

NGHIÊN CỨU CÔNG NGHỆ SỬA CHỮA ĐẦU CHỐT NỐI CÁNH TUABIN HƠI NƯỚC THÉP KHÔNG GỈ AISI 422SS BẰNG CÔNG NGHỆ IN 3D LASER BỘT

REPAIR TENON OF STEAM TURBINE BLADE AISI 422 STAINLESS STEEL USING
LASER 3D PRINTING METAL POWDER PROCESS

Trần Lâm

Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

Email: lam.tran@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Mục đích của bài báo là nghiên cứu công nghệ sửa chữa đầu nối của cánh tuabin hơi nước bằng quá trình in 3D laser bột thép không gỉ AISI 422 (422 SS) lên cánh tuabin có vật liệu tương tự. Việc phân tích, so sánh cấu trúc tế vi và cơ tính của cả kim loại cơ bản và lớp bột kim loại in trong cả hai trường hợp in một lớp và in nhiều lớp nhằm tìm ra bộ thông số phù hợp cho quá trình hàn in 3D laser bột kim loại. Trong báo cáo, các thí nghiệm đo độ bền kéo, độ dai va đập và độ cứng được tiến hành để xác định cơ tính của cả kim loại cơ bản và lớp kim loại in 3D. Các kết quả thí nghiệm cho thấy kích thước hạt của lớp kim loại in 3D nhỏ hơn so với kim loại cơ bản trong cả hai điều kiện ngay sau khi in 3D và sau khi xử lý nhiệt và điều này làm tăng độ cứng lớp kim loại in so với kim loại cơ bản. Với quá trình in laser 3D nhiều lớp, các kết quả thí nghiệm đo độ bền kéo và độ dai va đập của lớp kim loại in sau khi xử lý nhiệt có độ bền kéo cao hơn nhưng độ dai va đập tương đương so với kim loại cơ bản. Sau khi thí nghiệm với các cánh tuabin thử nghiệm khi lắp vào rotor cho thấy các đầu nối sau khi được sửa chữa, phục hồi bằng quá trình in laser 3D bột kim loại nhiều lớp có khả năng chịu tải kéo lớn hơn so với kim loại cơ bản nên hoàn toàn có thể sử dụng công nghệ in 3D laser bột để sửa chữa, phục hồi các cánh tuabin khi đầu chốt nối bị hỏng.

Từ khóa: AISI 422 SS; In Laser 3D bột kim loại nóng chảy; Cánh tua bin hơi nước; Sửa chữa đầu chốt nối cánh tuabin.

ABSTRACT

The purpose of this investigation was to study the tenon repairs of steam turbine blade using laser 3D powder fusion process by added AISI 422 stainless steel (SS) powder on a 422 SS used blade. The microstructures analysis, mechanical properties tests of base metal (BM) and printing layer in both single layer and multi-layer processes with various process parameters were analyzed and compared to find out the adequate laser 3D printing metal powder process parameters. In this study, tensile test, impact test and microhardness test were carried out to characterize the mechanical properties of both BM and printed metal layer. Experimental results showed the grain size of printing metal layer was smaller than that of BM either in the as- printed condition and the 700°C/2h tempered condition; these small grains also increased the hardness of printed metal layer.

In the multi-layer laser printing condition, the results of tensile and impact test showed the printed metal layer after 700°C/2h tempering had higher tensile strength than the BM did, while both printed metal layer and BM possess approximately the same impact energy. Experimental results of mock-up trials showed that the repaired tenons, through multi-layer laser 3D printing process, can sustain higher tensile loads than the BM after pinning deformation.

Keywords: AISI 422 SS; Laser 3D powder fusion; Steam turbine blade; Tenon repair.

1. TỔNG QUAN

Trong những năm gần đây, việc ứng dụng thép không gỉ martensitic để chế tạo các bộ phận sử dụng trong môi trường ăn mòn và/hoặc nhiệt độ cao, chẳng hạn như ống hơi nhiệt độ cao, cánh tua bin hơi nước, rôto,... đã mang lại kết quả thành công và đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng từ ngành sản xuất điện [1]. Thép không gỉ loại 422 là một biến thể của thép không gỉ martensitic AISI 420 đã được cải tiến với thành phần hóa học được bổ sung Molypden và Wolfram, được thiết kế để có thể hoạt động ở nhiệt độ lên đến 650°C mà vẫn đảm bảo độ bền và độ dai cần thiết. Ứng dụng chủ yếu của loại thép không gỉ này là làm cánh tua bin, van áp suất và các bộ phận kết cấu của máy bay [2].

Trong quá trình kiểm tra định kỳ tại một nhà máy điện hạt nhân, các yếu tố quan trọng nhất gây ra hư hỏng hủy lớn cho cánh tua bin hơi nước là các chót bị mòn/gãy của cánh tua bin áp suất cao được tán đinh để cố định các vỏ rotor. Do đó, cần phải sửa chữa các chót bị hỏng hoặc thay thế các chót mới trước khi đưa tua bin trở lại hoạt động. Với mục đích giảm chi phí vận hành, nhu cầu sửa chữa các chót bị hỏng là rất lớn. Bên cạnh phương pháp sửa chữa truyền thống, có thể áp dụng quy trình tiên tiến hơn được gọi là in 3D laser bột, là một trong những ứng dụng quan trọng trong gia công vật liệu laser, được đề xuất để tiến hành công việc sửa chữa, phục hồi các chi tiết quan trọng [3]. Việc sửa chữa này được thực hiện bằng cách

dựng lại chót (Tenon) bị hỏng bằng quy trình in 3D laser. Với các cánh tua bin hơi nước đã qua sử dụng được làm bằng thép không gỉ 422 martensitic sẽ được nghiên cứu sửa chữa, phục hồi bằng quá trình in 3D laser sử dụng bột thép không gỉ 422 cùng loại.

Mục đích chính của bài báo này là tìm ra các thông số quy trình in 3D laser bột thích hợp để sửa chữa, phục hồi chót của cánh tuabin. Do vậy, việc nghiên cứu tác động của các thông số quy trình (công suất nguồn laser, tốc độ cấp bột) cho quy trình in 3D laser nhiều lớp lên các mẫu phôi là rất quan trọng. Cuối cùng, các thử nghiệm mô phỏng được tiến hành bằng cách sử dụng sự các thông số tối ưu cho quá trình in 3D laser nhiều lớp kim loại để tạo chót trên cánh tuabin mô phỏng và sau đó kiểm tra cơ tính của liên kết chót.

2. VẬT LIỆU, THIẾT BỊ NGHIÊN CỨU VÀ QUÁ TRÌNH THỰC NGHIỆM

2.1. Vật liệu, thiết bị nghiên cứu

Cánh tuabin thép không gỉ AISI 422 (Kim loại cơ bản-KLCB) đã qua sử dụng và bột thép không gỉ cùng loại do Viện Nghiên cứu Năng lượng Đà Loan cung cấp đã được sử dụng trong nghiên cứu này, với thành phần hóa học và các cơ tính được thể hiện trong Bảng 1.

Bột kim loại được sử dụng làm vật liệu in có dạng hạt cầu, đường kính nhỏ hơn 150 

μm. Cánh tuabin 422 SS đã qua sử dụng có chốt nổi bị hỏng từ cánh động cơ tuabin khí được sử dụng cho các thí nghiệm in laser 3D một lớp và nhiều lớp. Nguồn laser sợi quang công suất cao 5000W – YLR-5000 (Hình 1) với đầu in 3D có thể điều khiển chính xác CNC đã được sử dụng cho quá trình in laser 3D. Trước quá trình in laser 3D, vật liệu KLCB từ cánh tuabin đã qua sử dụng được xử lý nhiệt bao gồm austenit hóa ở 1040°C với thời gian 1 giờ trong lò chân không, sau đó làm nguội trong

khí quyển, tiếp theo là xử lý nhiệt ủ trong 2 giờ ở nhiệt độ 750°C và làm mát bằng không khí để cải thiện độ dẻo và độ dai va đập [4]. Để tránh nứt nguội trong quá trình xử lý vật liệu có độ cứng cao như vật liệu thép không gỉ AISI 422, tất cả các mẫu đều được nung nóng trước ở 200°C trước quá trình in laser 3D. Sau quá trình in laser 3D, các mẫu in 3D được xử lý nhiệt sau hàn để giảm ứng suất bằng cách ủ kim loại ở nhiệt độ 700°C trong 2 giờ (700°C/2h) và làm nguội ngoài không khí.

Bảng 1(a). Thành phần hóa học của kim loại cơ bản thép không gỉ AISI 422 và bột kim loại cùng loại

Thành phần hóa học Vật liệu	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	W
Kim loại cơ bản AISI 422 SS		0.24	0.38	0.71	0.016	0.006	0.034	0.76	11.98	1.07	0.26	0.99
Bột kim loại AISI 422 SS		0.24	0.15	0.37	0.007	0.007		0.75	12	0.97	0.2	0.95

Bảng 1(b). Cơ tính của kim loại cơ bản thép không gỉ AISI 422 SS [5]

Điều kiện	Giới hạn bền		Giới hạn chảy		Độ giãn dài tương đối (%)	Độ cứng Vicker
	(ksi)	(Mpa)	(ksi)	(Mpa)		
Đã được xử lý nhiệt	133	915	117	808	15	304 HV

2.2. Quá trình thực nghiệm

Để tìm ra các thông số quy trình in laser 3D phù hợp, trước tiên quá trình in laser 3D một lớp kim loại được thử nghiệm với các thông số thay đổi bao gồm công suất laser từ 1000W ÷ 1500W, tốc độ cấp bột từ 5 g/phút ÷ 12 g/phút trong khi tốc độ đầu in được giữ không đổi ở mức 750 mm/phút. Sau khi tối ưu hóa thông số cho chất lượng lớp kim loại in 1 lớp tốt cùng với vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) càng hẹp càng tốt, quá trình in Laser 3D nhiều lớp được tiến hành với các thông số bao gồm cố định công suất nguồn laser 1300W, tốc độ đầu in được giữ không đổi ở mức 750 mm/phút và tốc độ cấp bột thay đổi từ 5 g/phút đến 8 g/phút đã được thử nghiệm (Bảng 2).

Bảng 2. Các thông số thực nghiệm của quá trình in laser 3D nhiều lớp.

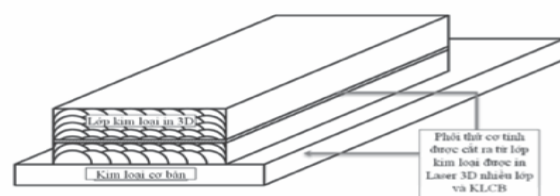
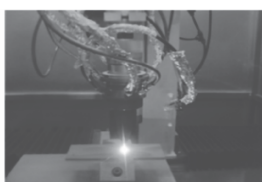
	Thông số Thí nghiệm	Công suất nguồn Laser (W)	Tốc độ đầu in (mm/phút)	Tốc độ cấp bột (g/phút)
In nhiều lớp kim loại	Thí nghiệm 1	1000W ÷ 1500 W	750	5
	Thí nghiệm 2	1000W ÷ 1500 W	750	6
	Thí nghiệm 3	1000W ÷ 1500 W	750	7
	Thí nghiệm 4	1000W ÷ 1500 W	750	8

Sau khi tạo hình in 3D bột kim loại lên trên KLCB theo quy trình in laser nhiều lớp, các mẫu thử kéo và dai va đập Charpy, được chế tạo bằng cách cắt dây EDM từ lớp kim loại bột và KLCB (Hình 2), đã tuân theo tiêu chuẩn ASTM E8 và E23. Do hạn chế về vật liệu, kích thước của mẫu thử như được mô tả trong tiêu chuẩn ASTM E8 đối với các mẫu thử độ bền kéo có kích thước thu gọn như Hình 3 và các mẫu thử độ dai va đập có kích thước thu gọn 55 mm x 10 mm x 2,5 mm như Hình 4.

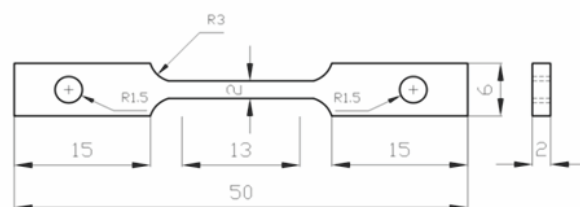
Cấu trúc vi mô của các mẫu in laser 3D được phân tích bằng Kính hiển vi quang học OLYMPUS GX-51 (OM) và Kính hiển vi điện tử quét JEOL-5410 (SEM). Các quan sát cấu trúc tế vi cũng được phân tích sau khi tẩm thực các mẫu bằng vật liệu Vilella.



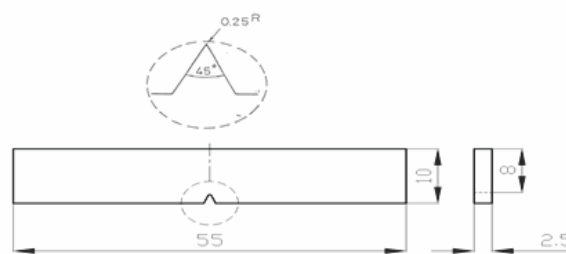
Hình 1. Nguồn hàn và đầu in laser 3D Ytterbium Fiber Laser YLR-5000W.



Hình 2. Phôi thử cơ tính được cắt ra từ lớp kim loại được in laser 3D nhiều lớp và kim loại cơ bản



Hình 3. Mẫu thử độ bền kéo với kích thước thu gọn



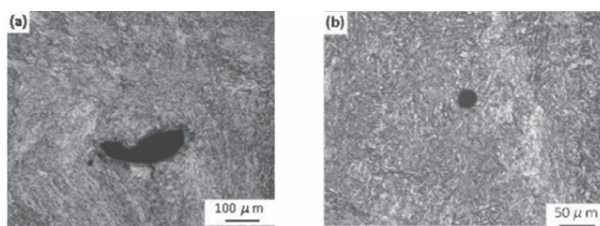
Hình 4. Mẫu thử độ dai va đập với kích thước thu gọn

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ BÀN LUẬN

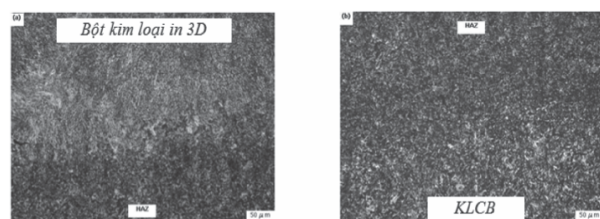
3.1. Cấu trúc tế vi của mẫu kim loại in cho quá trình in laser 3D nhiều lớp

Từ 4 thí nghiệm lớp kim loại in laser 3D nhiều lớp trong Bảng 2, qua quan sát cấu trúc tế vi, có thể thấy một số khuyết tật như thiếu liên kết, lỗ rỗng và vết nứt nhỏ xuất hiện ở vùng lớp kim loại in sau khi kết tinh như các hình bên dưới. Khi tốc độ cấp bột cao ứng với 7 g/phút (Thí nghiệm 3 - Bảng 2) và 8 g/phút (Thí nghiệm 4 - Bảng 2) nguồn cung cấp nhiệt không đủ, có thể dẫn đến thiếu liên kết và nứt tế vi ở vùng nóng chảy như Hình 5 (a) với các thông số thí nghiệm 3, 4 ở Bảng 2. Bên cạnh đó, khuyết tật rỗ khí, được hiểu là các điểm không liên tục kiểu khoang (khoảng trống) hình thành do khí bị giữ lại trong quá trình bột kim loại đông đặc, đã được quan sát thấy trong Hình 5 (b) trong Thí nghiệm 3 của Bảng 2.

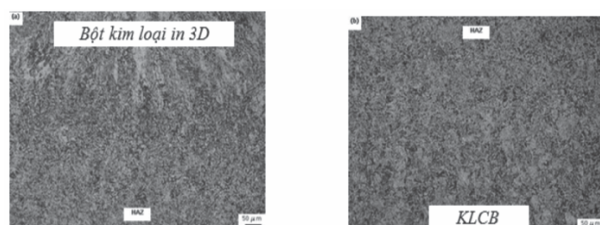
Hình 6 và Hình 7 là các ảnh cấu trúc tế vi kim loại in nhiều lớp điển hình trong điều kiện ngay sau khi in 3D và sau khi xử lý nhiệt ($700^{\circ}\text{C}/2\text{h}$) tương ứng với vị trí quan sát là vùng tiếp giáp giữa lớp kim loại in và HAZ và giữa HAZ và KLCB. Do quá trình bột kim loại được in và kết tinh rất nhanh, cấu trúc của bột kim loại SS 422 mịn hơn với các vùng dạng cây như được thể hiện trong Hình 6 và Hình 7. So sánh cấu trúc tế vi của lớp kim loại in và KLCB trong Hình 6, có thể thấy rằng lớp bột kim loại in có cấu trúc hạt nhỏ mịn hơn đáng kể khiến nó có độ cứng vi mô cao hơn KLCB. Sau khi xử lý nhiệt ($700^{\circ}\text{C}/2\text{h}$) như Hình 7, đã tăng kích thước hạt của lớp bột kim loại in, do đó bột kim loại in có độ cứng giảm đi đáng kể sau khi xử lý nhiệt ($700^{\circ}\text{C}/2\text{h}$).



Hình 5. Các khuyết tật xuất hiện trong vùng lớp bột kim loại kết tinh của Thí nghiệm 3, 4 trong Bảng 2: (a) kim loại bột không được cấp đủ nhiệt để nóng chảy và bị nứt; (b) rỗ khí



Hình 6. Cấu trúc tế vi lớp bột kim loại in đa lớp điển hình khi sau khi in 3D và kết tinh: (a) cấu trúc tế vi vùng tiếp giáp giữa bột kim loại in 3D -HAZ và (b) cấu trúc tế vi vùng tiếp giáp giữa HAZ-KLCB



Hình 7. Cấu trúc tế vi lớp bột kim loại in đa lớp điển hình khi sau khi in và xử lý nhiệt ($700^{\circ}\text{C}/2\text{h}$): (a) cấu trúc tế vi vùng tiếp giáp giữa bột kim loại in 3D -HAZ và (b) cấu trúc tế vi vùng tiếp giáp giữa HAZ-KLCB

3.2. Cơ tính của mẫu kim loại in cho quá trình in laser 3D nhiều lớp

Dựa trên quan sát về cấu trúc tế vi chất lượng của lớp bột kim loại in sau khi kết tinh (tránh các khuyết tật như không liên kết, rỗ khí và nứt tế vi), hai bộ thông số Thí nghiệm 1 và 2 của Bảng 2 được lựa chọn tiếp tục in laser 3D nhiều lớp và sẽ tiến hành xử lý nhiệt ở

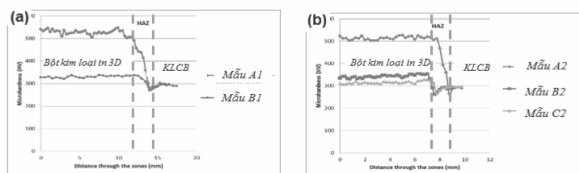
(650°C/2h và 700°C/2h) như Bảng 3. Sau đó, các mẫu KLCB và bột kim loại in đã được chọn để kiểm tra cơ học bao gồm Thử nghiệm độ cứng tế vi, Thử nghiệm kéo và Thử nghiệm dai va đập.

Dựa trên đánh giá độ cứng tế vi cho thấy độ cứng của lớp bột kim loại in laser 3D, HAZ

và KLCB được xếp hạng theo thứ tự giảm dần như sau: Lớp bột kim loại in > HAZ > KLCB trong cả điều kiện in thông thường và sau khi xử lý nhiệt (Hình 8). Ngoài ra, cũng lưu ý rằng lớp bột kim loại in và HAZ có độ cứng cao hơn khoảng 20HV trong điều kiện xử lý nhiệt 650°C/2h so với xử lý nhiệt 700°C/2h (Hình 8 (b)).

Bảng 3. Các thông số thực nghiệm của quá trình in laser 3D nhiều lớp dùng để kiểm tra cơ tính

Quá trình	Mẫu thí nghiệm	Điều kiện xử lý mẫu	Công suất nguồn Laser (W)	Tốc độ đầu in (mm/phút)	Tốc độ cấp bột (g/phút)
In laser 3D nhiều lớp bột kim loại	A1	Thông thường	1300	750	5
	B1	Xử lý nhiệt (700°C/2h)			
	A2	Thông thường	1300	750	6
	B2	Xử lý nhiệt (650°C/2h)			
	C2	Xử lý nhiệt (700°C/2h)			



Hình 8. Độ cứng tế vi của vùng bột kim loại in 3D, vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) và KLCB của mẫu thí nghiệm: (a) Trong Thí nghiệm 1 của Bảng 3 trước và sau khi xử lý nhiệt và (b) Trong Thí nghiệm 2 của Bảng 3 trước và sau khi xử lý nhiệt.

Dựa trên đánh giá độ bền kéo từ Bảng 4, cho thấy lớp bột kim loại in laser 3D trong điều kiện thông thường có độ bền kéo, độ bền chảy cao hơn so với sau khi được xử lý nhiệt. Hơn nữa, qua các kết quả đo độ giãn dài tương đối cho thấy lớp bột kim loại in laser 3D có độ dẻo được cải thiện sau khi nhiệt xử lý nhiệt. So với độ bền kéo của KLCB, cho thấy lớp bột kim loại in laser 3D trong điều kiện thông thường có độ bền kéo và độ bền chảy cao hơn

đáng kể so với KLCB trong điều kiện ngay sau khi lấy ra khỏi nơi làm việc (~1021 MPa). Rõ ràng, sau khi xử lý nhiệt (700°C/2h), lớp bột kim loại in laser 3D có độ bền kéo và độ bền chảy cao hơn một chút so với KLCB trong điều kiện xử lý nhiệt (~927 MPa).

Kiểm tra dai va đập Charpy để đánh giá độ dai của lớp bột kim loại in laser 3D trong điều kiện thông thường và sau khi xử lý nhiệt. Dựa trên đánh giá va đập, cho thấy lớp bột kim loại in laser 3D trong điều kiện thông thường có độ dai va đập thấp hơn đáng kể (~5J) so với sau khi xử lý nhiệt (~13J). So sánh với độ dai va đập của KLCB, không có sự khác biệt đáng kể về độ dai va đập của lớp bột kim loại in laser 3D trong điều kiện thông thường và xử lý nhiệt (700°C/2h) với KLCB trong điều kiện sau khi lấy ra khỏi nơi làm việc và xử lý nhiệt (700°C/2h).



Bảng 4. Kết quả đo độ bền kéo, độ dai va đập được thực hiện ở nhiệt độ phòng.

Mẫu kiểm tra cơ tính	Điều kiện xử lý	Giới hạn bền (MPa)	Giới hạn chảy (MPa)	Độ giãn dài tương đối (%)	Độ dai va đập (J)
TA1	Thông thường	1420.7	970.7	3.60	4.5
TB1	Xử lý nhiệt (700°C/2h)	1010.36	860	13.19	12.0
TA2	Thông thường	2010.7	1756.5	6.88	5.5
TB2	Xử lý nhiệt (650°C/2h)	1074.7	901.4	13.13	11
TC2	Xử lý nhiệt (700°C/2h)	998.4	852.8	10.94	13.5
KLCB1a	Sau khi lấy ra khỏi nơi làm việc	1021	850	12	3.5
KLCB2a	Xử lý nhiệt (700°C/2h)	927	798.5	15	13

3.3. Thử nghiệm mô hình trước khi sửa chữa chốt bị hỏng của cánh tua bin đã qua sử dụng

Dựa trên cấu trúc tế vi và cơ tính của các mẫu bột kim loại in laser 3D sau khi in nhiều lớp bằng laser với các thông số khác nhau có thể lựa chọn thông số phù hợp (Công suất nguồn laser (1300 W), Tốc độ đầu in (750 mm/phút) và Tốc độ cấp bột (5 g/phút)) để in chốt lên trên cánh tuabin thu nhỏ. Sau khi tạo chốt, cánh tuabin thu nhỏ có chốt in đã được xử lý nhiệt (700°C/2h) để so sánh độ bền kéo với các mẫu vật có chốt làm

bằng KLCB ở điều kiện sau khi lấy ra khỏi nơi làm việc. Tất cả các mẫu vật đã được tiến hành thử kéo để đánh giá độ bền của phần chốt in sau khi tán nguội vào vỏ rotor. Dựa trên đánh giá độ bền kéo, độ bền của phần chốt in ở điều kiện xử lý nhiệt (700°C/2h) có giá trị cao nhất (54-55 kN) so với 30 kN của chốt làm bằng KLCB ở điều kiện sau khi lấy ra khỏi nơi làm việc. Kết quả thực nghiệm cho thấy các chốt được sửa chữa, thông qua quá trình in laser 3D nhiều lớp với các thông số phù hợp có thể đáp ứng được tải trọng kéo thiết kế tối thiểu là 30 kN (Bảng 5).

Bảng 5. Kiểm tra độ bền kéo chốt được tạo mới sau khi được tán nguội vào vỏ rotor [6].

Điều kiện mẫu đo	Quan sát mẫu sau khi thử kéo	Mẫu thí nghiệm	Tải trọng kéo lớn nhất (kN)
Cánh tuabin thu nhỏ có chốt làm bằng KLCB ở trạng thái như khi lấy ra khỏi nơi làm việc		1	30±3
		2	30±3
Cánh tuabin thu nhỏ có chốt in laser 3D đã được xử lý nhiệt (700°C/2h)		1	55±3
		2	55±3

4. KẾT LUẬN

1) Các tính chất cơ học của 422SS từ cánh tuabin đã qua sử dụng bao gồm độ cứng, độ dẻo và độ dai sau 100.000 giờ sử dụng có thể được phục hồi sau khi xử lý nhiệt (austenit hóa ở 1040°C trong 1 giờ trong lò chân không, sau đó làm nguội trong khí quyển 5 bar, tiếp theo là ủ ở 750°C trong 2 giờ và làm mát bằng không khí).

2) Kết quả thực nghiệm cho thấy các thông số quy trình in 3D laser bột kim loại đóng vai trò quan trọng trong chất lượng và cấu trúc tế vi mô của lớp bột kim loại in. Sau khi phân tích cấu trúc tế vi và các tính chất cơ học của các mẫu bột kim loại in trong cả quy trình in laser một lớp và nhiều lớp, bộ thông số quy trình in tối ưu bao gồm Công suất laser (1300 W), Tốc độ đầu in (750 mm/phút) và Tốc độ cấp bột (5 g/phút) đã được chọn để tạo chốt (Tenon) trên cánh tuabin.

3) Kết quả thực nghiệm cho thấy chốt có thể sửa chữa bằng công nghệ in laser 3D nhiều lớp kim loại và có độ bền của phần chốt in sau khi tán nguội vào vỏ rotor có tải trọng kéo (~55 kN) cao hơn KLCB sau khi tán nguội biến dạng và đạt tải trọng kéo thiết kế tối thiểu là 30 kN. Như vậy, quá trình in 3D laser bột kim loại nhiều lớp có thể được áp dụng để sửa chữa chốt đầu chốt nối bị hỏng của cánh tuabin đã qua sử dụng.

Lời cảm ơn:

Tác giả xin cảm ơn Giáo sư Ye-Ee Wu và Giáo sư Hsien-Lung Tsai đã giúp đỡ và hỗ trợ. Xin cảm ơn Tiến sĩ Hsien-Cheng Wu và các đồng nghiệp tại Viện Nghiên cứu Năng lượng Đài Loan đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 29/5/2025

Ngày phản biện: 16/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. C. L. Ou, R. K. Shiue, “Microstructural evolution of brazing 422 stainless steel using the BNi-3 braze alloy”. *Journal of Materials Science*, Vol.38 (2003), 2337-2346.
- [2]. T.C. Yang, C. Chen, “Laser Welding of 422 Stainless Steel with Inconel 625 Filler Metal”. *ISIJ International*, Vol. 44 (2004), No. 5, 852-857.
- [3]. L. Sextona, S. Lavina, G. Byrne, A. Kennedyb, “Laser cladding of aerospace materials”. Vol.122 (2002), 63-68.
- [4]. George E. Totten, “Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies”. CRC Press, Taylor and Francis group (2006).
- [5]. ASM Handbook, “Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys”, Volume 1 (2005), pp.1352-1355.
- [6]. C.-M. Lin, S.-H. Yen, L. Tran, Y.-E. Wu, H.-C. Wu & H.-L. Tsai, “Experimental investigation into microstructure, metallurgy and mechanical properties of AISI 422 stainless steel weldments produced using fibre laser welding direct forming”. *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science* (04 Jul 2016), DOI: 10.1080/00084433.2016.1196850.