

## ارزیابی تأثیر الگوی روبش بر بافت انجمادی اینکونل ۶۲۵

### در فرایند رسوب‌نشانی مستقیم لیزری

محمد رضا برهانی، محمد رجبی، روح الله جماعتی

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مواد و صنایع

سید رضا شجاع‌رضوی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۲ - پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۲۲)

#### چکیده

تیغه‌های توربین به همراه بافت کنترل‌شده مانند سازه‌های کریستالی جهت‌دار و تک کریستال قابلیت انعطاف‌پذیری و عمر طولانی‌تر و خستگی حرارتی را بهبود می‌بخشد. هدف از انجام این پروژه بررسی بافت نمونه اینکونل ۶۲۵ تولیدشده توسط روش رسوب‌نشانی مستقیم لیزری با الگوهای مختلف حرکتی می‌باشد. در این پژوهش بافت کریستالی نمونه تولید شده با استفاده از سه الگوی یک‌جهت، رفت و برگشتی و دایره‌ای روی زیرلایه هم‌جنس انجام شده است. برای بررسی بافت نمونه از تصاویر قطبی و تابع توزیع جهت‌گیری استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد مولفه اصلی بافت در الگوی رفت و برگشتی مولفه‌ی گوس و برنج، در الگوی یک جهت مولفه‌ی گوس و در الگوی دایره‌ای مولفه‌ی گوس چرخیده و مکعبی چرخیده می‌باشد. توزیع عدم تطابق مرزخانه‌ها برای هر سه الگوی حرکتی عمدتاً بالای ۳۰ درجه می‌باشد. شدت بافت جهت  $< 100 >$  در الگوهای یک‌جهت و دایره‌ای نسبت به سایر جهات بالاتر می‌باشد و این اختلاف در الگوی دایره‌ای افزایش می‌یابد. با توجه به تصاویر قطبی شدت بافت به ترتیب ۱/۵ برابر، ۱/۴ برابر و ۱/۳ برابر راندوم برای الگوهای دایره‌ای، یک‌جهت و رفت و برگشتی می‌باشد؛ در نتیجه الگوی دایره‌ای بیشترین شدت بافت در بین نمونه‌ها را دارا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: انجماد جهت‌دار لیزری، سویرآلیاز اینکونل ۶۲۵، الگوی روبش.

## Evaluation of the effect of the scanning pattern on the texture of Inconel 625 in the direct laser deposition process

Mohammad Reza Borhani, Mohammad Rajabi, Roohollah Jamaati

Department of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol.

Seyed Reza Shoja Razavi

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

(Received 12 June 2022, accepted 13 September 2022)

#### Abstract

Turbine blades with controlled textures such as single-crystal and oriented crystalline structures improve flexibility, lifetime, and thermal fatigue. This research project investigates the texture of an Inconel 625 sample produced by direct laser deposition with different motion patterns. In this study, the crystalline structure of Inconel 625 was produced by additive manufacturing on the homogenous substrate using three patterns: unidirectional, reciprocating, and circular. Polfigure images and the orientation distribution function were used to examine the sample texture. According to the results, the main texture component in the reciprocating, unidirectional, and circular patterns was Goss and brass; Goss; and rotated Goss and rotated cub, respectively. The distribution of grain boundary mismatch for all three motion patterns was over 30°. The texture intensity of direction  $< 100 >$  is higher in unidirectional and circular patterns than other directions, and this difference increases in circular patterns. According to the Polfigures images, the texture intensity for the circular, unidirectional, and reciprocating patterns was 1.5, 1.4, and 1.3 times random. As a result, the circular pattern showed the highest texture intensity among the samples.

**Keywords:** Laser directional solidification, Inconel 625, Scanning pattern.

**E-mail of Corresponding author:** m.rajabi@nit.ac.ir

## مقدمه

حوضچه (بردار عمود بر کف حوضچه) می‌باشد. البته عوامل دیگری نیز بر پارامترهای انجماد مؤثر هستند. به عنوان مثال، مشخص شده که شیب حرارتی در فرایندهای لایه‌نشانی لیزری با روبش یک‌طرفه، بیشتر از فرایندهای دوطرفه یا رفت و برگشت می‌باشد [۵].

یوان و همکاران [۶] در خصوص پارامترهای انجماد لیزری سوپرآلیاژ اینکونل ۶۲۵ مطالعاتی را انجام داده‌اند. آنها به کمک برخی اطلاعات مربوط به این آلیاژ مطابق جدول ۱ پارامترهای انجماد لیزری را تجزیه و تحلیل نموده‌اند. در جدول ۲ پارامترهای فرایند به همراه نتایج مربوط به مشاهدات میکروسکوپی و فواصل بین بازوهای دندردیتی ثانویه ارائه شده است.

جدول ۱. اطلاعات آلیاژ اینکونل، مورد نیاز برای

شبیه‌سازی انجماد لیزری [۶]

پارامتر	واحد	مقدار
چگالی	g/cm <sup>3</sup>	۸/۴
گرمای ویژه	J/Kg°C	۶۰۰
دمای پایان انجماد T <sub>sol</sub>	°C	۱۲۹۰
دمای مایع T <sub>liq</sub>	°C	۱۳۵۰
انتشار حرارتی	m <sup>2</sup> /s	۴/۹۴*۱۰ <sup>۶</sup>
ضریب جذب لیزر	-	۰/۳۳
شعاع پرتو لیزر	mm	۰/۰۵
دمای صفحه ساخت	°C	۲۵

جدول ۲. پارامترهای فرایند لایه‌نشانی لیزری

مورد نیاز برای شبیه‌سازی انجماد لیزری [۶]

توان (W)	سرعت روبش (mm/s)	نرخ سرشدن (K/s)	G/R	فاصله بازوی ثانویه (μm)
۷۵	۱۰۰	۱/۰۲*۱۰ <sup>۶</sup>	۶/۶۶*۱۰ <sup>۲۶</sup>	۶۸±۰/۰۷
۷۵	۵۰۰	۵/۴۷*۱۰ <sup>۶</sup>	۲/۴۳*۱۰ <sup>۲۷</sup>	۳۸±۰/۰۶

در جدول ۲، برای شرایطی که سرعت روبش بالاتر است (۵۰۰)، نرخ سرمایش بیشتر (۵/۴۷\*۱۰<sup>۶</sup>) و نیز نسبت G<sub>H</sub>/v بالاتر (۲/۴۳\*۱۰<sup>۲۷</sup>) ثبت شده که نشان می‌دهد در

اینکونل ۶۲۵ یک آلیاژ رسوب‌سخت‌شونده حاوی عناصری همچون Fe، Mo و Cr می‌باشد و به خاطر ترکیب شیمیایی منحصر به فرد از خواص مکانیکی، خزشی و خوردگی در دماهای بالا برخوردار است و از همین رو به‌طور گسترده در صنایع مختلفی همچون هوایی، هوافضا، شیمیایی و نفت و گاز استفاده می‌شوند. از دیگر مزایای اینکونل ۶۲۵، قابلیت جوش منحصر به فرد آن و پایداری ساختار بلورین اینکونل ۶۲۵ در دمای بالا و حفظ دانه‌بندی پس از ذوب مجدد است [۱-۲]. رسوب‌نشانی مستقیم لیزری از روش‌های در حال توسعه جهت ساخت و بازسازی قطعات می‌باشد. در این روش پودر فلزی هم‌زمان با تابش پرتو لیزر تزریق می‌شود و ساخت افزایشی انجام می‌شود. ساختار انجمادی در تعیین خواص مکانیکی نهایی نقش مهمی دارد. واکنش لیزر پرانرژی باعث ذوب سریع می‌شود. فرایندهای روکش‌کاری لیزری اساساً سرعت‌های گرمایش و سرمایش بالا به‌خصوص در فصل مشترک جامد-مذاب تا حد ۱۰۸ کلوین بر ثانیه را دارند؛ بنابراین، به سبب زمان ناکافی تشکیل و رشد دانه، اساساً انتظار می‌رود ساختار دانه‌ریز ایجاد شود [۳-۴].

با توجه به ارتباط تنگاتنگ R و G با پارامترهای فرایندهای مبتنی بر لیزر، برخی از محققین روابطی را ارائه کرده‌اند که از طریق آنها می‌توان پارامترهای انجماد را به راحتی بدست آورد. به عنوان نمونه رابطه ۱ آورده شده است [۵]:

$$G/R = 2\pi K(T-T_0)^2 / \eta P v \cos\theta \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه، G شیب حرارتی، R نرخ انجماد، P توان لیزر، v سرعت روبش، T دمای حوضچه مذاب، T<sub>0</sub> دمای زیرلایه، η ضریب جذب لیزر، K ضریب هدایت حرارتی ماده و θ زاویه بین جهت روبش و جهت انجماد مذاب

در تحقیق دیگری که توسط ما<sup>۶</sup> و همکاران [۹] انجام شد، ساخت آلیاژ اینکونل ۶۲۵ با استفاده از فرایند رسوب‌نشانی مستقیم لیزری و مورد بررسی قرار گرفت. بافت نمونه توسط تصاویر قطبی (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۲) مشخص شد. نتایج نشان می‌دهد شدت مؤلفه‌های بافت به سمت داخل نمونه کاهش پیدا کرده است. مؤلفه بافت گوس<sup>۷</sup> مؤلفه اصلی در نمونه‌ها می‌باشد. این محققان اعلام کردند که رشد شاخه‌های دندریتی در جهت <۱۰۰> عامل اصلی تشکیل مؤلفه گوس می‌باشد و عامل اصلی در کاهش این مؤلفه با حرکت به سمت داخل نمونه، کاهش نرخ انتقال حرارت بیان شده است [۹].

همان‌طور که عنوان شد قطعات مورد استفاده در موتور جت‌ها و توربین‌های هوایی عموماً از جنس سوپرآلیاژهای پایه نیکل می‌باشند. آلیاژهای مورد استفاده در اجزاء داغ توربین، به دلیل وجود نمک‌های خورنده، پیوسته در معرض آسیب‌هایی نظیر خوردگی داغ، اکسیداسیون دمای بالا و فرسایش قرار می‌گیرند. از این رو ترمیم هرچه سریع‌تر و بهتر قطعات خورده شده به منظور جلوگیری از به‌وجود آمدن آسیب‌های جدی در قطعات حساس هواپیماها ضروری به نظر می‌رسد [۱۰-۱۲]. در این راستا روکش‌کاری لیزری باهدف دستیابی به ساختار انجمادی جهت‌دار و دارای تطابق بالا با جهت انجمادی زیرلایه پره در ناحیه تعمیراتی همچنین کنترل بافت اهمیت بالایی دارد. علاوه بر این حفظ و مشابهت خواص مکانیکی زیرلایه با ناحیه ترمیم شده نیز الزامی است. این‌گونه ترمیم قطعات با دقت ابعادی بالا تنها از طریق روش‌های ساخت افزایشی قابل انجام است. در این‌گونه فرایندها می‌توان قطعات فلزی را با دقت ابعادی و درصد تخلخل کم تولید و یا ترمیم نمود. لذا هدف اصلی این تحقیق کنترل رسوب‌نشانی لیزری سوپرآلیاژهای پایه نیکل می‌باشد به‌نحوی که در نهایت بافت ناحیه ترمیم شده

این شرایط، طی انجماد حوضچه مذاب، امکان ایجاد ساختار دندریتی ظریف‌تر (با فاصله دندریتی کوچکتر) و در نتیجه امکان دستیابی به ساختار کاملاً ستونی (بدون تبدیل به ساختار هم محور) بیشتر خواهد بود. ریزساختارهای حاصل از نتایج آزمایشگاهی نیز این موضوع را تایید می‌کنند.

دیندا و همکاران [۷] تغییرات بافت در نمونه اینکونل ۶۲۵ تولید شده از روش رسوب‌نشانی مستقیم لیزری را مورد بررسی قرار دادند. الگوی حرکت پرتو لیزری به صورت رفت و برگشتی در نظر گرفته شد. با توجه به آنالیز پراش الکترون‌های بازگشتی<sup>۱</sup> (EBSD) و تصویر قطبی<sup>۲</sup> در جهت (۱۰۰) تغییرات اندازه دانه‌ها در ساختار زیاد است و دانه‌هایی با ابعاد ریز و درشت در ساختار تشکیل شده‌اند. همچنین ساختار زیگزاگی به علت سیستم رفت و برگشتی تولید شده است. به‌طور کلی مشخص شده که سریع‌ترین جهت انجماد در ساختارهای مکعبی و جوه پر<sup>۳</sup> (FCC) جهت <۱۰۰> می‌باشد. تصویر قطبی نشان می‌دهد که در این حالت بافت مکعبی<sup>۴</sup> تشکیل شده است. محققان 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 بافت معرفی کرده‌اند [۷].

در تحقیقی که توسط ابیوی<sup>۵</sup> و همکارانش [۸] انجام شد اثر نرخ ورودی ماده اولیه، سرعت حرکت و توان لیزر بر خواص اینکونل ۶۲۵ بررسی شد. در این پژوهش با افزایش سرعت ورود ماده اولیه رفتاری متفاوت از دو پارامتر دیگر دارد. با افزایش سرعت حرکت و توان لیزر، زاویه تماس سطحی کاهش پیدا می‌کند و نرخ انحلال افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش نرخ ماده ورودی زاویه تماس افزایش و نرخ انحلال کاهش می‌یابد.

<sup>1</sup> Electron Backscatter Diffraction

<sup>2</sup> Pole figure

<sup>3</sup> Face-Centered Cubic

<sup>4</sup> Cube

<sup>5</sup> Abioye

<sup>6</sup> Ma  
<sup>7</sup> Goss

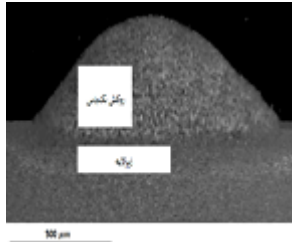
پرتو ایکس مجهز به زاویه‌یاب<sup>۴</sup> بافت نمونه‌ها محاسبه شد. شد برای این منظور از تصاویر قطبی استفاده گردید. اساس کار بدین صورت است که تیوب پرتو ایکس در زاویه صفحه مورد نظر ثابت می‌شود و نمونه حول محورهای افقی و عمود بر صفحه می‌چرخد تا دستگاه شدت تمام صفحاتی را ثبت نماید. پس از اتمام آزمایش دستگاه فایل داده‌ای را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. برای استخراج کامل داده‌های بافت چهار تصویر قطبی تهیه شد که شامل (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۳۱۱) می‌باشند. پس از انجام آنالیز بافت با استفاده از نرم‌افزار TexTools داده‌های مختلف از جمله تابع توزیع جهت‌گیری<sup>۵</sup> (ODF)، تصاویر قطبی، تصاویر قطبی معکوس و توزیع عدم تطابق مرزانه‌ها<sup>۶</sup> برای تمامی نمونه‌ها استخراج شد [۱۶-۱۸].

جدول ۳. آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پودر و زیرلایه

Mo	Nb	Cr	Fe	Ni	عناصر	زیرلایه
۸/۸	۳/۵	۲۲/۴	۲	پایه	درصد	
دیگر	Ti	Mn	Si	Al	وزنی	
۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۵	۰/۸		
Mo	Nb	Cr	Fe	Ni	عناصر	پودر
۷/۵	۲/۹	۲۲/۲	۴/۵	پایه	درصد	
دیگر	Ti	Mn	Si	Al	وزنی	
۰/۲	۰/۲	۰/۴	۰/۵	-		

جدول ۴. خصوصیات هندسی روکش تک‌پاس

اینکونل ۶۲۵ روی زیرلایه هم‌جنس

	ارتفاع روکش	۳۸۰ μm
	عرض روکش	۱۲۵۰ μm
	آمیختگی هندسی	۱۰ درصد

تطابق مطلوبی با زیرلایه داشته باشد. علاوه بر این الگوهای روبش و پارامترهای فرایندی می‌توانند بر خواص و ریزساختار نمونه‌های تولید شده در این فرایند تأثیرگذار باشند. این موضوع در نهایت بر همسان‌سازی رفتار مکانیکی نواحی تعمیر شده با زیرلایه کمک خواهد نمود.

### مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، پودر اینکونل ۶۲۵ اتمیزاسیون گازی تولیدشده توسط شرکت هورای<sup>۱</sup> با توزیع اندازه دانه ۶۰ الی ۹۰ میکرومتر مطابق شکل ۱ با فرایند روکش‌کاری لیزری روی زیرلایه آلیاژ اینکونل ۶۲۵ رسوب داده شده است. در این پژوهش از دستگاه رسوب‌نشانی مستقیم لیزری<sup>۲</sup> مجهز به لیزر فیبری پیوسته با حداکثر توان یک کیلووات برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. نتایج طیف‌سنجی تفکیک انرژی<sup>۳</sup> پودر و زیرلایه در جدول ۳ آمده است. برای آماده‌سازی زیرلایه قرصی شکل با ضخامت ۵ میلی‌متر تا سناده ۸۰۰، تحت عملیات سناده-زنی قرار گرفت. جهت نمونه‌سازی از توان لیزر ۲۲۵ وات، نرخ روبش ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه و نرخ تغذیه پودر ۱۵۰ میلی‌گرم بر ثانیه با همپوشانی عرضی ۴۵ درصد و سه الگوی حرکتی یک‌جهت، رفت و برگشتی و دایره‌ای استفاده شده است [۱۳-۱۵]. مشخصات هندسی تک‌پاس در جدول ۴ و تصویر همپوشانی در شکل ۲ آورده شده است. به منظور بررسی بافت نمونه‌های تولید شده پس از آماده‌سازی، برش و مانع گرم آنها در مقطع جهت ساخت-جهت عمود بر ساخت، عملیات پولیش نمونه‌ها با استفاده از پارچه پولیش و محلول آلومینا و در نهایت الکتروپولیش با استفاده از محلولی شامل ۳۰ درصد اسید پرکلریک، ۶۰ درصد اسید استیک و ۱۰ درصد آب دیونیزه، تحت ولتاژ ۷ ولت، جریان ۱/۷ آمپر و دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. با استفاده از دستگاه پراش

<sup>۴</sup> Goniometer

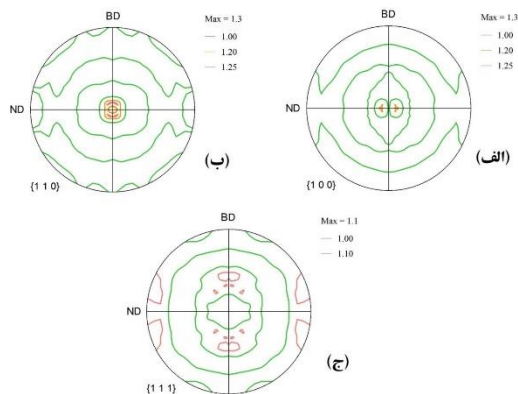
<sup>۵</sup> Orientation Distribution Function

<sup>۶</sup> Grain boundary misorientation

<sup>۱</sup> Huarui

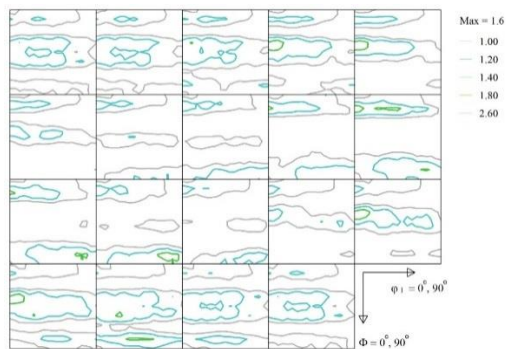
<sup>۲</sup> MUT-DLD-C5

<sup>۳</sup> Energy Dispersive Spectroscopy



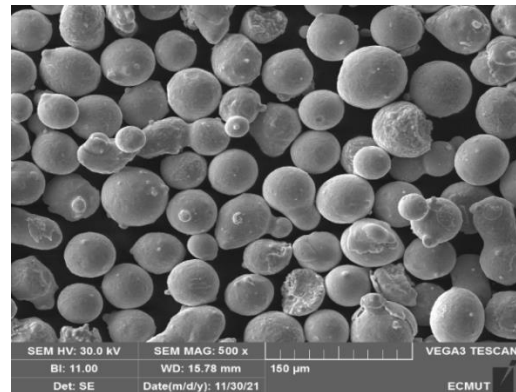
شکل ۳. تصاویر قطبی (۱۰۰)، (۱۱۰) و (۱۱۱) برای نمونه اینکونل ۶۲۵ با الگوی رفت و برگشتی.

شکل ۴ نیز تابع توزیع جهت‌گیری را برای این نمونه نشان می‌دهد. در این تصویر می‌توان مؤلفه‌های بافت را با دقت خوبی شناسایی کرد. با توجه به زوایای اویلر می‌توان دید که مؤلفه‌های گوس و برنج از مؤلفه‌های اصلی بافت این نمونه هستند. همچنین مؤلفه G/B(T) نیز در این تصویر قابل مشاهده است. البته مؤلفه ضعیفی از بافت مکعبی چرخیده نیز قابل مشاهده است که به علت شدت پایین قابل چشم‌پوشی است.

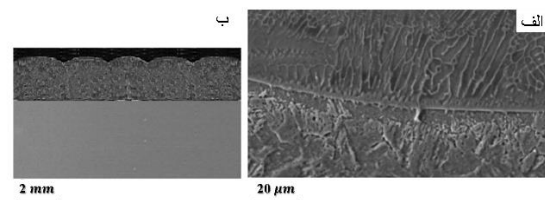


شکل ۴. توابع توزیع جهت‌گیری برای نمونه اینکونل ۶۲۵ با الگوی رفت و برگشتی.

استفاده از تصاویر قطبی معکوس می‌تواند در تعیین رشته‌های ایجادشده در ساختار کمک‌کننده باشد. تصاویر قطبی معکوس متناسب با جهات مختلف قطعه (BD: جهت ساخت، ND: جهت نرمال یا عمود و TD: جهت



شکل ۱. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از پودر اینکونل ۶۲۵ مورد استفاده در این پژوهش.

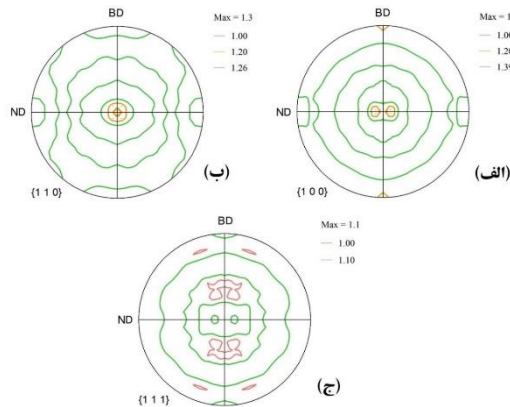


شکل ۲. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع عرضی پوشش اینکونل ۶۲۵ با هم‌پوشانی ۴۵ درصد: (الف) تصویر ریزساختار در نزدیک فصل مشترک و (ب) مقطع کلی.

## نتایج و بحث

نتایج حاصل از بررسی بافت نمونه‌های اینکونل ۶۲۵ تولیدشده از سه الگوی متفاوت استخراج و مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه اطلاعات کامل مربوط به هر یک از این نمونه‌ها با توضیحات مختصری ارائه شده است و در انتها نیز تغییرات در سه حالت تولیدشده مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شکل ۳ تصاویر قطبی (۱۰۰)، (۱۱۰) و (۱۱۱) را برای نمونه با الگوی رفت و برگشتی نشان می‌دهد. با توجه به هر سه تصویر قطبی می‌توان حضور مؤلفه‌های بافت گوس و برنج را در این شکل‌ها دید؛ نکته قابل توجه در این تصاویر شدت حداکثر مقدار مؤلفه یافت است که به ۱/۳ برابر حالت راندوم می‌رسد.

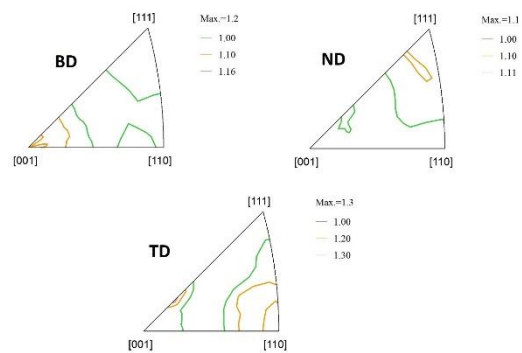
شکل ۷ تصاویر قطبی (۱۰۰)، (۱۱۰) و (۱۱۱) را برای نمونه با الگوی یک‌جهت را نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر قطبی می‌توان حضور مؤلفه‌های بافت گوس به‌عنوان بافت اصلی و مؤلفه‌های ضعیفی از بافت مکعبی چرخیده و برنج را در این شکل‌ها مشاهده نمود.



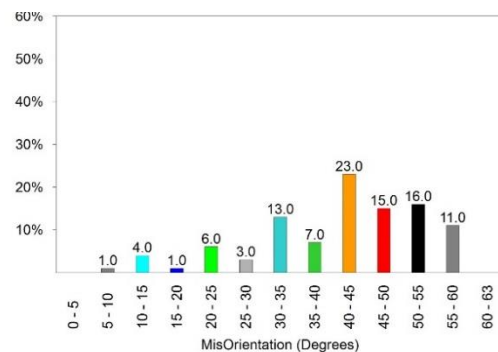
شکل ۷. تصاویر قطبی (۱۰۰)، (۱۱۰) و (۱۱۱) برای نمونه اینکونل ۶۲۵ با الگوی یک‌جهت.

شکل ۸ نیز تابع توزیع جهت‌گیری را برای نمونه اینکونل ۶۲۵ نشان می‌دهد. در این تصویر می‌توان مؤلفه‌های بافت را با دقت خوبی شناسایی کرد. با توجه به زوایای اوایلر می‌توان دید که مؤلفه‌های گوس و G/B(T) از مؤلفه‌های اصلی بافت این نمونه هستند که شدت بالای ۱/۴ برابر حالت راندوم از خود نشان داده‌اند. همچنین مؤلفه‌های ضعیف برنج، مکعبی چرخیده و مکعبی نیز در این تصویر قابل مشاهده است. البته این مؤلفه‌ها به علت شدت پایین قابل چشم‌پوشی هستند اما برای مقایسه با سایر نمونه‌ها در صورت تغییر در شدت آنها قابل بررسی هستند. همان‌طور که گفته شد استفاده از تصاویر قطبی معکوس می‌تواند در تعیین رشته‌های ایجاد شده در ساختار کمک‌کننده باشد. تصاویر قطبی معکوس متناسب با جهات مختلف در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به این شکل می‌توان دید که جهات <۱۰۰> با شدت حدود ۱/۲ برابر حالت راندوم موازی با جهت ساخت قرار دارند که مانند نمونه با الگوی رفت و برگشتی با شدت کمی بیشتر است

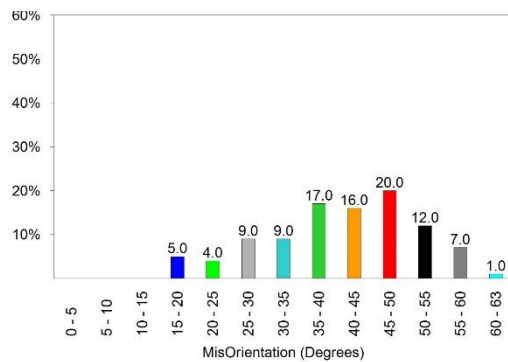
عرضی نسبت به جهت ساخت) در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به این شکل می‌توان دید که جهات <۱۰۰> با شدت حدود ۱/۱۵ برابر حالت راندوم موازی با جهت ساخت قرار دارند. به‌طور کلی مشخص شده است که سریع‌ترین جهت انجماد در ساختارهای FCC جهت <۱۰۰> می‌باشد. همچنین جهت <۱۱۰> با شدت ۱/۱ موازی جهت نرمال و جهات <۱۱۱> با شدت ۱/۳ موازی با جهت عرضی قرار گرفته‌اند. شکل ۶ نیز توزیع عدم تطابق مرزخانه‌ها را برای نمونه اینکونل ۶۲۵ با الگوی رفت و برگشتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود حدود ۶ درصد از مرزخانه‌ها عدم تطابق زیر ۱۵ درجه دارند و درصد بالایی در حدود ۸۵ درصد مرزخانه‌ها عدم تطابق بالای ۳۰ درجه دارند. نتایج ارائه شده در ادامه با دو نمونه اینکونل ۶۲۵ دیگر مقایسه می‌شوند که با انجام این مقایسه می‌توان برداشت‌های بهتری از نتایج ارائه نمود.



شکل ۵. تصاویر قطبی معکوس برای نمونه اینکونل ۶۲۵ با الگوی رفت و برگشتی.



شکل ۶. توزیع عدم تطابق مرزخانه‌ها با الگوی رفت و برگشتی.

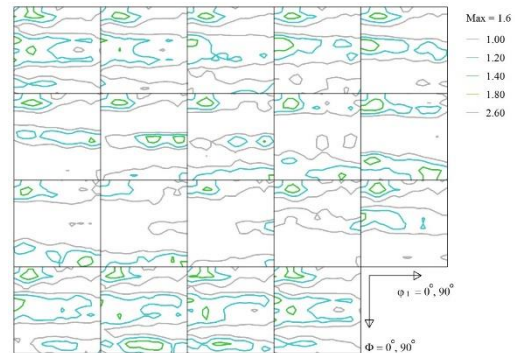


شکل ۱۰. توزیع عدم تطابق مرزدانه‌ها برای نمونه اینکونل ۶۲۵ با الگوی یک‌جهت.

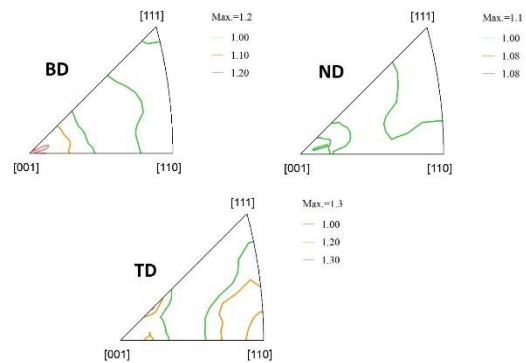
شکل ۱۱ نیز تصاویر قطبی (۱۰۰)، (۱۱۰) و (۱۱۱) را برای نمونه با الگوی دایره‌ای نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر قطبی می‌توان گفت که مؤلفه‌های بافت گوس چرخیده و مکعبی چرخیده مؤلفه‌های اصلی بافت این نمونه هستند. هرچند در این نمونه نیز مؤلفه‌های ضعیفی از بافت مکعبی و برنج وجود دارند. نکته قابل توجه این‌که در این نمونه شدت مؤلفه‌های بافت کمی قوی‌تر از دو نمونه قبل است.

مؤلفه‌های بافت در تصاویر قطبی کمی پیچیده است و محل‌های با شدت بالا می‌تواند به چند مؤلفه مربوط باشد بنابراین توابع توزیع جهت‌گیری برای این نمونه نیز مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۱۲ ارائه شده است. با توجه در این شکل می‌تواند دید که این نمونه دارای سه مؤلفه اصلی بافت می‌باشد که شامل بافت گوس چرخیده و مکعبی چرخیده است. شدت این مؤلفه‌ها در حد مناسبی قرار دارد و به ترتیب حدود ۱/۵، ۱/۲ و ۱/۵ هستند. همچنین در این تصویر می‌توان مؤلفه‌های ضعیفی از بافت مکعبی و G/B(T) نیز مشاهده نمود که قابل چشم‌پوشی هستند.

و جهات  $\langle 111 \rangle$  با شدت ۱/۳ موازی با جهت عرضی قرار گرفته‌اند. همچنین مشاهده می‌شود که جهت خاصی با شدت قابل توجه موازی با جهت نرمال قرار نگرفته است.



شکل ۸. توابع توزیع جهت‌گیری برای نمونه اینکونل ۶۲۵ با الگوی یک‌جهت.

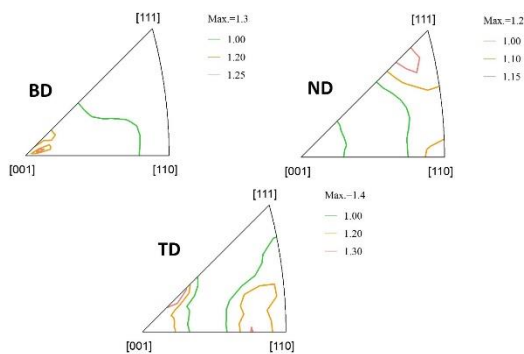


شکل ۹. تصاویر قطبی معکوس برای نمونه اینکونل ۶۲۵ با الگوی یک‌جهت.

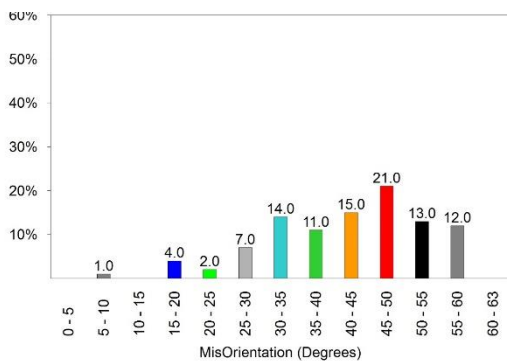
شکل ۱۰ توزیع عدم تطابق مرزدانه‌ها را برای نمونه اینکونل ۶۲۵ با الگوی یک‌جهت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نسبت مرزدانه‌های با عدم تطابق پایین و کمتر از ۱۵ درجه در این نمونه ناچیز است و در اینجا نیز درصد بالایی (در حدود ۸۲ درصد مرزدانه‌ها) عدم تطابق بالای ۳۰ درجه دارند.



بررسی عدم تطابق مرزدانه در این نمونه نیز نتایج تقریباً مشابهی داشت. شکل ۱۴ توزیع عدم تطابق مرزدانه‌ها را برای این نمونه نشان می‌دهد که مشاهده می‌شود باز هم درصد ناچیزی از مرزدانه‌ها عدم تطابق زیر ۱۵ درصد دارند و عمده مرزدانه‌ها (حدود ۸۶ درصد) عدم تطابق بالای ۳۰ درجه دارند.

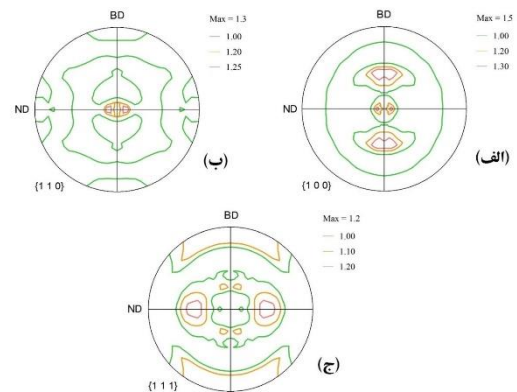


شکل ۱۳. تصاویر قطبی معکوس برای نمونه اینکونل ۶۲۵ با الگوی دایره‌ای.

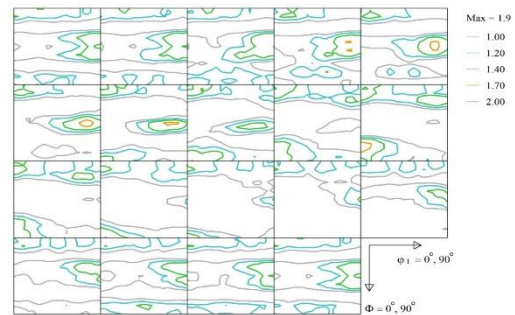


شکل ۱۴. توزیع عدم تطابق مرزدانه‌ها برای نمونه اینکونل ۶۲۵ با الگوی دایره‌ای.

در تحقیقات مشابه [۷،۹،۱۶،۱۹] نیز به بهبود بافت در اثر تغییر الگو از الگوی رفت و برگشتی به الگوی یک‌جهت اشاره شده‌است. در بحث حاضر و مقالات اشاره‌شده اکثر دانه‌ها در امتداد جهت <۱۰۰> قرار دارد. در این تحقیقات فرض بر این است که منشأ بافت گوس نتیجه انجماد دندریتی ترجیحی <۱۰۰> است که توسط جریان حرارتی ناشی از لیزر ایجاد می‌شود و تحت تأثیر اثر



شکل ۱۱. تصاویر قطبی (۱۰۰)، (۱۱۰) و (۱۱۱) برای نمونه اینکونل ۶۲۵ با الگوی دایره‌ای.



شکل ۱۲. توابع توزیع جهت‌گیری برای نمونه اینکونل ۶۲۵ با الگوی دایره‌ای.

جهت بررسی بهتر بافت و تعیین رشته‌های ایجاد شده در ساختار تصاویر قطبی معکوس برای این نمونه نیز مورد بررسی قرار گرفتند. تصاویر قطبی معکوس متناسب با جهات مختلف قطعه در شکل ۱۳ ارائه شده‌است. با توجه به این شکل می‌توان دید که مانند دو نمونه قبلی اما با شدت کمی بیشتر جهات <۱۰۰> موازی با جهت ساخت قرار دارند که شدتی حدود ۱/۲۵ از خود نشان داده‌است. همچنین جهت <۱۱۰> با شدت ۱/۱۵ و <۱۱۰> با شدت ۱/۱ موازی جهت نرمال قرار گرفته‌اند. باید اضافه کرد که جهات <۱۱۱> با شدت حدود ۱/۴ و جهات <۱۱۰> با شدت ۱/۳ موازی با جهت عرضی قرار گرفته‌اند. نکته قابل ذکر اینکه در اینجا نیز رشته‌های تشکیل شده تقریباً مشابه دو نمونه قبلی است اما شدت آن بیشتر است.



حالت رفت و برگشتی جهات با اختلاف زاویه ۱۸۰ درجه‌ای باعث کاهش شدت این مؤلفه شده است.  
۵. 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.

۶. در بررسی‌های انجام شده مشخص شد که حالت رفت و برگشتی ضعیف‌ترین شدت بافت و حالت دایره‌ای قوی‌ترین شدت بافت را از خود نشان داده است.

#### مراجع

1. Liu, Xudong, et al. *High-temperature tensile and creep behaviour of Inconel 625 superalloy sheet and its associated deformation-failure micromechanisms*, *Materials Science and Engineering: A* 829 (2022): 142152.
2. Shankar, Vani, K. Bhanu Sankara Rao, and S. L. Mannan. *Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy*, *Journal of nuclear materials* 288.2-3 (2001): 222-232.
۳. شجاع رضوی، س.ر.، «روکش‌کاری لیزری»، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۵.
۴. شجاع رضوی، س.ر. و همکاران، «ساخت افزایشی با رسوب‌نشانی مستقیم لیزری»، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر ۱۳۹۸.
5. Amine, Tarak, Joseph W. Newkirk, and Frank Liou. *An investigation of the effect of direct metal deposition parameters on the characteristics of the deposited layers*, *Case Studies in Thermal Engineering* 3 (2014): 21-34.
6. Yuan, L., et al. *Columnar-to-equiaxed transition in a laser scan for metal additive manufacturing*, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 861. No. 1. IOP Publishing, 2020.
7. Dinda, G. P., A. K. Dasgupta, and J. Mazumder. *Texture control during laser deposition of nickel-based superalloy*, *Scripta Materialia* 67.5 (2012): 503-506.

ترکیبی توان لیزر، جذب پودر و سرعت روبش لیزری قرار می‌گیرد. در این پژوهش با تغییر الگو از یک‌جهت به دایره‌ای شدت بافت در جهت <۱۰۰> افزایش و در سایر جهات نسبت به الگوی یک‌جهت کاهش یافته‌است که به نظر می‌رسد علاوه بر نوع حرکت لیزر، افزایش شدت بافت نیز تحت تأثیر افزایش شیب حرارتی می‌باشد.

#### نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر الگوی روبش بر بافت سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل ۶۲۵ پرداخته شد. با استفاده از تصاویر قطبی، توابع توزیع جهت‌گیری، تصاویر قطبی معکوس و توزیع عدم تطابق مرزدانه‌ها تغییرات بافت نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

۱. تصاویر قطبی و توابع توزیع جهت‌گیری نشان داد که 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 می‌باشد.

۲. بررسی تصاویر قطبی معکوس نشان داد که جهات <۱۰۰> که جهات با حداکثر انتقال حرارت در ساختارهای FCC می‌باشند و علت اصلی در تشکیل مؤلفه‌های بافت هستند بیشتر در جهت روبش و عرضی تشکیل شده‌اند و شدت آن‌ها در نمونه رفت و برگشتی ضعیف‌ترین مقدار را دارد.

۳. نمونه‌هایی که بالاترین شدت مؤلفه بافت را داشته‌اند، یعنی نمونه‌های ساخته شده به روش یک‌جهت و دایره‌ای، درصد بالاتری از مرزدانه‌های با عدم تطابق بالای ۳۰ درجه داشته‌اند.

۴. با توجه به تکرار حرکت در استراتژی یک‌جهته با وجود اینکه دانه‌های ستونی بزرگ تشکیل نشده است اما اینکه جهت تشکیل دانه‌های ستونی در روش یک‌جهته یکسان بوده و باعث بالا رفتن شدت این رشته شده است. اما در

*process.*, Materials Science and Engineering: A 598 (2014): 263-276.

19. Dinda, G. P., A. K. Dasgupta, and J. Mazumder. *Texture control during laser deposition of nickel-based superalloy*, Scripta Materialia 67.5 (2012): 503-506.

8 Abioye, T. E., J. Folkes, and A. T. Clare. *A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition*, Journal of Materials Processing Technology 213.12 (2013): 2145-2151.

9. Ma, Dong, et al, *Crystallographic texture in an additively manufactured nickel-base superalloy*, Materials Science and Engineering: A 684 (2017): 47-53.

10. Choi, J., B. Dutta, and J. Mazumder. *Spatial control of crystal texture by laser DMD process*, MICHIGAN UNIV ANN ARBOR, 2009.

11. Zhao, Rijing, et al., *In situ and ex situ studies of anomalous eutectic formation in undercooled Ni-Sn alloys*, Acta Materialia 197 (2020): 198-211.

12. Ma, Dong, et al., *Crystallographic texture in an additively manufactured nickel-base superalloy*, Materials Science and Engineering: A 684 (2017): 47-53.

13. Wang, Xingcheng, et al., *Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of Inconel 625 Produced Using Direct Laser Metal Deposition*, Physics of Metals and Metallography 122.9 (2021): 896-907.

14. Rashkovets, Mariia, et al., *Microstructure and phase composition of Ni-based alloy obtained by high-speed direct laser deposition*, Journal of Materials Engineering and Performance 27.12 (2018): 6398-6406.

15. Ferreira, André A., et al., *Mechanical and microstructural characterisation of Inconel 625-AISI 431 steel bulk produced by direct laser deposition*, Journal of Materials Processing Technology 306 (2022): 117603.

16. Smith, Derek H., et al., *Microstructure and mechanical behavior of direct metal laser sintered Inconel alloy 718*, Materials Characterization 113 (2016): 1-9.

17. Jamaati, R., et al., *Development of texture during ARB in metal matrix composite*, Materials Science and Technology 28.4 (2012): 406-410.

18. Jamaati, Roohollah, and Mohammad Reza Toroghinejad. *Effect of stacking fault energy on deformation texture development of nanostructured materials produced by the ARB*