



بررسی متغیرهای طراحی فرآیند ساخت افزایشی همبسته ۴۰۴۳، برای ایجاد تغییرات غیر عملکردی بستار

محمد کامیاب^{۱*}، محمدصادق محبی^۲، علیرضا حاجی‌علی‌محمدی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ساخت و تولید دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران، m_kamyab@ip-co.com

^۲ عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران، mohebbi@qut.ac.ir

^۳ عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ahajiali@semnan.ac.ir

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۴ بهمن ۱۳۹۸

پذیرش: ۳ خرداد ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

ساخت افزایشی سیم و قوس

خواص مکانیکی

دمای بین خط جوش

سرعت پیشروی

چالش‌های پیش روی روش‌های ساخت افزایشی سیم و قوس به منظور ساخت قطعات تولیدی ایجاد هندسه‌های پیچیده، مواد مورد استفاده، کیفیت ساخت قطعه، زمان و هزینه تولید است. مقدار انحلال هیدروژن در آلومینیوم در دماهای گرمتر از ۶۵۰ درجه سانتیگراد به شدت افزایش می‌یابد و باعث ایجاد تخلخل هیدروژنی و در نتیجه کاهش خواص مکانیکی قطعه می‌شود. برای رفع تخلخل هیدروژنی، علاوه بر تمیزی و چربی‌زدایی، باید حفاظت گازی تا زمانی که دمای قطعه به زیر ۵۰۰ درجه سانتیگراد برسد، تداوم داشته باشد. در این مطالعه یک هندسه ساده بررسی شد و خواص مکانیکی نمونه‌های ایجاد شده از دیواره‌های رسوب داده شده بر روی زیرلایه، در شرایط مختلف مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. با افزایش زمان توقف بین پاسی، و در نتیجه کاهش بیشتر دمای بین خط جوش، نسبت ارتفاع لایه به عرض آنها، افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش بهینه سرعت پیشروی علاوه بر کاهش ارتفاع و عرض لایه‌ها، باعث گرمای ورودی کمتر و بهبود خواص مکانیکی شده و ویژگی‌های دقیق‌تری را می‌توان روی سطوح خارجی بستار ایجاد کرد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

روش ساخت افزایشی مبتنی بر سیم و قوس^۱، و جوشکاری فلزات در بسیاری از جنبه‌ها شبیه هم هستند. ذوب، انجماد، تنش‌های پسماند، اعوجاج و تخلخل در هر کدام از این دو فرآیند رخ می‌دهد، و سازوکارهای اساسی هر کدام از این اثرات در هر دو یکسان است. یک تمایز مهم بین این دو روش این است که در جوشکاری دو بخش مجزا از هم به یکدیگر متصل شده تا بخش پیچیده‌تری را ایجاد کند، در حالیکه ساخت افزایشی^۲ (AM) یک جز منفرد و تنها است که ممکن است پس از تکمیل مراحل ساخت جوش داده شود، یا به قطعه دیگری متصل شود.

هرچند از منابع گرمائی و روش‌های جوشکاری، در ساخت به روش افزایشی استفاده می‌شود، و می‌توان آنها را به عنوان فرآیندهایی یکسانی از نظر موادی در نظر گرفت، اما کیفیت سطح مورد انتظار برای فرآیندهای ساخت افزایشی و جوشکاری متفاوت است. به طور کلی کیفیت سطح با ضخامت لایه و مقدار ذوب رابطه عکس دارد [۱].

در روش ساخت افزایشی مبتنی بر سیم و قوس، از ترکیب قوس برقی به عنوان منبع گرمائی و سیم به عنوان ماده افزودنی^۳، استفاده می‌شود. این شیوه می‌تواند با روش‌های مرسوم، همچون جوشکاری قوس برقی با گاز محافظ^۴ (MIG و MAG)، و همچنین با استفاده از فرآیندهای جوشکاری قوس برقی با الکتروود غیر مصرفی تنگستن^۵ (TIG) و نیز روش جوشکاری با پلاسما^۶ ترکیب شود. با توجه به سهولت بکارگیری و نرخ رسوب‌گذاری^۷ تند در روش MIG، این روش مورد اقبال بیشتری قرار گرفته است [۲-۳].

ویلیامز و همکاران^۸ [۴] معتقدند روش‌های ساخت افزایشی مبتنی بر سیم و قوس می‌تواند از گسترده‌ترین فن‌آوری‌های ساخت افزایشی فلزات باشد، که انعطاف پذیری در رسوب‌گذاری فلز با فرآیند جوشکاری مهار شده را، با دقت حرکتی ماشین مهار عددی و یا ربات، ترکیب می‌کند. این شیوه می‌تواند زمان و هزینه کمتری نسبت به سایر فناوریها، برای ساخت نمونه‌های اولیه و تولید در دسته‌های کوچک، ایجاد نماید.

ممکن است از فرآیند MIG به عنوان یک فرآیند جوش قوسی مورد نیاز در این روش استفاده شود. در این صورت الکتروود که یک سیم قابل

مصرف است، و هماهنگی آن با مشعل^۹ (افشانه) جوشکاری به‌راحتی قابل مهار است. بنابراین فرآیند MIG بعنوان یک فرآیند ساخت افزایشی برای موادی مانند آلومینیوم و فولاد مناسب است [۳-۴].

طبق بررسی و مقایسه‌های که در دانشگاه کرن‌فیلد^{۱۰}، توسط جیان چن^{۱۱} [۵] در مورد جوشکاری قوس تنگستن گاز^{۱۲} (GTAW) و قوس برقی گاز با الکتروود مصرفی^{۱۳} (GMAW)، انجام گرفته است نرخ رسوب دهی WAAM برای یک فرآیند مبتنی بر GTAW می‌تواند به ۱ کیلوگرم در ساعت برسد، در حالی که نرخ رسوب در فرآیند ساخت افزایشی مبتنی بر سیم و قوس برقی گاز با الکتروود مصرفی^{۱۴} (WAAM-GMAW) چندین کیلوگرم در ساعت می‌تواند باشد. نقطه ضعف WAAM-GMAW، سرگردانی قوس و پراکندگی در رسوبات Ti و همبسته‌های آن است، که این وضعیت با استفاده از روش انتقال فلز سرد^{۱۵} (CMT)، که یک فرآیند GMAW اصلاح شده است بهبود خواهد یافت. از بین فرآیندهای رسوب‌گذاری مبتنی بر قوس برای آلومینیوم، فرآیند GMAW به‌راحتی می‌تواند به صورت خودکار ساخته شود، همچنین از لحاظ تولیدی تطبیق بسیار خوبی از لحاظ قطر و نوع مواد مورد استفاده به عنوان ماده افزودنی خواهد داشت. امکان تغییر حالت انتقال فلز^{۱۶} برای انطباق با قطرهای مختلف و تنوع در رسوب‌گذاری، از دیگر ویژگی‌های مهم و جذاب این فرآیند است. با این حال، مطالعات کمی در مورد حالت‌های انتقال در فرآیند GMAW آلومینیوم انجام شده است. حالت‌های انتقال فلز بین حالت انتقال قطره‌ای^{۱۷} (GL) و پاششی^{۱۸} (SP) می‌تواند نرخ ذوب‌های مختلفی را فراهم کند، انتقال فلز در حالت اتصال کوتاه^{۱۹} (SC) با بسامد تند نیز در فرآیند CMT مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴-۵].

لی و همکاران^{۲۰} [۶] با استفاده از تحلیل‌های رگرسیون^{۲۱} و روش تاگوچی^{۲۲} روش‌هایی برای پیش بینی گرده جوش بر پایه متغیرهای ورودی پیشنهاد داده‌اند. در روش ساخت افزایشی توسط جوشکاری قوس برقی با گاز محافظ نیز اتصال بین هندسه جوش با متغیرهای ورودی فرآیند توسط یک الگو باید برقرار شود، لذا به منظور تنظیم بهینه متغیرهایی که هندسه گرده جوش طراحی شده را ایجاد می‌نمایند، اتصال بین متغیرهای متغیر فرآیند و هندسه گرده جوش باید مطالعه شود [۶-۷].

¹³ Gas Metal Arc Welding

¹⁴ Wire & Arc Additive Manufacturing-Gas Metal Arc Welding

¹⁵ Cold Metal Transfer

¹⁶ Metal Transfer Mode

¹⁷ Globular Transfere

¹⁸ Spray Transfer

¹⁹ Short Circuit Transfer

²⁰ H. K., Lee

²¹ Regression Analysis

²² Taguchi Method

¹ Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)

² Additive Manufacturing

³ Additive Material

⁴ Gas shielded arc welding (Metal Inert Gas and Metal Active Gas)

⁵ Tungsten Inert Gas

⁶ Plasma Arc welding

⁷ Deposition Rate

⁸ Williams, S.W.

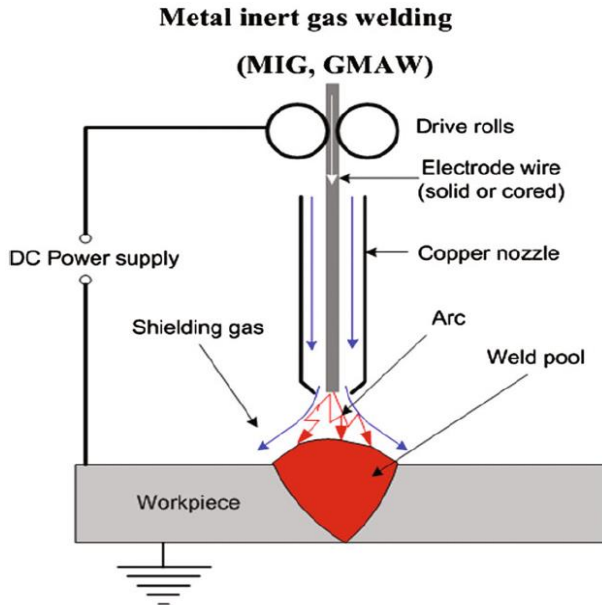
⁹ Torch

¹⁰ Cranfield

¹¹ Jian Chen

¹² Gas Tungsten Arc Welding

استفاده قرار می‌گیرد. رسوب‌گذاری دیواره‌ها معمولاً به صورت دو طرفه انجام می‌شود، اما برای بررسی متغیرهای ساخت افزایشی، بیشتر به صورت یک طرفه انجام می‌شود. حرکت به صورت مارپیچی و یا زیگزاگ برای ساخت افزایشی قطعات با حجم بیشتر استفاده می‌شود [۱۱-۱۲].



شکل ۱: فرآیندهای ساخت افزایشی فلز مبتنی بر سیم و قوس [۱۱]

در این مطالعه نمونه‌هایی از جنس همبسته آلومینیوم ۴۰۴۳، که به صورت دیواره با مسیر حرکت یک طرفه بر روی زیرلایه^۶ رسوب‌گذاری شده‌اند، بررسی و خواص مکانیکی آنها به منظور ایجاد ویژگی‌های بیرونی بستار، مقایسه شدند.

افزایش سرعت پیشروی، کاهش ارتفاع و عرض لایه‌ها در حد بهینه، باعث گرمای ورودی^۷ کمتر و بهبود خواص مکانیکی شد. به نحوی که نتایج آن برای ایجاد ویژگی‌های بیرونی بستار، بدون نیاز به اعمال تغییر در قالب تولید انبوه، می‌تواند بررسی شود. مهار روی عرض لایه‌های ایجاد شده، از طریق پایش دمایی حاصل شده است، که قابلیت ایجاد ویژگی‌های دقیق‌تر برای رسوب‌گذاری روی سطوح خارجی قطع‌های نظیر بستار را فراهم می‌کند.

ترکیب حالت‌های مختلف انتقال فلز نیز ایده‌های است که می‌تواند در WAAM-GMAW کاربرد داشته باشد، که یکی از معیارهای مقایسه‌های طراحی آزمون در این مطالعه است.

با توجه به نیاز به یک سامانه نگهداری قابل اطمینان و قابل تنظیم، یک تجهیز برای نگهداری افشانه MIG و سامانه تغذیه گاز محافظ آرگون، و برای اطمینان از صدمه ندیدن دستگاه فرز، موقعیت دهنده

ویلیامز و همکاران [۸] نتیجه گرفتند که روش‌های WAAM می‌تواند یکی از فن‌آوری‌های بسیار کاربردی برای ساخت افزایشی فلز باشد و انعطاف‌پذیری و دقت خوبی با ترکیب کردن یک فرآیند جوشکاری مهار شده و دستگاه مهار عددی یا ربات را نتیجه دهد. این روش می‌تواند در مقایسه با سایر فناوری‌ها برای ساخت نمونه‌های اولیه یا تولید محصول به صورت دسته‌ای، با زمان و هزینه کمتری به کار گرفته شود. در فرآیند MIG، الکتروود یک سیم مصرفی است و به راحتی توسط حرکت مشعل جوشکاری مهار می‌شود تا برای فرآیند ساخت افزایشی استفاده شود. این فرآیند برای موادی مانند فولادها مناسب است و با تمهیداتی می‌تواند برای آلومینیوم نیز مناسب باشد.

به دلیل تنظیم اتوماتیک نوک سیم، پراکندگی پایین و عمدتاً ورودی گرمای کم، فرآیند انتقال فلز سرد یک فرآیند مناسب برای ساخت افزایشی آلومینیوم است. بائوکیانگ^۱ و همکاران [۹] تأثیر انواع فرآیندهای CMT برای رسوب تک لایه و چند لایه همبسته‌های آلومینیوم را بررسی کرده‌اند. آنها دریافته‌اند که با استفاده از انتقال فلز سرد پالسی پیشرفته (CMT-P-ADV)، می‌توان رسوب آزاد بدون منیزیم با دانه‌های متعادل شده تصفیه شده $Cu/Al-6.3$ را تولید کرد. پاسکوال^۲ و همکاران [۱۰]، متغیرهای تنظیم برای فرآیندهای CMT و CMT-P را مطالعه کرده‌اند، برای دست آوردن متغیرهای تنظیم جوشکاری با استفاده از تجهیزات MIG برای فرآیند CMT، باید متغیرهای شروع و پایان دادن به جوش را با مهار برقی تحت مهار داشت. هدف آنها بررسی و بهینه‌سازی نفوذ، عرض کرده رسوب گذاری شده و استحکام جوشکاری MIG روباتیک با زیرلایه‌ای از جنس ورق آلومینیوم ۶۰۸۲ و مفتول رسوب گذاری از جنس آلومینیوم ۵۷۵۴ (با قطر یک میلی‌متر) بوده است، برای این هدف نمونه‌ها در قسمت‌های آغاز، میانه و پایان خط رسوب بررسی می‌شوند [۱۰].

در این مقاله بر روی حالات انتقال فلز مطالعه شده است و بر حالاتی که گرمای ورودی کمتری را ایجاد کند تا بدون استفاده از تجهیزات گران قیمت CMT به آن نزدیک شود تمرکز شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- طراحی فرآیند رسوب‌گذاری

در فرآیند قوس برقی گاز با الکتروود مصرفی، فلز از طریق قوس به حوضچه مذاب تشکیل شده، منتقل می‌شود. در این فرآیند با استفاده از یک سامانه حرکتی خودکار می‌توان لایه‌های مواد را روی یکدیگر رسوب داد. مسیرهای حرکت در فرآیند ساخت افزایشی، بسته به نوع قطعه تولیدی می‌تواند به صورت مستقیم^۳، زیگزاگ^۴، مارپیچی^۵ و یا ترکیبی باشد. حرکت مستقیم معمولاً برای ایجاد دیواره یک ردیفی مورد

^۵ Spiral

^۶ Substrate

^۷ Heat input

^۱ Baoqiang

^۲ Pascoal

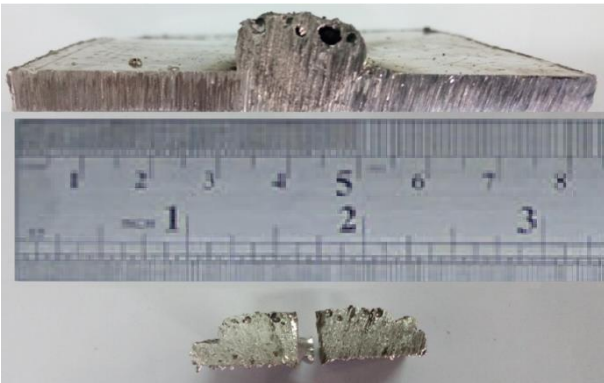
^۳ Raster

^۴ zigzag

انجام شد، که در هر کدام از حالات مذکور تغییر محسوسی مشاهده نشد. با بررسی دقیق تر مشخص شد که نچسبیدن لایه اولیه به زیر لایه به دلیل سرد بودن زیر لایه و نچسبیدن جوش در شروع رسوب گذاری بوده است، که ناشی برقراری همزمان قوس و حرکت پیشروی بوده است و برای رفع این نقیصه پس از یک توقف ۳ تا ۵ ثانیه ای از لحظه برقراری قوس، حرکت پیشروی آغاز شد، با اعمال این تغییر در فرآیند مشکل عدم نفوذ و عدم اتصال به زیر لایه رفع گردید. سه عامل کلیدی که بر روی کیفیت ساخت قطعات تأثیر گذارند تمیزی و پیشگرم کردن زیر لایه، پایش و مهار طول قوس و مهار گرمای ورودی می باشند.

شرایط تجربی ساخت افزایشی یک قطعه از همبسته آلومینیوم ۴۰۴۳ با فرآیند WAAM-GMAW، نشان دهنده این است که پیشگرم کردن زیر لایه تا دمای حدود ۳۰۰ درجه سانتیگراد و تمیز کردن (چربی زدایی و رطوبت زدایی) سطح زیر لایه و مسیر عبور ماده افزودنی، باعث شده است که تخلخل های هیدروژنی تا حد قابل ملاحظه ای کاهش یافته و همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود به سطح لایه رسوب گذاری شده منتقل شده اند.

با توجه به اینکه لایه های اکسیدی موجود بر روی سطح قطعه آلومینیومی می تواند رطوبت هوا را جذب کرده و باعث ورود هیدروژن به مذاب آلومینیوم گردد، همچنین رطوبت موجود در گاز محافظ می تواند منبع هیدروژن باشد. از آنجا که هیدروژن می تواند باعث ایجاد تخلخل در فرآیند رسوب گذاری همبسته های آلومینیوم گردد، باید از نفوذ آن به حوضچه مذاب جلوگیری کرد [۱۳].



شکل ۳: کاهش قابل ملاحظه تخلخل های هیدروژنی در اثر چربی زدایی و منتقل شدن آنها به نزدیک سطح نمونه

شکل ۴ مقدار تغییرات حلالیت هیدروژن در آلومینیوم در دماهای بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد را نشان می دهد. به دلیل اینکه حلالیت هیدروژن در آلومینیوم مذاب بسیار بیشتر از آلومینیوم جامد است، در این شکل مشاهده می شود که مقدار انحلال هیدروژن در آلومینیوم از دمای

عایق برقی قطعه طراحی و ساخته شد. نگهدارنده افشانه به نحوی طراحی گردیده است که افشانه و شلنگ تغذیه گاز محافظ در راستای محور X و Y به مقدار ۴۰ میلیمتر قابل تنظیم بوده و همچنین به مقدار ۴۵ درجه قابلیت تنظیم دورانی دارند.

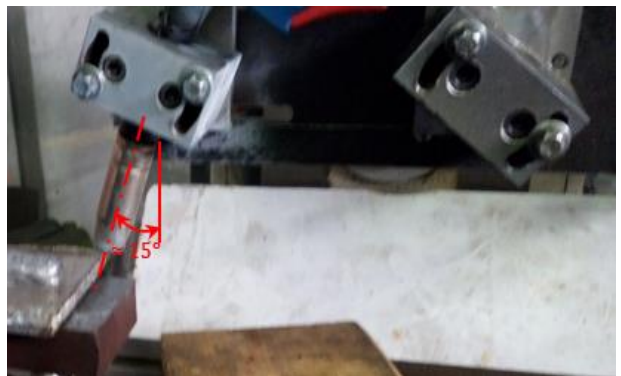
۲-۲- فرآیند لایه نشانی و حذف عیوب رسوب گذاری

این پژوهش به روش ساخت افزایشی مبتنی بر سیم و جوشکاری قوس برقی گاز با الکتروود مصرفی^۱ تمرکز داشته و چند آزمایش عملی برای مطالعه این روش طراحی و اجرا شده است تا اطلاعات بیشتری درباره این روش کسب شود.

با استفاده از یک دستگاه جوش MIG/MAG به انضمام دستگاه وایر فیدر که توانایی تنظیم سرعت تغذیه ۰٫۵ تا ۲۰ متر در دقیقه را دارا است، لایه نشانی با سیم گاز محافظ آرگون (MIG) بر روی ورق آلومینیومی با ضخامت ۵ میلیمتر بعنوان زیر لایه^۲ انجام شد.

در این فرآیند از فیلمتال آلومینیوم ۴۰۴۳ با قطر ۱ میلیمتر، بعنوان ماده افزودنی استفاده شده است. در مرحله نصب فیلمتال AISi 4043 در دستگاه تغذیه سیم، و با شروع به تغذیه سیم به دلیل نرم بودن سیم آلومینیوم، فیلمتال داخل دستگاه جمع شده و نهایتاً گیر کرده و کار تغذیه مختل شد.

برای رفع این ایراد قطعات هدایت کننده ابتدایی، میانی و انتهایی که در حالت استاندارد دستگاه که برای تغذیه سیم فولادی طراحی و ساخته شده اند، برنجی و فولادی هستند که با قطعاتی از جنس تفلون ضد سایش ساخته و جایگزین شدند. همچنین سرعت تغذیه سیم $F_w = 11 \text{ m/min}$ و سرعت پیشروی افشانه $F_t \approx 132 \text{ mm/min}$ تنظیم شد.



شکل ۲: تنظیم زاویه افشانه نسبت به قطعه کار

در ابتدای کار رسوب گذاری (به صورت خودکار)، لایه رسوب گذاری شده روی زیر لایه، نفوذ کافی روی زیر لایه را نداشت و براحتی از آن جدا شد. با توجه به زاویه ۱۵ درجه ای افشانه، فرآیند رسوب گذاری به صورت روبه جلو (فشاری / پیش دستی) و رو به عقب (کششی/پس دستی)

² Substrate

¹ WAAM-GMAW (Wire & Arc Additive Manufacturing-Gas Metal Arc Welding)

به منظور حفظ حفاظت با گاز آرگون حین و پس از رسوب گذاری، در پشت مسیر حرکت افشانه یک محفظه قاشقی شکل ساخته شد، تا تداوم حفاظت گازی مادامی که دما به زیر ۵۰۰ درجه سانتیگراد کاهش پیدا نکرده را تأمین نماید.

همانگونه که در شکل ۵ قابل مشاهده است، تخلخل هیدروژنی به شدت باعث کاهش استحکام کششی و انعطاف پذیری قطعات رسوب گذاری شده آلومینیومی می شود. همچنین افزایش تخلخل هیدروژنی در رسوب آلومینیوم باعث کاهش مقاومت به خستگی قطعه ساخته شده با فرآیند افزایشی رسوب آلومینیوم می شود. در این شکل نمودار پراکندگی مقدار کاهش استحکام کششی و کاهش درصد ازدیاد طول برای همبسته های آلومینیوم ۷۰۳۹ و ۵۰۳۹ که با روش قوس برقی گاز با الکتروود مصرفی رسوب گذاری شده است نشان داده شده است [۱۳].

با توجه به شکل ۴ با تداوم محافظت از سطح لایه رسوب گذاری تا دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد، مقدار تخلخل های گازی به شدت کاهش خواهد یافت.

در قطعات قابل مشاهده در شکل ۶، ضمن تأمین گاز محافظ اضافی حین و پس از رسوب گذاری، چند ردیف رسوب گذاری یک لایه های به صورت غیر خودکار (دستی) انجام شد. در این قطعات تأمین گاز محافظ اضافی با نگهداشتن یک شلنگ گاز آرگون درست پشت مسیر حرکت افشانه به صورت دستی انجام شد، ارزیابی قطعات نشان می دهد که این روش مؤثر بوده و مقدار تخلخل های هیدروژنی به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است.



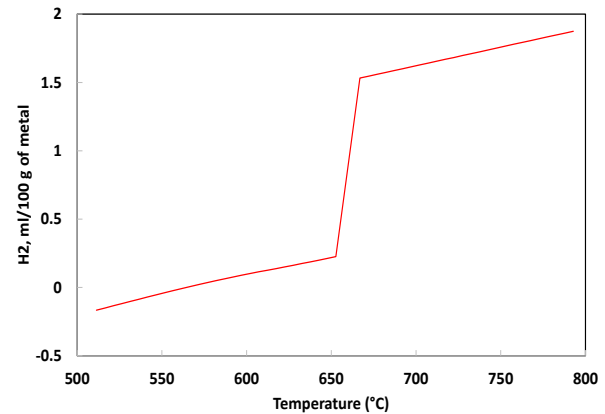
شکل ۶: حذف تخلخل های هیدروژنی موجود در نزدیکی سطح، در اثر تداوم گاز محافظ پس از رسوب گذاری

شکل ۷ نحوه تأمین گاز محافظ اضافی جهت رسوب گذاری خودکار و توزیع یکنواخت آن برای حفظ محافظت سطح رسوب گذاری شده، با گاز آرگون تا زمانی که دمای سطح قطعه به دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد کاهش پیدا کند را نشان می دهد.



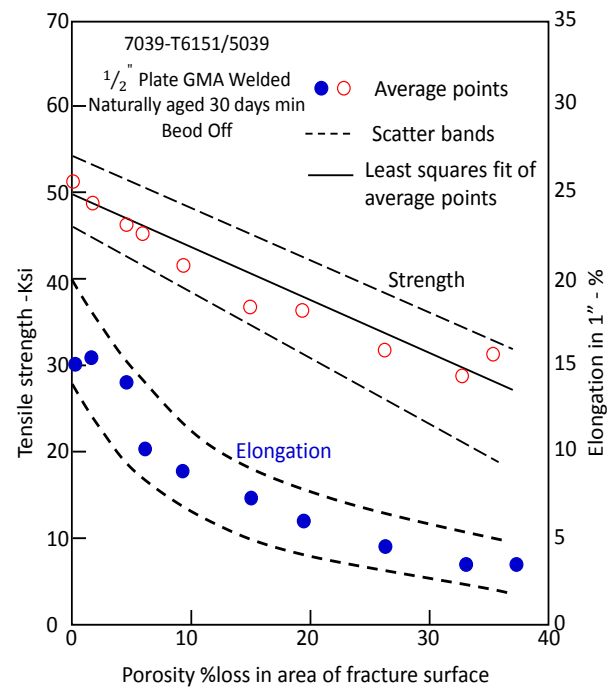
شکل ۷: تجهیزات هدایت و توزیع گاز محافظ اضافی

حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد شروع شده و با افزایش دما تا ۶۶۰ درجه سانتیگراد به مقدار آن به طور قابل ملاحظه ای افزوده می شود.



شکل ۴: حلالیت هیدروژن در آلومینیوم [۱۳]

با افزایش دما از ۶۶۰ درجه سانتیگراد به دمای داغتر، مقدار حضور هیدروژن در آلومینیوم به شدت افزایش می یابد و به طور ناگهانی از ۱ میلی لیتر در هر ۱۰۰ گرم فلز آلومینیوم تجاوز می کند، در ادامه با پیشروی فصل مشترک جامد - مذاب، هیدروژن به درون حوضچه مذاب پس زده می شود و باعث ایجاد تخلخل در رسوب آلومینیوم می شود، لذا نیاز است فرآیند حفاظت با گاز محافظ آرگون تا زمانی که دمای لایه رسوب گذاری شده به حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد کاهش می یابد، تداوم داشته باشد. [۱۳-۱۲].



شکل ۵: تأثیر تخلخل هیدروژنی بر خواص کششی قطعات رسوب داده شده آلومینیومی [۱۳]



شکل ۹: مقاطع برش خورده رسوب گذاری خودکار پس از اصلاح محفظه گاز

۲-۳- طراحی آزمون

خواص مکانیکی مورد انتظار برای ایجاد ویژگی‌های بیرونی بستار، با انجام آزمون سختی سنجی و کشش تک محوری بررسی می‌شود. جهت آماده سازی نمونه‌های آزمون‌ها، نیاز به تعریف یک محدوده مجاز برای ابعاد دیواره‌ها است.

دیواره‌هایی که با حرکت مستقیم افشانه، با طول حدود ۱۲۰ میلی‌متر و عرض ۸ تا ۱۰ میلی‌متر ایجاد شوند، و با ۳۰ لایه رسوب گذاری، ارتفاع آنها به حدود ۶۵ میلی‌متر برسد. عرض لایه‌های ایجاد شده با نرخ رسوب گذاری متناسب است و با سه مشخصه اصلی سرعت تغذیه سیم (FW)، سرعت پیشروی افشانه (Ft) و توان (P) قابل مهار است. هرچند همه نمونه‌ها قابل بررسی هستند، اما نمونه‌هایی که در محدوده تعریف شده تولید خواهند شد مقایسه پذیرتر و مطلوب‌تر می‌باشند.

پیش بینی کردن جریان مورد نیاز، در گرو مقدار نرخ رسوب گذاری مطلوب است، که البته مقدار جریان مورد نیاز منبع تغذیه، توسط دستگاه، در هنگام تنظیم کردن سرعت تغذیه سیم به صورت خودکار انجام می‌شود. اما اتصال بین نرخ رسوب گذاری و جریان از طریق معادله (۱) قابل بررسی است.

$$DR = \alpha I + \beta I_A^2 \quad (1)$$

در این معادله I شدت جریان بر حسب آمپر است و I_A طول قوس^۴ بر حسب میلی‌متر است. α یک ضریب ثابت است که وابسته به جنس سیم مصرفی، قطبیت جریان^۵ و نوع گاز محافظ است، و ثابت β وابسته به افت ولتاژ سیم است که با قطر، طول و جنس سیم مشخص می‌شود [۱۴]. با توجه به اینکه حالت انتقال مذاب اتصال کوتاه، گرمای ورودی کمتری در زیرلایه، و لایه قبلی رسوب داده شده ایجاد خواهد کرد، می‌تواند دیواره‌هایی با عرض کمتر و ضخامت زیادتری در لایه‌ها ایجاد کند. این حالت علاوه بر اینکه می‌تواند سرعت کار در ساخت افزایشی را تند می‌کند، برای تولید دیواره‌های نازک‌تر و ایجاد جزئیات بیشتر در ساخت افزایشی فلز نقش مؤثری خواهد داشت [۱۶-۱۵].

استفاده از محفظه تأمین گاز محافظ اضافی قاشقی شکل، به کاهش قابل توجه تخلخل هیدروژنی در خطوط رسوب گذاری، که به صورت خودکار انجام گرفته است منجر شد.

مطابق شکل ۸ باز هم تعدادی تخلخل قابل رویت در مقاطع برش خورده دیده می‌شود. که علت آن را در انحراف گاز محافظ اصلی که از افشانه به دور حوضچه مذاب تغذیه می‌شود باید جستجو کرد، بررسی‌ها نشان می‌دهد که شار خروج گاز محافظ در یکنواختی توزیع و حفاظت حوضچه مذاب اثرگذار است.

با توجه به اینکه محفظه اضافی تأمین گاز کمی عقب تر از افشانه حرکت می‌کند، هنگامی که لبه محفظه قاشقی شکل به سطح زیرلایه می‌رسد، به طور آنی تغییراتی در شرایط قوس ایجاد شده و پایداری آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد.



شکل ۸: مقاطع برش خورده رسوب گذاری خودکار با اضافه شدن تجهیزات هدایت گاز محافظ اضافی حین و پس از رسوب گذاری

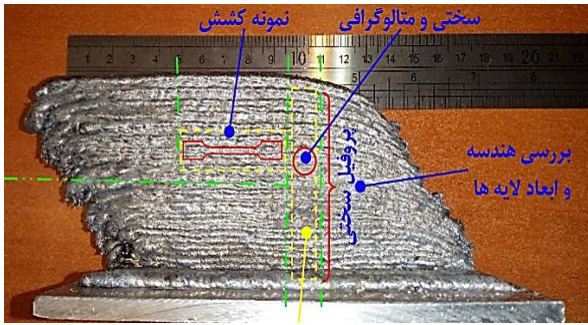
با توجه به اینکه محفظه قاشقی شکل نشان داده شده در شکل ۸ به صورت موازی با سطح زیرلایه نصب شده است، و انتهای محفظه با این سطح عمود است، جریان گاز پس از برخورد با سطح زیرلایه باعث انحراف گاز محافظ اصلی خارج شونده از دور افشانه می‌شود، و حضور هوا باعث نفوذ هیدروژن و همچنین اختلال در پایداری قوس و تعادل مذاب تشکیل شده در حوضچه و مستقیمی مسیر رسوب گذاری می‌شود.

نتایج ارائه شده در شکل ۹ نشان داد که چرخش سر محفظه به سمت پایین و افزایش فاصله تا سطح زیرلایه، باعث هدایت بهتر جریان گاز اضافی به منطقه رسوب گذاری، شده و تعادل نسبی در حوضچه برقرار می‌شود.



⁴ Arc length
⁵ Current Polarity

¹ Wire Feed speed
² Touch Feed speed
³ Power



شکل ۱۰: محدوده برش نمونه‌های آزمون‌های مکانیکی و موادشناسی.

۲-۴- آزمون‌های مکانیکی (سختی سنجی و کشش)

روش برینل یکی از معیارهای تعیین مقدار سختی مواد نسبتاً نرم مانند آلومینیوم و همبسته‌های آن است، که بر اساس مقاومت مواد در برابر یک فرو رونده کرووی شکل از جنس فولاد یا کاربید تنگستن سختی آن‌ها را تعیین می‌کند.

قطعات نمونه کشش با توجه به شکل فوق تهیه می‌گردد، به طوریکه در راستای طول قطعه، و تقریباً در وسط قطعه، و با ارتفاع حداقل ۳۰ میلی‌متر از سطح زیرلایه باشد. نمونه‌های سختی سنجی نیز از قسمت سمت راست دیواره تهیه شده است.

در میان نتایج آزمون کشش بیشترین توجه به استحکام کششی می‌شود. استحکام کششی فلزات شکل‌پذیر، حداکثر باری است که فلز می‌تواند تحت شرایط بسیار محدود بارگذاری یک بعدی، در برابر آن پایداری کند. به عبارتی استحکام کششی یا استحکام نهایی کششی (UTS) از تقسیم بار حداکثر بر سطح مقطع اولیه نمونه حاصل خواهد شد. برای بدست آوردن استحکام تسلیم از روش آفست ۰٫۲٪ به موازات قسمت ناحیه کشسان منحنی تنش - کرنش استفاده می‌شود. نقطه تقاطع خط آفست با منحنی تنش - کرنش بیانگر مقدار استحکام تسلیم (σ_y) است.

برای محاسبه درصد افزایش طول، می‌توان با اندازه‌گیری طول اولیه قطعات نمونه (قبل از شکست) و چسباندن قطعات نمونه پس از آنکه شکست روی داد، مقادیر طول اولیه و طول نهایی و نهایتاً مقدار درصد افزایش طول را بدست آورد [۱۷].

در آزمون کشش، نمونه‌ها تحت نیروی کششی یک بعدی که به طور پیوسته زیاد می‌شود، قرار دارند. این در حالی است که ازدیاد طول نیز به طور همزمان اتفاق می‌افتد. نمونه‌های کشش مطابق استاندارد ASTM E8 ساخته شده است [۱۸].

۲-۵- موادشناسی و تصویر نگاری

برای تهیه نمونه‌های موادشناسی با توجه به شکل فوق قطعات از سمت راست دیواره برش خورده تهیه می‌شود. موادشناسی در نقاط مختلف قطعه انجام شده است، اما آنچه که بیشتر مورد قبول و قابل استناد است نقاط نزدیک به وسط قطعه کار است.

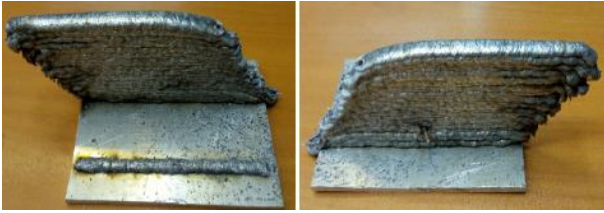
انتخاب سرعت پیشروی حدود ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت تغذیه سیم ۳ متر بر دقیقه، می‌تواند شرایط ایجاد انتقال فلز در حالت اتصال کوتاه را فراهم کند. در این حالت انتظار می‌رود رسوب‌گذاری با گرمای ورودی کمتر، کیفیت مورد انتظار در ساخت افزایشی دیواره‌های نمونه را تضمین نماید.

از آنجا که شرایط انتقال فلز در حالت اتصال کوتاه، باعث ایجاد اتصال کوتاه در سیم مصرفی (همبسته آلومینیوم ۴۰۴۳)، با افشانه هدایت کننده ماده افزودنی و چسبیدن آن به افشانه می‌شود، این تنظیم برای ساخت افزایشی همبسته‌های آلومینیوم با فرآیند GMAW براحتی قابل اجرا نمی‌باشد و چسبیدن مداوم ماده افزودنی به دیواره سوراخ افشانه، جمع شدن سیم در دستگاه تغذیه سیم و مختل شدن فرآیند را در پی خواهد داشت.

جدول ۱: مشخصه‌های اصلی نمونه‌ها جهت طراحی آزمون اولیه

شماره نمونه	سرعت تغذیه سیم : F_w (m/min)	سرعت پیشروی افشانه : F_t (mm/min)	دمای بین خط جوش ($^{\circ}C$)	توان (VA)	پیشنهادی حالت انتقال فلز
N1	۳٫۹۶	۱۳۲	۲۵۰	۷۵۹	GL/SC
N2	۳٫۹۶	۱۳۲	۲۵۰	۷۵۹	GL/SC
N3	۳٫۹۶	۱۳۲	۲۵۰	۷۵۹	GL/SC
N4	۶	۲۰۰	۲۵۰	۱۲۶۰	GL/SP
N5	۶	۲۰۰	۲۵۰	۱۲۶۰	GL/SP
N6	۶	۲۰۰	۲۵۰	۱۲۶۰	GL/SP
N7	۱۰٫۸	۳۶۰	۲۵۰	۲۰۷۹	SP
N8	۱۰٫۸	۳۶۰	۲۵۰	۲۰۷۹	SP
N9	۱۰٫۸	۳۶۰	۲۵۰	۲۰۷۹	SP

آزمون‌های انجام گرفته شامل آزمون سختی سنجی، آزمون کشش نمونه‌ها و موادشناسی است. مطابق شکل ۱۰ محل برش نمونه‌های آزمون نمایش داده شده است. برای برش صحیح نمونه‌ها، با اطمینان از سامانه گیره‌بندی و استفاده از روش خنک‌کاری مطلوب قطعه، اثرات مخرب ناشی از تنش و گرمای ایجاد شده در فرآیند برش کاهش خواهد یافت. در این فرآیند ضخامت صفحه برش ۲ میلی‌متر انتخاب شده است، و مایع خنک‌کاری محلول آب صابون (محلول تراش) بوده است. محل گیره‌بندی و مقدار نیروی گیره‌بندی نیز به گونه‌ای انتخاب شده است تا آسیبی به قطعه وارد نشود.

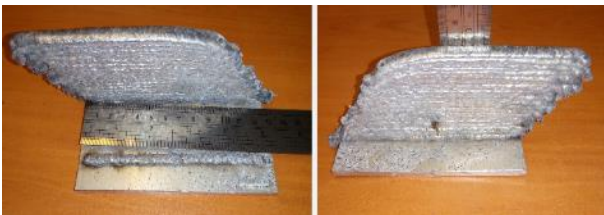


شکل ۱۲: کیفیت سطح دیواره رسوب گذاری شده در حالت انتقال GL/SC

در این حالت تکرار شرایط مندرج در ردیف اول جدول ۱، منجر به نتیجه مطلوب به منظور بررسی تکرارپذیری فرآیند نخواهد شد. بدین ترتیب باید شرایط دیگری جایگزین ردیف‌های ۲ و ۳ شود.

حالت دیگری که در جدول ۱ تعریف شده است، حالت ترکیبی انتقال قطره‌ای و پاششی (GL/SP) در ردیف‌های ۴ تا ۶ است. مزیت این حالت نسبت به حالت پاششی کامل، این است که گرمای ورودی کمتری دارد، و علاوه بر اینکه قطعات ساخت افزایشی با جزئیات دقیقتری تولید خواهند شد، تنش پسماند و اعوجاج کمتری نسبت به حالت انتقال پاششی کامل خواهند داشت. همچنین زمان رسیدن به دمای بین خط جوش ثابتی که در طراحی فرآیند تعریف شده است (۲۵۰ درجه سانتیگراد) نیز کمتر خواهد بود.

شکل ۱۳ شرایط و کیفیت رسوب گذاری دیواره با داده‌های ردیف‌های ۴ تا ۶ جدول ۱ را نمایش می‌دهد. به وضوح دیده می‌شود که کیفیت سطح دیواره به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است، و می‌تواند پاسخگوی ساخت افزایشی ویژگی‌های بیرونی بستار باشد، به شرط اینکه تکرارپذیری فرآیند و نتایج آزمون‌های کشش و موادشناسی نیز تأیید کننده این موضوع باشد.



شکل ۱۳: بهبود کیفیت سطح دیواره رسوب گذاری شده به منظور ایجاد قابلیت ساخت افزایشی ویژگی‌های بیرونی قطعه بستار

درخصوص تکرارپذیری فرآیند، در هر کدام از قطعات ردیف‌های ۴ تا ۶ لایه‌های رسوب گذاری شده شرایط یکسانی را داشته‌اند. در صورتیکه عیب گیر کردن سیم درون افشانه به دلایلی گرم شدن بیش از حد گردنی مشعل اتفاق نیفتد، قطعات تولید شده تکرار پذیری خوبی در کیفیت سطح و نظم لایه‌های چیده شده خواهند داشت. در هنگام گیر کردن سیم درون افشانه، گاهی شدت چسبیدن سیم به افشانه و در نتیجه چروکیدگی و گیر کردن سیم به حدی است که، نیاز است مشعل MIG از داخل نگهدارنده خارج شده و عمل تمیزکاری افشانه و مسیر انجام

این نقاط از لحاظ اینکه شرایط دمایی قطعه به ثبات رسیده است مهم است. با استفاده از سمباده‌های کاغذی از شماره ۱۰۰ الی ۳۰۰۰ نمونه‌ها را سمباده خواهد خورد. پس از سمباده زدن، نمونه‌ها را شستشو داده و آن را اچ می‌کنیم. نحوه اچ کردن بدین قرار است که نمونه را در محلول اچ شناور کرده و به آرامی تکان داده، زمان نگه داشتن نمونه در محلول اچ کننده حدود ۵ دقیقه است [۱۹-۲۰].

۲-۶- عوامل مؤثر بر تکرار پذیری فرآیند

با توجه به طراحی فرآیند در بخش قبل (جدول ۱)، که شامل سه حالت مختلف GL/SC، GL/SP و SP بود. لذا برای هر کدام از حالتها، سه نمونه دیواره در مرحله طراحی آزمون در نظر گرفته شده است، تا تکرارپذیری فرآیند نیز بررسی گردد. طبق شرایط ذکر شده تمام متغیرها به جز توان، شرایط یکسانی خواهد داشت، تا الزامات کافی برای صحنه گذاری بر تکرار پذیری فرآیند را ایجاد کنند.

بر اساس طراحی فرآیند، قطعه ردیف ۱ با سرعت پیشروی افشانه ۱۳۲ میلیمتر بر دقیقه و سرعت تغذیه سیم حدود ۴ متر بر دقیقه انجام شد، تا شرایط انتقال ترکیبی به صورت اتصال کوتاه و قطره‌ای (GL/SC) مهیا شود (ردیف ۱ در جدول ۱) [۲۱].

در شکل ۱۱ قطره مذاب جدا نشده از ماده افزودنی، که به صورت اشکی شکل به انتهای آن منجمد شده است قابل مشاهده است. این ترکیب در صورتی که کیفیت سطح دیواره ساخته شده مطلوب باشد، می‌تواند جزئیات دقیقتری را در ساخت هندسه‌های تولید شده به روش ساخت افزایشی ایجاد کند.

همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود کیفیت این دیواره برای ساخت افزایشی قابل قبول نبوده و لایه‌ها به صورت تفکیک شده روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. در این شرایط اتصال لایه اول به زیر لایه و همچنین اتصال سایر لایه‌ها به یکدیگر ضعیف بوده، و عدم یکپارچگی در رسوب گذاری باعث خواهد شد دیواره تولید شده استحکام کافی برای ایجاد ویژگی‌های بستار را نداشته باشد [۲۲-۲۳].



شکل ۱۱: قطره مذاب منجمد شده در حالت انتقال ترکیبی GL/SC

پدیده خواهیم بود. از طرفی رسوب‌گذاری با حضور پدیده سرریز شدن مذاب، بسیار زمانبر بوده و برای رسیدن به ارتفاع حداقلی برای تهیه نمونه‌های آزمون (۶۵ میلی‌متر)، تعداد لایه‌های بیشتری باید رسوب داده شوند.



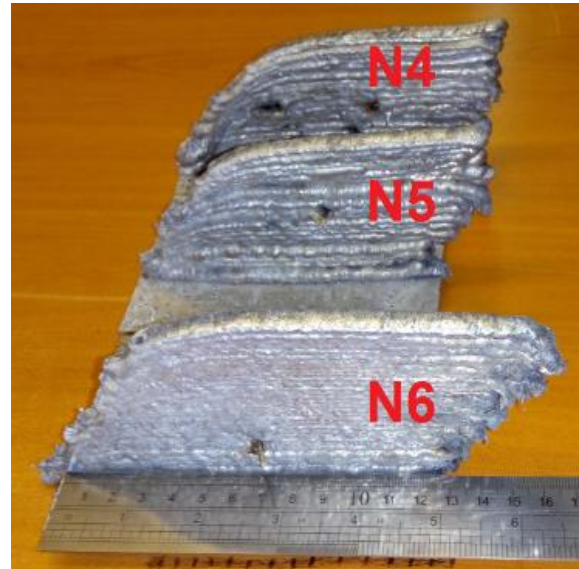
شکل ۱۵: ایجاد پدیده سرریز شدن مذاب در نمونه N7

یک راه کاهش اثر پدیده سرریز شدن مذاب بهینه کردن نرخ سرد شدن^۲ است. اما بهینه کردن نرخ سرد شدن در حالت پاششی، منجر به افزایش زمان رسوب‌گذاری در نتیجه افزایش زمان توقف بین پاسی^۳، و افزایش فشار و شار گاز محافظ، و در نتیجه افزایش هزینه‌های تولید در فرآیند ساخت افزایشی فلز خواهد شد. از طرفی این بهینه‌سازی، بهبود قابل توجهی در کیفیت سطح و یکنواختی دیواره رسوب داده شده، نیز نخواهد داشت.

۲-۷- همگرایی فرآیند با آزمون تکرار

با توجه به نتایج بدست آمده، و اتصال ضعیف لایه‌ها در قطعه N1 و مشاهده پدیده سرریز شدن مذاب در قطعه N7، بهینه‌سازی نرخ سرد شدن برای قطعات تولید شده با شرایط ردیف‌های ۴ تا ۶ از مشخصه‌های جدول ۱، نتیجه بهتری خواهد داشت. از این رو بهتر است بجای استفاده از شرایط جدول ۱ برای ادامه قطعات شرایط جدیدی نزدیک به قطعات N4، N5 و N6 تعریف گردد. در این شرایط همه متغیرها یکسان در نظر گرفته خواهد شد و تغییرات روی دمای بین خط جوش اعمال خواهد شد، دمای بین خط جوش نختلف می‌تواند روی حالت انتقال مذاب نیز تغییراتی ایجاد کند. پیش‌بینی حالت انتقال مذاب در ستون آخر جدول ۲ آمده است. شرایط جدید این امکان را خواهد داد تا با آزمون تکرار^۴ از بین دماهای بین پاسی که بسته به شرایط مشاهده شده در قطعات بعدی یک دمای بین خط جوش داغتر یا خنکتر انتخاب شود. این فرآیند به ما کمک خواهد کرد که با همگرایی دمای بین خط جوش، نرخ سرد شدن بهینه سازی شود.

شود. در این صورت ممکن است افشانه و مشعل دقیقاً در محل قبلی خود نصب نشده و لایه جدید با کمی انحراف روی لایه قبلی چیده شود. در شکل ۱۴ نشان داده شده است که ایراد گیرکردن سیم در نمونه‌های N4 و N5 باعث انحراف جزئی دیواره در برخی لایه‌ها شده است. ایجاد وقفه زمانی بین تولید هر دیواره با دیواره بعدی، باعث خنک شدن گردنی افشانه شده، که در پیشگیری این ایراد مؤثر است.



شکل ۱۴: انحراف جزئی دیواره در برخی لایه‌ها در نمونه‌های N4 و N5 به دلیل ایراد گیر کردن سیم

حالت انتقال فلز پاششی (SP)، با شرایط مندرج در ردیف‌های ۷ تا ۹ جدول ۱ پیش‌بینی شده است. با توجه به اینکه سرعت پیشروی و سرعت تغذیه سیم، به نحوی متناسب با یکدیگر افزایش یافته است که، مقدار رسوب در هر لایه، با شرایط تعریف شده در ردیف‌های ۱ تا ۶ ثابت بماند. همچنین سایر مشخصه‌های تنظیم شده نیز با شرایط دیواره‌های تولید شده قبلی یکسان است. توان رسوب‌گذاری که حاصل ضرب ولتاژ و آمپر است، توسط منبع تغذیه به نحوی انتخاب می‌شود که امکان ذوب سیم با سرعت تغذیه تنظیمی وجود داشته باشد. در مراحل لایه نشانی قطعه N7 (ردیف ۷ جدول ۱)، مشاهده شد که لایه‌های جدید از روی لایه قبلی ریزش می‌کند، و پدیده سرریز شدن مذاب^۱، در نتیجه توان قوی و گرمای ورودی بیشتر اتفاق می‌افتد. پدیده سرریز شدن لایه‌ها نشان دهنده این است که شرایط تنظیم شده مناسب فرآیند ساخت افزایشی فلز نبوده و نیازی به ادامه فرآیند برای پایش تکرار پذیری نیست. این پدیده مستقیماً وابسته به گرمای ورودی است و با زمان توقف بین پاسی رابطه عکس دارد. در صورت ادامه فرآیند با این شرایط، در نمونه‌های ردیف‌های ۸ و ۹ جدول ۱ نیز شاهد این

¹ Melt overflow

² Colling Rate

³ Inter-pass time

⁴ Iteration

جدول ۲: مشخصه‌های بهبود یافته نمونه‌ها جهت طراحی آزمون

شماره نمونه	سرعت تغذیه سپیم : Fw (m/min)	سرعت پیشروی افشانه : Ft (mm/min)	توان (V.A)	دمای بین خط جوش (°C)	حالت انتقال فلز GL/SP (پیش‌بینی است)
N1	۴	۱۳۲	۷۸۰	۲۵۰	SC-GL
N2	۶	۲۰۰	۱۲۶۰	۳۵۰	GL/SP
N3	۶	۲۰۰	۱۲۶۰	۴۵۰-۱۵۰	GL/SP
N4	۶	۲۰۰	۱۲۶۰	۲۵۰	SP-GL
N5	۶	۲۰۰	۱۲۶۰	۲۵۰	SP-GL
N6	۶	۲۰۰	۱۲۶۰	۲۵۰	SP-GL
N7	۱۰٫۸	۳۶۰	۲۰۸۰	۲۵۰	SP
N8	۶	۲۰۰	۱۲۶۰	۲۰۰-۵۰	GL/SP

جدول ۳: تأثیر متغیرهای فرآیند بر هندسه دیواره‌ها

شماره نمونه	توان (V.A)	حالت انتقال فلز	عرض دیواره (mm)	ارتفاع دیواره (mm)	تعداد لایه‌ها (n)	ضخامت لایه‌ها (mm)	کیفیت و نظم لایه‌ها
N1	۷۸۰	SC-GL	۸٫۲	۶۶	۲۴	۲٫۷۵	ضعیف
N2	۱۲۶۰	SP	۱۰٫۳	۶۳٫۵	۲۹	۲٫۱۹	متوسط
N3	۱۲۶۰	GL-SP	۹٫۵	۶۴	۲۷	۲٫۳۷	متوسط
N4	۱۲۶۰	SP-GL	۱۰٫۴	۶۲٫۷	۲۹	۲٫۱۶	خوب
N5	۱۲۶۰	SP-GL	۱۰٫۶	۶۴	۳۰	۲٫۱۳	خوب
N6	۱۲۶۰	SP-GL	۱۰٫۵	۶۶٫۵	۳۱	۲٫۱۴	خوب
N7	۲۰۸۰	SP	۱۳	۶۵٫۵	۳۸	۱٫۷۲	ضعیف
N8	۱۲۶۰	SP-GL	۱۰٫۲	۶۶	۳۰	۲٫۲	خوب

۳- نتایج و بحث

سختی نمونه‌ها با روش سختی سنجی برینل و مطابق با استاندارد ASTM E10 انجام شده است. قطر ساچمه ۲٫۵ میلی‌متر انتخاب و نیروی ۶۲٫۵ کیلوگرم اندازه‌گیری شده است. سختی سنجی در هر یک از نمونه‌ها حداقل در سه نقطه انجام شده است که جزئیات آن در جدول ۴ قابل مشاهده است، با توجه به اینکه مقادیر سختی در سه نقطه اندازه‌گیری شده است مقدار سختی میانگین و انحراف معیار مقادیر سختی نیز درج شده است تا تکرارپذیری آزمون مشخص گردد [۲۴].

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - M)^2}{k}} \quad (2)$$

که S انحراف معیار، k تعداد داده‌ها، x_i هر کدام از داده‌ها، و M مقدار میانگین x_i اند [۲۵].

جدول ۴: تأثیر متغیرهای فرآیند بر سختی دیواره‌های ساخته شده

شماره نمونه	توان (V.A)	حالت انتقال فلز	سختی نقطه پایینی (HB)	سختی نقطه وسط (HB)	سختی نقطه بالایی (HB)	سختی میانگین (HB)	انحراف معیار
N1	۷۸۰	SC-GL	۴۱	۴۲	۴۱	۴۱٫۳۳	۰٫۴۷
N2	۱۲۶۰	SP	۴۶	۴۱	۴۶	۴۴٫۳۳	۲٫۳۶
N3	۱۲۶۰	GL-SP	۴۵	۴۶	۴۵	۴۵٫۳۳	۰٫۴۷
N4	۱۲۶۰	SP-GL	۴۲	۴۵	۴۲	۴۳	۱٫۴۱
N5	۱۲۶۰	SP-GL	۴۱	۴۵	۴۵	۴۳٫۶۶	۱٫۸۹
N7	۲۰۸۰	SP	۴۵	۴۲	۴۵	۴۴	۱٫۴۱
N8	۱۲۶۰	SP-GL	۴۸	۵۲	۵۲	۵۰٫۶۶	۱٫۸۹

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، در نمونه‌های N2، N3 و N8 با اصلاح و همگرایی دمای بین خط جوش، شرایط بهینه‌سازی فرآیند بواسطه آزمون تکرار فراهم خواهد شد. به نحوی که اگر شرایط ردیف ۲ در جدول ۲، باعث ایجاد بهبود در فرآیند شود، برای قطعه N3 دمای بین خط جوش ۴۵۰ درجه سانتیگراد انتخاب خواهد شد و در غیر اینصورت قطعه N3 با دمای بین خط جوش ۱۵۰ درجه سانتیگراد ساخته خواهد شد.

سپس در صورتی که هر کدام که از حالت‌ها برای دمای بین خط جوش قطعه N3 اجرا شد، دمای بین خط جوش بعدی ۲۰۰ یا ۵۰ درجه سانتیگراد (بسته به مشاهده بهبود در روند کاهش یا افزایش دما در مرحله قبل)، انتخاب خواهد شد. در صورتی که دمای بین خط جوش ۲۰۰ درجه لازم باشد که اجرا شود، همگرایی لازم (با توجه به دقت تجهیزات خوانش دمای سطح) ایجاد خواهد شد. در غیر این صورت نیاز است دمای ۵۰ درجه و در صورت نیاز دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد نیز پایش شود تا همگرایی با تفکیک پذیری ۵۰ درجه سانتیگراد حادث شود.

جدول ۳ نتایج قطعات ساخته شده بر اساس همگرایی ایجاد شده با آزمون تکرار که در بالا توضیحات آن داده شده است را نشان می‌دهد. در این جدول علاوه بر هندسه دیواره‌ها (ابعاد دیواره و تعداد لایه تشکیل دهنده آن)، ضخامت، کیفیت تولید و نظم لایه‌های رسوب‌گذاری شده نیز بررسی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همگرایی بدست آمده در دمای بین خط جوش باعث بهبود کیفیت قطعه در نمونه N8 شده است. دمای بین خط جوش در این قطعه ۲۰۰ درجه سانتیگراد و حالت انتقال فلز در این نمونه SP-GL است.

با اعمال مهار دمایی بهتر و مهار طول قوس، و در نتیجه حفظ یکنواختی عرض لایه‌های ایجاد شده، می‌توان ویژگی‌های دقیق‌تری را برای قطع‌های نظیر بستار ایجاد کرد. به نحوی که علاوه بر اینکه با بهبود کیفیت و نظم لایه‌ها، نیاز به ماشینکاری غیر ضرور حذف خواهد شد، گرمای ورودی کمتر باعث ایجاد اعوجاج و تنش پسماند کمتر و مهار بهتر روی ریزساختار می‌شود. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که، افزایش گرمای ورودی و عدم تأمین گاز محافظ بیشتر (به دلیل شرایط ثابت تعریف شده)، در افزایش مقدار تخلخل مؤثر است.

همانطور که شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان می‌دهد، ابعاد و مقدار حفره‌ها در قطعات N2 و N8 به شدت کاهش پیدا کرده است. این امر نشان دهنده این است که بین حالت انتقال فلز و دمای بین خط جوش، انصالی وجود دارد که بهینه شدن آن، می‌تواند روی افزایش نرخ سرد شدن و کیفیت ساخت قطعات، و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی تأثیرگذار باشد.



شکل ۱۷: مقاطع دیواره‌ها و نمونه‌های آزمون کشش N1 تا N8

شکل ۱۸ نتایج موادشناسی نمونه‌های N1 تا N8 را مقایسه می‌کند. متغیرهای سرعت پیشروی، سرعت تغذیه سیم، توان، دمای بین خط جوش و حالت انتقال مذاب، نتایج متنوعی ایجاد کرده‌اند. با توجه به مشاهدات و نتایج بدست آمده قطعه N1 ضعیف‌ترین شرایط را دارد، به طوری که اتصال به زیر لایه به قدری ضعیف بود که در هنگام برش قطعه جهت آماده سازی نمونه‌های آزمون کشش و سختی سنجی، دیواره از زیر لایه به راحتی جدا شد.

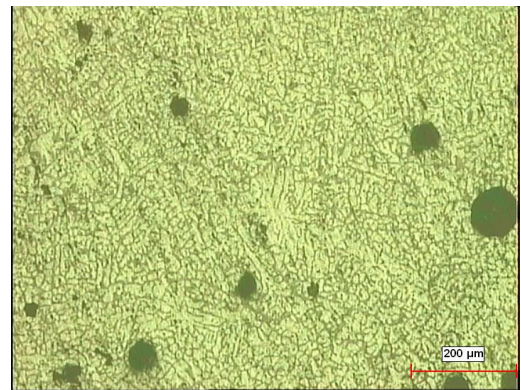
قطعه N2 با وجود اینکه دارای استحکام نهایی قویتری است اما سختی کمتر و ازدیاد طول بیشتری از خود نشان داده است، که برای کاربرد مورد انتظار مطلوب نیست. در قطعه N3، کاهش دمای بین خط جوش، باعث افزایش زمان توقف بین پاسی و افزایش زمان ساخت دیواره شده است. همچنین کاهش بیش از حد دما بر روی کیفیت ظاهری قطعه (کیفیت و نظم لایه‌ها) و مقدار و ابعاد تخلخل، تأثیر منفی گذاشته است [۲۶].

اطلاعات نتایج آزمون کشش در جدول ۵ آورده شده است. ضخامت کم در دیواره نمونه N1، و وجود حفره‌های بزرگ در قسمت گیره نمونه کشش، باعث سر خوردن قطعه از بین فک‌های دستگاه کشش عدم امکان انجام آزمون برای این قطعه شد. با توجه به اتصال ضعیف به زیرلایه، کیفیت ظاهری نامطلوب و نتایج سختی سنجی، ساخت نمونه جدید و تکرار آزمون کشش برای این قطعه، منجر به نتیجه مطلوب نخواهد شد.

جدول ۵: تأثیر متغیرهای فرآیند بر خواص کششی دیواره‌های ساخته شده

شماره نمونه	دمای بین پاسی (°C)	توان (V.A)	حالت انتقال فلز	درصد افزایش طول	استحکام تسلیم: σ_y (Mpa)	استحکام نهایی: UTS (Mpa)
N1	۲۵۰	۷۸۰	SC-GL	Fail	Fail	Fail
N2	۳۵۰	۱۲۶۰	SP	۸/۴	۵۵	۱۷۲/۱۳۴
N3	۱۵۰	۱۲۶۰	GL-SP	۳/۲	۶۲	۱۵۱/۶۴۲
N4	۲۵۰	۱۲۶۰	SP-GL	۶/۷	۵۸	۱۴۹/۳۰۳
N5	۲۵۰	۱۲۶۰	SP-GL	۷/۵	۶۲	۱۶۲/۱۷۸
N7	۲۵۰	۲۰۸۰	SP	۴/۵	۶۰	۱۵۷/۱۳۱
N8	۲۰۰	۱۲۶۰	SP-GL	۴/۷	۷۳	۱۶۶/۲۷۷

در خصوص قطعه N7، نتایج آزمون کشش و موادشناسی نشان می‌دهد که، این قطعه کیفیت متوسطی در خواص مکانیکی و ریز ساختار دارد. اما همانطور که در مبحث یافته‌های پژوهش گفته شد، پدیده سرریز شدن مذاب و اعوجاج زیرلایه، به دلیل حالت انتقال مذاب پاششی، و در نتیجه استفاده از توان بسیار قوی اتفاق افتاده است. این اتفاق باعث شده است که، کیفیت و نظم لایه‌ها، بسیار ضعیف‌تر از حد انتظار برای تولید یک قطعه، با مشخصات قطعات نزدیک به شکل نهایی^۱ باشد.



شکل ۱۶: تصویر موادشناسی نمونه N7

^۱ Near-net shape Product

با افزایش گرمای ورودی که در نتیجه افزایش سرعت تغذیه سیم (به منظور حفظ مقدار رسوب گذاری در هر لایه، در سرعت پیشروی افشانه بیشتر) اتفاق می افتد، توان نیز افزایش یافته و منجر به پدیده سرریز شدن مذاب خواهد شد. یک راه کاهش اثر پدیده سرریز شدن مذاب در ساخت افزایشی فلز مبتنی بر سیم و قوس (WAAM)، کاهش دمای بین خط جوش است. اما این کار در حالت انتقال فلز به صورت پاششی منجر به افزایش زمان توقف بین پاسی، فشار و شار گاز محافظ و در نتیجه افزایش هزینه های تولید خواهد شد.

با افزایش زمان توقف بین پاسی، و در نتیجه کاهش بیشتر دمای بین خط جوش، نسبت ارتفاع لایه به عرض آنها، افزایش می یابد. همچنین، افزایش بهینه سرعت پیشروی علاوه بر کاهش ارتفاع و عرض لایه ها، باعث گرمای ورودی کمتر و بهبود خواص مکانیکی می شود. افزایش بیش از حد زمان توقف بین پاسی و کاهش بیش از حد سرعت پیشروی باعث می شود کیفیت سطح دیواره کاهش پیدا کرده و لایه ها به صورت تفکیک شده رسوب داده شوند. در این شرایط اتصال ضعیف و عدم یکپارچگی در رسوب گذاری باعث خواهد شد دیواره تولید شده استحکام کافی برای ایجاد ویژگی های قطعه بستار را نداشته باشد.

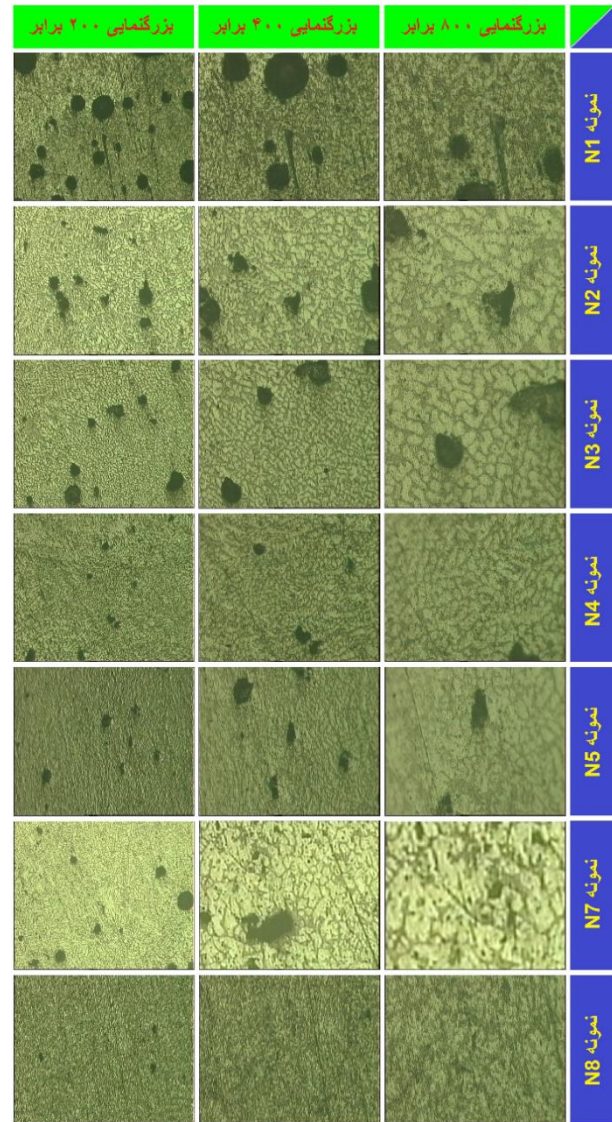
مجموع بررسی های انجام شده و نتایج شکل ۱۸ و جدول ۵، نشان می دهد که شرایط رعایت شده در ساخت قطعه N8، می تواند مبنای مناسبی برای طراحی فرآیند مورد انتظار در ساخت افزایشی ویژگی های بیرونی بستار، بدون نیاز به اعمال تغییرات در قالب تولید انبوه (در مراحل توسعه محصول جدید) باشد.

با توجه به وابستگی حجم مذاب حاصل از سیم جوش به متغیرهایی همچون سرعت تغذیه سیم ورودی و سرعت حرکت مشعل، گرمای ورودی که وابسته به توان (ولتاژ و جریان) است، دمای بین خط جوش که به زمان توقف بین پاسی و نرخ سرد شدن وابسته است، نیاز است این متغیرها در فرآیند ساخت افزایشی مبتنی بر سیم و قوس به طور ویژه مهار و پایش شوند. با تغییر هر کدام از این موارد به نتایج متفاوتی می توان حاصل خواهد شد. با بررسی مستقل تأثیر متغیرهای سرعت حرکت مشعل و فاصله زمانی توقف بین هر پاس بر ارتفاع و عرض مؤثر هر لایه می توان به کیفیت سطح مطلوب در ساخت افزایشی مبتنی بر سیم و قوس دست یافت.

۴- نتیجه گیری

سرعت تغذیه سیم، سرعت پیشروی و توان روی ضخامت لایه ها و مقدار ذوب تأثیرگذار است، به طوریکه کیفیت سطح دیواره رسوب گذاری شده با ضخامت لایه و مقدار ذوب رابطه عکس دارد. پیشگرم کردن و چربی زدایی باعث ایجاد اتصال مطمئن بین قطعه و

در قطعات N2 و N7، حالت انتقال فلز پاششی باعث بروز پدیده سرریز شدن مذاب شده است، و مجموع نتایج آنها نیز مورد قبول نمی باشد. همچنین دیواره های رسوب داده شده در نمونه های N1 و N7 مجموع شرایط ذکر شده (ابعادی و تعداد لایه های رسوب داده شده تا رسیدن به ارتفاع لازم) در مبحث آماده سازی نمونه ها و طراحی آزمون را ندارند. نمونه های N4، N5 و N8، که حالت انتقال مذاب در آنها به صورت پاششی - قطره ای^۱ (SP-GL) بوده است، به نتایج رضایت بخش تری منجر شده است.



شکل ۱۸: تصاویر موادشناسی نمونه های N1 تا N8 با بزرگنمایی مختلف

افزایش محدود مقدار گرمای ورودی و سرعت رسوب گذاری، تا حدی که مانع افزایش نرخ سرد شدن لایه های قبلی نباشد، مقدار تشکیل دانه های ریزتر را افزایش داده و به بهبود خواص مکانیکی کمک خواهد کرد.

^۱ Spray to Globular Transfere

DR	نرخ رسوب گذاری، kg/h
α	ثابت نوع گاز محافظ، سیم مصرفی و قطبیت جریان
β	ثابت افت ولتاژ سیم
l_A	طول قوس، mm
S	انحراف معیار
k	تعداد داده‌ها
x_i	هر کدام از داده‌ها
M	مقدار میانگین x_i
σ_y	استحکام تسلیم، MPa
UTS	استحکام نهایی، MPa

مراجع و منابع

- [1] K. Furukawa, New CMT arc welding process – welding of steel to aluminum dissimilar metals and welding of super-thin aluminum sheets, *Welding International*, 2006, P. 440-445.
- [2] M. Kamyab, Production of Aluminum Parts by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process, MSc Seminar, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, 2018.
- [3] André, D. C. ON THE FORMABILITY OF A DEPOSITED ALUMINUM ALLOY USING WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal, 2016, P. 1-8.
- [4] Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C., Ding, J., Pardal, G. and Colegrove, P. (2016), Wire + Arc Additive Manufacturing, *Materials Science and Technology*, Vol. 32, pp. 641-647.
- [5] Jian, C. Hybrid Design based on Wire and Arc Additive Manufacturing in the Aircraft Industry, MSc by Research Thesis, Cranfield University, 2012, 143 Pages.
- [6] Li Yang, Keng Hsu, Brian Baughman, D.G.F.M., Mamballykalathil Menon, Soeren Wiener, Additive Manufacturing of Metals The Technology, Materials, Design and Production. Springer, 2017, 168 Pages.
- [7] Nabendu, G., Pradip K. P., Goutam N. "Parametric Optimization of MIG Welding on 316L Austenitic Stainless Steel by Taguchi Method", *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* Vol. 6, No. 2, 2017, P. 88-95.
- [8] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal and P. Colegrove, "Wire + Arc Additive Manufacturing", *Materials Science and Technology*, Vol. 32, Iss. 7, 2016, P. 641-647.

زیرلایه و کاهش مقدار تخلخل هیدروژنی می‌شود. برای حذف قابل قبول تخلخل هیدروژنی لازم است علاوه بر چربی زدایی، پیش گرم کردن و رطوبت زدایی، حفاظت با گاز آرگون تا زیر ۵۰۰ درجه سانتیگراد تداوم داشته باشد.

بررسی ریزساختار نشان داد که مقدار تخلخل موجود در محدوده مجاز برای قطعه‌ای مانند بستار است. افزایش سرعت پیشروی و دمای بین خط جوش باعث کاهش ارتفاع و افزایش عرض لایه‌ها می‌شود. هرچه مهار روی دمای بین خط جوش و عرض لایه‌های ایجاد شده بیشتر باشد، ویژگی‌های دقیق‌تری را می‌توان روی سطوح خارجی قطع‌های نظیر بستار ایجاد کرد.

افزایش سرعت پیشروی و دمای بین خط جوش و انتخاب توان متناسب، باعث می‌شود که حالت انتقال فلز به صورت پاششی – قطره‌ای باشد. این حالت در ریزدانه‌گی و کاهش مقدار تخلخل بسیار مؤثر بوده و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی مورد انتظار خواهد بود.

سرریز شدن مذاب به دلیل استفاده از توان بسیار زیاد، گرمای ورودی بیشتر و حالت انتقال مذاب پاششی اتفاق می‌افتد. این پدیده باعث کاهش نظم لایه‌ها و کیفیت سطح می‌شود، و انتظارات فرآیندهای تولید قطعات نزدیک به شکل نهایی را بر آورده نمی‌کند.

گرمای ورودی کمتر و پایش دقیقتر دمای بین خط جوش، باعث ایجاد اعوجاج و تنش پسماند کمتر شده، و مهار بهتر روی ریزساختار و خواص مکانیکی را در پی خواهد داشت.

ر سوب گذاری ویژگی‌های خارجی جدید، در فرآیند نمونه سازی یک بستار تغییر یافته، بدون نیاز به اعمال تغییرات در قالب تولید انبوه، در مراحل توسعه محصول جدید کاربرد خواهد داشت.

تشکر و قدردانی

از حمایت و پشتیبانی کارکنان و مدیران شرکت تحقیقات موتور ایرانخودرو به ویژه آقایان محمد کلهر و فرج الله زارعی بابت آماده سازی نمونه‌ها، و آقایان مهندسین محسن اسدی طاهری، علی ذاکری و امیر مافی، بابت حمایت‌های بی‌دریغشان قدردانی می‌شود.

فهرست علائم و اختصارات

F_W	سرعت تغذیه سیم، m/min
F_t	سرعت پیشروی افشانه، mm/min
l	طول دیواره رسوب گذاری شده، mm
w	عرض دیواره رسوب گذاری شده، mm
h	ارتفاع دیواره رسوب گذاری شده، mm
V	ولتاژ، V
I	جریان، A
P	توان، V.A
T_i	گرمای ورودی، °C

- [19] M. Kamyab, M. Mohebbi, A. Haji Alimohamadi, M. Asadi, A. Mafi, "Mechanical properties of 4043 alloy Additive Manufactured specimens, to create external features of cylinder head", 11th International Conference on Internal Combustion Engines & Oil, February 18-20, 2020, 10 pages.
- [۲۰] مسعود رنج کش و همکاران، طرح ریزی و بررسی ریز ساختار AL و خواص آن، چهارمین کنفرانس بین المللی پژوهش در مهندسی، علوم و تکنولوژی، ۱۶ شهریور ۱۳۹۵.
- [21] M. Kamyab, H. Qodrati, M. Nasiri, A. Abdollahi, M. Mohebbi, Effects of Wire and Arc Additive Manufacturing parameters on geometry of layers, The First National Conference on Computational and Experimental Mechanics, SRTTU, 28 Feb 2019.
- [22] IPCO EFD - 1.5L I4 TDI 90kW (Diesel) EU5, Drawing for Cylinder head, G108_06_10100_09_3_cylh Rev. Issue 11, 2015.03.05.
- [23] IPCO EFD - 1.5L I4 TDI 90kW (Diesel) EU5, Technical Part Specification for Cylinder head, V-RELEASE, 2018.07.27-V06
- [24] ASTM E10 - 15, Standard Test Methods for Beinnell Hardness of Metallic Materials, ASTM International, 2015, 32 Pages.
- [25] A.K. r Thukral, R. Bhardwaj, V. Kumar, A. Sharma, New indices regarding the dominance and diversity of communities, derived from sample variance and standard deviation", Heliyon Volume 5, Issue 10 October 2019, e02606 .
- [26] IRAN KHODRO INDUSTRIAL GROUP, IK 150 11 1 0010 In-House Standard, Porosity Classification and Requirements for Casting Parts, 2006.
- [27] W. Huijun, J. Wenhui, O. Jiahu, K. Radovan, Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW", Journal of Materials Processing Technology 148, 2004, P. 93-102.
- [28] M. Nasiri, A. Abdollahi, Investigation of Inter-pass dwell time and travel speed effects on mechanical properties and geometry of printed steel by WAAM method, BSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, 2018. (in Persian).
- [9] Baoqiang, C., Zewu, Q., Bojin, Q., Hongye, S., Gang, Z., Jialuo, D. "A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process", Applied Sciences, 2017, P.1-11.
- [10] Arlindo, P., A.Eduardo, I., Vinicius, C., Nuno, M., José, G., João, E. R. "Robotic Welding Tests MIG Standard and CMT+P in Aluminum Alloy 6082-T6 for Optimization of Penetration, Cord Width and Reinforcement", Journal of Proceedings, Vol. 2, 2018, P. 1-7.
- [11] John, O. M. Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry, Springer Series in Materials Science 258, 2017, 351 Pages.
- [12] Amberlee, S. H. DESIGN FOR LOW-COST GAS METAL ARC WELD-BASED ALUMINUM 3-D PRINTING, Dissertation of PhD in Department of Materials Science & Engineering of MICHIGAN TECHNOLOGICAL UNIVERSITY, 2016, 183 Pages.
- [13] S. Kou, Mechanical Metallurgy, John Wiley & Sons, Inc., 2003, 461 Pages.
- [14] V. A. Ferraresi, K. M. Figueiredo, T. Hiap Ong, Metal Transfer in the Aluminum Gas Metal Arc Welding, Journal of the Braz. Soc. of Mechanical Science & Engineering, Vol. XXV, No. 3, 2003, P, 229-234.
- [15] Arturo, O. G., Luis, C. G., Frédéric D. B. Effect of process parameters on the quality of aluminium alloy Al5Si deposits in wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process, HAL Archives-Ouvertes, 2018, P. 1-17.
- [16] Maria, L. Studying the Application of Additive Manufacturing to Large Parts, Thesis to obtain the Master of Science Degree in Carvalho Neto, 2017, 107 Pages.
- [17] G. E. DIETER, Welding Metallurgy, University of Maryland, 1988, 766 Pages.
- [18] ASTM E8 / E8M - 16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, 2013, 28 Pages.



Study of design parameters in 4043–alloy additive manufacturing process, to create non-functional external features of cylinder–head

M. Kamyab^{1*}, M. S. Mohebbi², A. Haji Alimohamadi³

¹ MSc Student, Mechanical Engineering Department, Qom University of Technology, Qom, Iran, m_kamyab@ip-co.com

² Faculty of Mechanical Engineering Department, Qom University of Technology, Qom, Iran, mohebbi@qut.ac.ir

³ Faculty of Mechanical Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran, ahajiali@semnan.ac.ir

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 February 2020

Accepted: 23 May 2020

Keywords:

Wire and Arc Additive Manufacturing
mechanical properties
Interpass temperature
Travel speed

ABSTRACT

The challenges facing Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) methods for functional or mass production parts, are still complex geometries, used materials, quality of manufactured components, cycle time and cost. The solubility of hydrogen in aluminum increases dramatically at temperatures above 650 °C, causing hydrogen porosity and thus reducing the mechanical properties of the specimen. It is shown that in order to eliminate the hydrogen porosity, in addition to cleaning and degreasing, gas protection must be maintained during cooling until at least 500 °C. In this study, a simple geometry has been investigated, and the mechanical properties of specimens created from deposited walls on substrates, have been compared under different conditions. As the result of interpass time increased, the Interpass temperature, further decreased and the ratio of layer height to its width increased. Optimization in travel speed increasing, reducing the height and width of the layers, in addition the heat input reduced and the mechanical properties improved, and the more accurated features, created on the external surfaces of the cylinder head.

