

NGHIÊN CỨU HIỆU SUẤT LIÊN KẾT GIỮA THỦY TINH VÀ NHÔM SỬ DỤNG LASER XUNG NANO GIÂY

STUDYING JOINING PERFORMANCE OF GLASS TO ALUMINUM USING NANOSECOND PULSED LASER

Nguyễn Hoài*, Phùng Minh Tùng

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng, Việt Nam¹

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: nhoai@ute.udn.vn

(Nhận bài / Received: 21/01/2025; Sửa bài / Revised: 02/5/2025; Chấp nhận đăng / Accepted: 08/5/2025)

DOI: 10.31130/ud-jst.2025.026

Tóm tắt - Trong nghiên cứu này đặc tính và chất lượng mối hàn nhôm/thủy tinh được khám phá thông qua phương pháp hàn truyền bằng xung nano giây. Vùng hàn được xác định với tỷ lệ diện tích mối hàn từ 85 đến 95% và ngưỡng hàn từ 0,15 đến 0,8 mJ. Độ bền kéo lớn nhất của mối hàn có thể đạt được xấp xỉ 26,34 MPa vượt qua giá trị độ bền trong nghiên cứu mới nhất. Sự khác biệt về biên dạng hàn trên chất nền kính và nhôm sau tương ứng với các thông số xử lý đầu vào khi áp dụng lực kéo theo phương tiếp tuyến chứng minh ảnh hưởng khác nhau của ngoại lực tác dụng lên hai bề mặt vật liệu. Hình ảnh từ kính hiển vi quét, SEM cùng với hệ thống phân tích phổ, EDS chứng minh tính hòa trộn và khuếch tán cao tại vùng giao diện mối hàn. Trong khi đó, sự hiện diện của các thành phần nguyên tố Al, O, và Si cùng với các pha mới tại vùng giao diện, chứng minh sự hoàn thiện của mối hàn Al/SiO₂ khi sử dụng phương pháp hàn truyền.

Từ khóa - Hàn truyền laser; thủy tinh và nhôm; xung nano giây; hình thái bề mặt; đặc trưng cấu trúc

Abstract - This study used nanosecond pulsed transfer welding to examine the characteristics and quality of aluminum/glass welds. Weld overlapping factor ranging from 85 to 95% and welding thresholds ranging from 0.15 to 0.8 mJ were used to estimate the weld zone. The weld's maximum tensile strength, which was higher than the strength reported in the most recent investigation, was roughly 26.34 MPa. The distinct effects of external forces on the surfaces of glass and aluminium were illustrated by the differences in weld profiles on the two materials after matching the input processing parameters when applying tangential tensile force. High levels of intermixing and diffusion were shown at the weld interface by SEM (Scanning Electron Microscopy) pictures and EDS (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy) spectrum analysis. In the meantime, the existence of elemental components Al, O, and Si in addition to the anticipated phases demonstrated the perfection of the aluminum/ glass weld using a nanosecond pulsed laser.

Key words - Laser transmission welding; glass and aluminum; nanosecond pulsed laser; surface morphology; microstructure characterization

1. Giới thiệu

Thủy tinh là vật liệu trong suốt và có tính ứng dụng cao trong nhiều lĩnh vực dựa vào ưu thế về thuộc tính của nó như: độ cứng cao, tính chống ăn mòn hiệu quả, hằng số điện môi thấp, và điện trở suất cao. Vì vậy thủy tinh đóng vai trò là vật liệu tiên tiến và không giới hạn trong sự phát triển của nhiều sản phẩm bao gồm hệ thống vi cơ điện tử MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), quang điện tử, viễn thông quang học. Ngược lại, đa số nhôm lại có độ bền cao, tính dẫn điện và dẫn nhiệt tốt, cùng với hệ số giãn nở vì nhiệt ấn tượng. Những đặc điểm này góp phần vào sự ứng dụng rộng rãi của chúng trong các lĩnh vực công nghiệp khác nhau.

Trong những năm gần đây, nhu cầu kết nối hai vật liệu không đồng nhất như nhôm và thủy tinh đã xuất hiện trong nhiều lĩnh vực công nghiệp khác nhau như công nghệ vi lưu, các cảm biến, hay thậm chí là hệ thống vi điện tử. Tuy nhiên, để đạt được sự kết nối chính xác và chắc chắn giữa thủy tinh và nhôm luôn đặt ra những thách thức do sự chênh lệch đáng kể về tính chất vật liệu của chúng. Thủy tinh thể hiện tính giòn, trong khi đa số nhôm mềm và dẻo. Hơn nữa, thủy tinh có đặc tính cách nhiệt cao, trong khi nhôm có tính dẫn nhiệt cao. Rõ ràng, sự khác biệt về đặc tính vật liệu này

gây ra những khó khăn cho việc tìm ra một kỹ thuật đáng tin cậy và tiết kiệm chi phí để liên kết chính xác và chắc chắn giữa hai vật liệu.

Hiện nay, có rất nhiều phương pháp khác nhau được sử dụng để liên kết giữa thủy tinh và kim loại như hàn cơ học, liên kết dính [1], thêu kết ở nhiệt độ cao [2], hàn laser [3-6], và hàn khuếch tán [7]. Trong số đó, hàn laser đã nổi lên như một kỹ thuật thu hút sự chú ý nhờ khả năng độ dẻo của nó là cung cấp nhiệt chính xác và cục bộ cho mối hàn. Một trong những ưu điểm của hàn laser là khả năng tạo điều kiện thuận lợi cho việc hàn mẫu bên trong thông qua một kỹ thuật gọi là hàn truyền laser. Kỹ thuật này bao gồm một chùm tia laser đi qua kính phía trên và tương tác với kim loại khi tiếp xúc gần với kính, từ đó cho phép hàn hiệu quả. Ngoài ra, phương pháp hàn laser mang lại lợi thế về khả năng tự động hóa và số hóa dễ dàng. Đặc tính này cho phép tích hợp liền mạch vào các quy trình sản xuất tự động, cho phép kiểm soát và giám sát chính xác các thông số liên kết. Việc số hóa hàn laser tạo điều kiện thuận lợi hơn nữa cho việc tối ưu quy trình, từ đó đảm bảo chất lượng và đảm bảo phương pháp hàn laser trở thành lựa chọn ấn tượng và hấp dẫn cho các ngành công nghiệp cơ khí.

¹ The University of Danang - University of Technology and Education, Vietnam (Hoai Nguyen, Minh Tung Phung)

Trong thực tế, các nguồn laser với xung siêu ngắn như femto giây hay pico giây có thể cung cấp năng lượng hàn rất tốt trong phạm vi nhỏ nhờ vào sự giới hạn vùng ảnh hưởng nhiệt. Ví dụ như Zhang cùng cộng sự [8] đã khám phá mối liên hệ giữa năng lượng laser, tốc độ quét và độ bền trong các mẫu đồng và thủy tinh bằng xung femto giây, và đạt được độ bền cao nhất là 2,34 MPa. Trong khi đó, Wang và cộng sự [9] đã sử dụng nguồn laser femto giây cho mối hàn giữa kính và thép không gỉ, đạt được độ bền khoảng 8,79 MPa. Về liên kết giữa nhôm và thủy tinh sử dụng nguồn laser xung femto giây, Zhang cùng cộng sự [10] dựa vào mối liên hệ giữa công suất hàn và chất lượng mối hàn với độ bền tối ưu đạt được là 7,77 MPa. Mặc dù, sử dụng phương pháp hàn laser xung siêu ngắn với chi phí lớn, nhưng độ bền mối hàn đạt được chưa thật sự cao. Vì vậy việc lựa chọn một phương pháp hàn laser khác với chi phí hợp lý cần được xem xét một cách cẩn thận.

Một cách tiếp cận thay thế hiệu quả về mặt chi phí là sử dụng xung laser dài hơn, chẳng hạn như nguồn laser xung mili giây hoặc nano giây trong khi vẫn giữ được ưu điểm của hàn truyền laser. Chẳng hạn như Min và cộng sự [11] đã nghiên cứu mối hàn giữa thủy tinh và nhôm bằng cách sử dụng nguồn laser mili giây đồng thời kiểm tra ảnh hưởng của công suất mối hàn, tốc độ hàn, và tần số hàn đến độ bền liên kết. Hay trong một nghiên cứu gần đây, Huo và cộng sự [12] đã chỉ rõ sự chắc chắn của mối hàn giữa thủy tinh và thép không gỉ 304 thông qua việc sử dụng nguồn laser xung nano giây, kết quả độ bền của mối hàn có thể đạt được 16,39 MPa. Rõ ràng những nghiên cứu này đã nêu bật tính khả thi của việc liên kết giữa thủy tinh và kim loại bằng cách sử dụng xung nano dài hơn. Tuy nhiên, các thông số hàn vẫn chưa được phân tích sâu thông qua mối quan hệ với đặc trưng cấu trúc mối hàn và biên dạng đường hàn tương ứng với hai bề mặt vật liệu trước sau khi kiểm tra lực kéo, điều này đặt ra nhiều thách thức đối với việc nâng cao chất lượng đường hàn không có sự hình thành khuyết tật.

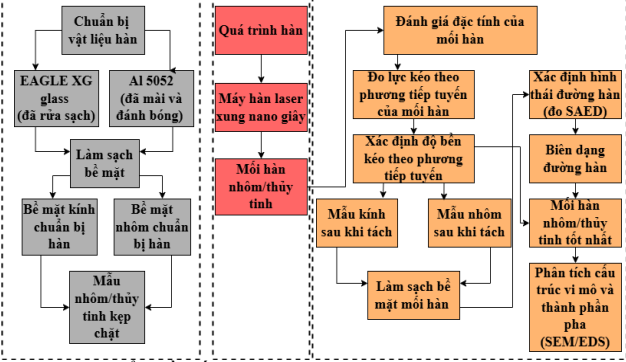
Mối tương quan giữa thông số xử lý đầu vào và chất lượng mối hàn thủy tinh/ kim loại thường xuyên được chú ý trong các nghiên cứu gần đây. Ví dụ, Li cùng cộng sự [13] sử dụng nguồn laser xung nano giây và chứng minh chất lượng mối hàn thủy tinh/hợp kim titan phụ thuộc vào công suất hàn, với độ bền kéo lớn nhất đạt được gần 6,49 MPa. Ngoài ra, Feng cùng cộng sự [14] tiếp tục chứng minh độ bền kéo của mối hàn giữa đồng và thủy tinh có thể đạt được 33,4 MPa trong mối quan hệ với các thông số như công suất hàn, tốc độ hàn, và số lần quét của xung khi sử dụng xung nano giây. Tuy nhiên, một thách thức lớn đối với các nghiên cứu này là chưa đưa ra một vùng hàn phù hợp dựa vào các thông số đầu vào như năng lượng xung hay tỷ lệ điền đầy mối hàn giữa kim loại và thủy tinh.

Nghiên cứu này nhằm mục đích phân tích hiệu suất mối hàn giữa thủy tinh và nhôm sử dụng nguồn laser xung nano giây chi phí thấp. Ngoài ra, việc tập trung vào sự ảnh hưởng của ngưỡng hàn và tỷ lệ điền đầy đến chất lượng mối hàn nhôm/thủy tinh cũng sẽ được xem xét cẩn thận. Hình thái và biên dạng đường hàn sau khi kiểm tra lực kéo cũng được đánh giá thông qua mối quan hệ với các thông số xử lý đầu vào quá trình hàn. Cấu trúc vi mô và thành phần pha tại

vùng giao diện mối hàn Al/SiO₂ trước khi kiểm tra lực kéo cũng được phân tích. Kết quả chỉ rõ sự hòa trộn và khuếch tán hoàn thiện giữa các nguyên tố tại vùng nóng chảy ở mức năng lượng xung tối ưu. Nhóm tác giả hi vọng việc ứng dụng nguồn laser xung nano giây được sử dụng trong nghiên cứu cung cấp một phương pháp tiết kiệm chi phí để liên kết hai vật liệu khác biệt lớn về thuộc tính vật lý.

2. Phương pháp thực nghiệm

Quy trình thực nghiệm được tiến hành theo ba giai đoạn sau: CHUẨN bị vật liệu hàn, quá trình hàn laser xung nano giây và đánh giá đặc tính của mối hàn nhôm/ thủy tinh.



Hình 1. Biểu đồ tiến trình thực nghiệm trong nghiên cứu này

Trong giai đoạn đầu tiên, cả hai chất nền và thủy tinh được làm sạch kỹ lưỡng để loại bỏ mọi chất gây ô nhiễm tiềm ẩn (Hình 1). Trước khi thực hiện trên máy hàn xung nano giây, các mẫu hàn được kẹp chặt để giảm khe hở không khí và tạo điều kiện dễ dàng cho việc hình thành liên kết. Giai đoạn này gọi là quá trình hàn truyền laser. Sau đó, các mẫu liên kết nhôm/ thủy tinh được đo độ bền kéo theo phương tiếp tuyến với đường hàn trên thiết bị đo lực kéo. Ngoài ra, hình thái của mối hàn thể hiện qua biên dạng sau khi tách ra từ các chất nền nhôm và thủy tinh được phân tích và so sánh cẩn thận. Sau khi hoàn tất đánh giá các mẫu này, mẫu thể hiện chất lượng mối hàn đạt yêu cầu nhất được chọn để nghiên cứu cấu trúc vi mô và thành phần pha nóng chảy. Quá trình thực nghiệm này bao gồm phân tích CLSM (Confocal Laser Scanning Microscopy), SEM (Scanning Electron Microscopy) và EDS (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy)

2.1. Chuẩn bị vật liệu hàn

Thủy tinh EAGLE XG® với kích thước 75 mm × 25 mm × 0,7 mm và hợp kim nhôm Al5052 với kích thước 75 mm × 25 mm × 3 mm. Thành phần hóa học của hai vật liệu được xác định ở Bảng 1. Bởi vì nhiệt độ biến đổi trong suốt quá trình hàn đóng vai trò rất quan trọng trong việc khám phá chất lượng hàn. Và một vài thuộc tính như hệ số giãn nở vì nhiệt, hệ số truyền nhiệt, nhiệt độ nóng chảy và khối lượng riêng được chỉ rõ trên Bảng 2.

Bảng 1. Thành phần hóa học của thủy tinh và nhôm

Vật liệu	Tỷ lệ thành phần nguyên tố
EAGLE XG®	SiO ₂ (59,7%); Al ₂ O ₃ (17,11%); B ₂ O ₃ (12,27%), CaO (7,33%); SrO (0,81%); BaO (0,01%)
Al 5052	Al (96,83%); Mg (2,48%); Fe (3%); Cr (0,23%); Si (0,09 %); Mn (0,03%);

Các chất nền nhôm được mài bằng các giấy mài SiC cỡ P600, P1000, và P1500, sau đó tất cả các bề mặt này sẽ được đánh bóng bằng bột Al_2O_3 để đạt được độ bóng bề mặt khoảng $0,30\text{ }\mu\text{m}$. Trong khi đó, phần lớn các chất nền kính EAGLE XG® rất phẳng, độ bóng bề mặt khoảng $0,15\text{ }\mu\text{m}$. Bề mặt của cả kính và nhôm đều được làm sạch kỹ lưỡng bằng cồn ethylic ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), sau đó khuấy siêu âm trong 25 phút và rửa sạch bằng acetone. Trong giai đoạn cuối cùng của quá trình làm sạch, hai loại bề mặt khác nhau được rửa liên tục trong nước khử ion và sấy khô bằng nitor. Các đồ gá kẹp có lực kẹp tối đa là 60 N được sử dụng để gắn hai bề mặt hàn nhằm tăng cường kết quả liên kết và duy trì khoảng cách tối thiểu giữa chúng.

Bảng 2. Thuộc tính vật lý của thủy tinh và nhôm

Vật liệu	EAGLE XG®	Al 5052
Thuộc tính		
Hệ số giãn nở nhiệt ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	3,17	23,7
Nhiệt độ nóng chảy ($^{\circ}\text{C}$)	971 (Điểm làm mềm)	650 (Điểm nóng chảy)
Khối lượng riêng (g/cm^3)	2,38	2,68

2.2. Hàn laser xung nano giây

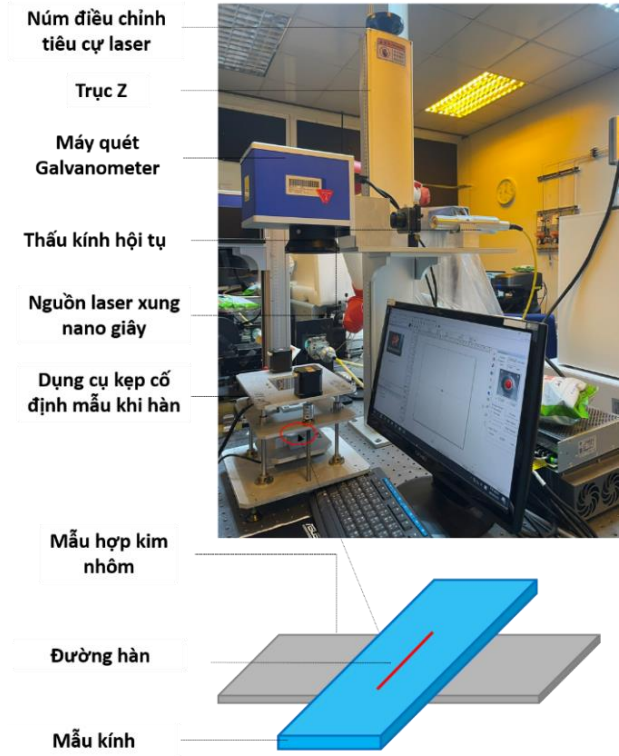
Hình 2 mô tả cấu hình thử nghiệm cho hệ thống laser ns (ns-laser). Hệ thống laser xung (YLP-1-100-20-20, IPG) với công suất laser trung bình tối đa là 20 W, độ rộng xung là 100 ns và bước sóng là 1080 nm đã được sử dụng để hoàn thành phần lớn các nghiên cứu liên kết laser. Bàn làm việc X-Y, thấu kính hội tụ và gương phân phối chùm tia laser là những tính năng khác của hệ thống hàn. Ngoài ra, thấu kính hội tụ có tiêu cự 290 mm và sau khi đi qua thấu kính này, chùm tia laser được hội tụ tại một điểm có kích thước $40\text{ }\mu\text{m}$ trên mặt phẳng hội tụ của nó. Rõ ràng là trục Z-Axis 800 mm, được đặt cạnh máy quét Galvanometer, cho phép điều chỉnh linh hoạt lên xuống mặt phẳng hội tụ. Điều này giúp có thể kiểm soát chính xác vị trí điểm laser sẽ xuất hiện dọc theo trục thẳng đứng. Vị trí của chùm tia laser trên mặt phẳng hội tụ cũng được chụp bằng camera CCD đồng trục. Các thông số cụ thể của nguồn laser xung nano giây được biểu thị ở Bảng 3.

Bảng 3. Thông số kỹ thuật nguồn laser xung nano giây

Hệ thống laser xung (YLP-1-100-20-20, IPG)	
Bước sóng (λ)	1080
Độ rộng xung (ns)	100
Công suất laser tối đa (W)	20
Tiêu cự thấu kính (mm)	290
Tần số quét tối đa (kHz)	20
Kích thước điểm hội tụ (μm)	40
Năng lượng xung lớn nhất (mJ)	1

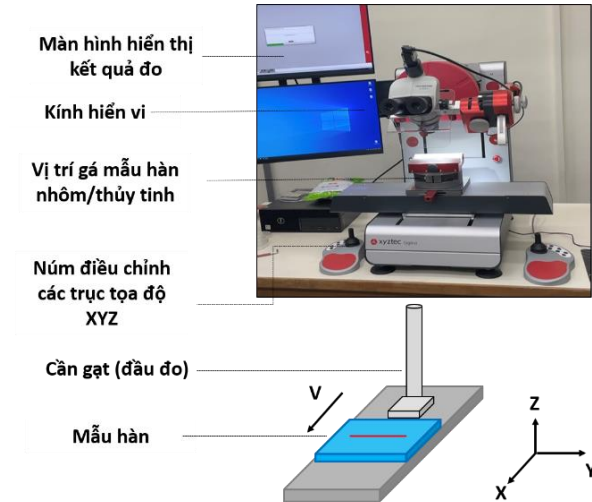
Tất cả các mẫu được cắt ngang bằng máy cắt chính xác tuyến tính IsoMetTM 4000 cùng với lưỡi cắt kim cương EXTEC. Sau đó, đánh bóng bằng bột Al_2O_3 trên máy đánh bóng bán tự động Buehler Ecomet 30, để đánh giá hình thái bề mặt của vùng cắt ngang mối hàn. Để loại bỏ bất kỳ bụi bẩn hoặc tạp chất nào, các mẫu đã đánh bóng được rửa cẩn thận bằng cồn ethylic ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) và rửa siêu âm trong 15 phút. Sau quá trình làm sạch, hình ảnh bề mặt cắt ngang

được phân tích bằng công nghệ kính hiển vi quét laser cộng hưởng (CLSM).



Hình 2. Thiết lập thí nghiệm hàn giữa nhôm và thủy tinh sử dụng máy hàn laser xung nano giây

2.3. Phương pháp đo độ bền kéo và cấu trúc vi mô của mối hàn



Hình 3. Thiết bị đo lực kéo cắt của mối hàn giữa nhôm và thủy tinh

Lực kéo cắt tối đa của các mẫu liên kết nhôm/thủy tinh được đo theo các thông số xử lý khác nhau bằng cách sử dụng XYZTEC Condor Sigma Bond Tester, một thiết bị tiên tiến. Với tùy chọn chế tạo thiết bị này với sáu cảm biến và lực cắt tối đa 1000 N, nó có tiềm năng cải thiện các tiêu chuẩn hiện tại. Trong Hình 3, công cụ đo lực cắt tối đa đã được hiển thị. Để thực hiện quy trình độ bền kéo của mối hàn, đầu tiên, chế độ đo shear test được thiết lập tương ứng với vị trí của cầm gạt vuông góc với hướng của đường hàn.

Sau khi định cài đặt các thông số bao gồm vận tốc di chuyển bàn trượt, hướng tác động, giới hạn lực cắt, và giới hạn dịch chuyển. Đặt mẫu hàn nhôm/thủy tinh lên bề gá, căn chỉnh sao cho cần gạt (đầu đo) ở gần tiếp xúc với mỗi hàn tại vị trí cần kiểm tra. Sử dụng kính hiển vi tích hợp để căn chỉnh chính xác. Sau đó, kẹp chặt hai đầu vật liệu có mỗi hàn vào hai bộ phận kẹp của máy. Bắt đầu thực hiện đo bằng cách kích hoạt máy để cần gạt di chuyển và tác động lực lên mỗi hàn. Lực cắt lớn nhất F_c (N) là giá trị cần xác định. Áp dụng công thức $\sigma = \frac{F_c}{S}$ (MPa) để xác định độ bền kéo của mỗi hàn, trong đó S (mm^2) là tiết diện của mỗi hàn được xác định dựa vào chiều dài 18 mm của đường hàn và bề rộng trung bình của mỗi hàn.

Ngoài ra, nhiều kỹ thuật đặc trưng khác nhau được sử dụng để nghiên cứu hình thái của vùng giao diện đường hàn, chẳng hạn như kính hiển vi laser quét đồng tiêu, CLSM, kính hiển vi điện tử quét (SEM, JEOL, JSM-7000F). Phổ tia X phân tán năng lượng (EDS, BURKER XFlash®Detector 6060, 126 eV) được sử dụng để lập bản đồ pha mới giữa thủy tinh và nhôm.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Cơ chế hình thành mối hàn nhôm/thủy tinh

Để đánh giá chất lượng mối hàn nhôm/thủy tinh, việc nghiên cứu cơ chế hình thành liên kết giữa hai vật liệu kính và kim loại là một yếu tố quan trọng. Không giống như phương pháp hàn laser xung femto hoặc pico giây dùng cho hàn thủy tinh và kim loại, thủy tinh có thể hấp thụ năng lượng trực tiếp thông qua cơ chế hấp thụ phi tuyến. Khi áp dụng phương pháp hàn bằng xung nano giây, hơn 90% ánh sáng được xuyên thấu qua lớp kính có độ trong suốt cao. Trong quá trình hàn kính và nhôm, cơ chế liên kết chính liên quan đến việc xuyên thấu qua chất nền kính và hấp thụ trên chất nền nhôm. Sự hấp thụ năng lượng này dẫn đến việc gia tăng nhiệt độ của tấm nhôm, đồng thời tạo ra sự thay đổi các thành phần pha tại vùng giao diện mối hàn. Kết quả dẫn đến sự nóng chảy cục bộ và sự đông đặc lại tạo nên mối hàn nhôm/thủy tinh.

3.2. Mối liên hệ giữa chất lượng mối hàn nhôm/thủy tinh và thông số đầu vào

Trong tất cả các thí nghiệm, năng lượng xung laser tối thiểu để liên kết (ngưỡng hàn, E_{Th}) là một thông số quan trọng thể hiện mối quan hệ giữa công suất trung bình (P) và tần số quét (f), $E_{Th} = P/f$. Trong khi đó, tỷ lệ điền đầy của đường hàn phù hợp có thể tạo ra một mối hàn đồng đều và chắc chắn,

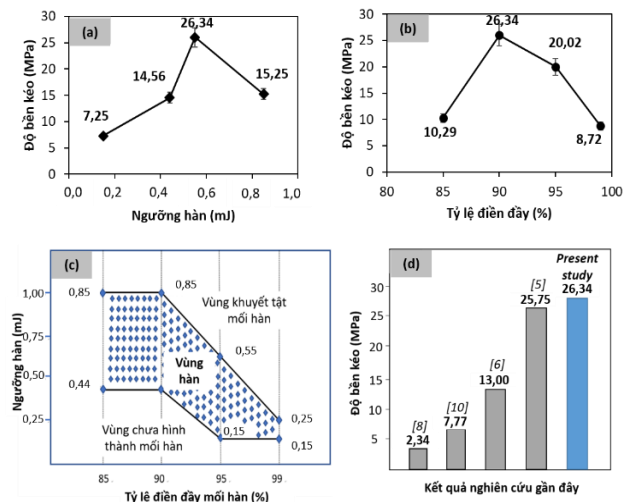
$$PO = [1 - (v/f)/(D+vt)] \times 100$$

trong đó, v [mm/s] là tốc độ quét, f là tần số quét [kHz], D [μm] là kích thước điểm của tia laser khi hàn, t [ns] là thời gian xung.

Số lần quét tia laser được ứng dụng trong các lần thí nghiệm được duy trì không đổi ($N = 1$), giá trị này đủ để hình thành vùng nóng chảy và mối hàn. Mặc khác, lực kẹp 60 N được sử dụng để hỗ trợ việc giảm thiểu khe hở không khí giữa hai vật liệu trong suốt quá trình chuẩn bị hàn. Từ đó tạo điều kiện so sánh có hệ thống chất lượng mối hàn thu được bằng cách sử dụng các thông số xử lý laser khác nhau. Kết quả hàn giữa nhôm và kính được thực hiện

tương ứng với sự thay đổi P , v . Để đạt được kết quả chính xác thì mỗi mẫu hàn được thực hiện 3 lần với cùng một thông số hàn.

Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng, lượng nhiệt tập trung không đủ tạo điều kiện cho quá trình hàn nhôm và kính khi công suất trung bình nguồn laser nhỏ hơn 3 W (30%), trong khi giá trị này vượt quá 17,00 W dễ dàng gây ra sự hư hỏng chất nền kính do tình trạng quá nhiệt. Mối quan hệ giữa công suất nguồn laser, $P = 3, 5, 11$, và 17 W và tần số quét cố định, $f = 20$ kHz tạo điều kiện cho ngưỡng hàn có thể xem xét ở các giá trị cụ thể lần lượt là 0,15; 0,25; 0,55; 0,85 mJ. Ngoài ra, sự kết hợp giữa tốc độ quét (v) với các giá trị 5, 50, 100, và 150 mm/s cùng với tần số quét f cho phép tạo ra mối hàn đồng nhất với độ điền đầy lần lượt là 85, 90, 95, và 99%.



Hình 4. Mối quan hệ giữa ngưỡng hàn, tỷ lệ điền đầy đường hàn và chất lượng mối hàn nhôm/thủy tinh: (a) quan hệ giữa độ bền kéo và ngưỡng hàn, (b) quan hệ giữa độ bền kéo và tỷ lệ điền đầy, (c) Vùng hàn phù hợp, (d) So sánh độ bền của nghiên cứu hiện tại với các nghiên cứu đã thực hiện

Hình 4 (a) chỉ ra mối quan hệ giữa ngưỡng hàn và độ bền kéo trong khi các thông số xử lý khác được cố định bao gồm tần số quét ($f = 20$ kHz), tốc độ hàn ($v = 50$ mm/s). Độ bền kéo cho trường hợp này được xác định với các giá trị lần lượt là 7,25; 14,56; 26,34; 15,25 MPa. Kết quả cho thấy, cường độ mối hàn ban đầu là 7,25 MPa, và tăng gấp đôi lên đến 14,56 MPa với sự gia tăng của ngưỡng hàn từ 0,15 mJ đến 0,25 MPa. Điều này có thể được giải thích khi ngưỡng hàn tăng lên, làm gia tăng nhiệt lượng cấp cho quá trình hàn, điều này sẽ giúp các chất nền nhôm và kính sẽ dễ dàng nóng chảy, hòa trộn và khuếch tán lẫn nhau [14]. Kết quả tạo ra sự liên kết hiệu quả giữa hai vật liệu. Sau đó, độ bền kéo đạt giá trị lớn nhất khoảng 26,34 MPa, giá trị này đã vượt qua nghiên cứu của Zhan và cộng sự [5] cho mối hàn nhôm/thủy tinh. Tuy nhiên, khi ngưỡng hàn đạt giá trị 0,85 mJ, σ cho thấy sự giảm đáng kể xuống 15,25 MPa. Kết quả này là do sự quá nhiệt cục bộ tại một số khu vực nhỏ của vùng nóng chảy khi năng lượng xung laser vượt mức tối ưu. Điều này có thể gây ra một vài khuyết tật không mong muốn làm ảnh hưởng đến độ bền mối hàn [15]. Kết quả này có thể được thảo luận ở phần 3.3 liên quan đến hình thái đường hàn.

Độ bền kéo của mối hàn nhôm/thủy tinh dưới điều kiện các thông số đầu vào cố định như công suất hàn, $P = 11 \text{ W}$, tần số quét, $f = 20 \text{ kHz}$ được chỉ rõ trên Hình 4 (b) cho các tỷ lệ điền đầy mối hàn lần lượt là 85, 90, 95, và 99%. Một điều chú ý, độ bền liên kết lúc đầu đạt trị số khoảng 10,29 MPa. Rõ ràng khi tỷ lệ điền đầy tăng lên, mức độ chông lán giữa các xung laser tăng, từ đó bề mặt mối hàn sẽ phân bố năng lượng đồng đều hơn. Kết quả là một mối hàn đồng nhất về hình thái được tạo ra có độ bền kéo được tăng cường đáng kể. Tuy nhiên, bộ bền này đã cải thiện đáng kể lên đến $\sigma = 26,34 \text{ MPa}$ sau khi tăng khoảng 5% tỷ lệ điền đầy mối hàn. Tuy nhiên, khi PO tiếp tục tăng đến các giá trị 95% và 99% thì độ bền kéo có xu hướng giảm nhanh khoảng 3 lần đến giá trị 8,72 MPa. Điều này là kết quả của việc tăng tỷ lệ điền đầy quá cao dẫn đến sự hình thành ứng suất dư trong một số khu vực của mối hàn, làm giảm độ bền kéo tương ứng.

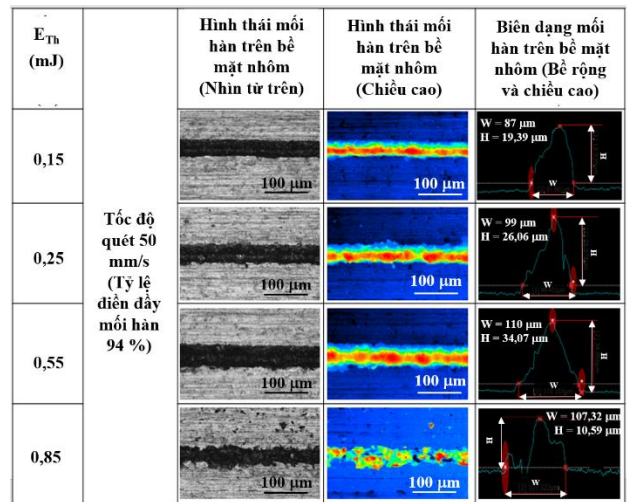
Hình 4 (c) chứng minh năng lượng xung tối thiểu khoảng 0,15 mJ để tạo thành công mối hàn nhôm/thủy tinh. Dưới ngưỡng này, năng lượng laser không đủ để tạo ra vùng nóng chảy hiệu quả. So sánh với kết quả đạt được trong nghiên cứu [8] khi sử dụng nguồn laser xung femto giây thì ngưỡng này cao hơn khoảng 30 lần. Điều này là do thời lượng xung ngắn hơn có cường độ năng lượng tức thời cao hơn, dẫn đến nóng chảy cục bộ nhanh hơn, mặc dù vùng hàn thu hẹp lại. Khi năng lượng xung tăng lên, độ bền liên kết cũng tăng lên do sự mở rộng của đường hàn. Tuy nhiên, sự hình thành một vùng bão hòa đã ảnh hưởng đến mối quan hệ giữa độ bền mối hàn và ngưỡng hàn [15]. Khi năng lượng xung tối thiểu để thực hiện liên kết không phù hợp thì có thể hình thành các mối hàn dễ tách rời hoặc xuất hiện nhiều khuyết tật. Điều này ảnh hưởng nghiêm trọng đến chất lượng mối hàn giữa nhôm và thủy tinh.

Hình 4 (d) đánh giá kết quả độ bền kéo mối hàn nhôm/thủy tinh ở nghiên cứu hiện tại với các kết quả đã được chứng minh. Rõ ràng hầu hết các thành tựu đã được công bố cho mối hàn nhôm/thủy tinh đều sử dụng nguồn laser với xung femto giây hoặc pico giây. Nhưng độ bền kéo nhìn chung khá thấp và khó đáp ứng trong các hoạt động công nghiệp vi điện tử. Mặc dù, kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu này chỉ vượt qua được một giá trị nhỏ (khoảng 2% độ bền kéo), tuy nhiên việc ứng dụng một nguồn laser xung dài và chi phí hợp lý mở ra tiềm năng tạo ra vùng hàn chất lượng tốt và giảm thiểu khuyết tật.

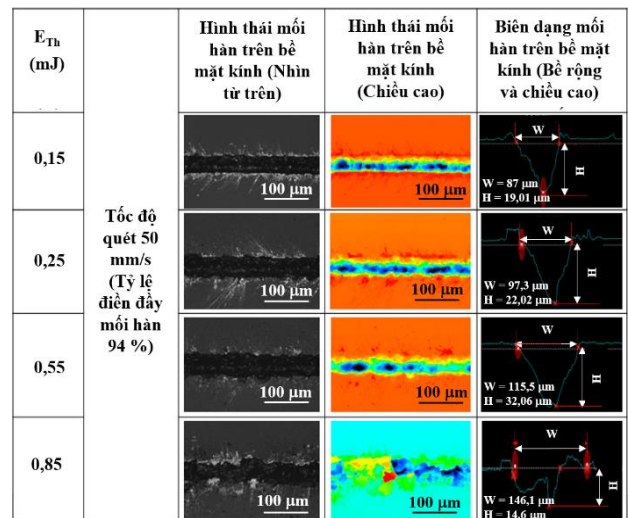
3.3. Phân tích hình thái đường hàn

Hình thái mối hàn được chứng minh bằng kính hiển vi quét laser đồng tiêu, CLSM như thể hiện trong Hình 5 và Hình 6 tương ứng với các chất nền nhôm và kính sau khi áp dụng lực kéo cắt theo phương tiếp tuyến. Kích thước của đường hàn được biểu thị tương ứng với chiều rộng, W và chiều cao đường hàn H . Các giá trị này cũng được đo trên kính hiển vi CLSM tương ứng với 5 vị trí ở mỗi bề mặt đường hàn. Kết quả đo nhận được chứng minh các biên dạng lõm ở phía thủy tinh và biên dạng lồi ở phía nhôm. Điều này cho thấy, phần thân chính của mối hàn nằm trên các chất nền nhôm và một rãnh xuất hiện trên chất nền kính.

Sau khi tác dụng lực kéo cắt theo phương tiếp tuyến với đường hàn, có thể quan sát rõ ràng sự xuất hiện của biên dạng lồi trên tấm kính và biên dạng lõm trên tấm nhôm. Hiện tượng này có thể được giải thích qua một số nguyên nhân sau: thủy tinh và nhôm có sự khác biệt lớn về tính chất vật lý, trong đó thủy tinh mang tính giòn còn nhôm lại có tính dẻo cao. Tính giòn của thủy tinh giúp nó chịu được ứng suất nén tốt hơn nhưng lại kém bền khi chịu ứng suất cắt (kéo), đặc biệt khi xuất hiện các khuyết tật hoặc vết nứt nhỏ. Ngược lại, nhôm - vật liệu dẻo - lại có khả năng chịu ứng suất kéo cao. Khi mối hàn cùng chịu tác động của lực theo phương tiếp tuyến với đường hàn, do chu vi tiếp xúc giữa mối hàn và kính lớn hơn nhiều so với chu vi tiếp xúc giữa mối hàn và kim loại [16, 17], diện tích tiếp xúc với vật liệu giòn (kính) cũng lớn hơn, dẫn đến nguy cơ xuất hiện vết nứt xung quanh chất nền kính cao hơn [15].



Hình 5. Hình thái đường hàn trên chất nền nhôm được đo bằng CLSM tương ứng với các giá trị khác nhau của ngưỡng hàn



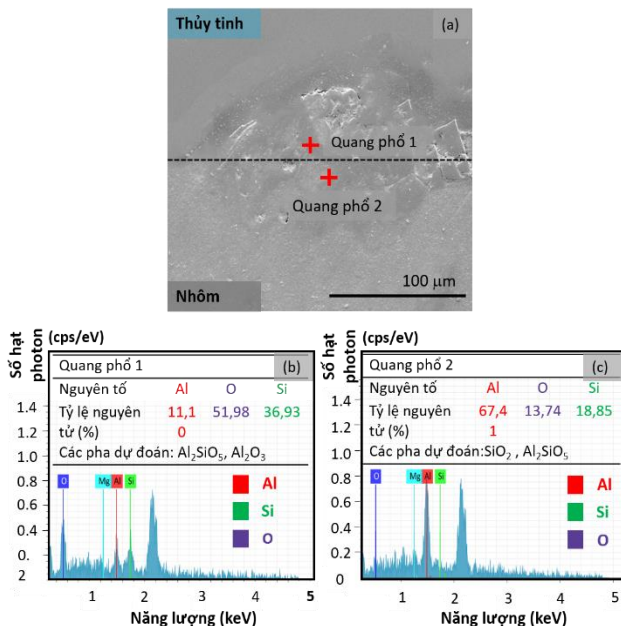
Hình 6. Hình thái đường hàn trên chất nền kính được đo bằng thiết bị CLSM tương ứng với các giá trị khác nhau của ngưỡng hàn

Đồng thời, kích thước mối hàn cũng tăng dần tương ứng với sự gia tăng của ngưỡng hàn. Đây là kết quả của việc hoàn thiện quá trình hòa trộn và khuếch tán tại vùng giao diện của mối hàn khi năng lượng xung laser tăng

cường [18]. Đặc biệt, khi so sánh với bề rộng mỗi hàn đồng/thủy tinh [15] thì giá trị này tăng gấp 1,74 lần mặc dù công suất nguồn laser chỉ bằng một nửa. Kết quả này có thể được giải thích dựa vào tính dẫn nhiệt ẩn tượng của nhôm so với đồng, và nhiệt độ nóng chảy thấp hơn. Với cùng một mức năng lượng từ nguồn laser, nhôm sẽ nóng chảy nhanh hơn và tạo ra vùng hơn lớn hơn. Tuy nhiên, hình thái của đường hàn không đồng nhất khi E_{Th} tăng đến 0,85 mJ. Điều này có thể bắt nguồn từ một số nguyên nhân, khi công suất laser cao có thể gây ra sự gia nhiệt cho kính nhanh chóng, dẫn đến hình thành các gradient nhiệt đáng kể. Khi kính được làm mát nhanh chóng trong khi hàn, có thể tạo ra các ứng suất nhiệt, có thể hình thành các vết nứt nhỏ. Mặt khác, thủy tinh có độ dẫn nhiệt thấp, rất khó phân bố nhiệt đồng đều trên bề mặt trong suốt quá trình hàn. Sự gia nhiệt không giống nhau có thể dẫn đến sự giãn nở cục bộ sự kém đồng nhất của đường hàn đặc biệt ở vùng công suất hàn cao.

3.4. Phân tích cấu trúc vi mô và thành phần pha

Cấu trúc vi mô của mối hàn tại vùng giao diện đóng vai trò rất quan trọng trong việc quyết định chất lượng hàn. Để nghiên cứu các cấu trúc, một phân tích toàn diện có thể được tiến hành bằng nhiều kỹ thuật khác nhau, bao gồm phân tích hình ảnh SEM, phân tích phổ EDS. Các kỹ thuật này cung cấp những hiểu biết có giá trị về đặc trưng cấu trúc và thành phần pha của vùng nóng chảy mối hàn nhôm/thủy tinh.



Hình 7. Cấu trúc vi mô của vùng nóng chảy: (a) Hình thái mối hàn được đo trên kính hiển vi điện từ quét (SEM); (b) và (c) thành phần các nguyên tố tại vùng nóng chảy của mối hàn được phân tích dựa vào EDS tương ứng với quang phổ 1 và 2

Hình ảnh phân tích SEM trên Hình 7 (a) chỉ rõ hình dạng của mối hàn tại vùng mặt cắt ngang tương ứng với giá trị các thông số hàn như $P = 11$ W, $v = 50$ mm/s, $f = 20$ kHz, $PO = 90\%$, $E_{Th} = 0,55$ mJ. Kết quả phân tích SEM chỉ ra rằng phần lớn vùng hàn được tạo ra gần về phía khu vực thủy tinh. Có thể lý giải hiện tượng này như sau: dưới ảnh hưởng của bức xạ nguồn laser, nhiệt độ tại chất nền kính tăng lên nhanh chóng, làm tăng độ mờ đục

của thủy tinh. Kết quả là năng lượng hấp thụ từ kính truyền qua nhôm sẽ tăng lên tương ứng, từ đó vùng nóng chảy về phía kính sẽ được mở rộng đáng kể [15, 18]. Sự phát triển của vùng hòa trộn còn là kết quả của các phản ứng cộng hóa trị giữa các nguyên tố trong thủy tinh và kim loại [17]. Kết quả là sự tạo thành các pha hoặc hợp chất mới có thể được quan sát tương ứng với hai vị trí đo quang phổ 1 và 2 trên Hình 7 (b) và (c). Hình ảnh hiển thị phân tích phổ EDS trên Hình 7 (b) sự xuất hiện của các nguyên tố O, Al, và Si với tỷ lệ trung bình lần lượt là: 51,98%, 11,1%, và 36,93%. So với nghiên cứu của Zhan và cộng sự [19], tỷ lệ % về nguyên tố O lớn hơn khoảng 1,5 lần chứng tỏ ngoài hợp chất SiO_2 trong thủy tinh, có thể xuất hiện liên kết Al-O tạo thành các hợp chất vô định hình khác nhau tại vùng giao diện của Al 5052/glass. Khi vùng đo gần phía khu vực chất nền nhôm thì có sự phân bố đồng đều hơn với tỷ lệ % các nguyên tử oxygen, aluminium, và silicon lần lượt là 67,4%, 13,74%, và 18,85%. Kết quả này có thể được giải thích dựa vào sự mở rộng của vùng lỗ khóa (keyhole zone) sơ cấp và thứ cấp về phía chất nền nhôm ở mức năng lượng xung laser tối ưu [16]. Hệ quả chứng minh sự khuếch tán và hòa trộn cao tại vùng nóng chảy. Điều này có thể dẫn đến sự hình thành của một số hợp chất như là Al_2O_3 hoặc Al_2SiO_5 thậm chí có thể là các cấu trúc Al-O-Si vô định hình.

4. Kết luận

Đối với mối hàn giữa nhôm và thủy tinh được thực hiện thông qua phương pháp hàn truyền bằng xung nano giây. Chất lượng liên kết được đánh giá với việc áp dụng lực kéo theo phương tiếp tuyến đường hàn, biên dạng đường hàn, và đặc điểm cấu trúc vi mô tại vùng giao diện mối hàn. Sau đây là một số kết luận được rút ra:

- Dựa vào kết quả mối quan hệ giữa công suất hàn, tốc độ hàn, tỷ lệ điền đầy (PO) với lực kéo lớn nhất theo phương tiếp tuyến với đường hàn đã chỉ ra giá trị của $PO = 90\%$, $P = 11$ W, $v = 50$ mm/s và $f = 20$ kHz thì độ bền kéo của mối hàn có thể đạt được giá trị lớn nhất là 26,34 MPa.

- Hình ảnh mối hàn trên kính hiển vi quang học CLSM cho thấy đường hàn chủ yếu được tập trung trên chất nền nhôm, và sự đứt gãy xuất hiện trên chất nền kính sau khi áp dụng lực kéo theo phương tiếp tuyến với đường hàn.

- Các phản ứng oxi hóa khử có thể xảy ra tại vùng nóng chảy, nơi có sự xuất hiện của các thành phần nguyên tố Al, O, và Si, đã chứng minh độ hòa trộn và khuếch tán cao. Đây là yếu tố quan trọng trong việc cải thiện hiệu suất hàn giữa nhôm và thủy tinh.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số B2024-DN06-06.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Nazari and H. Khoramishad, "A novel combined anodic-adhesive bonding technique for joining glass to metal for micro device applications", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 117, p. 103175, 2022.
- [2] M. C. Özdemir Yanık, O. Demirel, M. Elmadağlı, E. Günay, and S. Aydın, "Investigation of glass sintering to improve strength and

- interfacial interactions in glass-to-AISI 316L metal joints", *International Journal of Applied Glass Science*, vol. 14, pp. 256-267, 2023.
- [3] C. Tian, H. Ren, and H. Shen, "The connection of glass and metal with a large gap by combining laser soldering and ultrafast laser welding", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 102, pp. 528-534, 2023.
- [4] C. Li *et al.*, "High shear strength welding of soda lime glass to stainless steel using an infrared nanosecond fiber laser assisted by surface tension", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 161, p. 107329, 2023.
- [5] J. Zhan *et al.*, "Mechanism and optimization of femtosecond laser welding fused silica and aluminum", *Applied Surface Science*, vol. 640, p. 158327, 2023.
- [6] R. M. Carter *et al.*, "Towards industrial ultrafast laser microwelding: SiO₂ and BK7 to aluminum alloy", *Applied optics*, vol. 56, pp. 4873-4881, 2017.
- [7] X. H. Shen and X. Ling, "Damage analysis of glass-to-metal diffusion welded joints", *Advanced Materials Research*, vol. 44, pp. 765-772, 2008.
- [8] G. Zhang and G. Cheng, "Direct welding of glass and metal by 1 kHz femtosecond laser pulses", *Applied Optics*, vol. 54, pp. 8957-8961, 2015.
- [9] Y. Wang, Y. Li, S. Ao, Z. Luo, and D. Zhang, "Welding of 304 stainless steel and glass using high-repetition-frequency femtosecond laser", *Materials Research Express*, vol. 8, p. 106523, 2021.
- [10] L. Zhang, Z. Zhu, T. Xu, H. Wu, and X. Ma, "Enhanced joint through significant diffusion and molten pool regions in fused silica to aluminum alloy welding by femtosecond mJ-pulses", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 129, pp. 601-610, 2023.
- [11] Z. Min, C. Yufei, C. Changjun, and Q. Zhaoling, "A new sealing technology for ultra-thin glass to aluminum alloy by laser transmission welding method", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 115, pp. 2017-2035, 2021.
- [12] J. Huo *et al.*, "The mechanism of the welding between silica glass and 304 stainless steel using nanosecond fibre laser", *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 28, pp. 407-414, 2023.
- [13] P. Li, X. Xu, W. Tan, H. Liu, and X. Wang, "Improvement of laser transmission welding of glass with titanium alloy by laser surface treatment", *Materials*, vol. 11, p. 2060, 2018.
- [14] Y. Feng *et al.*, "Direct joining of quartz glass and copper by nanosecond laser", *Ceramics International*, vol. 49, pp. 36056-36070, 2023.
- [15] H. Nguyen, C.-K. Lin, P.-C. Tung, and J.-R. Ho, "Characterizations of laser transmission welding of glass and copper using nanosecond pulsed laser", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 130, pp. 2755-2770, 2024.
- [16] O. P. Ciuca, R. M. Carter, P. B. Prangnell, and D. P. Hand, "Characterisation of weld zone reactions in dissimilar glass-to-aluminium pulsed picosecond laser welds", *Materials Characterization*, vol. 120, pp. 53-62, 2016.
- [17] H. Nguyen, C.-K. Lin, P.-C. Tung, and J.-R. Ho, "Microstructures and mechanical properties of copper-to-glass laser transmission welding employing a nanosecond pulsed laser", *Ceramics International*, vol. 50, pp. 21788-21799, 2024.
- [18] Y. Wang, L. Mi, X. Qi, X. Fang, C. Liu, and H. Cui, "Achieving high-strength laser welding of quartz glass to titanium alloys via magnetron sputtering", *Ceramics International*, vol. 51, pp. 3461-3470, 2025.
- [19] L. Zhang, Z. Zhu, J. Wen, H. Wu, L. Li, and X. Ma, "The characteristics and dynamics of fused silica-aluminum alloy welding during mJ-level femtosecond laser", *Materials & Design*, vol. 239, p. 112790, 2024.