

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG PHÂN BỐ NHIỆT TRONG CÔNG NGHỆ SẢN XUẤT BỒI ĐẮP

SIMULATION RESEARCH ON TEMPERATURE DISTRIBUTION IN ADDITIVE MANUFACTURING

ThS. Nguyễn Thái Sơn¹, PGS, TS. Nguyễn Chí Sáng², PGS, TS. Trần Ngọc Hiền^{3,*}

¹Trung tâm Khoa học Công nghệ Giao thông vận tải,
Trường Đại học Giao thông vận tải, NCS. Viện Nghiên cứu Cơ khí

²Viện Nghiên cứu Cơ khí

³Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông vận tải

*Email: tranhien.tkm@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Xác định chính xác nhiệt độ trong quá trình in rất quan trọng đối với sản xuất bồi đắp. Nhiệt độ quá nhỏ hay quá lớn đều ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm in. Để đảm bảo chất lượng sản phẩm in, nhiệt độ trong quá trình in phải lớn hơn nhiệt độ chảy của vật liệu in. Nghiên cứu này xác định ảnh hưởng của các thông số công nghệ in tới phân bố nhiệt độ khi in vật liệu bột Ti6Al4V theo phương pháp in nóng chảy laser chọn lọc (SLM). Các thông số công nghệ in SLM bao gồm công suất nguồn laser, vận tốc in, chiều dày lớp in. Kết quả nghiên cứu cho phép xác định bộ thông số công nghệ hợp lý khi tiến hành in trên máy in 3D.

Từ khoá: Phân bố nhiệt khi in; Thông số công nghệ in; Sản xuất bồi đắp; Nóng chảy laser chọn lọc; Vật liệu bột Ti6Al4V.

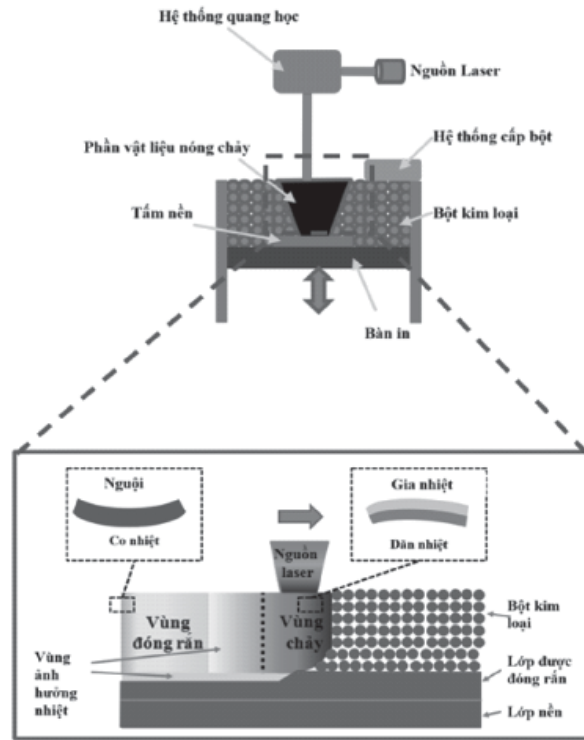
ABSTRACT

Determining the exact temperature during the printing process is very important for additive manufacturing. Too low or too high of temperature affects the quality of the printed product. To ensure the quality of the printed product, the temperature during the printing process must be higher than the melting temperature of the printed material. This study determines the influence of printing parameters on the temperature distribution when printing Ti6Al4V powder material using the selective laser melting (SLM) printing method. The SLM printing parameters include laser power, printing speed, and printing layer thickness. The research results allow determining the reasonable values of printing parameters when printing on a real 3D printer.

Keywords: Temperature distribution; Printing parameters; Additive manufacturing; Selective laser melting; Ti6Al4V powder material.

1. GIỚI THIỆU

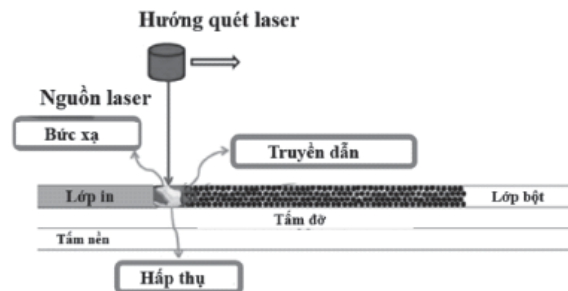
Công nghệ sản xuất bồi đắp (Additive Manufacturing, viết tắt AM) đã và đang được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực từ giáo dục, y tế đến các ứng dụng công nghiệp. Với sự phát triển của khoa học công nghệ và vật liệu mới, ngày nay công nghệ AM không những được sử dụng để tạo ra các sản phẩm mẫu (thường là vật liệu nhựa) trong giai đoạn thiết kế mà còn được sử dụng để tạo các chi tiết, sản phẩm cuối cùng với vật liệu kim loại [1]. Trong công nghệ AM, có nhiều phương pháp in đã và đang được áp dụng. Phương pháp in nóng chảy laser chọn lọc (SLM) là một trong những phương pháp in được dùng để tạo sản phẩm từ bột kim loại [2]. Hình 1 thể hiện cơ chế in SLM. Ban đầu lớp bột kim loại được rải trên tấm nền, nguồn laser thông qua hệ thống quang học làm nóng chảy lớp bột và hình thành lớp in đầu tiên. Để in lớp thứ hai, bàn in được dịch chuyển xuống theo phương thẳng đứng một lượng bằng chiều dày lớp in. Hệ thống cấp bột rải lớp bột mới lên lớp vừa in. Sau đó, lớp bột này được làm nóng chảy bởi năng lượng laser để hình thành lớp thứ hai. Quá trình này được lặp lại đến hết chiều cao của chi tiết cần in [3]. Để đảm bảo được các yêu cầu làm việc, chi tiết in phải thỏa mãn các yêu cầu về độ chính xác kích thước, độ chính xác hình dạng, chất lượng bề mặt và các thuộc tính cơ khí. Tuy vậy, cơ chế in phức tạp với sự thay đổi trạng thái của vật liệu từ rắn (trạng thái ban đầu) đến lỏng (giai đoạn nóng chảy) và cuối cùng là trạng thái rắn (sau khi in xong), thời gian chuyển trạng thái ngắn dẫn đến ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm in. Chính vì vậy, nghiên cứu nhằm nâng cao năng suất, chất lượng sản phẩm luôn được các nhà nghiên cứu, đơn vị ứng dụng quan tâm. Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu về phân bố nhiệt khi in theo phương pháp SLM trong mối liên hệ với các thông số công nghệ của quá trình in.



Hình 1. Cơ chế in SLM [3]

2. MÔ HÌNH TRUYỀN NHIỆT CỦA QUÁ TRÌNH IN SLM

Khi nguồn laser quét trên bề mặt lớp bột, năng lượng được truyền từ lớp trên cùng xuống các lớp dưới thông qua nhiều thay đổi vật lý khác nhau, chẳng hạn như: truyền nhiệt, bức xạ, đối lưu, dẫn nhiệt, dòng chất lỏng chảy trong vùng nóng chảy, nóng chảy, bay hơi và phản ứng hóa học [3].



Hình 2. Mô hình truyền nhiệt khi in SLM [4]

Mô hình toán để xác định nhiệt độ trong quá trình in trong mối liên hệ với thuộc tính nhiệt của vật liệu, thông số công nghệ in được thể hiện như sau [5]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C u \nabla T = \nabla(k \nabla T) + Q_{nguồn\ nhiệt} \quad (1)$$

Với T là nhiệt độ (K); ρ là khối lượng riêng của vật liệu (kg/m³); C là nhiệt dung (J/(kg.K)); k là độ dẫn nhiệt (W/(m.K)); u là vận tốc in (m/s); Q_{nguồn nhiệt} là năng lượng laser phân bố cho vùng cần in của lớp in (W/m³). Năng lượng nguồn laser được xác định trên cơ sở là tổng năng lượng hấp thụ, truyền dẫn và bức xạ như thể hiện ở Hình 2.

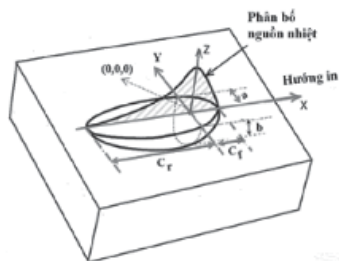
Năng lượng laser phân bố cho vùng cần in được xác định như sau:

$$Q_{nguồn\ nhiệt} = Q_{công\ suất\ yêu\ cầu} + Q_{dẫn\ nhiệt} \quad (2)$$

$$Q_{công\ suất\ yêu\ cầu} = Q_{nguồn\ laser\ đến} - Q_{đổi\ lưu} - Q_{bức\ xạ} - Q_{dẫn\ nhiệt} \quad (3)$$

Hình 3 thể hiện các thông số của mô hình Goldak biểu diễn phân bố năng lượng laser [6], các thông số và giá trị tương ứng được sử dụng cho mô phỏng được thể hiện ở Bảng 1. Năng lượng công suất laser yêu cầu theo mô hình Goldak được xác định như sau:

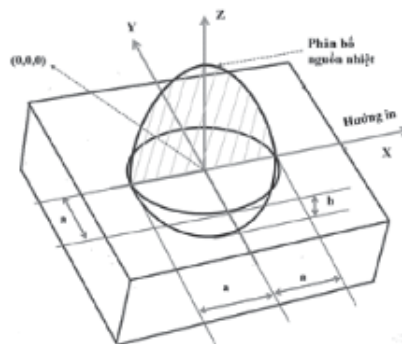
$$Q_{công\ suất\ yêu\ cầu} = Q \frac{6\sqrt{3}}{ab\pi\sqrt{\pi}} e^{\left[\frac{-3z^2}{b^2} + \frac{-3y^2}{a^2}\right]} \left[\frac{f_f}{C_f} e^{\frac{-3x^2}{C_f^2}} + \frac{f_r}{C_r} e^{\frac{-3x^2}{C_r^2}} \right] \quad (4)$$



Hình 3. Mô hình Goldak biểu diễn phân bố năng lượng laser

Hình 4 thể hiện mô hình Gauss biểu diễn phân bố năng lượng laser [7, 8]. Năng lượng công suất laser yêu cầu theo mô hình Gauss được xác định như sau:

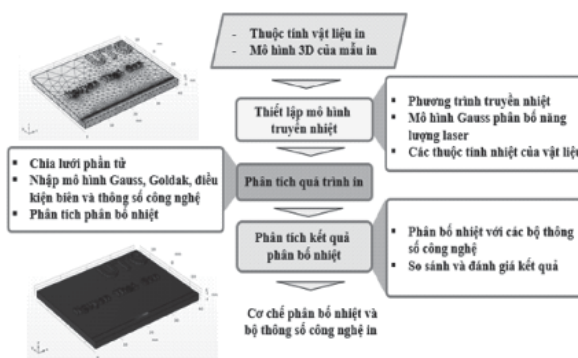
$$Q_{công\ suất\ yêu\ cầu} = 2Q \frac{6\sqrt{3}}{a^2 b \pi \sqrt{\pi}} e^{\left[\frac{-3z^2}{b^2} + \frac{-3y^2}{a^2} + \frac{-3x^2}{a^2}\right]} \quad (5)$$



Hình 4. Mô hình Gauss biểu diễn phân bố năng lượng laser

3. PHÂN BỐ NHIỆT TRONG QUÁ TRÌNH IN SLM

Để xác định phân bố nhiệt trong quá trình in, các bước thực hiện được thể hiện trên Hình 5.



Hình 5. Các bước xác định phân bố nhiệt và bộ thông số công nghệ

Cơ chế phân bố nhiệt và bộ thông số công nghệ in đã được xác định ứng dụng phần

mềm Comsol với các bước từ thiết lập mô hình truyền nhiệt, phân tích quá trình in tới phân tích kết quả phân bố nhiệt. Trong bước thiết lập mô hình truyền nhiệt, mô hình nhiệt (1), mô hình Gauss, mô hình Goldak thể hiện năng lượng laser phân bố (4) (5) và các thuộc tính vật liệu được nhập vào môi trường Comsol. Để phân tích quá trình in, phương pháp phần tử hữu hạn được áp dụng, mô hình in được chia lưới cho phân tích; điều kiện biên và các thông số công nghệ in được thiết lập. Kết quả phân bố nhiệt với các bộ thông số công nghệ in khác nhau

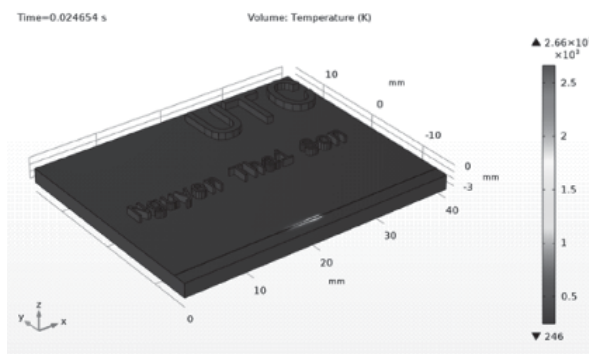
như công suất nguồn laser, vận tốc in, chiều dày lớp in, và khoảng cách giữa các đường in nhằm xác định được bộ thông số công nghệ in phù hợp.

Trong nghiên cứu này, vì tính chất lặp lại của các đường in nên chỉ nghiên cứu quá trình in một đường đơn để xác định giá trị của nhiệt độ khi in. Bảng 1 thể hiện các giá trị được sử dụng để xác định trường nhiệt với mô hình Goldak và mô hình Gauss.

Bảng 1. Giá trị của các thông số mô phỏng [9, 10]

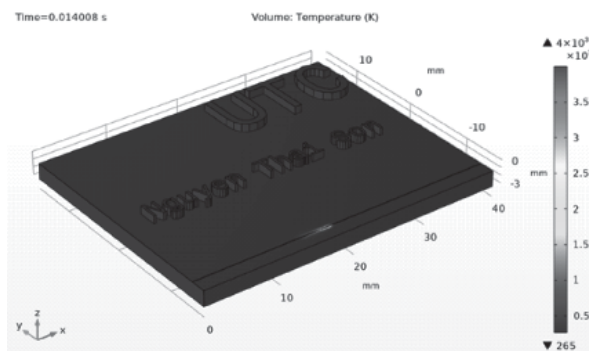
Ký hiệu	Thông số	Mô hình Goldak	Mô hình Gauss
x_0	Tọa độ x ban đầu	0 [mm]	0 [mm]
y_0	Tọa độ y ban đầu	0 [mm]	0 [mm]
Q	Công suất nguồn laser từ máy	150 [W]	150 [W]
a	Chiều rộng chùm tia laser theo trục y	0.4205 [mm]	0.4205 [mm]
b	Chiều sâu thâm nhập của chùm tia laser theo trục z	0.1682 [mm]	0.1682 [mm]
C_f	Chiều dài phân bố phía trước của chùm tia laser theo trục x	0.4205 [mm]	0.4205 [mm]
C_r	Chiều dài phân bố phía sau của chùm tia laser theo trục x	0.84 [mm]	0.4205 [mm]
f_f	Hệ số nguồn nhiệt phía trước của chùm tia laser	2/3	1
f_r	Hệ số nguồn nhiệt phía sau của chùm tia laser	4/3	1
u	Vận tốc in	1500 [mm/s]	1500 [mm/s]
C	Nhiệt dung	$710 \cdot 10^{-3}$ [J/(g.K)]	$710 \cdot 10^{-3}$ [J/(g.K)]
k	Hệ số dẫn nhiệt	$7.5 \cdot 10^{-3}$ [W/(mm.K)]	$7.5 \cdot 10^{-3}$ [W/(mm.K)]
T_a	Nhiệt độ môi trường	293 [K]	293 [K]
h_c	Hệ số truyền nhiệt đối lưu	186.3 [W/(mm ² .K)]	186.3 [W/(mm ² .K)]
h_r	Hệ số truyền nhiệt bức xạ	4.4 [W/(mm ² .K)]	4.4 [W/(mm ² .K)]
h	Chiều dày lớp in	0.045 [mm]	0.045 [mm]
Ha	Khoảng cách giữa hai đường in	0.07 [mm]	0.07 [mm]





Hình 6. Phân bố nhiệt với mô hình Gauss

Hình 6 mô tả trường nhiệt độ khi in SLM cho vật liệu hợp kim Titan với các thông số mô hình Gauss như trong bảng 1. Với mô hình Gauss, áp dụng với công suất nguồn laser là 150 W, vận tốc in là 400 mm/s, nhiệt độ tại vùng nóng chảy vật liệu đạt được là $T_m = 2660$ K.



Hình 7. Phân bố nhiệt với mô hình Goldak

Áp dụng với mô hình Goldak, trong cùng điều kiện giống nhau về công suất (150 W), vận tốc in (400 mm/s), nhiệt độ tại vùng nóng chảy vật liệu đạt được là $T_m = 4000$ K.

Lặp lại quá trình trên với các bộ thông số công nghệ in khác nhau (trong trường hợp nghiên cứu này chỉ thay đổi công suất nguồn laser và vận tốc in), giá trị của T_m được thể hiện ở Bảng 2. Trong đó với công suất nguồn laser 150 W, giá trị của chiều sâu thâm nhập của chùm laser là 1.682 mm (như thể hiện ở

bảng 1); với công suất nguồn lớn hơn, giá trị của chiều sâu thâm nhập của chùm laser sẽ lớn hơn. Cụ thể, với công suất nguồn laser là 250 W giá trị của $b = 0.35$ mm; với công suất nguồn laser là 350 W giá trị của $b = 0.5$ mm đã được sử dụng cho quá trình mô phỏng.

Bảng 2. Giá trị nhiệt độ tại vùng nóng chảy (T_m) với mô hình Goldak và Gauss

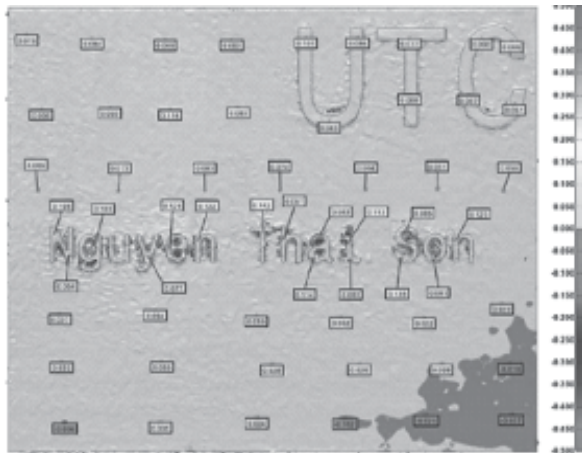
STT	Nguồn laser (W)	Vận tốc in (mm/s)	Mô hình Goldak T_m (K)	Mô hình Gauss T_m (K)
1	150	400	4000	2610
2	350	400	4030	2750
3	150	1500	3630	2480
4	350	1500	3900	2720
5	250	950	4090	2660

Từ kết quả Bảng 2 ta nhận thấy rằng, với công suất nguồn laser 150 W, 250 W, và 350 W; vận tốc in 400 mm/s, 950 mm/s, và 1500 mm/s giá trị trường nhiệt độ áp dụng mô hình Gauss và mô hình Goldak đều lớn hơn nhiệt độ chảy yêu cầu của vật liệu hợp kim Titan là 1877 K [11]. Tuy vậy, giá trị đạt được thông qua mô phỏng áp dụng mô hình Goldak là quá lớn, và đều lớn hơn nhiệt độ bay hơi của vật liệu hợp kim Titan là 3533 K [12].

Từ kết quả Bảng 2, áp dụng mô hình Gauss, giá trị nguồn công suất laser $Q = 150$ W và vận tốc in $u = 1500$ mm/s là phù hợp cho quá trình in SLM với vật liệu hợp kim Titan. Sử dụng kết quả này với bộ thông số công nghệ $Q = 150$ W, $u = 1500$ mm/s và chiều dày in 0.03 mm, kết quả in trên máy in 3D FF-M180D với bột hợp kim Titan được thể hiện ở Hình 8.



Hình 8. Mẫu in 3D trên máy in FF-M180D



Hình 9. Đánh giá độ chính xác hình học của mẫu in 3D

Kết quả mẫu in có độ chính xác hình học đạt được cao thông qua phương pháp quét 3D mẫu in và so sánh với mô hình 3D ban đầu như thể hiện ở Hình 9 với độ lệch là 0.142 mm (thể hiện bởi màu đỏ).

4. KẾT LUẬN

Xác định phân bố nhiệt trong quá trình in SLM trong mối liên hệ với các thông số công nghệ in là rất cần thiết đối với quá trình in thực tế nhằm sử dụng hiệu quả thiết bị và đảm bảo

chất lượng sản phẩm in. Nghiên cứu này đề xuất bộ thông số công nghệ in phù hợp cho quá trình in SLM trên cơ sở xác định giá trị nhiệt độ nóng chảy T_m của vật liệu hợp kim Ti6Al4V. Để xác định được T_m , phương trình truyền nhiệt đã được thiết lập với mô hình phân bố nguồn nhiệt laser được xét theo cả mô hình phân bố Goldak và mô hình phân bố Gauss. Trên cơ sở đó, phần mềm Comsol với phương pháp phần tử hữu hạn đã được sử dụng để mô phỏng phân bố trường nhiệt độ khi in theo phương pháp in SLM. Từ kết quả mô phỏng bộ thông số công nghệ bao gồm công suất nguồn laser 150 W, vận tốc in 1500 mm/s, và chiều sâu in 0.03 mm đã được sử dụng để in trên máy in 3D – FF-M180D. Kết quả mẫu in cho độ chính xác hình học cao.


Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo thông qua đề tài mã số B2025-GHA-06. ❖

Ngày nhận bài: 09/6/2025

Ngày phản biện: 30/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Kumar R., Kumar M., Chohan J.S., “The role of additive manufacturing for biomedical applications: A critical review”. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64, 828-850.
- [2]. Rasiya G., Shukla, A., Saran, K., “Additive Manufacturing-A Review”. Materials Today: Proceedings, 2021, 47, 6896-6901.
- [3]. Fu C.H., Guo Y.B., “3-Dimensional finite element modeling of selective laser melting Ti-6Al-4V alloy”. Proc 25th Annu Int Solid Freeform Fabr Symp, 2014, 1129-1144.
- [4]. Park H.S., Ansari M.J., “Numerical investigation and an effective predicting system on the Selective Laser Melting (SLM) process with Ti6Al4V alloy”. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2008, 400, 042046. 

- [5]. Roberts I.A., “*Investigation of residual stresses in the laser melting of metal powders in additive layer manufacturing*”. Dissertation, University of Wolverhampton, 2012.
- [6]. Samad Z., Nor N.M., Fauzi E.R.I., “*Thermo-mechanical simulation of temperature distribution and prediction of heat-affected zone size in MIG welding process on aluminium alloy EN AW 6082-T6*”. IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng. 2019, 530.
- [7]. Zhang Z., Huang Y., Kasinathan A.R., Shahabad S.I., Ali U., Mahmoodkhani Y., Toyserkani E., “*3-Dimensional heat transfer modeling for laser powder-bed fusion additive manufacturing with volumetric heat sources based on varied thermal conductivity and absorptivity*”. Opt. Laser Technol. 2019, 109, 297-312.
- [8]. Liu S., Zhu H., Peng G., Yin J., Zeng X., “*Microstructure prediction of selective laser melting AlSi10Mg using finite element analysis*”. Mater. Des. 2018, 142, 319-328.
- [9]. Nain V., Engel T., Carin M., Boisselier D., Seguy L., “*Development of an elongated ellipsoid heat Source model to reduce computation time for directed energy deposition process*”. Front Mater, 2021, 8:747389
- [10]. Ansari P., Rehman A.U., Pitir F., Veziroglu S., Mishra Y.K., Aktas O.C., Salamci M.U., “*Selective Laser Melting of 316L Austenitic Stainless Steel: Detailed Process Understanding Using Multiphysics Simulation and Experimentation*”. Metals, 2021, 11, 1076.
- [11]. John J.Z.L., William L.J., Rhima W.K., “*Thermal expansion of liquid Ti-6Al-4V measured by electrostatic levitation*”. Applied Physics Letters, 2006, 89, 111913.
- [12]. Nain V., “*Efficient thermomechanical modeling of large parts fabricated by Directed Energy Deposition Additive Manufacturing processes*”. PhD Thesis, 2023.