

Ảnh hưởng của TiO_2 và nhiệt độ đến chế tạo gốm xốp trên cơ sở Al_2O_3 bằng phương pháp thiêu kết không áp lực

Dương Minh Hồng¹, Chu Hoàng Đức Anh^{1,2}, Nguyễn Đức Sơn¹, Vũ Trọng Nghĩa¹,
Nguyễn Xuân Trường³, Đặng Quốc Khánh¹, Nguyễn Thị Thảo^{1*}

¹Trường Vật liệu, Đại học Bách khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, phường Bách Khoa, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

²Cục Công nghiệp, Bộ Công Thương, 54 Hai Bà Trưng, phường Trần Hưng Đạo, quận Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam

³Trường Hoá và Khoa học sự sống, Đại học Bách khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, phường Bách Khoa, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 12/9/2024; ngày chuyển phản biện 15/9/2024; ngày nhận phản biện 30/9/2024; ngày chấp nhận đăng 15/10/2024

Tóm tắt:

Trong nghiên cứu này, chúng tôi trình bày ảnh hưởng của TiO_2 và nhiệt độ thiêu kết tới cấu trúc và tính chất cơ học của vật liệu gốm xốp trên cơ sở Al_2O_3 được chế tạo bằng phương pháp luyện kim bột. Kết quả nghiên cứu cho thấy, chỉ với hàm lượng nhỏ TiO_2 được thêm vào (nhỏ hơn 1%.kl) đã làm tăng khả năng liên kết giữa các hạt Al_2O_3 , từ đó làm tăng khả năng thiêu kết của Al_2O_3 và cải thiện đáng kể độ bền của sản phẩm ở nhiệt độ thiêu kết thấp hơn 1500°C. Khi thiêu kết ở 1400°C, độ xốp giảm từ 82,54 xuống 64,11% và độ bền nén tăng từ 1,35 lên 13,73 MPa khi tăng hàm lượng TiO_2 từ 0 đến 1%.kl. Khi tăng nhiệt độ từ 1400 đến 1500°C, độ xốp của tất cả các mẫu gốm xốp giảm mạnh và độ bền tăng cao. Độ xốp giảm mạnh từ 64,11 xuống 55,74% và độ bền nén tăng từ 13,73 đến 17,53 MPa khi thêm vào 1%.kl TiO_2 . Kết quả nghiên cứu này chỉ ra rằng, TiO_2 đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện tính chất cơ học của gốm xốp trên cơ sở Al_2O_3 .

Từ khóa: Al_2O_3 , gốm xốp, luyện kim bột, thiêu kết không áp lực, TiO_2 .

Chỉ số phân loại: 1.3, 1.4, 2.5

Effect of TiO_2 and temperature on fabrication of porous Al_2O_3 - based porous ceramic by pressureless sintering

Minh Hong Duong¹, Hoang Duc Anh Chu^{1,2}, Duc Son Nguyen¹, Trong Nghia Vu¹,
Xuan Truong Nguyen³, Quoc Khanh Dang¹, Thi Thao Nguyen^{1*}

¹School of Materials Science and Engineering, Hanoi University of Science and Technology, 1 Dai Co Viet Street, Bach Khoa Ward, Hai Ba Trung District, Hanoi, Vietnam

²Vietnam Industry Agency, Ministry of Industry and Trade, 54 Hai Ba Trung Street, Tran Hung Dao Ward, Hoan Kiem District, Hanoi, Vietnam

³School of Chemistry and Life Sciences, Hanoi University of Science and Technology, 1 Dai Co Viet Street, Bach Khoa Ward, Hai Ba Trung District, Hanoi, Vietnam

Received 12 September 2024; revised 30 September 2024; accepted 15 October 2024

Abstract:

This study investigated the effects of TiO_2 and sintering temperature on the structure and mechanical properties of Al_2O_3 -based porous ceramic materials fabricated by powder metallurgy techniques. The results showed that a small addition of TiO_2 (less than 1% by weight) increased the sintering ability of Al_2O_3 and significantly improved the strength of the samples at sintering temperatures below 1500°C. When sintered at 1400°C, the porosity decreased sharply from 82.54 to 64.11%, while compressive strength increased dramatically from 1.35 to 13.73 MPa as the TiO_2 content increased from 0 to 1 wt.%. As the temperature increased from 1400 to 1500°C, the porosity of all porous ceramic samples decreased significantly, while their strength increased remarkably. The porosity decreased from 64.11 to 55.74%, and the compressive strength increased from 13.73 to 17.53 MPa with the TiO_2 addition of 1 wt.%. These study results indicated that TiO_2 played a crucial role in the improvement of the mechanical properties of Al_2O_3 - based porous ceramic.

Keywords: Al_2O_3 , porous ceramic, powder metallurgy techniques, pressureless sintering, TiO_2 .

Classification numbers: 1.3, 1.4, 2.5

*Tác giả liên hệ: Email: thao.nguyenthi1@hust.edu.vn

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, các vấn đề về môi trường đang ngày càng được các nước trên toàn thế giới quan tâm, đặc biệt là các nước đang phát triển như Việt Nam. Trong đó, ô nhiễm môi trường không khí do bụi mịn đang là một trong những vấn đề rất nghiêm trọng đối với sức khỏe con người và chưa có giải pháp giải quyết triệt để vấn đề này. Do đó, các công nghệ xử lý khí thải cần phải được nghiên cứu và phát triển. Trong đó, công nghệ xử lý không khí bằng vật liệu gồm xốp trên cơ sở Al_2O_3 đang là một hướng đi đầy hứa hẹn trong lĩnh vực này.

Vật liệu gồm xốp trên cơ sở Al_2O_3 là một trong những vật liệu tiềm năng cho việc sản xuất các bộ lọc ứng dụng trong xử lý môi trường, lọc các hạt từ các luồng khí nóng sinh ra từ quá trình đốt cháy, khí hóa... bởi nhiều ưu điểm nổi bật của vật liệu này như khả năng chịu nhiệt, độ xốp và độ bền cơ học cao [1]. Cho tới nay, có nhiều phương pháp với các kỹ thuật khác nhau để chế tạo loại vật liệu này và có tổng cộng bốn kỹ thuật chính bao gồm: mẫu chảy, sử dụng chất chiếm chỗ, thiêu kết một phần và tạo xốp trực tiếp [2]. Phương pháp luyện kim bột là một trong số các phương pháp chế tạo mang nhiều ưu điểm như quy trình chế tạo đơn giản, thân thiện với môi trường, tổn hao nguyên vật liệu thấp và tiết kiệm năng lượng [3]. Ngoài ra, phương pháp này sử dụng kỹ thuật mẫu chảy có ưu điểm nổi bật là khả năng điều khiển cấu trúc xốp, kích thước và phân bố lỗ xốp phụ thuộc vào yêu cầu và mục đích ứng dụng của sản phẩm cần chế tạo. Tuy nhiên, do nhiệt độ thiêu kết của Al_2O_3 có thể đến 1700°C nên nhiệt độ chế tạo vật liệu gồm xốp trên cơ sở Al_2O_3 bằng phương pháp này rất cao [4]. Để giảm nhiệt độ thiêu kết của Al_2O_3 xuống dưới 1500°C với chi phí chế tạo thấp, các loại phụ gia thiêu kết như MgO , Cr_2O_3 , TiO_2 là một giải pháp vô cùng hiệu quả [4-8]. Trong đó, TiO_2 là loại phụ gia phổ biến được sử dụng để thiêu kết của Al_2O_3 ở nhiệt độ thấp hơn theo cơ chế thiêu kết pha rắn bằng cách tạo dung dịch rắn trên bề mặt hạt Al_2O_3 , ngoài ra TiO_2 còn có thể tạo pha $\beta\text{-Al}_2\text{TiO}_5$ với Al_2O_3 , cản trở sự lớn hạt của Al_2O_3 . Nghiên cứu này tập trung vào ảnh hưởng của hàm lượng TiO_2 và nhiệt độ tới độ xốp, cấu trúc lỗ xốp và độ bền nén của vật liệu gồm xốp trên cơ sở Al_2O_3 được chế tạo bằng phương pháp luyện kim bột.

2. Phương pháp chế tạo vật liệu

2.1. Nguyên liệu ban đầu

Nguyên liệu đầu vào bao gồm bột $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Macklin, Trung Quốc) có độ tinh khiết lớn hơn 99,9%, bột TiO_2 ở dạng rutile (Guangdong Guanghua Sci-Tech Co., Trung Quốc) có độ tinh khiết lớn hơn 99%, chất tạo xốp NH_4HCO_3 (Guangdong Chemical Reagent, Trung Quốc) với kích thước hạt trung bình khoảng $150\text{ }\mu\text{m}$ và silica sol với 30% khối lượng (%.kl) SiO_2 được sử dụng làm chất kết dính.

2.2. Chuẩn bị bột và chế tạo vật liệu

Bột Al_2O_3 và TiO_2 được trộn theo tỷ lệ tính toán trước để thu được hỗn hợp bột có thành phần thể hiện trong bảng 1 bằng phương pháp nghiền cơ học với bi nghiền Al_2O_3 và môi trường nghiền là ethanol trong 2 giờ. Huyền phù thu được sau quá trình nghiền được sấy ở 200°C để bay hơi ethanol.

Bảng 1. Tỷ lệ thành phần của hỗn hợp bột Al_2O_3 - TiO_2

Mẫu	Al_2O_3 (%.kl)	TiO_2 (%.kl)
A	100	0
A - 0,25Ti	99,75	0,25
A - 0,5Ti	99,5	0,5
A - 0,75Ti	99,25	0,75
A - 1Ti	99	1

Hỗn hợp bột sau đó được trộn với chất tạo xốp NH_4HCO_3 với tỷ lệ 20:80 theo tỷ lệ phần trăm thể tích và chất kết dính silica sol, sau đó được ép tạo hình với lực ép là 50 MPa. Mẫu sau khi ép tạo hình sẽ được nung ở 150°C trong 3 giờ để loại bỏ chất tạo xốp theo phương trình (1) và thiêu kết (sử dụng lò nung Linn HT1600, Đức) ở các nhiệt độ lần lượt là 1400, 1450, 1500°C với thời gian thiêu kết là 2 giờ trong môi trường khí Ar (việc sử dụng khí Ar nhằm bảo vệ điện cực của lò thiêu kết).



2.3. Kiểm tra và đánh giá tính chất của vật liệu

Thành phần pha của các mẫu gồm xốp được xác định và phân tích trên thiết bị chụp nhiễu xạ tia X (PANalytical AERIS, Hà Lan). Kích thước, hình dạng của lỗ xốp và cấu trúc xốp được quan sát và phân tích trên máy hiển vi quang học kỹ thuật số (VHX - 7000, Keyence, Nhật Bản). Máy thử kéo vạn năng (MTS 809, Hoa Kỳ) được dùng để xác định độ bền nén của mẫu gồm xốp dựa theo tiêu chuẩn quốc tế

ISO 17162:2014. Phương pháp cân thủy tĩnh theo trên tiêu chuẩn TCVN 10826:2015 được dùng để xác định độ xốp của mẫu gốm xốp sau khi thiêu kết theo phương trình sau:

$$\text{Tỷ trọng} \quad \gamma_t = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (2)$$

$$\text{Độ xốp thực} \quad \theta = \frac{\gamma_{lt} - \gamma_t}{\gamma_{lt}} \cdot 100\% \text{ (%) } \quad (3)$$

$$\text{Độ xốp biểu kiến} \quad \theta_h = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3} \cdot 100\% \text{ (%) } \quad (4)$$

trong đó: m_1 là khối lượng mẫu khô; m_2 là khối lượng mẫu sau khi bão hòa chất lỏng; m_3 là khối lượng mẫu khi cân trong chất lỏng dựa trên định luật Acsimet bằng hệ thống cân bao gồm dây hoặc rổ treo mẫu sao cho mẫu thử được ngâm hoàn toàn trong chất lỏng, bình chứa chất lỏng và thiết bị cân phân tích OHAUS PR224 với độ chính xác 0,0001 g; γ_{lt} là tỷ trọng lý thuyết của hỗn hợp bột được tính theo phương trình sau:

$$\gamma_{lt} = \frac{1}{\frac{\%m_a}{d_a} + \frac{\%m_b}{d_b}} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (5)$$

trong đó: $\%m_a$, $\%m_b$ là phần trăm khối lượng tương ứng của thành phần chất Al_2O_3 và TiO_2 trong hỗn hợp; d_a , d_b là khối lượng riêng theo lý thuyết tương ứng của thành phần chất Al_2O_3 và TiO_2 trong hỗn hợp.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Kết quả phân tích nhiễu xạ tia X

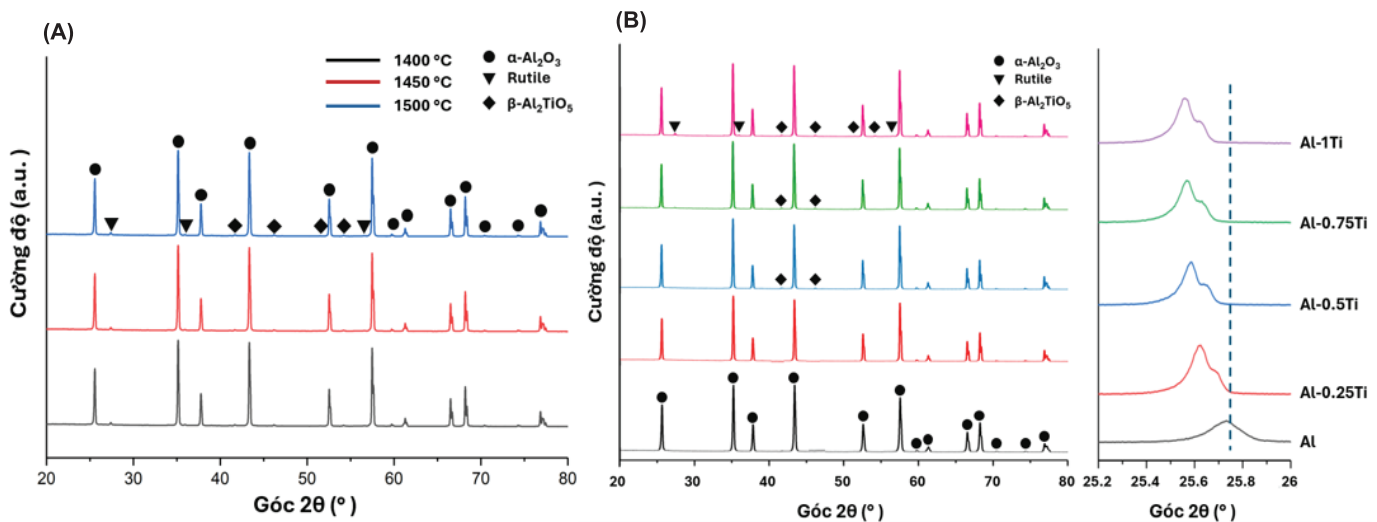
Hình 1 là giản đồ nhiễu xạ tia X của các mẫu gốm được thiêu kết ở 1450°C với hàm lượng TiO_2 thay đổi từ 0 đến 1%.kl và các mẫu gốm sử dụng 1%.kl TiO_2 khi nhiệt độ thiêu kết tăng từ 1400 đến 1500°C . Kết quả phân tích ở hình 1A

và 1B chỉ ra rằng, chỉ xác nhận được các đỉnh nhiễu xạ của $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ có cường độ lớn và một vài đỉnh nhiễu xạ có cường độ nhỏ của TiO_2 . Khi sử dụng tiêu chuẩn JCPDS-41-0258 dành cho aluminium titanate, một số đỉnh nhiễu xạ của aluminium titanate ứng với một số đỉnh nhiễu xạ trong các mẫu gốm xốp với hàm lượng TiO_2 là 0,5, 0,75 và 1%.kl.

Khi so sánh vị trí của đỉnh nhiễu xạ đầu tiên của các mẫu, chúng có xu hướng dịch chuyển sang bên trái khi hàm lượng TiO_2 tăng. Kết quả này chứng tỏ đã xảy ra quá trình thay thế vị trí của cation Al^{3+} và cation Ti^{4+} trong mạng tinh thể để tạo thành dung dịch rắn do sự sai lệch về bán kính ion nhỏ hơn 15% (bán kính ion của Al^{3+} là 0,068 nm và bán kính ion của Ti^{4+} là 0,075 nm) [9]. Khi giới hạn hòa tan là 0,27%.kl TiO_2 , pha aluminium titanate bắt đầu hình thành và lượng pha mới hình thành tăng theo chiều tăng hàm lượng TiO_2 . Khi nhiệt độ thiêu kết tăng từ 1400 đến 1500°C , các đỉnh nhiễu xạ không có sự thay đổi, đỉnh nhiễu xạ của pha aluminium titanate đã xuất hiện ở 1400°C , kết quả này cũng phù hợp với nghiên cứu trước đây của P.C.F. Alves và cs (2021) [10].

3.2. Kết quả cấu trúc bề mặt, độ xốp

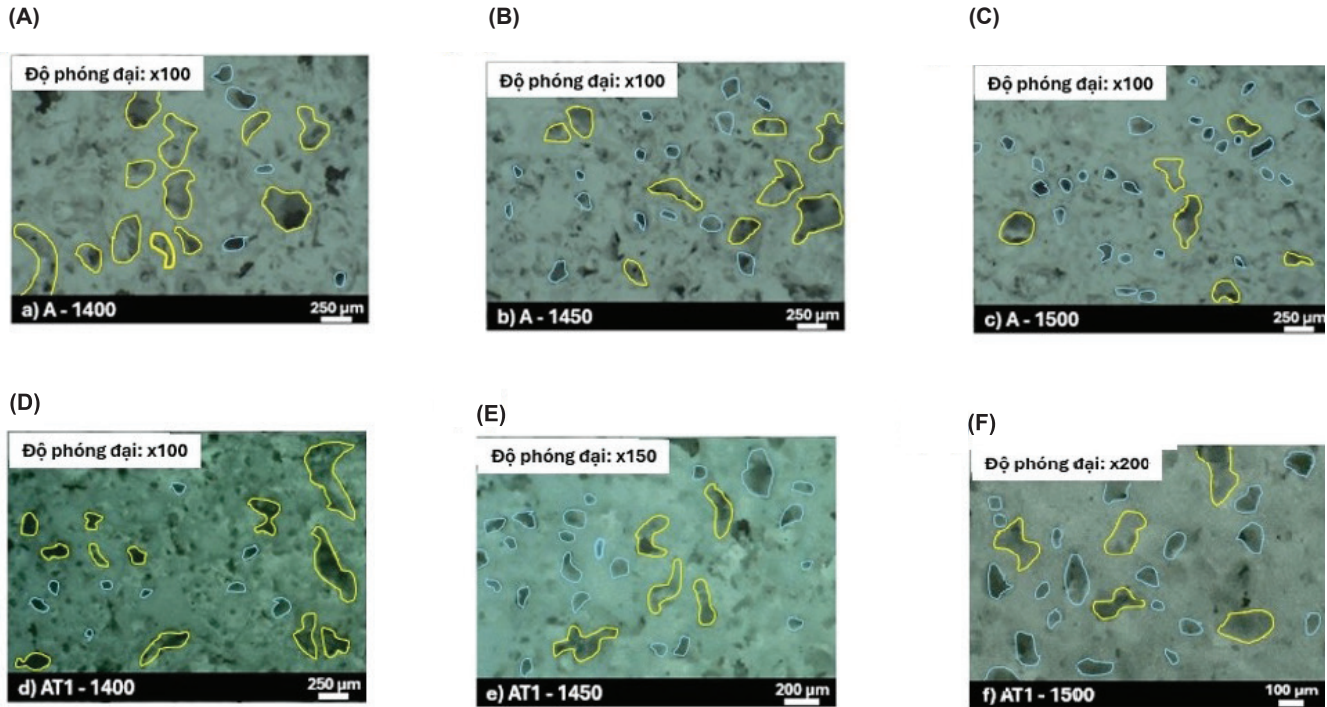
Hình 2 là hình ảnh về hình thái bề mặt của các mẫu gốm xốp không dùng và có dùng 1%.kl TiO_2 . Kết quả cho thấy, khi đưa thêm 1%.kl TiO_2 , các lỗ xốp liên thông (lỗ xốp khoanh vàng) dần biến mất và các lỗ xốp nằm đơn lẻ bắt đầu xuất hiện nhiều hơn và kích thước của chúng có xu hướng nhỏ dần. Hình thái bề mặt mẫu có xu hướng thay đổi tương tự khi nhiệt độ tăng từ 1400 đến 1500°C .



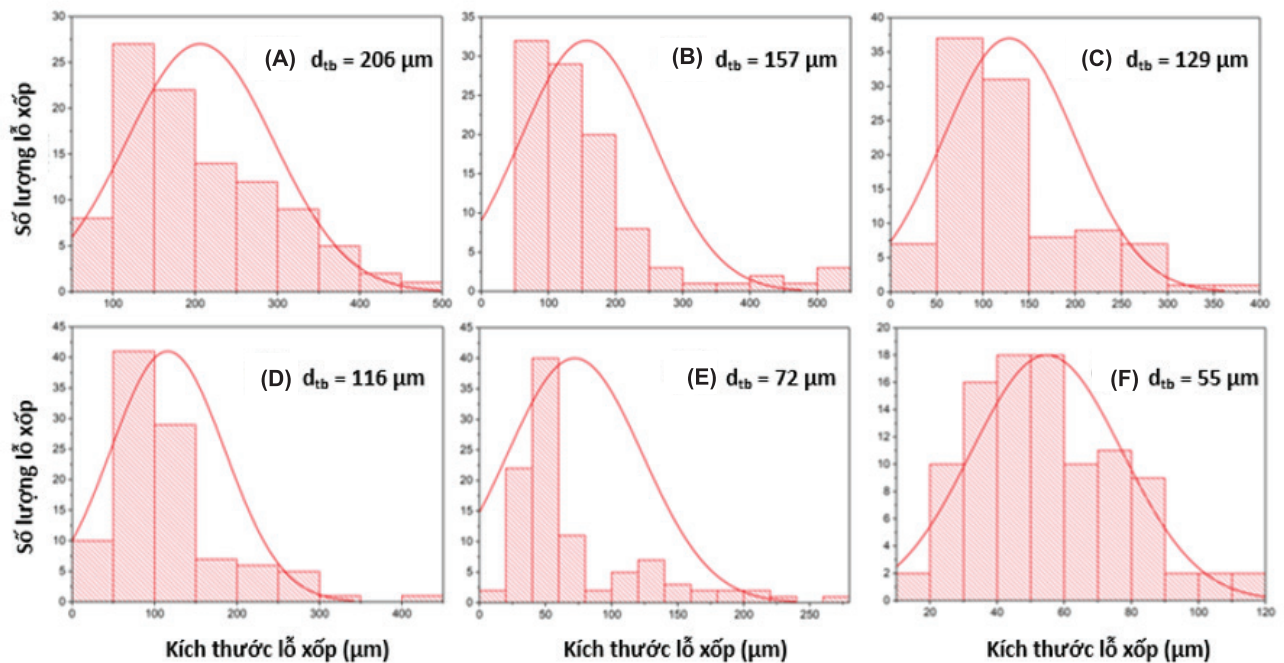
Hình 1. Kết quả phân tích nhiễu xạ tia X. (A) Các mẫu gốm sử dụng 1%.kl TiO_2 khi nhiệt độ thiêu kết thay đổi từ 1400 đến 1500°C ; **(B)** Các mẫu gốm thiêu kết ở 1450°C với hàm lượng TiO_2 khác nhau.

Hình 3 cho thấy kết quả phân tích phân bố và kích thước lỗ xốp tương ứng với các mẫu được thể hiện ở hình 2. Sự phân bố và kích thước lỗ xốp trung bình có xu hướng thay đổi tương tự khi tăng hàm lượng

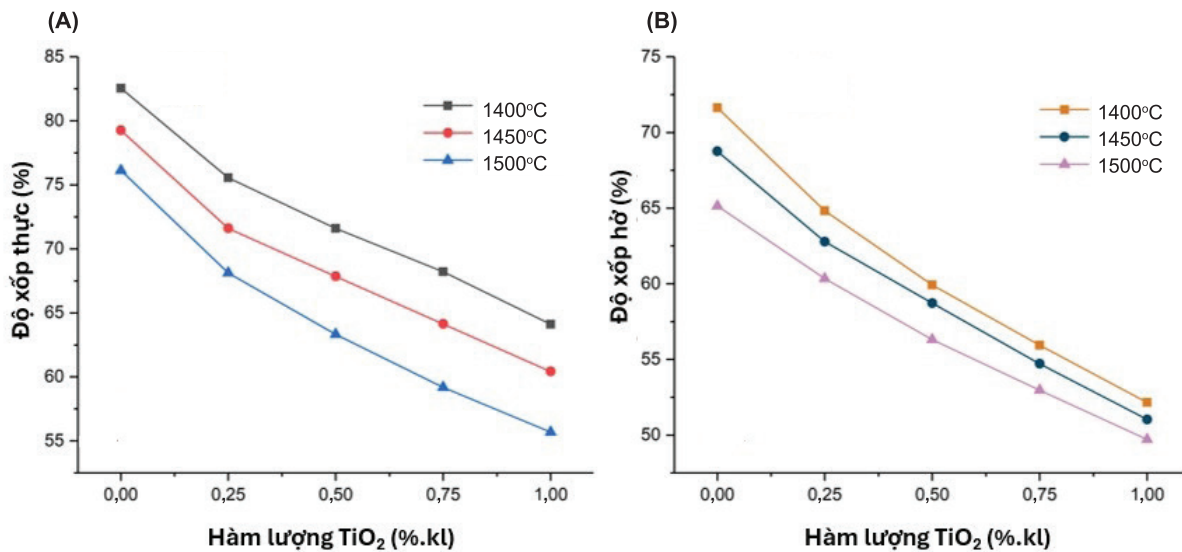
chất phụ gia hoặc tăng nhiệt độ thiêu kết. Ở mọi nhiệt độ thiêu kết, ta có thể thấy rằng, mẫu không dùng TiO_2 có kích thước lỗ xốp trung bình lớn hơn rất nhiều so với mẫu dùng TiO_2 .



Hình 2. Ảnh qua kính hiển vi kỹ thuật số của các mẫu gốm xốp không dùng TiO_2 ở nhiệt độ thiêu kết: (A) 1400°C; (B) 1450°C; (C) 1500°C và các mẫu gốm xốp dùng 1% TiO_2 ở nhiệt độ thiêu kết: (D) 1400°C; (E) 1450°C; (F) 1500°C.



Hình 3. Giản đồ mô tả phân bố, kích thước lỗ xốp trung bình (d_{tb}) của các mẫu gốm xốp không dùng TiO_2 ở: (A) 1400°C; (B) 1450°C; (C) 1500°C và các mẫu gốm xốp dùng 1 kl.% TiO_2 ở (D) 1400°C; (E) 1450°C; (F) 1500°C.



Hình 4. Đồ thị mô tả sự thay đổi: (A) Độ xốp thực của các mẫu gốm xốp; (B) Độ xốp hở của các mẫu gốm xốp với hàm lượng TiO₂ khác nhau khi nhiệt độ thay đổi từ 1400 đến 1500°C.

Hình 4 là đồ thị mô tả sự thay đổi của độ xốp thực và độ xốp hở của các mẫu gốm xốp dùng TiO₂ với hàm lượng khác nhau khi nhiệt độ tăng từ 1400 đến 1500°C.

Độ xốp của tất cả các mẫu gốm xốp đều giảm khi tăng hàm lượng TiO₂ hoặc nhiệt độ. Ở nhiệt độ 1400°C, độ xốp thực của mẫu gốm xốp giảm mạnh từ 82,54 xuống còn 64,11% và độ xốp hở giảm mạnh từ 71,62 xuống còn 52,23% khi tăng hàm lượng TiO₂ từ 0 đến 1%. Khi tăng nhiệt độ từ 1400 đến 1500°C, độ xốp của tất cả các mẫu gốm xốp giảm mạnh. Ở nhiệt độ 1500°C, độ xốp thực của mẫu gốm xốp giảm mạnh từ 76,15 xuống 55,74% và độ xốp hở giảm mạnh từ 65,12 xuống 49,76% khi tăng hàm lượng TiO₂.

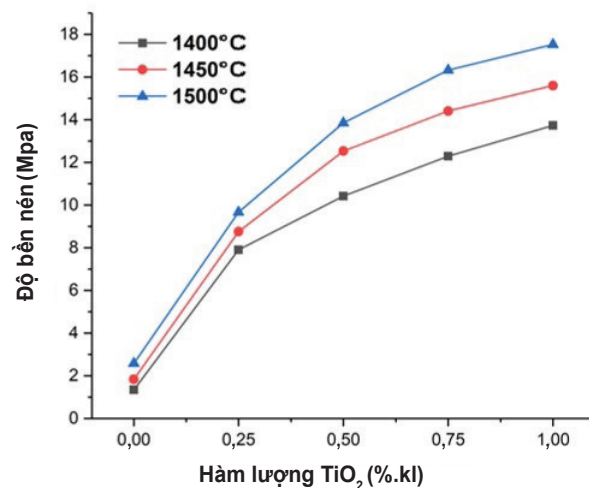
Từ các kết quả nhận được sau khi phân tích về cấu trúc bề mặt, độ xốp, phân bố và kích thước lỗ xốp có thể thấy khả năng thiêu kết của Al₂O₃ được cải thiện rõ rệt khi dùng TiO₂. Sau khi loại bỏ chất tạo xốp, một hệ thống lỗ xốp liên thông được hình thành bởi khoảng trống giữa các hạt bột Al₂O₃ và khoảng trống để lại sau khi chất tạo xốp bị loại bỏ. Khi bắt đầu quá trình thiêu kết, tại bề mặt các hạt Al₂O₃ diễn ra quá trình hình thành và phát triển cổ liên kết. Cổ liên kết tiếp tục phát triển đến mức độ nhất định sẽ diễn ra quá trình kết khối. Khi đó, các hạt Al₂O₃ bắt đầu hợp nhất với nhau làm cho kích thước các lỗ xốp hở giữa các hạt nhỏ dần và trở thành các lỗ xốp kín, kích thước các lỗ xốp kín này tiếp tục nhỏ dần đến kích thước tới hạn.

Mặt khác, khi quá trình kết khối ở nhiệt độ cao diễn ra đồng nghĩa với việc co ngót về thể tích diễn ra mạnh mẽ hơn. Do đó, kích thước các lỗ xốp liên thông được tạo bởi khoảng trống sau khi loại bỏ chất tạo xốp có xu hướng giảm dần và trở thành lỗ xốp kín. Sự hình thành dung dịch rắn của TiO₂ và Al₂O₃ trên bề mặt làm tăng khả năng liên kết giữa

các hạt Al₂O₃ dẫn đến quá trình kết khối diễn ra nhanh hơn. Việc tăng hàm lượng TiO₂ cũng khiến cho dung dịch rắn của TiO₂ và Al₂O₃ hình thành nhiều hơn. Do vậy, độ xốp và kích thước lỗ xốp trung bình giảm khi tăng hàm lượng TiO₂, cùng với đó, độ xốp và kích thước lỗ xốp trung bình giảm khi nâng cao nhiệt độ thiêu kết.

3.3. Độ bền nén

Hình 5 mô tả sự phụ thuộc của độ bền nén của các mẫu gốm xốp vào sự thay đổi của nhiệt độ và hàm lượng TiO₂. Tại 1400°C, khi hàm lượng TiO₂ tăng từ 0 đến 1%.kl, độ bền nén của mẫu tăng từ 1,35 lên 13,73 MPa. Khi nhiệt độ tăng từ 1400 đến 1500°C, độ bền nén của mẫu không sử dụng TiO₂ tăng từ 1,35 đến 2,58 MPa, độ bền nén của mẫu sử dụng 1%.kl TiO₂ tăng từ 13,73 đến 17,53 MPa.



Hình 5. Độ bền nén của các mẫu gốm khi thay đổi hàm lượng TiO₂ và nhiệt độ tăng từ 1400 đến 1500°C.

Kết quả về độ xốp ở phần 3.2 và kết quả độ bền nén ở hình 5 cho thấy giá trị của độ bền nén tăng khi độ xốp giảm. Mỗi quan hệ đó có thể được biểu diễn theo công thức Rice được biểu diễn ở phương trình (6) [11]:

$$\sigma = \sigma^0 \exp(-bp) \quad (6)$$

trong đó: σ là độ bền của vật liệu ở độ xốp p ; σ^0 là độ bền của vật liệu khi độ xốp bằng 0; p là độ xốp của vật liệu và b là hằng số đặc trưng của lỗ xốp. Trong kết quả nghiên cứu của hai nhóm lần lượt là M.S. Ali và cs (2017) [11], A. Çelik và cs (2022) [12] cũng xác nhận tương tự mối quan tương quan hệ giữa độ bền nén và độ xốp.

Mối quan hệ tương quan giữa độ bền nén và độ xốp cũng có thể được giải thích do khả năng kết khối của Al_2O_3 được cải thiện rõ rệt khi tăng hàm lượng TiO_2 dẫn đến mẫu kết khối nhanh hơn và làm tăng độ bền của các mẫu có dung TiO_2 .

4. Kết luận

Với một lượng nhỏ TiO_2 được thêm vào đã có thể làm cải thiện khả năng thiêu kết do đó làm tăng độ bền của vật liệu gồm xốp trên cơ sở Al_2O_3 ở nhiệt độ thấp hơn 1500°C . Với mục tiêu nhằm chế tạo vật liệu gồm xốp trên cơ sở Al_2O_3 ở nhiệt độ thấp, kết quả cho thấy, vật liệu gồm xốp trên cơ sở Al_2O_3 khi sử dụng 1%kl TiO_2 , thiêu 1400°C có độ xốp thực chỉ đạt 64,11%, trong đó xốp hở chiếm 52,15%, thấp hơn khá nhiều so với vật liệu khi không sử dụng TiO_2 , thiêu ở 1500°C có độ xốp thực đạt 82,54%, độ xốp hở đạt 71,6%. Tuy nhiên, độ bền nén của vật liệu khi sử dụng 1%kl TiO_2 , thiêu kết tại 1400°C có độ bền nén 13,73 MPa, cao hơn rất nhiều so với độ bền nén của vật liệu khi không sử dụng TiO_2 , thiêu kết ở 1500°C là 2,58 MPa. Do đó, cần nghiên cứu thêm nhằm nâng cao độ xốp của vật liệu khi sử dụng 1%kl TiO_2 và thiêu kết ở 1400°C .

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được tài trợ thông qua đề tài Nghị định thư hợp tác nghiên cứu khoa học Việt Nam - Hungary của Bộ Khoa học và Công nghệ, mã số NĐT/HU/22/21. Các tác giả xin chân thành cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D. Peck, M. Zappi, D. Gang, et al. (2023), "Review of porous ceramics for hot gas cleanup of biomass syngas using catalytic ceramic filters to produce green hydrogen/fuels/chemicals", *Energies*, **16**(5), DOI: 10.3390/en16052334.
- [2] U.M. Basheer, A. Naib (2018), "Introductory chapter: A brief introduction to porous ceramic", *Recent Advanced in Porous Ceramic*, DOI: 10.5772/intechopen.74747.
- [3] A. Panda, J. Dobránsky, M. Jančík, et al. (2018), "Advantages and effectiveness of the powder metallurgy in manufacturing technologies", *Metalurgija*, **57**(4), pp.353-356.
- [4] L.A. Xue, I.W. Chen (1991), "Low-temperature sintering of alumina with liquid-forming additives", *J. Am. Ceram. Soc.*, **74**(8), DOI: 10.1111/j.1151-2916.1991.tb07825.x.
- [5] K. Hamano, C. Hwang, Z. Nakagawa, et al. (1987), "Effects of TiO_2 on sintering of alumina ceramics", *International Journal of High Technology Ceramics*, **94**(5), pp.505-511, DOI: 10.1016/0267-3762(87)90069-5.
- [6] K. Cui, Y. Zhang, T. Fu, et al. (2021), "Effects of Cr_2O_3 content on microstructure and mechanical properties of Al_2O_3 matrix composites", *Coatings*, **11**(2), pp.1-17, DOI: 10.3390/coatings11020234.
- [7] Z. Harun, N. Ismail, N. Badarulzaman (2012), "Effect of MgO additive on microstructure of Al_2O_3 ", *Advanced Materials Research*, pp.335-339, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.335.
- [8] M. Qiu, X. Chen, Y. Fan, et al. (2017), "Ceramic membranes", *Comprehensive Membrane Science and Engineering*, pp.270-297, DOI: 10.1016/b978-0-12-409547-2.12243-7.
- [9] R.D. Shannon (1976), "Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides", *Acta Crystallographica Section A*, **32**(5), pp.751-767, DOI: 10.1107/S0567739476001551.
- [10] P.C.F. Alves, D.G.D. Silva, D.C.L. Vasconcelos, et al. (2021), "Microstructural characterisation and mechanical properties on Al_2O_3 - TiO_2 materials obtained by uniaxial pressing and extrusion", *Ceramics International*, **47**(17), pp.24988-24996, DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.05.227.
- [11] M.S. Ali, M.A. Hanim, S. Tahir, et al. (2017), "Preparation and characterisation of porous alumina ceramics using different pore agents", *Journal of The Ceramic Society of Japan*, **125**(5), pp.402-412, DOI: 10.2109/jcersj2.16233.
- [12] A. Çelik, G. Çağlar, Y. Çelik (2022), "Fabrication of porous Al_2O_3 ceramics using carbon black as a pore forming agent by spark plasma sintering", *Ceramics International*, **48**(19), pp.28181-28190, DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.06.121.