ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

doi 10.22034/IJME.2023.418064.1844

بررسی اثر تعداد پاس و تغییر جهت دوران ابزار بر توزیع ذرات تقویت‌کننده در فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی

حسین رحیمی آسیابرکی[۱]، پرویز اسدی[۲]، مصطفی اکبری[۱*]، مرتضی عزتی[۳]

۱- عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۲- عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

۳- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: mo-akbari@tvu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۶ مهر ۱۴۰۲

پذیرش: ۱ آبان ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

فرایند اصطکاکی-اغتشاشی

تعداد پاس

ذرات تقویت‌کننده

کامپوزیت

چکیده

فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی یکی از فرآیندهای نوین در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌باشد. انتخاب پارامترهای مناسب جهت توزیع یکنواخت ذرات در این فرایند امری حیاتی است. یکی از پارامترهای مهم در این فرایند تعداد پاس فرایند و تغییر جهت دوران ابزار در بین پاس‌های فرایند می‌باشد. در این مطالعه به بررسی اثر تعداد پاس و تغییر جهت دوران ابزار بر توزیع ذرات سیلیسیم کاربید در آلومینیوم ۶۰۶۱ پرداخته شده است. آلومینیوم ۶۰۶۱ یکی از آلیاژهای آلومینیوم با قابلیت رسوب سختی است که منیزیم و سیلیسیم عناصر اصلی آن را تشکیل می‌دهند. ابتدا نمونه‌هایی با استفاده از یک، دو و چهار پاس فرایند، با و بدون تغییر جهت دوران ابزار در بین پاس‌های فرایند تولید می‌شوند. سپس با استفاده از عکس‌های ماکرو و میکروسکوپی نحوه توزیع ذرات در فلز پایه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد تعداد پاس فرایند و تغییر جهت دوران ابزار، تأثیر چشم‌گیری در توزیع یکنواخت ذرات دارد.

Investigating the effect of the passes number and changing the tool rotation direction on the distribution of reinforcing particles in the FSP

Hossein Rahimi Asiabaraki[1], Parviz Asadi[2], Mostafa Akbari[1*], Morteza Ezzati[3]

1- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

2- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

3- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

* Corresponding Author's Email: mo-akbari@tvu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 28 September 2023

Accepted: 23 October 2023

Keywords:

FSP

Number of Passes

Reinforcing Particles

Composite

Abstract

The friction stirring process is one of the new processes in the production of metal matrix composites. Choosing the right parameters for the uniform distribution of particles in this process is vital. One of the important parameters in this process is the number of processes passes and the change in the direction of the tool rotation between the process passes. In this study, the effect of the number of passes and the change in the tool rotation direction on the distribution of SIC particles in aluminum 6061 has been investigated. Aluminum 6061 is one of the hard deposit able aluminum alloys, in which magnesium and silicon are the main elements. First, samples are produced using one, two, and four process passes, with and without changing the tool rotation direction between the process passes. Then, the distribution of particles in the base metal is studied using macro- and microscopic photographs. The results showed that the number of processes passes and the change in the tool rotation direction have a significant effect on the uniform distribution of particles.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Rahimi Asiabaraki H, Asadi P, Akbari M, Ezzati M. Investigating the effect of the passes number and changing the tool rotation direction on the distribution of reinforcing particles in the FSP. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 Apr 21;10(2):7-13. doi: 10.22034/IJME.2023.418064.1844 [In Persian]

۱- مقدمه

آلومینیوم ۶۰۶۱ یکی از آلیاژهای آلومینیوم با قابلیت رسوب سختی (عملیات حرارتی پذیر) است که منیزیم و سیلیسیم عناصر اصلی آن را تشکیل می‌دهند. از ویژگی‌های مهم آن می‌توان قابلیت اکستروژن را نام برد [۱، ۲]. این آلیاژ اصولاً در مدتی که عملیات ساخت انجام می‌شود تحت حرارت قرار می‌گیرد. این آلیاژها خواص مکانیکی خوب همراه با جوش‌پذیری و مقاومت به خوردگی عالی از خود نشان می‌دهند. کاربرد آن‌ها در قطعات هواپیما، اتومبیل، پیستون‌های هیدرولیک، سوپاپ‌ها، بدنه دوچرخه و غیره است.

امروزه نیاز روزافزون به استفاده از ترکیبی از مواد برای دستیابی به خواصی بهینه وجود دارد زیرا عموماً یک ماده به‌تنهایی، با توجه به جنبه‌های اقتصادی و یا کارایی و عملکرد، به‌سختی می‌تواند پاسخگوی مجموعه خواص موردنیاز برای آن باشد. ماده کامپوزیتی از ترکیب دو یا چند ماده ساخته می‌شود تا خواص ترکیبی بی‌نظیری را ایجاد کند. این مواد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده و مرز مشخصی را با یکدیگر تشکیل می‌دهند. این مخلوط در مجموع و با توجه به برخی معیارها خواصی بهتر از هر یک از اجزاء تشکیل‌دهنده خود را دارا می‌باشند. در کامپوزیت سه ناحیه متمایز، شامل فاز پیوسته (ماتریس)، فاز ناپیوسته (تقویت‌کننده) و لایه‌مرزی بین این دو فاز وجود دارد که تعیین‌کننده‌ی خواص و مشخصه‌های ماده کامپوزیتی خواهند بود [۳، ۴].

فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی[1] با استفاده از مفاهیم جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی[2] ایجاد شده است [۵، ۶]. پارامترها و ابزارهای مورداستفاده در هر دو فرآیند مشابه هستند. بااین‌حال در فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی، اتصال فلزات مانند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، موردنظر نیست و برای اصلاح ریزساختار مواد و همچنین برای تولید کامپوزیت‌های فلزی استفاده می‌شود [۷-۹]. در این فرایند، ابزار چرخان به داخل ورق نفوذ می‌کند تا با ایجاد تغییرات ریزساختاری محلی ویژگی‌های موردنیاز را بهبود دهد. از این روش برای همگن‌سازی اجزای متالورژی پودر، ساخت کامپوزیت‌های لایه سطحی، تنظیم ریزساختار کامپوزیت‌ها و بهبود ویژگی‌های آلیاژهای ریخته‌گری نیز استفاده می‌شود.

یکی از بزرگ‌ترین مشکلات در تولید کامپوزیت‌های فلزی، توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده در فلز پایه است [۱۰]. در روش‌های سنتی تولید کامپوزیت، تجمع ذرات تقویت‌کننده در فلز پایه بسیار رایج می‌باشد. این تجمع ذرات تقویت‌کننده به‌طور قابل‌توجهی خواص مکانیکی کامپوزیت تولیدشده را کاهش می‌دهد. فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی یکی از روش‌هایی است که می‌تواند ذرات تقویت‌کننده را به‌طور مناسب‌تری در فلز پایه توزیع نماید. بااین‌حال، عملکرد روش درنهایت به پارامترهای انتخابی فرایند بستگی دارد [۱۱].

تعداد پاس فرایند و تغییر جهت دوران ابزار از پارامترهای بسیار تأثیرگذار در فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی هستند. در این تحقیق به‌منظور بررسی تأثیر این پارامترها بر توزیع ذرات تقویت‌کننده، کامپوزیت‌هایی با استفاده از ذرات سیلیسیم کاربید ایجاد شده است. این کامپوزیت‌ها با استفاده از تعداد پاس یک، دو و چهار پاس، با و بدون تغییر در جهت ابزار تولید می‌شوند. در نهایت با استفاده از تصاویر ریزساختاری تأثیر این پارامترها بر توزیع ذرات در فلز پایه مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- روش تحقیق

برای تولید کامپوزیت از ورق‌های آلومینیومی ۶۰۶۱ استفاده شد. جدول ۱ ترکیب شیمیایی این آلیاژ را نشان می‌دهد.

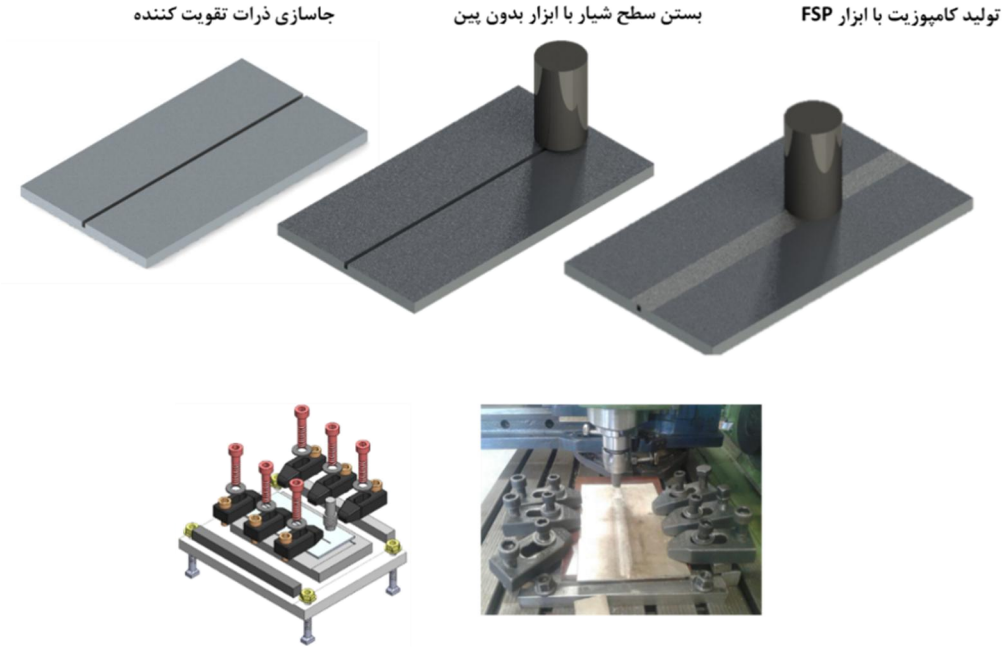
جدول ۱ ترکیب شیمیایی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ استفاده‌شده در این تحقیق

Al	Mg	Si	Cu	Fe	Mn	Cr	Zn	Ti
۹۷/۲	۰/۸	۰/۶	۰/۲	۰/۵	۰/۱	۰/۲۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱۵

ذرات سیلیسیم کاربید با اندازه متوسط ۵ میکرون در این تحقیق استفاده شد. برای ساخت کامپوزیت با استفاده از روش فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی، شیارهایی به عمق ۱/۴ میلی‌متر و عرض ۰/۸ میلی‌متر در ورق‌های آلومینیومی ایجاد شدند و سپس ذرات در

[1] FSP
[2] FSW

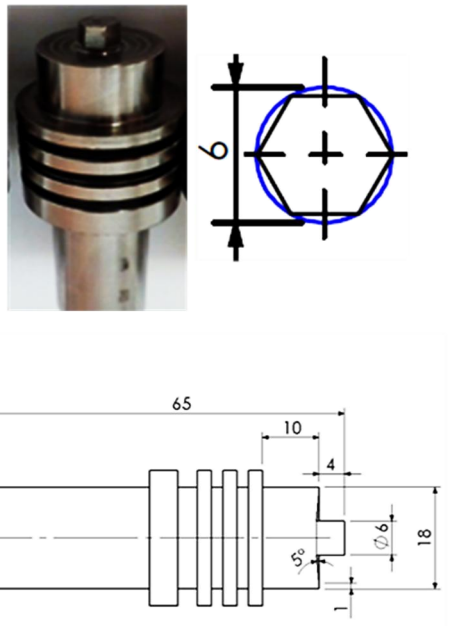
داخل این شیارها جانمایی شد. به‌منظور جلوگیری از خروج ذرات در حین تولید کامپوزیت، ابتدا سطح شیارها توسط ابزاری بدون پین بسته می‌شود (شکل ۱). سپس کامپوزیت با استفاده از فرآیند ایجاد می‌گردد.



شکل ۱ مراحل فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی

ابعاد ابزار مورداستفاده در شکل ۲ بر حسب میلی‌متر نشان داده شده است. ابزارها پس از ساخت با عملیات حرارتی، سخت‌کاری شدند. نمونه‌های کامپوزیت در این مطالعه با سرعت پیشروی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخش ۱۲۵۰ دور در دقیقه تولید می‌شوند. با توجه به تجربه پیشین گروه تحقیقاتی، شکل ابزار شش‌گوش برای پین ابزار در این فرایند انتخاب گردید [۶].

اثر زاویه انحراف ابزار در تولید نمونه‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت و عیوب احتمالی با استفاده از تصاویر ماکروسکوپی تهیه‌شده از سطح مقطع نمونه‌ها مطالعه شد. علاوه بر بررسی عیوب احتمالی، سطح مقطع نمونه‌ها با استفاده از تصاویر ماکروسکوپی جهت بررسی نحوه توزیع پودر تقویت‌کننده در زمینه آلومینیم مورد مطالعه قرار گرفتند.

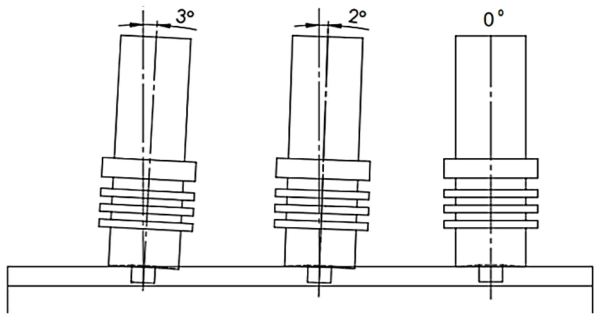


شکل ۲ ابزار مورداستفاده در این پژوهش

برای ارزیابی ویژگی‌های ریزساختاری نمونه‌های کامپوزیتی، مراحل عمومی متالورژیکی برای پرداخت و اچ[1] سطح مقطع نمونه‌ها بکار گرفته شد. حکاکی نمونه‌ها با استفاده از محلول اسیدی و خورنده کلر در ۱۰۰ ثانیه انجام گردید. ساختار ماکرو و ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری Olympus با بزرگنمایی‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ برابر مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت از دستگاه میکرو سختی جهت ارزیابی سختی کامپوزیت‌ها استفاده شد. وزن اعمال‌شده روی ابزار در دستگاه میکروسختی برابر ۲۰۰ گرم به مدت ۱۵ ثانیه بوده است.

۳- نتایج و بحث

در این مطالعه ابتدا اثر زاویه‌ی انحراف ابزار در تولید نمونه بدون عیب مورد بررسی قرار گرفت. سه زاویه مختلف استفاده‌شده برای زاویه انحراف در شکل ۳ الف نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در زوایای انحراف ابزار صفر و ۲ درجه، عیوب مشهودی در سطح مقطع نمونه تولید شده است. در فرایند اصطکاکی-اغتشاشی به دلیل حرارت بالا در حین فرایند و نرم شدن مواد و سیلان آن در زیر ابزار، ممکن است جریان ماده به‌خوبی صورت نگرفته و جبهه‌های جریان به یکدیگر نرسد و در نهایت موجب تولید عیب در سطح مقطع گردد؛ بنابراین نیاز به نیرو عمودی مناسبی است تا مواد نرم‌شده و سیلان‌یافته که از جلوی ابزار به پشت آن هدایت شده‌اند در محل فرایند به‌شدت فورج شوند تا از تولید عیب جلوگیری شود. در شکل ۳ ب و ج مشاهده می‌شود که اندازه عیب تولیدشده در نمونه با زاویه انحراف ۲ درجه، کمتر از نمونه تولیدشده بدون زاویه انحراف (عمود بر مسیر حرکت ابزار) می‌باشد. با افزایش این زاویه به مقدار ۳ درجه با توجه به وجود نیروی فورج عمودی مناسب در حین اجرای فرایند، دیگر عیبی در سطح مقطع ایجاد نمی‌گردد.



الف

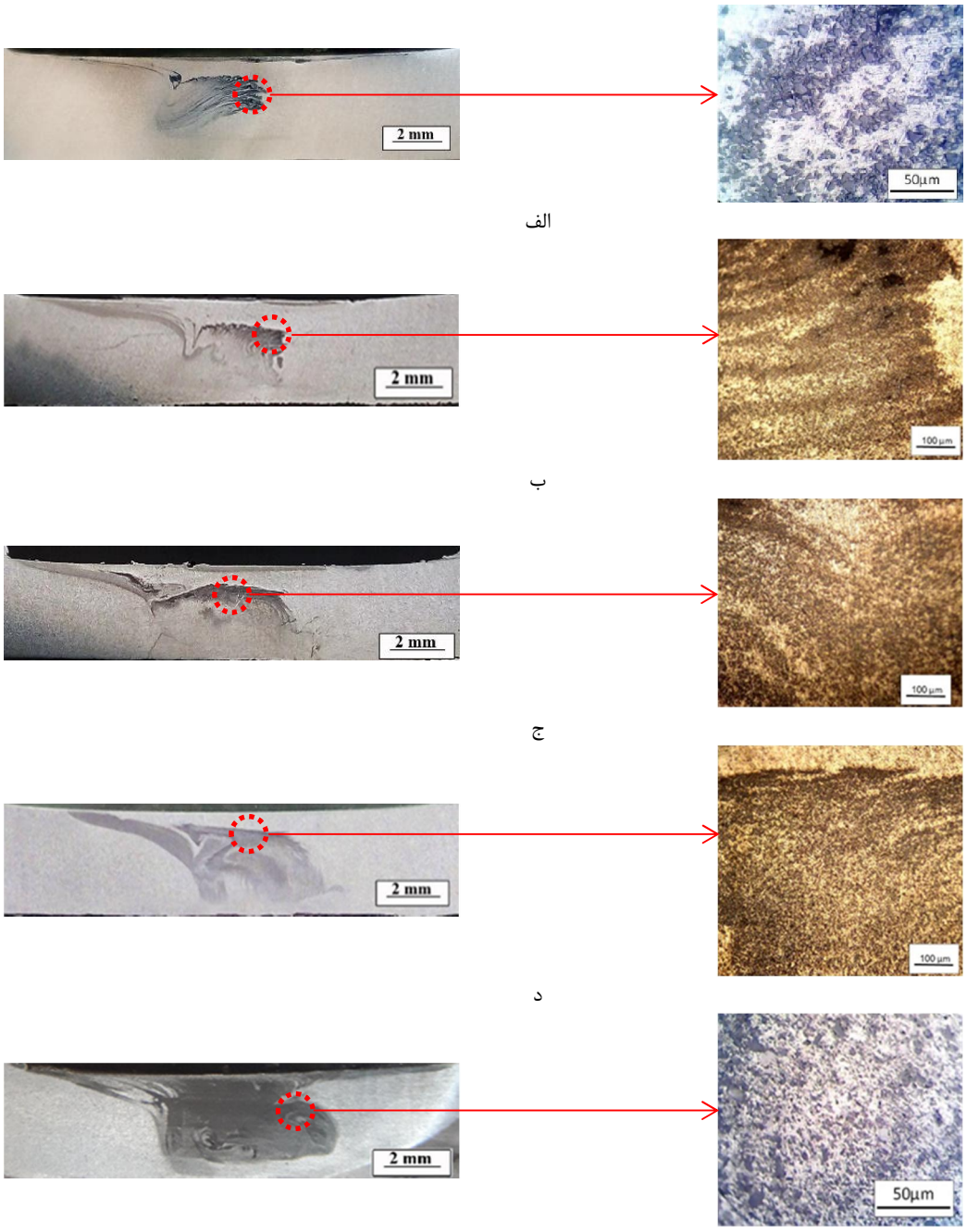
ب

ج

شکل ۳ الف) زوایای انحراف استفاده‌شده در این پژوهش، ب) سطح مقطع نمونه‌های تولیدشده با زاویه انحراف صفر و ج) سطح مقطع نمونه‌های تولیدشده با زاویه انحراف ۲ درجه

[1] Etched

در شکل ۴ به ترتیب تصاویر میکرو و ماکرو، نمونه‌های فرآوری‌شده در تعداد پاس‌های مختلف از فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی با و بدون تغییر در جهت دوران ابزار مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در نمونه‌ی فرآوری‌شده تک پاس قابل مشاهده است، توزیع ذرات سیلیسیم کاربید در ماده‌ی زمینه یکنواخت نبوده و به‌صورت لایه‌ای و انباشته و غیرهمگن می‌باشد. افزایش تعداد پاس باعث پراکندگی بهتر ذرات در ناحیه وسیع‌تر و بهبود توزیع پودر در ماده زمینه می‌گردد. تغییر جهت دوران ابزار نیز با تغییرات اساسی که در نحوه جریان ماده در منطقه اغتشاش ایجاد می‌کند باعث توزیع پودر بهتر و گستردگی بیشتر منطقه اغتشاش می‌شود [۱۲] و همچنین موجب می‌شود توزیع پودر در منطقه فرآوری‌شده تا حدودی متقارن صورت بگیرد.



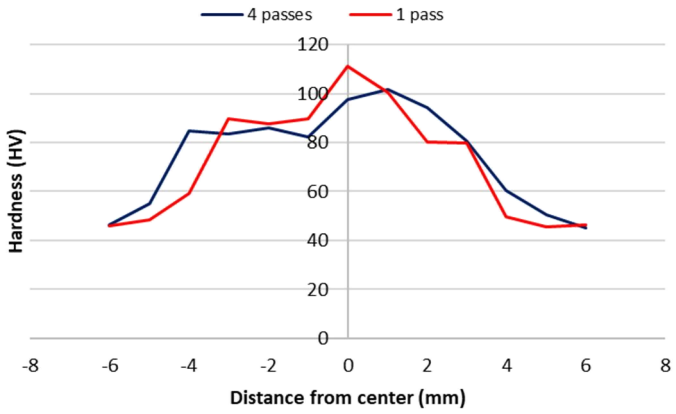
شکل ۴ تصاویر میکرو و ماکرو نمونه‌های فرآوری‌شده الف) تک پاس، ب) دو پاس، ج) دو پاس با تغییر جهت دوران، د) چهار پاس، ه) چهار پاس با تغییر جهت دوران

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، ناهمگنی ریزساختاری در نمونه‌های تولیدشده بدون تغییر جهت چرخش ابزار قابل‌توجه‌تر است. ذرات تقویت‌کننده به دلیل جریان نامتقارن مواد در هنگام فرآیند به سمت ناحیه پیشرو حرکت می‌کنند [۱۳] و ذرات در سمت پیشرو تجمع می‌یابند و توزیع نامتقارن ذرات تقویت‌کننده در دو طرف ناحیه اغتشاشی مشاهده می‌گردد. هنگامی‌که جهت چرخش ابزار تغییر نمی‌کند، این تجمع ذرات در هر پاس فرایند، تشدید شده و پس از چهار پاس، ذرات در ناحیه پیشرو انباشته می‌شوند. بااین‌حال، با تغییر جهت چرخش ابزار بین پاس‌های مختلف، ناحیه پیشرو و پسرو در هر پاس با هم تغییر می‌کند که منجر به تغییر در الگوی جریان مواد شده و در نتیجه توزیع ذرات را بهبود می‌بخشد.

شکل ۵ تغییرات سختی نمونه‌های فرآوری‌شده با پودر سیلیسیم کاربید در پاس اول و چهارم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سختی در تمامی نمونه‌های فرآوری‌شده نسبت به ماده پایه، افزایش یافته است، ولی پراکندگی زیادی در نتایج سختی در منطقه فرآوری‌شده نمونه تولیدشده با یک پاس وجود دارد. با توجه به شکل ۴ مشاهده گردید که توزیع پودر در پاس اول یکنواخت نبوده و به‌صورت انباشته توزیع شده است، همین دلیل پراکندگی زیاد، نتایج سختی در پاس اول را در برداشته است.

یکی از مهم‌ترین عوامل که باعث افزایش سختی در نمونه‌های فرآوری با پودر سیلیسیم کاربید می‌شود اثر قفل‌کنندگی یا پینینگ ذرات پودر سیلیسیم کاربید در منطقه اغتشاش می‌باشد که در حین انجام فرایند از رشد دانه‌ها حین تبلور مجدد جلوگیری می‌کند و درنتیجه باعث کاهش اندازه‌ی دانه شده و این کاهش اندازه، طبق رابطه‌ی زنر[1] باعث افزایش سختی می‌گردد. عامل دیگری که باعث افزایش سختی و هم باعث پراکندگی نتایج می‌شود جریان پالسی در منطقه‌ی اغتشاش می‌باشد.

همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است سختی مربوط به نمونه‌ی چهار پاس (با تعویض جهت دوران) نسبت به نمونه تولیدشده در یک پاس پراکندگی کمتری دارد. افزایش پاس سبب می‌شود ذرات از یک‌سو در ناحیه وسیع‌تری توزیع گردند و از سوی دیگر تغییر جهت دوران ابزار نیز با تغییراتی که در نحوه‌ی جریان مواد ایجاد می‌کند باعث می‌شود ذرات تقویت‌کننده در دو سمت (پیشرو و پسرو) منطقه‌ی اغتشاش تقریباً متقارن توزیع شوند. در نتیجه این توزیع یکنواخت و همگن ذرات باعث توزیع یکنواخت سختی در منطقه اغتشاش می‌گردد. ولی درکل با دلایلی که ذکر شد توزیع ذرات در پاس چهارم یکنواخت‌تر شده ولی همچنان ناهمگنی و تجمع ذرات در برخی از ناحیه‌ها دیده می‌شود. همین امر سبب پراکندگی نتایج سختی در منطقه فرآوری‌شده گردیده است.



شکل ۵ تغییرات سختی در کامپوزیت‌های تولیدشده

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر تعداد پاس فرایند و تغییر جهت دوران ابزار بر توزیع ذرات تقویت‌کننده سیلیسیم کاربید در آلومینیوم پرداخته شد. این کامپوزیت‌ها با تعداد یک، دو و چهار پاس و با و بدون تغییر در جهت ابزار تولید شدند و با استفاده از میکروسکوپ نوری نحوه توزیع ذرات در فلز پایه مورد بررسی قرار گرفت. به‌طور خلاصه نتایج زیر به دست آمد:

[1] Zener Relationship

- با افزایش تعداد پاس فرایند توزیع ذرات در فلز پایه به نحوه چشم‌گیری بهبود یافت.
- تغییر جهت دوران ابزار بین پاس‌ها سبب از بین رفتن تجمع ذرات در ناحیه پیشرو شد.
- تغییرات سختی مربوط به نمونه‌ی چهار پاس (با تعویض جهت دوران) نسبت به پاس اول پراکندگی نتایج کمتری دارد.

References

[1] Lee SH, Saito Y, Sakai T, Utsunomiya H. Microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding. Materials Science and Engineering: A. 2002 Feb 28;325(1-2):228-35. doi: 10.1016/S0921-5093(01)01416-2

[2] Xu B, Jiang P, Geng S, Wang Y, Zhao J, Mi G. In-situ reactions and mechanical properties of 6061 aluminum alloy weld joint with SiCp by laser melting injection. Materials & Design. 2021 May 1;203:109538. doi: 10.1016/j.matdes.2021.109538

[3] Hsissou R, Seghiri R, Benzekri Z, Hilali M, Rafik M, Elharfi A. Polymer composite materials: A comprehensive review. Composite structures. 2021 Apr 15;262:113640. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113640

[4] Egbo MK. A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering. Journal of King Saud University-Engineering Sciences. 2021 Dec 1;33(8):557-68. doi: 10.1016/j.jksues.2020.07.007

[5] Akbari M, Asadi P, Behnagh RA. Modeling of material flow in dissimilar friction stir lap welding of aluminum and brass using coupled eulerian and lagrangian method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021 Mar;113:721-34. doi: 10.1007/s00170-020-06541-x

[6] Asadi P, Mirzaei M, Akbari M. Modeling of pin shape effects in bobbin tool FSW. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. 2022 Jun 1;5(2):162-77. doi: 10.1016/j.ijlmm.2021.12.001

[7] Akbari M, Asadi P, Sadowski T. A Review on Friction Stir Welding/Processing: Numerical Modeling. Materials. 2023 Aug 28;16(17):5890. doi: 10.3390/ma1617589

[8] Akbari M, Rahimi Asiabaraki H, Aliha MR. Investigation of the effect of welding and rotational speed on strain and temperature during friction stir welding of AA5083 and AA7075 using the CEL approach. Engineering Research Express. 2023 Apr 14;5(2):025012. doi: 10.1088/2631-8695/acca00

[9] Akbari M, Rahimi Asiabaraki H, Hassanzadeh E, Esfandiar M. Simulation of dissimilar friction stir welding of AA7075 and AA5083 aluminium alloys using Coupled Eulerian–Lagrangian approach. Welding International. 2023 Apr 3;37(4):174-84. doi: 10.1080/09507116.2023.2205035

[10] Asadi P, Akbari M, Kohantorabi O, Peyghami M, Aliha MR, Salehi SM, Rahimi Asiabaraki H, Berto F. Characterization of the influence of rotational and traverse speeds on the mechanical and microstructural properties of wires produced by the FSBE method. Strength of Materials. 2022 Mar;54(2):318-30. doi: 10.1007/s11223-022-00403-5

[11] Mirzadeh H. High strain rate superplasticity via friction stir processing (FSP): A review. Materials Science and Engineering: A. 2021 Jul 5;819:141499. doi: 10.1016/j.msea.2021.141499

[12] Salekrostam R, Besharati Givi MK, Asadi P, Bahemmat P. Influence of friction stir processing parameters on the fabrication of SiC/316L surface composite. Defect and diffusion forum. 2010 Apr 1;297:221-26. doi: 10.4028/www.scientific.net/DDF.297-301.221

[13] Dialami N, Cervera M, Chiumenti M. Defect formation and material flow in friction stir welding. European Journal of Mechanics-A/Solids. 2020 Mar 1;80:103912. doi: 10.1016/j.euromechsol.2019.103912