



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

شبیه‌سازی عددی ریزساختار انجماد در فرایند ذوب انتخابی بوسیله لیزر و بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر مورفولوژی دانه‌ها

احسان دست‌باز^۱، روح‌اله توکلی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشیار دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۴۵۸۸۸۹۶۹۴، Email: rtavakoli@sharif.edu

چکیده:

در فرآیند ساخت افزایشی فلزات توانایی پیش‌بینی و کنترل ریزساختار، می‌تواند نیاز به عملیات حرارتی متعاقب را کاهش داده و فرآیند کیفیت‌سنجی قطعه ساخته‌شده را سرعت بخشد. توانایی پیش‌بینی و کنترل ریزساختار مواد در روش رسوب‌دهی با لیزر نیاز به درک شرایط حرارتی طی فرایند انجماد دارد. به این منظور، در این تحقیق ارتباط میان نرخ سرد شدن و شیب دما حین انجماد موضعی، و پارامترهای کنترلی فرآیند رسوب‌دهی لیزر مانند توان، شعاع پرتو و سرعت اسکن لیزر، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور در قسمت اول پروژه نرخ سرمایش و شیب حرارتی در خلال انجماد به‌صورت عددی با حل معادله انتقال حرارت مربوطه به کمک روش اجزای محدود محاسبه شد و سپس نتایج حاصل شامل پارامترهای انجمادی ذکر شده روی نقشه انجمادی آلیاژ Ti6-Al4-V جهت پیش‌بینی ریزساختار انجمادی تصویر شد. نتایج این تحقیق نشان داد که تغییرات توان، شعاع و سرعت اسکن پرتو لیزر، بسته به شرایط فرایند می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر روی نرخ سرد شدن و شیب دمایی حین فرآیند انجماد داشته باشد، بطوریکه با کاهش توان، افزایش سرعت اسکن و افزایش شعاع پرتوی لیزر، مورفولوژی دانه‌ها می‌تواند از حالت ستونی به حالت مخلوط (ترکیب ستونی و هم‌محور) و کاملاً هم‌محور تغییر یابد.

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۳

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹

واژه‌های کلیدی:

ساخت افزایشی،
ریزساختار،
ذوب انتخابی با لیزر،
شبیه‌سازی،
انجماد.

ارجاع به این مقاله:

احسان دست‌باز، روح‌الله توکلی، شبیه‌سازی عددی ریزساختار انجماد در فرایند ذوب انتخابی به‌وسیله لیزر و بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر مورفولوژی دانه‌ها، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، زمستان ۱۳۹۸، جلد ۳، شماره ۴، صفحات ۲۲۹-۲۳۶.

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/FRJ.2020.209247.1110

۱- مقدمه

فرایند ساخت افزایشی^۱، تولید یک شیء سه‌بعدی است که از روی هم قرارگرفتن لایه‌لایه مواد انجام شده و اغلب با عناوینی چون چاپ سه‌بعدی، تولید لایه‌ای یا ساخت به شکل آزاد نیز شناخته می‌شود [۱]. همچنین می‌تواند مستقیماً قطعاتی را با اجزاء پیچیده همراه با کاهش هزینه، زمان و تلفات در مواد اولیه تولید کند. برتری اصلی این

تکنولوژی به توانایی ساخت قطعات پیچیده با ساختارهای سبک وزن و جدید از آلیاژهایی با چگالی کم باز است که آن را به یک تکنولوژی سودمند در صنعت هوافضا تبدیل کرده است [۲]. این روش تولید برای فلزات بیشتر در مورد فلزات مهندسی نظیر فولاد، آلومینیم و تیتانیوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های فلزی می‌توان به ذوب انتخابی از طریق لیزر^۲، ذوب از طریق

^۲ Selective laser Melting (SLM)

^۱ Additive Manufacturing

پلی کریستالی در فرآیند SLM استفاده کردند. لویز و همکاران [۸] با استفاده از ترکیب روش اجزاء محدود و روش اتوماتیک سلولی ساختار دانه‌های انجمادی حاصل از جوانه‌زنی و رشد را در فرآیند SLM شبیه‌سازی کردند. شیومی و همکاران [۹] یک شبیه‌سازی اجزاء محدود انجام دادند که توزیع دما را در پودرهای فلزی در معرض یک لیزر پالسی را محاسبه می‌کند و به‌صورت تجربی نتایج محاسبه‌شده را تأیید می‌کند. رابرتز و همکاران [۱۰] حل غیرخطی مربوط به وابستگی به دمای خواص ترموفیزیک یک مدل FEM سه‌بعدی به‌منظور درک تاریخچه حرارتی در طول پردازش لایه‌لایه را ایجاد کردند. بونتا و همکاران [۱۱] حل غیرخطی معادله انتقال حرارت را انجام دادند و با رسم کردن داده‌های انجمادی بر روی نقشه فرآیند انجمادی آلیاژ Ti6-Al4-V مورفولوژی دانه را پیش‌بینی کردند. در این تحقیق سعی بر آن شده که برخلاف بسیاری از پژوهش‌های گذشته با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی به‌جای دوبعدی، علاوه بر اثر توان و سرعت لیزر، اثر شعاع پرتوی لیزر بر ریزساختار به‌عنوان یک فاکتور مهم، بررسی شود. همچنین در این پژوهش به علت تعداد بالای گره‌ها شبیه‌سازی، جهت کاهش هزینه محاسباتی، از یک پاس لیزر استفاده شده است. قابل‌ذکر است در اغلب پژوهش‌های اخیر برای به دست آوردن رفتار کلی پارامترهای فرآیند و اثر آن‌ها بر پارامترهای انجمادی نظیر سرعت پیشروی جبهه انجماد (R) و شیب دمایی (G) از یک پاس حرکت لیزر استفاده شده است (مانند [۱۲]).

از تیتانیم، به‌ویژه آلیاژهای آن به‌عنوان نمونه Ti6-Al4-V، در کاربردهای هوافضا [۱۳]، کاربردهای زیست پزشکی [۱۴-۱۶]، پروتزهای دندان‌پزشکی [۱۷] به خاطر خواص جذاب و ترکیبی مانند وزن کم، نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت در برابر خوردگی یاد می‌شود. از این‌رو به علت کاربرد بالای این آلیاژ، در این تحقیق به بررسی ریزساختاری این آلیاژ پرداخته می‌شود.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از روش شبیه‌سازی اجزاء محدود جهت به دست آوردن پروفیل دمایی و شار حرارتی آلیاژ Ti6-Al4-V در فرآیند SLM استفاده شده و سپس با به دست آوردن داده‌هایی نظیر شیب دمایی و نرخ سرد شدن انجمادی از پروفیل دمایی و رسم کردن آن‌ها بر روی نقشه

پرتوی الکترونی^۱ و رسوبدهی فلزی از طریق لیزر^۲ اشاره کرد [۴،۳]. نحوه تولید قطعه در روش ذوب انتخابی از طریق لیزر درست همانند ذوب انتخابی توسط پرتوی الکترونی^۳ است و تنها تفاوت این دو روش در منبع حرارتی مورد استفاده است، چراکه در EBM از پرتوی الکترونی و در SLM از لیزر استفاده می‌شود [۲]. اغلب ویژگی‌ها در فرآیند ساخت افزایشی مستقیماً به پدیده‌های انتقال همچون انتقال جریان مایع، انتقال حرارت، نفوذ و پدیده‌های متالورژیکی همچون ذوب، انجماد و شکل‌دهی حالت جامد بستگی دارد. همچنین به دلیل درگیری این فرآیند با برخی فعل و انفعالات فیزیکی و تفاوت در شرایط کلی برای روند ساخت هر قطعه، برای به دست آوردن ریزساختار و توانایی کنترل فرآیند، به کشف ارتباط بین ریزساختار و پارامترهای فرآیند نیاز است [۲]. به دلیل برهمکنش‌های پیچیده میان انرژی پرتو، بستر پودر، و تغییر فاز مواد، ساخت افزایشی به روش همجوشی بستر پودری به پارامترهای فرآیند از جمله قدرت پرتو، سرعت اسکن بسیار حساس است. در نتیجه، پنجره فرآیند برای تولید مؤلفه‌هایی در کلاس ASTM بسیار محدود است. از این‌رو کنترل خواص مکانیکی برای محققین همواره یک چالش بوده است. کنترل ریزساختار حاصل از انجماد حین فرآیند ساخت افزایشی فلزات عامل مهمی در جهت صنعتی سازی این تکنولوژی به شمار می‌رود [۵]. استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری به‌عنوان ابزاری قبل از اجرای فرآیند این امکان را فراهم می‌کند که درک صحیحی از فیزیک فرآیند ایجاد شود. روش‌هایی که تاکنون در پژوهش‌ها به کار گرفته شده‌است، بر پایه روش حجم محدود^۴ و روش اجزاء محدود^۵ برای مدل‌سازی حرارتی سیستم است [۶] که در این پژوهش از روش اجزاء محدود استفاده شده‌است. در سال‌های اخیر، پیش‌بینی ریزساختار بر اساس نتایج شبیه‌سازی شده در فرآیند SLM مورد توجه قرار گرفته است. لیو و همکاران [۷] یک روش نیمه تجربی کمی با استفاده از مدل Rosenthal ایجاد کردند و از آن جهت پیش‌بینی رشد دانه‌های ستونی هم‌بافته از صفحات پایه فلزی

^۱ Electron Beam Melting (EBM)

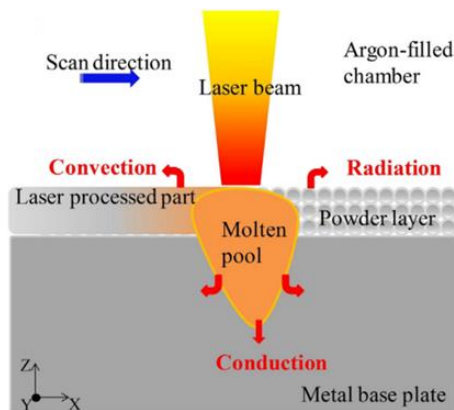
^۲ Laser Metal Deposition (LMD)

^۳ Electron Beam Selective Melting (EBSM)

^۴ Finite Volume Methods (FVM)

^۵ Finite Element Method (FEM)

پودر ($50\mu\text{m}$) در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است به علت کوچک بودن حوضچه مذاب در فرایند ذوب انتخابی توسط لیزر و سرعت سرمایش بالا در این فرایند، جهت ساده شدن مدل، از اثر جدایش عناصر در این پژوهش صرف‌نظر شده است. بررسی تأثیر جدایش می‌تواند در پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۱- شماتیک کلی از فرآیند SLM که ذوب، انجماد، تحولات فازی و برهمکنش بین لیزر و پودر را نشان می‌دهد [۱۲].

۲-۲) خواص ترموفیزیکی وابسته به دمای مواد
جدول (۱) خواص ترموفیزیکی آلیاژ Ti6-Al4-V که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته را نشان می‌دهد.

۳-۲) مدل‌سازی اجزاء محدود

دامنه مکانی حل شامل مدل سه‌بعدی جهت شبیه‌سازی بستر پودر به صورت مکعب مستطیلی به ابعاد $0.0005 \times 0.0005 \times 0.0005$ متر مکعب روی زیر لایه‌ای از جنس فولاد کم کربن به شکل مکعب مستطیلی به ابعاد $0.0001 \times 0.0005 \times 0.0005$ است (شکل ۲-الف). مدل سه‌بعدی ارائه شده توسط جعبه‌ابزار مش بندی نرم‌افزار متلب با استفاده از المان‌های تتراهدرن شبکه‌بندی شده است (شکل ۲-ب).

مرحله اول، شبیه‌سازی برای یک پاس لیزر (شکل ۳) جهت صرفه‌جویی در زمان و هزینه محاسباتی به منظور بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر توزیع دمایی انجام شده است. در مرحله دوم، نتایج مربوط به نرخ سرد شدن و شیب دمایی حین انجماد موضعی در نقشه انجمادی (شکل ۴) تفسیر و مورفولوژی دانه در فرآیند رسوب‌دهی لیزر برای آلیاژ Ti6-Al4-V پیش‌بینی شده است. اگر $G = |VT|$ ، گرادیان دمایی و $C.R = \frac{\partial T}{\partial t}$ ، نرخ سرمایش باشد، با فرض این که

انجمادی آلیاژ Ti6-Al4-V، مورفولوژی دانه‌های انجمادی پیش‌بینی شده است.

۱-۲) مدل‌سازی تاریخچه حرارتی

در فرآیند SLM از یک لیزر به صورت موضعی جهت حرارت دادن و ذوب بستر پودر استفاده شده است. بنابراین انتقال حرارت در این فرآیند نقش مهمی را ایفا می‌کند. در روش اجزاء محدود برای محاسبه توزیع دما در هر گره از حل معادله انتقال حرارت زیر استفاده شده است [۱۲]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۱)$$

که در آن T دما، t زمان، k ضریب رسانش، ρ چگالی، c ظرفیت حرارتی هست. عبارت Q مربوط به منبع حرارتی گاوسی هست و به صورت زیر محاسبه شده است (شکل ۱): [12]

$$Q(x, y, z, t) = \frac{2\eta P}{\pi r^2 \delta} \cdot \exp\left(\frac{-2[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]}{r^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-|z|}{\delta}\right) \quad (۲)$$

که در آن، P توان لیزر (w)، r شعاع پرتو لیزر (m) و η ضریب جذب لیزر است (۰/۶ در نظر گرفته شده است). دمای اولیه و محیط در طول فرآیند ذوب انتخابی لیزر (T_0) که در واقع شرط مرزی نوع اول^۱ است، 25°C در نظر گرفته شده است [۱۲].

$$T(x, y, z)_{t=0} = T_0 \quad (۳)$$

روی سطح لایه، شرط مرزی نوع دوم^۲ به صورت زیر اعمال شده است [۱۲]:

$$k_{nn} \frac{\partial T}{\partial n} = q(x, y, z, t) + h_c(T - T_0) + \sigma_{sb} \varepsilon (T^4 - T_0^4) \quad (۴)$$

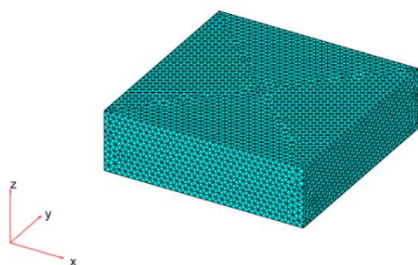
N بردار نرمال سطح است که شار حرارتی از آن به صورت انتقال حرارت جابجایی و تابشی خارج می‌شود، k_{nn} رسانایی حرارتی در جهات مختلف، q عبارت مربوط به منبع حرارتی، h_c ضریب انتقال حرارت جابجایی، σ_{sb} ثابت استفان بولتزمن، ε ضریب تابش است. هنگامی که ماده متخلخل با لیزر دچار برهمکنش است، عمق نفوذ (δ) باید به حساب آید [۱۲]. در این پژوهش عمق نفوذ برابر ضخامت لایه

^۱ Dirichlet

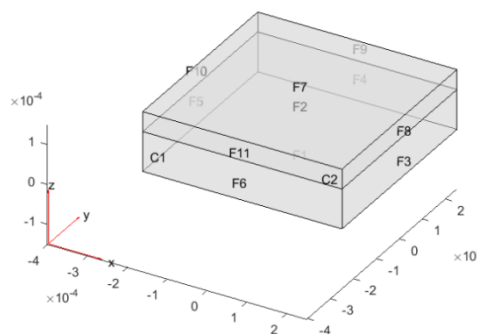
^۲ Newman

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی آلیاژ Ti6-Al4-V [18][19].

Physical properties	Value	Reference
Liquid Temperature (K)	1923.0	[18]
Solidus Temperature (K)	1877.0	[19]
Evaporation Temperature (K)	3533.0	[19]
Solid specific Heat (J/kg.°K)	$\begin{cases} 483.04 + 0.215T & T \leq 1268 K \\ 412.7 + 0.1801T & 1268 < T \leq 1923 K \end{cases}$	[18]
Solid specific Heat (J/kg.°K)	831.0	[18]
Thermal Conductivity (W/m.°K)	$\begin{cases} 1.2595 + 0.0157T & T \leq 1268 K \\ 3.5127 + 0.0127T & 1268 < T \leq 1923 K \\ -12.752 + 0.024T & T > 1923 K \end{cases}$	[18]
Solid Density (kg/m ³)	4420-0.154(T-298 K)	[18]
Liquid Density (kg/m ³)	3920-0.68(T-1923 K)	[18]
Latent heat of fusion	2.86×10^5	[18]

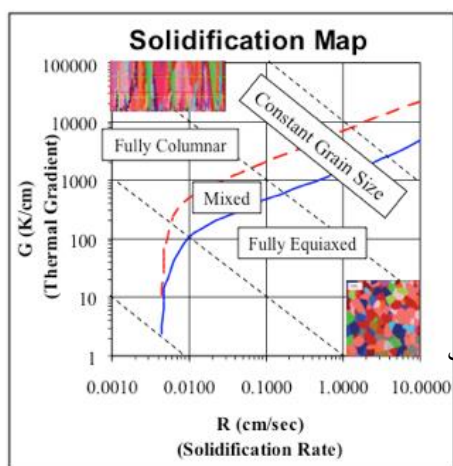


ب



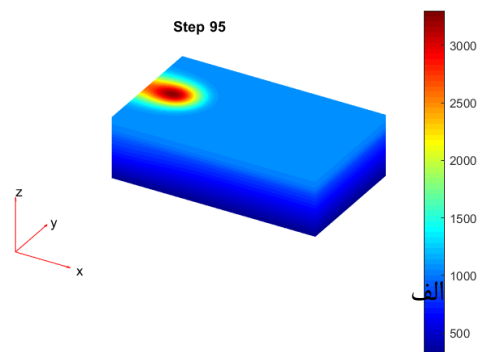
الف

شکل ۲- الف) ابعاد شبیه‌سازی بستر پودر، ب) مش بندی با المان تتراهدرون.



ب

شکل ۴- نقشه انجمادی آلیاژ Ti-6Al-4V [۱۱].



الف

شکل ۳- نمایی از برهمکنش لیزر با بستر پودر و توزیع دمایی حاصل از این برهمکنش.

جدول ۲- پارامترهای فرآیند مورد استفاده در آزمایش‌های ۱ تا ۱۲

ردیف	شماره آزمایش	توان (وات)	سرعت اسکن (متر بر ثانیه)	شعاع پرتوی لیزر (میکرومتر)	دمای محیط (درجه سانتی‌گراد)	دمای اولیه (درجه سانتی‌گراد)
۱	۱-۴	۲۲۰-۱۸۰-۱۵۰-۱۲۰	۱	۵۰	۲۵	۲۵
۲	۵-۸	۱۸۰	۱/۳-۱-۰/۷-۰/۳	۵۰	۲۵	۲۵
۳	۹-۱۲	۱۸۰	۱	۱۰۰-۸۰-۵۰-۳۰	۲۵	۲۵

انجمادی (R و G) حاصل از این چهار آزمایش بر روی نقشه انجمادی مطابق شکل (۶) است. مطابق شکل (۶)، با افزایش سرعت اسکن لیزر، سرعت پیشروی جبهه انجماد افزایش می‌یابد و شیب دمایی تغییر چندانی نمی‌کند و در نتیجه نرخ سرد شدن افزایش می‌یابد. بنابراین مورفولوژی دانه به سمت دانه‌های مخلوط می‌رود.

۳-۳- اثر شعاع پرتوی لیزر بر مورفولوژی دانه‌های انجمادی

در ردیف سوم جدول (۲)، پارامترهای فرآیند آزمایش‌های ۹ تا ۱۲ را با افزایش شعاع پرتوی لیزر از ۳۰ تا ۱۰۰ میکرومتر نشان می‌دهد که در این آزمون‌ها همه پارامترهای جز شعاع پرتوی لیزر ثابت است. نتایج حاصل از رسم پارامترهای انجمادی (R و G) این چهار آزمایش بر روی نقشه انجمادی مطابق شکل (۷) است. مطابق شکل (۷)، با افزایش شعاع پرتوی لیزر مقدار حرارت ورودی ثابتی در حجم بیشتری توزیع می‌شود که باعث می‌شود بیشینه دمای موضعی کاهش یابد و از طرفی با افزایش سطح تابش شیب دمایی نیز کاهش می‌یابد. از سوی دیگر سرعت پیشروی جبهه انجماد تغییر چندانی نخواهد کرد. در نتیجه نرخ سرد شدن کاهش یافته و مطابق شکل مورفولوژی دانه‌بندی به سمت دانه‌های مخلوط و هم‌محور پیش می‌رود. در تمام آزمایش‌های فوق با حرکت از سطح به سمت عمق حوضچه مذاب، شیب دمایی افزایش و سرعت پیشروی جبهه انجماد کاهش می‌یابد که در نتیجه مورفولوژی دانه‌ها به سمت دانه‌های ستونی می‌رود.

جهت خروج گرما در یک جهت است، سرعت پیشروی جبهه انجماد (R) از معادله زیر به دست آمده است [۲۰]:

$$R=1/G \partial T/\partial t \quad (۵)$$

با رسم کردن داده‌های G و R برای هر منطقه بر روی نمودار G-R نقشه انجمادی Ti6-Al4-V می‌توان پیش‌بینی کرد که مورفولوژی دانه، ستونی، مخلوط یا هم‌محور است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر توان لیزر بر مورفولوژی دانه‌های انجمادی

در ردیف اول جدول (۲)، پارامترهای فرآیند آزمایش‌های ۱-۴ را با افزایش توان از ۱۲۰ تا ۲۲۰ وات نشان می‌دهد. در این آزمایش همه پارامترهای آن به غیر از توان لیزر ثابت است و نتایج رسم پارامترهای انجمادی (R و G) حاصل از این چهار آزمایش بر روی نقشه انجمادی، مطابق شکل (۵) است. داده‌های دریافت شده در همه دوازده آزمایش مربوط به گره‌هایی در ناحیه‌ی مکعبی شکل به ابعاد $50 \times 50 \times 50 \mu m^3$ در وسط نمونه است. مطابق شکل (۵)، با افزایش توان لیزر، شیب دمایی افزایش می‌یابد ولی سرعت پیشروی جبهه انجماد تغییر چندانی نمی‌کند و در نتیجه نرخ سرماییش افزایش می‌یابد، بنابراین مورفولوژی دانه به سمت دانه‌های ستونی می‌رود.

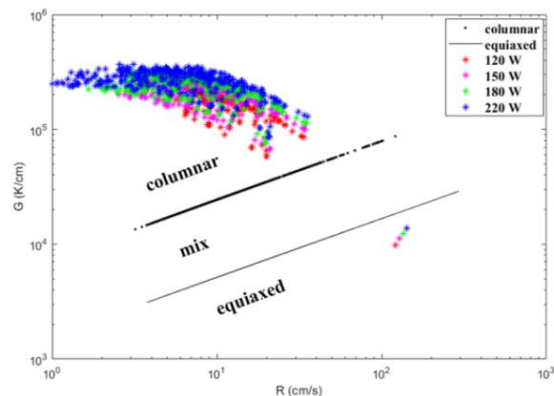
۳-۲- اثر سرعت اسکن لیزر بر مورفولوژی دانه‌های انجمادی

در ردیف دوم جدول (۲)، پارامترهای فرآیند آزمایش‌های ۵-۸ را با افزایش سرعت اسکن لیزر از ۰/۳ تا ۱/۳ متر بر ثانیه نشان می‌دهد که در این آزمایش‌ها همه پارامترهای به جز سرعت اسکن لیزر ثابت است. نتایج رسم پارامترهای

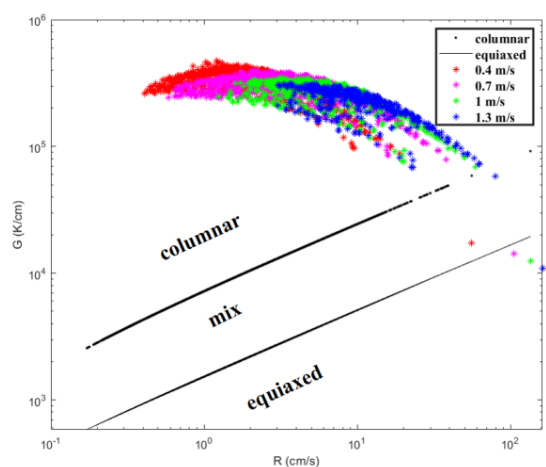
تغییر چندانی نمی‌کند، بنابراین مورفولوژی دانه به سمت دانه‌های ستونی پیش می‌رود. از سوی دیگر با افزایش سرعت اسکن لیزر، سرعت پیش‌روی جبهه انجماد افزایش می‌یابد و گرادیان دمایی تغییر چندانی نخواهد کرد، بنابراین مورفولوژی دانه به سمت دانه‌های مخلوط و هم‌محور میل می‌کند. در تمامی نتایج آزمایش‌های انجام شده، با حرکت از سطح به سمت عمق حوضچه مذاب، گرادیان دمایی افزایش یافته و سرعت پیش‌روی جبهه انجماد کاهش می‌یابد که در نتیجه مورفولوژی دانه به سمت دانه‌های ستونی پیش خواهد رفت.

مراجع

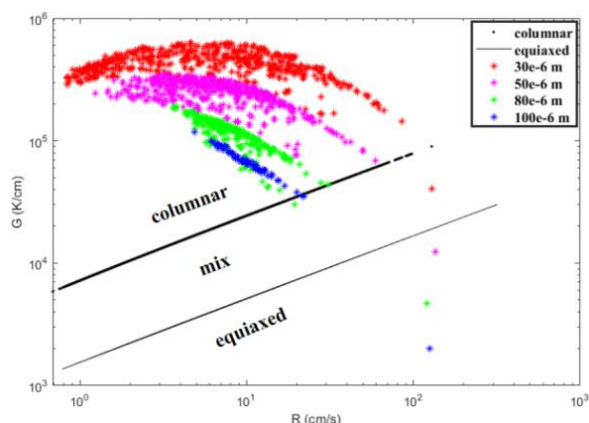
- [1] Gibson I., Rosen D., Stucker B., Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition, Second. New York: Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2015.
- [2] Rafi H.K., Karthik N.V., Gong H., Starr T. L., Stucker B.E., Antonysamy A. A., Microstructure, texture and mechanical property evolution during additive manufacturing of Ti6Al4V alloy for Aerospace applications, Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 22(12) 3872–3883.
- [3] Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C., Additive manufacturing of metals, Acta Materialia, 2016, 117, 371–392.
- [4] Jyothish Kumar L., Pandey P. M., Wimpenny D. I., 3D printing and additive manufacturing technologies, 2018.
- [5] Rivera O.G., Structure-property relationships of solid state additive manufactured aluminum alloy 2219 and Inconel 625, The University of Alabama, 2017.
- [6] Bansal R., Acharya R., Gambone J.J., Das S., Experimental and theoretical analysis of scanning laser epitaxy applied to nickel-based superalloys, 22nd Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp.: An Addit. Manuf. Conf. SFF 2011, 2011, 496–503.
- [7] Liu J., To A.C., Quantitative texture prediction of epitaxial columnar grains in additive manufacturing using selective laser melting, Additive Manufacturing, 2017, 16, 58–64.
- [8] Lopez-Botello O., Martinez-Hernandez U., Ramirez J., Pinna C., Mumtaz K., Two-dimensional simulation of grain structure growth within selective laser melted AA-2024, Materials and Design, 2017, 113, 369–376.
- [9] Shiomi M., Yoshidome A., Abe F., Osakada K., Finite element analysis of melting and solidifying processes in laser rapid prototyping of metallic powders, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39(2) 237–252.
- [10] Roberts I., Wang C.J., Esterlein R., Stanford M., Mynors D., A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(12–13) 916–923.



شکل ۵- رسم داده‌های R و G حاصل از توان‌های ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ وات.



شکل ۶- رسم داده‌های R و G حاصل از سرعت اسکن‌های ۰/۴، ۰/۷، ۱ و ۱/۳ متر بر ثانیه.



شکل ۷- رسم داده‌های R و G حاصل از شعاع پرتوهای ۳۰، ۵۰، ۸۰ و ۱۰۰ میکرومتر.

۴) نتیجه‌گیری

در جمع‌بندی از نتایج تحقیق اخیر می‌توان دریافت، با افزایش توان لیزر و کاهش شعاع پرتوی لیزر، گرادیان دمایی افزایش می‌یابد ولی سرعت پیش‌روی جبهه انجماد

- Ti-6Al-4V biomedical alloy, *Tribology International*, 2018, 119, 381-388.
- [16] Santecchia E., et al., Powder Bed Fusion of Biomedical Co-Cr-Mo and Ti-6Al-4V Alloys: Microstructure and Mechanical Properties, *Advanced Materials Research*, 2019, 1151, 3-7.
- [17] Xie W., Zheng M., Wang J., Li X., The effect of build orientation on the microstructure and properties of selective laser melting Ti-6Al-4V for removable partial denture clasps, *Journal of Prosthetic Dentistry*, 2019, 123(1), 163-172.
- [18] Mills K.C., *Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys*. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2002.
- [19] Welsch G., Boyer R., Collings E. W., *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, 2nd ed. 1998.
- [20] Kurz W., Bezençon C., Gäumann M., Columnar to equiaxed transition in solidification processing, *Science and Technology of Advanced Materials*, 2001, 2(1) 185-191.
- [11] Bontha S., Klingbeil N.W., Kobryn P.A., Fraser H.L., Thermal process maps for predicting solidification microstructure in laser fabrication of thin-wall structures, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 178 (1-3) 135-142.
- [12] Liu S., Zhu H., Peng G., Yin J., Zeng X., Microstructure prediction of selective laser melting AlSi10Mg using finite element analysis, *Materials and Design*, 2018, 142, 319-328.
- [13] Froes F., Boyer R., Dutta B., Introduction to aerospace materials requirements and the role of additive manufacturing, *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry* 2019, 1-6.
- [14] Murr L.E., et al., Microstructures and mechanical properties of electron beam-rapid manufactured Ti-6Al-4V biomedical prototypes compared to wrought Ti-6Al-4V, *Materials Characterization*, 2008, 60(2) 96-105.
- [15] Buciumeanu M., Bagheri A., Shamsaei N., Thompson S. M., Silva F. S., Henriques B., Tribocorrosion behavior of additive manufactured

IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper

Numerical Simulation of Solidification Microstructure in Selective Laser Melting Additive Manufacturing and Studying the Effect of Process Parameters on Grains Morphologies

Ehsan Dastbaz¹, Rohollah Tavakoli^{2*}

1. M.Sc. Student, Sharif University of Technology.

2. Associate Professor, Materials Science and Engineering Department, Sharif University of Technology

* **Corresponding Author:** E-mail: rtavakoli@sharif.edu

Received 24 November 2019

Accepted 08 February 2020

Abstract:

The prediction and control of solidification induced microstructure is an important issue during the product/process design stage in the selective laser melting additive manufacturing. It helps to avoid undesirable microstructures and possibly additional required post heat treatment, consequently improving the quality of manufactured parts. However, the direct numerical simulation of microstructure formation in this process is computationally very expensive, even by employing the state-of-the-art available computational resources. In the present study, an indirect approach based on empirical law is employed to predict the solidification microstructure. For this purpose, the macro-scale nonlinear heat equation include phase change effect is solved using the conventional finite element method and the local cooling rate and thermal gradient within the freezing interval is computed accordingly for Ti6-Al4-V alloy. Then, this information is projected on the empirical solidification microstructure map of this alloy to predict local microstructure, and the effects of process parameters like the laser power, laser effective radius (laser focus), scanning speed and scanning strategy on the solidification microstructure are investigated. According to the results, by decreasing the laser power, increasing the effective laser radius and laser scanning speed, the resulted grains morphologies can be varied gradually from the columnar to mixed columnar and equiaxed and completely equiaxed microstructures.

Keywords:

Additive manufacturing,
Microstructure,
Selective laser melting,
Simulation,
Solidification.

Please cite this article using:

Ehsan Dastbaz, Rohollah Tavakoli, Numerical Simulation of Solidification Microstructure in Selective Laser Melting Additive Manufacturing and Studying the Effect of Process Parameters on Grains Morphologies, in Persian, Founding Research Journal, 2020, 3(4) 229-236.

DOI: 10.22034/FRJ.2020.209247.1110

Journal homepage: www.foundingjournal.ir