نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME

دوره ۳۲، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۵۰، مرداد و شهریور ۱۴۰۲، صفحه ۶۳-۵۴
ISSN: 1605-9719

DOI: 10.30506/MMEP.2023.2000194.2083
DOR: 20.1001.1.16059719.1402.32.3.5.3

پیشرفت های اخیر در روش های ساخت افزودنی مبتنی بر فناوری های اصطکاکی اغتشاشی

سروش سلطانی
دانشجوی کارشناسی ارشد

موسی ساجد*
استادیار

شاهین مصطفی زاده
دانشجوی کارشناسی ارشد،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه شهید مدنی آذربایجان،
تبریز

چکیده: ساخت افزودنی مجموعه ای از فرایندهای نوین تولید است که با رویکردی متفاوت در تولید محصولات، انقلابی را در روش های تولید ایجاد نموده است. استفاده از این روش ها محدودیت های پیش روی طراحان را که هنگام استفاده از روش های سنتی تولید ایجاد می شود تا حدود زیادی مرتفع ساخته است. با توجه به اینکه منبع مناسبی به زبان فارسی در حوزه ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی وجود ندارد، در مقاله حاضر یافته های جدید در حوزه ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی برای استفاده در تولید افزودنی فلزات، آلیاژها و کامپوزیت های زمینه فلزی، مورد بررسی قرار گرفته و خلاصه شده است. فرایند ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند حالت جامد است که در آن ساختارهایی کاملاً متراکم و همگن با بهبود قابل توجه ریزساختاری تشکیل می شود که عاری از هرگونه نقص ذوب و انجماد مجدد مانند حفره های کوچک انقباضی، تخلخل ها و ترک است. در ادامه مقاله ابتدا جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان فرایند پایه توضیح داده خواهد شد. سپس دو روش اصلی ساخت افزودنی مبتنی بر آن شامل ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی و لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

واژه های راهنما: ساخت افزودنی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی، لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۹

Recent Development in Friction Stir-based Additive Manufacturing Processes

Soroush Soltani
MSc Student

Moosa Sajed*
Assitant Professor

Shahin Mostafazadeh
MSc Student,
Mechanical Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz

Abstract: Additive manufacturing is a set of modern manufacturing technologies with a novel revolutionary point of view that addresses most of limitations that were around due to using conventional manufacturing methods. Due to the lack of references for additive friction stir manufacturing, in the present paper the new developments in friction stir additive manufacturing of metals, alloys, and metal matrix composites are presented and summarized. Friction stir additive manufacturing is a solid-state process that yields a dense and homogeneous structure with a significant microstructural refinement with no fusion defects such as shrinkage cavities, porosity, and cracks. The rest of the paper was arranged as follows: friction stir welding is discussed as the base technology. Then, the two additive manufacturing methods that are based on friction stir welding, i.e. additive friction stir manufacturing and additive friction stir deposition are presented.

Keywords: Additive Manufacturing (AM), Friction Stir Welding (FSW), Additive friction stir manufacturing (AFSM), Additive Friction Stir Deposition (AFSD)

* نویسنده مسئول، sajed@azaruniv.ac.ir

۱- مقدمه

فناوری ساخت افزودنی[1]در سال ۱۹۹۰ اختراع شده است. این فرایند را می توان به عنوان فرایند افزایش لایه به لایه مواد برای ساخت قطعات تعریف کرد که مزایای زیادی مانند ایجاد امکان نوآوری در طراحی، کاهش مصرف مواد اولیه به کمترین سطح، صرفه جویی در زمان پردازش و کاهش موثر هزینه ساخت را منجر می شود. از این رو، در ۲۰ سال گذشته، تحقیق و مطالعه در حوزه ساخت افزودنی یکی از موضوعات داغ بوده است. به دلیل ذوب و انجماد مجدد، عیوب متالورژیکی مانند حساسیت به ترک و تخلخل به طور اجتناب ناپذیری در ساختار قطعات ساخته شده با روشهای ساخت افزودنی مبتنی بر جوشکاری های ذوبی به ویژه در آلیاژهای سبک مانند تیتانیوم و آلومینیوم ایجاد می شود [۱]. دلیل ایجاد تخلخل، به دام افتادن گاز است که در حین اتمیزه شدن ذرات پودر اتفاق می افتد. تبخیر عناصر آلیاژی عیب دیگری است که در حین استفاده از فرایندهای ذوبی اتفاق می افتد. ایجاد ترک در اثر مکانیزم های مختلف از جمله ترک در حین انجماد و ذوب موضعی نیز از جمله عیوب رایج فرایندهای ذوبی است [۲]. ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی[2]روشی جدید بر پایه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[3]است که در سالهای اخیر به عنوان یکی از فناوری های جدید ساخت افزودنی معرفی شده است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک نوع جوشکاری حالت جامد با ابزار غیر مصرفی است [۱]. همچنین فناوری ساخت افزودنی به روش اصطکاکی اغتشاشی را می توان به عنوان طرح های فرایندی مختلف برای تولید یک جزء سه بعدی از طریق رسوب لایه به لایه مواد در حالت جامد با استفاده از مکانیزم پردازش اصطکاکی اغتشاشی[4]تعریف کرد [۳]. علاوه بر این، فرایند لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی یک رویکرد ساخت افزودنی حالت جامد نوپا است که امکان لایه نشانی لایه به لایه مواد را فراهم می کند. مفهوم لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی در ابتدا به عنوان فرایند روکش دهی اصطکاکی اغتشاشی[5]با استفاده از ابزار چرخشی توخالی معرفی شد که یک فناوری مشتق شده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است[۴].

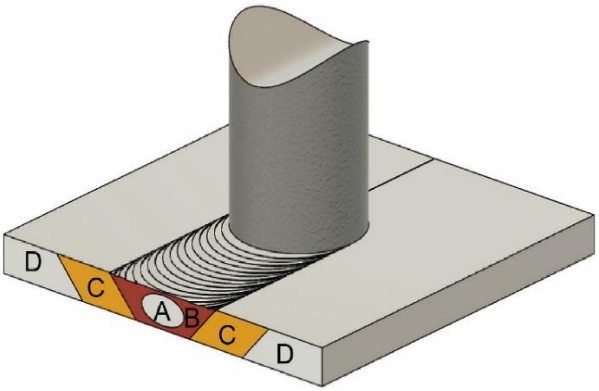
دو نوع اصلی ساخت افزودنی اغتشاشی اصطکاکی وجود دارد: ۱) ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی مبتنی بر ورق که در آن ورق های یک ماده با کمک ابزار جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی به یکدیگر متصل می‌شوند و ۲) ساخت افزایشی از طریق لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی[6]که در آن از یک ابزار پردازش اصطکاکی اغتشاشی توخالی برای تغذیه مواد جهت لایه نشانی در حالت جامد استفاده می شود[۵].

۲- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روشی برای اتصال در حالت جامد است که در ابتدا در موسسه جوشکاری بریتانیا[7]در سال ۱۹۹۱ توسعه یافت و برتری خود را در جوشکاری آلومینیوم و آلیاژهای آن که جوشکاری آنها با روشهای مرسوم چالش برانگیز بود، به اثبات رساند. در ابتدا از آلیاژهای آلومینیوم برای این فرایند استفاده می شد. قبل از ابداع جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، برخی از سری های آلیاژهای آلومینیوم مانند سری ۲۰۰۰ و ۷۰۰۰ به دلیل رفتار انجمادی ضعیف در ناحیه جوش غیرقابل جوش بودند و خواص مکانیکی ضعیفی در مقایسه با ماده پایه داشتند. این فناوری شامل فرو بردن یک ابزار غیر مصرفی با چرخش سریع است که دارای یک پین و یک شانه است. پین با فشار محوری وارد سطح می شود و ابزار در سراسر سطح حرکت داده می شود. با دوران ابزار حرارت اصطکاکی بین شانه ابزار و سطح قطعه کار ایجاد شده و تغییر شکل پلاستیک ناحیه جوش را ایجاد می کند و به نرم شدن مواد منجر می شود. سپس مواد نرم شده به هم زده می شود و توسط پین ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به صورت دایره ای جریان می یابد. در طول هم زدن، جریان مواد مانند یک فرایند اکستروژن است که حفره ایجاد شده توسط ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را پر می کند. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دارای مزایای فوق العاده ای است. از جمله اینکه منطقه متأثر از حرارت در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به دلیل ورود گرمای کمتر و محدود در مقایسه با روش های جوشکاری متداول باریک است که به نوبه خود به دانه های ریزتر و خواص مکانیکی بهتر در اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی منجر می شود. همه این ویژگی ها جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را به یکی از مناسب ترین فرایندها برای اتصال در حالت جامد تبدیل کرده است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کاربردهای زیادی در صنایع خودرو، کشتی سازی، دفاع، هوافضا و غیره دارد [۶]. این روش جوشکاری همچنین به عنوان روشی که قابلیت استفاده در سطح کره ماه را

[1] Additive Manufacturing
[2] Friction Stir Additive Manufacturing
[3] Friction Stir Welding
[4] Friction Stir Processing
[5] Friction Stir Surfacing
[6] Additive Friction Stir Deposition
[7] The Welding Institute

دارد مورد مطالعه قرار گرفته است [۷]. این فرایند در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده است. فناوری های متنوعی برپایه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ابداع و صنعتی سازی شده است که در مقاله مروری ساجد و سیدکاشی [۸] دسته بندی و ارائه شده است. مطالعات گسترده ای در حوزه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است. از آن جمله احمدی و همکاران [۹] به مطالعه اتصال مس به آلومینیوم با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی پرداخته اند و ترکیبات بین فلزی تولید شده در حین جوشکاری را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. امامی خواه و همکاران [۱۰] به مطالعه عددی و تجربی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم ۶۰۶۱ و ۵۰۸۳ پرداخته و تحولات ریزساختاری را هم از مدل المان محدود و هم به صورت تجربی ارزیابی کرده اند. با توجه به این مطالعه، شکست در اتصال از نواحی با سختی کمتر گزارش شده است.



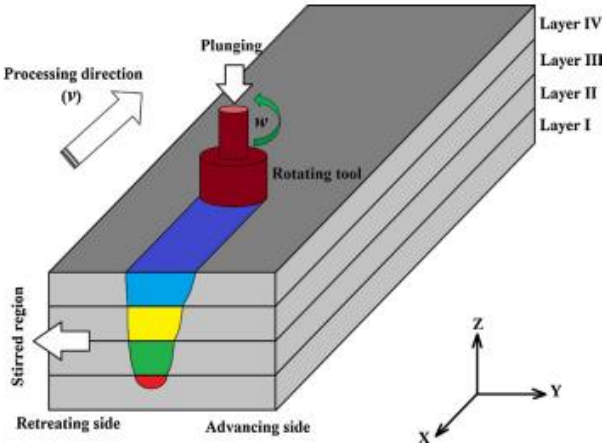
شکل ۱ فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[۷]

۳- ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی

ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی مبتنی بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و یک فرایند ساخت افزودنی حالت جامد برای تولید آلیاژهای سبک وزن با کارایی بالا و هندسه ساده است. ذات این فرایند که شامل استفاده از یک ابزار غیرمصرفی چرخان است که با یک فشار محوری لایه های تشکیل دهنده قطعه را به هم متصل کند، هندسه های قابل دستیابی را محدود می کند. در صورت نیاز به ساخت قطعاتی با هندسه های پیچیده، لازم است از ترکیب این روش با ماشینکاری استفاده نمود. یک کاربرد بالقوه ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی بهبود خواص مکانیکی است. استحکام بالاتر در ساخت آلیاژ های سبک مانند آلیاژهای منیزیم پس از فرایند ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی نشان دهنده پتانسیل این روش برای بهبود ریزساختار است. دلیل ریزساختار بهتر و به طبع آن خواص مکانیکی بهتر قطعات تولید شده به این روش به فرایند تبلور مجدد دینامیکی مربوط می شود. به دلیل تغییرشکل شدید پلاستیکی که در حین فرایند توسط ماده تجربه می شود و همچنین دمای بالا که تا ٪۸۰ دمای ذوب ماده می رسد، در مرزدانه های قدیم، جوانه زنی اتفاق افتاده و دانه های جدیدی شروع به رشد می کنند و جای دانه های قبلی را می گیرند. این دانه های جدید به دلیل زمان کوتاه قرار گرفتن در معرض دمای بالا عموما کوچکتر از دانه های قبلی هستند و در نتیجه استحکام و سختی ماده نسبت به قبل از فرآوری کاهش می یابد. اگر چه فرایند ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی از نظر عملکرد ساختاری تأثیر مثبتی دارد، اما معایبی نیز وجود دارد. این موارد مربوط به بستن قطعه، سایش ابزار در طول زمان، ایجاد تنش های پسماند و هندسه قطعه است [۱۱]. ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی برای اولین بار در ۲۰۰۲ ثبت شده است و از این روش برای تولید آلیاژهای با استحکام بالا نیز استفاده شده است [۲]. ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی را می توان به عنوان طرح های فرایندی مختلف برای تولید یک قطعه سه بعدی از طریق رسوب لایه به لایه مواد در حالت جامد با استفاده از مکانیزم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تعریف کرد. اگرچه برای رسیدن به تلرانس ابعادی مطلوب، معمولا نیاز به فرایند های ساخت مانند ماشین کاری یا سنگ زنی وجود دارد. در حالی که در حال حاضر، ساخت افزودنی به عنوان فرایندی برای تولید قطعات فلزی به خوبی تثبیت شده است، بهینه سازی آلیاژهای موجود و طراحی آلیاژهای پیشرفته که به طور خاص برای ساخت افزودنی حالت جامد طراحی شده اند، همچنان نیاز به مطالعات بیشتری دارد. در این فرایند همانطورکه به صورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است، ورق ها به صورت انباشته و مانند یک ساندویچ از ورق ها با فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به یکدیگر متصل می شوند. یک ابزار دوار معمولی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، شامل شانه و پین در ورق ها فرو می رود و به سطح بالایی ورق های زیرین نفوذ می کند. سپس پس از تماس با سطح ورق و گرمایش اصطکاکی، با حرکت در امتداد خط مورد نظر، اتصال ورق ها به یکدیگر انجام می شود[۳].

طول پین و نسبت ابعاد آن به قطر شانه عامل مهمی در طراحی ابزار و در تولید گرمای اصطکاکی کافی برای ادامه فرایند است. برای پوشاندن کل سطح و ساخت یک قطعه سه بعدی، می توان این فرایند را به صورت چند پاس در کنار یکدیگر انجام داد. شکل (۳) اجرای فرایند ساخت افزایشی اصطکاکی اغتشاشی برای ساخت قطعاتی از ورق های روکش دار انباشته را نشان می

دهد [۳]. یک روش دیگر برای اجرای این فرایند به این صورت است که ابتدا دو ورق به هم جوش داده می شوند و سپس ورق سوم به این دو ورق جوش داده می شود و بعد ورق چهارم جوش داده می شود و فرایند به همین ترتیب ادامه می یابد تا ضخامت مورد نظر ساخته شود. به این دلیل که در این شرایط، در هر مرحله از فرایند، فقط به اندازه ضخامت دو لایه درگیر فرایند جوشکاری هستند، عملا محدودیتی برای ضخامت قابل دستیابی وجود ندارد، مگر محدودیت های ماشین مورد استفاده برای فرایند که عموما دستگاه فرز است. همچنین با استفاده از این روش می توان آلیاژهای مختلفی را در لایه های متفاوت به کار گرفت و در نتیجه به قطعه ای دست یافت که در هر لایه یا ضخامت مشخصی، خواص متفاوتی دارد.



شکل۲ شکل شماتیک ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی [۳]

سلمان و همکاران[۱۲] چهار لایه کامپوزیت با پایه آلومینیوم ۶۰۶۱ و پودر آلومینا را از طریق ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۱۰۰ میلی متر در دقیقه برای ابزار و با استفاده از اندازه های مختلف پودر آلومینا تولید کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که کامپوزیت های تولید شده در مقایسه با قطعات ساخته شده بدون افزودن پودر آلومینا خواص مکانیکی بهتری دارند. ژائو و همکاران[۱] ویژگی های اتصال بین لایه ای یک آلیاژ آلومینیوم لیتیوم ساخته شده با استفاده از روش ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی را بررسی کردند و تأثیر شکل پین ابزار و پارامترهای فرایند بر ویژگی های پیوند بین لایه ای در میان لایه ها را مورد بحث قرار دادند و اثرات عیوب سطحی بر عملکرد ساخت افزودنی از نظر ریزساختارها، پروفایل های سختی و خواص مکانیکی را بررسی کرده اند. آنها از سرعت های چرخش ابزار ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۱۰۰ میلی متر در دقیقه استفاده کردند و گزارش دادند که ریز ساختار مطلوب با سرعت چرخش ۸۰۰ دور در دقیقه به دست می آید. سریواستاوا و همکاران [۱۳] مروری بر پیشرفت های انجام شده در زمینه ساخت افزودنی حالت جامد مواد فلزی مبتنی بر اصطکاک و به طور مشخص روش های ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی انجام داده و اشاره ای به نمونه سازی سریع[1]و ابزار سازی سریع داشتند. سیرواستا و همکاران[۱۴] مروری بر تولید ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از ابزاری نوآورانه برای افزایش خواص مکانیکی و دستیابی به ریزساختاری مطلوب داشتند. در طول لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی Al-Mg-Si، چرخش ابزار باعث چرخش مواد در منطقه رسوب می شود. شن و همکاران[۱۵] مطالعه ای بر تکامل ریزساختار موضعی و عملکرد مکانیکی آلیاژ آلومینیوم-لیتیوم ساخته شده به روش افزایشی اصطکاکی اغتشاشی داشتند و سختی و استحکام نمونه ها را ارزیابی کردند. آقاجانی و همکاران[۱۶] به ارزیابی ساختار کامپوزیتی ورق چند لایه پلیمری-فولادی تولید شده با فناوری ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی پرداختند. بخش های مختلف ساختار ورق چند لایه کامپوزیتی با آزمایشهای خمشی و کششی برای رفتار مکانیکی سازه تولید شده شرح داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، اتصال بین لایه ها دوام بیشتری را در طول آزمایش خمشی در مقایسه با نمونه کششی با نسبت افزایش مقاومت تا ۹۰٪ نشان داده است. در استفاده از فرایندهای اصطکاکی اغتشاشی برای پلیمرها باید توجه داشت که با توجه به دمای فرایند، ذوب موضعی برای پلیمرها اتفاق می افتد که عموما منجر به تغییر ساختار در ناحیه اتصال و مشکلاتی در حین اجرای فرایند می شود. در شرکت بوئینگ نیز مطالعاتی برای امکان سنجی استفاده از فرایند ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی به صورت تجاری انجام پذیرفته است [۲].

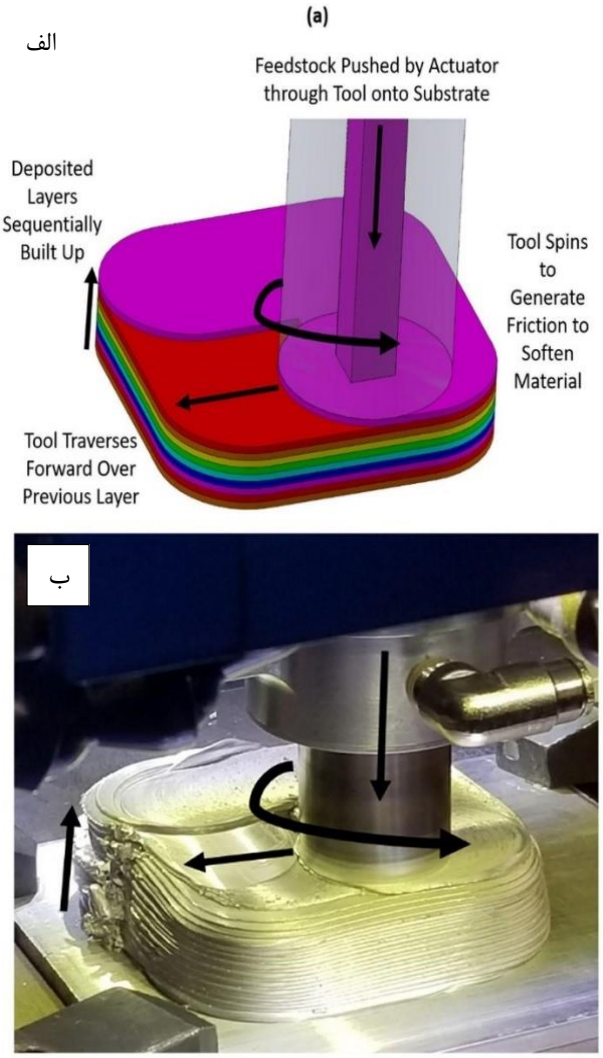
لیو و همکاران [۱۷] موفق شده اند با استفاده از ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی زیر آب قطعه ای از جنس مس خالص با ابعاد ۱۰۰×۲۶×۵ میلیمتر با استفاده از ورق های ۲ میلیمتری بسازند به نحوی که استحکام کششی آن به ۴۳۶ مگاپاسکال و استحکام خستگی آن به ۱۳۰ مگاپاسکال رسیده است. داس و همکاران [۱۸] به بررسی هیبریدسازی ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی با ماشینکاری به منظور صنعتی سازی این فرایند پرداخته و استراتژی های مختلف را مورد بررسی قرار دادند.

[1] Rapid Prototyping

شکل ۳ ساخت افزایشی اصطکاکی اغتشاشی [۳]

۴- لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی

فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی یک رویکرد ساخت افزودنی حالت جامد نوپا است که امکان لایه نشانی لایه به لایه مواد را فراهم می کند. این مفهوم در ابتدا به عنوان فرایند روکش دهی اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از ابزار چرخشی توخالی معرفی شد که یک فناوری مشتق شده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، تولید گرمای اصطکاکی از اصطکاک شانه ابزار در سطح بالایی صفحات جوش داده شده و هم زدن پین ابزار درون مواد جوش داده شده ناشی می شود. از آنجایی که ابزار فرایند لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی پینی ندارد که به داخل ماده فرو رود، تولید گرمای اصطکاکی عمدتاً از چرخش شانه ابزار در بالای سطح مواد لایه نشانی شده ناشی می‌شود. فرایند لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی چندین مزیت را نسبت به جوش‌های مبتنی بر جوشکاری سنتی ارائه می‌کند که شامل تخلخل کمتر، تنش‌های پسماند کمتر، عمر خستگی بیشتر، شکل پذیری و چقرمگی بهتر، و کاهش مسائل زیست محیطی و ایمنی است که این به دلیل باقی ماندن دمای مواد زیر نقطه ذوب در حین فرایند است. اخیراً، تحقیقات تجربی بر روی فرایند لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی برای مواد مختلف از جمله آلیاژهای سخت مانند آلیاژهای پایه نیکل، مس و فلزات سبک مانند آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم انجام شده است. به طور خاص، این فرایند از طریق لایه نشانی مواد بر روی یک بستر، بدون نیاز به تبدیل فاز جامد به مایع ماده در حال لایه نشانی اتفاق می افتد. شکل (۴)، فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی را با فشردن یک ابزار به طول ۳۰۰ میلی‌متر به عنوان میله مواد اولیه که با یک روان‌کننده گرافیتی پوشیده شده است را با استفاده از یک ابزار تو خالی دوار نشان می دهد. در هر مرحله از لایه نشانی، یک فاصله بین کف ابزار و لایه زیرین برای ایجاد لایه ای دیگر از مواد لایه نشانی شده حفظ می شود. حرکت چرخشی ابزار باعث تولید گرما می شود، بنابراین مواد نرم شده و به شکاف بین شانه ابزار و لایه هایی که قبلاً لایه نشانی شده جریان می یابد [۴].



شکل۴ (الف) شکل شماتیک ابزار، میله مصرفی،جهت دوران و نیرو ها در حین فرایند (ب) فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی[۴]

فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی شامل سه مرحله تغذیه، حرکت خطی و انتقال لایه تشکیل شده است. در مرحله تغذیه، میله تغذیه چرخان به آرامی توسط دستگاه تغذیه از مرکز سر ابزار به سمت پایین رانده می شود تا با بستر ثابت تماس پیدا کند. در ابتدا، گرما توسط اصطکاک در محل اتصال میله تغذیه و بستر ایجاد می شود تا زمانی که ماده به طور قابل ملاحظه ای نرم شده و وارد فاز پلاستیک شود. مواد تغذیه شونده

که وارد فاز پلاستیک شده اند پیوسته به صورت شعاعی اکسترود می شوند تا جایی که فضای زیر ابزار دوار اشباع شود. سپس مرحله حرکت درون صفحه شروع می شود، جایی که بستر نسبت به ابزار دوار در حرکت قرار می گیرد. در نتیجه، مواد به طور مداوم بر روی بستر لایه نشانی می شود. هنگامی که هندسه مورد نظر توسط حرکت درون صفحه ایجاد شد و یک لایه ایجاد کرد، مرحله انتقال لایه خارج از صفحه شروع می شود، که در آن بستر لایه نشانی در جهت عمودی به اندازه ضخامت لایه مورد نظر پایین می آید[۶].

تکامل ریز ساختار به شدت به متغیرهای فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی بستگی دارد که شامل سرعت چرخش سر ابزار (Ω)، سرعت حرکت خطی (V) و سرعت تغذیه مواد (F) می‌شود. به طور کلی سرعت چرخش (Ω) نرخ تولید گرما و نرخ کرنش را کنترل می کند، در حالی که (V) مدت زمان موجود برای تغییر شکل مواد را تعیین می کند. در نتیجه، نسبت (Ω/V) معیاری برای کنترل دما و تغییر شکل پلاستیک است. سرعت تغذیه مواد (F) مقدار مواد تغذیه شده است که در واحد زمان اندازه گیری می شود. در چرخش سر ابزار، گرمای شدید می تواند باعث آسیب به سر ابزار، گیر کردن مواد تغذیه در داخل ابزار توخالی، یا ذوب شدن در موارد شدید شود. کم یا زیاد شدن مقدار مواد تغذیه ممکن است منجر به کیفیت پایین سطح و تشکیل تخلخل شود، زیرا مواد کافی برای لایه نشانی عرضه نمی شود. در صورت درک پارامتر های فرایند و نحوه تغییر ریز ساختار می توان از طریق طراحی فرآیند لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی، ریز ساختار مطلوب را برای کاربردهای معین تنظیم نمود. به عنوان مثال، با کنترل Ω، V، و F، می توان به ریز ساختارهایی با دانه های بسیار ریز برای تقویت مرزدانه یا ریز ساختار هایی متشکل از مرزهای دانه ویژه برای جلوگیری از شکست خستگی یا شکنندگی ناشی از نفوذ هیدروژن شد[۱۹].

در ساخت افزودنی به روش لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی می توان به جای میله جامد از پودر استفاده کرد که تولید پوشش های کامپوزیت سطحی را امکان پذیر می کند. این پودرها می توانند سرامیکی یا مخلوطی از پودرهای سرامیکی و فلزی باشند. گاندرا و همکاران [۲۰] سه لایه به قطر ۲۰ میلی متر از جنس کامپوزیت سطحی AA6082/SiC را بر روی یک صفحه بستر از جنس AA2024-T3 تولید کردند. آنها از روش میله مصرفی پر شده با استفاده اندازه های مختلف پودر SiC استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که سختی لایه های کامپوزیتی لایه نشانی شده بالاتر از لایه های لایه نشانی شده بدون SiC است. علاوه بر این، افزودن ذرات SiC عملکرد سایشی لایه های AA6082-T6 را افزایش داد. این فرایند حالت جامد را می توان برای طیف وسیعی از فلزات و آلیاژها و برای تولید قطعات چند لایه پیوسته و کامپوزیتی استفاده کرد. رابینسون و همکاران [۲۱] به ساخت آلیاژ منیزیم AZ31B-F با استفاده از روش لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی دست پیدا کردند. نتایج نشان می دهد رسوب کاملا متراکم بوده است و نقص هایی فقط در لبه قطعه تولید شده دیده می شود. البته برای رسیدن به محصول نهایی لبه قطعه ماشینکاری می شود. ویلیامز و همکاران [۲۲] یک قطعه هشت لایه با ماده اولیه WE43-T5 با استفاده از روش لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی تولید کردند. نتایج نشان می دهد که ریزساختاری مطلوب و همگن بدست آمده است و اندازه دانه ها از ۴۵ میکرون به ۲/۷ میکرون رسیده است.

آلیاژهای منیزیم (Mg) یکی از سبک ترین مواد فلزی با چگالی تقریباً ۳۶ درصد کمتر از آلیاژهای آلومینیوم هستند. این چگالی کم با استحکام ویژه و سختی بالا در آلیاژهای منیزیم همراه است. آلیاژهای منیزیم خواص جذاب دیگری مانند قابلیت محافظت الکترومغناطیسی خوب و زیست سازگاری عالی به دلیل غیر سمی بودن دارند. بنابراین آلیاژهای منیزیم مواد مناسبی برای کاربرد در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی و زیست پزشکی هستند. محققان به طور گسترده روش های پردازش پیشرفته را برای آلیاژهای منیزیم بررسی کرده اند تا شکل پذیری، عملکرد سطح و خواص حجمی را بهبود دهند. این تلاش‌ها در زمینه جدید ساخت افزودنی آلیاژهای منیزیم نیز گسترش یافته است. استراتژی های ساخت افزودنی برای آلیاژهای منیزیم، هنوز در مراحل ابتدایی خود هستند. این روشها شامل ساخت افزودنی با استفاده از پرتو لیزر ، قوس الکتریکی و ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی هستند [۲۳].

در مطالعه ای که توسط فارابی و همکاران [۵] انجام شده است، لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی Ti6Al4V با استفاده از یک محفظه فشار مثبت پاکسازی شده با گاز آرگون با خلوص بالا برای به حداقل رساندن اکسیداسیون در دماهای بالا انجام شده است. در این لایه نشانی به دلیل استحکام مناسب در دمای بالا، از یک ابزار تنگستنی استفاده شد. در این مطالعه از دور دورانی ۴۵۰ و۵۰۰ دور در دقیقه، دو سرعت پیشروی ۱/۱۲ و ۱/۴۹ میلیمتر در دقیقه و دو سرعت تغذیه ۲/۵۴ و ۳/۳۸ میلیمتر در دقیقه استفاده شده است. برای کاهش دما در حین فرایند، افزایش سرعت پیشروی و کاهش سرعت دورانی در نظر گرفته شده است. البته لازم است به منظور ثابت نگه داشتن نرخ لایه نشانی حجمی، نسبت نرخ تغذیه به سرعت پیشروی، ثابت نگه داشته شود. دمای اندازه گیری شده در حین فرایند با استفاده از

دوربین مادون قرمز بین ۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد است[۵].

عمده مطالعات صورت پذیرفته در حوزه لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی همانند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به فلزات سبک محدود شده و کمتر آلیاژهای استحکام بالا مانند انواع گریدهای فولاد و سوپر آلیاژها مورد مطالعه قرار می گیرد. این در صورتی است که این آلیاژها و به صورت مشخص فولادها شکل پذیری مناسبی دارند. دلیل این امر را باید در سه حوزه جستجو کرد. اول اینکه، عمدتا این روشها قابلیت خود را در فراوری آلیاژهایی نشان می دهند که خواص انجماد ضعیفی دارند که مثال روشن آن برخی از گریدهای آلومینیوم است. فولادها عمدتا گزینه مناسبی برای جوشکاری و به طبع آن ساخت افزودنی ذوبی هستند. دلیل دوم دقیقا به استحکام بالای این آلیاژها بر می گردد. تغییرشکل پلاستیکی جز جدانشدنی فرایندهای حالت جامد مبتنی بر اصطکاک است. در مورد فولاد ود سایر آلیاژهای استحکام بالا، نیاز به استفاده از نیروهای بیشتر و به دنبال آن دستگاه های با تناژ بالاتر است که خود عاملی محدود ککننده در کاربرد این آلیاژها است. دلیل سوم سایش بالای ابزار در پردازش آلیاژهای استحکام بالا است که منجر می شود تا این فرایندها به سرعت مزیت اقتصادی بودن خود را از دست بدهند.

دما در طول فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد دمای ذوب ماده پایه است. دماهای بالاتر باعث سایش ابزار در حین لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی می شود. برای اندازه‌گیری مستقیم تکامل دما در مواد لایه نشانی شده، جاسازی ترموکوپل ها در منطقه پردازش چالش برانگیز است زیرا مقادیر زیاد تغییر شکل پلاستیکی احتمالاً هر حسگر فیزیکی را از بین می برد. علاوه بر این، ابزار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، پردازش اصطکاکی اغتشاشی و لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی، ناحیه اغتشاشی یا منطقه لایه نشانی را پنهان می‌کند و نظارت بر تکامل دما را چالش برانگیز می‌کند. با این حال، یک تفاوت مهم در لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی این است که مواد لایه نشانی شده در بالای بستر قرار می‌گیرند، در حالی که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یا پردازش اصطکاکی اغتشاشی منطقه اغتشاشی در داخل قطعه کار است. در نتیجه، در فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی امکان اندازه گیری مستقیم تکامل دما در مواد لایه نشانی شده فقط با استفاده از روش های غیر تماسی ممکن است. همچنین در فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی می توان از نمای جانبی مستقیماً بر سطح جریان مواد نظارت نمود. هدف از این کار، دستیابی به بینش فیزیکی در مورد اصول فرایند لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی از طریق توصیف مستقیم تکامل دما، جریان مواد و روش های تولید گرما با استفاده از رویکردهای نظارت درجا[1] است. از فناوری تصویربرداری حرارتی مادون قرمز برای نظارت بر تکامل دما در مواد لایه نشانی شده از نمای جانبی استفاده می شود و ترموکوپل‌ها برای اندازه گیری تکمیلی دما مستقیماً در زیر مواد لایه نشانی شده و در صفحه زیرین قرار داده می شود. در همین حال، بر جریان مواد نیز نظارت می شود تا بینش ارزشمندی در مورد نحوه تولید گرما به دست آید [۶].

۵- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، سه روش تولید مورد بررسی قرار گرفتند. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان فرایند اصلی و فرایندهای ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی و لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی به عنوان دو روش ساخت افزودنی برگرفته شده از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قابل اعمال به طیف وسیعی از فلزات و پلیمرها و همچنین آلیاژهای غیرهمجنس است. پارامترهای موثر در کیفیت جوش شامل هندسه ابزار، سرعت دورانی ابزار، عمق نفوذ ابزار، نیروی محوری، سرعت پیشروی ابزار و زاویه ابزار است. با توجه به ماهیت حالت جامد این فرایند، عیوب ناشی از ذوب و انجماد در نمونه های تولیدی مشاهده نمی شود و عمدتا کیفیت بالایی در نمونه های تولید شده مشاهده می گردد.با استفاده از روش ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی می توان به یک قطعه یکپارچه دست پیدا کرد که نتایج نشان می دهد ابزار نقش بسیار مهمی در ترکیب ورق ها دارد. این فرایند به دو روش قابل اجرا است. در روش اول لایه ها در یک مرحله و همزمان جوشکاری می شوند. روش دوم شامل جوشکاری دو به دو به لایه ها به یکدیگر است که منجر به افزایش ضخامت قابل دسترسی می شود اما زمان فرایند را به صورت قابل ملاحظه ای افزایش می دهد. چون عملا این فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در حالتی است که ورق ها روی هم قرار می گیرند، همان پارامترهای موثر در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که در بالا اشاره شد، در این فرایند نیز اثرگذار است.

[1] In situ monitoring

در فرایند ساخت افزایشی اصطکاکی اغتشاشی می توان از لایه هایی با مواد مختلف استفاده کرد و به قطعه ای رسید که در هر لایه خواص مکانیکی متفاوتی داشته باشد. همچنین با استفاده از این روش می توان لایه های فلزی و غیر فلزی باهم ترکیب کرد. روش لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی شامل ابزار مصرفی است و در هر مرحله یک لایه از ابزار روی بستر قرار می گیرد و بنابراین تفاوت قابل ملاحظه ای از نظر فرایندی با روش قبلی دارد. پارامترهای موثر در فرایند لایه نشانی افزایشی اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و نرخ تغذیه پودر یا میله است. برای رسیدن به ضخامت لایه مورد نظر باید شانه ابزار از بستر فاصله پیدا کند. مواد تغذیه شونده می تواند به صورت پودر یا میله جامد باشد. این پودرها می توانند سرامیکی یا مخلوطی از پودرهای سرامیکی و زمینه فلزی باشند. سرعت بیش از حد ابزار تولید گرمای شدید می کند که منجر به اتصال مواد لایه گذاری شده به ابزار شده و ابزار را دچار آسیب می کند. کیفیت سطح قطعه به نرخ تغذیه بستگی دارد. قطعات تولید شده به روش لایه نشانی افزایشی اصطکاکی اغتشاشی خواص مکانیکی مطلوبی دارند که این خواص وابسته به ریز ساختار قطعه است. به عنوان مثال، در نمونه های تولید شده به این روش، ریز ساختار همگن و اندازه دانه ها کوچک تر از نمونه تجاری است که برای آلیاژ T5-WE43 این مورد به خوبی قابل مشاهده هست. به منظور مقایسه بهتر این روشها، اطلاعات مربوط به فرایندهای مورد مطالعه در مقاله حاضر در جدول (۱) خلاصه شده است.

جدول ۱ مقایسه روش های تولید مورد مطالعه در این مقاله

روش تولید	پارامترهای موثر	مزایا	معایب
جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی	هندسه ابزار، سرعت دورانی ابزار، عمق نفوذ ابزار، نیروی محوری، سرعت پیشروی ابزار و زاویه ابزار	حالت جامد بودن فرایند، عدم نیاز به آماده سازی، سبز بودن فرایند، قابلیت اتصال آلیاژهای غیرهمجنس	سایش بالای ابزار در جوشکاری آلیاژهای با سختی بالا نظیر فولاد، نیاز به ابزار خاص با عوض شدن ضخامت یا جنس قطعه
ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی تک مرحله	هندسه ابزار، سرعت دورانی ابزار، عمق نفوذ ابزار، نیروی محوری، سرعت پیشروی ابزار و زاویه ابزار	حالت جامد بودن فرایند، قابلیت تولید قطعات با لایه های ناهمجنس، تولید قطعات در زمان کوتاه	محدودیت هندسه قطعه قابل تولید، محدودیت در ضخامت قابل تولید
ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی با جوشکاری دو به دو ورق ها	هندسه ابزار، سرعت دورانی ابزار، عمق نفوذ ابزار، نیروی محوری، سرعت پیشروی ابزار و زاویه ابزار	حالت جامد بودن فرایند، قابلیت تولید قطعات با لایه های ناهمجنس، عدم وجود محدودیت در ضخامت قطعه تولیدی	محدودیت هندسه قطعه قابل تولید، زمان زیاد تولید قطعه در صورت افزایش ضخامت
لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی	سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و نرخ تغذیه پودر یا میله	حالت جامد بودن فرایند، عدم وجود محدودیت در ضخامت قطعه تولیدی	مصرفی بودن ابزار، امکان عدم اتصال مناسب بین لایه ها در صورت استفاده از آلیاژهای ناهمجنس

۶- مراجع

[1] Z. Zhao, X. Yang, S. Li, and D. Li, "Interfacial bonding features of friction stir additive manufactured build for 2195-T8 aluminum-lithium alloy," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 38, pp. 396-410, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.042.

[2] H. Venkit and S. K. Selvaraj, "Review on latest trends in friction-based additive manufacturing techniques," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 236, no. 18, pp. 10090-10121, 2022, doi: https://doi.org/10.1177/09544062221101754.

[3] F. Khodabakhshi and A. Gerlich, "Potentials and strategies of solid-state additive friction-stir manufacturing technology: A critical review," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 36, pp. 77-92, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.09.030.

[4] G. G. Stubblefield, K. Fraser, B. J. Phillips, J. B. Jordon, and P. G. Allison, "A meshfree

computational framework for the numerical simulation of the solid-state additive manufacturing process, additive friction stir-deposition (AFS-D)," *Materials & Design*, vol. 202, p. 109514, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109514.

[5] E. Farabi, S. Babaniaris, M. R. Barnett, and D. M. Fabijanic, "Microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloys fabricated by additive friction stir deposition," *Additive Manufacturing Letters*, vol. 2, p. 100034, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.addlet.

[6] D. Garcia et al., "In situ investigation into temperature evolution and heat generation during additive friction stir deposition: A comparative study of Cu and Al-Mg-Si," *Additive Manufacturing*, vol. 34, p. 101386, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101386.

[7] C. Strawn and A. M. Strauss, "Investigation of friction stir welding for lunar applications," *Acta Astronautica*, vol. 210, pp. 364-371, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.05.035.

[8] M. Sajed and S. Seyedkashi, "Analysis of Material Flow and Phase Transformation in Friction Hydro-Pillar Processing of 1045 Steel," *ADMT Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 31-37, 2020, doi: https://doi.org/10.30495/admt.2020.1900258.1198.

[9] M. Ahmadi, H. R. Ahmadi, M. R. Khanzadeh, and H. Bakhtiari, "Investigation of microstructure, hardness and intermetallic compound in friction stir welding of AA1050 aluminum alloy to copper," (in eng), *Journal of Welding Science and Technology of Iran*, Research vol. 9, no. 1, pp. 31-38, 2023. [Online]. Available: http://jwsti.iut.ac.ir/article-1-426-en.html.

[10] A. Emamikhah, A. Kazerooni, M. Rakhshkhorshid, Numerical and experimental study of microstructural and mechanical evolutions in dissimilar friction stir welding of AA5083-O and AA6061-T6 aluminum alloys,"(in persian), *Journal of Mechanical Engineering of University of Tabriz*, Vol. 53, pp. 121-130, 2023, doi: https://doi.org/10.22034/JMEUT.2023.54083.3199.

[11] N. Gotawala, N. Kumar Mishra, and A. Shrivastava, "Solid-state depositions of multilayer SS304 by friction stir metal deposition," *Materials Letters*, vol. 314, p. 131881, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131881.

[12] M. M. El-Sayed Seleman et al., "The Additive Manufacturing of Aluminum Matrix Nano Al2O3 Composites Produced via Friction Stir Deposition Using Different Initial Material Conditions," *Materials*, vol. 15, no. 8, p. 2926, 2022, doi: https://doi.org/10.3390/ma15082926.

[13] M. Srivastava, S. Rathee, S. Maheshwari, A. Noor Siddiquee, and T. K. Kundra, "A Review on Recent Progress in Solid State Friction Based Metal Additive Manufacturing: Friction Stir Additive Techniques," *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, vol. 44, no. 5, pp. 345-377, 2019/09/03 2019, doi: https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1490250.

[14] A. Kumar Srivastava, N. Kumar, and A. Rai Dixit, "Friction stir additive manufacturing – An innovative tool to enhance mechanical and microstructural properties," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 263, p. 114832, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114832.

[15] Z. Shen et al., "Local microstructure evolution and mechanical performance of friction stir additive manufactured 2195 Al-Li alloy," *Materials Characterization*, vol. 186, p. 111818, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111818.

[16] H. A. Derazkola, F. Khodabakhshi, and A. Simchi, "Evaluation of a polymer-steel laminated sheet composite structure produced by friction stir additive manufacturing (FSAM) technology," *Polymer Testing*, vol. 90, p. 106690, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106690.

[17] M. Liu et al., "Achieving high fatigue strength of large-scale ultrafine-grained copper fabricated by friction stir additive manufacturing," *Materials Letters*, vol. 346, p. 134531, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134531.

[18] A. Das, T. Medhi, S. Kapil, and P. Biswas, "Different build strategies and computer-aided process planning for fabricating a functional component through hybrid-friction stir additive manufacturing," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, pp. 1-22, 2023, doi: https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2228258.

[19] R. J. Griffiths et al., "Solid-state additive manufacturing of aluminum and copper using additive friction stir deposition: Process-microstructure linkages," Materialia, vol. 15, p. 100967, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100967.

[20] J. Gandra, P. Vigarinho, D. Pereira, R. M. Miranda, A. Velhinho, and P. Vilaça, "Wear characterization of functionally graded Al–SiC composite coatings produced by Friction Surfacing," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 52, pp. 373-383, 2013, DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.059.

[21] T. W. Robinson, M. Williams, H. Rao, R. P. Kinser, P. Allison, and J. Jordon, "Microstructural and

mechanical properties of a solid-state additive manufactured magnesium alloy," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 144, no. 6, p. 061013, 2022.

[22] M. B. Williams et al., "Elucidating the Effect of Additive Friction Stir Deposition on the Resulting Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Alloy WE43," *Metals*, vol. 11, no. 11, p. 1739, 2021, doi: https://doi.org/10.3390/met11111739.

[23] S. S. Joshi et al., "Additive friction stir deposition of AZ31B magnesium alloy," *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 10, no. 9, pp. 2404-2420, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.03.011.