

بررسی ریزساختاری پوشش‌های الکترواسپارک ذوب مجدد شده توسط لیزر بر روی اینکونل IN738LC

محمد ابراهیم نیا^۱، فرشید مالک قاینی^۲، حمیدرضا شاهرودی^۳
۱- دانشجوی دکتری بخش مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه تربیت مدرس ebrahimniya.m@gmail.com
۲- استادیار بخش مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه تربیت مدرس fmalek@modares.ac.ir
۳- دانشیار بخش مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه تربیت مدرس

Microstructural investigation of laser remelted electrospark deposited layer on IN738LC super alloy

M.Ebrahimnia, F. Malek Ghaini, H.Shahverdi

Department of Materials Science and Engineering, Tarbiat Modares University,

Corresponding author: E-Mail: fmalek@modares.ac.ir

چکیده

فرایند پوشش دهی الکترواسپارک به عنوان فرایندی جهت ایجاد لایه واسط جهت جوشکاری یا لایه نشانی لیزر بر روی آلیاژ IN738LC استفاده گردید. از آنجایی که آلیاژ IN738LC حساسیت بسیار زیادی به ترک های ذوبی در منطقه متأثر از حرارت دارد در صورتی که بتوان پارامترهای فرایند الکترواسپارک را به طور بهینه انتخاب نمود، لایه پوششی با ایجاد حداقل ترک ذوبی قابل دستیابی است. لایه ایجاد شده توسط فرایند الکترواسپارک دارای ریزساختار منحصراً متشکل از ستون های فاز گاما است. به دلیل سرعت سرمایش بسیار بالا در این فرایند میزان جدایش عناصر آلیاژی بسیار کم است. ریزساختار این پوشش ها بسیار ریزدانه است که در مقایسه با فلز ریخته گری پایه از نظر مقاومت به اشاعه ترک دارای عملکرد بهتری می باشد. نتایج عملیات ذوب مجدد لیزر حاکی از بدست آمدن لایه چگال با حذف عیوب پوشش های الکترواسپارک مانند تخلخل و ذوب نشدن کافی مرز لایه ها بوده است. نتایج سختی سنجی نشانگر کاهش سختی لایه ذوب مجدد لیزر شده در مقایسه با پوشش های الکترواسپارک به علت تغییر ریزساختاری و درشت تر شدن نسبی ساختار در نتیجه لیزر است. در لایه ذوب مجدد لیزر شده اثری از ترک های ذوبی یا انجمادی مشاهده نشده است.

واژه‌های کلیدی: الکترواسپارک، لیزر، اینکونل، ترک ذوبی

Abstract

Electrospark deposition method has been used for creating an intermediate layer on the IN738LC superalloy for subsequent laser welding or laser cladding. With using proper Electrospark deposition parameters a crack free or at least less crack susceptible layer can be formed by same filler metal on this alloy. ESD layer has unique microstructure consists of columnar gamma phase. Because of very rapid cooling rate involved in electrospark deposition method, the layer with very low elemental segregation can be obtained. Having fine grain microstructure in comparison to as cast base metal, ESD layer is more crack resistance. Laser remelted ESD layer is dense and the ESD defects like lack of fusion between layers and porosity are eliminated in laser remelted layer. Hardness results show lower hardness value for remelted laser area in comparison with ESD layer. Furthermore, no solidification or liquation crack found in remelted layer.

Keywords: Electrospark, Laser, Inconel, liquation crack

(کد: ۹۱۱۰۶۲)

ساختار آلیاژ IN738LC پس از عملیات حل سازی استاندارد در دمای ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت، متشکل از توزیع متوازن از ذرات رسوبی γ' ریز در داخل دندریت ها و γ درشت تر در مناطق بین دندریتی است. آلیاژ IN738LC پس از عملیات محلول سازی، مورد عملیات پیرسازی در دمای ۸۴۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت و سپس سرد شدن در هوا قرار می‌گیرد. ریزساختار نهایی تقریباً مشابه با ریزساختار فلز محلول سازی شده است؛ با این تفاوت که توزیع ذرات γ' ، بسته به عملیات محلول سازی در دماهای مختلف متفاوت خواهد بود. این آلیاژ دارای قابلیت جوش پذیری پایین و یکی از مشکلات جوشکاری آن ایجاد ترک‌های ذوبی در منطقه متأثر از حرارت این آلیاژ است. مهمترین علل ایجاد ترک‌های ذوبی در منطقه متأثر از حرارت این آلیاژ، ذوب شدگی فاز γ' و ایجاد ترکیبات یوتکتیک $\gamma-\gamma'$ در مرز دانه‌ها و همچنین ایجاد ترکیبات کاربیدی شکننده و ذوب شدن عناصر ناخالصی و عناصر پایین آورنده دمای ذوب در محل مرز دانه‌ها است. علت ایجاد ترک‌های ذوبی مربوط به حرارت ورودی از منطقه جوش به فلز پایه و ذوب شدگی موضعی ترکیبات زود ذوب در این منطقه و ایجاد ترک در این مناطق در اثر ایجاد تنش کششی حاصل از انجماد فلز جوش یا مهار شدید است. بنابراین در صورت استفاده از روش‌های جوشکاری با حداقل حرارت ورودی به فلز پایه می‌توان میزان ترک و اندازه آن را کنترل نمود. تابحال تحقیقات انجام شده توفیق چندانی در حذف ترک در این آلیاژها نداشته اند.

فرایند پوشش‌دهی الکترواسپارک ESD که با نام‌های مختلفی در صنعت شناخته می‌شود، بر پایه اصول میکرو جوشکاری است. دستگاه ESD شامل سه جزء اصلی است:

۱. منبع تغذیه (خازن تخلیه الکتریکی و مدارهای الکتریکی)
۲. تغذیه کننده الکتروود دستی یا روباتیک؛ که الکتروود مورد نظر برای پوشش دهی را با سرعت بسیار بالا می‌چرخاند.
۳. واحد تامین گاز محافظ که اغلب گاز محافظ آرگون می‌باشد. در شکل ۱ دستگاه ساخته شده در دانشگاه تربیت مدرس قابل ملاحظه است.

در این روش پالس‌ها یا جرقه‌های الکتریکی با دوره زمانی کوتاه و با جریان‌های بالا، سبب ذوب شدن جزئی الکتروود مصرفی و انتقال آن بر روی زیرلایه می‌شوند. اساس این روش به این طریق است که وقتی الکتروود در حال چرخش با زیرلایه تماس برقرار می‌کند، بین دو ماده هادی جریان الکتریسیته جرقه الکتریکی زده می‌شود که این امر باعث ذوب شدن جزئی الکتروود و زیرلایه می‌شود. چرخش مداوم الکتروود و تماس لحظه‌ای آن با زیرلایه سبب انتقال بسیار جزئی و ظریف فلز الکتروود به زیرلایه می‌شود. نگه دارنده الکتروود

سوپرآلیاژهای پایه نیکل بدلیل کاربردهای بسیار زیاد در صنایع حساس و مهم مانند صنایع نیروگاهی و هوافضا، یکی از مهمترین خانواده‌های فلزات در طبقه بندی مواد مهندسی هستند. خانواده آلیاژهای اینکونل، خانواده‌ای از آلیاژهای پایه نیکل هستند که توسط شرکت بین المللی INCO تولید و توسعه یافتند و به این نام مشهور شدند. آلیاژهای محلول جامد، آلیاژهای رسوب سخت شده و آلیاژهای خاص مانند بین فلزی Ni-Al و استحکام یافته با ذرات اکسید^۱. آلیاژهای محلول جامد دارای دامنه وسیعی از عناصر آلیاژی محلول در نیکل مانند Co, Mo, Fe, Cr هستند. این آلیاژها بر حسب میزان و نوع عناصر آلیاژی محلول دارای کاربردهای مختلفی مانند مقاومت به خوردگی در آب دریا و یا کاربردهای الکتریکی هستند. در کاربردهای نیازمند استحکام بالاتر، از آلیاژهای استحکام یافته رسوبی^۲ استفاده می‌شود. این آلیاژها شامل افزودنی‌های آلیاژی مانند تیتانیوم، آلومینیم و نیوبیوم جهت تشکیل رسوب‌های استحکام دهنده با نیکل بعد از انجام عملیات حرارتی هستند. قابلیت آلیاژهای استحکام یافته با رسوبات، برای حفظ استحکام در دماهای بالا می‌تواند با تغییرات در ساختار بوسیله عملیات حرارتی همراه با تغییر در ترکیب شیمیایی تامین شود [۱،۲]. در بیشتر موارد، رسوب‌های مورد نظر با زمینه آستنیتی کوهنت هستند و سبب افزایش استحکام زمینه می‌شوند. مهمترین رسوب‌های موجود در ساختار آلیاژهای رسوب سخت شده، رسوب‌های γ' (Ni₃Al, Ni₃Ti) و γ'' (Ni₃Nb) هستند. با بهینه سازی ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی، این آلیاژها می‌توانند دارای استحکام تا میزان ۱۲۸۰ MPa و استحکام تسلیم بیش از ۱۰۳۵ MPa باشند. یکی از آلیاژهای معروف خانواده سوپرآلیاژهای رسوب سخت شده، آلیاژ IN7383 کم کربن است. در سال‌های اخیر بحث جوشکاری و پوشش دهی آلیاژ IN738 کم کربن به علت استفاده گسترده در توربین‌ها بیشتر مورد توجه محققان بوده است. این آلیاژ پیرسختی شده با فاز گام‌پرایم (Ni₃(Al, Ti)) γ' است و همچنین دارای کاربیدهای نوع MC است که در ساختار فلز پراکنده شده‌اند. فرایند ترمیم این آلیاژ بوسیله فرایند جوشکاری در تحقیقات بسیار زیادی مورد توجه قرار گرفته است [۱-۹].

ریزساختار آلیاژ ریختگی IN738LC متشکل از توزیع وسیعی از اندازه ذرات رسوبی γ' موجود درون دندریت‌ها و بین دندریت‌ها است. کسر حجمی بسیار کمی از انواع مختلف کاربیدها و کربونیترایدهای نوع MC، بوراید و سولفوکاربیدها و یوتکتیک $\gamma-\gamma'$ در ساختار ریختگی در محل بین دندریتی وجود دارد [۱۰].

جدول ۱- ترکیب عناصر آلیاژی آلیاژ IN۷۳۸LC (درصد وزنی)

C	Cr	Co	W	Mo	Nb
۰,۱۰	۱۵,۵۰	۹,۸	۳,۰۴	۲,۲۷	۰,۷۰
Fe	Al	Ti	Ta	Zr	B
۰,۰۹	۴,۳۶	۳,۱۵	۱,۸۱	۰,۰۴	۰,۰۱

Ni: balance Nickel

پارامترهای فرایند پوشش‌دهی الکترواسپارک با منبع تغذیه کنترل می‌شود که شامل ولتاژ، مقدار ظرفیت خازن، جریان، فرکانس پالس، دوره روشن و خاموش بودن پالس هستند. شکل موج نیز با منبع تغذیه کنترل می‌شود.

از ویژگی‌های این فرایند می‌توان به حرارت ورودی بسیار پایین جوشکاری و سرعت سرد شدن بسیار زیاد پوشش اشاره نمود. با استفاده از این روش مواد آمورف فلزی نیز بر روی زیرلایه‌های کریستالی به شکل آمورف رسوب داده شده است. به علت سرعت سرد شدن بالا، انجماد جهت‌دار در پوشش‌های این روش مشاهده شده است که دارای جهت‌گیری مشابه با دانه‌های فلز پایه می‌باشند [۱۶].

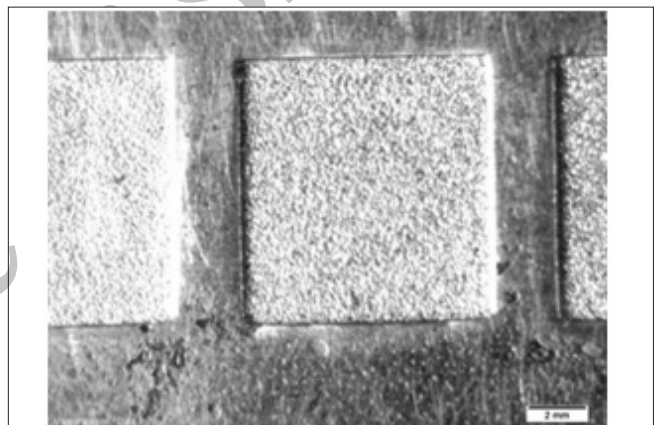
در تحقیقات پیشین محققان این مقاله و همکاران [۱۷] با بررسی پوشش‌های الکترواسپارک بر روی آلیاژ IN738LC دریافتند که این پوشش‌ها دارای مقاومت به ترک‌های ذوبی بیشتری هستند. از سوی دیگر عملیات ذوب لیزر بر روی این پوشش‌ها سبب ایجاد پوشش‌های بدون ترک گردید [۱۸]. در مقاله حاضر به بررسی میکروساختاری پوشش‌های ذوب مجدد لیزر پرداخته می‌شود. در این تحقیق استفاده از این روش برای پوشش‌دهی سطح آلیاژ IN738 برای حذف مشکل ترک‌های ذوبی این آلیاژ مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش تحقیق

آلیاژ IN738 کم‌کربن به عنوان فلز زیرلایه مورد استفاده قرار گرفت. آنالیز طیف سنج نوری عناصر این آلیاژ در جدول ۱ قابل مشاهده است. این آلیاژ به شکل ریخته‌گری تهیه شده و می‌توان پس از انجام عملیات انحلال و پیرسازی در شرایط مختلف نیز آن را مورد استفاده قرار داد. الکترودهایی از آلیاژ پایه نیکل IN738 کم کربن از بلوک همجنس فلز زیرلایه نیز با قطر ۴ میلی‌متر به عنوان فلزپرکن استفاده شده است.

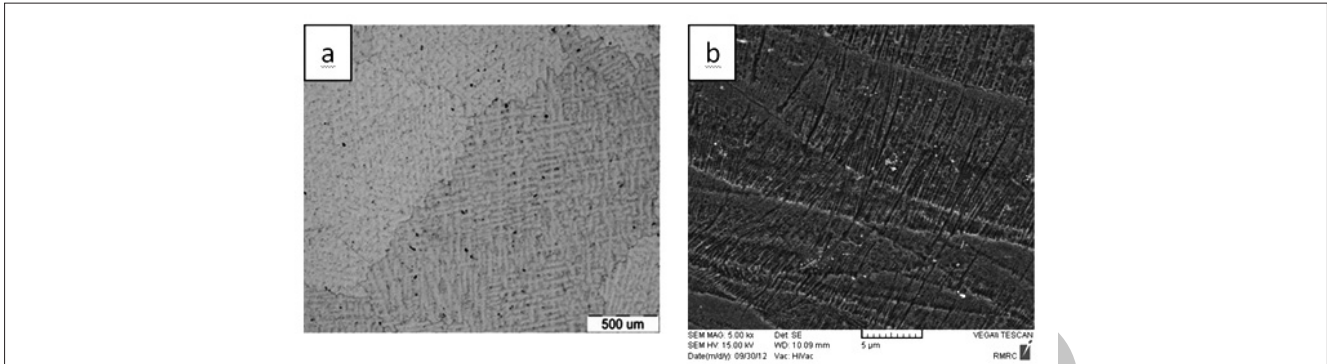


شکل ۱- دستگاه الکترواسپارک مورد استفاده برای پوشش دهی آلیاژ IN738LC

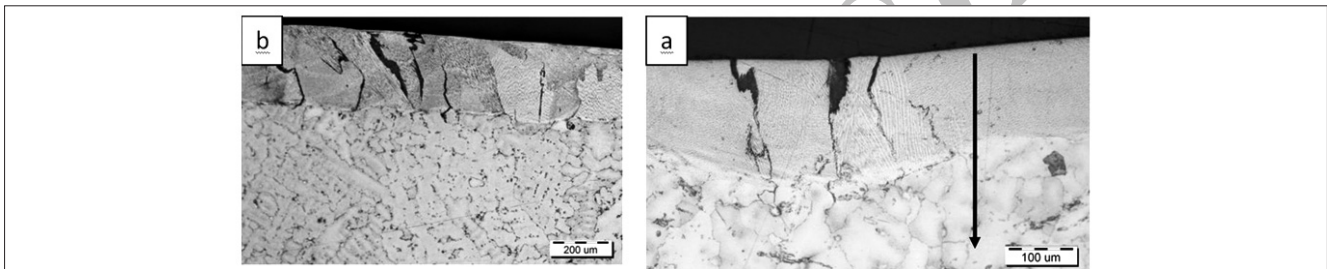


شکل ۲- آماده سازی نمونه آلیاژ IN738 کم کربن جهت پوشش دهی

شامل یک موتور است که امکان چرخش به الکتروود متصل شده به نگهدارنده را می‌دهد. سرعت چرخش الکتروود تا چند هزار دور بر دقیقه قابل تغییر است. در فرایند ESD برای شکستن فضای عایق بین الکتروود و زیر لایه، الکتروود به صورت چرخشی یا ارتعاشی جلوی اتصال قرار داده می‌شود و بطور مداوم با سطح تماس داده می‌شود. بعضی از نگهدارنده‌های الکتروود در فرایند ESD شامل سیستمی برای انتقال گاز محافظ (مثل آرگون یا هلیوم) بر روی محل کار هستند. این گاز باعث حفاظت از اکسیداسیون و بهبود خواص ایجاد جرقه می‌گردد و بدین‌گونه بر روی مشخصات پوشش اثر می‌گذارند. برای مثال آرگون در مورد بعضی مواد به ایجاد سطح صاف‌تر و کاهش اکسید در پوشش ایجاد شده کمک می‌کند [۱۱-۱۵].



شکل ۳- ریزساختار پوشش الکترواسپارک و فلز ریخته گری a، IN738LC ساختار دانه بندی درشت متشکل از دندریت های هم محور آلیاژ ریخته گری ، (b) ساختار پوشش های الکترواسپارک بر روی آلیاژ IN738LC



شکل ۴- ریزساختار لایه ذوب مجدد شده توسط لیزر بر روی فلز پایه آلیاژ a، IN738LC مقطع عرضی پالس لیزر بصورت تک پالس، (b) مقطع طولی لایه ذوب لیزر روی فلز پایه با هم پوشانی پالس به میزان ۸۰ درصد، فلش مسیر سختی سنجی با اندیس مربع در شکل ۶ را نشان می دهد.

قطر لکه به میزان ۱ میلی متر، فرکانس پالس زنی ۲۰ هرتز، دوره روشن بودن پالس به میزان ۷ میلی ثانیه، و انرژی پالس ۷ ژول. این پارامترها جهت بدست آمدن عمق حوضچه ذوب به میزان حداقل ۳۰۰ میکرومتر تعیین شد.

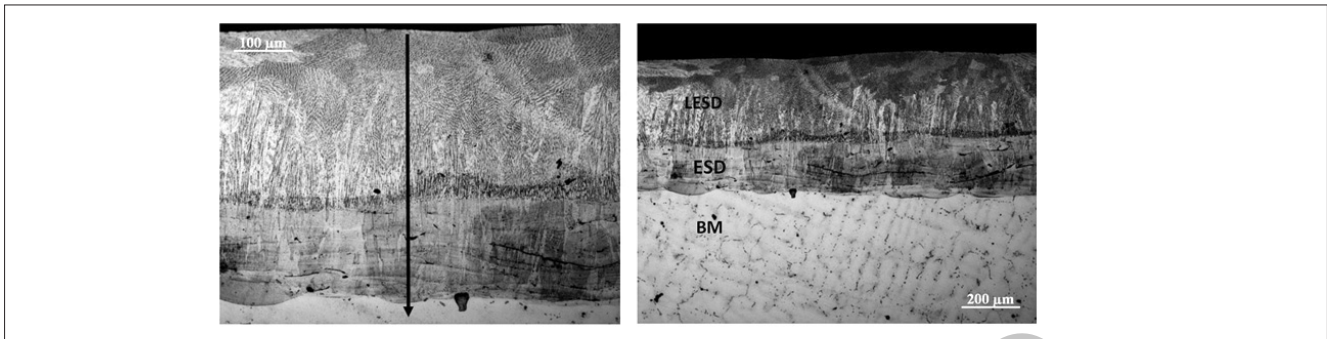
پس از پوشش دهی این نمونه مورد آزمایش های متالوگرافی و بررسی ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار گرفت. نمونه های متالوگرافی نوری با محلول ماربل حکاکی شده اند و نمونه های مورد بررسی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی با استفاده از محلول آبی ۱۰ درصد اکسالیک اسید حکاکی شده اند. سختی سنجی با استفاده از دستگاه سختی سنجی میکرو LECO و با بار ۳۰۰ گرم انجام گردید.

نتایج و بحث

در شکل 3-a ریزساختار فلز پایه مشاهده می شود. همانطور که مشخص است فلز پایه دارای دانه بندی با اندازه دانه های بزرگ است که مشخصه نرخ انجماد بسیار پایین و رشد دانه ها در ساختار

برای پوشش دهی دقیق و درست به اندازه مشخص ابتدا بر روی نمونه آلیاژ IN738LC مربع هایی به طول و عرض ۱ سانتی متر و عمق ۵۰۰ میکرومتر تراشکاری گردید و سپس با استفاده از الکتروود درون این مربع ها پر شد تا پوششی با مساحت ۱ در ۱ سانتی متر مربع و عمق ۵۰۰ میکرومتر بدست بیاید. در شکل ۲ نمونه ایی از مربع های ماشین کاری شده بر روی سطح زیرلایه نشان داده شده است.

پوشش دهی بر روی آلیاژ IN738 کم کربن با استفاده از الکتروودهای گفته شده در قسمت مواد مصرفی با استفاده از دستگاه الکترواسپارک ساخته شده توسط محققان دانشگاه تربیت مدرس، انجام شد. نمونه پوشش دهی شده با الکتروود با قطر ۴ میلی متر و با پارامترهای فرکانس ۲۴۸ هرتز، ولتاژ ۷۵ ولت و دوره روشن بودن پالس به میزان ۱۴۰ میکروثانیه بود. عملیات ذوب لیزر با استفاده از یک دستگاه جوش لیزر پالسی Nd:YAG با حداکثر توان متوسط ۴۰۰ وات انجام شد. نرخ تغذیه گاز آرگون به میزان $160 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ برای محافظت از حوضچه مذاب استفاده شد. پارامترهای لیزر پالسی برای ذوب مجدد لیزر عبارتند از:



شکل ۵ - ریزساختار پوشش ذوب مجدد شده لیزر بر روی پوشش ESD در دو بزرگنمایی مختلف ،
 فلش مسیبر سختی سنجی در شکل ۶ مربوط به مسیرهای اندیس لوزی را نشان می دهد.
 (BM (base metal), ESD (electrospark deposition), LESD (laser remelted electrospark deposition)

مشاهده می شود. همانطور که مشخص است دانه های منطقه جوش متأثر از مرزدانه های فلز پایه تشکیل شده اند. در هر دو نمونه ترک های ذوبی بسیار شدید در ساختار مشاهده می شود که همگی در امتداد مرزدانه های منطقه جوش رشد کرده اند. این ترک های ذوبی در منطقه ذوب جزئی فلز پایه تشکیل شده و به داخل منطقه جوش رشد می کنند. مرزدانه های بزرگ در ساختار جوش که در امتداد و ادامه مرزدانه های فلز پایه هستند سبب رشد سریع و شدید ترک های ذوبی می شوند.

با بررسی مقاطع عرضی و طولی مختلف ساختار جوش لیزر همزا مشخص گردید همگی نمونه ها دارای ترک های ذوبی هستند. تعداد و شدت ترک ها می تواند متفاوت باشد. تعداد و شدت ترک های ایجاد شده بسته به میزان حرارت ورودی، میزان هم پوشانی متفاوت است.

در شکل ۵ ریزساختار منطقه ذوب مجدد لیزر شده بر روی پوشش های الکترواسپارک آلیاژ IN738LC مشاهده می شود. بررسی نمونه های مختلف ذوب مجدد لیزر شده بر روی پوشش الکترواسپارک نشانگر نبود ترک های ذوبی یا انجمادی در این پوشش ها است. بر خلاف جوش لیزر بر روی فلز پایه که همراه با ترک های ذوبی بسیار شدید در زیرلایه است در ذوب مجدد لیزر بر روی پوشش های الکترواسپارک اثری از ترک های ذوبی در پوشش های ESD مشاهده نشد.

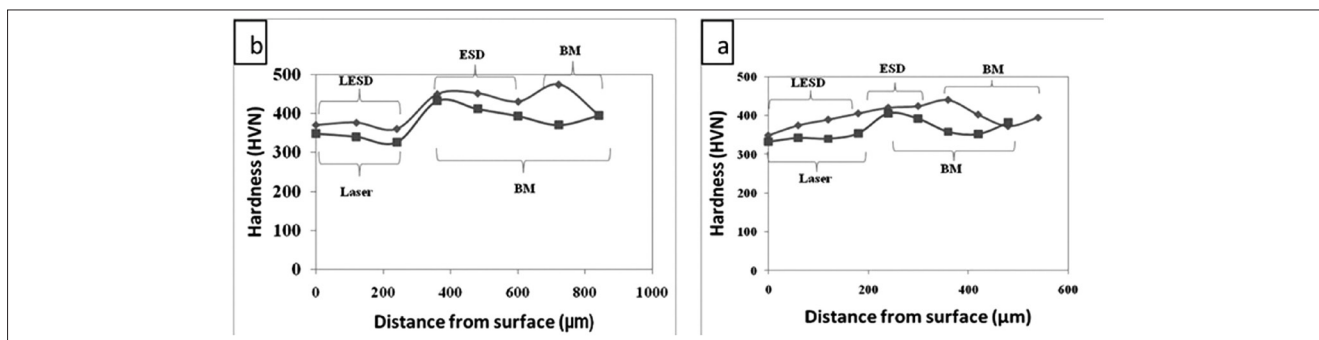
یکی از دلایل تفاوت بسیار زیاد در حساسیت به ترک های ذوبی در پوشش های ESD و فلز پایه در تفاوت در مشخصات ریزساختاری این پوشش ها است. تفاوت های بین پوشش های ESD و فلز پایه را میتوان در چند مورد برشمرد:
 ۱- دانه بندی: پوشش های ESD دارای ریزساختار بسیار

ریخته گری است. در این شکل ساختار دندریتی هم محور و مرز دانه های زاویه بزرگ بین دانه های بزرگ قابل مشاهده است. در شکل 3-b ریزساختار پوشش های الکترواسپارک بر روی زیرلایه آلیاژ IN738LC قابل مشاهده است. همانطور که دیده میشود این ساختار متشکل از ساختار انجمادی با مشخصه های سرعت سرد شدن و نرخ انجماد بسیار بالا شامل سلول های بسیار کوچک فاز گاما است. قطرات مذاب با قرار گرفتن بر روی یکدیگر و تشکیل ساختار سلولی رشد یافته بصورت رشد همبافته ۶ از فلز پایه، پوشش الکترواسپارک را تشکیل می دهند.

در صورتی که اندازه بازوهای دندریتی در ساختار فلز پایه را اندازه گیری نماییم، میزان تقریبی بازوهای دندریتی به میزان ۲۰ میکرومتر در فلز پایه و اندازه سلول های گاما حدود ۲۰۰ نانومتر در ساختار پوشش الکترواسپارک بدست می آید. اندازه بازوهای دندریتی های فلز پایه حدود ۲۰۰ برابر بزرگتر از سلول های فلز پوشش هستند.

با انجام ذوب لیزر به صورت همزا بر روی آلیاژ ریخته گری IN738LC ساختار دندریتی بسیار ریز که مشخصه ساختارهای انجمادی جوش است بدست می آید. در شکل ۴ ریزساختارهای منطقه جوش لیزر با دو هم پوشانی مختلف بر روی آلیاژ ریخته گری IN738LC قابل مشاهده است. همانطور که مشخص است دانه بندی منطقه ذوب لیزر شده متأثر از دانه بندی فلز پایه است و ساختار دندریتی گاما با رشد هم بافته از فلز پایه رشد نموده است.

در شکل ۴ a ریزساختار مقطع عرضی ذوب لیزر همزا متشکل از بسته های دندریتی با جهت گیری های مختلف است. این بسته ها سبب ایجاد دانه های مختلف در ساختار ذوب لیزر شده است. در شکل ۴ b ریزساختار منطقه جوش لیزر با هم پوشانی ۸۰ درصد



شکل ۶ - نمودار سختی سنجی نمونه های ذوب مجدد لیزر شده و سختی پوشش (a, ESD) نمودار سختی بر روی مناطق مختلف شامل پوشش ESD و ذوب مجدد شده LESD و فلز پایه در نمونه با هم پوشانی صفر درصد (تک پاس)، (b) نمودار سختی بر روی مناطق مختلف شامل پوشش ESD و ذوب مجدد شده LESD و فلز پایه در نمونه با هم پوشانی هشتاد درصد (۸۰٪)
LES: laser treated ESD

لیزر مشابه دانه بندی ساختار ESD است و بصورت دانه بندی دارای جهت دار و ریزدانه است.

بررسی سختی منطقه ESD و منطقه لیزر بر روی فلز پایه و بر روی منطقه ESD با استفاده از دستگاه میکروسختی سنجی انجام شده است. سختی های اندازه گیری شده نشانگر بالاتر بودن سختی منطقه ESD نسبت به فلز پایه است. سختی منطقه ذوب مجدد لیزر بر روی ESD نسبت به ساختار ESD دارای مقدار کمتری است. از سوی دیگر سختی منطقه ذوب مجدد لیزر شده بر روی ESD بیشتر از میزان سختی منطقه ذوب لیزر بر روی فلز پایه است.

تغییرات سختی در مناطق مختلف پوشش های ایجاد شده در شکل ۶ قابل مشاهده است. در شکل ۶ a و b، نمودارهای بالایی پروفیل سختی در امتداد مسیر رسم شده در شکل ۵ بصورت فلش سیاه رنگ از سطح تا فلز پایه هستند. این مسیر شامل چند اثر سختی در محل پوشش الکترواسپارک ذوب مجدد شده و چند اثر سختی در محل پوشش الکترواسپارک و همچنین ادامه مسیر در فلز پایه است. در این شکل ها پروفیل سختی پایین مربوط به مسیر سختی سنجی مشخص شده در شکل ۶ a می باشد که سختی در محل ذوب لیزر و سختی در فلز پایه را نشان می دهد.

بطور کلی ریزساختار منطقه الکترواسپارک به علت ریزدانه بودن و ساختار سلولی بسیار ظریف و میزان مرز دانه های بیشتر از ساختار لیزر و فلز زمینه، دارای سختی بالاتری نیز هست. از سوی دیگر ریزساختار منطقه ذوب مجدد لیزر بر روی الکترواسپارک در مقایسه با ریزساختار لیزر بر روی فلز پایه دارای دانه بندی ریزتر و دانه های کوچکتر و لذا مرز دانه های بیشتری است و از این نظر می توان تصور نمود سختی بیشتری نسبت به منطقه ذوب لیزر بر روی فلز پایه دارد.

ریزدانه است که نسبت به فلز پایه که دارای دانه بندی هم محور و بسیار درشت دانه است دارای مقاومت به ترک بیشتری است. هرچه دانه بندی ریزدانه تر باشد میزان مرزدانه ها بیشتر شده و تجمع ترکیبات نهایی انجماد در مرزدانه ها کمتر می شود و از سوی دیگر تمایل به جذب تنش وارد شده توسط فلز جوش به مرز دانه ها بیشتر میشود. همانطور که در شکل ۴ و ۵ مشاهده می شود ریزساختار پوشش های ESD بسیار ریزدانه و با جهت گیری ترجیحی است.

۲- جدایش عناصر آلیاژی: میزان جدایش عناصر آلیاژی در ریزساختارهای حاصل از انجماد سریع بسیار کمتر از ساختارهای با انجماد با سرعت کمتر است. بنابراین میزان جدایش عناصر آلیاژی در پوشش بسیار کمتر است. با دقت در پوشش های ESD ترکیبات نهایی انجمادی شامل ترکیبات یوتکتیکی، کاربیدهای بزرگ فلزی مشاهده نمی شود. این ترکیبات به میزان بسیار زیاد در مرزدانه های آلیاژ ریختگی مشاهده می شود. این جدایش ترکیبات آلیاژی سبب ایجاد ترک های ذوبی در ذوب مجدد لیزر در آلیاژ ریختگی می شود.

بررسی ریزساختاری در شکل ۵ نشانگر وجود دو نوع دانه بندی در ساختار منطقه لیزر است. در محل نزدیک به مرز جوش، دانه بندی به صورت جهت گیری ترجیحی در جهت انتقال حرارت و جهت رشد کریستالی مرجح است. با نزدیک شدن به سطح فلز جوش، دانه ها به صورت رشد غیر جهت دار و هم محور تبدیل می شوند. این دانه ها در اثر تغییر شرایط گرادیان حرارتی و نرخ انجماد بوجود می آیند و نزدیک به سطح شکل می گیرند. در شکل ۵ در فاصله تقریبی ۱۰۰ میکرومتری از سطح این منطقه دیده می شود. دانه بندی منطقه لیزر شده در محل مرز ESD به طور کامل بصورت هم بافته از دانه های ESD نشأت می گیرد. دانه بندی این منطقه از

منابع و مراجع

- [1] Nathaniel, O. K., "Characterization of Inconel 718: Using Gleeble and Varestraint Testing Methods to Determine the Weldability of Inconel 718", 2010, MS Thesis, California Polytechnic State University - San Luis Obispo.
- [2] DuPont, J. N., Lippold, J. C., Kiser S. D., "Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys", John Wiley & Sons, INC., New Jersey, 2009.
- [3] Egbewande, A.T., Buckson, R. A., Ojo, O. A., "Analysis of laser beam weldability of Inconel 738 superalloy", Materials characterization 61, 2010, pp. 569-574.
- [4] Danis, Y., Arvieu, C., Lacoste, E., Larrouy, T., Quenisset, J. M., "An investigation on thermal, metallurgical and mechanical states in weld cracking of Inconel 738LC superalloy", Materials and Design, 31, 2010., pp 402-416.
- [5] Zhong, M., Sun, H., Liu, W., Zhu, X., He, J., "Boundary liquation and interface cracking characterization in laser deposition of Inconel 738 on directionally solidified Ni-based superalloy", Scripta Materialia 53, 2005., pp 159-164.
- [6] Durocher, J., Richards, N.L., "Characterization of the Micro-Welding Process for Repair of Nickel Base Superalloys", ASM International, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 16(6), 2007.
- [7] Ojo, O.A., Richards, N.L., Chaturvedi, M.C., "Microstructural study of weld fusion zone of TIG welded IN 738LC nickel-based superalloy", Scripta Materialia 51, 2004, pp 683 - 688.
- [8] Ojo, O.A., Richards, N.L., Chaturvedi, M.C., "Study of the Fusion Zone and Heat-Affected Zone Microstructures in Tungsten Inert Gas-Welded INCONEL 738LC Superalloy", Metallurgical and materials transactions A, 2006, pp 421- 434.
- [9] Sidhu, R.K., Ojo, O.A., Chaturvedi, M.C., "Microstructural Analysis of Laser-Beam-Welded Directionally Solidified INCONEL 738", Metallurgical and materials transactions A, volume 38A, 2007, pp 858 - 869.
- [10] Ojo, O.A., Richards, N.L., Chaturvedi, M.C., "Contribution of constitutional liquation of gamma prime precipitate to weld HAZ cracking of cast Inconel 738 superalloy", Scripta Materialia 50, 2004, pp 641-646.
- [11] R. N Johnson, J. A Bailey, "Electro-Spark Deposited for replacement of chrome plating", Pacific Northwest National Laboratory, 2005, Contractor Report ARAET-CR-05002.
- [12] Sartwell, D.B., "Electrospark Deposition for Depot- and Field-Level Component Repair and Replacement of Hard Chromium Plating", U.S. Department of defense, Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP), Final Report, 2006.
- [13] Tang, S.K., "The Process Fundamentals and Parameters of Electro-Spark Deposition", MS thesis, Waterloo University, Ontario, Canada, 2009.
- [14] Sheldon, G.L., Johnson, R.N., "Spark deposition- a technique for producing wear resistant coatings", International Conference on Wear of Materials, 1985.
- [15] Johnson, R.N., "ElectroSpark Deposition: Principles and Applications," Society of Vacuum Coaters, 45th Annual Technical Conference Proceedings, 2002, pp 87 - 92.
- [16] Wang, M.C., Wang, W.f., Xie, Y. J., Zhang, J., "Electro-spark epitaxial deposition of NiCoCrAlYTa alloy on directionally solidified nickel-based superalloy", Trans. Nonferrous Met. Soc. China 20, 2010, pp 795-802.
- [17] Ebrahimnia, M., Ghaini, F.M., Shahverdi, H.R., "Hot cracking in pulsed laser processing of a nickel base superalloy built up by electrospark deposition", Science and Technology of Welding and Joining, 2014 (19): 25-29.
- ۱۸- ابراهیم نیا، محمد. مالک قایینی، فرشید. شاهرودی، حمیدرضا. ۱۳۹۲، بررسی ریزساختار لایه‌های ایجاد شده توسط فرایند الکترواسپارک بر روی سوپر آلیاژ IN738LC، اولین همایش ملی فلزات و آلیاژهای غیر آهنی، (مواد و فناوری‌های نوین کاربردی)، مشهد- سالن همایش‌های فردوسی جهاد دانشگاهی مشهد.

با انجام عملیات ذوب لیزر بر روی پوشش‌های الکترواسپارک میزان سختی بالای این پوشش‌ها کاهش می‌یابد. این امر به علت تغییر ریزساختاری و دانه درشت تر بودن ساختار لیزر نسبت به ESD است. میزان سختی منطقه جوش لیزر بر روی فلز پایه نسبت به فلز پایه کمتر است. ذرات گاماپرایم بر روی سختی در فلز پایه تاثیر زیادی دارد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نسبت سختی در ساختارهای مختلف را به صورت زیر جمع بندی نمود:

سختی لیزر > سختی پوشش الکترواسپارک لیزر شده \geq سختی فلز پایه > سختی پوشش الکترواسپارک

نتیجه گیری

- پوشش دهی الکترواسپارک بر روی آلیاژ IN738LC جهت ایجاد لایه واسط برای ذوب مجدد لیزر بر روی این آلیاژ دارای نتایج زیر است:
- ۱- پوشش‌های الکترواسپارک دارای ریزساختار سلولی بسیار ظریف و دانه بندی بسیار ریز هستند. جهت گیری دانه‌ها در جهت رشد پوشش می‌باشد.
 - ۲- با انجام ذوب خودزا لیزر بر روی فلز پایه IN738LC ترک‌های ذوبی بسیار شدیدی در نمونه‌ها مشاهده شد. علت ایجاد ترک‌ها ذوب شدگی مرز دانه‌ها در فلز پایه شامل ترکیبات یوتکتیکی و کاربیدی است.
 - ۳- انجام ذوب مجدد لیزر بر روی پوشش‌های الکترواسپارک سبب ایجاد پوشش‌های بدون ترک و حذف عیوب متداول پوشش‌های الکترواسپارک مانند تخلخل و آخال و عدم ذوب شدگی کافی بین پاسی شده است.
 - ۴- میزان سختی پوشش‌های الکترواسپارک با انجام عملیات ذوب مجدد لیزر کاهش یافته است. هم چنین سختی پوشش‌های ذوب مجدد لیزر بیشتر از سختی مناطق ذوب لیزر بر روی فلز پایه می‌باشد.
 - ۵- نبود جدایش عناصر آلیاژی و هم چنین ریزدانه بودن پوشش‌های الکترواسپارک علت مقاومت بیشتر پوشش‌های الکترواسپارک به ترک‌های ذوبی در ذوب مجدد لیزر نسبت به حساسیت بسیار بالای فلز پایه در ذوب لیزر به ترک‌های ذوبی است.

پی نوشت‌ها:

1. Oxide dispersion strengthened
2. Precipitate hardened super alloy
3. IN-738 or IN-738 LC is a trademark of INCO Alloys International, Huntington Woods, WV.
4. Applicator head or torch
5. Quantometric analysis
6. Epitaxial growth