



اثر درصد هم پوشانی پاس ها و خنک کاری سریع در فرایند اصطکاک اغتشاشی بر روی ریز ساختار و مقاومت مکانیکی آلیاژ AZ31

علی علوی نیا^{۱*}، حمید امیدوار^۲، سید حسن نوربخش^۳

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲- استادیار دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه امیرکبیر، تهران

۳- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

* همدان، کد پستی ۶۵۱۷۵۴۱۶۱، alavi495@basu.ac.ir

چکیده- فرایند اصطکاک اغتشاشی، یک فرایند حالت جامد است که در گروه فرایندهای دارای تغییر شکل شدید قرار می گیرد و از آن برای تغییر ریز ساختار ماده استفاده می شود. این تغییر در ریزساختار که به واسطه تبلور مجدد دینامیکی ایجاد می شود، خواص مکانیکی ماده را تغییر می دهد. منیزیم سبک ترین فلز سازه ای است که استفاده گسترده ای در صنایع خودروسازی و هوافضا دارد. در این تحقیق سطح آلیاژ AZ31 با استفاده از هم پوشانی پاس ها، تحت فرایند اصطکاک اغتشاشی قرار گرفته است. هم پوشانی ها در دو حالت ۵۰ و صفر درصد انجام شدند. به منظور کنترل دما و جلوگیری از افزایش زیاد دما در حین انجام فرایند، از خنک کاری سریع استفاده شد. فرایند اصطکاک اغتشاشی باعث شد که ساختار غیریکنواخت ماده خام با اندازه دانه های متوسط ۱۸ میکرومتر به ساختاری یکنواخت در حالت هم پوشانی صفر درصد به اندازه دانه هایی در حدود ۷ میکرومتر کاهش، تنش نهایی ۲۹/۹ و تغییر شکل ۱۹/۸ درصد نسبت به ماده خام افزایش یابد. در حالت هم پوشانی ۵۰٪ یکنواختی اندازه دانه ها کمتر از حالت صفر درصد شد و تنش نهایی ۱۹/۹۸ و تغییر شکل ۳/۹ درصد نسبت به ماده خام افزایش یافت.

کلید واژگان: اصطکاک اغتشاشی، منیزیم، خنک کاری، هم پوشانی.

Effect of overlapping ratio and rapid cooling in friction stir process on the microstructure and mechanical properties of AZ31 alloy

A. Alavi Nia^{1*}, H. Omidvar², S. H. Nourbakhsh³

1- Assoc. Prof., Mech. Eng., Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran

2- Assist. Prof., Mining and Metallu. Eng., Polytechnic Univ., Tehran, Iran

3- PhD Student, Mech. Eng., Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran

* P. O.B. 651754161, Hamedan, Iran. alavi495@basu.ac.ir

Abstract- Friction stir process is one of the severe plastic deformation techniques which causes microstructure refinement and hence change in mechanical properties of the specimen. Temperature, strain and strain rate which are the results of this process, causing dynamic recrystallization and followed by shift in mechanical properties. Magnesium is the lightest structural alloy which is used in a wide range, in the automobile and aerospace industries. In this research, the overlapping friction stir process is applied on the surface of AZ31 alloy. The overlapping is conducted in 50 and 0 percentages. In order to reduce the temperature which is generated in the process, rapid cooling was used. After friction stir processing in the 0 percent overlapping the grains refine from 18 micrometer in the base metal to 7 micrometer with a uniform structure than the base metal, ultimate tensile strength and elongation increased 29.9% and 19.8%, respectively with respect to the base metal. The structural uniformity of 50 percent overlapping was less than that of 0 percent overlapping, ultimate tensile strength and elongation increased 19.98% and 3.9%, respectively with respect to the base metal.

Keywords: Friction Stir Process, Magnesium, Rapid Cooling, Overlapping.

۱- مقدمه

استفاده از منیزیم در صنایع مختلف از جمله صنایع خودروسازی به دلیل داشتن چگالی پایین و مقاومت ویژه (نسبت تنش نهایی به چگالی) بالا مورد توجه ویژه قرار گرفته است [۱]. به دلیل این که منیزیم ساختاری هگزاگونال^۱ دارد و صفحات لغزش آن در دمای اتاق محدود می‌باشد استفاده از آن دارای محدودیت است [۲]. ایجاد ساختاری یکنواخت با اندازه دانه‌های کوچک برای غلبه بر این مشکل از سوی محققان مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور فرایندهایی که تغییر شکل شدید در ماده ایجاد می‌کنند مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از این فرایندها، فرایند اصطکاک اغتشاشی^۲ است. این فرایند، یک فرایند حالت جامد است که در آن یک ابزار چرخنده، که از یک شانه^۳ و پین تشکیل شده است، داخل قطعه، وارد شده و با سرعت خطی و دورانی ثابتی در جهت مورد نظر حرکت می‌کند. در اثر حرکت خطی و دورانی، مواد از جلوی پین به پشت آن منتقل شده و در اثر این حرکت تحت فرایندهای اکستروژن و فورج با کرنش و نرخ کرنش بالا، همراه با تبلور مجدد دینامیکی^۴ قرار می‌گیرند. در این فرایند با توجه به جهت سرعت خطی و دورانی، دو ناحیه وجود دارد. طرفی که جهت خطی سرعت دورانی با جهت سرعت خطی مشابه است ناحیه پیشرو^۵ و طرفی که جهت خطی سرعت دورانی با جهت سرعت خطی متفاوت است ناحیه پسرو^۶ نامیده می‌شود، این دو ناحیه باعث می‌شوند فرایند اصطکاک اغتشاشی نامتقارن باشد. فرایند اصطکاک اغتشاشی سه ناحیه به وجود می‌آورد، ناحیه اغتشاش^۷، که تحت تأثیر بیشترین کار مکانیکی و دما، ناحیه ترمومکانیکال^۸ که تحت تأثیر کار مکانیکی و دمای کمتری نسبت به ناحیه اغتشاش و ناحیه‌ای که فقط متأثر از حرارت^۹ است. اندازه دانه‌ها به ترتیب از ناحیه اغتشاش به سمت ناحیه ترمومکانیکال و سپس ناحیه متأثر از دما افزایش و یکنواختی در توزیع دانه‌ها کاهش می‌یابد.

فرایند اصطکاک اغتشاشی به صورت گسترده‌ای بر روی آلومینیوم و در حد کمتری بر روی منیزیم انجام شده است. این فرایند به دو صورت مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حالت اول پین در یک مسیر مشخص حرکت می‌کند و خواص مکانیکی و ریزساختاری در راستای این مسیر و یا عمود بر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. ناحیه تحت تأثیر قرار گرفته از فرایند اصطکاک اغتشاشی در این حالت، در حدود ابعاد پین است. به این حالت، فرایند یک پاس می‌گویند. با استفاده از پین با قطر ۸ میلی‌متر، بعد از انجام فرایند اصطکاک اغتشاشی یک پاس، ناحیه‌ای به اندازه ۱۰-۱۴ میلی‌متر تحت تأثیر قرار می‌گیرد و ریزدانه می‌شود، این ناحیه کوچک برای استفاده‌های مهندسی ممکن است مناسب نباشد [۳]. روش دیگری که جدیداً مورد استفاده قرار گرفته، استفاده از هم‌پوشانی پاس‌ها می‌باشد. در این روش، ناحیه ریزدانه شده هر پاس به میزان مشخصی با ناحیه ریزدانه پاس بعدی هم‌پوشانی می‌کند تا سطح مورد نظر با عرض دلخواه ایجاد شود.

در برخی از تحقیقات، فرایند اصطکاک اغتشاشی به صورت یک پاس بر روی آلیاژ منیزیم AZ31 [۴-۸]، انجام شده است. همان‌طور که گفته شد با توجه به اینکه ناحیه ایجاد شده از حالت یک پاس محدود می‌باشد، اخیراً انجام فرایند اصطکاک اغتشاشی به صورت هم‌پوشانی به منظور ایجاد سطح دلخواه مورد توجه محققان قرار گرفته، در این زمینه تحقیقاتی بر روی آلومینیوم صورت پذیرفته که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود ولی در مورد منیزیم تقریباً گزارشی ارائه نشده است.

یکی از فلزاتی که برای هم‌پوشانی مورد توجه محققان قرار گرفته آلومینیوم ۷۰۷۵ است [۹-۱۱]. دوتا و همکاران [۹] با استفاده از هم‌پوشانی ناحیه‌ای با عرض ۸۰ میلی‌متر و جواز و میشر [۱۰] ناحیه‌ای متشکل از هم‌پوشانی ۴ پاس ایجاد کردند. در هر دو تحقیق خواص سوپر پلاستیسیته ناحیه ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته، به صورتی که در نرخ کرنش ۰.۰۱ و دمای ۷۲۳ درجه کلون دوتا و همکاران [۹] به ازدیاد طولی برابر با ۳۷۸٪ دست یافتند. سو و همکاران [۱۱] با استفاده از خنک‌کاری سریع در حین انجام فرایند هم‌پوشانی دانه‌هایی را با اندازه‌ای در حدود ۲۵۰ نانومتر در آلومینیوم ۷۰۷۵ مشاهده کردند.

ناکاتا و همکاران [۱۲] آلومینیوم ریختگری شده ADC12، ما و همکاران [۳] آلومینیوم ریختگری شده A356 و ناشیمنتو و همکاران [۱۳] آلومینیوم ۵۰۸۳ و ۷۰۷۲ را مورد هم‌پوشانی

1. Hcp
2. Friction Stir Process
3. Shoulder
4. Dynamic Recrystallization
5. Advance Side
6. Retreating Side
7. Nugget
8. Thermo-Mechanical Affected Zone
9. Heat Affected Zone

تنها گزارشی که در مورد اثر هم‌پوشانی پاس‌ها بر روی آلیاژ منیزیم AZ31 ارائه شده است توسط ونکاتسوارلو و همکاران [۷] می‌باشد. در این تحقیق اثر هم‌پوشانی با درصدهای متفاوت، صفر، ۵۰ و ۱۰۰٪ مورد بررسی قرار گرفته و گزارش شده که هم‌پوشانی ۱۰۰٪، ناحیه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت‌تر و مقاومت مکانیکی بالاتری را ایجاد می‌کند ولی هم‌پوشانی با ۵۰٪، ناحیه‌ای با مقاومت مکانیکی پایین‌تر نسبت به بقیه حالت‌ها ارائه می‌کند. در این تحقیق اشاره‌ای به چگونگی انجام فرایند که آیا پاس بعدی بلافاصله بعد از خاتمه پاس اول صورت پذیرفته یا نه، تأثیر این هم‌پوشانی‌ها بر روی خواص مکانیکی در جهت عمود بر راستای انجام فرایند و نحوه تغییر در ریزساختار در اثر هم‌پوشانی‌های متفاوت و همچنین نمودارهای تنش-کرنش ارائه نشده است تا تأثیر هم‌پوشانی در مقابل فرایند یک پاس مورد بررسی قرار گیرد. موضوع جالب دیگری که این تحقیق را متمایز می‌کند استفاده از خنک‌کاری سریع در کل فرایند می‌باشد که باعث می‌شود دمای شروع هر پاس برابر با دمای اتاق بوده و در حین فرایند نیز دمای فرایند تا حد امکان کاهش یابد که باعث جلوگیری از رشد دانه‌ها می‌شود. علاوه بر این موارد، با استفاده از خنک‌کاری سریع می‌توان فرایند را به صورت متوالی انجام داد و بدین صورت زمان لازم برای ساخت سطح مورد نظر را کاهش داد. با توجه به این که مقاومت کششی آلیاژ AZ31 در دمای اتاق کم می‌باشد، در این تحقیق هم‌پوشانی پاس‌ها به صورت صفر و ۵۰ درصد بر روی آلیاژ AZ31 انجام شد و پس از انجام هم‌پوشانی در فرایند اصطکاک اغتشاشی، خواص مکانیکی و ریزساختار ماده مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش انجام آزمایش

آلیاژ منیزیم AZ31 مورد استفاده در این تحقیق، دارای درصد عناصری مطابق با جدول ۱ می‌باشد. قطعات منیزیم در ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی‌متر با ضخامت ۱۰ میلی‌متر برش‌کاری و آماده شدند. به منظور بررسی اثر خنک‌کاری سریع، در فرایند اصطکاک اغتشاشی، قالبی مطابق با شکل ۱- الف آماده شد.

جدول ۱ درصد عناصر تشکیل دهنده AZ31

Mg	Al	Cl	Mn	Zn
۹۵/۵	۲/۸۲	۰/۱۸	۰/۴۲	۰/۹۴

پاس‌ها در فرایند اصطکاک اغتشاشی قرار دادند و خواص مکانیکی در دمای اتاق و ریز ساختار ناحیه ایجاد شده را مورد بررسی قرار دادند. در تحقیقات آن‌ها خواص مکانیکی در دو جهت، راستای انجام فرایند و عمود بر راستای انجام فرایند بررسی شد. ناکاتا و همکاران [۱۲] مشاهده کردند که مقاومت مکانیکی و شکل پذیری این ناحیه در جهت فرایند و عمود بر آن تقریباً مشابه و بیشتر از فلز پایه است.

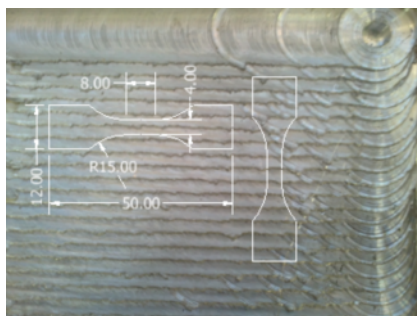
هم‌پوشانی پاس‌ها به دو صورت، با استفاده از ناحیه پیشرو یا پسرو می‌تواند انجام شود، گاندر و همکاران [۱۴] اثر هر یک از این نوع هم‌پوشانی‌ها بر روی ریز ساختار و مقاومت خمشی آلومینیوم ۵۰۸۳ مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که هم‌پوشانی با طرف پیشرو لایه‌ای یکنواخت‌تر و هم‌پوشانی با طرف پسرو، لایه‌ای با مقاومت بالاتر ایجاد می‌کند ولی توزیع سختی هر دو حالت یکسان بود. در هم‌پوشانی پاس‌ها موضوع دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد نحوه شروع پاس بعدی است. آیا بلافاصله بعد از خاتمه پاس باید پاس بعدی شروع شود یا به قطعه فرصت داده شود تا دمای آن در حدود دمای اتاق کاهش یابد و پاس بعدی شروع شود. این موضوع در تحقیق رامش و همکاران [۱۵] بر روی آلومینیوم ۵۰۸۶ مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها مشاهده کردند در هر دو حالت که پاس بعدی بلافاصله بعد از اتمام هر پاس شروع شود و یا این که بعد از خاتمه پاس به قطعه اجازه داده شود تا دمای آن به دمای محیط برسد و پاس بعدی شروع شود، خواص مکانیکی نسبت به حالت یک پاس و حتی ماده خام کاهش می‌یابد. آن‌ها نمونه‌های کشش را از ناحیه هم‌پوشانی در راستای انجام فرایند (حرکت پین) و راستای عمود بر انجام فرایند تهیه کردند. نتایج نشان داد که مقاومت کششی در راستای عمود بر انجام فرایند در هر دو حالت هم‌پوشانی، کمتر از مقاومت کششی در راستای انجام فرایند می‌باشد. آن‌ها مشاهده کردند که مقاومت کششی حالتی که در آن قطعه کار اجازه پیدا می‌کرد تا دمایش به دمای اتاق برسد و پاس بعدی شروع شود، بهتر از حالت دیگر هم‌پوشانی بود.

پاردیپ و پانچولی [۱۶] فرایند هم‌پوشانی پاس‌ها را بر روی آلومینیوم ۵۰۸۶ در دو حالت متفاوت از سرعت دورانی و خطی انجام دادند و خواص سوپر پلاستیسیته را بررسی کردند. حالتی که در آن به واسطه سرعت دورانی کمتر و سرعت خطی بالاتر دمای کمتری در قطعه ایجاد شده بود، نتایج بهتری داشت.

پین و OR^1 درصد هم پوشانی است.

کل فرایند به صورت متوالی انجام شد، به دلیل استفاده از خنک کاری سریع، دمای قطعه قبل از شروع هر پاس هیچ تفاوتی با دیگر پاس ها نداشت و تجمیع حرارت در قطعه رخ نداد. هم پوشانی ها با استفاده از ناحیه پسرو انجام شدند. در شکل های ۲- الف و ۲- ب ناحیه های هم پوشانی شده در دو حالت ۵۰٪ و صفر درصد نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود تعداد پاس ها در حالت هم پوشانی صفر درصد کمتر از هم پوشانی ۵۰ درصد می باشند.

نمونه های کشش مطابق شکل ۲- الف با استفاده از دستگاه وایرکات^۲ در راستای انجام فرایند و عمود بر آن، جدا و سپس به منظور حذف اثرات سطحی، پولیش کاری شدند. آزمایش های کشش با استفاده از دستگاه سنتام به ظرفیت ۵ تن انجام شدند.



الف- ناحیه هم پوشانی ۵۰٪



ب- ناحیه هم پوشانی ۰٪
شکل ۲ نواحی هم پوشانی

این آزمایش ها با نرخ کرنش ۰/۰۱ انجام شدند. میکرو سختی نمونه ها با استفاده از دستگاه میکرو سختی بوهرلر^۳،

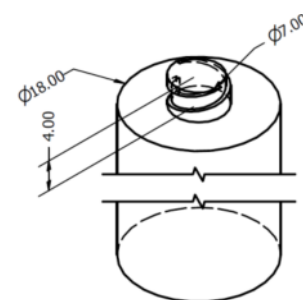
قالب متشکل از یک قطعه مسی (به دلیل انتقال حرارت سریع بین ماده خنک کننده و قطعه کار) می باشد که نمونه AZ31 بر روی آن قرار می گیرد و مایع خنک کننده از داخل شیارهایی که درون مس تعبیه شده است عبور می کند. انتقال حرارت از کف پین به صفحه پشتی، نخستین مرحله از اتلاف حرارت ایجاد شده در فرایند است [۴]. به همین دلیل از این نوع خنک کاری استفاده شد. برای خنک کاری از آب با دمای ۱۰ درجه سانتی گراد و دبی ۱/۵ لیتر بر دقیقه استفاده شد.

همان طور که در شکل ۱- ب مشاهده می شود اندازه های قطر شانه، قطر پین و طول پین به ترتیب، برابر با، ۱۸، ۷ و ۴ میلیمتر و گام رزوه پین ۳ میلی متر به صورت راست گرد در نظر گرفته شد. فرایند با سرعت دورانی و خطی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و ۵۸ میلی متر بر دقیقه با هم پوشانی صفر و ۵۰ درصد طبق رابطه (۱) [۱۳-۱۴] انجام شد.

$$OR = l - \left[\frac{l}{d_{pin}} \right] \quad (1)$$



الف- قالب مورد استفاده برای خنک کاری

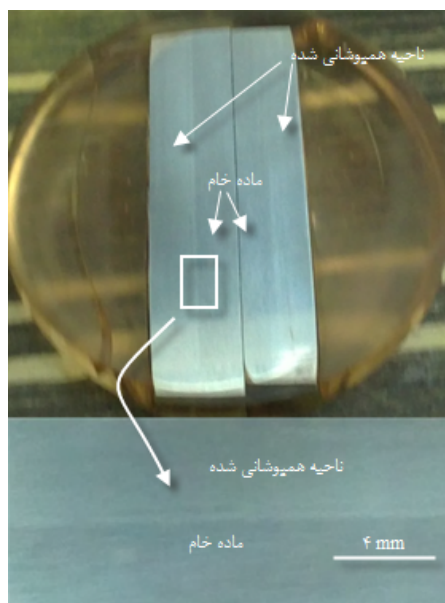


ب- ابعاد پین

شکل ۱ قالب و پین مورد استفاده

در این رابطه l فاصله بین مرکز دو پاس متوالی، d_{pin} قطر

1. Overlap Ratio
2. Electro Discharge Machine
3. Buehler



الف - هم‌پوشانی ۵۰٪



ب - هم‌پوشانی صفر درصد

شکل ۳ ماکروساختار ناحیه هم‌پوشانی شده.

حرارت ایجاد شده در زیر شانه که با سطح قطعه در تماس است بیشتر از بقیه نواحی بوده و همچنین گرادیان دما از سطح قطعه (بالای ناحیه هم‌پوشانی) به سمت پایین ناحیه هم‌پوشانی می‌باشد. با توجه به استفاده از خنک‌کاری سریع در حین فرایند، گرادیان دمایی از شدت بیشتری برخوردار و دمایی پایین ناحیه هم‌پوشانی کمتر از بالای ناحیه هم‌پوشانی شده، این موضوع باعث ایجاد تفاوت در اندازه دانه‌های در بالا و پایین ناحیه هم‌پوشانی شده است.

در شکل ۴-الف، ساختار آلیاژ AZ31 مورد استفاده در این تحقیق که دارای حالتی غیریکنواخت از نظر اندازه دانه با متوسط اندازه دانه‌هایی برابر با ۱۸ میکرومتر است نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-ج و ۴-د، اندازه متوسط دانه‌ها، در کف ناحیه هم‌پوشانی ۵۰٪ برابر با ۴/۲ میکرومتر و در سطح برابر ۷/۵۲ میکرومتر ولی در هم‌پوشانی صفر درصد، اندازه دانه‌ها، در کف ناحیه هم‌پوشانی شده برابر ۶/۱۵ میکرومتر و در

تحت شرایط ۱۰۰ گرم-نیرو و ۱۵ ثانیه اندازه‌گیری شدند. پس از اچ^۱ کردن سطح نمونه‌ها با محلول ۴/۲ پیکریک اسید، ۱۰ میلی‌لیتر استیک اسید، ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۷۰ میلی‌لیتر اتانول، ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری یونیون^۲ مشاهده شد.

۳- بررسی ریزساختار

در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب، تصویر نواحی مختلف آلیاژ AZ31 بعد از هم‌پوشانی دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود ناحیه انتقال بین پاس‌ها و نوارهای پیازی شکل^۳ در حالت هم‌پوشانی ۵۰٪ دیده نمی‌شود. نی و همکاران [۱۷] دلیل این موضوع را، دو بار تحت فرایند قرار گرفتن ناحیه انتقال بیان کردند. رامش و همکاران [۱۵] این حالت را در فرایند هم‌پوشانی به صورت متوالی که در آن دمای قطعه قبل از شروع پاس بعدی تا دمای اتاق کاهش نمی‌یابد، مشاهده کردند. در شکل ۳-ب که هم‌پوشانی به صورت صفر درصد رخ داده است، این ناحیه انتقال به وضوح دیده می‌شود.

در شکل ۴، تصویر دانه‌ها و نحوه توزیع آن‌ها و نیز اندازه دانه در نواحی مختلف سطح هم‌پوشانی شده در هر دو حالت، نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴، پس از بررسی هر دو حالت هم‌پوشانی از لحاظ ریز ساختار، ملاحظه شد توزیع اندازه دانه‌ها در عرض ناحیه هم‌پوشانی شده در هر دو حالت هم‌پوشانی ۵۰ و صفر درصد به صورت یکنواخت می‌باشد و حرارت ایجاد شده از پاس‌های متوالی تأثیری بر روی اندازه دانه‌های پاس قبلی نداشته و باعث رشد آن‌ها نشده (تغییرات در حدود ۱۰ درصد بود)، این موضوع توسط محققان دیگر نیز ذکر شده است [۱۵، ۱۱، ۱۰]. سو و همکاران [۱۱] دلیل این پدیده را به این صورت بیان کردند که دانه‌های تبلور مجدد یافته در فرایندهای دما بالا، پایداری بیشتری دارند و همچنین به دلیل خنک‌کاری سریع، دما به سرعت کاهش یافته و زمان لازم برای رشد مجدد دانه‌ها به وجود نمی‌آید.

در نواحی انتقال در حالت هم‌پوشانی صفر درصد که ریزساختار آن در شکل ۴-ب نشان داده شده است اندازه دانه (۵/۲ میکرومتر) کمتر از نواحی دیگر است، این موضوع توسط رامش و همکاران نیز گزارش شده است [۱۵].

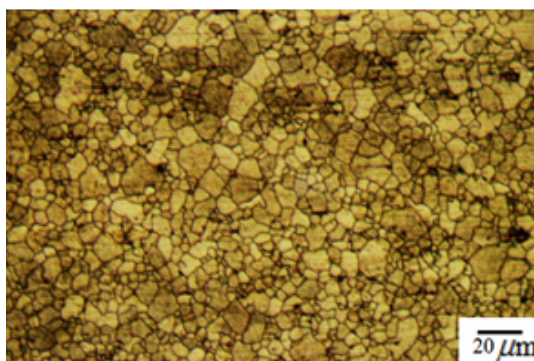
1. Etch
2. Union
3. Onion Rings

بدین ترتیب مرز دانه‌های ذرات تبلور مجدد یافته به عنوان مراکز جوانه زنی جهت تبلور مجدد بعدی عمل می‌کنند و در نتیجه اندازه دانه‌ها کوچک‌تر از حالت هم‌پوشانی صفر درصد شده است.

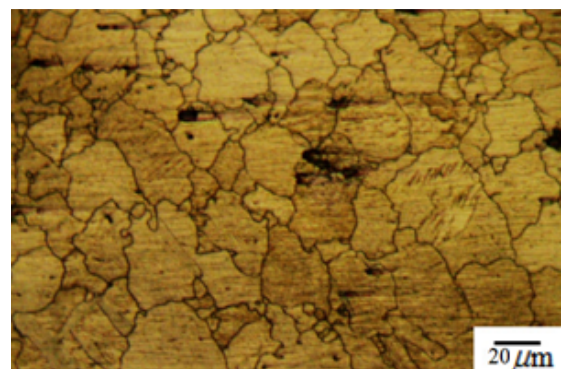
۴- میکروسختی

شکل‌های ۵-الف و ۵-ب به ترتیب توزیع سختی در جهت عمود بر راستای انجام فرایند هم‌پوشانی و ضخامت (بالا به سمت پایین ناحیه هم‌پوشانی) را نشان می‌دهند.

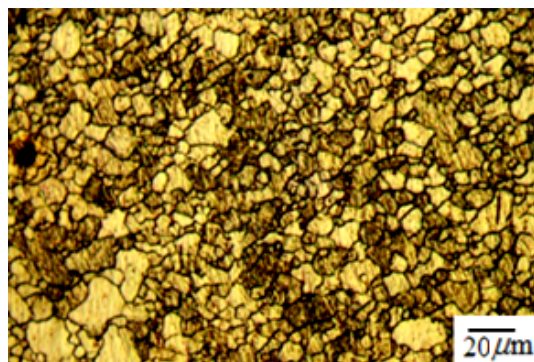
سطح برابر با ۸/۱ میکرومتر بود که در شکل ۴-ه و ۴-و قابل مشاهده است. سو و همکاران [۱۱] کاهش اندازه دانه از سطح قطعه (بالای ناحیه هم‌پوشانی شده) به سمت پایین ناحیه هم‌پوشانی شده در فرایند اصطکاک اغتشاشی را گزارش کردند، نی و همکاران [۱۷] دلیل این موضوع را به متفاوت بودن جریان مواد در بالا و پایین ناحیه هم‌پوشانی مرتبط دانسته‌اند. در هم‌پوشانی ۵۰٪ به این دلیل که مواد دو بار تحت فرایند اصطکاک اغتشاشی قرار می‌گیرند در دانه‌ها چندین بار تبلور مجدد اتفاق می‌افتد؛



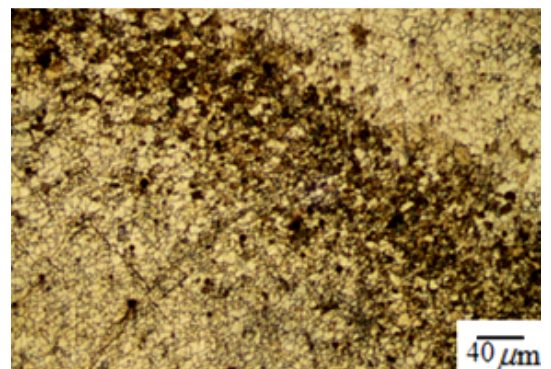
د- ناحیه بالای هم‌پوشانی در هم‌پوشانی ۵۰٪



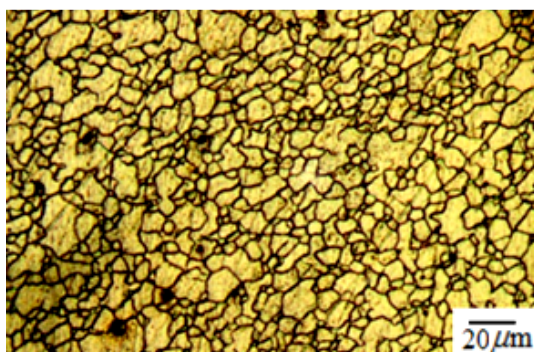
الف- ماده خام



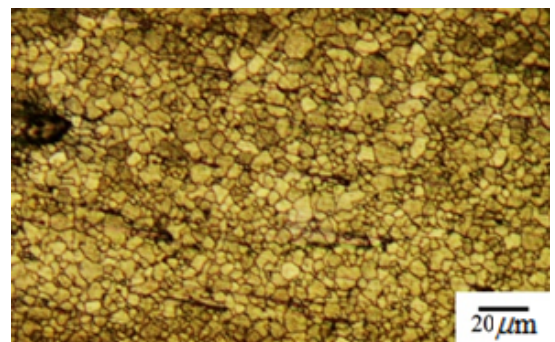
ه- ناحیه پایین هم‌پوشانی در هم‌پوشانی صفر درصد



ب- ناحیه انتقال در هم‌پوشانی صفر درصد



و- ناحیه بالای هم‌پوشانی در هم‌پوشانی صفر درصد



ج- ناحیه پایین هم‌پوشانی در هم‌پوشانی ۵۰٪

شکل ۴ اندازه دانه نواحی مختلف

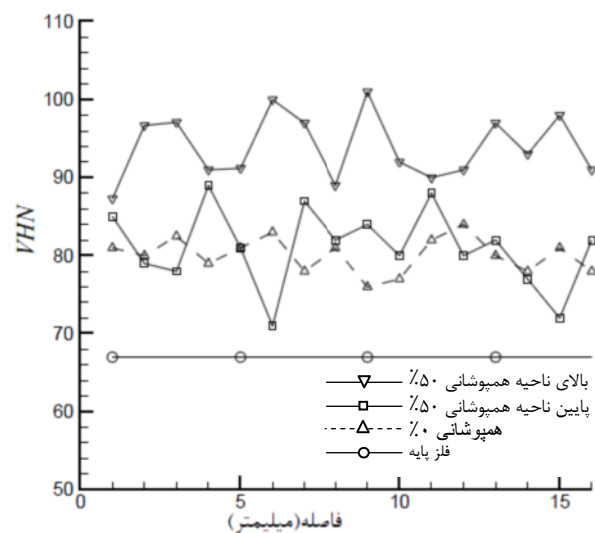
همان‌طور که در بخش ریزساختار بررسی شد، هم‌پوشانی ۵۰٪ در راستای ضخامت تغییر بیشتری در اندازه دانه نسبت به هم‌پوشانی صفر درصد دارد و همین موضوع باعث شده که سختی در راستای ضخامت، همان‌طور که در شکل ۵-ب نشان داده شده، به صورت یکنواخت نباشد ولی در راستای عرضی همان‌طور که در شکل ۵-الف ملاحظه می‌شود توزیع سختی یکنواخت است که این موضوع با یکنواخت بودن اندازه دانه‌ها در راستای عرضی که در بخش ریزساختار مورد مطالعه قرار گرفت همخوانی دارد. مقدار سختی در نواحی انتقال ناحیه هم‌پوشانی شده صفر درصد اندکی بیشتر از نواحی دیگر بود که این موضوع با ریزتر بودن اندازه دانه‌ها در این نواحی قابل توجیه است. افزایش سختی در نواحی انتقال توسط رامش و همکاران [۱۵] نیز گزارش شده است.

سختی متوسط در کل ناحیه‌ای که فرایند اصطکاک اغتشاشی به صورت یک پاس انجام شد به طور میانگین برابر با ۸۰ ویکرز می‌باشد. هم‌پوشانی صفر درصد و ناحیه زیر شانه، هم‌پوشانی ۵۰٪ که دارای اندازه دانه‌هایی برابر با حالت یک پاس هستند نیز سختی مشابه با حالت یک پاس دارند. این موضوع توسط نی و همکاران [۱۷] نیز مشاهده شده ولی رامش و همکاران [۱۵] سختی ناحیه هم‌پوشانی را کمتر از حالت یک پاس گزارش کرده‌اند. در تحقیق حاضر به دلیل استفاده از خنک‌کاری سریع، اندازه دانه‌ها در بعضی نواحی نسبت به حالت یک پاس کاهش یافته‌اند و همین موضوع باعث شده که سختی بیشتری مشاهده شود.

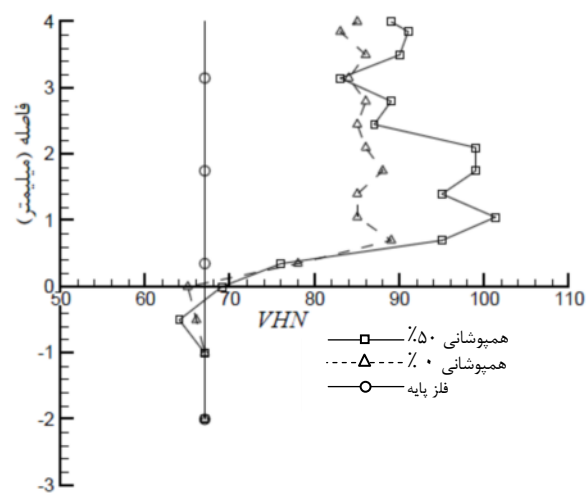
۵- بررسی خواص کششی

به منظور تعیین سرعت خطی مناسب برای انجام هم‌پوشانی در فرایند اصطکاک اغتشاشی، سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت‌های خطی ۲۸، ۴۰ و ۵۸ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شدند و فرایند اصطکاک اغتشاشی به صورت یک پاس صورت پذیرفت. نمودار تنش-کرنش مربوط به این بررسی‌ها در راستای انجام فرایند در شکل ۶-الف نشان داده شده است. لازم به ذکر است که فرایندهای یک پاس نیز همراه با خنک‌کاری سریع بود. همان‌طور که در شکل ۶-الف ملاحظه می‌شود سرعت خطی ۵۸ میلی‌متر بر دقیقه از لحاظ مقاومت کششی نتایج بهتری را نسبت به سایر سرعت‌ها ارائه می‌کند،

در حالت هم‌پوشانی صفر درصد به دلیل یکنواختی بیشتر اندازه دانه‌ها نسبت به حالت هم‌پوشانی ۵۰ درصد، سختی در فاصله ۲ میلی‌متری از بالای ناحیه هم‌پوشانی که وسط این ناحیه است اندازه‌گیری شده ولی در حالت هم‌پوشانی ۵۰ درصد، به دلیل تفاوت در اندازه دانه‌ها در بالا و پایین ناحیه هم‌پوشانی، سختی در دو ناحیه ۱ میلی‌متری و ۳ میلی‌متری از سطح اندازه‌گیری شده است. با توجه به شکل ۵ ملاحظه می‌شود که سختی ناحیه هم‌پوشانی شده در دو حالت هم‌پوشانی صفر و ۵۰ درصد بیشتر از ماده خام شده است.



الف- در راستای عمود بر جهت فرایند



ب- در راستای ضخامت

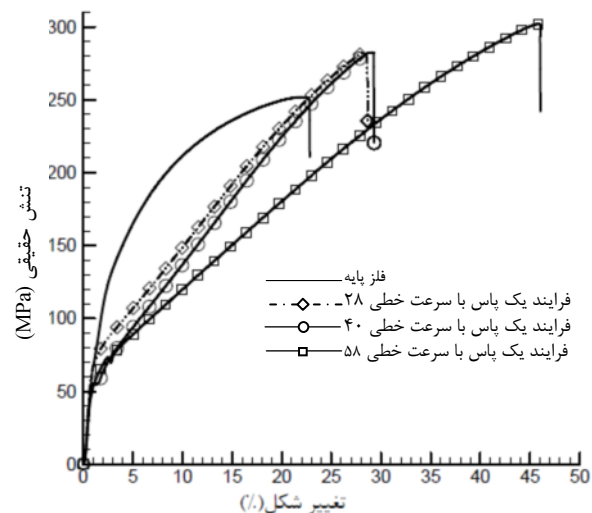
شکل ۵ توزیع سختی در ناحیه هم‌پوشانی شده

جدول ۲ تنش تسلیم، نهایی و تغییر شکل حالت‌های مختلف فرایند اصطکاک اغتشاشی

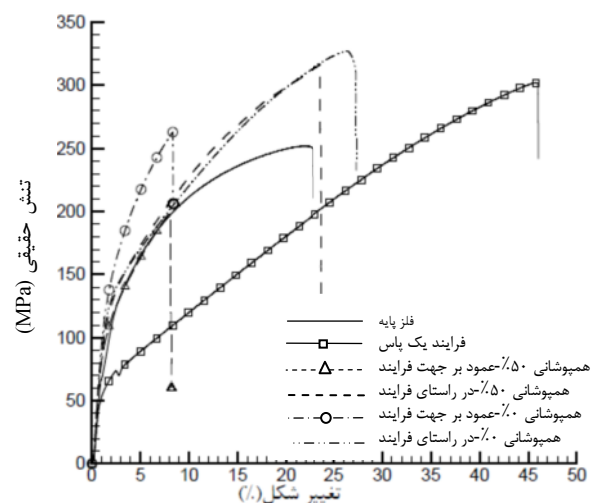
تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	تغییر شکل (%)	
۱۱۰/۱۵	۲۵۱/۸۰	۲۲/۸۲	ماده خام
۴۹/۳۲	۳۰۲/۱۱	۴۶/۰۴	فرایند یک پاس
۱۰۵/۹۹	۳۱۶/۴۴	۲۳/۷۱	هم‌پوشانی ۵۰٪ در راستای انجام فرایند
۸۷/۱۵	۱۹۷/۸۹	۸/۱۹	هم‌پوشانی ۵۰٪ در راستای عمود بر انجام فرایند
۱۱۷/۶۶	۳۲۷/۱۰	۲۷/۳۵	هم‌پوشانی صفر درصد- در راستای انجام فرایند
۱۱۰/۱۵	۲۶۲/۸۶	۸/۳۹	هم‌پوشانی صفر درصد- در راستای عمود بر انجام فرایند

کاهش شدید تنش تسلیم در حالت یک پاس ارتباط نزدیکی با بافت^۱ ماده دارد، در مواد هگزگونال، مقدار تنش تسلیم بیشتر از آن که از رابطه هال-پیچ^۲ تبعیت نماید از بافت ماده تأثیر می‌پذیرد [۱۸]. در اثر تغییر شکل‌های شدید برشی و فشاری که در حین فرایند اصطکاک اغتشاشی روی می‌دهد، صفحات لغزش اصلی در ناحیه تماس با شانه در جهت موازی با شانه و در ناحیه تماس با پین، در جهت موازی با سطح پین می‌چرخند [۱۹]. در نمونه‌های کششی که در جهت فرایند باشند صفحات لغزش اصلی نسبت به کشیدگی دوگلولی‌ها^۳ ترجیح داده می‌شوند و همین مورد باعث کاهش تنش تسلیم می‌شود [۸]. با توجه به اعداد موجود در جدول ۲ ملاحظه می‌شود که تنش نهایی در همه حالت‌ها به جز در جهت عمود بر اجرای فرایند در هم‌پوشانی ۵۰٪ افزایش یافته است. این موضوع را می‌توان به یکنواخت شدن و کاهش اندازه دانه‌ها مرتبط دانست. کاهش خواص مکانیکی در راستای عمود بر اجرای فرایند توسط ما و همکاران [۳] نیز گزارش شده است. خواص مکانیکی در راستای عمود بر راستای انجام فرایند در حالت هم‌پوشانی صفر درصد بهتر از حالت ۵۰٪ می‌باشد به صورتی که تنش نهایی ۴/۳۹ درصد نسبت به ماده خام افزایش یافته ولی تغییر شکل در هر دو حالت هم‌پوشانی از ماده خام کمتر شده است. کاهش خواص در راستای عمود بر انجام

بنابراین برای هم‌پوشانی‌ها از این سرعت خطی استفاده شد. نمودار تنش- کرنش مربوط به ناحیه‌های هم‌پوشانی در شکل ۶- ب و مقادیر عددی آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.



الف- فرایند اصطکاک اغتشاشی یک پاس



ب- فرایند اصطکاک اغتشاشی هم‌پوشانی شده

شکل ۶ نمودار تنش- کرنش

با توجه به شکل ۶- ب ملاحظه می‌شود که انجام فرایند اصطکاک اغتشاشی به صورت یک پاس باعث می‌شود تنش تسلیم کاهش بیشتری در مقایسه با فرایند اصطکاک اغتشاشی که به صورت هم‌پوشانی انجام شده، نسبت به ماده خام پیدا کند.

1. Texture
2. Hall-Petch
3. Extension Twinning

جلوگیری کرد که این موضوع باعث کاهش در زمان لازم برای هم‌پوشانی کل سطح قطعه می‌شود.

- در هم‌پوشانی ۵۰٪ ناحیه انتقال مشاهده نشد و توزیع اندازه دانه‌ها در عرض ناحیه هم‌پوشانی شده یکنواخت بود ولی در راستای ضخامت (بالا به سمت پایین ناحیه هم‌پوشانی) این یکنواختی وجود نداشت.

- در هم‌پوشانی صفر درصد یکنواختی اندازه دانه‌ها در عرض و ضخامت ناحیه هم‌پوشانی وجود داشت و از حالت ۵۰٪ بیشتر بود. در هم‌پوشانی صفر درصد ناحیه انتقال مشاهده شد.

- خواص مکانیکی هم‌پوشانی صفر درصد در هر دو راستای موازی با جهت انجام فرایند و عمود بر جهت انجام فرایند بهتر از هم‌پوشانی ۵۰٪ بود و نسبت به ماده خام افزایش یافتند.

- تنش تسلیم و نهایی ناحیه‌های هم‌پوشانی شده در راستای انجام فرایند از حالت یک پاس بیشتر بود که این افزایش در مورد تنش تسلیم به مراتب از مقدار بزرگ‌تری برخوردار بود ولی تغییر شکل کاهش یافت.

۷- تشکر و قدردانی

این تحقیق، تحت حمایت‌های صندوق حمایت از پژوهشگران انجام شده است، لذا نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از این سازمان تقدیر و تشکر نمایند.

۸- مراجع

- [1] Mordike B.L., Ebert T. "Magnesium: Properties-applications- potential", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 302, 2001, pp. 37-45
- [2] Kulekci M.K., "Magnesium and its alloys applications in automotive industry", *International Journal of Advanced Manufacture Technolgy*, 2008, pp. 15-39.
- [3] Ma Z.Y., Sharma S.R., Mishra R.S., "Effect of multiple-pass friction stir processing on microstructure and tensile properties of a cast aluminum-silicon alloy", *Scripta Materialia*, Vol. 54, 2006, pp.1623-1626
- [4] Chang C.I., Du X.H., Huang J.C., "Achieving ultrafine grain size in Mg-Al-Zn alloy by friction stir processing", *Scripta Materialia*, Vol. 57, 2007, pp. 209-212.
- [5] Darras B.M., Khraisheh M.K., Abu-Farha F.K., Omar M.A., "Friction stir processing of commercial AZ31 magnesium alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, 2007, pp. 77-81.

فرایند در حالت فرایند اصطکاک اغتشاشی یک پاس در گزارش یوآن و میسرا [۸] نیز گزارش شده است.

همان‌طور که در روند نمودارهای تنش- کرنش در شکل ۶- ب ملاحظه می‌شود، روند نمودار تنش-کرنش حالت‌های هم‌پوشانی با حالت یک پاس متفاوت است. این تفاوت را می‌توان به این گونه تفسیر کرد که در حالت یک پاس کل ناحیه مورد آزمایش^۱ در نمونه کشش فقط از ناحیه اغتشاش تشکیل شده است ولی در نمونه کشش‌هایی که از ناحیه هم‌پوشانی شده ساخته می‌شوند نواحی ترمومکانیکال و متأثر از حرارت نیز وجود دارند که وجود این نواحی باعث متفاوت شدن خواص مکانیکی می‌شوند، این موضوع توسط نی و همکاران [۱۷] نیز ذکر شده است. خنک‌کاری سریع باعث شده که نواحی ترمومکانیکال و متأثر از حرارت بسیار کوچک شده و قابل شناسایی نباشند و در قسمت بررسی ریزساختار نیز همان‌طور که بررسی شد اثری از این نواحی در هم‌پوشانی ۵۰ درصد مشاهده نشد ولی تأثیر خود را در نتایج مقاومت کششی ماده نشان داده‌اند. سو و همکاران [۱۱] به این موضوع در گزارش خود اشاره کرده‌اند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در قسمت ریز ساختار مشاهده شد که یکنواختی توزیع اندازه دانه‌ها در هم‌پوشانی صفر درصد بیشتر از هم‌پوشانی ۵۰٪ می‌باشد، همین موضوع باعث شده است که خواص مکانیکی هم‌پوشانی صفر درصد بهتر از هم‌پوشانی ۵۰٪ شود. در تحقیق ونکاتسوآرلو و همکاران [۷] نیز گزارش شده است که هم‌پوشانی صفر درصد، ناحیه ای با یکنواختی بیشتر از ۵۰٪ ایجاد می‌نماید.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق آلیاژ منیزیم AZ31 تحت فرایند اصطکاک اغتشاشی به صورت هم‌پوشانی قرار گرفت. به منظور کاهش دمای ایجاد شده در پاس‌های متوالی و اثر آن بر روی دیگر پاس‌ها از خنک‌کاری سریع استفاده شد. ریزساختار و خواص مکانیکی نواحی هم‌پوشانی شده مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر را می‌توان بیان کرد:

- با استفاده از خنک‌کاری سریع می‌توان فرایند هم‌پوشانی را به صورت متوالی انجام داد و از افزایش دمای قطعه کار

1. Gage Length

- [13] Nascimento F., Santos T., Vilaça P., Miranda R.M., Quintino L., "Microstructural modification and ductility enhancement of surfaces modified by FSP in aluminium alloys", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 506, 2009, pp. 16-22.
- [14] Gandra J., Miranda R.M., Vilaça P., "Effect of overlapping direction in multipass friction stir processing", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, 2011, pp. 5592-5599.
- [15] Ramesh K.N., Pradeep S., Pancholi V., "Multipass friction-stir processing and its effect on mechanical properties of aluminum alloy 5086", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, DOI: 10.1007/s11661-012-1232-3.
- [16] Pradeep S., Pancholi V., "Effect of microstructural inhomogeneity on superplastic behaviour of multipass friction stir processed aluminium alloy", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 561, 2013, pp. 78-87.
- [17] Ni D.R., Xue P., Ma Z.Y., "Effect of multiple-pass friction stir processing overlapping on microstructure and mechanical properties of as-cast nial bronze", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 2011, DOI: 10.1007/s11661-011-0628-9.
- [18] Agnew S.R., Horton J.A., Lillo T.M., Brown D.W., "Enhanced ductility in strongly textured magnesium produced by equal channel angular processing", *Scripta Materialia*, Vol. 50, 2004, pp. 377-381.
- [19] Yuan W., Mishra R.S., Carlson B., Mishra R.K., Verma R., Kubic R., "Effect of texture on the mechanical behavior of ultrafine grained magnesium alloy", *Scripta Materialia*, Vol. 64, 2011, pp. 580-583.
- [6] Hsu H.H., Hwang Y.M., "A Study on Friction Stir Process of Magnesium Alloy AZ31 Sheet", *Key Engineering Materials*, Vol. 340-341, 2007, pp. 1449-1454.
- [7] Venkateswarlu G., Devaraju D., Davidson M.J., Kotiveerachari B., Tagore G.R.N., "Effect of overlapping ratio on mechanical properties and formability of friction stir processed Mg AZ31B alloy", *Materials and Design*, Vol. 45, 2013, pp. 480-486.
- [8] Yuan W., Mishra R.S., "Grain size and texture effects on deformation behavior of AZ31 magnesium alloy", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 558, 2012, pp. 716-724.
- [9] Dutta A., Charit I., Johannes L.B., Mishra R.S., "Deep cup forming by superplastic punch stretching of friction stir processed 7075 Al alloy", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 395, 2005, pp. 173-179.
- [10] Johannes L.B., Mishra R.S., "Multiple passes of friction stir processing for the creation of superplastic 7075 aluminum", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 464, 2007, pp. 255-260.
- [11] Su J.Q., Nelson T.W., Sterling C.J., "Friction stir processing of large-area bulk UFG aluminum alloys", *Scripta Materialia*, Vol. 52, 2005, pp. 135-140.
- [12] Nakata K., Kim Y.G., Fujii H., Tsumura T., Komazaki T., "Improvement of mechanical properties of aluminum die casting alloy by multi-pass friction stir processing", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 437, 2006, pp. 274-280.