



بررسی پوشش کاری آلیاژ آلومینیوم - سیلیسیوم توسط نانو تیوب کربن به روش فراوری اصطکاکی اغتشاشی (FSP)

جواد شهبازی کرمی^{1*}، فرزاد خوش صوت²

¹ دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی و پژوهشکده سازمان صنایع هوایی

² دانشکده مکانیک دانشگاه تهران

چکیده

در بسیاری از شرایط کاری، عمر مفید قطعات وابسته به خواص سطحی آن‌ها می‌باشد. فراوری اصطکاکی اغتشاشی استحکام کششی، طول پذیری و سختی فلز ریخته شده را با حذف تخلخل‌ها و شاخه‌های دندردیتی و همچنین ساختارهای سوزنی افزایش می‌دهد. استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با نانو پودر به دلیل خواص خوب آن مانند استحکام مخصوص بالا، سختی بالا و مقاومت در برابر سایش خوب در حال افزایش است. در این تحقیق فراوری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از تبدیل سطحی یک آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم به یک سطح کامپوزیتی با استفاده از نانو تیوب‌های کربنی با خواص خوب انجام می‌شود. پارامترهای در نظر گرفته شده در اینجا هندسه ابزار، تعداد پاس‌های فرایند، سرعت پیشروی و دورانی ابزار می‌باشد. نمونه‌های فراوری شده با 3 و 4 پاس فراوری تفاوت زیادی در خواص کششی ندارند. نمونه فراوری شده با ابزار مربعی بهترین خواص کششی را در بین نمونه‌های فراوری شده با ابزارهای مختلف نشان داد. با افزایش سرعت پیشروی و سرعت دورانی میزان سختی هم افزایش می‌یابد. مقاومت به سایش نانو کامپوزیت‌های متناسب با سختی نمونه‌ها است. در بهترین حالت استحکام کششی نمونه فراوری شده تا 288 مگا پاسکال، سختی نمونه 140 میکرو ویکرز و نرخ کاهش وزن نمونه تا 14 میلی گرم می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: خواص سطحی؛ کامپوزیت؛ فراوری اصطکاکی اغتشاشی؛ نانو تیوب کربن.

¹ Email: Shahbazi.mech@gmail.com

مقدمه

در چند سال اخیر چندین روش بهسازی سطح مانند پرتو الکترونی، اسپری پلاسما، عملیات ذوب بالیزر انرژی بالا و ریخته‌گری جهت ساخت کامپوزیت‌های سطحی توسعه پیدا کرده‌اند. در این بین، عملیات ذوب لیزری که فرایند مهندسی لیزر سطح¹ نیز نامیده می‌شود، به گونه‌ای وسیع کاربرد دارد. در این روش‌های ارائه شده باید به این نکته توجه داشت که شکل‌گیری کامپوزیت سطحی بر اساس ایجاد فاز مایع در دماهای بالا صورت گرفته است. در این مورد، اجتناب از واکنش بین سطحی میان ذرات تقویتی و شبکه فلزی، سخت بوده و باعث تولید فازهای زیان‌آور می‌شود. از این گذشته، کنترل بحرانی پارامترهای فرآیند برای به دست آوردن ریزساختار انجمادی ایده آل مورد نیاز است و هزینه انجام این گونه فرآیندها بسیار بالاست. بدیهی است اگر فرآیند سطحی در زیر نقطه ذوب ماده پایه انجام شود، می‌تواند از مشکلات ذکر شده بالا جلوگیری شود.

یکی از روش‌های تولید لایه سطحی کامپوزیتی، روش فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی است. فرآوری اصطکاکی اغتشاشی² برای اصلاح موضعی و کنترل میکرو ساختارها در لایه‌های سطحی اجزا فلزی و برای افزایش خواص ویژه بکار می‌رود. این روش یک درمان مؤثر برای بهبود و تقویت میکرو ساختار، چگالش (تراکم) و همگنی در ناحیه تحت فرآیند و حذف عیوب از ساختار است. سطوح تحت فرآیند از لحاظ خواص مکانیکی مانند، سختی، استحکام کششی، خستگی، مقاومت به خوردگی و سایش بهبود می‌یابند. از طرف دیگر، میکرو ساختارهای خوب با دانه‌های تبلور مجدد یافته رفتار سوپر پلاستیسیته را بهبود می‌بخشد [1]. با توجه به ویژگی‌ها و برتری‌های این روش نسبت به روش‌های گذشته در ساخت نانو کامپوزیت‌های سطحی وهم چنین، بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر، ضرورت گسترش و پیشرفت در این زمینه برای کاربردهای پژوهشی و صنعتی وجود دارد [2]. با توجه به آنچه در شکل 1 نمایش داده است، یک ابزار چرخان غیر مصرفی که از یک پین و یک بدنه سیلندری بزرگ‌تر یا یک شانه تشکیل شده است در داخل مواد فروخته تا شانه ابزار سطح قطعه کار را فشرده سازد. به موجب آن ابزار مواد و اطراف آن را وادار به تغییر شکل ویسکوپلاستیک می‌کند و وقتی که شرایط ترمومکانیکی مناسب (اختلاط خوب مواد) حاصل گردید، ابزار شروع به حرکت می‌کند. تغییر شکل پلاستیک به وسیله چرخش پین و شانه ابزار حاصل می‌شود و گرمای لازم را تولید می‌کند که عمل نرم کاری مواد بدون رسیدن به نقطه ذوب، با حرکت پین به سمت جلو و حرکت مواد دور پین انجام می‌پذیرد. وقتی که ابزار به جلو حرکت می‌کند، مواد قطعه کار از جلو به پشت پین جابه‌جا می‌شوند، در آنجا مواد زیر فشار شانه فورج شده و به نمونه تحت عملیات محکم می‌شوند [3].

آلیاژهای آلومینیوم سیلیسیوم به طور گسترده در صنایع اتومبیل و هوافضا به دلیل مقاومت سایشی عالی، نسبت استحکام به وزن بالا و قابلیت ریخته‌گری خوب به کار می‌روند [4]. خیلی از فاکتورها مانند اندازه دانه، اندازه

¹ laser surface engineering (LSE)

² Friction stir processing

سیلیکون و فاصله بازوی دندریتی می تواند کیفیت ساخت قطعات ریخته گری آلومینیوم سیلیسیوم را تحت تأثیر قرار دهد. این خصوصیات این آلیاژها منجر به محدودیت خواص مکانیکی مانند استحکام کششی، مقاومت خستگی، شکل پذیری و چقرمگی می شود [5].

در سال های اخیر تحقیقات گسترده ای در زمینه ی فراوری اصطکاکی اغتشاشی انجام گرفته است. در یک تحقیق برای بهبود خواص مکانیکی آلیاژ ریختگی آلومینیوم با فراوری اصطکاکی اغتشاشی چند پاسه، ناکاتا و همکاران، استحکام کششی آلومینیوم ریختگی ADC12 با فاکتور 1.7 افزایش دادند. سختی مواد فراوری شده 20 ویکرز بالاتر از ماده پایه اندازه گیری شد. این افزایش در استحکام کششی به دلیل حذف عیوب ریختگی مانند تخلخل، توزیع مجدد ذرات Si و بهبود قابل توجه اندازه دانه تا 2-3 میکرومتر می باشد [6]. بر موز و همکاران خواص کششی و سختی و سایشی کامپوزیت Cu/SiC فراوری شده با روش فراوری اصطکاکی اغتشاشی را بررسی کردند. آن ها بیان کردند که خواص سایشی نمونه فراوری شده و با پودر SiC بسیار بالاتر از نمونه خالص مس هست. ذرات سیلیسیوم کارباید موجود در کامپوزیت نوسانات را کاهش می دهد و ضریب اصطکاک را اندکی بالا می برد [7].

همان طور که مشاهده شد، تحقیقات گسترده ای پیرامون این روش و بهبود خواص مکانیکی آلیاژهای مختلف انجام گردیده است. اما وجه تمایز این تحقیق با تحقیق های دیگر استفاده از یک آلیاژ پر کاربرد در صنعت هوافضا و خودرو بوده زیرا آلیاژ LM13 آلیاژ یوتکتیکی است که خواص ریزساختاری و مکانیکی آن به عنوان یکی از آلیاژهای Al-Si به نرخ سرد شدن و دمای آنیل آن بستگی دارد. علاوه بر این خواص مکانیکی این آلیاژ به اندازه ذرات سیلیکونی در فاز یوتکتیک این آلیاژ وابسته است [8]. همچنین نانو پودر در نظر گرفته شده برای انجام این فرایند نانو تیوب کربن است که یک پودر تقویت کننده ایده آل برای ایجاد کامپوزیت به دلیل مدول الاستیسیته بسیار بالا و استحکام و خواص خوب گرمایی و الکتریکی می باشد [9].

مواد و روش تحقیق

آزمایش ها روی ورق های آلیاژ ریختگی آلومینیوم Lm13 با ضخامت 6 میلی متر انجام شد. ترکیبات شیمیایی آلیاژ در جدول 1 آورده شده است. همچنین از سه ابزار فولادی گرم کار H13 با سختی 52 راکول C با شکل پین استوانه ای، مربعی و مثلثی جهت انجام فرآیند استفاده گردید. ابعاد ابزار و خصوصیات آن در شکل 2 نشان داده شده است. پارامترهای به کاررفته در آزمایش ها در جدول 2 ارائه شده است.

توانایی فراوری اصطکاکی اغتشاشی در تولید کامپوزیت های زمینه فلزی با استفاده از ذرات تقویت کننده بر روی زمینه آلومینیومی مورد ارزیابی قرار گرفت و اثر و تغییر پارامترهای سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی ابزار، شکل پین ابزار و تعداد پاس های فرایند بر عامل های خروجی فرآیند که شامل استحکام نهایی کشش، سختی و مقاومت به سایش لایه کامپوزیت سطحی تولید شده مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

نمونه های فراوری شده بعد از انجام تست بصورت نمونه های لازم جهت انجام تست های مختلف مهیا گردید. نمونه های کشش با اندازه 10 سانتیمتر از طول منطقه فراوری بوسیله وایرکات بریده شد و تحت تست قرار گرفت (شکل 3). نمونه های سختی بعد از متالوگرافی و پولیش به کمک دستگاه میکرو سختی سنج و در نقاط مختلف سطح مقطع نمونه فراوری شده و در فاصله 1 میلی متری از سطح نانو کامپوزیت اندازه گیری شد. پروفیل سختی در نمونه های مختلف در شکل 4 نشان داده شده است. آزمایش سایش نمونه ها به روش پین بر روی دیسک انجام شد. در این آزمایش ها از نیروی 30 نیوتن استفاده شد و سرعت لغزش 0.5 متر بر ثانیه و کل طول لغزش 1800 متر در نظر گرفته شد. آزمایش سایش به صورت خشک و بدون روانکار انجام شد (شکل 5).

1- بررسی خواص کششی

برای بررسی اثر تعداد پاس های فرآوری بر خواص کششی، نمودار تنش - کرنش مربوط نمونه های شماره 2، 6 و 7 بررسی می شوند. در شکل 3 پیداست که با افزایش تعداد پاس های فرآوری استحکام کششی و طولی شدگی بهبود می یابد. این رفتار احتمالاً بیش از هر چیز مربوط به ریز شدن ذرات سیلیکونی در ساختار و همچنین توزیع بهتر و بیشتر ذرات نانو پودر در زمینه ی آلومینیوم است. کاهش اندازه ذرات تنش لازم برای جوانه زنی ترک را افزایش می دهد و شکست قطعه را به تأخیر می اندازد [10]. بنابراین استحکام کششی بهبود می یابد.

با بررسی نتایج آزمون کشش مربوط به نمونه آزمایش های شماره 2، 8 و 9 و شکل 3، نمونه فراوری شده توسط ابزار مربعی یعنی نمونه مربوط به آزمایش شماره 2 دارای استحکام کششی و طولی شدگی بیشتری نسبت به نمونه های فراوری شده توسط دیگر ابزارها دارد. دلیل این امر هم کوچک تر شدن اندازه ذرات سیلیکونی و نانو پودر و توزیع بهتر آن در زمینه ی آلومینیومی است. میزان کرنش پلاستیک مؤثر اعمال شده در ناحیه اغتشاش یافته، برای پین مربعی شکل بیشتر از دیگر پین ها است. کرنش مؤثر بیشتر منجر به شکستن بیشتر ذرات سیلیکونی و توزیع بهتر و بیشتر نانو پودر تقویت کننده و همچنین دانه بندی ریزتر می شود [11].

برای بررسی اثر سرعت دورانی بر خواص کششی به نتایج مربوط به آزمون کشش بر روی نمونه های مربوط به آزمایش های 1، 2 و 3 توجه شده است. با توجه به شکل 3، با افزایش سرعت دورانی ابزار از 600 به 1000 دور بر دقیقه در سرعت پیشروی ثابت و یکسان، استحکام کششی و طولی شدگی به ترتیب از 273.42 به 287.37 مگاپاسکال و از 14٪ به 18٪ افزایش یافته است. چنین رفتار کششی به میزان کاهش اندازه ذرات تقویت کننده و همچنین توزیع بهتر و ریزتر شده نانو پودر تقویت کننده است. در نمونه 1600 دور بر دقیقه بدلیل بالا بودن بیش از حد سرعت دورانی حفره کوچک باعث افت استحکام شده است (جدول 2).

برای بررسی اثر سرعت پیشروی بر خواص کششی به نتایج مربوط به آزمون کشش بر روی نمونه های مربوط به آزمایش های 2، 4 و 5 توجه شده است. همان طور که در جدول 2 و شکل 3 نشان داده شده است، با افزایش

سرعت پیشروی ابزار از 8 به 32 و از 32 به 80 میلی‌متر بر دقیقه در سرعت دورانی ثابت و یکسان، استحکام کششی و طولیل شدگی به ترتیب از 247.36 به 287.37 و سپس 260.34 مگاپاسکال و از حدود 14٪ به 18٪ افزایش یافته است و سپس به 11٪ کاهش یافته است. بدتر شدن خواص کششی نمونه فراوری شده با سرعت پیشروی 80 میلی‌متر بر دقیقه نسبت به نمونه فراوری شده با سرعت 32 میلی‌متر بر دقیقه را می‌توان با بدتر شدن توزیع نانو پودر در ساختار مرتبط دانست. دلیل بدتر شدن خواص کششی نمونه فراوری شده با سرعت پیشروی 8 میلی‌متر بر دقیقه نسبت به نمونه فراوری شده با سرعت پیشروی 32 میلی‌متر بر دقیقه می‌توان با حفره‌های دیده شده ماکرو ساختار این نمونه توجیه کرد (جدول 2). که این نمونه هم همانند نمونه فراوری شده با سرعت دورانی 1600 دور بر دقیقه به علت بالا بودن شرایط دمایی فرایند و افزایش احتمال اغتشاش غیرطبیعی و جریان مغشوش ماده [12] احتمال ایجاد عیوبی مانند حفره و یا تونل در ساختار افزایش پیدا می‌کند که این عیوب هم بر خواص کششی تأثیر بسزایی دارند.

2- سختی

برای مشاهده تأثیر تعداد پاس بر روی سختی نمونه‌های نانو کامپوزیت تولید شده، نمونه‌های مربوط به آزمایش‌های شماره 2، 6 و 7 بررسی می‌شوند. همان‌طور که در شکل 4 هم نشان داده شده، سختی متوسط مربوط به این نمونه‌ها به ترتیب 116.92، 118.48 و 114.68 ویکرز است. که همه این مقادیر سختی نسبت به سختی متوسط فلز پایه مقدار بزرگ‌تری دارد. با افزایش تعداد پاس‌های فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، ذرات سیلیکونی کوچک‌تر و همچنین میزان انباشتگی نانو پودر اضافه شده کم‌تر می‌شوند همچنین با اعمال تعداد پاس‌های بیشتر فرآوری این ذرات هم‌محور‌تر می‌شوند. این دو عامل موجب کاهش ضریب انبساط حرارتی می‌شود. براون و همکاران [13] گزارش کرده‌اند که با افزایش تعداد پاس‌های فرآوری اصطکاکی اغتشاشی - هرچند که تغییرات دمایی در هر پاس تقریباً یکسان است - تنش‌های پسماند کاهش می‌یابد. با توجه به دو نکته اخیر، یعنی کاهش تنش پسماند و ضریب انبساط حرارتی با افزایش تعداد پاس، به نظر می‌رسد که دلیل اصلی کاهش تنش پسماند می‌تواند کاهش ضریب انبساط حرارتی پس از هر پاس باشد که دلیل کاهش ضریب انبساط حرارتی پس از هر پاس، ریزتر شدن، همگن‌تر شدن ریزساختار بعد از هر پاس فرآوری اصطکاکی اغتشاشی است.

برای بررسی اثر هندسه بین ابزار بر متوسط سختی به نتایج مربوط به آزمایش‌های شماره 2، 8 و 9 توجه می‌شود. با توجه به شکل 4، نمونه فراوری شده توسط ابزار مربعی - یعنی نمونه مربوط به آزمایش شماره 2 - دارای متوسط سختی بیشتری نسبت به نمونه‌های فرآوری شده توسط دیگر ابزارها دارد. دلیل این امر هم کوچک‌تر شدن اندازه ذرات سیلیکونی و نانو پودر و توزیع بهتر آن در زمینه آلومینیومی است. میزان کرنش پلاستیک مؤثر اعمال شده در ناحیه اغتشاش یافته، برای پین مربعی شکل بیشتر از دیگر پین‌ها است. کرنش مؤثر

بیشتر منجر به شکستن بیشتر ذرات سیلیکونی و توزیع بهتر و بیشتر نانو پودر تقویت کننده و همچنین دانه بندی ریزتر می شود.

با توجه به شکل 4 و نمونه های مربوط به آزمایش های 1، 2 و 3، با افزایش سرعت دورانی ابزار از 600 دور بر دقیقه تا 1600 دور بر دقیقه در سرعت پیشروی ثابت و یکسان، متوسط سختی از 104.86 به 126.79 و یکرز افزایش یافته است. به وجود آمدن چنین روندی در تغییرات سختی به میزان کاهش اندازه ذرات سیلیکونی [14] و همچنین توزیع بهتر و ریزتر شده نانو پودر تقویت کننده است.

برای بررسی تأثیر سرعت پیشروی بر خواص مکانیکی به نتایج مربوط به آزمون کشش و سختی نمونه های مربوط به آزمایش های 2، 4 و 5 توجه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل 4 مشاهده می شود که در یک سرعت ثابت و یکسان دروانی، با افزایش سرعت پیشروی از 8 تا 80 میلی متر بر دقیقه، میزان سختی متوسط افزایش می یابد. همان طور که قبلاً هم توضیح داده شد، با افزایش سرعت پیشروی ابزار، متوسط اندازه ذرات سیلیکونی افزایش می یابد و وضعیت توزیع نانو پودر و ذرات سیلیکونی بدتر می شود اما دیده می شود که سختی افزایش یافته است. برای این پدیده یک استدلال وجود دارد:

به خاطر نامطابق بودن ضریب انبساط حرارتی زمینه آلومینیومی و ذرات تقویت کننده در نانو کامپوزیت تولیدشده، تنش های حرارتی کششی در کامپوزیت ایجاد می شود. تنش های حرارتی کششی باعث ایجاد تمرکز تنش در ناحیه اتصال زمینه به ذرات تقویت کننده کامپوزیت می شود. در نتیجه در اثر آزاد شدن تنش و تغییر شکل زمینه به ناچار در ساختار نابعثی ایجاد می شود و تغییر شکل پلاستیکی ناشی از ناهمگونی ضریب انبساط حرارتی، چگالی نابعثی ها را افزایش می دهد [15 و 14].

1- سایش

از شکل 5 و با توجه به آزمایش های 2، 6 و 7، واضح است که نمونه های نانو کامپوزیت فراوری شده با تعداد پاس های مختلف دارای کاهش وزن کمتری نسبت به نمونه آلیاژ ریخته گری هستند. اما این میزان کاهش وزن با تغییر تعداد پاس تغییر کرده است. بدین صورت که بیشترین کاهش وزن و در نتیجه کمترین مقاومت به سایش مربوط به نمونه 1 پاسه است و بهترین نمونه هم نمونه 4 پاسه است. دلیل اینکه نمونه با یک پاس فرآوری کاهش وزن بیشتری داشته این است که در این نمونه به دلیل کامل انجام نشدن فرآوری و تجمع نانو پودر در بخش های مختلف آن، چسبندگی لازم بین نانو پودر اضافه شده و فاز زمینه ایجاد نشده و در نتیجه نانو ذرات اضافه شده به راحتی از سطح جدا می شوند و باعث سایش بیشتر ماده می شوند. با افزایش تعداد پاس ها توزیع بهتر شده و علی رغم کاهش سختی، مقاومت به سایش بالا رفته است.

با توجه به نمودار های مربوط به آزمایش های شماره 2، 8 و 9 در شکل 5، کمترین کاهش وزن مربوط به آزمایش فرآوری به کمک ابزار مربعی شکل است و بیشترین کاهش وزن هم مربوط به نمونه فرآوری شده به کمک ابزار با پین استوانه ای شکل است. علت آن را می توان این گونه بیان کرد که میزان کرنش پلاستیک مؤثر

اعمال شده در ناحیه اغتشاش یافته، برای پین مربعی شکل بیشتر از دیگر پین ها است. کرنش مؤثر بیشتر منجر به شکستن بیشتر ذرات سیلیکونی توزیع بهتر نانو پودر تقویت کننده و در نتیجه دانه بندی ریزتر می شود. [11] و دانه بندی ریزتر و اندازه ذرات سیلیکونی ریزتر در ریزساختار موجب افزایش سختی می شود.

برای بررسی اثر سرعت دورانی بر میزان کاهش وزن به نتایج مربوط به آزمون سایش نمونه آزمایش های 1، 2 و 3 در شکل 5 توجه می کنیم. در این شکل واضح است که نمونه های نانو کامپوزیت فراوری شده با سرعت های دورانی مختلف دارای کاهش وزن کمتری نسبت به نمونه آلیاژ ریخته گری شده دارند. اما این میزان کاهش وزن با تغییر سرعت دورانی ابزار تغییر کرده است. در این نمودار پیداست که با افزایش سرعت دورانی ابزار از 600 به 1600 دور بر دقیقه، میزان کاهش وزن نمونه ها از 22.2 به 16.7 میلی گرم کاهش یافته است. دلیل این اتفاق را می توان با بررسی نتایج مربوط به ریزساختار این نمونه ها و همچنین میزان سختی آن ها توجیه کرد. همان طور که در بخش قبل گفته شد با افزایش سرعت دورانی میزان سختی نمونه ها افزایش می یابد. کاهش متوسط اندازه ذرات هم موجب افزایش سختی و استحکام [14] و افزایش مقاومت به سایش می شود [16].

در نمودار 5 پیداست که با افزایش سرعت پیشروی ابزار از 8 به 32 و سپس 80 میلی متر بر دقیقه، میزان کاهش وزن نمونه ها به ترتیب 25.2، 18.9 و 14.4 میلی گرم کاهش یافته است. دلیل این اتفاق را می توان با بررسی نتایج مربوط به سختی این نمونه ها توجیه کرد.

نتیجه گیری

- 1- فراوری اصطکاکی اغتشاشی موجب بهبود استحکام، سختی و خواص سایشی آلیاژ LM13 می شود.
- 2- افزایش سرعت دورانی و تعداد پاس ها باعث بالارفتن استحکام کششی و کرنش می شود. افزایش سرعت پیشروی باعث کاهش کرنش می شود. هر چند تاثیر خاصی روی استحکام کششی ندارد.
- 3- اضافه کردن پودر کربن نانوتیوب روی پاس اول فراوری سختی را نسبت به نمونه ریخته گری افزایش می دهد، هر چند با بکار بردن پاس های بعد سختی بعد از هر پاس کاهش می یابد که دلیل آن می تواند انحلال رسوباتی مانند Mg_2Si باشد. به محض افزایش سرعت دورانی اندازه دانه ها کاهش می یابد لذا سختی افزایش می یابد. با افزایش سرعت پیشروی اندازه دانه ها بزرگتر و توزیع ذرات بخصوص در پین های مربعی ناهمگن تر می شود و در نتیجه سختی افزایش می یابد. دلیل آن رشد و افزایش چگالی نابه جایی ها که منجر به افزایش گرادیان گرمایی می شود می باشد.
- 4- خواص سایش ماده تا حد زیادی به سختی نمونه وابسته است اما افزایش تعداد پاس های فرآیند بدلیل بهبود توزیع ذرات مقاومت به سایش بیشتر می شود.
- 5- با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش های تجربی و تحلیل های انجام شده بهترین سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه و بهترین سرعت پیشروی 32 میلیمتر بر دقیقه می باشد.
- 6- بهترین پروفیل و شکل پین ابزار، ابزار مربعی می باشد.

- 7- تعداد پاس مناسب برای این فرآیند با توجه به آزمایش ها 3 پاس می باشد.
- 8- با توجه مجموع نتایج بدست آمده از این آزمایش، نمونه شماره 2 بهترین نمونه مورد آزمایش است.

مراجع

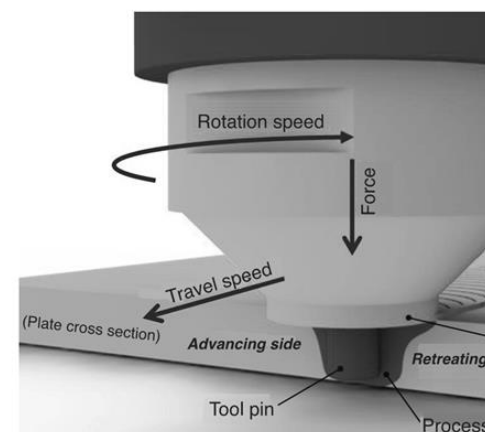
1. C. G. Rhodes, M. W. Mahoney, W. H. Bingel, and M. Calabrese, "Fine-grain evolution in friction-stir processed 7050 aluminum," *Scripta Materialia*, vol. 48, no. 10, pp. 1451-1455, 2003.
2. R. S. Mishra, P. S. De, and N. Kumar, 2014, *Friction Stir Welding and Processing*.
3. R. M. Miranda, J. P. Gandra, P. Vilaca, L. Quintino, and T. G. Santos, "Surface modification by solid state processing." 2014, Woodhead Publishing, Burlington.
4. V. V. K. Narayan Prabhu, Review of Microstructure Evolution in Hypereutectic Al-Si Alloys and its Effect on Wear Properties, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 67, no. 1, pp. 1-18, 2014.
5. J. Clarke, A. D. Sarkar, Wear characteristics of as-cast binary aluminium-silicon alloys, *Wear*, vol. 54, no. 1, pp. 7-16, 1979.
6. K. Nakata, Y. G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, and T. Komazaki, "Improvement of mechanical properties of aluminum die casting alloy by multi-pass friction stir processing," *Material and Science Engineering. A*, vol. 437, no. 2, pp. 274-280, 2006
7. M. Barmouz, M. K. Besharati Givi, and J. Seyfi, "On the role of processing parameters in producing Cu/SiC metal matrix composites via friction stir processing: Investigating microstructure, microhardness, wear and tensile behavior," *Materials Characterization*, vol. 62, no. 1, pp. 108-117, Jan. 2011
8. Q. G. Wang, Microstructural Effects on the Tensile and Fracture Behavior of Aluminum Casting Alloys A356 / 357, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 34, no.1, pp. 2887-2899, 2003.
9. Popov, V., 2004. Carbon nanotubes: properties and application. *Materials Science and Engineering*, R43, 61-102
10. Sharma, S.R., Z. Ma, and R.S. Mishra, *Effect of friction stir processing on fatigue behavior of A356 alloy*. *Scripta Materialia*, 2004. 51(3): p. 237-241.
11. Buffa, G., et al., A continuum based fem model for friction stir welding—model development. *Materials Science and Engineering: A*, 2006. 419(1): p. 389-396.
12. Kim, Y., et al., Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2006. 415(1): p. 250-254.
13. Brown, R., W. Tang, and A.P. Reynolds, Multi-pass friction stir welding in alloy 7050-T7451: Effects on weld response variables and on weld properties. *Materials Science and Engineering: A*, 2009. 513: p. 115-121.
14. Lee, I., et al., Particle-reinforced aluminum matrix composites produced from powder mixtures via friction stir processing. *Composites Science and Technology*, 2011. 71(5): p. 693-698.
15. Peng, J., et al., Study on the yield behavior of Al₂O₃-SiO₂ (sf)/Al-Si metal matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 2008. 486(1): p. 427-432.
16. Das, S., et al., Synergic effect of reinforcement and heat treatment on the two body abrasive wear of an Al-Si alloy under varying loads and abrasive sizes. *Wear*, 2008. 264(1): p. 47-59.

جدول 1 ترکیب شیمیایی ورق‌های آلومینیوم Lm13

تیتانیوم	روی	منگنز	منیزیوم	مس	آهن	سیلیسیم
0.2	0.5	0.61	0.9	1.2	1	12

جدول 2 پارامترهای در نظر گرفته شده در هر آزمایش و نتایج بازرسی های چشمی نمونه

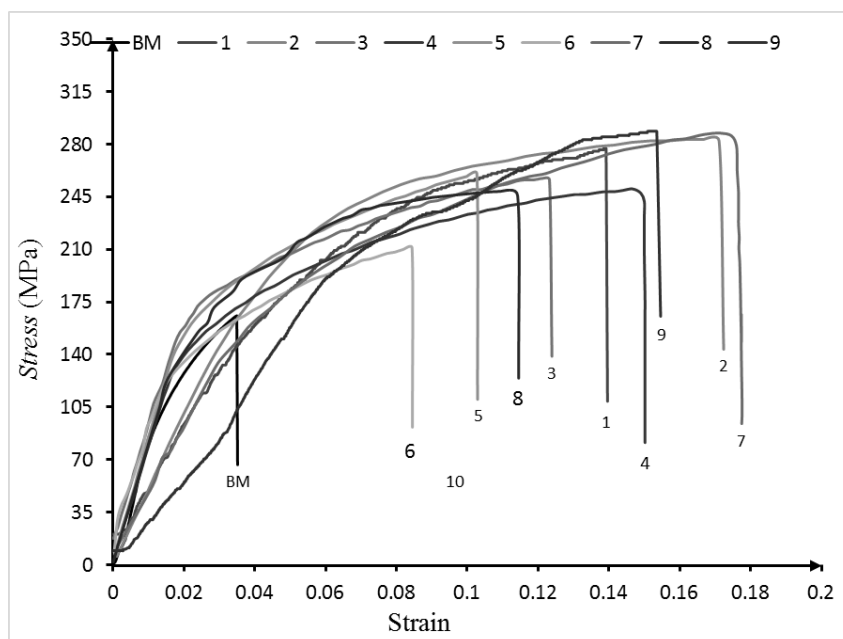
شماره آزمایش	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	هندسه ابزار	تعداد پاس	کیفیت سطح	عیوب ظاهری
1	600	32	مربعی	3	خوب	تجمع پودر
2	1000	32	مربعی	3	عالی	ندارد
3	1600	32	مربعی	3	نا مناسب	حفره کوچک
4	1000	8	مربعی	3	متوسط	حفره کوچک
5	1000	80	مربعی	3	عالی	تجمع پودر
6	1000	32	مربعی	1	عالی	تجمع پودر
7	1000	32	مربعی	4	خوب	ندارد
8	1000	32	استوانه‌ای	3	خوب	ندارد
9	1000	32	مثلثی	3	عالی	ندارد



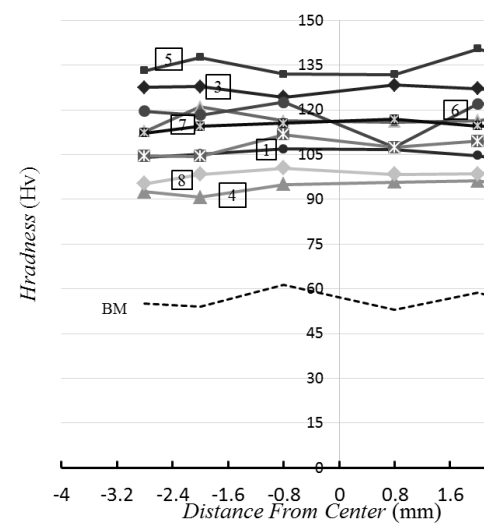
شکل 1: نمای کلی فراوری اصطکاکی اغتشاشی



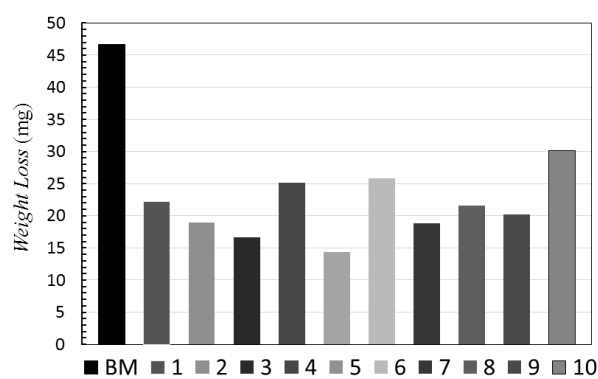
شکل 2: ابزارهای استفاده شده در فرایند



شکل 3: نمودار تنش کرنش نمونه های فراوری شده و فلز پایه



شکل 4: پروفیل سختی نمونه های فراوری شده و فلز پایه



شکل 5: نمودار کاهش وزن (سایش) نمونه های فراوری شده و فلز پایه