

Sửa chữa và gia cường kết cấu bê tông cốt thép bằng hợp kim nhớ hình

Repair and strengthening of reinforced concrete structures using shape memory alloys

> TS BÙI THANH QUANG

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: thanhquang.bui@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Hợp kim nhớ hình (Shape Memory Alloy - SMA) là một loại vật liệu thông minh có khả năng tạo ứng suất phục hồi thông qua chuyển pha nhiệt - cơ, mở ra hướng tiếp cận mới trong sửa chữa và gia cường kết cấu bê tông cốt thép (BTCT). Bài báo trình bày tổng quan về nguyên lý làm việc của SMA, các giải pháp gia cường kết cấu BTCT sử dụng SMA, cũng như cơ chế cải thiện khả năng chịu lực của cấu kiện. Cuối cùng, bài báo so sánh phương pháp gia cường bằng SMA với các phương pháp gia cường truyền thống và đề xuất các hướng nghiên cứu trong tương lai.

Từ khóa: SMA; gia cường bê tông cốt thép; vật liệu thông minh.

ABSTRACT

Shape Memory Alloys (SMA) are a class of smart materials capable of generating recovery stresses through thermo-mechanical phase transformations, offering a novel approach for the repair and strengthening of reinforced concrete structures. This paper presents an overview of the working principles of SMA, the strengthening techniques for RC structures using SMA, as well as the mechanisms by which the load-carrying capacity of structural members is enhanced. Finally, the paper compares SMA-based strengthening with conventional methods and proposes directions for future research.

Keywords: Shape memory alloys; reinforced concrete; structural strengthening; smart materials.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, kết cấu BTCT được ứng dụng rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp, bao gồm xây dựng, giao thông, thủy lợi và kiến trúc. Trong quá trình sử dụng, dưới tác động của tải trọng và môi trường, kết cấu có thể bị hư hỏng, dẫn đến suy giảm khả năng chịu lực. Vì vậy, để đảm bảo hiệu quả làm việc và đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật, cần thực hiện các biện pháp sửa chữa kịp thời và phù hợp.

Trong số các giải pháp hiện có, việc sử dụng vật liệu thông minh, đặc biệt là hợp kim nhớ hình (Shape Memory Alloys - SMA), đã nổi lên như một hướng tiếp cận đầy tiềm năng trong lĩnh vực gia cường và sửa chữa kết cấu. So với các vật liệu gia cường truyền thống như polymer cốt sợi (Fiber Reinforced Polymer - FRP), SMA có nhiều ưu điểm nổi bật như khả năng tạo ứng suất kéo trước thông qua quá trình kích hoạt nhiệt, tính tương thích tốt với bê tông, cũng như chi phí hợp lý hơn trong các ứng dụng quy mô lớn.

Cơ chế gia cường bằng SMA dựa trên việc tạo ra biến dạng trước trong vật liệu, sau đó kích hoạt bằng nhiệt để sinh ra ứng suất phục hồi, từ đó tạo hiệu ứng tương tự như dự ứng lực ngoài. Điều này cho phép cải thiện đáng kể độ cứng uốn, tăng tải trọng phá hoại và hạn chế sự phát triển của vết nứt trong dầm BTCT. Bên cạnh đó, so với FRP vốn chủ yếu làm việc theo cơ chế gia cường thụ động,

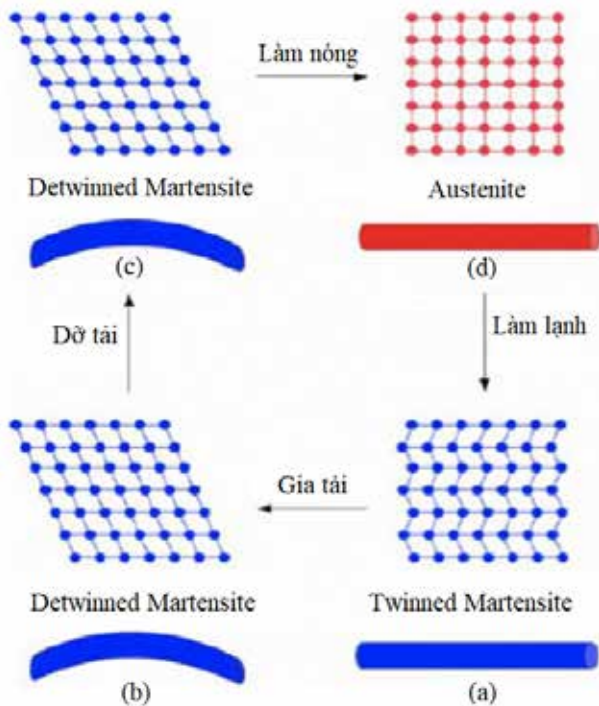
SMA có khả năng cung cấp trạng thái ứng suất chủ động, qua đó nâng cao hiệu quả làm việc tổng thể của hệ kết cấu.

Mục tiêu của bài báo là phân tích cơ chế gia cường của SMA và đánh giá hiệu quả của việc sử dụng SMA trong gia cường kết cấu BTCT.

2. GIỚI THIỆU VỀ HỢP KIM NHỚ HÌNH

Hợp kim nhớ hình (Shape Memory Alloys - SMA) là một loại vật liệu thông minh có đặc tính cơ - nhiệt đặc biệt, nổi bật nhất là khả năng phục hồi hình dạng ban đầu khi chịu các tác động bên ngoài như nhiệt độ hoặc từ trường. Hiện tượng khôi phục hình dạng này được gọi là hiệu ứng nhớ hình (Shape Memory Effect - SME). Về bản chất, SME xuất phát từ quá trình chuyển pha thuận nghịch giữa hai cấu trúc tinh thể đặc trưng của vật liệu, bao gồm pha martensite và pha austenite. Trong đó, pha austenite tồn tại ở vùng nhiệt độ cao còn pha martensite tồn tại ở nhiệt độ thấp hơn [1]. Khi pha martensite hình thành, các tinh thể không xuất hiện theo một cấu hình duy nhất mà tồn tại dưới nhiều trạng thái khác nhau, được gọi là các biến thể. Sự phân bố và sắp xếp của các biến thể này dẫn đến hai dạng cấu trúc martensite đặc trưng: (i) martensite song tinh (twinned martensite - M^t), trong đó các biến thể được sắp xếp đối

xúng và không tạo ra biến dạng vĩ mô; (ii) martensite khử song tinh (detwinned martensite - M^d), hình thành khi các biến thể bị tái sắp xếp dưới tác dụng của tải trọng cơ học, dẫn đến biến dạng đáng kể ở cấp độ vật liệu. Quá trình chuyển pha từ martensite sang austenite khi gia nhiệt là cơ chế cốt lõi tạo nên hiệu ứng nhớ hình của SMA. Sự chuyển pha này mang tính thuận nghịch và có thể được mô tả thông qua các chu trình nhiệt - cơ, như minh họa trong Hình 1 [5].



Hình 1. Hiệu ứng nhớ hình trong hợp kim [5]

Dưới tác dụng của tải trọng cơ học, vật liệu ở pha martensite song tinh có thể trải qua quá trình khử song tinh thông qua sự tái định hướng của các biến thể martensite, dẫn đến sự thay đổi hình dạng của vật liệu. Đáng chú ý, biến dạng sau khi khử song tinh được duy trì ngay cả khi tải trọng được dỡ bỏ, do cấu trúc vi mô đã chuyển sang trạng thái martensite định hướng. Khi vật liệu được gia nhiệt vượt qua nhiệt độ chuyển pha đặc trưng, cấu trúc martensite khử song tinh sẽ biến đổi sang pha austenite. Quá trình chuyển pha này đi kèm với sự phục hồi hoàn toàn hình dạng ban đầu của vật liệu. Ngược lại, khi làm nguội, vật liệu chuyển từ pha austenite trở lại pha martensite song tinh mà không gây ra biến dạng hình học bổ sung. Chu trình biến đổi thuận nghịch giữa hai pha cùng với khả năng phục hồi hình dạng như mô tả ở trên được gọi là hiệu ứng nhớ hình (SME).

Các nghiên cứu về vật liệu nhớ hình bắt đầu từ đầu thế kỷ XX. Năm 1932, Ölande - nhà vật lý người Thụy Điển lần đầu đã phát hiện ra hiệu ứng nhớ hình trên hợp kim Au-Cd [2]. Hợp kim này có thể biến dạng dẻo khi gặp lạnh và trở lại hình dạng ban đầu khi bị đốt nóng. Năm 1962, Buehler và Wang đã tìm ra SME trong hợp kim Ni-Ti [3, 4], sau này được biết đến với tên gọi Nitinol. Hợp kim Ni-Ti được sản xuất rẻ, an toàn và có tính chất cơ học tốt hơn so với các SMA khác vào thời điểm đó. Đến năm 1986, ứng dụng thương mại của hợp kim Ni-Ti đã phát triển trong nhiều lĩnh vực do nhu cầu ngày càng lớn về các bộ truyền động nhẹ hơn và nhỏ gọn hơn, đặc biệt là trong lĩnh vực y sinh [5]. Tuy nhiên, chi phí cao và mô-đun đàn hồi thấp đã cản trở việc ứng dụng của hợp kim Ni-Ti trong các công trình xây dựng.

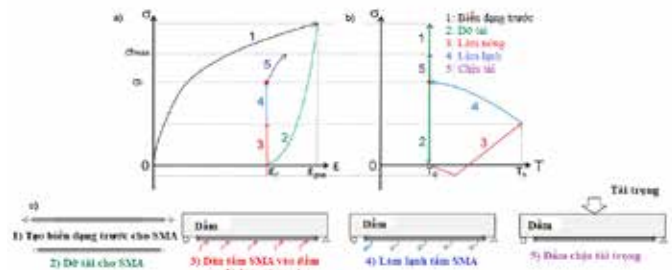
Nhằm khắc phục các hạn chế này, các hợp kim nhớ hình nền

sắt (Fe-SMA), đặc biệt là hệ Fe-Mn-Si đã thu hút sự quan tâm đáng kể. Hiệu ứng SME trong hợp kim Fe-Mn-Si lần đầu tiên được báo cáo bởi Sato và cộng sự vào năm 1982 [6]. Đáng chú ý, chi phí của hợp kim Fe-Mn-Si chỉ bằng khoảng 1/20 so với hợp kim Ni-Ti [7]. Bên cạnh đó, loại vật liệu này còn thể hiện nhiều ưu điểm vượt trội về khả năng gia công, tính hàn, khả năng tạo hình và đặc trưng trễ chuyển pha rộng [8]. Các nghiên cứu hiện đại cho thấy Fe-SMA là vật liệu gia cường đầy tiềm năng trong lĩnh vực kỹ thuật xây dựng, với nhiều kết quả thực nghiệm và ứng dụng thực tế đã đạt được hiệu quả đáng kể.

3. SỬA CHỮA, GIA CƯỜNG KẾT CẤU BTCT BẰNG HỢP KIM NHỚ HÌNH

Hợp kim nhớ hình (SMA) được ứng dụng trong gia cường kết cấu BTCT dựa trên khả năng tạo ứng suất phục hồi thông qua quá trình chuyển pha nhiệt - cơ. Hình 2 trình bày nguyên lý gia cường kết cấu BTCT bằng SMA. Ban đầu, SMA được kéo trước đến mức biến dạng ϵ_{pre} trạng thái martensite (Hình 2a, đường 1) ở nhiệt độ T_0 . Sau đó, vật liệu được dỡ tải, để lại một biến dạng dư ϵ_r (Hình 2a đường 2). Ở trạng thái này, SMA được liên kết với cấu kiện cần gia cường thông qua các phương pháp neo cơ học hoặc bằng keo dính, trong khi vẫn duy trì trạng thái biến dạng. Tiếp theo, SMA được gia nhiệt đến nhiệt độ kích hoạt T_s (Hình 2b, đường 3) để kích hoạt chuyển sang trạng thái austenite và sau đó được làm nguội trở lại nhiệt độ ban đầu T_0 . Do bị ràng buộc bởi kết cấu xung quanh, biến dạng phục hồi của SMA không thể phát triển tự do, dẫn đến sự hình thành ứng suất kéo trong SMA. Hệ quả là trong cấu kiện BTCT xuất hiện ứng suất nén, góp phần cải thiện khả năng chịu lực và độ cứng của kết cấu. Về bản chất cơ học, cơ chế này tương đương với một hệ dự ứng lực. SMA không đơn thuần là vật liệu gia cường, mà đóng vai trò như một hệ dự ứng lực, tạo ra trạng thái ứng suất chủ động trong kết cấu - điều mà các phương pháp như FRP không thể đạt được.

Bên cạnh hiệu ứng dự ứng lực, SMA còn thể hiện một cơ chế đặc biệt trong việc kiểm soát vết nứt. Khác với các vật liệu gia cường thụ động như FRP, SMA có khả năng tạo ra lực kéo ngược tác dụng trực tiếp lên hai mặt vết nứt, từ đó làm giảm độ mở của các vết nứt đã hình thành. Cơ chế này có thể được xem như một dạng "tự khép kín vết nứt" trong điều kiện làm việc của kết cấu. Nhờ đó, SMA không chỉ có tác dụng trì hoãn sự hình thành vết nứt, mà còn góp phần làm giảm sự phát triển của vết nứt trong quá trình khai thác, từ đó cải thiện đáng kể độ bền lâu của kết cấu.



Hình 2. Nguyên lý gia cường kết cấu BTCT bằng SMA [9]

Hợp kim nhớ hình SMA lần đầu tiên được ứng dụng trong lĩnh vực sửa chữa kết cấu vào năm 2001, trong một dự án xử lý các vết nứt cục bộ của cầu tại Michigan, Hoa Kỳ [10]. Do khả năng chịu cắt của bê tông không đáp ứng yêu cầu, các vết nứt có độ mở lên tới 0,55 mm đã xuất hiện trong dầm bê tông mặt cắt chữ T. Để khắc phục hiện tượng này, một hệ thống thanh hợp kim Fe-Mn-Si-Cr đã được sử dụng (Hình 3). Nhờ đó, độ mở của các vết nứt đã được

giảm đáng kể, lên tới khoảng 40%, cho thấy hiệu quả rõ rệt của công nghệ SMA trong sửa chữa và gia cường kết cấu bê tông.



Hình 3. Sửa chữa vết nứt cho dầm cầu, mặt cắt chữ T bằng BTCT tại Michigan [10]

Trong những năm gần đây, hợp kim nhớ hình nền sắt Fe-SMA đã được áp dụng rộng rãi trong gia cường cấu kiện BTCT, đặc biệt trong các bài toán chịu uốn và chịu cắt. Hình 4-5 mô tả một số công trình được gia cường uốn và cắt bằng Fe-SMA.



Hình 4. Gia cường uốn cho dầm cầu tại Courrendlin - Thụy Sĩ (a) và cho sàn tại gare ở Nussbaumen - Thụy Sĩ (b)



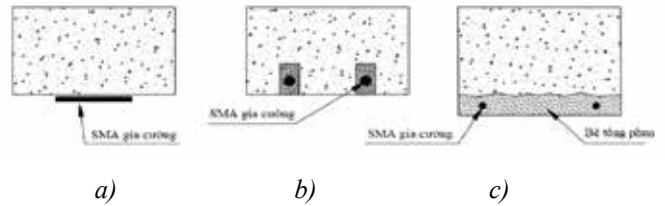
Hình 5. Gia cường cắt cho dầm cầu tại St.-Lesgier-Fenil - Thụy Sĩ

Mục tiêu của công tác sửa chữa và gia cường kết cấu BTCT bằng hợp kim nhớ hình (SMA) là bố trí vật liệu này tại các vùng chịu lực quan trọng, với phương đặt phù hợp với hướng truyền nội lực, nhằm nâng cao hiệu quả chịu lực của cấu kiện. Các phương pháp gia cường sử dụng SMA hiện nay chủ yếu bao gồm: Gia cường dán ngoài (Hình 6a), gia cường chôn gắn bề mặt (Hình 6b) và gia cường bằng cách tích hợp SMA trong lớp bê tông phun (Hình 6c).

Trong phương pháp gia cường dán ngoài, vật liệu SMA được gắn trực tiếp lên bề mặt cấu kiện BTCT, tương tự như kỹ thuật gia cường bằng vật liệu FRP. Đối với phương pháp chôn gắn bề mặt, các thanh hoặc dải SMA được đặt vào các rãnh được cắt sẵn gắn bề mặt bê tông, sau đó được lấp đầy bằng keo epoxy hoặc vữa xi măng nhằm đảm bảo khả năng truyền lực và liên kết với bê tông nền. Trong khi đó, phương pháp tích hợp SMA trong lớp bê tông phun được thực hiện bằng cách bố trí vật liệu SMA trên bề mặt cấu kiện hiện hữu, sau đó phủ một lớp bê tông phun mới nhằm tạo thành một hệ gia cường tích hợp, vừa tăng cường khả năng chịu lực vừa cải thiện điều kiện làm việc tổng thể của cấu kiện.

Cần lưu ý rằng, hiệu quả của phương pháp gia cường bằng SMA phụ thuộc mạnh vào cơ chế bám dính giữa SMA và bê tông.

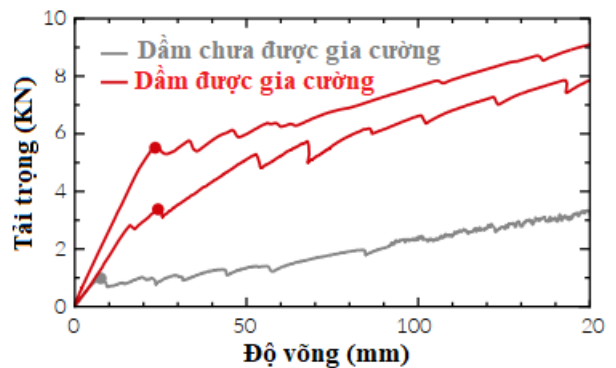
Trong quá trình kích hoạt, SMA có thể sinh ra ứng suất phục hồi lớn, dẫn đến sự hình thành các ứng suất tiếp đáng kể tại bề mặt tiếp xúc. Nếu khả năng bám dính không đủ, hiện tượng trượt hoặc bóc tách có thể xảy ra, làm giảm đáng kể hiệu quả gia cường. Do đó, cơ chế tương tác bám dính giữa SMA và bê tông là một trong những yếu tố chi phối quan trọng, cần được nghiên cứu sâu hơn trong các mô hình tính toán và thiết kế.



Hình 6. Các giải pháp gia cường kết cấu BTCT bằng SMA [11]

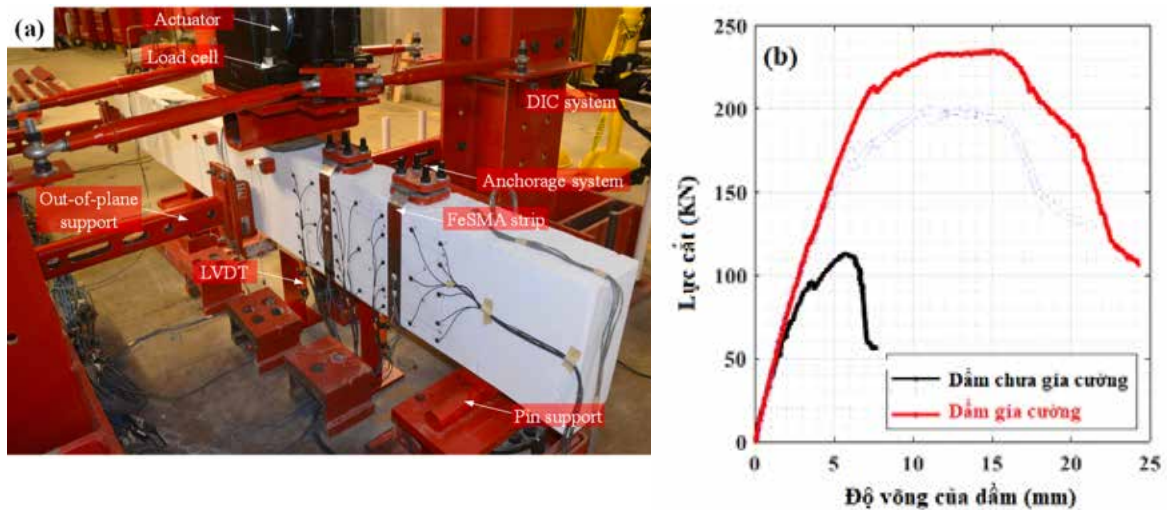
Các nghiên cứu thực nghiệm đã chỉ ra rằng, việc sử dụng hợp kim nhớ hình gốc sắt (Fe-SMA) trong gia cường kết cấu BTCT có thể cải thiện đáng kể hiệu quả làm việc của cấu kiện dưới cả tác dụng uốn và cắt. Đối với ứng xử uốn, Fe-SMA góp phần gia tăng khả năng chịu lực, giảm độ mở rộng vết nứt và nâng cao độ cứng của cấu kiện. Đối với ứng xử cắt, Fe-SMA ở trạng thái kích hoạt giúp làm giảm ứng suất kéo chính trong vùng chịu cắt, hạn chế sự hình thành và phát triển của các vết nứt xiên, đồng thời tăng cường khả năng chịu lực cắt và cải thiện độ dẻo của cấu kiện.

Hình 7 thể hiện biểu đồ quan hệ tải trọng - độ võng khi chịu uốn của dầm không được gia cường và dầm được gia cường bằng Fe-SMA [12]. Có thể nhận ra rằng, sau khi được gia cường, tải trọng gây nứt của dầm đã tăng từ 3 đến 5 lần so với dầm trước gia cường. Sự gia tăng này có thể được giải thích bởi hiệu ứng dự ứng lực do SMA tạo ra, nó làm giảm ứng suất kéo trong vùng bê tông chịu kéo và trì hoãn quá trình hình thành vết nứt và cải thiện độ cứng của cấu kiện.



Hình 7. Đường cong quan hệ tải trọng - độ võng của dầm BTCT trước và sau khi được gia cường uốn bằng vật liệu Fe-SMA [11]

Hình 8 thể hiện sơ đồ bố trí thí nghiệm và biểu đồ quan hệ lực cắt - độ võng khi chịu cắt của dầm không được gia cường và dầm được gia cường bằng Fe-SMA [13]. Trong thí nghiệm này, dầm BTCT có mặt cắt chữ nhật được gia cường cắt bằng cách sử dụng vật liệu Fe-SMA dạng bản, được bọc kín quanh chu vi mặt cắt. Kết quả thí nghiệm cho thấy, việc áp dụng Fe-SMA đã cải thiện đáng kể khả năng chịu cắt của dầm, sức kháng cắt của dầm đã tăng khoảng 2 lần so với dầm không gia cường. Hiệu quả này chủ yếu xuất phát từ việc SMA làm giảm ứng suất kéo chính trong vùng chịu cắt, qua đó hạn chế sự phát triển của các vết nứt xiên và cải thiện cơ chế truyền lực trong vùng này.



Hình 8. Sơ đồ bố trí thí nghiệm (a) và đường cong quan hệ lực cắt - độ võng của dầm BTCT trước và sau khi được gia cường cắt bằng vật liệu Fe-SMA(b) [13]

4. KẾT LUẬN

Hợp kim nhớ hình là một giải pháp gia cường tiên tiến có khả năng tạo dự ứng lực chủ động trong kết cấu BTCT. Khác với các phương pháp gia cường truyền thống, SMA không chỉ làm việc thụ động mà còn tạo ra ứng suất nội sinh thông qua quá trình chuyển pha. So với FRP, SMA có ưu điểm vượt trội trong kiểm soát vết nứt và khả năng làm việc chủ động. So với dự ứng lực ngoài, SMA có ưu điểm về thi công đơn giản và không yêu cầu hệ thống neo phức tạp. Tuy nhiên, hiệu quả gia cường bằng SMA phụ thuộc mạnh vào cơ chế bám dính giữa SMA và bê tông, cũng như điều kiện kích hoạt vật liệu. Do đó, cần có các nghiên cứu sâu hơn về tương tác SMA-bê tông, về điều kiện kích hoạt vật liệu, về tuổi thọ của kết cấu sau gia cường cũng như xây dựng các tiêu chuẩn thiết kế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lagoudas, D. C. Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications. New York: Springer, 2008.
- [2] Ölander, A. An Electrochemical Investigation of Solid Cadmium-Gold Alloys. *Journal of the American Chemical Society* 54, pp. 3819-3833, 1932.
- [3] Buehler W.J., Gilfrich J.V., Wiley R.C. Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi. *Applied Physics* 34, p. 1475, 1963.
- [4] Wang F.E., Buehler W.J., Pickart S.J. TiNi's unique crystal structure and martensite transition, *Journal of Applied Physics* 36, p. 3232, 1965.
- [5] Melton K., Simpson J., Duerig T. A new wide lagged shape memory alloy based on NiTi and its applications. *Proceedings of the International Conference on Martensitic Transforms. ICOMAT-86*, 1986.
- [6] Sato, A.; Chishima, E.; Soma, K.; Mori, T. Shape Memory Effect in Transformation in Fe-30Mn-1Si Alloy Single Crystals. *Acta Metallurgica* 30, pp. 1177-1183, 1982.
- [7] Zhou, L. Research of Fe-Mn-Si Based Shape Memory Alloy and Its Coupler. Master's Thesis, Fuzhou University, Fuzhou, China, 2004.
- [8] Tiwari, N.D.; Gogoi, A.; Hazra, B.; Wang, Q. A Shape Memory Alloy-Tuned Mass Damper Inerter System for Passive Control of Linked-SDOF Structural Systems under Seismic Excitation. *Journal of Sound and Vibration* 494, p.115893, 2021.
- [9] Hilscher, M.; Jübner, P.; Ghafoori, E. Iron-Based Shape Memory Alloys in Construction: A Review of Research, Applications and Challenges. *Shape Memory and Superelasticity* 11, pp. 363-377, 2025.
- [10] Soroushian, P., Ostowari, K., Nossoni, A., Chowdhury, H. Repair and Strengthening of Concrete Structures through Application of Corrective Posttensioning Forces with Shape Memory Alloys. *Transportation Research Record* 1770, pp. 20-26, 2001.

[11] Raza, S.; Shafei, B.; Saiidi, M.S.; Motavalli, M.; Shahverdi, M. Shape memory alloy reinforcement for strengthening and self-centering of concrete structures State of the art. *Construction and Building Materials* 314: 126628, 2022.

[12] Memory-steel prestressing techniques for strengthening and new construction under static and dynamic loading. Internet: <https://www.re-fer.eu>.

[13] Hong, H.; Belarbi, A.; Gencturk, B.; Zerbe, L. Shear strengthening of rectangular and T-shaped reinforced concrete beams with iron-based shape memory alloy (FeSMA) strips. *Engineering Structures* 345, 121423, 2025.