

تاثیر حرارت ورودی بر خواص ریزساختاری در فرآیند لایه نشانی لیزری اینکونل ۶۲۵ بر روی سوپرآلیاژ رسوب سخت شونده

محمد رضا عامل زاده^۱، بهروز بیدختی^۲، ابوالفضل رضایی بزازی^۳

beidokhti@um.ac.ir

چکیده

در شرایطی که امروزه هزینه جایگزینی قطعات فلزی آسیب دیده نیروگاهی افزایش پیدا کرده است، سازندگان به بازسازی این قطعات متمایل شده‌اند. در این میان یکی از فرآیندهای ترمیم و بازسازی که به سرعت در حال توسعه است، فرآیند لایه نشانی لیزری است. در این پژوهش سوپرآلیاژ پایه نیکل رسوب سخت شونده توسط آلیاژ محلول جامد اینکونل ۶۲۵ با استفاده از توان‌های مختلف لیزر تحت لایه نشانی لیزری قرار گرفت. بررسی ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی در مرز اتصال نشان داد که کنترل حرارت ورودی (۵۸.۳ ژول بر میلی‌متر) در دستیابی به فصل مشترک کاملاً پیوسته و بدون ترک در سوپرآلیاژ پایه نیکل بسیار سودمند است. همچنین نتایج سختی سنجی موید کاهش ۶۳٪ اندازه منطقه تحت تاثیر حرارت (HAZ) با کاهش حرارت ورودی لیزر از ۶۶.۷ J/mm به ۵۰ J/mm است. حرارت ورودی بالا علاوه بر ایجاد ترک در زیر لایه، باعث تشکیل رسوبات مکعبی و میله‌ای شکل در لایه اینکونلی ۶۲۵ گردید.

کلمات کلیدی: لایه نشانی لیزری، سوپرآلیاژ، اینکونل ۶۲۵، ریزساختار، حرارت ورودی

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۱- مقدمه

در توربین‌های گازی بهبود عملکرد مواد در دمای بالا از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا می‌تواند راندمان تبدیل انرژی و طول عمر قطعات را افزایش دهد. برای همین از سوپرآلیاژهای پایه نیکل در بخش داغ توربین گازی به دلیل مقاومت آنها در برابر خزش و خستگی حرارتی استفاده می‌کنند. با این حال، هزینه بالای ساخت اجزای سوپرآلیاژی منجر به توسعه روش‌های تعمیری شده که از نظر اقتصادی بسیار مورد توجه است [۱].

در گذشته روش‌های زیادی برای بهسازی و تعمیر قطعات سوپرآلیاژی توربین به کار برده شده است. از جمله آنها می‌توان به نفوذ حالت جامد، لحیم کاری سخت، اتصال از طریق فاز مایع گذرا [۲]، پاشش پلاسما^۴، جوش قوس پلاسما^۵، جوشکاری قوسی با الکتروود تنگستن تحت پوشش گاز محافظ^۶ [۳] و روش انتقال سرد فلز^۷ [۴] اشاره کرد. با این حال، این فناوری‌ها دارای محدودیت‌های مهمی از جمله حرارت ورودی بسیار زیاد به مواد پایه و ترک گرم در لایه‌های جوش داده شده هستند [۳]. تزنگ^۸ و همکارانش [۵] به منظور تعمیر قطعات سوپر آلیاژهای پایه نیکل IN-713LC از روش GTAW به همراه فیلر اینکونل ۶۲۵ استفاده کردند. با اینکه آنها این روش را برای ترمیم پره‌ها مؤثر می‌دانستند اما عدم کنترل فرآیند GTAW، باعث ایجاد سریع ترک گرم در منطقه تحت تأثیر حرارت (HAZ) هنگام جوشکاری شد.

امروزه از فرآیند لایه نشانی لیزری^۹ به عنوان یک فناوری رسوب فلزات توسط لیزر در عملیات تعمیر قطعات سوپرآلیاژی استفاده می‌شود [۶]. فناوری‌های رسوب فلز مبتنی بر لیزر بدین صورت است که در طول فرآیند رسوب، پرتو لیزر یک لایه نازک از قطعه کار را ذوب کرده و مواد پرکننده (پودر یا سیم) را به طور همزمان در حوضچه مذاب وارد می‌کند. بنابراین مواد پرکننده با ماده پایه ذوب شده پیوند متالورژیکی ایجاد می‌کنند [۳]. با توجه به تمرکز مناسب پرتو لیزر و مدت زمان کوتاه فرآیند، حرارت ورودی بسیار کمی روی ماده پایه اعمال می‌شود و در نتیجه برای جوشکاری تعمیری سوپرآلیاژهای پایه نیکل سودمند است [۷].

سکستون^{۱۰} و همکارانش [۸] دو فرآیند جوش تعمیری TIG و لایه‌نشانی با لیزر را با هم مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که به دلیل حرارت زیاد روی زیرلایه در روش TIG میزان رقت در این فرآیند بیشتر از روش لیزرکاری است. کورسمیک^{۱۱} و همکارانش [۶] در فرآیند لایه نشانی با لیزر اشاره کردند که افزایش سرعت عرضی لیزر باعث کاهش طول نسبی بلورهای ستونی شده و افزایش توان لیزر در کنار کاهش سرعت تغذیه پودر و سرعت عرضی باعث ایجاد ترک می‌شود. سانتوس^{۱۲} و همکارانش [۹] لایه نشانی لیزری را به همراه پودر

⁴ Plasma spraying

⁵ Plasma transferred arc (PTA) welding

⁶ Tungsten inert gas welding

⁷ Cold metal transfer

⁸ Tzeng

⁹ Laser cladding

¹⁰ Sexton

¹¹ Korsmik

¹² Santos

TMS-138A بر روی زیرلایه ModTMS انجام دادند. آنها در روکش انجام شده حفره و ترک مشاهده نکردند اما رقت بالا و منطقه تحت تاثیر حرارت بزرگ را گزارش کردند. درکنار این موارد، سوپرآلیاژهای رسوب سخت شونده حاوی Al و Ti قابل ملاحظه دارای جوشپذیری ضعیف و حساس به ترک ذوبی می‌باشند [۱۰]. لذا در این پژوهش به منظور کنترل اندازه منطقه تحت تاثیر حرارت و جلوگیری از ایجاد ترک اثر حرارت ورودی را با تغییر توان لیزر در فرآیند لایه نشانی لیزری سیم اینکونل ۶۲۵ بر روی سوپرآلیاژ پایه نیکل رسوب سخت شونده بررسی کرده و نتایج توسط مطالعه ریزساختاری و سختی سنجی مقایسه می‌گردند.

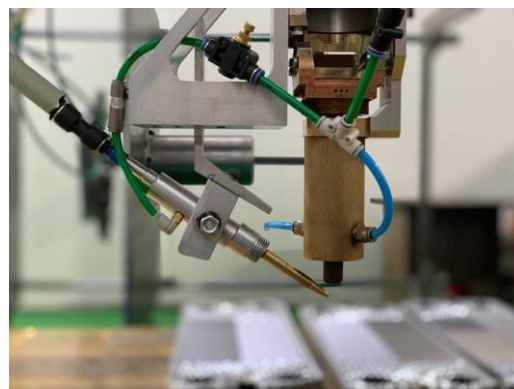
۲- مواد و روش تحقیق

جدول ۱ ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ پایه نیکل رسوب سخت شونده و سیم سوپرآلیاژ اینکونل ۶۲۵ را به ترتیب به عنوان فلز پایه و فلز لایه نشانی شده نشان می‌دهد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی

Ni	Fe	Co	Cr	Ti	Nb+Ta	Mo	Hf	W	Al	آلیاژ
باقیمانده	-	۱۰.۲	۹	۱.۷	۲.۲۵	۰.۱	۱.۳	۹.۹	۵.۸	Ni-superalloy
باقیمانده	۵	۱	۲۱.۳	۰.۴	۳.۶	۹.۲	-	-	۰.۴	IN625

انجام فرآیند با استفاده از دستگاه لیزری فایبر دارای طول موج ۱۰۷۰ نانومتر و حداکثر توان ۲ کیلو وات صورت گرفت. توزیع انرژی پرتو متمرکز لیزر به صورت گاوسی و موقعیت قرارگیری نازل سیم و هد دستگاه جوش به زاویه مشخص تنظیم گردید (شکل ۱). سپس از توان‌های لیزری ۶۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ وات با ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها برای لایه نشانی سیم اینکونل ۶۲۵ بر روی سوپرآلیاژ رسوب سخت شونده پایه نیکل استفاده شد. پارامترهای فرآیند در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است که در حین فرآیند گاز خنثی آرگون برای حفاظت موضع لایه نشانی و جلوگیری از اکسیداسیون به کارگرفته شد.



شکل ۱- موقعیت لیزر

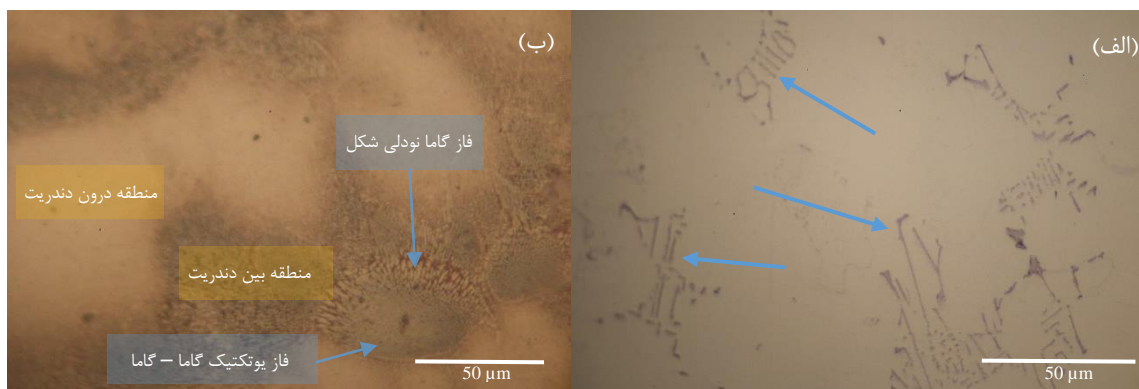
بعد از روکش کاری، مقطع عرضی از نمونه‌ها توسط وایرکات برش خورد و بعد از مانت شدن تحت سنباده‌زنی تا شماره ۲۰۰۰ قرار گرفتند و سپس با نمد مخصوص به همراه محلول آلومینا پولیش شدند. برای بررسی میزان ناپیوستگی‌ها در لایه‌های نشانده شده ابتدا نمونه در حالت پولیش (قبل از اچ) با بزرگنمایی‌های مختلف مورد عکس‌برداری قرار گرفت. سپس توسط محلول $C_2H_4O_2 + HNO_3 + HCl$ به صورت الکترو اچ با ولتاژ ۳ ولت اچ گردید. در نهایت برای بررسی نتایج از دستگاه‌های میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسختی سنجی ویکرز استفاده شد.

جدول ۲- پارامترهای فرایند لایه نشانی با سیم اینکونل ۶۲۵ (قطر ۱ mm)

نمونه	توان (W)	سرعت رویش (m/s)	سرعت سیم (cm/min)	فاصله کانونی (m)	حرارت ورودی (J/mm)
۱	۶۰۰	۰.۰۱۲	۸۵	۱۹۹	۵۰
۲	۷۰۰	۰.۰۱۲	۸۵	۱۹۹	۵۸.۳
۳	۸۰۰	۰.۰۱۲	۸۵	۱۹۹	۶۶.۷

۳- نتایج و بحث

شکل ۲ ریزساختار سوپرآلیاژ پایه نیکل که به عنوان زیرلایه استفاده می‌شود را نشان می‌دهد. علامت پیکان در شکل ۲-الف کاربیدها را در مناطق بین دندریتی به صورت کاربیدهای بلوکی $MC (Ta, Hf)$ و یا به صورت حروف چینی^{۱۳} $MC (Ta, Ti)$ مشخص می‌کند. ریزساختار شامل فازهای گاما، گاما پریم، کاربیدهای از نوع MC ، گاما پریم نودلی شکل و فازهای یوتکتیک است.



شکل ۲- ریزساختار سوپرآلیاژ پایه نیکل (الف) در حالت پولیش (ب) در حالت اچ

¹³ Chinese script

جدول ۲ لایه‌های نشانده شده اینکونل ۶۲۵ بر روی سوپرآلیاژ رسوب سخت شونده پایه نیکلی را از نظر ظاهری (زاویه ترشوندگی، ارتفاع گرده و پهنای آن) و ریزساختاری (اندازه منطقه متاثر از حرارت) در نمونه‌های مختلف مقایسه می‌کند. لایه نشانی با توان ۶۰۰ وات با اینکه حرارت ورودی پایینی (۵۰ ژول بر میلیمتر) نسبت به پارامترهای دیگر استفاده شده در این پژوهش دارد و منجر به منطقه متاثر از حرارت کوچکی می‌شود اما شکل گرده و پنجه جوش مناسبی ندارد. همچنین لایه نشانی با توان ۸۰۰ وات دارای حرارت ورودی زیادی است و حساسیت به ترک را در فلز پایه با افزایش اندازه منطقه متاثر از حرارت، زیاد می‌کند. در مقابل، لایه‌نشانی با توان ۷۰۰ وات و حرارت ورودی (۵۸.۳ ژول بر میلیمتر) هم اندازه منطقه متاثر از حرارت کوچکی دارد و هم از نظر ظاهری دارای پنجه جوش مناسبی است.

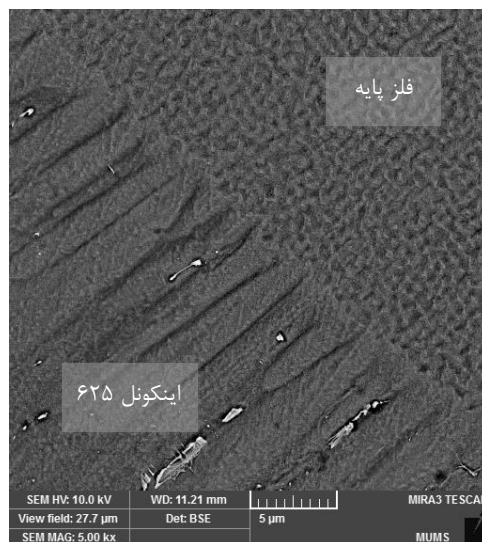
جدول ۲- مقایسه لایه های نشانده شده از نظر ظاهری و ریزساختاری

نمونه	پارامتر توان (W)	زاویه ترشوندگی (درجه)	ارتفاع گرده (mm)	پهنای گرده (mm)	اندازه منطقه HAZ (μm)
۱	۶۰۰	۶۲	۰.۸۶	۱	۱۰۰
۲	۷۰۰	۵۷	۰.۸۲	۱.۱	۱۶۲
۳	۸۰۰	۴۸	۰.۷۵	۱.۳	۲۲۰

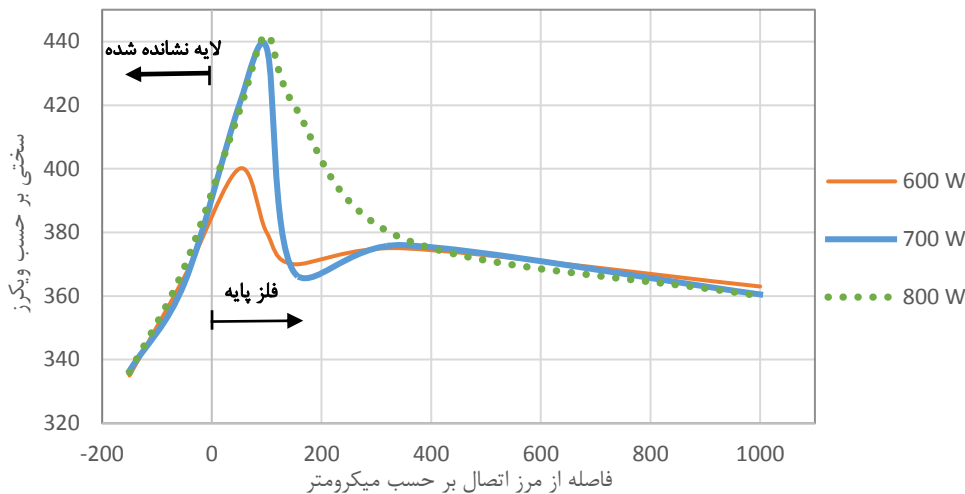
شکل ۳ و ۴ به ترتیب ریزساختار نمونه لایه نشانی شده لیزری با توان ۷۰۰ وات (نمونه ۲) را در میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها، پیوند مناسب بین زیرلایه و لایه نشانده شده اینکونل ۶۲۵، چسبندگی و عدم حضور تخلخل در مرز اتصال مشاهده می‌شود. به وسیله این تصاویر اندازه منطقه HAZ توسط نرم افزار پردازش تصویر در حدود $162 \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شد. منطقه HAZ در فلز پایه قرار گرفته و حرارت ناشی از جوشکاری باعث تغییر ریزساختار آن نسبت به فلز پایه شده است. شکل ۵ تغییرات ریزسختی از لایه نشانده شده تا فلز پایه در امتداد عمود بر مرز اتصال را برای سه نمونه با توان‌های مختلف لیزر نمایان می‌سازد. در هر سه نمونه، مقدار سختی در منطقه HAZ نسبت به فلز پایه افزایش یافته است. از این تغییرات سختی، محدوده منطقه HAZ مشخص می‌شود. بنابراین، اندازه منطقه HAZ برای نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در حدود ۱۰۰، ۲۰۰ و ۲۷۰ میکرومتر می‌باشد که موید نتایج بدست آمده از نرم افزار پردازش تصویر (جدول ۲) است.



شکل ۳- ریزساختار نمونه لایه نشانی شده لیزری با توان ۷۰۰W (الف) در حالت پولیش (ب) در حالت اچ



شکل ۴- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه لایه نشانی شده لیزری با توان ۷۰۰W



شکل ۵- ریزسختی در امتداد عمود بر مرز اتصال

شکل ۶ ریزساختار بخشی از سوپرآلیاژ پایه نیکل زیرلایه که حین فرآیند لایه نشانی لیزری توسط اینکونل ۶۲۵ تحت توان ۸۰۰ وات و حرارت ورودی بالا قرار گرفته است را نشان می‌دهد. در این تصاویر چندین ریزترک با طول‌های حدود ۲۵۶، ۲۵۳ و ۱۰۵ میکرومتر در فلز پایه مشاهده می‌شود. ترک خوردن در سوپرآلیاژها عموماً بین‌دانه‌ای است و معمولاً با تشکیل فیلم مذاب در مرزدانه‌های HAZ و فلز جوش همراه است. عدم توانایی این فیلم برای جبران تنش‌های حرارتی و مکانیکی حین سرمایش منجر به ریزشکاف مرزدانه‌ای از طریق شکاف در امتداد فصل مشترک جامد-مایع می‌شود که گاهی اوقات به عنوان ترک ذوبی، ترک گرم شناخته می‌شود [۱۱]. ترک ذوبی مرزدانه‌ای در HAZ سوپرآلیاژهای پایه نیکل در نتیجه حضور عناصر با نقطه ذوب پایین در مرز انجماد است. ذوب قسمتی از نواحی انجمادی همچون کونولی‌های یوتکتیک گاما-گاما پریم، کاربیدهای MC، بریده‌های Cr-Mo و ترکیبات بین فلزی Ni-Hf در مرزهای دندریتی مسئول ترک‌های ذوبی جوش است [۱۲].



شکل ۶- تصویر در حالت پولیش مربوط به فرآیند لایه نشانی نمونه ۳ (توان ۸۰۰ وات)

شکل ۷ ریزساختار در لایه اینکونل ۶۲۵ در فرآیند لایه نشانی با توان ۸۰۰ وات و حرارت ورودی بالا را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل دو نوع رسوب ثانویه به شکل میله و مکعبی در لایه اینکونلی مشاهده می‌شود. محققان [۱۳] گزارش کردند که این رسوبات می‌توانند از ترکیبات TiN ، NbC و $NbTiC$ و یا فاز لاوز غنی از Nb باشند.



شکل ۷- شکل رسوبت ایجاد شده در سوپراآلیاژ اینکونل ۶۲۵ بعد از لایه نشانی لیزری نمونه ۳

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش فرآیند لایه نشانی لیزری اینکونل ۶۲۵ بر روی سوپرآلیاژ رسوب سخت شونده پایه نیکلی صورت پذیرفت که نتایج آن به قرار زیر است:

۱. در فرآیند لایه نشانی لیزری با افزایش توان از ۶۰۰W به ۸۰۰W میزان زاویه ترشوندگی، ارتفاع و پهنای گرده به ترتیب ۲۲.۶٪ کاهش، ۱۲.۸٪ کاهش و ۲۳.۱٪ افزایش یافت.
۲. فصل مشترک ناحیه اتصال اینکونل ۶۲۵ به سوپرآلیاژ رسوب سخت شونده پایه نیکل در نمونه با توان ۷۰۰W و حرارت ورودی ۵۸.۳ J/mm کاملاً پیوسته، بدون ترک، یکنواخت و همگن بدست آمد.
۳. حرارت ناشی از لایه نشانی لیزری منجر به افزایش سختی در ناحیه متأثر از حرارت گردید و در نمونه‌های با توان ۶۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ وات به ترتیب اندازه این منطقه (HAZ) در حدود ۱۰۰، ۲۰۰ و ۲۷۰ میکرومتر اندازه‌گیری شد.
۴. لایه نشانی لیزری با توان بالای ۸۰۰ وات و حرارت ورودی ۶۶.۷ J/mm باعث ایجاد ریز ترکی به طول ۰.۶ mm در ناحیه HAZ سوپرآلیاژ پایه نیکل رسوب سخت شونده گردید.
۵. در فرآیند لایه نشانی لیزری نمونه ۳ (حرارت ورودی بالا ۶۶.۷ J/mm) در مقایسه با نمونه‌های ۱ و ۲ (حرارت ورودی پایین)، رسوبات مکعبی و میل‌های شکل در لایه اینکونل ۶۲۵ ظاهر گردید.

۵- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از شرکت دانش بنیان طاهای قالب توس به عنوان حامی این پروژه کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۶- مراجع

- 1- Santos, E.C., et al., Optimization of Laser Deposited Ni-Based Single Crystal Superalloys Microstructure. *Advanced Materials Research*, 2010. 154-155: p. 1405-1414.
- 2- Huang, X. and W. Miglietti, Wide Gap Braze Repair of Gas Turbine Blades and Vanes—A Review. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2012. 134(1).
- 3- Bi, G. and A. Gasser, Restoration of Nickel-Base Turbine Blade Knife-Edges with Controlled Laser Aided Additive Manufacturing. *Physics Procedia*, 2011. 12: p. 402-409.
- 4- Ciappi, A., et al., Technological and economical consideration for turbine blade tip restoration through metal deposition technologies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019.
- 5- Tzeng, Y.C. and C.T. Wu, Effect of Inconel 625 on Microstructure and Mechanical Properties of Gas Tungsten Arc Welded Inconel-713LC Superalloy Joints. *Advanced Materials Research*, 2019. 1156: p. 10-16.

- 6- Korsmik, R.S., et al., Investigation of crystallization process of a single crystal nickel -based alloy during the laser multilayer cladding. *Key Engineering Materials*, 2019. 822: p. 481-488.
- 7- Zhong, M., et al., Boundary liquation and interface cracking characterization in laser deposition of Inconel 738 on directionally solidified Ni-based superalloy. *Scripta Materialia*, 2005. 53: p. 159–164.
- 8- Sexton, L., et al., Laser cladding of aerospace materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002. 122(1): p. 63-68.
- 9- Costa Santos, E., et al., Epitaxial Growth of Ni-Based Superalloys Using Laser and Spark Deposition. *Advanced Materials Research*, 2011. 418-420: p. 1564-1569.
- 10- Chen, K.-C., et al., Liquation cracking in the heat-affected zone of IN738 superalloy weld. *Metals*, 2018. 8(6): p. 387.
- 11- Ojo, O.A. and N.L. Richards, Heat-affected zone cracking in welded nickel superalloys. 2012: p. 142-177.
- 12- Chaturvedi, M.C. Liquation cracking in heat affected zone in Ni superalloy welds. in *Materials Science Forum*. 2007. Trans Tech Publ.
- 13- Silva, C.C., et al., New insight on the solidification path of an alloy 625 weld overlay. *Journal of Materials research and Technology*, 2013. 2(3): p. 228-237.