



# Investigating the Mechanical Properties and Microhardness of the Combined Electrode with Wire Arc Additive Manufacturing Based on Gas Metal Arc Welding



## ARTICLE INFO

### Authors

Farzad-Rik S<sup>1\*</sup>,  
Mahmoodi M<sup>1</sup>,  
Tagimalek H<sup>1</sup>,  
Maraki M.R.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>2</sup> Department of Materials and Metallurgy Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

### \* Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran  
salar.farzad@semnan.ac.ir

### How to cite this article

Farzad-Rik S, Mahmoodi M, Tagimalek H, Maraki M.R. Investigating the Mechanical Properties and Microhardness of the Combined Electrode with Wire Arc Additive Manufacturing Based on Gas Metal Arc Welding. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT), 2023;23(10):177-181.

## ABSTRACT

Today, the wire arc additive manufacturing process is based on gas metal arc welding as one of the electric arc fusion processes, widely used in the industry due to its high efficiency. The correct selection of input parameters directly affects the welding quality, and by controlling those parameters, the amount of welding material can be reduced, its properties can be improved, and then the efficiency of the process can be increased. In this research, the production of a composite sample with a combined electrode by gas metal arc welding (GMAW) was investigated. At first, the welding speed, voltage, and wire speed were selected by studying and checking the effective parameters of the process in the wire and arc additive manufacturing (WAAM) by gas metal arc welding. Then, in order to evaluate the effects of effective welding parameters, three three-level factors were designed by the Taguchi method in Minitab software with an L9 array-related experiment. After performing the appearance review process, tensile and microhardness tests were performed. The tensile test results showed that the highest tensile strength is 294.327 MPa in the sample with a welding speed of 86 mm/min, voltage of 32 V, and wire feeding speed of 6 m/min. The microhardness test results showed that the highest value of microhardness was 463.1 Vickers for the sample produced with a welding speed of 86 mm/min, voltage of 27 V, and wire feeding speed of 5 m/min.

**Keywords** WAAM, GMAW, Combined Electrode, Microhardness, Mechanical properties

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته  
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۱۷۷-۱۸۱



## بررسی خواص مکانیکی و میکروسختی الکتروود ترکیبی با روش ساخت افزایشی قوس و سیم مبتنی بر جوشکاری قوس الکتريکی با گازمخافظ



### چکیده

امروزه فرآیند تولید افزودنی سیم و قوس بر پایه جوشکاری قوس فلزی گازی به عنوان یکی از فرآیندهای همجوشی قوس الکتريکی است که به دلیل کارایی بالا به طور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. انتخاب صحیح پارامترهای ورودی مستقیماً بر کیفیت جوش تأثیر می‌گذارد و با کنترل آن پارامترها می‌توان میزان مواد جوش را کاهش داد و خواص آن را بهبود بخشید. در این پژوهش تولید نمونه کامپوزیتی با الکتروود ترکیبی با روش جوشکاری قوس الکتريکی با گازمخافظ مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا، با استفاده از مطالعه و بررسی پارامترهای مؤثر فرآیند در ساخت افزایشی قوس و سیم به روش جوشکاری قوس الکتريکی با گازمخافظ سرعت جوش، ولتاژ و سرعت سیم انتخاب شد. سپس جهت ارزیابی اثرات پارامترهای جوشکاری مؤثر، سه فاکتور سه سطحی به روش تاگوشی در نرم افزار مینیتب با آرایه L9 آزمایشات مربوط طراحی گردید. پس از انجام فرآیند بررسی ظاهری، تست کشش و میکروسختی انجام شد. نتایج تست کشش نشان داد که بیشترین استحکام کششی ۲۹۴/۳۲۷ مگاپاسگال در نمونه با سرعت جوشکاری ۸۶ میلی‌متر بر دقیقه، ولتاژ ۳۲ ولت و سرعت تغذیه سیم ۶ متر بر دقیقه می‌باشد. نتایج آزمون میکروسختی نشان داد که بیشترین مقدار میکروسختی، مربوط به نمونه تولید شده با سرعت جوشکاری ۸۶ میلی‌متر بر دقیقه، ولتاژ ۲۷ ولت و سرعت تغذیه سیم ۵ متر بر دقیقه به مقدار ۴۶۳/۱ ویکرز بوده است.

### مشخصات مقاله

#### نویسنده‌ها

سالار فرزادریک<sup>۱\*</sup>  
مسعود محمودی<sup>۱</sup>  
هادی تقی‌ملک<sup>۱</sup>  
محمدرضا مرکی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

#### \* نویسنده مسئول

آدرس: دانشکده مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
salar.farzad@semnan.ac.ir

**کلیدواژه‌ها** ساخت افزایشی قوس و سیم، جوشکاری قوس الکتريکی با گازمخافظ، الکتروود ترکیبی، میکروسختی، خواص مکانیکی

## ۱- مقدمه

که نفوذ و ذوب فلز پایه را کاهش می‌دهد. در نهایت، این دو فرایند از نظر پارامترهای قابل قبول متفاوت هستند، زیرا سیم سرد می‌تواند انتقال فلز را تثبیت کند.

در این پژوهش با اضافه نمودن آلیاژهای آلومینیوم-نیکل-مس به حوضچه مذاب و تولید نمونه کامپوزیتی، به بررسی خواص مکانیکی و میکروسختی در نمونه‌های کامپوزیتی الکتروکتریکی و آهن-مس-نیکل-آلومینیوم با فرآیند ساخت افزایشی قوس و سیم بر پایه‌ی جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در مرحله اول با استفاده از مطالعه و بررسی مقالات پارامترهای مؤثر در روش ساخت افزایشی قوس و سیم مبنی بر جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ استخراج شد. سپس مطالعه تجربی بر روی پارامترهای جوشکاری و نحوه‌ی ادغام الکترودهای آهن-مس-نیکل-آلومینیوم در حین جوش آلیاژ پایه صورت گرفت. شکل ۱ چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در جدول ۱ آزمایش‌های انجام شده با تغییرات در پارامترها نشان داده شده است. پس از انجام آزمایش‌های نمونه‌های حاصله توسط تست خواص مکانیکی و میکروسختی سنجی قرار گرفت. از استاندارد ASTM E8/E8M برای تست کشش استفاده شد. شکل ۲ نمونه تولید شده جهت تست کشش در فرآیند ساخت افزایشی قوس و سیم مبتنی بر جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ قابل مشاهده است.



شکل ۱) چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی پژوهش حاضر

فرآیند ساخت افزایشی یکی از روش‌های نوین تولید قطعات مختلف مهندسی از جنس پلیمرها، سرامیک‌ها و فلزات است [۱]. در دهه‌های اخیر، فرآیند ساخت افزایشی توجه صنایع مختلف مانند هوافضا، خودروسازی و غیره را به خود جلب کرده است. در این فرآیند معمولاً قطعه از طریق رسوب‌گذاری لایه روی لایه ماده مدنظر و براساس مدلی سه‌بعدی ساخته می‌شود [۲]. مزیت اصلی ساخت افزایشی قوس و سیم نسبت به سایر تکنیک‌های ساخت افزایشی این است که نرخ رسوب آن بالاتر است [۳]. از این رو ساخت افزایشی قوس و سیم برای تولید اجزای بزرگ به شبکه استفاده می‌شود. مزیت دیگر ساخت افزایشی قوس و سیم هزینه سرمایه کمتر آن در مقایسه با روش‌های دیگر است [۴]. اما نرخ پایین رسوب‌گذاری مهم‌ترین محدودیت این فرآیند است برای برطرف کردن این محدودیت می‌توان از روش‌های جایگزین مانند روش‌های جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ، جوشکاری قوسی با الکتروکتریکی و جوشکاری پلاسما با نرخ رسوب بسیار بالا استفاده کرد [۵]. فناوری ساخت افزایشی این پتانسیل را دارد که تقریباً ۵۰ درصد هزینه ماشین‌کاری آلیاژهای با استحکام بالا را کاهش دهد. هدف اصلی این فرآیندها به حداقل رساندن زمان تولید و استفاده از مواد است، درحالی که اصلی‌ترین چالش‌های پیش‌روی این فناوری غلبه بر مسائل مربوط به عملکرد و کیفیت ساختاری است. با این حال، این یک مقایسه سالم بین ماشین‌کاری CNC و روش‌های ساخت افزایشی را از نظر سرعت، مواد اولیه، عرضه، دقت، هندسه و نوشتن برنامه برای ساخت جزء به دست می‌آورد [۶]. آهن با سطح صاف و نقره‌ای براق مایل به رنگ خاکستری می‌باشد و دارای استحکام بسیار پایین و مقاومت اندک در برابر خوردگی است [۷]. برای برقراری قوس در حین جوشکاری از این آلیاژ استفاده شد. آلیاژ مس با نماد Cu برای پایداری قوس در حین جوشکاری که پایداری قوس را برقرار کرده و آلیاژ نیکل با نماد و آلومینیوم برای تولید نمونه کامپوزیتی آلیاژهای حافظه‌شکلی مورد استفاده قرار گرفت. راکش چاوداری و همکاران [۸] مطالعه پارامتری و بررسی هندسه‌گرده نمونه توسط فرآیند ساخت افزایشی قوس و سیم مبتنی بر جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ را بر روی فولادهای زنگ‌زن ۳۱۶L بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که ساختار چند لایه به‌دست‌آمده در پارامتر بهینه‌سازی شده، عاری از جدا شدن بود، و همجوشی بدون درز بین لایه‌های به‌دست‌آمده از ساختار تشخیص داده شد. که مطالعه حاضر برای کاربردهای صنعتی برای ساخت سازه‌های چند لایه مفید خواهد بود. ریبرو و همکاران [۹]، نشان دادند که تغذیه سیم سرد باعث افزایش اندک جریان بدون افزایش نفوذ متناظر می‌شود. ویژگی که جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ را متمایز می‌کند، کاهش رقت ناشی از نرخ تغذیه سیم سرد است،

گردید. لازم به ذکر است که آزمون کشش با سرعت کشش ۲ میلی-متر بر دقیقه صورت گرفت. نتایج آزمون کشش برای نمونه‌های تولید شده به منظور بررسی خواص کششی شامل استحکام کششی و ازدیاد طول در دمای اتاق انجام گرفت. نتایج به دست آمده از آزمون کشش برای هر یک از نمونه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲) نتایج حاصل از آزمون کشش در این پژوهش

شماره آزمایش	استحکام کششی (مگاپاسکال)	ازدیاد طول (%)
۱	۲۱۳/۴۲۶	۰/۲۱
۲	۲۸۵/۳۸۷	۰/۱۵
۳	۲۴۴/۳۰۹	۰/۲۳
۴	۲۰۵/۳۰۱	۰/۱۰
۵	۲۳۴/۴۳۱	۰/۱۹
۶	۲۵۴/۴۷۴	۰/۱۸
۷	۲۹۴/۲۰۶	۰/۲۲
۸	۲۲۵/۲۲۶	۰/۱۲
۹	۲۹۳/۳۲۷	۰/۲۹

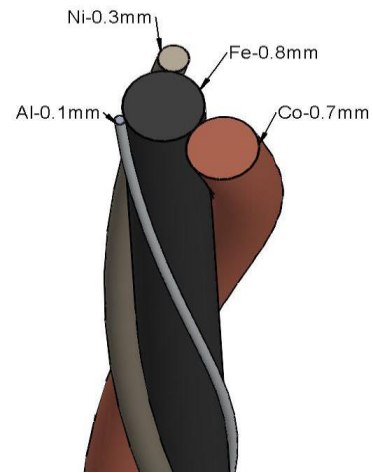
### ۳-۲- میکروسختی سنجی

آزمون میکروسختی سنجی توسط دستگاه سختی سنجی ویکرز مدل HVS-1000M انجام شد. آزمون میکروسختی با نیروی ۵۰۰ گرم، مدت زمان ۱۵ ثانیه و در فاصله ۵ میلی‌متری از سطح در نقاط متفاوت از سطح مقطع انجام شد.

برای هر نمونه از ۴ نقطه مختلف برای یافتن میانگین سختی هر نمونه استفاده شد. نتایج میانگین سختی در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بالاترین سختی مربوط به نمونه‌ی نمونه ۸ در سرعت جوشکاری ۸۶ میلی‌متر بر دقیقه، ولتاژ ۲۷ ولت و سرعت تغذیه سیم ۵ متر بر دقیقه به مقدار ۶۳/۱ ویکرز می-باشد.

جدول ۳) نتایج میانگین میکروسختی

شماره آزمایش	نقطه ۱	نقطه ۲	نقطه ۳	نقطه ۴	میانگین میکروسختی
۱	۳۷۷/۵	۳۶۰/۷	۳۵۰	۳۸۹/۸	۳۶۹/۵
۲	۴۲۵	۴۱۰/۲	۴۴۲/۸	۴۰۵/۵	۴۲۰/۸
۳	۴۰۲/۸	۳۹۵/۶	۴۱۸/۲	۳۷۳	۳۹۷/۴
۴	۳۵۲/۵	۳۳۰/۷	۲۹۸/۳	۳۷۵/۲	۳۳۹/۱
۵	۴۳۵/۴	۴۱۱/۶	۳۹۴/۳	۴۲۲/۶	۴۱۵/۹
۶	۳۴۳/۸	۳۲۵/۹	۳۷۵/۱	۳۶۸	۳۵۳/۲
۷	۳۹۲/۲	۳۷۶/۴	۴۱۶/۹	۳۶۱	۳۸۶/۶
۸	۴۷۶	۴۹۴/۳	۴۵۹/۵	۴۲۲/۸	۴۶۳/۱
۹	۴۳۹/۳	۳۹۷	۴۱۵/۸	۳۸۲/۴	۴۰۸/۷



الف



ب

شکل ۲) ساخت افزایشی قوس و سیم: الف) الکتروود ترکیبی، ب) شکل ظاهری نمونه‌های تولید شده

جدول ۱) آزمایش‌های انجام شده با تغییرات در پارامترها

شماره آزمایش	سرعت جوشکاری (میلی‌متر بر دقیقه)	ولتاژ (ولت)	سرعت سیم مصرفی (متر بر دقیقه)
۱	۴۴	۲۴	۵
۲	۴۴	۲۷	۶
۳	۴۴	۳۲	۷
۴	۶۲	۲۴	۶
۵	۶۲	۲۷	۷
۶	۶۲	۳۲	۵
۷	۸۶	۲۴	۷
۸	۸۶	۲۷	۵
۹	۸۶	۳۲	۶

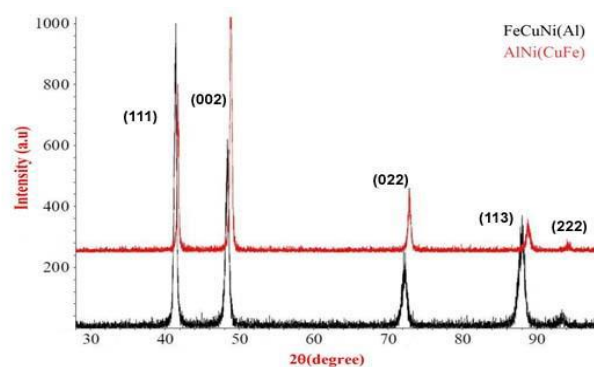
### ۳-۲- بحث و نتایج

#### ۳-۱- تست کشش

به منظور انجام آزمون کشش بر روی نمونه‌ها، از دستگاه تست کشش کامپیوتری SANTAM STM 150 با ظرفیت ۱۵ کیلو نیوتن برای بررسی خواص کششی نمونه‌های جوشکاری شده استفاده

## ۳-۳- نتایج XRD

در این پژوهش از ۹ نمونه آزمایش شده شماره ۴ و ۹ مورد بررسی قرار داده شد. نمونه‌های انتخاب شده نمونه شماره ۹ بهینه‌ترین نمونه از لحاظ طراحی آزمایش و نمونه شماره ۴ برای آزمون تست SEM و XRD انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفتند. تجزیه و تحلیل ترکیب لایه بین فلزی از روش (XRD) دو آلیاژ  $FeAlNiCu$  استفاده از فرآیند ساخت افزایشی قوس و سیم با روش جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ، توسط آنالیز SEM و تعیین ترکیب لایه بین فلزی فاز انجام شد. نتایج نشان داد که ریزساختار از ساختار بلوری FCC تشکیل شده است. بدیهی است که هیچ تفاوتی بین ساختارهای کریستالی دندریتی و بین دندریتی وجود ندارد. این نتایج همچنین نشان داد که فاز FCC را می‌توان در نمونه  $Fe-Al-Ni-Cu$  تهیه شده توسط هر دو فرآیند شناسایی کرد. ساختار غالب FCC بود. اگرچه چندین عنصر با ویژگی‌های ساختار کریستالی متفاوت در هر دو آلیاژ وجود داشت (شکل ۳).



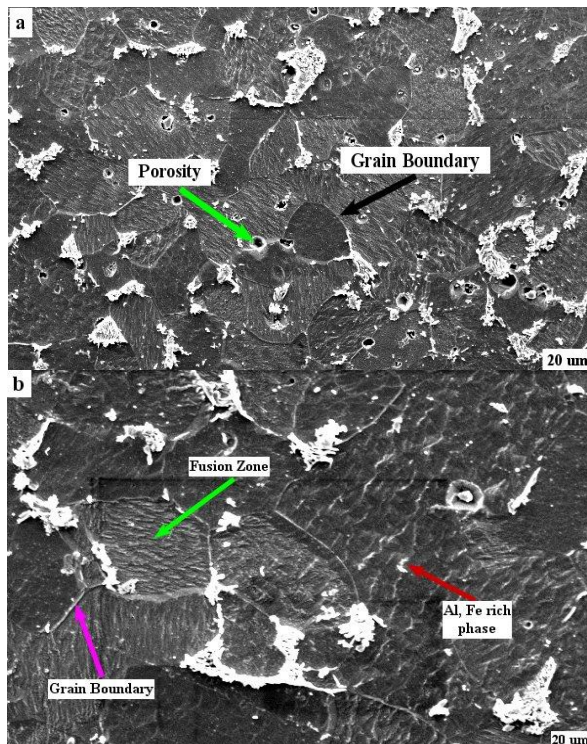
شکل ۳) طیف XRD مربوط به آلیاژهای مورد مطالعه با ساختار کریستالی FCC

## ۳-۴- نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از منطقه جوش نمونه را نشان می‌دهد. با توجه به این تصاویر می‌توان به روشنی دریافت، که ذرات سفید فاز دوم احتمالاً در امتداد مرز دانه پخش و پراکنده می‌شوند. ذره فاز دوم با رنگ سفید روشن از آلومینیوم و فاز آهن غنی شده با رنگ سفید تیره مرزبندی شده است. با مقدار بیشتر آلومینیوم و آهن غنی شده اما نیکل و مس کمتر، محتوای ذرات فاز دوم با رنگ سفید روشن فاز مرز دانه به تدریج افزایش می‌یابد که یکی از عوامل مهم انرژی جوشکاری است که می‌تواند باعث واکنش‌های احتمالی بین آلیاژها شود. علاوه بر این، ذوبی که در حین جوشکاری رخ می‌دهد نیز باعث ایجاد حفره و تخلخل در اندازه‌های مختلف می‌شود.

با کاهش ولتاژ جوش، مقدار حرارت تولید شده در ناحیه جوش کاهش می‌یابد و این عامل باعث افزایش سرعت خنک شدن و

کاهش اندازه دانه‌های ایجاد شده می‌شود. افزایش حرارت ایجاد شده با سرعت جوش رابطه معکوس و رابط مستقیم با ولتاژ و سرعت سیم جوش دارد. هر چه ولتاژ جوش کمتر باشد طول قوس و میزان نفوذ کمتر می‌شود و با افزایش گرما و افزایش ایجاد حفره‌ها و تخلخل در ناحیه مرز دانه‌های جوش، پایداری قوس جوش در نوسان است. از سایر مشاهدات SEM مشخص شد که نواحی دندریتی کاملاً صاف هستند و هیچ ویژگی قابل توجهی در آنها مشاهده نمی‌شود. تجزیه و تحلیل نشان داد که سطح عناصر آلیاژی در مناطق دندریتی و بین دندریتی در هر سه آلیاژ متفاوت است. سطح  $Al-Ni-Cu$  در نواحی دندریتی نسبتاً پایین‌تر بوده و با این حال، تعداد رسوبات نسبتاً کم بوده و تفاوت معنی‌داری در توزیع رسوبات آهن از سطح تا هسته نمونه مشاهده نشده است. مشاهدات SEM همچنین نشان داد که رسوبات غنی از آهن دارای مورفولوژی دایره‌ای یا بیضی شکل هستند.



شکل ۴) تصاویر SEM از جوش نمونه  $Fe-Al-Ni-Cu$  بر روی فلز پایه St37

## ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های انجام شده و مقادیر به دست آمده در این پژوهش که هدف از انجام این آزمایش‌های، دست‌یابی به حداکثر نیروی کششی و بیشترین میکروسختی می‌باشد. در این پژوهش تولید نمونه الکترونی ترکیبی آهن-مس-نیکل-آلومینیوم با روش ساخت افزایشی قوس و سیم مبتنی بر جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ مورد بررسی قرار گرفت. پس از انجام فرآیند بررسی ظاهری، تست کشش و میکروسختی انجام شد. نتایج تست کشش نشان داد که بیشترین استحکام کششی و

- manufacturing of 316L stainless steels. *Metals*. 2022 Jul 21;12(7):1232.
9. Nobrega G, Souza MS, Rodríguez-Martín M, Rodríguez-González P, Ribeiro J. Parametric optimization of the GMAW welding process in thin thickness of austenitic stainless steel by Taguchi method. *Applied Sciences*. 2021 Sep 19;11(18):8742.

ازدییاد طول به ترتیب. ۲۹۴/۲۰۶ مگاپاسگال و ۰/۲۹ در نمونه شماره ۷ به دست آمد. نتایج آزمون میکروسختی نشان داد که بیشترین مقدار میکروسختی، مربوط به نمونه ۸ در سرعت جوشکاری ۸۶ میلی‌متر بر دقیقه، ولتاژ ۲۷ ولت و سرعت تغذیه سیم ۵ متر بر دقیقه به مقدار ۴۶۳/۱ ویکرز بوده است.

#### تأییدیه اخلاقی

نویسندگان این مقاله تأیید می‌نمایند که این مقاله تماماً حاصل دستاوردهای تحقیقی این گروه می‌باشد و در صورت استفاده از دستاوردهای دیگران مرجع استفاده از آن ذکر شده است.

#### تعارض منافع

این مقاله حاصل استخراج از موضوع تحقیقاتی دوره کارشناسی ارشد جناب آقای مهندس سالار فرزاد ریک می‌باشد.

#### منابع مالی

هزینه‌های پژوهش بر عهده دانشگاه سمنان بوده است.

#### مراجع

1. Le VT, Paris H. A life cycle assessment-based approach for evaluating the influence of total build height and batch size on the environmental performance of electron beam melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018 Sep;98:275-88.
2. Ning J, Yu ZS, Sun K, Hu MJ, Zhang LX, Zhang YB, Zhang LJ. Comparison of microstructures and properties of X80 pipeline steel additively manufactured based on laser welding with filler wire and cold metal transfer. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021 Jan 1; 10:752-68.
3. Rodrigues TA, Duarte V, Miranda RM, Santos TG, Oliveira JP. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*. 2019 Apr 4;12(7):1121.
4. Todaro CJ, Easton MA, Qiu D, Brandt M, StJohn DH, Qian M. Grain refinement of stainless steel in ultrasound-assisted additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2021 Jan 1; 37:101632.
5. Kumar MB, Sathiya P. Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges. *Thin-Walled Structures*. 2021 Feb 1; 159:107228.
6. Jiang J, Xu X, Stringer J. Optimization of process planning for reducing material waste in extrusion based additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019 Oct 1; 59:317-25.
7. Ngo MH, Gandham B, Le DH, Van TN, Van TN. Unique characteristics of the novel-GTAW process for the butt joint of ultra-thin silicon steel sheets. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023 Jan 6; 85:894-903.
8. Chaudhari R, Parmar H, Vora J, Patel VK. Parametric study and investigations of bead geometries of GMAW-based wire-arc additive