

Research Paper

An Approach to Additive Manufacturing of Compressor Impellers: 3D Modeling of Multilayer Laser Solid Freeform Fabrication of Nickel Alloy 625 Powder Mixed with Nano-CeO₂ on AISI 4140

Gholamreza Fayaz^{1*}, Saman Kazemzadeh², Sepideh Sadat Zakeri³

Received: 2018.05.22

Accepted: 2020.01.25

Abstract

Gas turbine blades, turbine shafts and centrifugal compressor impellers are often suffered by erosion and/or corrosion. By laser cladding technique, a coating layer can be deposited on the base material in order to rebuild, repair and improve anti-erosion or anti-corrosion properties of the sensitive machine parts. In this paper, a three-dimensional finite element modeling of the laser solid freeform fabrication (LSFF) process for nickel alloy 625 powder mixed with nano-CeO₂ on AISI 4140 steel is examined. Using Comsol Multiphysics software and the finite element method (FEM), the heat transfer equation, moving mesh equation and stress tensor are numerically evaluated. The dynamic geometry of the molten zone is studied by a 3D moving mesh based on Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) module. The effects of preheating as well as addition of nano-CeO₂ on temperature distribution and stress fields are investigated. Temporal behavior of the key characteristic features of the model and dependence of the clad height on the scanning velocity of the laser for the first, second and third layers are also studied.

Keywords: *Additive Manufacturing, Laser Cladding, Compressor Impeller, Nano-CeO₂, AISI 4140.*

¹ Assistant Professor, department of Physics, Tafresh University. (Corresponding Author).
Email: reza.fayaz@tafreshu.ac.ir

² MSc in Physics, Tafresh University. Email: samankazemzadeh@yahoo.com

³ PhD in Photonics, FARPACO. Email: sepideh.zakeri@farpaco.com

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا

سال نهم، پیاپی ۱۶، بهار ۱۳۹۸

مقاله پژوهشی

رهیافتی بر ساخت افزایشی پروانه‌های کمپرسور: مدل سازی سه بعدی پوشش کاری چندلایه فولاد پایه AISI 4140 به روش LSFF با استفاده از پودر Inconel 625 مخلوط با ۲٪ نانو پودر CeO_2 ^۱

غلامرضا فیاض*^۲، سامان کاظم زاده^۳، سپیده سادات ذاکری^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۵

چکیده

تیغه توربین‌های گازی، شفت توربین‌ها و پروانه‌های کمپرسورها، اغلب به دلیل فرسایش یا خوردگی آسیب می‌بینند. با استفاده از روش پوشش کاری لیزری و به منظور بازسازی و بهبود خواص ضد فرسایشی قطعات حساس، یک لایه پوشش بر روی مواد پایه قرار داده می‌شود. در این مقاله، مدل سه بعدی فرآیند LSFF برای آلیاژ Inconel 625 مخلوط با نانو پودر CeO_2 بر روی فولاد AISI 4140 بررسی شده است. با استفاده از نرم افزار COMSOL Multiphysics و روش المان محدود (FEM)، معادله انتقال حرارت، معادله مش متحرک و تانسور تنش به

^۱ DOI: 10.22051/jap.2020.20412.1097

^۲ استادیار گروه فیزیک، دانشگاه تفرش. (نویسنده مسئول). Email: reza.fayaz@tafreshu.ac.ir

^۳ دانش آموخته کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه تفرش. Email: samankazemzadeh@yahoo.com

^۴ دانش آموخته دکترای فوتونیک، شرکت فاریاکو. Email: sepideh.zakeri@farpaco.com

صورت عددی حل می‌شود. هندسه ناحیه مذاب با استفاده از مش‌بندی متحرک و بر اساس مازول لاگرانژی-اویلری (ALE) به دست می‌آید و همچنین تأثیر پیش‌گرمایش و افزودن نانو پودر CeO_2 در توزیع دما و میدان‌های تنش به صورت عددی بررسی می‌شود. رفتار زمانی شاخص‌های کلیدی فرآیند مانند دمای بیشینه و تنش بیشینه و نسبت متناظر آن‌ها مطالعه شده و وابستگی ارتفاع پوشش به سرعت روبش لیزر برای لایه‌های اول و دوم و سوم بررسی و ارائه می‌شود.

واژگان کلیدی: ساخت افزایشی، پوشش‌کاری لیزری، پروانه کمپرسور، نانو پودر CeO_2 ، فولاد AISI 4140

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، ساخت افزایشی^۱ مواد فلزی یا چاپ سه‌بعدی به عنوان روشی پیشرفته و منطبق با الزامات انقلاب صنعتی چهارم به منظور پرینت قطعات فلزی براساس تقاضا^۲ در کانون توجه ویژه مراکز علمی-تحقیقاتی و صنعتی در سراسر جهان قرار گرفته است [۱]. در ساخت افزایشی، قطعه براساس ذوب کردن پودر ماده فلزی توسط یک منبع گرمایی و افزودن آن به صورت لایه‌لایه بر روی هم تا تشکیل شکل نهایی ساخته می‌شود. از جمله روش‌های متداول ساخت افزایشی، روش موسوم به LSFF^۳ است که در آن از لیزر به عنوان یک منبع گرمایی با قابلیت کنترل‌پذیری بالا استفاده شده و امکان تولید دقیق و مطمئن مواد با خواص سطحی ویژه و کاهش چشمگیر هدررفت مواد میسر می‌باشد [۲، ۳]. با به کارگیری روش LSFF، می‌توان یک قطعه پیچیده را از روی مدل دیجیتالی آن و از طریق افزودن پیوسته مواد فلزی به قطعه پایه، به صورت یکپارچه چاپ کرد. برخلاف سایر روش‌های متداول، این فرآیند دقیق و سریع است و در آن اتصالات میان مواد محکم‌تر و نواحی تحت تأثیر گرما کوچک‌تر می‌باشند [۴] و لذا بسیاری از محدودیت‌ها و چالش‌هایی که در فناوری‌های رایج ساخت قطعات فلزی وجود دارد، در این روش مرتفع شده است. روش LSFF را می‌توان راهکاری موفق و هوشمند با قابلیت کنترل‌پذیری بسیار خوب به‌شمار آورد که در طیف گسترده‌ای از کاربردهای نوین از جمله پوشش درپچه‌های خروجی موتور دیزل [۵]، خوردگی تیغه‌های توربین‌های گازی [۶]، بازسازی میدل‌های فولادی [۷]، پوشش سازه‌های فولادی در تجهیزات دوار [۸] و بسیاری کاربردهای دیگر که در آن روش‌های متداول کارآیی مناسبی ندارد، قابل استفاده است. با توجه به کاربردهای بسیار وسیع روش LSFF،

¹ Additive Manufacturing (AM)

² Print on Demand (POD)

³ Laser Solid Freeform Fabrication

بی شک هر تلاشی را در جهت بهبود دقت فرآیند می توان از پیش نیازهای ضروری عملیات بهینه سازی فرآیند برشمرد.

تحقیق صورت گرفته در این مقاله در شمار مجموعه تحقیقات نوین در زمینه اثر افزودن نانو پودر CeO_2 در پودر افزودنی بر روی زیرلایه ها به شمار می آید، که گستره وسیعی از کاربردها را در بر گرفته و به بهبود خواص سطحی می انجامد [۹-۱۲]. مواد در نظر گرفته شده در این مقاله، براساس کاربردهای فعلی آنها در قطعات کلیدی صنعت نفت و گاز مانند پروانه های کمپرسورهای گازی، انتخاب شده اند [۱۳]. تا آنجا که نویسندگان اطلاع دارند، این پژوهش اولین مطالعه نظری از روند شبیه سازی ساخت و پوشش کاری لیزری برای این مواد منتخب است. علاوه بر خاص بودن مواد منتخب، یکی دیگر از اهداف اصلی این مقاله، پیاده سازی مش متحرک در مدل المان محدود سه بعدی فرآیند پوشش کاری لیزری با تزریق پودر^۱ است که در راستای ارتقاء تحقیقات قبلی نویسنده است [۱۴].

مدل نظری و معادلات حاکم بر روش پوشش کاری لیزری در بخش ۲ توصیف می شود. سپس، نتایج حاصل از شبیه سازی سه لایه ای در بخش ۳ ارائه و به تفصیل بررسی می شود. اثر پیش گرمایش و همچنین افزودن نانو پودر CeO_2 بر روی هندسه لایه پوشش دهنده و همچنین امکان تشکیل ترک، به دقت تجزیه و تحلیل می شود. در مدل شبیه سازی شده، رفتار زمانی شاخص های مدل از جمله دمای بیشینه و تنش بیشینه و نسبت آنها برای لایه های اول و دوم و سوم در طی یک فرآیند پیوسته به طور کامل مطالعه می شود. همچنین، ارتفاع پوشش برای سرعت های مختلف رویش لیزر در محدوده $1/5 - 4/0$ (میلی متر بر ثانیه) اندازه گیری می شود. نتایج حاصل از شبیه سازی سه بعدی در این مقاله، درک کیفی و کمی عمیق و دقیقی از فرآیند پوشش کاری لیزری با تزریق پودر را ممکن می سازد.

۲. توصیف نظری

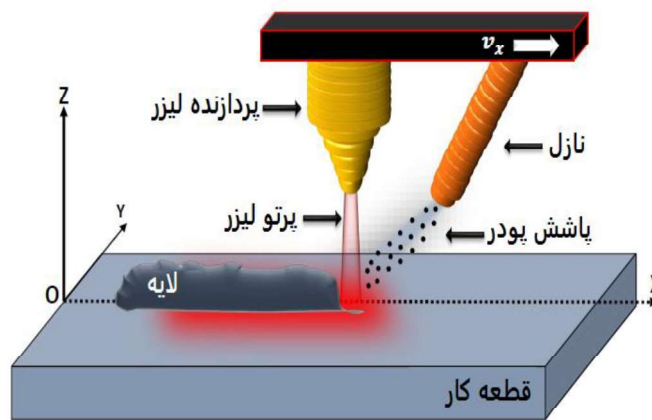
در این بخش، مدل نظری و معادلات حاکم بر فرآیند پوشش کاری لیزری با تزریق پودر به طور خلاصه توضیح داده می شود [۱۵].

۲-۱ مدل فیزیکی

در این تحقیق، به منظور بررسی ویژگی های فرآیند پوشش کاری لیزری با تزریق پودر، از یک مدل ساده و در عین حال واقع بینانه استفاده می شود. در لحظه $t=0$ ، یک پرتوی لیزر با شعاع ثابت با

¹ Laser cladding by powder injection

توزیع گاوسی حول محور Z بر روی سطح قطعه کار تابانده می‌شود و سپس در جهت X شروع به حرکت می‌کند. در حین فرآیند، در محل تماس لیزر با سطح قطعه کار، حوضچه مذابی تشکیل می‌شود که پودر به کمک یک نازل به درون آن تزریق می‌شود. همان طور که لیزر سطح کارقطعه را می‌پیماید، حوضچه مذاب به سرعت سخت (جامد) شده و پوسته پوشش تشکیل می‌شود. در شکل (۱)، طرحی از فرآیند پوشش کاری لیزری با تزریق پودر نشان داده شده است.



شکل ۱. طرحی از فرآیند پوشش کاری لیزری با تزریق پودر.

۲-۲ معادلات حاکم بر فرآیند

بر اساس تابع توزیع دما $T(x,y,z,t)$ ، مشخصات هندسه و حوضچه مذاب تعیین می‌شود. این تابع از حل معادله سه‌بعدی انتقال حرارت به دست می‌آید [۱۶، ۱۷]:

$$\nabla \cdot (K \nabla T) + Q = \frac{\partial (\rho c_p T)}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن K هدایت گرمایی، $T(K)$ دما، ρ چگالی، $t(s)$ زمان، c_p ظرفیت ویژه گرمایی و Q توان تولیدشده لیزر در واحد حجم است. حل معادله انتقال حرارت (۱) که یک معادله دیفرانسیل مرتبه دوم است، نیاز به تعیین مناسب شرایط اولیه و شرایط مرزی لازم دارد. شرایط اولیه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (2)$$

$$T(x, y, z, \infty) = T_0 \quad (3)$$

که در آن، $T_0(K)$ دمای محیط است. شرایط مرزی همرفتی و تابش با هم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R \notin \Lambda \text{ اگر } k(\nabla T, \mathbf{n})|_R = [-h(T - T_0) - \varepsilon_R \sigma_R (T^4 - T_0^4)] \Big|_R \quad (۴)$$

$$R \in \Lambda \text{ اگر } k(\nabla T, \mathbf{n})|_R = [\beta I(x, y, z, U, t) - h(T - T_0) - \varepsilon_R \sigma_R (T^4 - T_0^4) - \rho c_p^* V_p (T - T_0)] \Big|_R \quad (۵)$$

که در آن \mathbf{n} بردار عمود بر سطح، $h \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$ ظرفیت همرفتی ویژه، ε_R گسیلندگی تابشی، σ_R ثابت استفان-بولتزمان، $R (m^2)$ مساحت قطعه کار، $\Lambda (m^2)$ مساحت اشعه لیزر بر روی سطح قطعه کار، β فاکتور جذب مؤثر، $I \left(\frac{W}{m^2} \right)$ توزیع انرژی اشعه لیزر بر روی سطح، $U \left(\frac{m}{s} \right)$ سرعت در جهت های x و y و z است. ظرفیت گرمایی معادل c_p^* توسط رابطه زیر داده می شود [۱۸]:

$$c_p^* = c_p(T) + \frac{\Delta H_m}{\sqrt{\pi(T_L - T_S)^2}} \exp\left(-\frac{(T - T_m)^2}{(T_L - T_S)^2}\right) \quad (۶)$$

که در آن، $\Delta H_m \left(\frac{J}{kg} \right)$ گرمای نهان ذوب، $T_m (K)$ دمای ذوب و $T_L (K)$ و $T_S (K)$ به ترتیب دمای فاز جامد و مایع است.

جهت ارزیابی کامل تشکیل ترک خوردگی، ضروری است تحلیل دقیقی از تنش انجام شود. در طی فرآیند حرارتی، مواد به دلیل تغییرات دما دچار انبساط و انقباض می شوند. بنابراین، تنش حرارتی هم به درجه حرارت اولیه و هم به درجه حرارت لحظه ای بستگی دارد. کرنش کل ε در جسم با معادله زیر بیان می شود [۴]:

$$\varepsilon_{mn} = \varepsilon_{mn}^M + \varepsilon_{mn}^T \quad (m, n = 1, 2, 3) \quad (۷)$$

که در آن، $\varepsilon_{mn}^T \left(\frac{m}{m} \right)$ و $\varepsilon_{mn}^M \left(\frac{m}{m} \right)$ به ترتیب کرنش حاصل از نیروی مکانیکی و تغییرات دماست. تنش یک تابع خطی از کرنش است، بنابراین معادله ساختاری را برای یک ماده کشسان خطی می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\sigma_{ij} = D_{ijmn} \varepsilon_{mn} \quad (i, j, m, n = 1, 2, 3) \quad (۸)$$

که در آن، $\sigma_{ij} (Pa)$ تنش کششی و $D_{ijmn} (Pa)$ تانسور کشسانی با ۸۱ مؤلفه است. به دلیل وجود تقارن در تانسور تنش، تنها ۳۶ مؤلفه مستقل وجود دارد. برای مواد کشسان همسانگرد، این ۳۶ مؤلفه مستقل به ۲ مؤلفه مستقل کاهش می یابد. بر این اساس، فشارهای مکانیکی و حرارتی را می توان با روابط زیر بیان کرد [۱۹]:

$$\varepsilon_{11}^M = \varepsilon_x ; \varepsilon_{22}^M = \varepsilon_y ; \varepsilon_{33}^M = \varepsilon_z ; \varepsilon_{31}^M = \varepsilon_{13}^M = \frac{\gamma_{yz}}{2} ; \varepsilon_{12}^M = \varepsilon_{21}^M = \frac{\gamma_{zx}}{2} ; \varepsilon_{23}^M = \varepsilon_{32}^M = \frac{\gamma_{xy}}{2} \quad (۹)$$

$$\varepsilon_{mn}^T = \alpha(T - T_0) \delta_{mn} \quad (m, n = 1, 2, 3) \quad (۱۰)$$

که در آن، γ کرنش برشی بر حسب $\left(\frac{m}{m} \right)$ ، T_0 دمای اولیه بر حسب (K) ، α ضریب انبساط خطی بر حسب δ_{mn} ، $\left(\frac{m}{m.k} \right)$ تابع دلتای کرونگر است که به صورت زیر بیان می شود:

$$\delta_{mn} = \begin{cases} 0: & m \neq n \\ 1: & m = n \end{cases} \quad (۱۱)$$

بر این اساس، هر دوی تنش های مکانیکی و حرارتی را می توان با استفاده از معادله زیر بیان کرد [۲۰]:

۴۸ / رهیافتی بر ساخت افزایشی پروانه‌های کمپرسور: مدل‌سازی سه‌بعدی پوششکاری چندلایه فولاد پایه ...

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [v\delta_{ij}\varepsilon_{kk} + (1-2\nu)\varepsilon_{ij} - (1+\nu)\alpha\Delta T\delta_{ij}] \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (12)$$

که در آن ν نسبت پواسون است. مقادیر اولیه برای کرنش و تنش به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon(x, y, z, 0) \Big|_{T=T_0} = 0 \quad (13)$$

$$\sigma(x, y, z, 0) \Big|_{T=T_0} = 0 \quad (14)$$

از ترکیب شرایط اولیه با معادلات وابسته به زمان می‌توان، توزیع دما و تنش و شکل لایه را به دست آورد. برای پیش‌بینی شکل لایه، مش با سرعت زیر به حرکت در می‌آید:

$$\vec{V}_n = \vec{V}_p \cdot \mathbf{n} \quad (15)$$

که \vec{V}_p بیانگر سرعت حرکت مرزی به دلیل افزودن پودر است که توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\vec{V}_p = \frac{\eta_p D_m}{\rho_0 \pi r_l^2} \exp\left(-N_p \frac{(x-V_s t)^2}{r_l^2} - N_p \frac{y^2}{r_m^2}\right) \cdot \vec{k} \quad (16)$$

که در آن، η_p ضریب انقباض توزیع گوسی، N_p ضریب بهره‌وری پودر، ρ_0 چگالی پودر، D_m آهنگ پاشش پودر، V_s سرعت حرکت نازل، $r_l(m)$ شعاع پرتو لیزر بر روی سطح قطعه کار، $r_m(m)$ شعاع حوضچه مذاب بر روی سطح قطعه کار است.

لازم به ذکر است تکانه مربوط به افزودن ماده در حوضچه مذاب در معادله نادیده گرفته شده است [۱۷]. جذب مؤثر لیزر بر حسب ضرایب جذب زیرلایه و ذرات پودر به روشی که توسط پیکاسو توسعه یافته است در نظر گرفته شده است [۳]. با تعمیم هدایت حرارتی بر اساس روش توسعه یافته توسط لامپا و همکاران [۲۲]، جریان مارانگونی نیز در این تحقیق لحاظ شده است.

۳. نتایج و بحث

در این بخش، نتایج عددی حاصل از مدل نظری معرفی شده در بخش قبل ارائه می‌شود. جهت انجام شبیه‌سازی سه‌بعدی و حل معادلات حاکم و نیز اعمال شرایط مرزی، از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics 5.2^۱ استفاده شد.

فولاد AISI 4140 با ابعاد $40 \times 20 \times 5$ میلی‌متر به عنوان قطعه کار انتخاب و از آلیاژ Inconel 625 مخلوط شده با ۲٪ نانو پودر CeO_2 به عنوان ذرات پودر استفاده شد. مقدار درصد انتخابی برای نانو پودر CeO_2 بر اساس نتایج تجربی گزارش شده توسط دینگ و همکاران انتخاب شده است [۱۱]. در شبیه‌سازی انجام شده، گسسته‌سازی بدنه جامد و سطوح مرزی به ترتیب با مش بندی چهار گوش و مثلثی صورت پذیرفت. شبیه‌سازی با استفاده از ابررایانه تحت سیستم عامل لینوکس

¹ <https://www.comsol.com>

با ۳۲ گیگابایت رم شامل ۳۲ هسته موازی انجام شد (۲۵۰ گیگا هرتز، ۱۵۰ گیگابایت رم) و در مجموع ۴۸ ساعت به طول انجامید. مشخصاً، مش شامل ۶۷۱۰۸ المان با ۲۰۳۴۲۰ درجه آزادی بود. به منظور کنترل مش متحرک، از ماژول ALE^۱ که درون نرم افزار COMSOL تعیبه شده است، استفاده شد و همچنین حل کننده PARDISO جهت انجام محاسبات وابسته به زمان به کار گرفته شد. مقادیر پارامترهای فرآیندی که در شبیه سازی استفاده شده اند، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای فرآیندی بکار گرفته شده در مدل سازی پوشش کاری لیزری با تزریق پودر.

واحد	مقدار	پارامترها
g/min	2	آهنک تغذیه پودر
W	250	توان لیزر
nm	808	طول موج لیزر
—	0.69	ضریب جذب لیزر برای AISI4140
m	1.2×10^{-3}	شعاع جریان پودر بر روی زیر لایه
m	1.0×10^{-3}	شعاع پرتوی لیزر بر روی زیر لایه
K	1693	دمای ذوب AISI4140
K	1570	دمای ذوب IN625
K	2670	دمای ذوب نانو پودر CeO ₂
mm/s	1.5	سرعت حرکت نازل
kg/m ³	7840	چگالی AISI4140
kg/m ³	8300	چگالی IN 625
kg/m ³	7200	چگالی نانو پودر CeO ₂

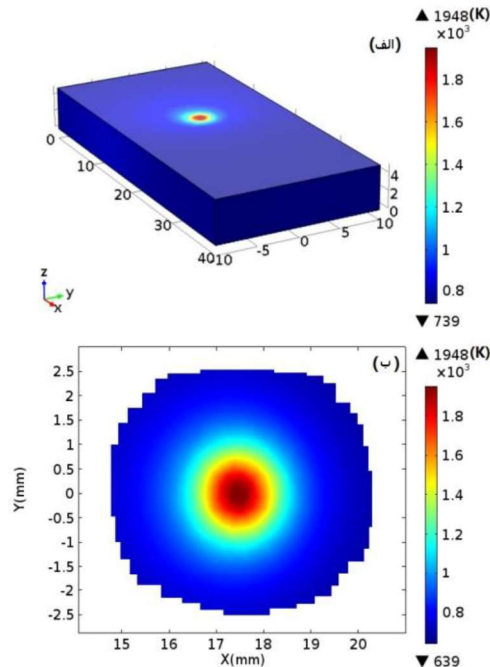
در این مدل، فرآیند پوشش کاری با سه لایه شبیه سازی شده است. شبیه سازی اولین لایه بین ۵ تا ۸ ساعت طول کشید. لیزر دیودی با طول موج عملکردی ۸۰۸ نانومتر و مد دایره ای گاوسی TEM₀₀، جهت توزیع توان پرتو لیزر بر روی قطعه کار در نظر گرفته شد. در لحظه $t=0$ ، مرکز پرتوی لیزر در نقطه (۱۰، ۰، ۵) قرار داده شد. برای هر لایه پوشش، لیزر به مدت ۱۰ ثانیه روشن و در طی آن اثرات همرفتی و تابش در نظر گرفته شد. از آنجا که لیزر مسیری مستقیم را بر روی قطعه کار با سرعت روبش ثابت طی می کند، در لحظه $t=10s$ ، در نقطه (۵، ۰، ۲۵) متوقف شد. بنابراین، طول کل لایه ایجاد شده در امتداد محور X برابر ۱۵ میلی متر می باشد. به منظور مشابه سازی نزدیک تر مدل به شرایط واقعی در آزمایش های تجربی، فاصله زمانی ۱۰ ثانیه ای نیز جهت

¹ Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)

۵۰ / رهیافتی بر ساخت افزایشی پروانه‌های کمپرسور: مدل‌سازی سه‌بعدی پوششکاری چندلایه فولاد پایه ...

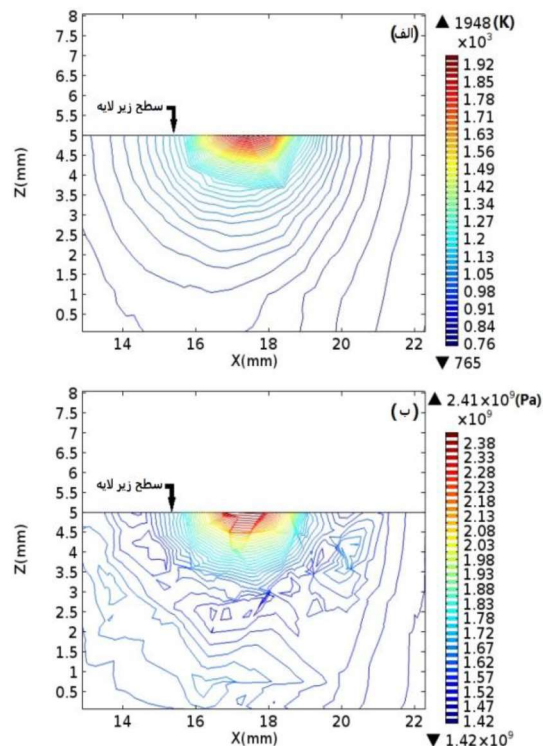
بازگشت پرتوی لیزر به نقطه اولیه در نظر گرفته شد که در طی آن لیزر خاموش بود. در شبیه‌سازی انجام شده، پوشش اولین و دومین و سومین لایه به ترتیب ۲۰ و ۲۰ و ۱۰ ثانیه به طول انجامید. بنابراین، کل شبیه‌سازی سه لایه در طی ۵۰ ثانیه انجام شد که در هر ۱۰ ثانیه، لیزر به طور متوالی روشن و خاموش می‌شد. در این شبیه‌سازی، شرایط اولیه برای میدان‌های تنش و توزیع دما در هر گام (با اندازه ۰,۰۰۱ ثانیه) معادل مقادیر مربوطه آن‌ها در گام قبلی در نظر گرفته شده است. در ادامه، نتایج حاصل از انجام محاسبات برای پارامترهای فرآیندی مختلف ارائه و به تفصیل بررسی می‌شوند.

با هدف درک بهتر فرآیند پوشش کاری، ابتدا شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن تزریق پودر انجام شد. هندسه حوضچه مذاب بر روی سطح قطعه، هنگامی که قطعه کار تنها توسط پرتوی لیزر به مدت ۵ ثانیه تحت تابش قرار گرفته است و پودری تزریق نشده است، در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲) الف مشاهده می‌شود، منطقه‌ای که تحت تأثیر گرمای لیزر قرار گرفته است، در مقایسه با اندازه واقعی قطعه کار بسیار کوچک بود. این امر بیانگر سخت شدن بسیار سریع لایه است که از جمله ویژگی‌های کلیدی فرآیندهای گرمایش لیزری است.



شکل ۲ هندسه حوضچه مذاب در سطح بالای قطعه کار (در سطح $Z=5$ میلی‌متر) در لحظه $t=5$ ثانیه بدون تزریق پودر. (الف) تصویر سه‌بعدی؛ (ب) تصویر ۲ بعدی.

علاوه بر هندسه حوضچه مذاب، درک عمیق توزیع دما و تنش نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. توزیع دما و تنش مرتبط با سطح ($y=0$) در لحظه مشخص $t=5$ ثانیه محاسبه شده و نتایج به دست آمده در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. با مقایسه الگوهای دما و تنش، به وضوح مشاهده می‌شود که در مناطقی که گرادیان دما بالاتر است، تنش به حداکثر رسیده است.

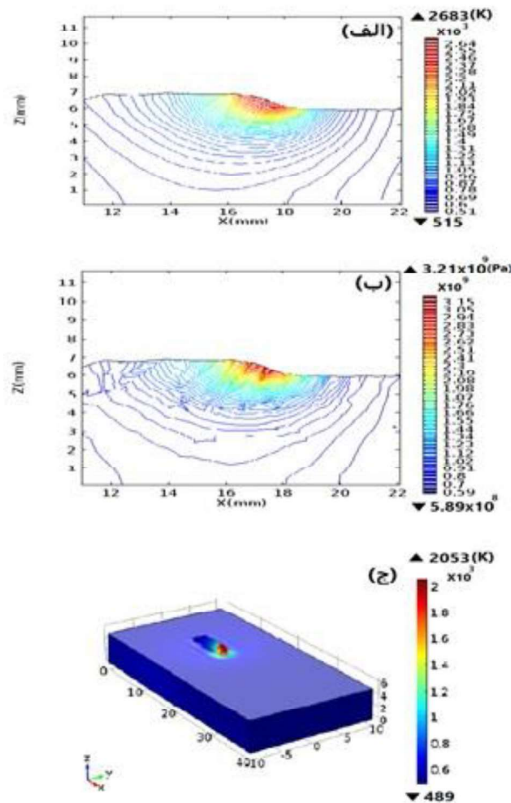


شکل ۳ الگوی مناطق حرارتی و تنش مرتبط با سطح ($y=0$ میلی‌متر) در لحظه $t=5$ ثانیه بدون تزریق پودر. (الف) خطوط هم‌دما برحسب کلوین. (ب) خطوط تنش برحسب پاسکال.

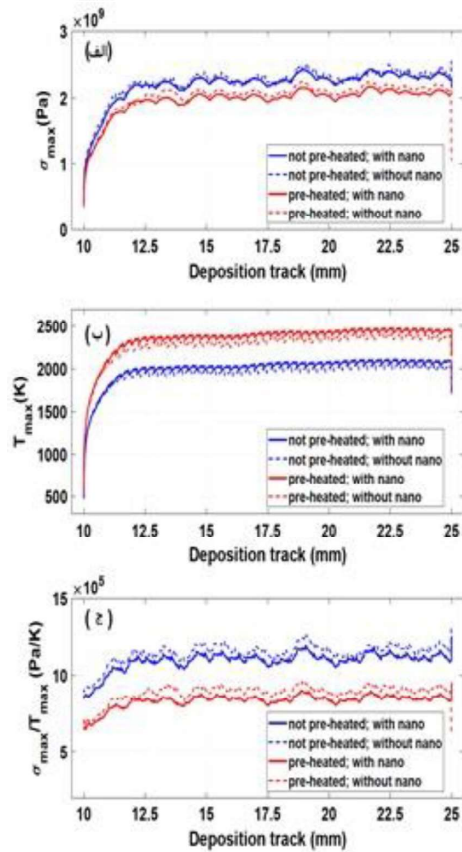
حال، در مدل شبیه‌سازی شده، تزریق پودر را نیز در نظر می‌گیریم. به منظور بررسی اثر نانو ذرات، ۲٪ نانو پودر CeO_2 به پودر اینکونل اضافه شد. تنش بیشینه (σ_{max}) و دمای بیشینه (T_{max}) مربوط به لایه اول در هر دو حالت با افزودن و بدون افزودن ۲٪ نانو پودر CeO_2 ، به همراه نسبت آن‌ها (σ_{max}/T_{max}) و همچنین مقایسه اثر پیش گرمایش در شکل (۴) ترسیم شده است. براساس این واقعیت فیزیکی که قطعه کار هنوز به اندازه کافی گرم نشده است تا انتقال حرارت به خوبی صورت پذیرد، انتظار می‌رود برای لایه اول، اضافه کردن ۲٪ نانو پودر CeO_2 تأثیر چندانی در

۵۲ / رهیافتی بر ساخت افزایشی پروانه‌های کمپرسور: مدل‌سازی سه‌بعدی پوششکاری چندلایه فولاد پایه ...

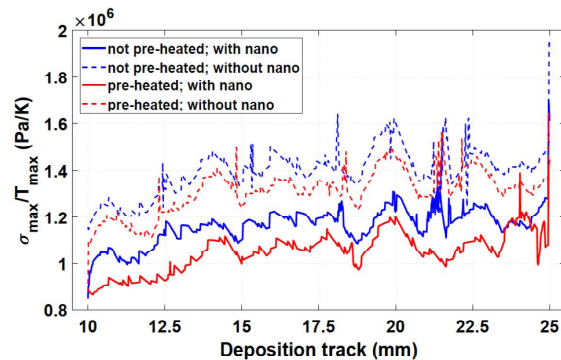
نسبت σ_{max}/T_{max} ایجاد نکند. در نتیجه، تنش باقی‌مانده در قطعه کار و لایه تا حدی قوی است که می‌تواند باعث ایجاد ترک شود. برای تأیید این موضوع، در مدل شبیه‌سازی ابتدا قطعه کار به میزان ۵۰۰ کلوین پیش گرم شد. سپس، تنش بیشینه و دمای بیشینه با در نظر گرفتن تزریق پودر شامل ۲٪ نانو پودر CeO_2 محاسبه شد. تأثیر پیش‌گرمایش بر روی T_{max} و σ_{max} و نسبت σ_{max}/T_{max} در شکل (۴) مشاهده می‌شود. نتایج ارائه شده در شکل‌های (۴) الف تا (۴) ج، در توافق کامل با این مفهوم فیزیکی است که پیش‌گرمایش باعث افزایش T_{max} و کاهش σ_{max} و همچنین کاهش σ_{max}/T_{max} می‌شود. در نتیجه، امکان شکل‌گیری شکستگی و ترک نیز با پیش‌گرمایش قطعه کار کاهش می‌یابد. در شکل‌های (۵) الف و (۵) ب، به ترتیب کانتورهای دما و تنش مرتبط با لایه اول در سطح $y=0$ میلی‌متر و در لحظه $t=5$ ثانیه نشان داده شده است. همچنین تصویر سه‌بعدی لایه ایجاد شده بر روی قطعه کار، در لحظه $t=5$ ثانیه، در شکل (۵) ج ارائه شده است.



شکل ۴ اثر پیش‌گرمایش قطعه کار (۵۰۰ کلوین) و افزودن ۲ درصد نانو پودر CeO_2 بر روی لایه اول در طول مسیر پوشش کاری. (الف) تنش بیشینه. (ب) دمای بیشینه. (ج) نسبت تنش بیشینه به دمای بیشینه.



شکل ۵ تصویری از ویژگی‌های فرآیندی با افزودن ۲ درصد نانو پودر CeO_2 برای اولین لایه در لحظه $t=5$ ثانیه. (الف) کانتورهای هم‌دما درجه حرارت (برحسب کلوین) برای سطح $y=0$ میلی‌متر. (ب) کانتورهای تنش (برحسب پاسکال) برای سطح $y=0$ میلی‌متر. (ج) تصویر سه بعدی از لایه تشکیل شده بر روی سطح قطعه کار.



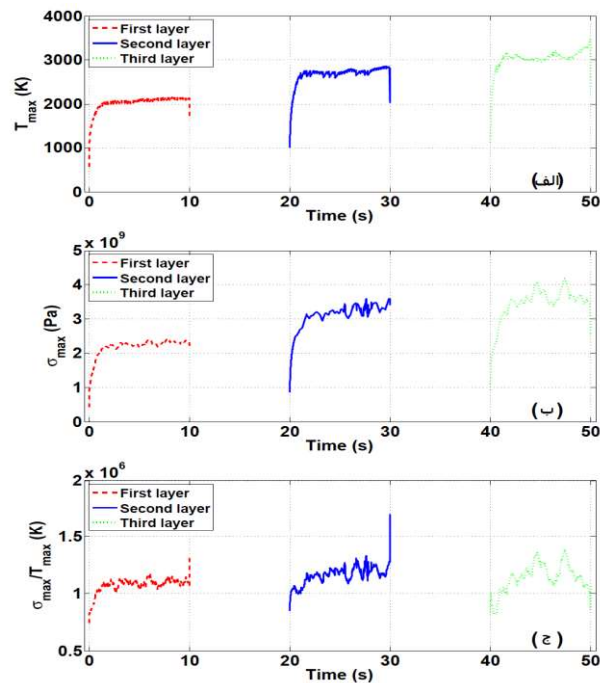
شکل ۶ نسبت تنش بیشینه به دمای بیشینه در طول مسیر پوشش کاری مرتبط با لایه دوم برای شرایط مختلف پیش گرمایش (۵۰۰ کلوین) و افزودن ۲ درصد نانو پودر CeO_2 .

در اینجا، به منظور بررسی کامل فرآیند پوشش‌کاری سه‌لایه‌ای، نتایج عددی مربوط به لایه‌های دیگر ارائه می‌شوند. در شکل (۶)، نسبت تنش بیشینه به دمای بیشینه در طول مسیر پوشش‌کاری مرتبط با لایه دوم در شرایط مختلف با (بدون) پیش‌گرمایش و با (بدون) افزودن ۲٪ نانو پودر CeO_2 ارائه و مقایسه می‌شود. همانطور که مشاهده می‌کنید، برای لایه دوم اثر افزودن ۲٪ نانو پودر CeO_2 و پیش‌گرمایش تأثیر شدیدی در نسبت تنش بیشینه به دمای بیشینه ایجاد می‌کند. برخلاف لایه اول که در آن افزودن نانو پودر تأثیر بسزایی در نسبت مذکور نداشت (توضیحات شکل ۴)، افزودن ۲٪ نانو پودر CeO_2 سبب کاهش نسبت تنش بیشینه به دمای بیشینه برای لایه دوم شد که دلیل آن می‌تواند به هندسه سطح و خواص حرارتی-فیزیکی لایه اول زیرین و همچنین ترکیبات مواد کامپوزیت بازگردد. در ادامه، وابستگی زمانی برخی مشخصه‌های فرآیند از جمله دمای بیشینه و تنش بیشینه و نسبت آن‌ها به عنوان پارامترهایی که رفتار زمانی آنها جالب توجه است، را بررسی می‌کنیم. در شکل (۷)، نتایج به‌دست‌آمده برای لایه‌های اول و دوم و سوم در فواصل زمانی که لیزر روشن است، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۷) الف مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن زمان به پایان فرآیند پوشش‌کاری ($t = 50$ ثانیه)، دمای بیشینه افزایش می‌یابد که به وضوح بیانگر اثر پیش‌گرمایش در افزایش دمای بیشینه است. رفتار مشابهی نیز برای تنش بیشینه مشاهده می‌شود که در شکل (۷) ب نشان داده شده است. اما همان‌طور که در شکل (۷) ج ترسیم شده است، میانگین نسبت بیشینه تنش به دمای بیشینه مرتبط با لایه سوم تفاوت چندانی با لایه دوم ندارد.

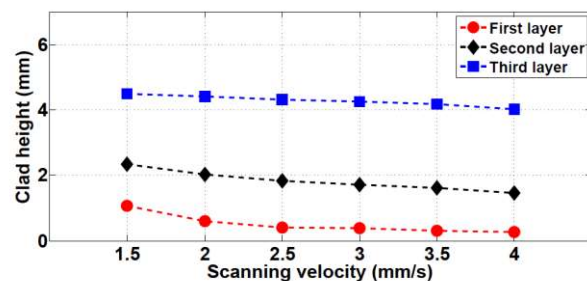
در نهایت، با انجام مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها با سرعت‌های روبش مختلف، وابستگی ارتفاع لایه به سرعت روبش لیزر بررسی شد که نتایج برای لایه‌های اول و دوم و سوم در شکل (۸) ارائه شده است. ارتفاع لایه براساس روش معرفی شده توسط تویسرکانی [۲۳] محاسبه شد.

۴. نتیجه‌گیری

به طور خلاصه، مدل‌سازی سه‌بعدی فرآیند پوشش‌کاری لیزری با تزریق پودر به طور گسترده‌ای بر اساس FEM ارائه شد. از ماژول ALE جهت انجام شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی استفاده شد. مشخصه‌های کلیدی فرآیند از جمله دمای بیشینه و تنش بیشینه و نسبت آن‌ها و ارتفاع نهایی پوشش حاصل از سه لایه تولیدشده محاسبه شد و رفتار زمانی آن‌ها نیز بررسی شد. برای اولین بار (تا آنجا که نویسندگان اطلاع دارند)، اثرات پیش‌گرمایش و افزودن ۲٪ نانو پودر CeO_2 به پودر Inconel 625 بر روی AISI 4140، به طور نظری بررسی شد. با مقایسه مقادیر نسبت تنش بیشینه به دمای بیشینه، مشخص شد بدون پیش‌گرمایش، افزودن ۲٪ نانو پودر CeO_2 ، تأثیر چندانی در لایه



شکل ۷ تغییرات زمانی مشخصه‌های مختلف فرآیند پوشش کاری لیزری با تزریق پودر برای لایه‌های اول و دوم و سوم. (الف) تغییرات دمای بیشینه برحسب زمان. (ب) تغییرات تنش بیشینه برحسب زمان (ج) تغییرات نسبت تنش بیشینه به دمای بیشینه برحسب زمان.



شکل ۸ ارتفاع لایه برای سرعت‌های مختلف روبش لیزر در لایه‌های اول، دوم و سوم برای فرآیند پوشش کاری لیزری با تزریق پودر شامل ۲٪ نانو پودر CeO_2 .

اول ایجاد نمی‌کند، درحالی که کاهش این نسبت در لایه دوم چشمگیر و مؤثر بود. در حضور پیش‌گرمایش تا ۵۰۰ کلوین و افزودن ۲٪ نانو پودر CeO_2 ، نسبت بیشینه تنش به دما برای لایه اول کاهش یافت که می‌تواند به کاهش تشکیل ترک انجامیده و لذا خواص میکروسختی را بهبود

بخشد. همچنین، با انجام مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها، وابستگی ارتفاع لایه به سرعت روبش لیزر بررسی شد. اگرچه افزودن نانو ذرات در پودر باعث افزایش ارتفاع لایه می‌شود، اما سرعت روبش تأثیر شدیدی در ارتفاع نهایی لایه دارد. با افزایش سرعت روبش لیزر، ارتفاع لایه‌ها کاهش یافت. لذا، براساس مشخصات مدنظر می‌توان محدوده بهینه‌ای برای سرعت روبش لیزر تعیین کرد. مواد انتخاب‌شده برای پودر و قطعه کار را می‌توان از جمله برجستگی‌های کلیدی این تحقیق به شمار آورد، چرا که مستقیماً در تولید کارآمد پروانه‌های کمپرسور کاربرد دارند. در پاسخ به خواسته دائمی صنایع پردازش فلزی که همان بهبود کیفیت محصولات و کاهش هزینه‌ها است، نتایج عددی حاصل از این تحقیق می‌تواند ارتباطات پیچیده میان پارامترهای مؤثر در فرآیند پوشش کاری را بیان کند. شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی ارائه‌شده در این تحقیق با پروژه‌های واقعی در لبه‌های پیشرفته صنعت [۱۳] منطبق است و تصویری کامل را با جزئیات به منظور دستیابی به طراحی و ساخت بهینه قطعات فلزی ایجاد می‌کند. هدف از این تحقیق پیشبرد و هموارسازی مسیر چاپ سه‌بعدی قطعات آلیاژی با کاربرد مستقیم در چاپ و ساخت سه‌بعدی قطعات مکانیکی موردنیاز صنایع نفت و گاز چون پروانه‌های کمپرسور بوده است. بی‌شک، شناخت فرآیندهایی با کاربردهای بسیار حساس صنعتی و فناوری‌محور و درک عمیق از آنها، امری بس حیاتی و مقرون‌به‌صرفه می‌باشد.

منابع

- [1] Fayaz G. R. and Kazemzadeh S., "Towards additive manufacturing of compressor impellers: 3D modeling of multilayer laser solid freeform fabrication of nickel alloy 625 powder mixed with nano-CeO₂ on AISI 4140", *Addit. Manufac.* **20** (2018) 182-188.
- [2] Han L., Phatak K.M., Liou F.W., "Modeling of laser cladding with powder injection", *Metall. Mater. Trans. B* **35** (2004) 1139-1150.
- [3] Picasso M., Marsden C.F., Wagniere J.D., Frenk A., Rappaz M., "A simple but realistic model for laser cladding", *Metall. Mater. Trans. B* **25** (2) (1994) 281-291.
- [4] Alimardani M., Toyserkani E., Huissoon J.P., "A 3D dynamic numerical approach for temperature and thermal stress distributions in multilayer laser solid freeform fabrication process", *Opt. Lasers Eng.* **45** (12) (2007) 1115-1130.
- [5] Navas C., Conde A., Cadenas M., de Damborenea J., "Tribological properties of laser clad stellite 6 coatings on steel substrates", *Surf. Eng.* **22** (1) (2006) 26-34.
- [6] Wang H., Zuo D., Li X., Chen K., Huang M., "Effects of CeO₂ nanoparticles on microstructure and properties of laser clad NiCoCrAlY coatings", *J. Rare Earths* **28** (2010) 246-250.

- [7] Navas C., Conde A., Fernández B., Zubiri F., de Damborenea J., "Laser coatings to improve wear resistance of mould steel", *Surf. Coat. Technol.* **194** (1) (2005) 136–142.
- [8] Darmawan W., Quesada J., Rossi F., Marchal R., Machi F., Usuki H., "Improvement in wear characteristics of the AISI M2 by laser cladding and melting", *J. Laser Appl.* **21** (4) (2009) 176–182.
- [9] Zhang S.H., Li M.X., Cho T.Y., Yoon J.H., Lee C.G., He Y.Z., "Laser clad Ni-base alloy added nano- and micron-size CeO₂ composites", *Opt. Laser Technol.* **40** (5) (2008) 716–722.
- [10] Jianing L., Chuazhong C., Cuifang Z., "Effect of nano-CeO₂ on microstructure properties of TiC/TiN+nTi(CN) reinforced composite coating", *Bull. Mater. Sci.* **35** (3) (2012) 399–404.
- [11] Ding L., Hu S., "Effect of nano-CeO₂ on microstructure and wear resistance of Co-based coatings", *Surf. Coat. Technol.* **276** (2015) 565–572.
- [12] Li J., Chen C., Hu J., "Effect of SiC/nano-CeO₂ on wear resistance and microstructures of Ti₃Al/Y-Ni matrix laser-cladded composite coating on Ti-6Al-4V alloy", *Surf. Interface Anal.* **44** (5) (2012) 559–564.
- [13] Andolfi A., Mammoliti F., Pineschi F., Catastini R., "Advanced laser cladding application for oil and gas components", *GE Oil Gas Newslett.* (2012) 164–173.
- [14] Tahmasbi H.R., Fayaz G.R., "Three dimensional finite element modeling of laser solid freeform fabrication of turbine blades", *Optik* **126** (22) (2015) 3382–3384.
- [15] Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S., Laser Cladding, CRC Press, 2004.
- [16] Carslaw H., Jaeger J., *Conduction of Heat in Solids*, Oxford science publications (Clarendon Press, 1986).
- [17] White F.M., *Heat Transfer* (Addison-Wesley Longman, 1984).
- [18] Morville S., Carin M., Peyre P., Gharbi M., Carron D., Masson P.L., Fabbro R., "2D longitudinal modeling of heat transfer and fluid flow during multilayered direct laser metal deposition process", *J. Laser Appl.* **24** (3) (2012) 032008.
- [19] Mase G., Smelser R., Smelser R., Mase G., *Continuum Mechanics for Engineers, CRC Series in Computational Mechanics and Applied Analysis* (Taylor and Francis, 2009).
- [20] Noda N., *Thermal Stresses* (Taylor & Francis, 2002).
- [21] Gan Z., Yu G., He X., Li S., "Numerical simulation of thermal behavior and multicomponent mass transfer in direct laser deposition of Co-base alloy on steel", *Int. J. Heat Mass Transf.* **104** (2017) 28–38.
- [22] Lampa C., Kaplan A.F.H., Powell J., Magnusson C., "An analytical thermodynamic model of laser welding", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **30** (9) (1997) 1293.
- [23] Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S., "Three-dimensional finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of powder feedrate and travel speed on the process", *J. Laser Appl.* **15** (3) (2003) 153–160.