یوتکتیک مانند A356، به دلیل مقدار سیلیسیم کمتر و همچنین دامنه انجماد طولانی و متعاقبا عیوب بسیار زیادی که در روش‌های ریخته‌گری معمول به همراه دارند، زمانی که به عنوان محفظه موتورها مورد استفاده قرار می‌گیرند، حتما باید توسط رینگ‌های چدنی یا فولادی تقویت شوند که این موضوع باعث افزایش هزینه‌ها و مشکل شدن بازیافت قطعات می‌شود [۵].

نوع روش ریخته‌گری بر نرخ انجماد، ریزساختار ریختگی و فرایند عملیات حرارتی تاثیرگذار است [۶]. ریخته‌گری کوبشی یکی از روش‌های مدرن صنعتی است که به دلیل

چالش وزن قطعات در صنایعی مانند اتومبیل‌سازی موجب افزایش تقاضا برای انتخاب موادی با وزن کمتر و استحکام بیشتر را موجب شده است. به همین منظور آلیاژهای مختلف آلومینیم-سیلیسیم مورد توجه روزافزون در صنایع ریخته‌گری قرار گرفته‌اند [۱]. حضور سیلیسیم در این دسته از آلیاژها، سبب افزایش سیالیت، استحکام و مقاومت به سایش آلیاژ می‌شود [۲]. هر دوی آلیاژهای ماقبل و مابعدیوتکتیک^۱ در سطوح درگیر در شرایط خشک و یا با روانکار در زمان‌های طولانی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. مهم‌ترین عاملی که موجب مقاومت به سایش

^۱ Hypo and hyper eutectic

۲- مواد و روش تحقیق

از شمش آلیاژ آلومینیم ماقبل‌یونکتیک A356 شرکت ایرالکو برای ریخته‌گری استفاده شد. جدول (۱)، آنالیز اسپکترومتری آن را نشان داده است.

برای اعمال فشار در ریخته‌گری کوبشی از یک دستگاه پرس هیدرولیک با ظرفیت ۲۰ تن و با قابلیت کنترل نیروی اعمالی و همچنین برای انجام عملیات ذوب از کوره مقاومتی با ظرفیت ۲۰ کیلوگرم به‌همراه بوته گرافیتی با ظرفیت یک کیلوگرم استفاده شد. کوره مقاومتی در کنار پرس قرار گرفت تا از کاهش دمای ذوب قبل از بارریزی جلوگیری شود. برای جلوگیری از کاهش بیش از حد دما، بوته بعد از عملیات سرباره‌گیری و گاززدایی به داخل کوره انتقال یافت و به مدت ۳۰ دقیقه در دماهای مورد نظر نگه داشته شد تا هم‌دما شود. جنس قالب استوانه‌ای شکل از فولاد ابزار گرم‌کار H13 به قطر ۳۰ و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر بوده است که توسط یک المنت با سیستم کنترل دما تا دمای ۲۰۰°C مورد پیش‌گرم قرار گرفت. همچنین از یک ترموکوپل در عمق ۵ میلی‌متری بدنه قالب به منظور اطمینان از کنترل دقیق دمای قالب استفاده شد. در شکل (۱)، هندسه قالب نشان داده شده است. روان‌کاری قالب توسط گرافیت کلئیدی انجام شد. دمای خط مایع آلیاژ، توسط دستگاه آنالیز حرارتی با دقت اندازه‌گیری ۱°C ثبت شد و انتخاب دمای فوق ذوب با توجه به این دما صورت گرفت. طراحی آزمایش‌ها برای بررسی متغیرهای فرایند ریخته‌گری کوبشی طبق روش طراحی آزمایشات تاگوچی مطابق با جدول (۲)، طرح L9 با سه متغیر و در سه سطح انجام پذیرفت. انتخاب ترتیب انجام آزمایش‌های ریخته‌گری به صورت اتفاقی و با حداقل دوبرار تکرار انجام شد. تحلیل‌های عددی داده‌های آزمایش (تعیین اثر اصلی متغیرها در سطوح مختلف) و رسم نمودارهای مرتبط با استفاده از برنامه Minitab انجام شده است.

آزمایش سختی‌سنجی به روش برینل با نیروی ۳۰ کیلوگرم و گلوله به قطر ۲/۵ میلی‌متر و طبق استاندارد E10-01 توسط دستگاه مدل SCTMC انجام شد [۱۲]. به منظور حصول اطمینان از درستی نتایج این آزمایش، حداقل ۷ مرتبه در هر نمونه تکرار شد.

آماده‌سازی نمونه‌های کشش به شکل ورق طبق استاندارد B557M-02a و تحت نرخ کرنش $0.002 S^{-1}$ توسط دستگاه آزمایش کشش سنتام با ظرفیت ۵ تن صورت گرفت [۱۳].

خصوصیاتی همچون عدم حضور تخلخل‌های گازی و انقباضی، عدم نیاز به سیستم راهگامی و تغذیه‌رسانی، قابلیت استفاده برای آلیاژهای مختلف نوردی و ریختگی و طراحی آسان‌تر نسبت به روش‌های معمول ریخته‌گری به نحو چشم‌گیری گسترش یافته است [۷]. در این فرایند، فلز مذاب بعد از بارریزی به داخل قالب پیشگرم شده فلزی، در دمای بین خط مایع و جامد تحت فشار کوبش یک پرس قرار می‌گیرد و این فشار تا پایان انجماد حفظ می‌شود [۸]. با این حال مهم‌ترین مسئله در این فرایند برای دستیابی به قطعات با بهره‌وری بالا، کنترل دقیق متغیرهای این فرایند است [۹]. بررسی دقیق عوامل تاثیرگذار بر مقاومت به سایش آلیاژ A356 بسیار حائز اهمیت است. لی و همکاران [۱۰] با مقایسه‌ی نمونه‌های حاصل از فرایند ریخته‌گری کوبشی با سایر نمونه‌ها از آلیاژ A356 نشان دادند که اعمال فشار تا ۱۰۰MPa در فرایند ریخته‌گری کوبشی، موجب تشکیل یک ساختار چگال با کمترین فاصله بین تیغه‌ای سیلیسیم یونکتیک نسبت به نمونه‌های ریخته‌گری تحت فشار پایین شده است و به این طریق، موجب افزایش چقرمگی شکست آلیاژ شده است. بررسی‌های مالکی و همکاران [۱۱]، بر روی تاثیر متغیرهای مختلف بر ریزساختار آلیاژ LM13، نشان داد که اعمال فشار کوبش تا ۱۰۰MPa موجب کاهش فاصله بین بازوهای دندریتی و بهبود فاکتور شکل فاز آلفا و سیلیسیم یونکتیک شده است. بررسی‌های صورت گرفته در زمینه این آلیاژ در محدوده بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی بوده است، بنابراین لزوم یک بررسی دقیق از تاثیر عوامل مختلف فرایند ریخته‌گری کوبشی بر تاثیر ریزساختار بر خواص سایشی بسیار حائز اهمیت است. پژوهش‌های صورت گرفته به منظور بررسی عوامل تاثیرگذار بر ریزساختار و خواص مکانیکی قطعات ریخته‌گری کوبشی، محدود به بررسی تعداد بسیار کمی از عوامل تاثیرگذار با تاکید بسیار کم بر مباحث سایشی بوده است. در این پژوهش، اثر متغیرهای تاثیرگذار فرایند ریخته‌گری کوبشی با انتخاب مناسب سطوح هر یک از عوامل به همراه آزمایش‌های دقیق ریزساختاری، خواص مکانیکی و مقاومت به سایش آلیاژ A356 صورت پذیرفته است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی اسپکترومتری نوری آلیاژ A356 استفاده شده در این تحقیق (بر حسب درصد وزنی).

Cu	Zn	Ti	Mg	Fe	Si	Al
۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۱۱	۰/۲۲	۰/۳۱	۷/۳	باقیمانده
<۰/۲۰	<۰/۱۰	<۰/۲۰	۰/۴۵-۰/۳۰	<۰/۱۵	۷/۵۰-۶/۵۰	استاندارد

جدول ۲- طراحی آزمایش‌ها و مقدار متغیرها در هر آزمایش

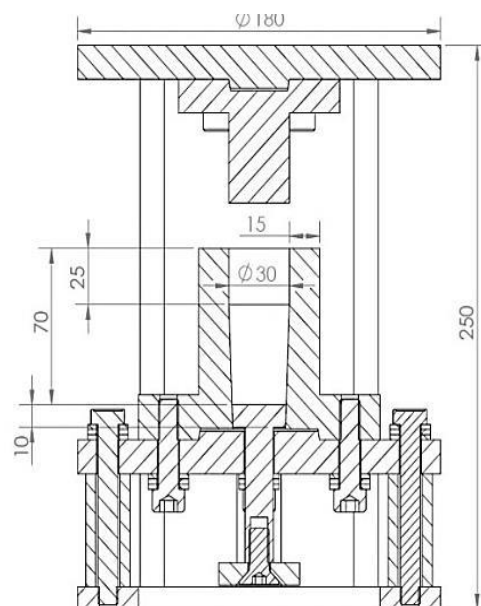
میزان فوق ذوب (°C)	مدت زمان اعمال فشار (S)	فشار کوبش (MPa)	کد آزمایش
۵۰	۱۵	۶۰	۱۱۱
۱۰۰	۳۰	۶۰	۱۲۲
۱۵۰	۴۵	۶۰	۱۳۳
۵۰	۳۰	۹۰	۲۲۱
۱۰۰	۴۵	۹۰	۲۳۲
۱۵۰	۱۵	۹۰	۲۱۳
۱۰۰	۴۵	۱۲۰	۳۳۲
۱۵۰	۱۵	۱۲۰	۳۱۳
۵۰	۳۰	۱۲۰	۳۲۱

نمودار تغییرات طول نمونه توسط اکستنسومتر با دقت ۰/۱ میکرومتر و هم‌چنین ضریب اصطکاک در حین آزمایش به طور پیوسته ثبت شده است. هم‌چنین جرم از دست رفته در اثر سایش نمونه‌ها قبل و بعد از انجام آزمایش توسط ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم ثبت شد.

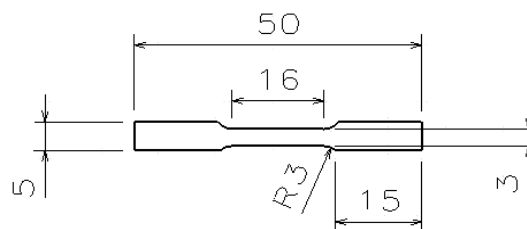
تصاویر ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری MDS مدل 120A-NJF با بزرگنمایی‌های مختلف و میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips مدل XL30 مجهز به دستگاه آنالیز عنصری EDS صورت گرفت. هم‌چنین به منظور بررسی سطح سایش تعدادی از نمونه‌های از میکروسکوپ استریو مدل DeWinter استفاده شد. نمونه‌گیری از فاصله ۲۰ میلی‌متری سطح انجام شده است. متالوگرافی تمامی نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی و پولیش توسط محلول kellers با ترکیب (3ml HCl, 5ml HNO₃, 190 ml H₂O, 2ml HF) صورت گرفت. بررسی ریزساختار شامل متوسط اندازه فاز آلفا و متوسط فاکتور شکل (نسبت طول به عرض) آن و هم‌چنین فاصله بین بازوهای دندریتی در ۲۰ تصویر از گوشه تا مرکز نمونه توسط نرم‌افزار تحلیل تصاویر ریزساختاری MIP4 صورت گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار نمونه‌های ریخته‌گری کوبشی شکل (۳)، تصاویر ریزساختار نوری آلیاژ A356 در فشار کوبش‌های مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اعمال فشار کوبش در فرایند ریخته‌گری کوبشی موجب اصلاح ریزساختار فاز اولیه و یوتکتیک نسبت به فشار ثقل شده است، به نحوی که هم مقدار عیوب ریخته‌گی مانند



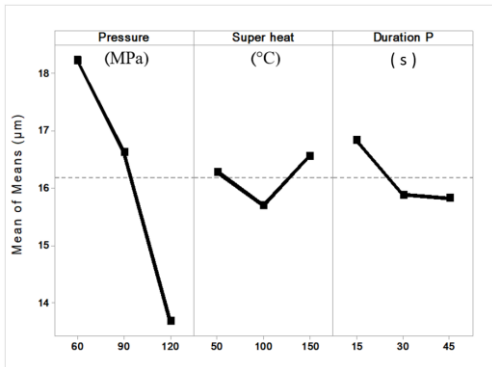
شکل ۱- هندسه و ابعاد قالب (ابعاد به میلی‌متر)



شکل ۲- ابعاد و هندسه نمونه آزمایش کشش (ابعاد به میلی‌متر)

در شکل (۲) ابعاد و هندسه نمونه آزمایش کشش نشان داده شده است.

آزمایش سایش به روش پین روی دیسک و طبق استاندارد G99-04 توسط دستگاه مدل AMC Wear 10.7 انجام شد [۱۴]. نمونه سایش به شکل پین با قطر ۶ میلی‌متر و طول حداقل ۴۰ میلی‌متر به روش برش با سیم از نمونه ریخته‌گری شده، تهیه شده است. آزمایش سایش در دما محیط و رطوبت محیطی ۶۵ درصد به مسافت ۲۰۰۰ متر و تحت نیروی ۲kgf با دیسک فولادی از جنس فولاد AISI:۴۳۴۰ با سختی ۳۶ و پیکرز با حداقل ۳ بار تکرار انجام گرفت.



شکل ۴- نمودار اثر اصلی متغیرهای فرایند ریخته‌گری کوبشی بر فاصله بین بازوهای فرعی دندربیتی فاز آلفا

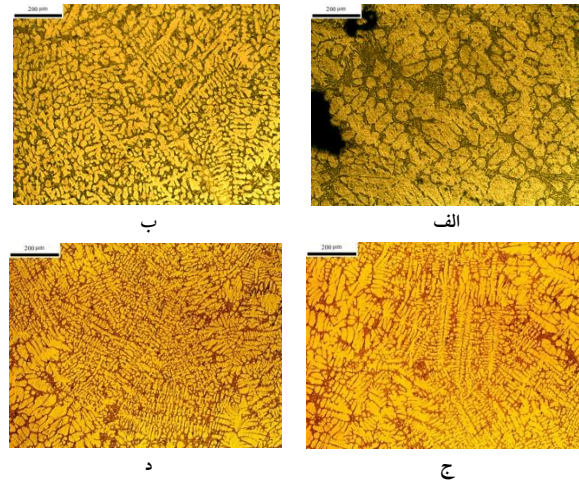
۳-۲- بررسی خواص مکانیکی

جدول (۳)، نتایج آزمایش‌های سختی و کشش را نشان می‌دهد. همچنین بر اساس این داده‌ها، نمودارهای اثر اصلی متغیرهای فرایند ریخته‌گری کوبشی بر سختی، استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول نسبی محاسبه و در شکل (۵) نشان داده شده است. بر اساس نمودارهای اثر اصلی، مشاهده می‌شود که تغییرات فشار کوبش بیشترین تاثیر را بر همه خواص کششی دارد به گونه‌ای که با افزایش فشار کوبش همه خواص کششی و سختی بهبود می‌یابد. این به تاثیر قابل ملاحظه فشار بر افزایش سرعت انجماد و ظریف شدن ریزساختار بستگی دارد که قبلاً تشریح شده است. در مقابل اثرات میزان فوق ذوب و مدت زمان اعمال فشار کمتر از نیروی کوبش است و شدت اثر آنها به شاخص مکانیکی و مقدار آن متغیر، بستگی دارد.

تحلیل نتایج شکل (۵)، نشان می‌دهد که فشار کوبش در مقدار ۱۲۰ MPa، مدت زمان اعمال فشار در حداقل ۳۰ ثانیه و دمای فوق ذوب تا مقدار ۱۰۰°C برای دستیابی به بالاترین نتایج سختی و خواص کششی، مناسب است.

با افزایش فشار کوبش از ۶۰ به ۹۰ و ۱۲۰ MPa، به ترتیب سختی به میزان ۱۱ و ۸٪، استحکام کششی نهایی به میزان ۷ و ۲٪ و استحکام تسلیم به میزان ۸ و ۱۲٪/۵ و ازدیاد طول نسبی ۳۴ و ۴۴٪ افزایش یافته است. این مقایسه نشان می‌دهد که افزایش فشار کوبش به ترتیب بر ازدیاد طول نسبی، استحکام تسلیم، سختی و استحکام کششی نهایی بیشترین تاثیر را دارد.

اعمال فشار کوبش به فلز مذاب در حین انجماد، موجب افزایش نقطه ذوب تعادلی آلیاژ و ایجاد یک مادون انجماد



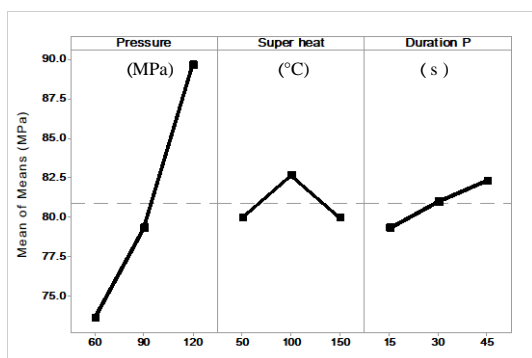
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ A356 در فشار کوبش‌های مختلف: الف) ثقل، ب) ۶۰ MPa (۱۱۱)، ج) ۹۰ MPa (۲۱۳)، د) ۱۲۰ MPa (۳۱۳) (اندازه میکروبارها ۲۰۰ μm)

تخلخل‌های انقباضی کاهش یافته است و هم توزیع فاز یوتکتیک به نحو مطلوب‌تری صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است که آلیاژ A356 به دلیل دامنه انجماد طولانی مستعد ایجاد تخلخل‌های انقباضی در حین انجماد است و اعمال فشار کوبش در فرایند ریخته‌گری کوبشی موجب جلوگیری از جوانه‌زنی و رشد مناطق مستعد ایجاد این تخلخل‌ها شده است.

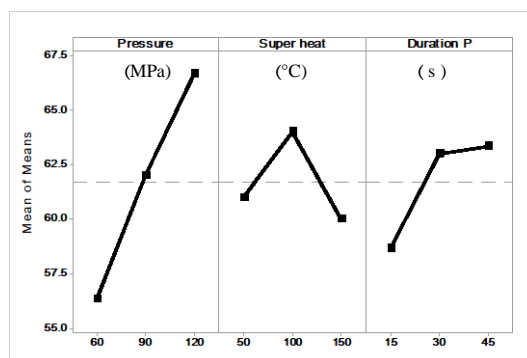
نتایج آنالیز تصویری از تصاویر میکروسکوپ نوری در شکل (۴) نشان می‌دهد که با افزایش فشار کوبش از ۶۰ به ۹۰ و ۱۲۰ MPa فاصله بین بازوهای دندربیتی فرعی به ترتیب به میزان ۹ و ۱۷/۵٪ کاهش یافته است. این ظریف‌شدن ریزساختار به علت تاثیر قابل ملاحظه فشار بر تعادل جامد-مذاب است. به گونه‌ای که با افزایش فشار در آلیاژ مابعدیوتکتیک آلومینیم-سیلیسیم، مذاب در مادون انجماد بیشتری قرار می‌گیرد و سرعت جوانه‌زنی افزایش می‌یابد [۱۶، ۱۵]. لذا هم دندربیت‌های فاز آلفا آلومینیم و هم سل‌های یوتکتیک با افزایش فشار ظریف‌تر می‌شوند. اعمال فشار کوبش به فلز مذاب در حین انجماد در کنار انتخاب سطح مناسبی از سایر متغیرهای فرایند، سبب افزایش ضریب انتقال حرارت و نرخ انجماد و در نتیجه سبب کاهش فاصله بین بازوهای دندربیتی فرعی، اندازه دانه‌های فاز آلفا با رشد مستقل، بهبود مورفولوژی و توزیع سیلیسیم یوتکتیک و کاهش مقدار تخلخل‌ها می‌شود.

جدول ۳- سختی، استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول نسبی آلیاژ A356 در شرایط مختلف ریخته‌گری کوبشی

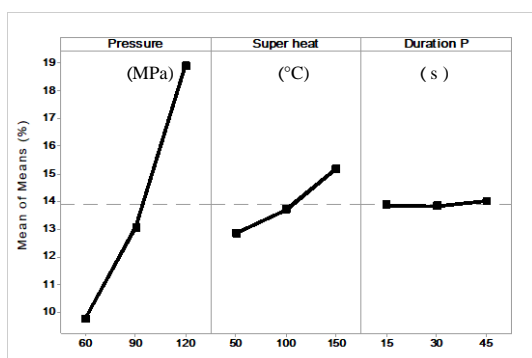
ازدیاد طول نسبی (%)		استحکام کششی (MPa)		استحکام تسلیم (MPa)		سختی (BHN)		آزمایش
انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار	متوسط	
۰/۷۱	۷/۵۰	۸/۴۸	۱۷۰	۱/۴۱	۷۲	۲/۵۸	۵۳	۱۱۱
۰/۴۲	۱۰/۴۰	۱۰/۶۰	۱۸۳	۲/۸۲	۷۵	۱/۸۲	۵۹	۱۲۲
۰/۷۰	۱۱/۴۰	۵/۶۵	۱۸۰	۳/۵۳	۷۴	۲/۴۴	۵۷	۱۳۳
۲/۸۲	۱۳/۶۰	۹/۸۹	۱۹۸	۲/۱۲	۸۳	۲/۰۴	۶۴	۲۲۱
۱/۲۷	۱۱/۱۰	۴/۳۴	۱۸۶	۲/۱۲	۷۴	۲/۴۸	۶۲	۲۳۲
۰/۶۳	۱۴/۵۰	۴/۲۴	۱۸۹	۴/۹۵	۸۱	۱/۴۷	۶۰	۲۱۳
۲/۲۵	۱۹/۶۰	۷/۰۷	۲۰۴	۴/۳۴	۹۹	۳/۶۵	۷۱	۳۳۲
۲/۸۲	۱۹/۶۰	۱/۴۱	۱۹۰	۲/۸۳	۸۵	۳/۳۶	۶۳	۳۱۳
۳/۰۹	۷/۰۰	۸/۴۸	۱۹۲	۲/۱۲	۸۵	۲/۰۴	۶۶	۳۲۱
۱/۶۳	۱۲/۷۴	۶/۶۷	۱۸۸	۲/۹۰	۸۱	۲/۴۳	۶۲	متوسط
۱۲/۸۲		۳/۵۵		۳/۵۹		۳/۹۴		ضریب تغییرات (درصد)



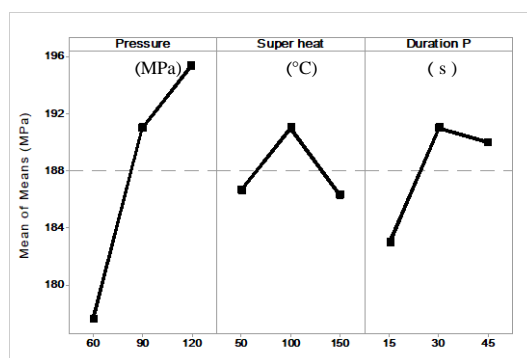
ب- استحکام تسلیم



الف- سختی (برینل)



د- ازدیاد طول نسبی



ج- استحکام کششی نهایی

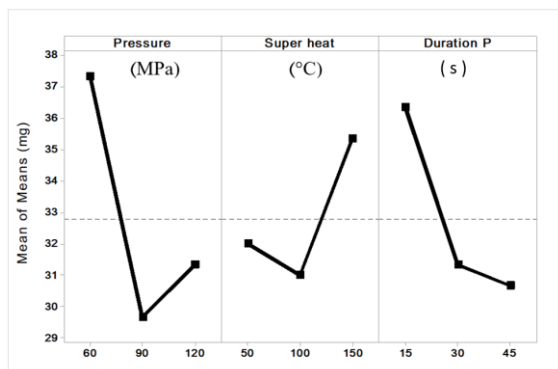
شکل ۵- نمودار اثرات اصلی متغیرهای ریخته‌گری کوبشی بر خواص مکانیکی:
الف) سختی، ب) استحکام تسلیم، ج) استحکام کششی نهایی، د) ازدیاد طول نسبی

می‌شود که افزایش زمان اعمال کوبش و در مقابل کاهش فوق ذوب، سبب بهبود مقاومت به سایش و کاهش جرم از دست رفته در اثر سایش می‌شود.

بر اساس نمودارهای شکل (۶)، فشار کوبش حداقل 90 MPa ، مدت زمان اعمال فشار حداقل 30 ثانیه و دمای فوق ذوب در مقدار 50 تا 100°C به عنوان محدوده مناسب برای دستیابی به حداقل جرم از دست‌رفته در اثر سایش مناسب است که این محدوده معادل همان محدوده مناسب برای حصول خواص کششی و سختی مناسب است.

جدول ۴- نتایج جرم از دست رفته و متوسط ضریب اصطکاک در حین آزمایش سایش بعد از 2000 متر سایش

متوسط ضریب اصطکاک	جرم از دست رفته (mg)		آزمایش
	انحراف معیار	متوسط	
۰/۳۶	۰/۷۰	۳۹	۱۱۱
۰/۳۴	۰/۷۰	۳۷	۱۲۲
۰/۴۴	۱/۴۱	۳۶	۱۳۳
۰/۳۶	۱/۴۱	۲۶	۲۲۱
۰/۴۴	۰/۷۰	۳۱	۲۳۲
۰/۳۵	۳/۵۳	۳۲	۲۱۳
۰/۲۳	۴/۹۴	۲۵	۳۳۲
۰/۲۹	۰/۷۰	۳۸	۳۱۳
۰/۲۸	۱/۴۱	۳۱	۳۲۱



شکل ۶- نمودار اثر اصلی متغیرهای ریخته‌گری کوبشی بر متوسط جرم از دست رفته در اثر سایش بعد از 2000 متر.

شکل (۷)، نمودار تغییرات جرم از دست رفته بر حسب مسافت سایش در نیروهای مختلف کوبش (نمونه‌های ۱۱۱، ۲۱۳ و ۳۱۳) را نشان داده شده است (بر اساس اندازه‌گیری در جای تغییرات طول نمونه توسط میکرومتر دستگاه

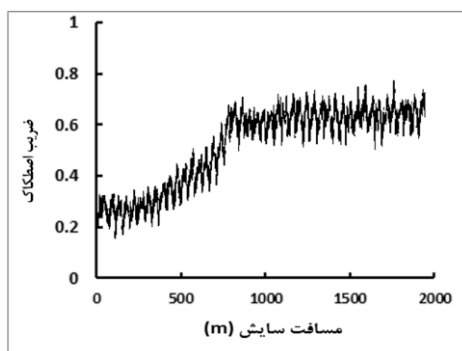
لحظه‌ای در آلیاژ می‌شود [۱۵] که ریزساختار را ظریف‌تر و عیوب ریختگی را کمتر می‌کند (شکل ۵). اعمال فشار کوبش به مقدار و مدت زمان مشخص بر روی فلز مذاب با حذف فاصله هوایی ایجاد شده، موجب افزایش ضریب انتقال حرارت و نرخ انجماد شده و در نتیجه، بهبود ساختار و خواص مکانیکی حاصل را موجب می‌شود [۱۶]. بنابراین مدت زمان اعمال فشار که متضمن انجماد فلز مذاب تحت فشار تا آخرین مراحل انجمادی و حذف کامل تخلخل‌های انقباضی است، بعد از فشار کوبش بیشترین تاثیر را بر نتایج سختی داشته است.

انتخاب دمای فوق ذوب معمولاً با توجه به دامنه انجمادی آلیاژ، انتخاب می‌شود به نحوی که برای آلیاژها با دامنه انجمادی کوتاه، این دما مقداری بالاتر در نظر گرفته می‌شود زیرا که این آلیاژها به محض بارریزی به داخل قالب تمایل به تشکیل پوسته انجمادی دارند [۱۷]. در آلیاژی مانند A356 که دارای دامنه انجماد طولانی هستند، این موضوع چندان حاد نیست و انتخاب یک مقدار با 50 تا 100°C برای فوق ذوب مناسب است.

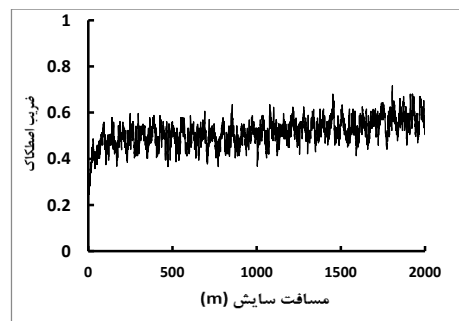
افزایش دمای فوق ذوب موجب می‌شود که اعمال فشار به فلز مذاب زمانی صورت گیرد که انجماد فاز یوتکتیک آغاز نشده است. به عبارت دیگر با کاهش دمای فوق ذوب، بخش زیادی از یوتکتیک قبل از اعمال فشار منجمد شده و فشار کوبش اثرگذاری مناسبی بر سل‌های یوتکتیک ندارد. از طرف دیگر، افزایش بیش از حد فوق ذوب می‌تواند سرعت انجماد را کاهش دهد. لذا مشاهده می‌شود که با افزایش فوق ذوب در مقادیر بیشتر از 100°C ، سختی و استحکام کاهش می‌یابند.

۳-۳- بررسی رفتار سایشی

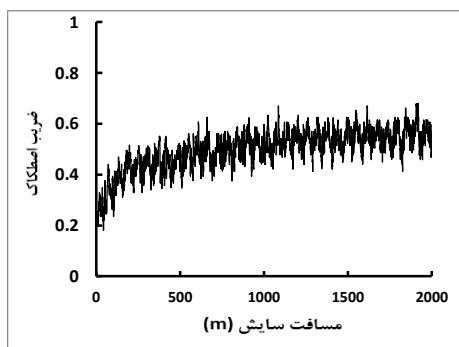
جدول (۴)، نتایج جرم از دست‌رفته (اندازه‌گیری شده با ترازوی دیجیتالی) و متوسط ضریب اصطکاک در اثر سایش را برای شرایط مختلف ریخته‌گری کوبشی ارائه داده است. بر اساس این داده‌ها، نمودار اثرات اصلی متغیرهای ریخته‌گری کوبشی بر این نتایج تعیین شده که در شکل (۶) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که جرم از دست رفته در اثر سایش آلیاژ A356 با افزایش فشار کوبش کاهش می‌یابد به گونه‌ای که این جرم از دست رفته نسبت به فشار کوبش 60 MPa در 90 و 120 MPa ، به ترتیب به میزان 20 و 15 درصد کاهش یافته است. همچنین مشاهده



الف



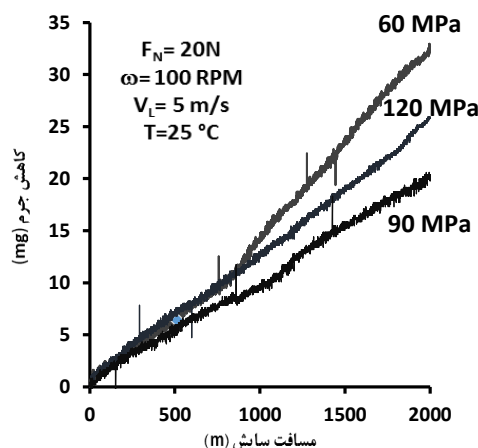
ب



ج

شکل ۸- نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت سایش در فشارهای کوبش مختلف: الف) ۶۰MPa (۱۱۳)، ب) ۹۰MPa (۲۲۳)، ج) ۱۲۰MPa (۳۳۲)

در مسافت‌های اولیه لایه محافظتی اکسیدی روی سطح در برابر نیروی اعمالی مقاومت کرده و شکاف‌ها بر روی این لایه اکسیدی ایجاد می‌شوند. بیش از این مقدار به تدریج این لایه شکسته شده و از بین رفته و اعمال نیرو به طور مستقیم به سطح فلز (زمینه فاز آلفا) وارد شده است. با افزایش فشار کوبش به ۹۰ و ۱۲۰MPa، میزان تغییرات ضریب اصطکاک به نحو محسوس کاهش یافته است که نشان دهنده عدم تغییر مکانیزم سایش در حین آزمایش در مسافت‌های مختلف است. از آنجایی که سختی با نرخ سایش رابطه معکوس دارد، بدیهی است که با افزایش



شکل ۷- اثر فشارهای کوبش بر نمودار تغییرات کاهش جرم بر حسب مسافت سایش در آلیاژ A356

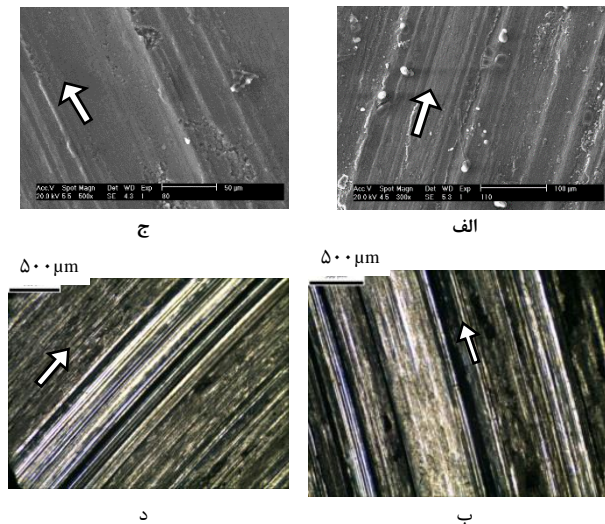
سایش). مشاهده می‌شود که کمترین کاهش جرم در نیروی کوبش ۹۰MPa (نمونه ۲۱۳) بدست می‌آید و افزایش بیشتر نیرو به ۱۲۰MPa (نمونه ۳۱۳) مجدد سبب کاهش مقاومت به سایش می‌شود. البته این کاهش مقاومت به سایش در نمونه ۳۱۳ (یا ۱۲۰ MPa) به بیشترین مقدار فوق ذوب و کمترین مدت زمان اعمال فشار انتخاب شده در آن مرتبط است که در شکل (۷)، اثرات این انتخاب در افزایش جرم از دست رفته را می‌توان مشاهده نمود.

در نمونه با فشار کوبش ۶۰MPa، مشاهده می‌شود که با افزایش مسافت سایش تا ۱۰۰۰ متر، نرخ کاهش جرم افزایش یافته است. افزایش نرخ کاهش جرم بعد از این مسافت و همچنین تغییرات ضریب اصطکاک در شکل (۸-الف) را می‌توان به تغییر مکانیزم سایش نسبت داد. این در حالی است که در نمونه‌های با فشار کوبش ۹۰ و ۱۲۰MPa، غیریکنواختی در تغییرات نرخ کاهش جرم مشاهده نشده است و مطابق شکل (۸-ب) و شکل (۸-ج)، تغییرات ضریب اصطکاک در طول سایش یکنواخت بوده است و تغییر مکانیزم سایشی به طور محسوس مشاهده نشده است.

ضریب اصطکاک آلیاژ در نمونه با فشار کوبش ۶۰MPa بعد از مسافت ۷۰۰-۱۰۰۰ متر دچار افزایش ناگهانی شده است که نشان‌دهنده انتقال نوع سایش از سایش ضعیف^۱ به سایش شدید^۲ (انتقال شکاف‌ها از لایه‌ی اکسیدی به زمینه فاز آلفا) در بیش از این مقدار بوده است [۵].

^۱ Mild wear

^۲ Severe wear



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی و استریو از سطح ساییده شده در فشار کوبش‌های: الف و ب) ۹۰ MPa (232)، ج و د) ۱۲۰ MPa (332)

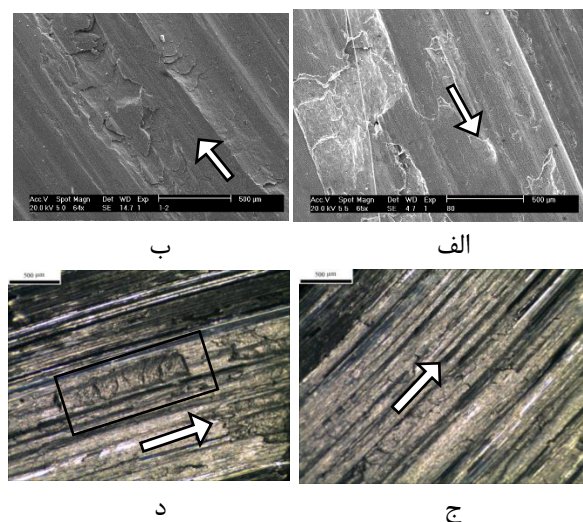
مطابق شکل (۱۰)، با افزایش فشار کوبش به ۹۰ و ۱۲۰ MPa، میزان و اندازه این ترک‌ها به مقدار محسوسی کاهش می‌یابد. سطح سایش شامل یک‌سری ترک‌های طولی و عرضی است، ولی ورقه‌ای شدن در قسمت‌های مختلف سطح به طور محسوس مشاهده نشده است.

در شکل (۱۱)، نمونه‌ای از ورقه‌ای شدن (ناشی از مکانیزم چسبان) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ورقه‌ای شدن سطح ساییده شده در نمونه با فشار کوبش ۶۰ MPa، موجب تغییر شکل زیرلایه تا عمق بین ۳۰-۵۰ میکرومتر شده است. تمرکز تنش در برخی از نقاط موجب اشاعه ترک در قسمت‌های میانی شده است. این ترک‌ها در اثر حرکت نسبی بین و دیسک در مناطقی مانند فصل مشترک سیلیسیم یوتکتیک، زمینه آلومینیم و تخلخل‌ها در ابتدا به صورت ریزترک‌هایی جوانه می‌زنند و در ادامه با یکدیگر ادغام شده و به سمت سطح سایش حرکت می‌کنند. با افزایش فشار کوبش به ۹۰ و ۱۲۰ MPa، شکل (۱۲)، مقدار این ریزترک‌ها به مقدار محسوسی کاهش یافته است و هیچ‌گونه تغییر شکل غیریکنواختی در سطح زیر سایش مشاهده نشده است. با اصلاح ریزساختار شامل کاهش فاصله بین بازوهای دندردیتی و سیلیسیم یوتکتیک در اثر افزایش فشار کوبش در شکل (۵)، انتقال از سایش ضعیف به شدید کندتر می‌شود [۱۸]. با افزایش فشار کوبش به ۹۰ MPa، میزان ترک‌ها و مقدار این لایه تریبولوژیکی کاهش یافته است.

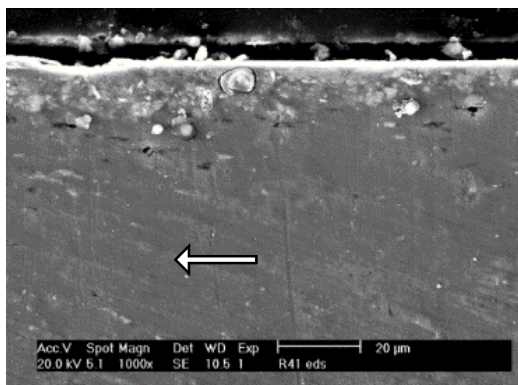
سختی در اثر اصلاح ریزساختار، مقاومت به سایش آلیاژ نیز افزایش یافته است و در نهایت موجب کاهش سطح تماس واقعی بین پین و دیسک و کاهش ضریب اصطکاک شده است.

شکل (۹)، تصاویر SEM و میکروسکوپ استریو از سطح ساییده شده در فشار کوبش ۶۰ MPa را نشان می‌دهد. وجود شیارها و کندگی‌های سطحی نشان می‌دهد که مکانیزم سایش در این شرایط، سایش خراشان و چسبیده است. در حین سایش، حضور سیلیسیم یوتکتیک سخت موجب حفاظت زمینه آلیاژ در برابر انتقال نیرو به سطح زمینه نرم فاز آلفا می‌شود. سطح زیرلایه فاز آلفا در صورت حضور فاز یوتکتیک با اندازه، مورفولوژی و توزیع نامناسب، در حین اعمال نیرو دچار تغییر شکل مومسان می‌شود و ترک‌ها در فصل مشترک زمینه و فاز سیلیسیم یوتکتیک گسترش می‌یابند (شکل ۹-د) [۱۶].

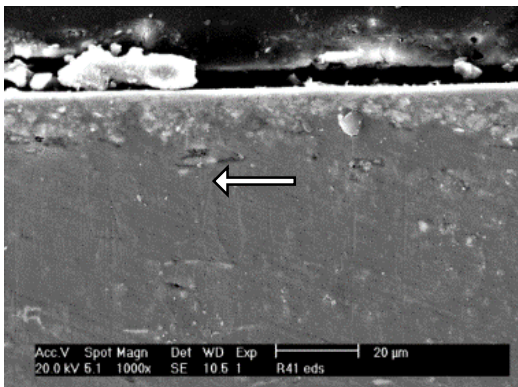
همان‌طور که نشان داده شده است، سطح ساییده شده در فشار کوبش ۶۰ MPa، شامل شیارهای طولی در راستای سطح سایش (شکل ۹-ج و د) و ورقه‌ای شدن (شکل ۹-الف و ب) در بسیاری از مناطق است. ترک‌ها در بسیاری از مناطق سطح نشان‌دهنده شکسته شدن لایه اکسیدی محافظ سطح است، که منجر به ورقه‌ای شدن سطح فلز شده است. در این دسته از آلیاژها، لایه محافظ سطح که از اکسیدهای فلزی تشکیل شده است، توانایی مقاومت در برابر نیروی اعمالی در حین سایش را ندارد و موجب تماس مستقیم بین پین و دیسک می‌شود [۱۷].



شکل ۹- تصاویر سطح سایش در فشار کوبش ۶۰ MPa (133): الف و ب) میکروسکوپ الکترونی روبشی، ج و د) میکروسکوپ استریو



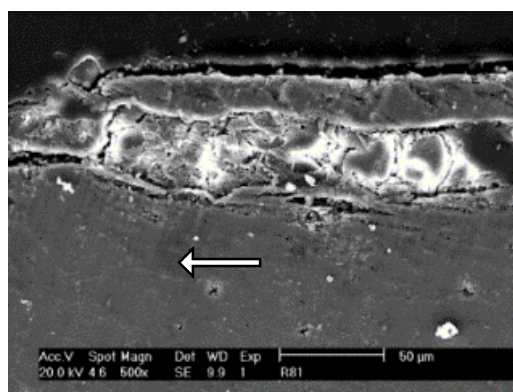
الف



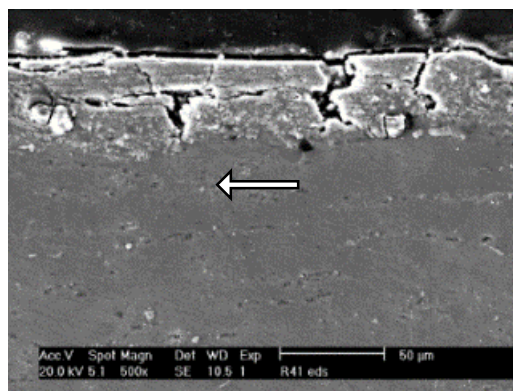
ب

شکل ۱۲- تصاویر SEM از زیر سطح ساییده شده در فشارهای کوبش: الف) ۹۰ MPa (232) و ب) ۱۲۰ MPa (332)

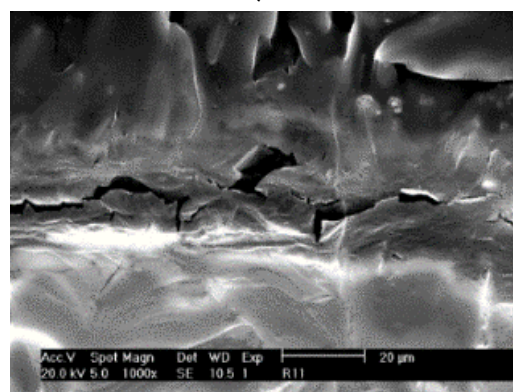
تغییرات ظاهری سطح ساییده شده، نشان‌دهنده کاهش شدت سایش در محل تماس پین با دیسک است. با افزایش فشار کوبش تا ۱۲۰ MPa، فقط یک سری خطوط سایشی در جهت سایش و بر روی لایه تریبولوژیکی سطح مشاهده می‌شود. این موضوع، موجب کاهش نرخ انتقال ماده از سطح پین به سطح دیسک می‌شود (کاهش ورقه‌ای شدن و تضعیف مکانیزم چسبان)، بنابراین مقدار جرم از دست رفته به مقدار محسوسی کاهش یافته است.



الف



ب



ج

شکل ۱۱- الف، ب، ج) تصاویر SEM از سطح زیر سایش در فشار کوبش ۶۰ MPa (نمونه 133) در بزرگنمایی‌های مختلف

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- با افزایش فشار کوبش از ۶۰ به ۹۰ و ۱۲۰ MPa فاصله بین بازوهای دندریتی فرعی به ترتیب به میزان ۹ و ۱۷/۵٪ کاهش یافته است.
- ۲- در ریخته‌گری کوبشی آلیاژ A356، متغیرهای فشار کوبش، مدت زمان اعمال فشار و دمای فوق ذوب به ترتیب بیشترین اثر را بر خواص مکانیکی و سایش دارند. با افزایش فشار کوبش از ۶۰ به ۹۰ و ۱۲۰ MPa، به ترتیب سختی به میزان ۱۱ و ۸٪، استحکام کششی نهایی به میزان ۷ و ۲٪ و استحکام تسلیم به میزان ۸ و ۱۲/۵٪ و ازدیاد طول نسبی ۳۴ و ۴۴٪ افزایش یافته است.
- ۳- با افزایش فشار در ریخته‌گری کوبشی از ۶۰ به ۹۰ MPa و بالاتر، مکانیزم سایش چسبان در مقایسه با خراشان ضعیف‌تر شده و سایش شدید به سایش ضعیف تغییر می‌یابد که در نتیجه موجب بهبود مقاومت به سایش می‌شود.

- [10] Lee K., Kwon Y.N., Lee S., Effects of eutectic silicon particles on tensile properties and fracture toughness of A356 aluminum alloys fabricated by low-pressure-casting, casting-forging, and squeeze-casting processes, *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 461, 532–541.
- [11] Maleki A., Shafyei A., Niroumand B., Effects of squeeze casting parameters on the microstructure of LM13 alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209, 3790–3797.
- [12] ASTM E10, Standard test method for brinell hardness of metallic materials, ASTM, 2004, 1–9.
- [13] ASTM B557, Standard test methods of tension testing wrought and cast aluminum and magnesium alloys products, ASTM, 2010, 1–15.
- [14] Method S.T, Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus, *Wear*, 2011, 05, 1–5.
- [15] Li R., Liu L., Zhang L., Sun J., Shi Y., Yu B., Effect of squeeze casting on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-xSi alloys, *Journal of Materials Science and Technology*, 2017, 33(4) 404–410.
- [16] Maleki A., Niroumand B., Shafyei A., Effects of squeeze casting parameters on density, macrostructure and hardness of LM13 alloy, *Materials Science and Engineering*, 2006, 428, 135–140.
- [17] Hu X., Ai F., Yan H., Influences of pouring temperature and cooling rate on microstructure and mechanical properties of casting Al-Si-Cu aluminum alloy, *Acta Metall. Sinica*, 2012, 25, 272–278.
- [18] Dwivedi D.K., Adhesive wear behaviour of cast aluminium – silicon alloys: Overview, *Material and Design*, 2010, 31, 2517–2531.
- [19] Miller A.E., Maijer D.M., Investigation of erosive-corrosive wear in the low pressure die casting of aluminum A356, *Materials Science and Engineering*, 2006, 435–436, 100–111.
- [20] Hekmat-Ardakan A., Liu X., Ajersch F., Chen X.G., Wear behaviour of hypereutectic Al-Si-Cu-Mg casting alloys with variable Mg contents, *Wear*, 2010, 269, 684–692.

۴- فشار کوبش حداقل ۹۰ MPa، مدت زمان اعمال فشار حداقل ۳۰ ثانیه و دمای فوق ذوب در مقدار ۵۰ تا ۱۰۰°C، محدوده پیشنهادی برای دستیابی به مناسب‌ترین مقاومت به سایش و خواص مکانیکی است.

مراجع

- [1] Souissi S., Amar B., Bradai M., Experimental investigation on microstructure and mechanical properties of direct squeeze cast Al-13%Si alloys, *Strength of Materials*, 2012, 44, 337–345.
- [2] Lus H.M., Turkeli A., Kinikoglu N.G., Swage casting of A380 alloy, *Material and Design*, 2011, 32, 3570–3577.
- [3] Clarke J., Sarkar A.D., Wear characteristics silicon alloys of as-cast binary aluminium, *Wear*, 1979, 54, 7–16.
- [4] Ye H., An overview of the development of Al-Si-alloy based material for engine applications, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2003, 12, 288–297.
- [5] Elmadagli M., Perry M., Alpas T., A parametric study of the relationship between microstructure and wear resistance of Al-Si alloys, *Wear*, 2007, 262, 79–92.
- [6] Abou El-khair M.T., Microstructure characterization and tensile properties of squeeze-cast AlSiMg alloys, *Material. Letters*, 2005, 59, 894–900.
- [7] Patel G.C.M., Krishna P., Parappagoudar M.B., Optimization of Squeeze cast process parameters using Taguchi and grey relational analysis, *Procedia Technology*, 2014, 14, 157–164.
- [8] Savas M.A., Altintas S., Effects of squeeze casting on the wide freezing range binary alloys, *Materials Science and Engineering*, 1993, 173, 227–231.
- [9] Vijian P., Arunachalam V.P., Optimization of squeeze cast parameters of LM6 aluminium alloy for surface roughness using Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 180, 161–166.

