

سبقت‌گالی

بیست و پنجمین همایش ملی مهندسی سطح و
چهارمین کنفرانس آنالیز تخریب و تخمین عمر

دانشگاه فردوسی مشهد

۱۴۰۴ و ۱۴۰۳ اردیبهشت



انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران

گواهی ارائه مقاله

تاثیر متغیرهای فرایند بر ریزساختار و مورفولوژی انجمادی آلیاژ استلایت حین ساخت افزایشی به کمک لیزر

علیرضا ظریفیان گرانسایه ، بهروز بیدختی، محسن حداد سبزواری

دکتر سید مهران نحوی

رئیس همایش

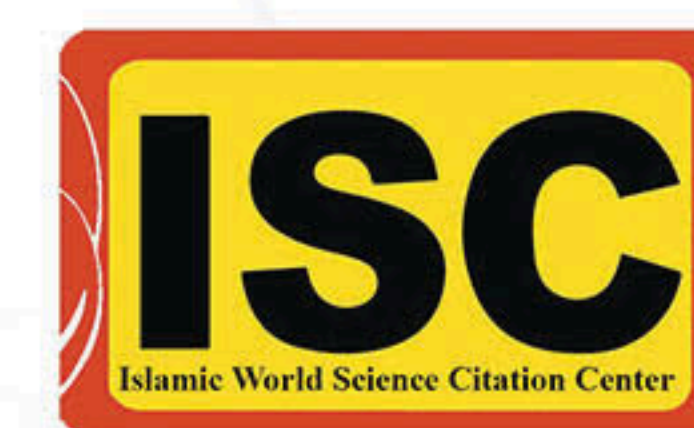


انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران



دکتر قاسم براتی دربند

دبیر علمی همایش



ISC



انجمن علوم و فناوری های ایران

۴
مین

کنفرانس
آنالیز تخریب
و تخمین عمر

۲۵
مین

همایش ملی
مهندسی
سطح

مجموعه چکیده مقاله ها

تاریخ برگزاری: ۲۳-۲۴ اردیبهشت ۱۴۰۴
محل برگزاری: دانشگاه فردوسی مشهد

- لایه نشانی اکسید تنگستن سنتز شده بر بستر شیشه به روش پیرولیز پاششی و تأثیر شرایط مختلف سنتز و عملیات حرارتی بر خواص ساختاری و نوری آن (..... ۳۸
- مقایسه رفتار خوردگی پوششهای کامپوزیتی تولید شده Ni-P/Ni-B-CeO_2 و Ni-P/Ni-B-ZrO_2 ۳۹
- مقایسه رفتار تریبولوژیکی پوششهای نانو ساختار Cr/CrN ، Ti/TiN و CrN/TiN اعمال شده به روش CA-PVD بر فولاد زنگزن ۳۰۴ ۴۰
- تأثیر ضخامت و یکنواختی پوششهای نیتریدی Cr/CrN اعمال شده به روش Arc-PVD بر خواص فرسایشی پره ثابت کمپرسور یک موتور توربینی ۴۱
- بررسی پوشش تعمیر هوزینگ توربین گازی با استفاده از روش Flame Spray و جوشکاری آلومینیوم ۴۲
- سنتز و مشخصه یابی پودر آلیاژ آنتروپی بالای FeCoCrNiMo به عنوان ذرات تقویت کننده جهت استفاده در فرآیندهای پوشش دهی پاشش حرارتی ۴۳
- بررسی ریزساختار و خاصیت آگریزی پوشش آلومینیم-سرامیکی Sermetel 5380 DP® ۴۴
- بررسی تأثیر جریان و نرخ گاز آرگون بر ریزساختار پوشش NiCrAlY اعمال شده با فرایند پاشش پلاسمایی اتمسفری ۴۵
- مطالعه رفتار تریبولوژیکی فولاد دریایی (AH36) روکشکاری شده با الکتروود مس/نیکل ۴۶
- سنتز و مشخصه یابی پودر آلیاژ آنتروپی بالای FeCoCrNiW به روش آلیاژسازی مکانیکی جهت استفاده در فرآیندهای پاشش حرارتی به عنوان ذرات تقویت کننده ۴۷
- بررسی رفتار زیستی پوشش شیشه سرامیک 45S5 بر فولاد زنگزن 316L ۴۸
- بررسی تأثیر افزودن منیزیم بر مقاومت به خوردگی پوشش گالوانیزه گرم Zn-Al روی فولاد ساده کربنی ۴۹
- پوشش دهی فورم های هوای دم کوره بلند به منظور افزایش طول عمر ۵۰
- تولید پوشش های دو لایه Cu-NiCo روی سطح ABS با روش الکتروولس و بررسی ریز ساختار ، ضخامت و رفتار خوردگی پوشش ۵۱
- تأثیر متغیر های فرایند بر ریزساختار و مورفولوژی انجمادی آلیاژ استلایت حین ساخت افزایشی به کمک لیزر ۵۲
- روکش کاری لیزری آلیاژ کلمونوی ۵ ۵۳
- ارزیابی تأثیر نوع و ضخامت پوسته اکسیدی بر ریزش مس لایه نشانی شده در سطح سیم جوش گرید SG2 ۵۴
- اصلاح سطح الیاف ابریشم جهت بهبود رفتار ضدباکتریایی و آنتی اکسیدان ۵۵
- جایگزینی پوشش Cd با پوشش آلیاژی Zn-Ni ۵۶
- فرآیندهای مبتنی بر تغییر ترکیب شیمیایی سطح ۵۷
- بررسی خواص پوشش کامپوزیت آلومینیوم- نانو اکسید تیتانیم در روش آندایزینگ همزمان ۵۹
- بررسی اثر حضور نانوذرات زیرکونیا با غلظت پایین در حمام PEO پوشش دهی آلومینیوم ۵۰۵۲ ۶۰
- بررسی رفتار سایشی پوشش دوتایی (دوبلکس) کربن دهی+ PVD روی فولاد St52 ۶۱
- ارزیابی رفتار خوردگی پوشش رویین فولادهای زنگزن در حمام اسید سیتریکی در مقایسه با حمام اسید نیتریکی ۶۲
- رفتار خوردگی پوشش دو لایه سیلیکات روی حاوی آلومینیوم با زیر پوشش تبدیلی تیتانیومی بر زیر لایه فولاد کربنی ۶۳
- آندایز الکتروشیمیایی تیتانیوم: روشی مطلوب جهت ایجاد پوشش نانولوله های دی اکسید تیتانیوم ۶۴
- افزایش انرژی سطحی پلی تترافلوئورو اتیلن از طریق پردازش پلاسمای سطحی و تأثیر آن بر ویژگی های ترشوندگی ۶۵



تأثیر متغیرهای فرایند بر ریزساختار و مورفولوژی انجمادی آلیاژ استلایت ۶۰۶۱ ساخت افزایشی به کمک لیزر

علیرضا ظریفیان گرانسایه^۱، بهروز بیدختی^۲، محسن حداد سبزواری^۳

۱. دانشگاه فردوسی مشهد (دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی)
۲. دانشگاه فردوسی مشهد (دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی)
۳. دانشگاه فردوسی مشهد (استاد گروه مهندسی مواد و متالورژی)

چکیده

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای فرآیندی بر ریزساختار انجمادی پوشش استلایت ۶۰۶۱ در فرآیند ساخت افزایشی با لیزر مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن و نرخ تغذیه پودر به صورت سیستماتیک تغییر داده شدند تا اثر هر یک به طور مستقل تحلیل شود. رقت به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی پوشش لیزری از طریق بررسی مقاطع عرضی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. تحلیل ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی انجام گرفت و تأثیر متقابل گرادیان دمایی (G) و سرعت انجماد (R) بر مورفولوژی انجماد مورد توجه قرار گرفت. همچنین، رابطه بین پارامتر فرآیندی چگالی انرژی اصلاح شده (نسبت توان لیزر به حاصل ضرب نرخ تغذیه پودر و سرعت اسکن) و ریزساختار پوشش‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که تغییرات در این پارامتر نقش تعیین‌کننده‌ای در جهت‌گیری و اندازه دانه‌ها، تقدم و تاخر انتقال دندریت‌ها از مستونی به هم محور (CET) میزان رقت نهایی پوشش دارد. این یافته‌ها می‌تواند به بهینه‌سازی شرایط فرآیند برای دستیابی به پوشش‌هایی با ریزساختار کنترل شده کمک نمایند.

واژه‌های کلیدی: ساخت افزایشی با لیزر؛ استلایت ۶۰۶۱؛ رفتار CET ؛ چگالی انرژی اصلاح شده؛ رقت



تأثیر متغیرهای فرایند بر ریزساختار و مورفولوژی انجمادی آلیاژ استلایت حین ساخت افزایشی به کمک لیزر

علیرضا ظریفیان گرانشایه¹، بهروز بیدختی²، محسن حداد سبزوار³

¹. دانشگاه فردوسی مشهد (دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی)

². دانشگاه فردوسی مشهد (دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی)

³. دانشگاه فردوسی مشهد (استاد گروه مهندسی مواد و متالورژی)

چکیده

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای فرآیندی بر ریزساختار انجمادی پوشش استلایت 6 در فرآیند ساخت افزایشی با لیزر مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن و نرخ تغذیه پودر به صورت سیستماتیک تغییر داده شدند تا اثر هر یک به طور مستقل تحلیل شود. رقت به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی پوشش لیزری از طریق بررسی مقاطع عرضی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. تحلیل ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی انجام گرفت و تأثیر متقابل گرادیان دمایی (G) و سرعت انجماد (R) بر مورفولوژی انجماد مورد توجه قرار گرفت. همچنین، رابطه بین پارامتر فرآیندی چگالی انرژی اصلاح شده (نسبت توان لیزر به حاصل ضرب نرخ تغذیه پودر و سرعت اسکن) و ریزساختار پوشش‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که تغییرات در این پارامتر نقش تعیین‌کننده‌ای در جهت‌گیری و اندازه دانه‌ها، تقدم و تاخر انتقال دندریت‌ها از ستونی به هم محور (CET) میزان رقت نهایی پوشش دارد. این یافته‌ها می‌توانند به بهینه‌سازی شرایط فرآیند برای دستیابی به پوشش‌هایی با ریزساختار کنترل‌شده کمک نمایند.

واژه‌های کلیدی: ساخت افزایشی با لیزر؛ استلایت؛ رفتار CET؛ چگالی انرژی اصلاح شده؛ رقت

². beidokhti@um.ac.ir

مقدمه

روکش کاری لیزری¹ به عنوان یکی از تکنیک های پیشرفته مهندسی سطح، نقش مهمی در بهبود عملکرد و افزایش عمر قطعات صنعتی ایفا می کند. این فرآیند که از انرژی متمرکز لیزر برای اعمال لایه فلزی بر سطح قطعات استفاده می کند، به ویژه در تعمیر و ساخت قطعات پیچیده، به ویژه در صنایع هوایی و نفت و گاز کاربرد فراوانی دارد. یکی از مواد پر کاربرد در این زمینه، سوپرآلیاژ استلایت 6 است که به دلیل ویژگی های برجسته ای مانند مقاومت به سایش، خوردگی و حرارت، در صنایع مختلفی نظیر هوافضا، تجهیزات پزشکی و صنایع نفت و گاز مورد استفاده قرار می گیرد.

ریزساختار و مورفولوژی انجماد پوشش های اعمال شده توسط لیزر به طور قابل توجهی تحت تأثیر پارامترهای فرآیند قرار دارد. پارامترهایی مانند توان لیزر، سرعت اسکن و نرخ تغذیه پودر تأثیر مستقیمی بر ویژگی های کلیدی همچون رقت، ارتفاع پوشش، عیوب مانند ترک و تخلخل و تغییرات ریزساختاری مواد دارند. مطالعه و بهینه سازی این پارامترها می تواند منجر به تولید پوشش هایی با عملکرد بهینه، حداقل نقص و بهترین مورفولوژی انجمادی متناسب با کاربردهای مختلف شود [1].

یکی از جنبه های مهم تحقیقاتی در زمینه سوپرآلیاژ استلایت-6، بررسی رفتار انجماد این آلیاژ تحت فرایند روکش کاری لیزری است. فرآیند انجماد نقش کلیدی در شکل گیری ریزساختار و خواص مکانیکی نهایی ایفا می کند. در پوشش های بر پایه استلایت-6، ریزساختار معمولاً شامل دندریت های غنی از کبالت با ساختمان بلوری مکعبی مرکز سطحی (FCC) یا بعضاً هگزاگونال فشرده (HCP) و نواحی بین دندریتی حاوی کاربیدهای کروم است که سبب مقاومت بالا در برابر سایش و سختی بالای این آلیاژ می شود.

انجماد با تشکیل محلول جامد γ شروع می شود، سپس کاربیدهای M_7C_3 و سپس با تشکیل یوتکتیک های γ/M_7C_3 خاتمه پیدا می کند و همچنین سختی و مقاومت سایشی بالای آلیاژ به علت 25-30 درصد حجمی کاربیدهای M_7C_3 است کنترل صحیح پارامترهای لیزر می تواند منجر به تشکیل ریزساختارهایی شود که بهترین عملکرد را در کاربردهای مختلف از خود نشان دهند [2].

در فرآیند روکش کاری لیزری رفتار انجماد سوپرآلیاژ استلایت-6 تحت تأثیر نرخ خنک شدن بالا و توزیع غیرهمگن دما قرار دارد. ریزساختار نهایی پوشش های ایجاد شده به روش ساخت افزایشی با لیزر، تا حد زیادی تحت تأثیر شرایط حرارتی حین انجماد است. در این میان، دو عامل مهم یعنی گرادیان دما (G) و نرخ انجماد (R)، نقش تعیین کننده ای در نوع ساختارهای تشکیل شده ایفا می کنند. تغییر نسبت این دو پارامتر در طول فرآیند، می تواند به تشکیل ریزساختارهای مختلفی از جمله صفحه ای، سلولی، دندریت ستونی و هم محور منجر شود. در نتیجه، درک صحیح از رفتار G و R برای پیش بینی مورفولوژی و بهبود خواص نهایی پوشش ضروری است [3].

¹ Laser Cladding

این موضوع در بسیاری از مطالعات پیشین مورد بررسی قرار گرفته است به عنوان مثال کیو چن^۱ و همکاران نشان دادند با افزایش توان لیزر، گرادیان دما در کف حوضچه مذاب افزایش می یابد و سرعت انجماد کاهش می یابد؛ لذا انتقال ساختار از جهت دار به هم محور^۲ با تاخیر انجام میشود [4]. در مقابل یان کایو^۳ و همکاران اعتقاد دارند با افزایش توان لیزر گرمای ورودی افزایش پیدا میکند و نسبت G/R کاهش پیدا میکند لذا این رفتار انتقالی تسهیل میشود [5]. در عین حال، متغیرهایی همچون توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و نرخ تغذیه پودر می توانند باعث ایجاد گرادیانهای دمایی متفاوت یا نرخهای انجماد مختلفی شوند که در نهایت تأثیرات متفاوتی بر مورفولوژی انجمادی، جهت گیری دانه ها و ریزساختار می گذارند. بنابر تحقیقات با افزایش سرعت اسکن لیزری منطقه هم محور گسترش می یابد و اندازه دانه ها کاهش می یابد [6]. یادو^۴ و همکاران به بررسی تأثیر رقت بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ پایه کبالت که با روش جوشکاری قوس پلازما انتقالی (PTA) روی سطوح اعمال شده، می پردازند. نتایج نشان می دهد که کاهش رقت (با نرخ تغذیه پودر بالاتر) سختی پوشش را افزایش داده است و ریزساختار پوشش ها عمدتاً مشابه و به صورت هیپو یوتکتیک باقی ماند [7]. در بعضی موارد نتایج نشان داده که افزایش رقت در اثر افزایش توان که منجر به اختلاط بیشتر بستر و پوشش در اثر افزایش نیروی مارانگونی است باعث کاهش تمایل به ساخت کاربید در اثر عدم حضور عناصری مثل Cr و C میشود و میتواند سختی را کاهش دهد همچنین سان^۵ و همکاران این ویژگی (رقت زیاد) را مسبب کاهش ریزسختی در مطالعات ایشان میدانند [8].

با این حال، شکاف قابل توجهی در درک رابطه پیچیده و دقیق میان پارامترهای لیزر و تغییرات ریزساختار حاصل و حالت های انجمادی در طول فرآیند روکش کاری لیزری وجود دارد. هدف این تحقیق پر کردن این شکاف و مرتفع کردن این چالش است و با بررسی چگونگی تأثیر تغییرات پارامترهای لیزر بر ویژگی های ریزساختاری و حالت های انجماد در فرآیند ساخت افزایشی، این موضوع به طور دقیق تری تحلیل خواهد شد.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، فرایند پوشش دهی به روش ساخت افزایشی رسوب مستقیم انرژی^۶ (DED) با استفاده از یک لیزر فیبری با توان حداکثر ۲ کیلووات و بازوی رباتیک هفت محوره KUKA انجام گرفت. پودر آلیاژی استلایت 6 با اندازه ذرات ۵۰ تا ۱۵۰ میکرون به عنوان ماده اولیه مورد استفاده قرار گرفت و گاز آرگون نیز به منظور جلوگیری از اکسیداسیون ناحیه مذاب وظیفه محافظت را برعهده داشت. زیرلایه از جنس فولاد زنگ نزن AISI 304 با ضخامت ۱۰ میلی متر انتخاب شدند. در هر نمونه، پنج مسیر موازی به طول تقریبی ۶۰

¹ Cui Chen

² Columnar to equiaxed transition

³ Yan Cao

⁴ Yaedu

⁵ Sun

⁶ Direct energy deposition

میلی متر و با فاصله مرکز تا مرکز یک میلی متر ایجاد شد. نمونه‌ها در سه حالت تک‌پاس، سه‌پاس و شش‌پاس تهیه گردیدند. به منظور بررسی اثر پارامترهای حرارتی بر رفتار پوشش، مجموعه‌ای از شرایط عملیاتی شامل توان لیزر (۸۰۰ تا ۱۹۵۰ وات)، سرعت اسکن (۸ تا ۴۰ میلی متر بر ثانیه) و نرخ تغذیه پودر (۶.۵ تا ۳۲.۵ گرم بر دقیقه) به صورت سیستماتیک اعمال شد.

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا با استفاده از دستگاه وایرکات، مقاطع عرضی از مسیرها استخراج شد. سپس سطوح برش‌خورده تحت فرایند سنباده‌زنی و پولیش مکانیکی قرار گرفتند. در ادامه، جهت نمایان‌سازی ریزساختار، عملیات حکاکی شیمیایی (Etching) با استفاده از محلولی شامل مقادیر مساوی از اسیدهای هیدروکلریک (HCl)، نیتریک (HNO₃) و استیک اسید انجام شد. ارزیابی ویژگی‌های هندسی شامل عرض، عمق، ارتفاع مسیر و محاسبه درصد رقت با استفاده از تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی نوری انجام گرفت و محاسبات با نرم افزار ImageJ محاسبه گردید. شکل 1 نمایی از ریز ساختار سطح مقطع عرضی روکش تک پاس را نشان می دهد و قسمت های مختلف شامل ارتفاع روکش (H) و عمق نفوذ (B) نشان داده شده اند. بررسی‌های ریزساختاری به کمک میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

بررسی های ماکروسکوپی نشان می دهد که تأثیر پارامترهای اصلی شامل نرخ تغذیه پودر، سرعت اسکن و توان لیزر بر ویژگی های هندسی اعم از رقت کاملاً مشهود است. با توجه به شکل 1 نفوذ در مسیر اول همیشه بیشتر است که این موضوع در تصویر متالوگرافی نمونه ها هم قابل مشاهده است و این به دلیل آن است که مسیر اول مستقیماً بستر را ذوب می کند اما مسیر های بعدی باید مقدار زیادی از انرژی را به دلیل همپوشانی مسیر ها صرف ذوب کردن مسیر مجاور کنند. پس رقت از فرمول زیر برای هر پنج مسیر محاسبه شد و سپس میانگین گرفته شد:

$$\%D = \frac{H}{H+B} \times 100 \quad (1)$$

شکل (2) نمایی از نمونه‌های منتخب را در قالب یک پنجره پارامتری ارائه می‌دهد که در آن نمونه‌ها با مقادیر مختلف نرخ تغذیه و سرعت اسکن نمایش داده شده‌اند. نمونه 2 که با کمترین نرخ تغذیه (6.5 گرم بر دقیقه) و سرعت اسکن متوسط (14 میلی متر بر ثانیه) تولید شده است، بیشترین عمق نفوذ و بیشترین درصد رقت (32٪) را نشان می‌دهد. این امر به دلیل میزان بالای انرژی وارد شده به واحد حجم ماده و کم بودن میزان پودر تغذیه‌شونده بوده که منجر به ذوب عمیق‌تر زیر لایه شده است.

در مقابل، نمونه 3 که با بیشترین نرخ تغذیه (19.5 گرم بر دقیقه) و همان سرعت اسکن تولید شده، کمترین عمق نفوذ و کمترین درصد رقت (4٪) را دارد. چون عمده حرارت ناشی از پرتو لیزر صرف ذوب پودر میشود و کسر کمتری از انرژی صرف ذوب زیر لایه می شود. نمونه‌هایی مانند 1 و 5 که در ناحیه میانی این پنجره قرار

دارند، عمق نفوذ و رقت متوسطی از خود نشان داده‌اند (به ترتیب 11٪ و 9٪) که می‌تواند نشانگر شرایط پایداری برای دستیابی به پوشش‌هایی با کیفیت یکنواخت باشد. این بررسی نشان می‌دهد با افزایش سرعت اسکن لیزر در نرخ تغذیه ثابت و همچنین با افزایش نرخ تغذیه در سرعت اسکن ثابت گرمای وارد شده به بستر کاهش می‌یابد که این منجر به کاهش رقت عناصر بستر در روکش می‌شود.

بدین منظور با در نظر گرفتن اثر این دو متغیر بصورت هم زمان و اثر توان لیزر نسبتی ترکیبی با عنوان چگالی ویژه انرژی ورودی به واحد حجم از ماده تعریف شد که مقدار آن از رابطه 2 بدست می‌آید و در جدول 1 گزارش شده است.

$$E = \frac{P}{FR \times V} \quad (2)$$

که در آن P توان لیزر، V سرعت اسکن و FR نرخ تغذیه پودر می‌باشد

این پارامتر می‌تواند به صورت مستقیم بر روی میزان نفوذ، نرخ سرد شدن، اندازه دانه‌ها، فازهای تشکیل شده و در نهایت سختی پوشش تأثیر بگذارد

در فرآیند ساخت افزایشی با لیزر، مورفولوژی انجماد نقش تعیین‌کننده‌ای در خواص نهایی پوشش یا قطعه تولیدی ایفا می‌کند. این مورفولوژی به‌طور مستقیم تحت تأثیر پارامترهای حرارتی مثل گرادیان دمایی (G) و سرعت انجماد (R)، قرار دارد. بررسی تغییرات این پارامترها و ارتباط آن‌ها با متغیرهای فرآیندی، در راستای بهینه‌سازی ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی ضروری است.

به طور خاص، نسبت معرف مادون انجماد G/R است و بر تکامل حالت انجماد تأثیر داشت و $G \cdot R$ که به نوعی سرعت سرمایش است بر اندازه دانه ریزساختار تأثیر می‌گذارد [5]. مقدار نرخ رشد (R) از رابطه 3 بدست می‌آید.

$$R = V \cos \alpha \quad (3)$$

که در آن V سرعت اسکن لیزر و α زاویه بین جهت عمود بر فصل مشترک و رشد دندریت‌ها می‌باشد. با در نظر گرفتن مقطع عرضی حوضچه جوش مقدار گرادیان دما (G) در واحد طول به دلیل اتلاف شدید حرارت توسط بستر در فصل مشترک بسیار زیاد است همچنین مقدار نرخ رشد (R) کمینه است چون جهت رشد و جهت خروج گرما عمود بر جهت اسکن لیزر است و $R=0$ پس G/R بیشینه است و حالت انجماد مسطح برقرار است. شکل 3 نشان می‌دهد با ادامه انجماد و دور شدن از فصل مشترک این نسبت کاهش پیدا می‌کند و انجماد از حالت صفحه‌ای به سلولی تغییر می‌کند و با ادامه کاهش G/R سریعاً دندریت‌ها نمایان میشوند ابتدا ساختار دندریت ستونی و با ادامه حرکت جبهه انجماد و پس زده شدن عناصر الیازی از نوک دندریت به مذاب جلوی دندریت‌ها، مادون انجماد مستلزم برای رشد هم محور بوجود می‌آید و دندریت‌های بعدی به حالت هم محور نمایان می‌شوند که در شکل 4 این تکامل ریز ساختار نشان داده شده است [9].

معمولاً گرادیان دما (G) در ناحیه فصل مشترک و نواحی نازک بالای استخر جوش به دلیل انتقال حرارت شدید این ناحیه با محیط اطراف و گاز سرد محافظ بزرگتر است، بنابراین ساختار بسیار ریز دانه در نواحی بالای پوشش بوجود می آید که حاصل $G.R$ بسیار زیاد موجود در این نواحی است [10]. در شکل 4 الف) در ناحیه نازکی ساختار صفحه ای و سلولی را داریم که در بزرگنمایی بیشتر در شکل 5 مشخص است همچنین با ادامه دور شدن از فصل مشترک در شکل 4 ب) رفتار انتقالی CET را شاهد هستیم و در بالای پوشش به دلیل انتقال حرارت شدید با اتمسفر و همچنین گاز محافظ سرد نرخ سرمایش افزایش پیدا میکند و فرصت انجماد کمتر می شود پس ساختار بسیار ریز در این نواحی قابل مشاهده است [11].

بطور کلی در فرایند ساخت افزایشی با لیزر با سوپر الیاز استلایت به دلیل وجود عناصر الیازی زیاد و همچنین ماهیت انجمادی سریع در این فرایند، مقدار G/R لازم برای بوجود آمدن ساختار دندریتی بسیار سریع ایجاد می شود و این باعث می شود که دندریت ها حاکم باشند بر مورفولوژی انجمادی.

مطابق تحلیل های ارائه شده، در توان های بالا، به واسطه ی افزایش قابل توجه اختلاف دمای بین ناحیه مذاب و ناحیه بستر، پارامتر G افزایش یافته و شرایط برای رشد ستونی مساعدتر می گردد. از طرفی با افزایش سرعت اسکن چون بطور مستقیم در ارتباط هست با نرخ رشد (R)، نسبت G/R افزایش پیدا می کند و کسر ساختار هم محور بیشتر می شود یا به عبارتی رفتار CET تسریع خواهد شد. اثر افزایش نرخ تغذیه پودر مانند افزایش سرعت اسکن است یعنی با افزایش نرخ تغذیه پودر عمده حرارت ناشی از پرتو صرف ذوب پودر می شود و گرمای ورودی به زیر لایه کاهش پیدا میکند، این عامل باعث میشود گرادیان درجه حرارت هم کاهش پیدا کند و نسبت G/R کاهش پیدا کند و ساختار غالب دندریت های هم محور باشد.

شکل 5 رشد صفحه ای و سلولی را در ضخامت نازکی از نمونه نشان میدهد. به عبارتی G/R لازم برای رشد مسطح بسیار زیاد است که فقط در نواحی کمی این نسبت موجود است.

شکل 6 تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه 2 را نشان می دهد که طبق توضیحات مطرح شده، ریز ساختار متشکل از مناطق دندریتی غنی از کبالت با ساختمان بلوری FCC یا HCP است و در مناطق بین دندریتی یوتکتیک کاربید ها و فاز غنی از کبالت کاملاً مشهود است.

نتیجه گیری

1) نسبت G/R به عنوان پارامتر تعیین کننده نوع رشد انجمادی، نقش کلیدی در تعیین مورفولوژی دانه ها ایفا می کند. مقادیر بالای G/R (ناشی از گرادیان حرارتی شدید و نرخ انجماد پایین) در فصل مشترک باعث رشد مسطح یا سلولی می شوند، در حالی که با کاهش این نسبت در نواحی بالاتر، ساختار به سمت دندریت های ستونی و نهایتاً دندریت های هم محور تغییر می کند.

(2) افزایش توان لیزر باعث افزایش گرادیان درجه حرارت و افزایش نسبت G/R شد و افزایش سرعت اسکن لیزری یا نرخ تغذیه پودر باعث کاهش زمان تعامل لیزر و پودر و افزایش R و کاهش نسبت G/R شد

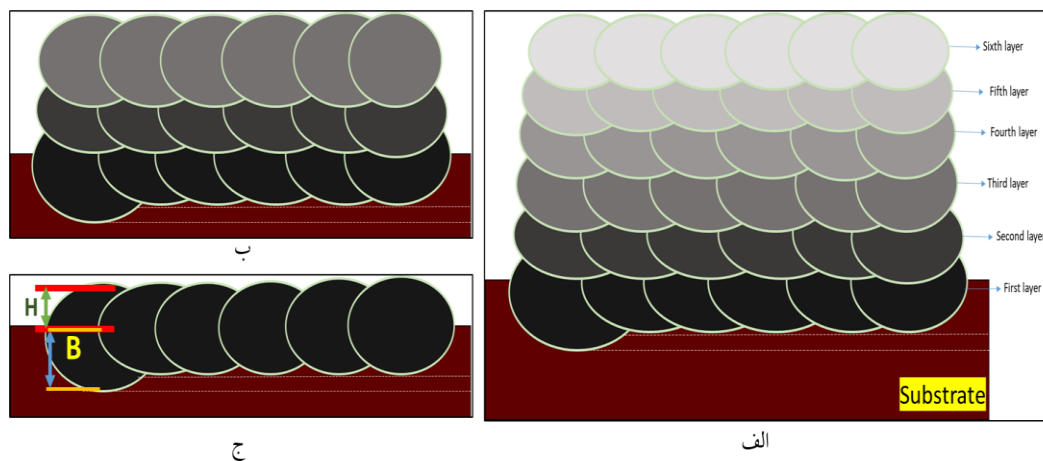
(3) بررسی های ریز ساختاری نشان داد ریز ساختار متشکل از دندریت های غنی از کبالت است و حضور فاز یوتکتیکی در اثر غنی شدن مذاب بین دندریت ها واضح است.

مراجع

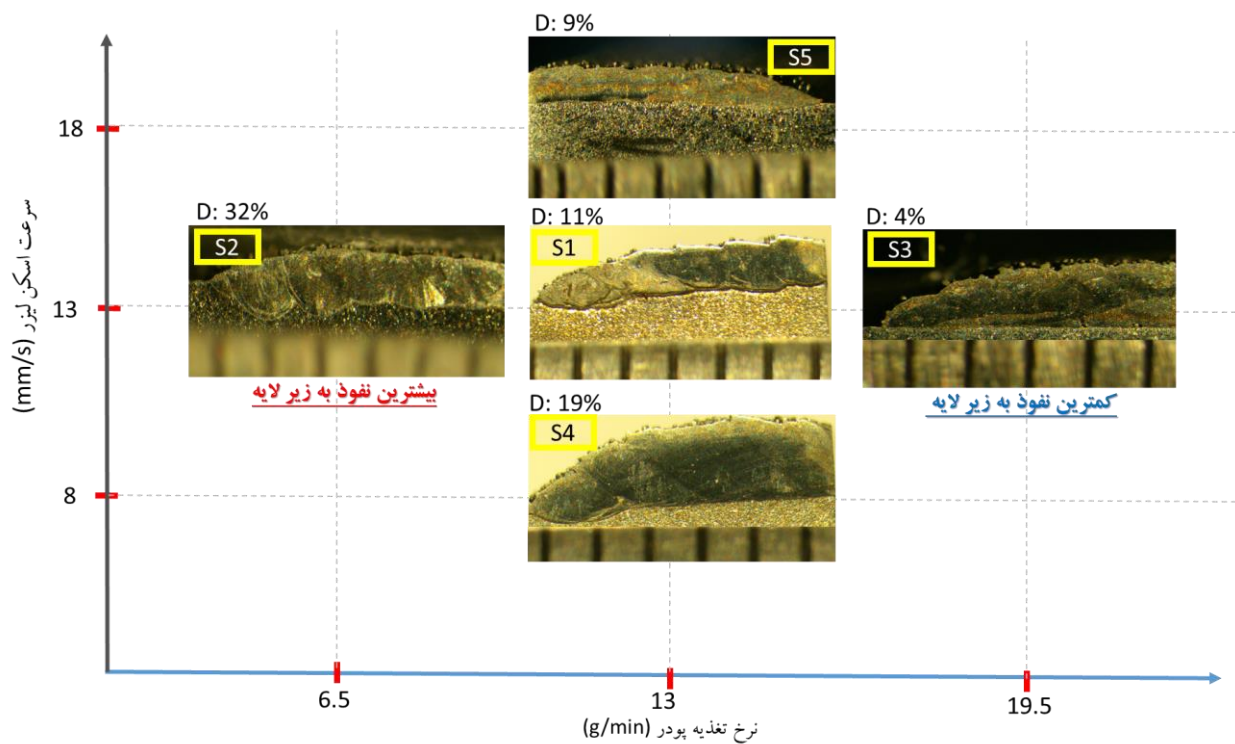
- .1 Wang, C., et al., *Numerical simulation and solidification characteristics for laser cladding of Inconel 718*. Optics & laser technology, 2022. **149**: p. 107843.
- .2 Guo, Y.A., et al. *Microstructure and Mechanical Properties of a Cobalt-Based Superalloy Used for Nuclear Power Station*. in *Materials Science Forum*. 2015. Trans Tech Publ.
- .3 Cui, C., et al., *Characteristics of cobalt-based alloy coating on tool steel prepared by powder feeding laser cladding*. Optics & Laser Technology, 2007. **39**(8): p. 1544-1550.
- .4 Chen, C., et al., *Understanding Stellite-6 coating prepared by laser cladding: convection and columnar-to-equiaxed transition*. Optics & Laser Technology, 2022. **149**: p. 107885.
- .5 Cao, Y., et al., *Evolution of solidification and microstructure in laser-clad IN625 superalloy powder on GTD-111 superalloy*. Surface and Coatings Technology, 2021. **412**: p. 127010.
- .6 Shim, D.-S., et al., *Effect of layer thickness setting on deposition characteristics in direct energy deposition (DED) process*. Optics & Laser Technology, 2016. **86**: p. 69-78.
- .7 Yaedu, A., P. Da Silva, and A. d'Oliveira. *Influence of dilution on microstructure and mechanical properties of a cobalt-based alloy deposited by Plasma Transferred Arc welding*. in *Proceedings of the Internatinal conference on Advanced Materials, their Processes and Applications*. Materials weel. 2002.
- .8 Sun, R., et al., *Microstructure, element segregation and performance of Inconel 625 metal layer deposited by laser assisted ultra-high frequency induction deposition*. Surface and Coatings Technology, 2021. **405**: p. 126715.
- .9 *Welding Metallurgy*, ed. S. EDITION. Sindo Kou, John Wiley , Sons.
- .10 Bhoskar, A., V. Kalyankar, and D. Deshmukh, *Metallurgical characterisation of multi-track Stellite 6 coating on SS316L substrate*. Canadian Metallurgical Quarterly, 2023. **62**(4): p. 665-677.
- .11 Cui, C., et al., *Investigation on the columnar-to-equiaxed transition and corrosion behavior in multi-track Stellite-6 coating fabricated by laser cladding*. Materials Chemistry and Physics :291. 2022 ,p. 126681.

جدول 2: جدول پارامترها

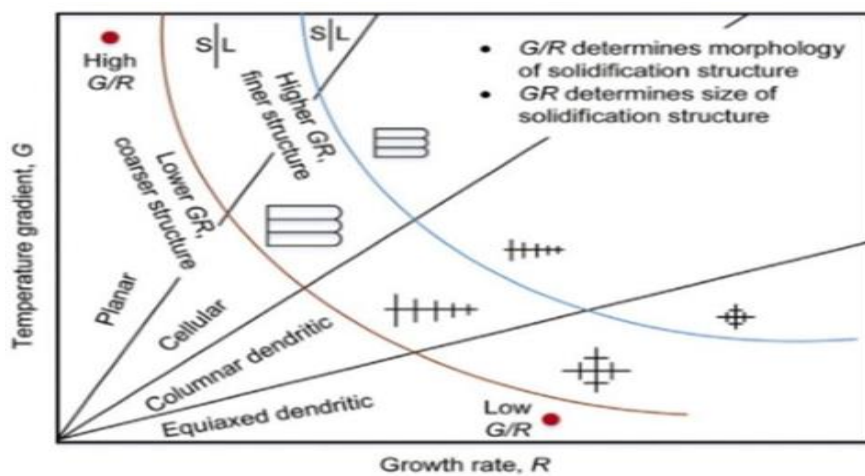
Samples	No. of passes	P(W)	FR(g/min)	V(mm/s)	nickname	$E=P/FV(J.S/g.mm)$
1	1	1200	13	13	P1.2F13V13	426.035503
2	1	1200	6.5	13	P1.2F6.5V13	852.0710059
3	1	1200	19.5	13	P1.2F19.5V13	284.0236686
4	1	1200	13	8	P1.2F13V8	692.3076923
5	1	1200	13	18	P1.2F13V18	307.6923077
6	1	600	13	13	P0.6F13V13	213.0177515
7	1	1800	13	13	P1.8F13V13	639.0532544
9	1	1800	19.5	19	P1.8F19.5V19	291.4979757
11	1	1800	19.5	25	P1.8F19.5V25	221.5384615
26	1	1950	39	40	P1.95F39V40	75
27	1	1950	32.5	40	P1.95F32.5V40	90
29	1	1950	32.5	33	P1.95F32.5V33	109.0909091
30	1	1950	26	33	P1.95F26V33	136.3636364
S1	6	1950	33	26	P1.95F26V33	136.3636364
S2	6	1950	33	32	P1.95F32V33	110.7954545
S3	3	1950	33	26	P1.95F26V33	136.3636364
S4	3	1950	33	32	P1.95F32V33	110.7954545



شکل 1: نمایی از روکش کاری 5 مسیره در حالت الف) شش لایه ب) سه لایه و ج) تک لایه

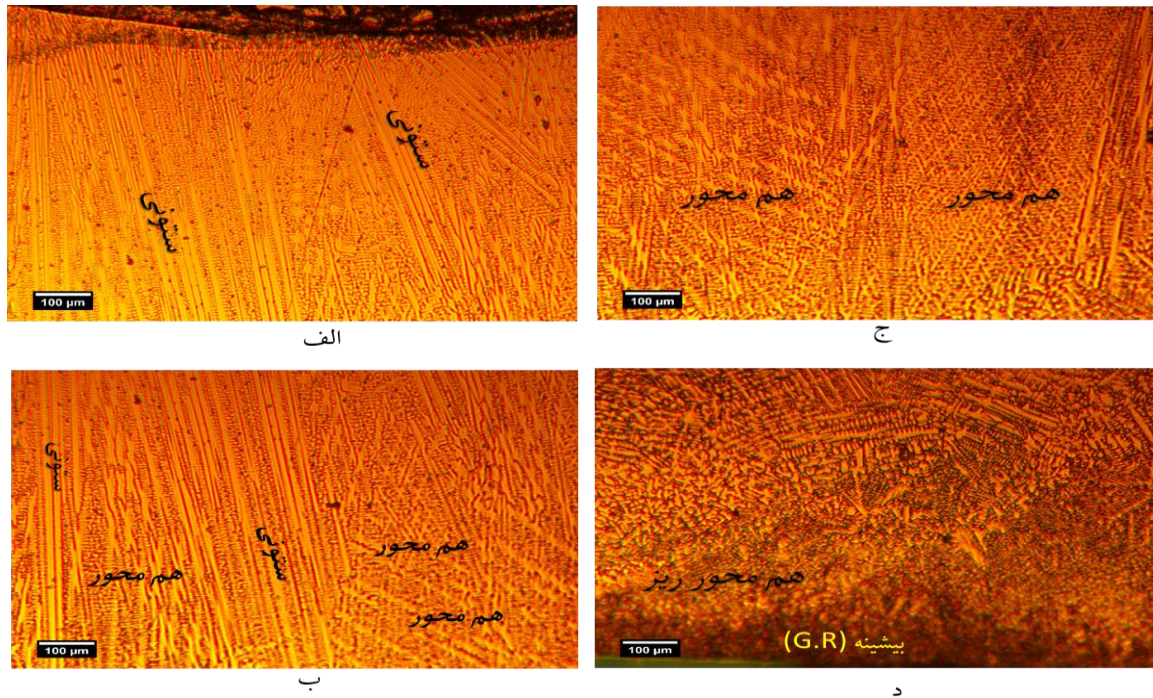


شکل 2: پنجره پارامتری تصاویر ماکروسکوپی

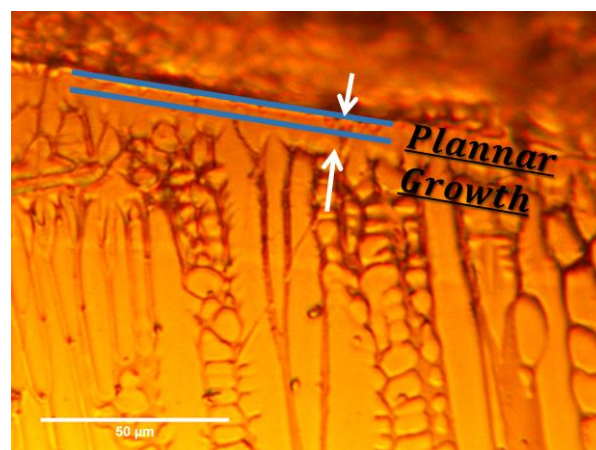


شکل 3: رابطه بین گرادیان درجه حرارت (G) و نرخ رشد (R) و تاثیر آن بر مورفولوژی انجماد

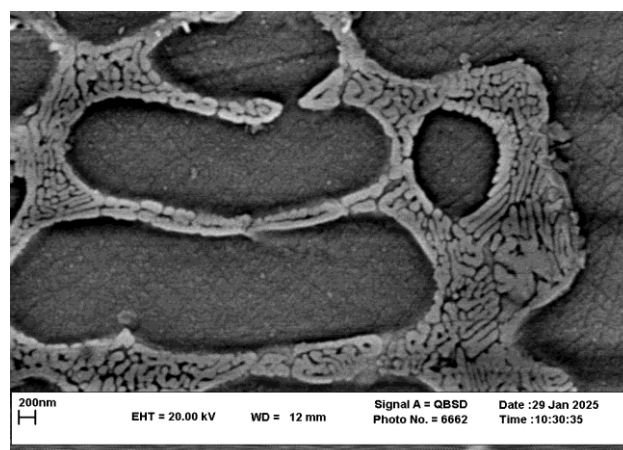
تأثیر متغیر های فرایند ...



شکل 4: تصویر متاوگرافی نمونه S27



شکل 5: تصویر متالوگرافی فصل مشترک پوشش-بستر نمونه S27



شکل 6: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه 3