

## ارزیابی ریزساختار، خواص مکانیکی و بافت انجمادی اینکونل ۶۲۵

### روی زیرلایه اینکونل ۷۳۸ توسط رسوب‌نشانی مستقیم لیزری

محمد گواهیان جهرمی، رضا شجاع رضوی، حامد نادری سامانی، فرید کرمانی  
دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۹/۱۴ - پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۳/۲۰)

#### چکیده

در تحقیق حاضر، ساخت افزایشی سوپرآلیاژ اینکونل ۶۲۵ روی زیرلایه اینکونل ۷۳۸ به صورت نمونه مکعبی به ابعاد  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  با الگوی یک جهت انجام شد. هدف از ساخت این نمونه ارزیابی قطعه از نظر ریزساختار، خواص مکانیکی و بافت انجمادی بوده است. به منظور بررسی خواص، از میکروسکپ الکترونی و نوری، پراش پرتو ایکس و دستگاه پراش پرتو ایکس مجهز به زاویه یاب استفاده شد. نتایج نشان داد انجماد دانه‌ها از حوضچه مذاب به سمت زیرلایه (جهت انتقال حرارت) است. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ریزساختار نشان داد دندریت‌های ستونی در لایه‌های بالایی در نمونه بزرگ‌تر از دندریت‌های ستونی در نواحی میانی به همراه بازوی ثانویه هستند. بررسی تصاویر قطبی یک جزء بافت - Goss ( $\{011\} > 100$ ) به اضافه یک مؤلفه مکعبی نسبتاً ضعیف ( $\{001\} > 100$ ) را نشان داد. (قرارگیری اکثر دانه‌ها در امتداد جهت  $< 100 >$ ) همچنین استحکام نهایی، تسلیم و ازدیاد طول به ترتیب ۹۹۰، ۵۶۳، ۴۸ درصد برای جهت موازی با محور کشش به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: انجماد جهت‌دار لیزری، ساخت افزایشی، سوپرآلیاژ اینکونل ۶۲۵، بافت گوس، خواص مکانیکی.

## Evaluation of the microstructure, mechanical properties and solidification texture of Inconel 625 on Inconel 738 substrate by direct laser deposition

Mohammad Gavahian jahromi, Reza Shoja Razavi, Hamed Naderi Samani, Farid Kermani

Faculty of Material & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology

#### Abstract:

In this research, additive manufacturing of IN625 on IN738 substrate was investigated by a cubic sample with dimensions of  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  with a unidirectional pattern. The purpose of manufacturing this sample; was to check the part microstructure, mechanical properties, and texture. To check the properties, electron and optical microscopes, and diffractometers equipped with goniometer were used. The results showed that the texture of grains is from the molten pool towards the substrate (in the direction of heat transfer). The SEM images showed that the columnar dendrites in the upper layers of the sample are larger than the columnar dendrites in the middle areas along with the secondary arm. Examination of the polfigure showed a Goss texture component ( $\{011\} > 100$ ) besides to a weak cubic component ( $\{001\} > 100$ ). The increase in length was 990, 563 MPa and 48% for the direction parallel to the tension axis.

**Keywords:** laser directional solidification, Additive manufacturing, Inconel 625 superalloy, Goss texture, mechanical properties.

**E-mail of Corresponding author:** [metalgavahian@mut.ac.ir](mailto:metalgavahian@mut.ac.ir)



## مقدمه

افزایشی فلزی (AM) است. ماده اولیه در این روش به صورت پودر یا سیم است و از طریق فعل و انفعالاتی که با پرتو لیزر صورت می‌گیرد حوضچه مذاب تشکیل می‌شود. جهت ساخت و تعمیر در این روش از طراحی سه بعدی و نرم افزارهای CAD/CAM استفاده می‌شود [۷]. دیندا<sup>۱</sup> و همکاران [۱۰] در پژوهشی از فناوری رسوب‌نشانی مستقیم فلزی با لیزر CO<sub>2</sub> جهت ساخت سوپرآلیاژ پایه نیکل استفاده کردند؛ نتایج نشان داد ریزساختار شامل دندریتهای ستونی است که به صورت هم‌محور از زیرلایه رشد کرده‌اند. همچنین جهت رشد دندریتهای ستونی به جهت روبش لیزر وابسته است.

یان<sup>۲</sup> و همکاران [۱۱] به ارزیابی ریزساختار انجمادی روکش اینکونل ۶۲۵ روی زیرلایه GT111 پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش نرخ تزریق پودر و سرعت لیزر، طول بازوهای دندریتهی در مرکز نمونه کاهش یافته‌است. بررسی سختی نشان داد به ترتیب زیرلایه، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه بالایی روکش اینکونل ۶۲۵ کمترین سختی را دارد. یکی از عوامل کنترل‌کننده در کارایی و خواص قطعات ساخت شده به روش ساخت افزایشی تغییرات در بافت کریستالی یا آرایش ترجیحی در حین ساخت لایه به لایه است. یکسان بودن بافت بلور در قطعات تعمیر شده و زیرلایه می‌تواند باعث افزایش عمر و بالا بردن کارایی آلیاژ شود؛ لذا کنترل بافت در هنگام تعمیر قطعات سوپرآلیاژ پایه نیکل به روش ساخت افزایشی از اهمیت بالایی برخوردار است. در تحقیقاتی اخیراً به مطالعه تغییرات بافت بلوری حین فرایند رسوب‌نشانی مستقیم فلزی با لیزر پرداخته شده است. نوع ماده و تحولات حالت جامد پس از ذوب و انجماد هر لایه، تأثیر بسزایی روی بافت ترجیحی دارد. پژوهشگران تأثیر الگوی حرکتی پرتو لیزر را به صورت رفت و برگشتی روی بافت اینکونل ۶۲۵ ساخته شده به روش رسوب‌نشانی مستقیم فلزی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان کردند سریع‌ترین جهت انجماد در ساختارهای FCC در جهت <۱۰۰> است [۱۴-۱۱]. در پژوهشی دیگر،

پره‌های ساخته شده از جنس سوپرآلیاژهای اینکونل ۷۳۸ پس از قرارگیری در دمای بالا و در حین سرویس به علت پدیده‌های خزش، خستگی، خوردگی داغ و اکسیداسیون، به تدریج کارایی خود را از دست می‌دهند. این تغییرات عمدتاً به صورت حفره و کندگی از لبه روی سطح پره ایجاد می‌شود. سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸ به دلیل حضور فاز گاماپرایم استحکام مناسبی دارد، اما مقاومت به خوردگی داغ، اکسیداسیون و جوش‌پذیری پایینی دارد؛ لذا از یک آلیاژ مقاوم به خوردگی و اکسیداسیون مانند اینکونل ۶۲۵ جهت بهبود شرایط کاری جهت تعمیر و بازسازی قطعه استفاده می‌شود [۳-۱].

استحکام سوپرآلیاژ اینکونل ۶۲۵ از طریق رسوب مولیبدن-نایوبیوم در زمینه نیکل و کرم به دست می‌آید؛ بنابراین الزامی به عملیات حرارتی ندارد؛ این سوپرآلیاژ مقاومت به خوردگی قابل توجه در گستره وسیعی از محیط‌های خورنده و محیط‌های متأثر از دماهای بالا (اکسیداسیون، خوردگی داغ) دارد؛ به همین دلیل گزینه مناسبی جهت تعمیر قطعات از جنس اینکونل ۷۳۸ است [۴-۶].

امروزه روش‌های متنوع و جدیدی را جهت تعمیر قطعات توربین‌ها استفاده می‌کنند. روش‌های ذوبی مانند جوشکاری قوس تنگستن از جمله روش‌های تعمیری پره‌ها است. در روش جوشکاری (TIG) به دلیل بالا بودن حرارت، منطقه تحت تأثیر حرارت بزرگ است، لذا حضور رسوبات در این منطقه باعث ایجاد ترک‌های انجمادی و کاهش خواص آلیاژ می‌شود [۷]. جوشکاری اینکونل ۶۲۵ با جدایش عناصر Nb و Mo همراه است. فاز غنی از Nb و نحوه توزیع آن روی خواص خستگی، چقرمگی شکست و جوش‌پذیری بسیار مؤثر است [۸-۹].

روش رسوب‌نشانی مستقیم فلزی به کمک لیزر یکی دیگر از روش‌های تعمیر و بازسازی قطعات است که امروزه جایگاه ویژه‌ای در صنعت دارد و یکی از روش‌های ساخت

<sup>1</sup> G.P. Dinda

<sup>2</sup> Yan

با سرعت اسکن و نرخ پودر بالاتر ترک مشاهده شد. ترک‌ها عمدتاً ناشی از تنش پسماند و ایجاد تنش کششی در ناحیه تحت تأثیر حرارت رخ می‌دهند. همچنین در نمونه با سرعت ۲ میلی‌متر بر ثانیه و نرخ پودر ۵۸ میلی‌گرم بر ثانیه در زیرلایه و فصل مشترک هیچ‌گونه ترکی مشاهده نشد.

در پژوهشی [۱۷] به بررسی بافت اینکونل ۷۱۸ روی زیرلایه هم‌جنس توسط روش رسوب‌نشانی مستقیم لیزری پرداخته شد. نتایج تصاویر قطبی و توابع توزیع جهت‌گیری نشان داد بافت اصلی تشکیل شده در اکثر نمونه‌ها شامل مؤلفه‌های بافت مکعبی، مکعبی چرخیده و گوس است که بافت گوس ناشی از تشکیل دانه‌های ستونی و بافت مکعبی ناشی از برخورد دانه‌های ستونی است همچنین در حالت چرخشی سرعت انتقال حرارت بیشتر عامل افزایش شدت مؤلفه بافت گوس در این نمونه شده است. به همین صورت حرکت چرخشی در این حالت و برخورد جهات <۱۰۰> باعث افزایش شدت مؤلفه بافت مکعبی نیز در این نمونه شده است. همچنین به‌طور کلی با تغییرات در الگوی روبش تغییرات معناداری در سختی مشاهده‌نشده و با انجام آنیل تغییرات سختی و میزان نوسانات آن کاهش یافت. همچنین بافت تشکیل شده به ترتیب در الگوهای دایره‌ای، یک‌جهت و رفت و برگشتی بیشترین شدت را دارا می‌باشند.

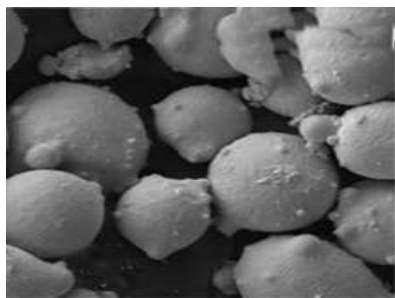
در این پژوهش در ابتدا ریزساختار نمونه ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت، سپس بافت بلوری موجود در دیوار اینکونل ۶۲۵ روی زیرلایه اینکونل ۷۳۸ ساخته شده در لبه و سطح مقطع بررسی شد؛ در پایان خواص کششی نمونه در دو حالت موازی و عمود بر جهت ساخت به‌عنوان یکی از معیارهای اصلی پذیرش در کنار ساختار مطلوب بررسی شد.

#### مواد و روش تحقیق

حرکت رفت و برگشتی و برخورد دندریتهایی با بیشترین نرخ رشد در جهتی خاص با دندریتهای ناشی از لایه‌های قبل را عامل تشکیل این نوع جهت‌گیری معرفی شد [۱۵]. چن<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶] به بررسی تعمیر پره اینکونل ۷۳۸ با فیلر اینکونل ۶۲۵ توسط روش رسوب‌نشانی مستقیم لیزری پرداختند. نتایج نشان داد ناحیه پوششی IN625 سختی به‌مراتب پایین‌تری نسبت به فلز پایه دارد؛ در نتیجه استفاده از این پوشش صرفاً در نقاطی با تنش‌های وارده‌ی محدود کاربرد دارد. تعمیرات پره در مناطق پرتنش نیازمند استفاده از پودر IN738 است که تعمیر را با توجه به ویژگی‌های خاص متالورژی جوش IN738 بسیار پیچیده می‌کند و فرآیند نیاز به پیش‌گرمایش و کنترل‌های حرارتی خاص دارد که باعث تحمیل هزینه بسیار بالا و نتایج بسیار ضعیف در فصل مشترک خواهد شد. استحکام تسلیم و نهایی پوشش به ترتیب ۵۱۰ و ۷۰۵ مگاپاسکال است. برای بررسی وضعیت ترک‌های احتمالی از آزمون سرعت رشد ترک خستگی (FCGR) استفاده شد. منحنی به‌دست‌آمده شرایط تقریباً یکسان در ناحیه تعمیری و زیرلایه را نشان می‌دهد. (نمودار FCGR برحسب  $\Delta K$  در یک محدوده قرار دارد.) امیرجان<sup>۲</sup> و همکاران [۴] به بررسی رشد ترک در رسوب‌نشانی مستقیم لیزری اینکونل ۶۲۵ روی اینکونل ۷۳۸ پرداختند. رسوب‌نشانی مستقیم لیزری با ۲۰۰ وات، نرخ پاشش پودر ۵۸ میلی‌گرم بر ثانیه و سرعت روبش ۲ میلی‌متر بر ثانیه انجام شد. نتایج نشان داد ساختار حاصله شامل دندریتهای ستونی و هم‌محور است. با تغییر سرعت به ۳ میلی‌متر بر ثانیه و افزایش نرخ پاشش پودر به ۱۰۲ میلی‌گرم بر ثانیه نسبت G/R (گرادیان حرارتی به‌سرعت رشد) کاهش یافت. با افزایش سرعت روبش لیزر از ۲ به ۳ میلی‌متر بر ثانیه و همچنین افزایش نرخ پودر، گرمای ورودی کاهش و نرخ خنک‌کنندگی افزایش می‌یابد و دندریتهای زمان کافی برای رشد ندارند؛ در نتیجه علاوه بر کاهش فاصله بازوهای بین دندریتهای، ساختار ظریف می‌شود و سختی آن افزایش می‌یابد. در فصل مشترک نمونه

<sup>1</sup> C.Chen

<sup>2</sup> Mostafa Amirjan



50  $\mu\text{m}$

شکل ۱. تصویر میکروسکوپی الکترونی از پودر اینکونل ۶۲۵.

متالوگرافی مطابق استاندارد [۱۸] ASTM-E192-03 انجام شد. برای آماده‌سازی، نمونه‌ها مانت سرد و سطح آن‌ها توسط سیستم پولیش خودکار (تا سنباده ۲۰۰۰) صاف شد. برای مطالعه‌ی ساختاری ابتدا نمونه توسط محلول ۱ گرم  $\text{FeCl}_3$ ، ۱۰ میلی‌لیتر  $\text{HCl}$  و ۵ میلی‌لیتر  $\text{HNO}_3$  حکاکی شدند. جهت بررسی مورفولوژی پوشش‌ها از میکروسکپ نوری مدل Unimate-Union8799 و از میکروسکپ الکترونی روبشی مدل Vega Tescan-S410 استفاده شد. جهت آنالیز عنصری از طیف‌سنجی تفکیک انرژی استفاده شد. جهت بررسی بافت نمونه دیواری ساخته‌شده از دستگاه پراش پرتوایکس مدل AW-DM300 مجهز به زاویه‌یاب استفاده شد. پس از انجام آنالیز بافت با استفاده از نرم‌افزار TexTools داده‌های تصویر قطبی برای نمونه‌ها استخراج شد. نتایج حاصل از تصاویر قطبی از نمونه در وسط سطح مقطع و سطح لبه بررسی شد. آزمون کشش مطابق با استاندارد [۱۹] ISO6892 توسط دستگاه کشش مدل Zwick Z250 انجام شد. شکل ۲ تصویر ماکروسکوپی از نمونه دیواری ساخته شده جهت انجام آزمون کشش را نشان می‌دهد. همچنین برش نمونه‌ها در دو جهت عمود و موازی با جهت ساخت انجام شد.

در این پ از زیرلایه اینکونل ۷۳۸ ریختگی به ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شد. بدین منظور ابتدا یک عملیات حرارتی انحلال‌سازی به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و خنک‌سازی در هوا انجام گرفت. جهت روکش‌کاری از پودر اینکونل ۶۲۵ شرکت ویزدم<sup>۱</sup> تولید شده به روش اتمایزینگ استفاده شد. شکل ۱ تصویر میکروسکوپی الکترونی از پودر اینکونل ۶۲۵ را نشان می‌دهد. مورفولوژی پودر کروی شکل با اندازه دانه ۵۰ تا ۱۱۰ میکرومتر است. ترکیب شیمیایی پودر و زیرلایه با استفاده از آنالیز طیف‌سنجی تفکیک<sup>۲</sup> انرژی در جدول ۱ آورده شده است.

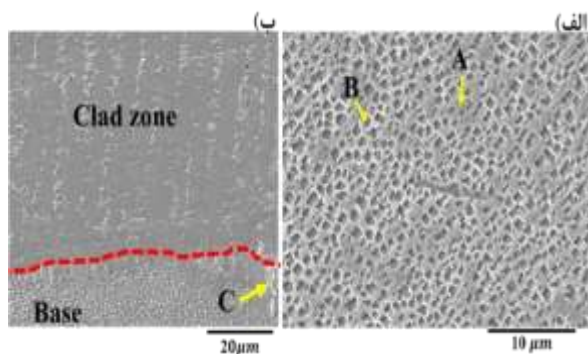
جدول ۱. آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پودر و زیرلایه

Al	Nb	Cr	Co	Ni	عناصر	زیرلایه	
۳	۲/۵	۱۴	۱۰	پایه			
-		دیگر	Ti	W	درصد وزنی		
		۰/۲	۴/۵	۳/۹			
Mo	Nb	Cr	Fe	Ni	عناصر	پودر	
۷/۵	۲/۹	۲۲/۲	۴/۵	پایه			
-		دیگر	Ti	Mn	Si	Al	درصد وزنی
		۰/۲	۰/۲	۰/۴	۰/۵	-	

ساخت افزایشی با استفاده از دستگاه رسوب‌نشانی مستقیم فلزی مدل MUT-DLD-C5 واقع در دانشگاه مالک اشتر و با استفاده از لیزر فیبری پیوسته با حداکثر توان ۱ کیلووات انجام شد. پارامترهای رسوب‌نشانی مستقیم لیزری اینکونل ۶۲۵ روی زیرلایه اینکونل ۷۳۸ به ترتیب ۲۰۰ وات، ۵ میلی‌متر بر ثانیه و ۲۰۰ میلی‌گرم بر ثانیه برای توان، نرخ روبش لیزر و نرخ پاشش پودر انتخاب شد.

<sup>1</sup> Wisdom

<sup>2</sup>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy



شکل ۴. الف. تصویر میکروسکپی الکترونی از زیرلایه و ب. تصویر میکروسکپی الکترونی روبشی از فصل مشترک زیرلایه و ناحیه CZ.

قطعه تولیدشده با لیزر فیبری دارای چهار ناحیه مختلف است؛ هرکدام از این مناطق در حین فرایند رسوب‌نشانی مستقیم فلزی شرایط دمایی متفاوتی را تجربه می‌کنند. این مناطق شامل زیرلایه، منطقه تحت تأثیر حرارت (HAZ)، منطقه مخلوط شده جزئی (PMZ) و منطقه پوشش داده شده<sup>۲</sup> (CZ) است. منطقه CZ بسته به نوع رسوب‌نشانی، از نظر مورفولوژی دارای سه ناحیه دندردیتی، ستونی و هم‌محور است. در روش DMD به‌ویژه با استفاده از لیزر فیبری پیوسته سرعت ذوب و انجماد بسیار بالا است.

شکل ۵ تصویر میکروسکپی نوری از ریزساختار نمونه دیواری را نشان می‌دهد. ریزساختار ناحیه فصل مشترک در تماس با زیرلایه حاوی دانه‌های سلولی است که با پیشروی به بالای پوشش به شکل ستونی تغییر شکل داده‌اند. با دور شدن از فصل مشترک، مقدار G/R کاهش می‌یابد و دانه‌های ستونی در جهت  $\langle 001 \rangle$  موازی با جهت ساخت ایجادشده است.

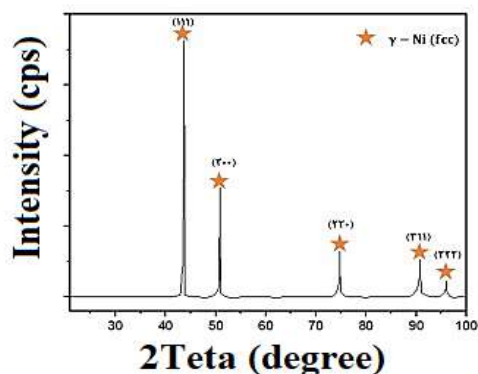


شکل ۲. تصویر ماکروسکپی از نمونه ساخت افزایشی به صورت دیواری و مکعبی به ابعاد ۲×۲ cm.

## نتایج و بحث

### ارزیابی میکرو ساختار:

شکل ۳ الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به اینکونل ۶۲۵ را نشان می‌دهد. در نمونه دیواری ساخت افزایشی تنها حضور فاز محلول جامد  $\gamma$  با ساختار FCC مشخص شد. تصویر میکروسکپی الکترونی از زیرلایه در شکل ۴ نشان داده شده است؛ ریزساختار شامل فازهای زمینه گاما و رسوبات اولیه و ثانویه مکعبی و کاربیدهای MC است. با توجه به منابع وجود کاربیدهای غیر پیوسته و پراکنده در مرزهای دانه، منجر به بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر خزش خواهد شد [۱-۳].

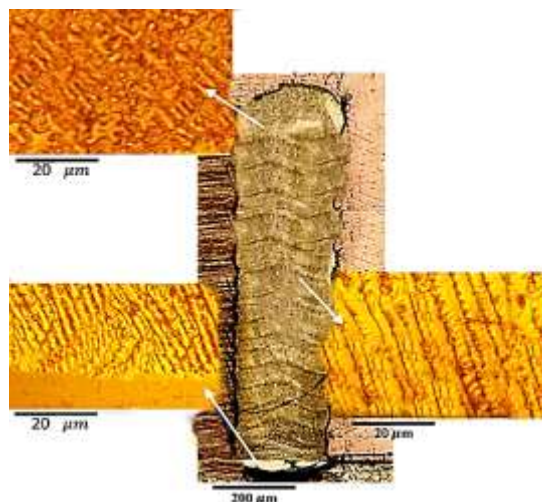


شکل ۳. الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به اینکونل ۶۲۵.

<sup>1</sup> Partially Mixed Zone

<sup>2</sup> Clad Zone

نتایج حاصل از ارزیابی نمونه‌های کشش در دو جهت عمود و موازی ساخت نشان می‌دهد. استحکام نهایی در حالت موازی با جهت ساخت، بزرگ‌تر از حالت عمود با جهت ساخت است. برای توجیه این مورد از مکانیزم استحکام‌دهی مرزدانه‌ها استفاده می‌شود. در این حالت اغلب مرزهای دندریتی عمود بر جهت کشش می‌باشند؛ بنابراین از حرکت نابجایی‌ها جلوگیری می‌کنند؛ لذا برای حرکت نابجایی انرژی بیشتری لازم است. در شرایطی که ساخت در جهت موازی با جهت کشش باشد جهت‌گیری دندریت‌ها موازی با جهت کشش است؛ بنابراین افزایش طول برای دندریت‌ها آسان‌تر است. لذا انعطاف‌پذیری بیشتری به دست می‌آید.



شکل ۵. تصویر میکروسکوپی نوری از نمونه ساخت افزایشی به صورت دیواری.

جدول ۳. خلاصه نتایج آزمون کشش

جهت کشش	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	انعطاف‌پذیری (%)
عمود	۵۵۰	۷۶۴	۳۰
موازی	۵۶۳	۹۹۰	۴۸

### ارزیابی بافت انجمادی:

شکل ۶ تصاویر قطبی (۱۰۰)، (۱۱۰) و (۱۱۱) را برای نمونه ساخته‌شده دیواری از وسط سطح مقطع نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر قطبی می‌توان گفت که مؤلفه‌های بافت گوس مؤلفه اصلی بافت این نمونه هستند. در این نمونه شدت مؤلفه‌های بافت تا ۲/۳ برابر حالت راندوم نیز می‌رسد. بیشترین شدت بافت در جهت <۱۰۰> وجود دارد. جهات <۱۱۰> و <۱۱۱> در این مقطع از نمونه فاقد بافت ترجیحی هستند و حداکثر شدت مؤلفه بافت در این جهات به ۱/۱ برابر حالت راندوم می‌رسد (فاقد بافت ترجیحی).

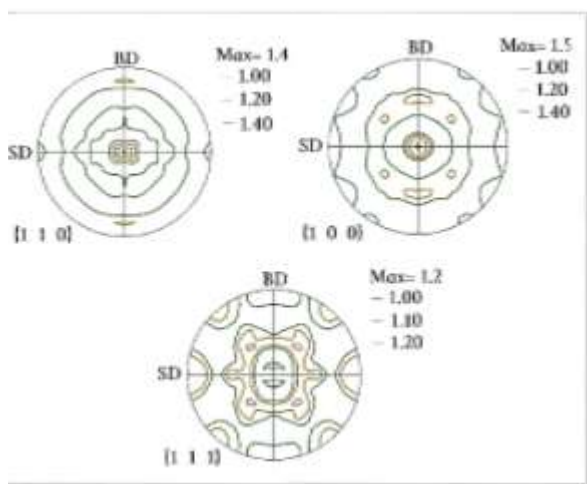
شکل ۷ تصویر قطبی (۱۰۰)، (۱۱۰) و (۱۱۱) را برای نمونه ساخته‌شده دیواری از کناره‌های نمونه با الگوی یک‌جهت

در سوپرآلیاژهای پایه نیکل جهت‌گیری ترجیحی در جهت <۰۰۱> است. انجماد و خنک‌سازی در طی فرایند DMD به وسیله زیرلایه انجام می‌شود؛ لذا انجماد ترجیحی دانه‌ها در جهت انتقال حرارت از حوضچه مذاب و انتقال حرارت از حوضچه مذاب و به سمت زیرلایه است. دندریت‌های ستونی در لایه‌های بالایی بزرگ‌تر از دندریت‌های ستونی میانی لایه هستند و این دندریت‌ها حاوی بازوهای دندریت ثانویه هستند [۱۴-۱۱].

نتایج نشان داد فرصت کافی در بالای پوشش برای تشکیل دانه‌های هم‌محور وجود داشته است. با این حال، محدودیت اصلی انجماد سریع اینکونل ۶۲۵ جدایش عناصر اصلی تقویت‌کننده آن مانند Nb,Mo در ناحیه بین دندریتی است که منجر به تشکیل فاز لاه و در نتیجه کاهش خواص مکانیکی می‌شود [۶-۴]. بررسی‌ها نشان داد با افزایش ارتفاع نمونه مکعبی دندریت‌هایی که جهت‌گیری متفاوت دارند افزایش یافته است. دلیل این ناهمگنی کریستالوگرافی را می‌توان با تئوری انتقال از ستونی به هم‌محور (CET) به دلیل وجود تحت تبرید عنوان کرد [۲۰].

### آزمون کشش:

بررسی خواص کششی به منظور معیار پذیرش جهت تعمیر و بازسازی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸ انجام شد. جدول ۳



تصویر ۷. تصاویر قطبی (۱۰۰)، (۱۱۰) و (۱۱۱) برای پوشش اینکونل ۶۲۵ از سطح لبه نمونه ساخت افزایشی با الگوی یک‌جهت.

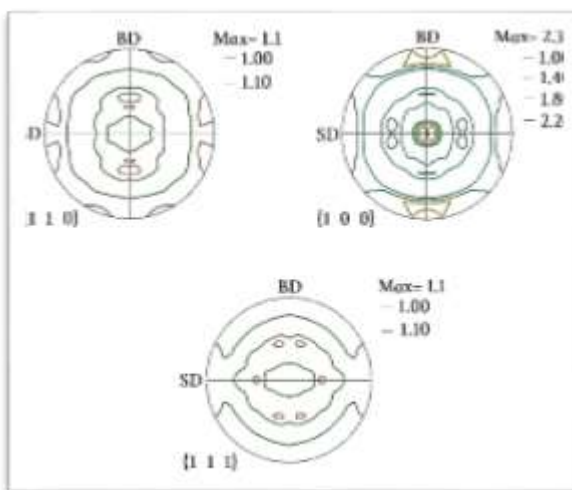
#### نتیجه‌گیری:

در این تحقیق به بررسی ریزساختار، خواص مکانیکی و بافت انجمادی پوشش اینکونل ۶۲۵ روی زیرلایه اینکونل ۷۳۸ ایجادشده توسط روش رسوب‌نشانی مستقیم لیزری پرداخته‌شد. ارزیابی میکرو ساختار، آزمون کشش و بررسی بافت توسط تصاویر قطبی در این پژوهش انجام‌شد؛ مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر بوده‌است:

- ۱- با افزایش ارتفاع، دندریتهای ستونی در لایه‌های بالایی در نمونه ساخت افزایشی مکعبی بزرگ‌تر از دندریتهای ستونی در نواحی میانی بودند.
- ۲- استحکام نهایی و تسلیم در نمونه تعمیری با نمونه ریختگی برابر بود درحالی‌که ازدیاد طول نمونه تعمیری افزایش یافت.
- ۳- بافت ترجیحی از وسط مقطع نمونه مکعبی با الگوی یک‌جهت بالاتر و در جهت <۱۰۰> مشاهده‌شد.

را نشان‌می‌دهد. حداکثر مؤلفه بافت در جهت <۱۰۰> در این مقطع کاهش یافته و به ۱/۵ برابر حالت راندوم می‌رسد. همچنین برخلاف شکل ۶ در این حالت در جهات <۱۱۰> و <۱۱۱> نیز بافت ترجیحی ضعیفی وجود دارد که به ترتیب ۱/۴ و ۱/۲ برابر حالت راندوم است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت شدت بافت ترجیحی در سطح مقطع نمونه مکعبی با الگوی یک‌جهت بالاتر و جهت آن <۱۰۰> است. تشکیل این مؤلفه‌ها در نمونه‌های ساخته‌شده با ساخت افزایشی در مقالات دیگر نیز گزارش شده است

[۱۰، ۱۵ و ۱۷]. نکته مهم اینکه عامل اصلی تشکیل بافت انجمادی ترجیحی در جهت <۱۰۰> یا همان سریع‌ترین جهت انجماد و بیشترین انتقال حرارت در ساختارهای FCC است [۱۰]. جهت روبش پرتو لیزری منشأ بافت Goss و نتیجه انجماد دندریتهی ترجیحی <۱۰۰> جهت‌گیری شده توسط جریان حرارتی ناشی از لیزر است و اثر ترکیبی توان لیزر، جذب پودر و سرعت اسکن لیزری است.



تصویر ۶. تصاویر قطبی (۱۰۰)، (۱۱۰) و (۱۱۱) برای پوشش اینکونل ۶۲۵ از وسط سطح مقطع نمونه ساخت افزایشی با الگوی یک‌جهت.



مراجع:

۱. ک. زنگنه‌مدار، مقدمه‌ای بر فلزات و آلیاژهای هوایی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، بهار ۱۳۷۸.
2. Francis, A., Thirugnanasambantham, K. G., Ramesh, R., Roshan, M. V., & Kumar, M. P. U. (2022). High-temperature erosion and its mechanisms of IN-738 super alloy under hot air jet conditions. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-7.
3. Zandifar, A., Amirjan, M., & Parvin, N. (2022). Preparation and Characterization of Nickel-Based Brazing Powder and Paste for Wide Gap Repair on IN738 Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-10.4. Amirjan, M., & Khodabandeh, M. (2021). Direct metal deposition of IN625 on IN738LC superalloy: microstructure and crack analysis. *Applied Physics A*, 127, 1-10.5. Zhou, W., Tian, Y., Tan, Q., Qiao, S., Luo, H., Zhu, G., & Sun, B. (2022). Effect of carbon content on the microstructure, tensile properties and cracking susceptibility of IN738 superalloy processed by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 58, 103016.6. Doroudi, A., Dastgheib, A., & Omidvar, H. (2020). The bonding temperature effect of the diffusion brazing Inconel 625 superalloy on the microstructure changes, corrosion resistance, and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 53, 213-222.
۷. ر. شجاع رضوی، ساخت افزایشی با رسوب نشانی مستقیم لیزری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۸.
8. Vemanaboina, H., Gundabattini, E., Akella, S., Rao, A. U. M., Buddu, R. K., Ferro, P., & Berto, F. (2021). Mechanical and Metallurgical Properties of CO2 Laser Beam INCONEL 625 Welded Joints. *Applied Sciences*, 11(15), 7002.
9. Cieslak, M. J., Headley, T. J., & Frank, R. B. (1989). The welding metallurgy of custom age 625 PLUS alloy. *Welding Journal*, 68(12), 473-482.
10. Dinda, G. P., A. K. Dasgupta, and J. Mazumder. "Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability." *Materials Science and Engineering: A* 509.1-2 (2009): 98-104.
11. Cao, Y., Farouk, N., Taheri, M., Yumashev, A. V., Bozorg, S. F. K., & Ojo, O. O. (2021). Evolution of solidification and microstructure in laser-clad IN625 superalloy powder on GTD-111 superalloy. *Surface and Coatings Technology*, 412, 127010.
12. Biroasca, S., Di Gioacchino, F., Stekovic, S., & Hardy, M. (2014). A quantitative approach to study the effect of local texture and heterogeneous plastic strain on the deformation micromechanism in RR1000 nickel-based superalloy. *Acta materialia*, 74, 110-124.13. Pang, K., & Wang, D. (2020). Study on the performances of the drilling process of nickel-based superalloy Inconel 718 with differently micro-textured drilling tools. *International Journal of Mechanical Sciences*, 180, 105658.14. Ma, D., Stoica, A. D., Wang, Z., & Beese, A. M. (2017). Crystallographic texture in an additively manufactured nickel-base superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, 684, 47-53.15. Fang, X. Y., Li, H. Q., Wang, M., Li, C., & Guo, Y. B. (2018). Characterization of texture and grain boundary character distributions of selective laser melted Inconel 625 alloy. *Materials Characterization*, 143, 182-190.16. Chen, C., Wu, H. C., & Chiang, M. F. (2008). Laser cladding in repair of IN738 turbine blades. *International Heat Treatment and Surface Engineering*, 2(3-4), 140-146.
17. Kermani, F., Shoja-Razavi, R., Zangenemadar, K., Borhani, M., & Gavahian, M. (2023). An investigation into the effect of scanning pattern and heat treatment on the mechanical properties of Inconel 718 in the direct metal deposition process. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 4743-4755.
18. Yu, Ting. (2021). Research on Metallographic Examination of Thermal Spraying Coatings. *Journal of Physics: Conference Series*.
19. ISO 6892-1, Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature 2019.
20. Flemings, Merton C. "Solidification processing." *Metallurgical and Materials Transactions B* 5.10 (1974): 2121-2134.