



AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE LATERAL–TORSIONAL BUCKLING BEHAVIOR OF STEEL BEAMS WITH INITIAL GEOMETRIC IMPERFECTIONS

Doan Tan Thi¹, Nguyen Xuan Huy², Pham Van Phe^{2*}

¹Faculty of Civil Engineering, Campus in Ho Chi Minh City, University of Transport and Communications, No. 450- 451 Le Van Viet Street, Ho Chi Minh City, Vietnam

²University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 05/03/2026

Revised: 12/06/2026

Accepted: 12/06/2026

Published online: 15/06/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.5.6>

* *Corresponding author*

Email: phe.phamvan@utc.edu.vn

Abstract. Lateral–torsional buckling is an important instability mode of steel I-beams subjected to bending, in which initial geometric imperfections may significantly influence the stiffness and resistance of the member. However, experimental data regarding the influence of such geometric imperfections on the lateral–torsional buckling behavior of steel beams remain limited. This study presents experimental results to clarify the effect of initial geometric imperfections on the lateral–torsional buckling behavior of hot-rolled I-section steel beams subjected to four-point bending. Three doubly symmetric beams were tested, and the initial out-of-straightness of each beam was measured prior to testing and considered in the interpretation of the results. The load–displacement relationship, the development of coupled lateral displacement and twist at midspan, and the buckling load of beams with initial geometric imperfections were determined and evaluated. Experimental observations indicate that variations in both the distribution pattern and amplitude of the measured initial imperfections alter the progression of coupled lateral displacement and twist, leading to noticeable differences in the ultimate lateral–torsional stability of the tested beams. The experimental database obtained from this study provides a reliable basis for the calibration and validation of finite element models, thereby improving the accuracy and reliability of predicting the lateral–torsional buckling resistance of steel beams accounting for initial geometric imperfections.

Keywords: lateral-torsional buckling, experimental study, initial geometric imperfection.

@ 2026 University of Transport and Communications



NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ỨNG XỬ MẤT ỔN ĐỊNH XOẮN NGANG CỦA DÀM THÉP CÓ KHIẾM KHUYẾT HÌNH HỌC BAN ĐẦU

Đoàn Tấn Thi¹, Nguyễn Xuân Huy², Phạm Văn Phê^{2*}

¹ Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 450-451 Lê Văn Việt, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

² Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 05/03/2026

Ngày nhận bài sửa: 12/06/2026

Ngày chấp nhận đăng: 12/06/2026

Ngày xuất bản Online: 15/06/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.5.6>

* Tác giả liên hệ

Email: phe.phamvan@utc.edu.vn

Tóm tắt. Mất ổn định xoắn ngang là một dạng mất ổn định quan trọng của dầm thép chữ I chịu uốn, trong đó các khiếm khuyết hình học ban đầu có thể ảnh hưởng đáng kể đến độ cứng và sức kháng của cấu kiện. Tuy nhiên, các dữ liệu thực nghiệm về ảnh hưởng của các sai lệch hình học này đến ứng xử mất ổn định của dầm thép vẫn còn hạn chế. Nghiên cứu này trình bày kết quả thí nghiệm nhằm làm rõ ảnh hưởng của khiếm khuyết hình học ban đầu đến ứng xử mất ổn định xoắn ngang của dầm thép chữ I cán nóng chịu uốn bốn điểm. Ba dầm có tiết diện đối xứng kép được thí nghiệm; độ cong vênh ban đầu của dầm được đo trước khi thí nghiệm và được xét trong quá trình phân tích kết quả. Quan hệ tải trọng – chuyển vị, sự phát triển chuyển vị ngang kết hợp xoắn tại giữa nhịp và tải trọng mất ổn định của dầm có khiếm khuyết hình học ban đầu được xác định và đánh giá. Kết quả thực nghiệm cho thấy sự khác biệt về dạng phân bố và biên độ của khiếm khuyết hình học ban đầu làm thay đổi đáng kể quá trình phát triển chuyển vị ngang kết hợp với xoắn, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chống mất ổn định xoắn ngang của các mẫu dầm được khảo sát. Cơ sở dữ liệu thực nghiệm thu được từ nghiên cứu có thể được sử dụng để hiệu chỉnh và kiểm chứng các mô hình phân tích phần tử hữu hạn, đồng thời hỗ trợ nâng cao độ tin cậy trong dự báo khả năng chịu mất ổn định xoắn ngang của dầm thép có xét đến ảnh hưởng của các khiếm khuyết hình học ban đầu.

Từ khóa: mất ổn định xoắn ngang, nghiên cứu thực nghiệm, khiếm khuyết hình học ban đầu.

@ 2026 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đối với các dầm thép chữ I không được giằng theo phương yếu, khả năng làm việc chịu uốn thường bị khống chế bởi hiện tượng mất ổn định xoắn ngang (lateral-torsional buckling – LTB), trong đó biến dạng uốn và biến dạng xoắn phát triển đồng thời làm suy giảm đáng kể khả năng chịu lực của cấu kiện. Ứng xử LTB không chỉ phụ thuộc vào mô men tới hạn đàn hồi mà còn chịu ảnh hưởng của quá trình chảy và sau chảy của vật liệu và sự tồn tại của khiếm khuyết hình học ban đầu. Trong thực tế sản xuất và thi công, các khiếm khuyết hình học như độ lệch trục, độ xoắn ban đầu hoặc các biến dạng cục bộ của bản cánh và bản bụng thường xuất hiện do dung sai chế tạo, vận chuyển và lắp dựng, khiến cấu kiện khó đạt được trạng thái hình học lý tưởng. Những yếu tố này có thể làm sai lệch đáng kể khả năng chịu lực nếu thiếu một sự xem xét đầy đủ.

Các nghiên cứu nước ngoài đã tiếp cận vấn đề mất ổn định xoắn ngang của dầm thép theo cả hai hướng thực nghiệm và mô phỏng số. Xiong và cộng sự [1] thực hiện chương trình thí nghiệm kết hợp phân tích phần tử hữu hạn đối với dầm thép Q460GJ có bố trí giằng ngang tại giữa nhịp, trong đó có xét đến ảnh hưởng của khiếm khuyết hình học ban đầu. Tankova và cộng sự [2] triển khai 12 thí nghiệm trên các dầm kích thước thực, tiến hành đo trực tiếp các sai lệch hình học ban đầu và xây dựng các mô hình số được hiệu chỉnh theo kết quả thí nghiệm nhằm đánh giá ảnh hưởng của cấp thép và dạng tiết diện đến ứng xử LTB. Le và cộng sự [3] nghiên cứu dầm thép hàn cường độ cao, và họ đã chỉ ra rằng sức kháng mất ổn định phụ thuộc đáng kể vào đặc trưng vật liệu và khiếm khuyết hình học, đồng thời có thể sai khác so với dự báo của một số tiêu chuẩn thiết kế. Trong lĩnh vực mô phỏng số, nhiều tác giả đã sử dụng phân tích phi tuyến hình học và vật liệu có xét đến khiếm khuyết ban đầu để đánh giá sức kháng ổn định của dầm thép. Trong các nghiên cứu này, mô hình phần tử hữu hạn được thiết lập với quan hệ ứng suất – biến dạng phi tuyến, có xét đến biến dạng lớn và hiệu ứng bậc hai, đồng thời đưa vào các dạng khiếm khuyết hình học ban đầu, thường theo dạng riêng LTB bậc nhất với biên độ xác định. Boissonnade và Somja [4] thực hiện các phân tích tham số với nhiều giả thiết khác nhau về dạng và biên độ khiếm khuyết, qua đó đánh giá ảnh hưởng riêng rẽ và tổng hợp của các tham số này đến sức kháng uốn và cơ chế mất ổn định. Couto và Real [5] phân tích sự tương tác giữa bản cánh và bản bụng dưới các dạng khiếm khuyết khác nhau, trong khi Valeš và Stan [6] so sánh các phương pháp mô hình hóa FEM khi đưa khiếm khuyết theo dạng riêng LTB bậc nhất, cho thấy việc lựa chọn dạng và biên độ khiếm khuyết có thể làm thay đổi đáng kể kết quả dự báo sức kháng. Đối với dầm hàn tiết diện cánh rộng, Kabir và Bhowmick [7] chỉ ra rằng khi đưa dạng khiếm khuyết đo được từ thực nghiệm vào mô hình phần tử hữu hạn, giá trị sức kháng LTB có thể khác biệt đáng kể so với kết quả tính toán dựa trên các giả định tiêu chuẩn. Các nghiên cứu của Bradford và Liu [8], Bachiri và cộng sự [9], nhấn mạnh rằng đặc tính vật liệu của thép cường độ cao kết hợp với dạng khiếm khuyết hình học ban đầu có ảnh hưởng trực tiếp đến đường cong ổn định uốn – xoắn của dầm chữ I. Trong nước, P.V. Phê và N.X. Huy ([10], [11]) đã khảo sát bằng mô phỏng số trong ABAQUS sức kháng mô men đàn hồi và dẻo của dầm thép tiết diện W có xét đến khiếm khuyết hình học ban đầu theo dạng riêng mất ổn định xoắn ngang bậc nhất. Kết quả cho thấy khi đưa khiếm khuyết vào phân tích, sức kháng mô men của dầm giảm đáng kể và cơ chế phá hoại có sự thay đổi so với trường hợp cấu kiện lý tưởng. Các tiêu chuẩn thiết kế AISC [12], EC 3 [13] và AS4100 [14] đều thừa nhận rằng khiếm khuyết hình học ban đầu ảnh hưởng đáng kể đến sức kháng mất ổn định xoắn ngang của dầm thép chữ I, nhưng cách phản ánh có sự khác biệt. Trong tiêu chuẩn AISC [12], khiếm khuyết hình học được xem như dung sai tổng thể của cấu kiện. EC 3 [13] không quy định trực tiếp dạng khiếm khuyết hình học cụ thể, mà gián tiếp phản ánh ảnh hưởng của chúng thông qua các đường cong ổn định được hiệu chỉnh từ dữ liệu

thực nghiệm và phân tích số. Trong khi đó, AS4100 [14] kết hợp công thức tính toán với các giới hạn chế tạo và yêu cầu phân tích bậc hai hoặc hệ số hiệu chỉnh bổ sung, nhằm phản ánh tác động của khiếm khuyết hình học ban đầu đến sức kháng LTB.

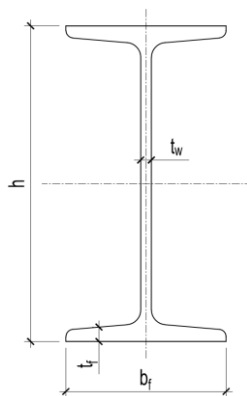
Tổng quan các công trình đã công bố cho thấy ứng xử mất ổn định xoắn ngang của dầm thép không chỉ phụ thuộc vào đặc tính cơ học của vật liệu mà còn chịu ảnh hưởng rõ rệt bởi dạng và biên độ của khiếm khuyết hình học ban đầu. Tuy nhiên, mức độ nhạy cảm của cấu kiện đối với các yếu tố này, cũng như cách thức đưa chúng vào mô hình phân tích và quy định thiết kế, vẫn chưa đạt được sự thống nhất giữa các nghiên cứu và trong các tiêu chuẩn hiện hành. Những khác biệt này đặt ra yêu cầu cần có các nghiên cứu thực nghiệm được thiết kế có kiểm soát, trong đó các đặc trưng không hoàn hảo của cấu kiện thực tế được đo đạc và xem xét một cách tường minh. Trên cơ sở đó, việc tiến hành khảo sát chuyên sâu đối với dầm thép chữ I cán nóng là cần thiết nhằm làm rõ cơ chế phát triển mất ổn định xoắn ngang và cung cấp cơ sở khoa học tin cậy cho việc đánh giá và dự báo sức kháng ổn định của loại cấu kiện này trong điều kiện làm việc thực tế.

2. CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

Chương trình thí nghiệm này được thực hiện tại phòng Thí nghiệm công trình VILAB của Trung tâm khoa học công nghệ GTVT, trực thuộc Trường đại học Giao thông vận tải.

2.1. Mẫu thí nghiệm

Các mẫu dầm thép chữ I dùng trong thí nghiệm ổn định được chế tạo theo tiêu chuẩn TCVN 7571-15:2019 [15]. Hình 1 trình bày ký hiệu và các thông số đặc trưng của mặt cắt ngang. Ba mẫu A1, A2 và A3 có tiết diện đối xứng kép và cùng cấu hình hình học nhằm đảm bảo tính đồng nhất của chương trình thí nghiệm. Chiều dài nhịp được lựa chọn phù hợp với mục tiêu khảo sát mất ổn định xoắn ngang của dầm chịu uốn. Các thông số hình học chi tiết được tổng hợp trong Bảng 1.



Hình 1. Ký hiệu các thông số kích thước tiết diện.

Bảng 1. Thông số hình học của mặt cắt ngang mẫu dầm thí nghiệm.

Mẫu dầm	Kích thước mặt cắt			Chiều dài nhịp dầm L (m)
	Chiều cao tiết diện h (mm)	Bề rộng bản cánh b_f (mm)	Chiều dày bản cánh t_f (mm)	
A1	150	75	7	2
A2	150	75	7	2
A3	150	75	7	2

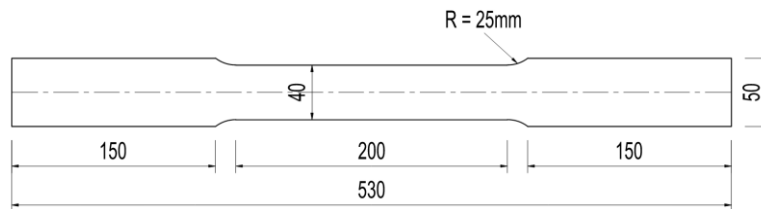
2.2. Đặc trưng cơ học của vật liệu

Vật liệu sử dụng để chế tạo các mẫu dầm thí nghiệm là thép kết cấu cán nóng thông dụng. Các đặc trưng cơ học của vật liệu được xác định thông qua thí nghiệm kéo một trục theo tiêu chuẩn TCVN 197-1:2014 [16], và kết quả được tổng hợp trong Bảng 2. Thép thể hiện ứng xử đàn hồi – dẻo điển hình với mô đun đàn hồi, giới hạn chảy, giới hạn bền kéo và hệ số Poisson phù hợp với các giá trị đặc trưng của thép kết cấu sử dụng phổ biến trong thực hành xây dựng, bảo đảm tính đại diện cho điều kiện làm việc thực tế của cấu kiện.

Bảng 2. Các đặc trưng cơ học của thép sử dụng trong chế tạo mẫu dầm thí nghiệm.

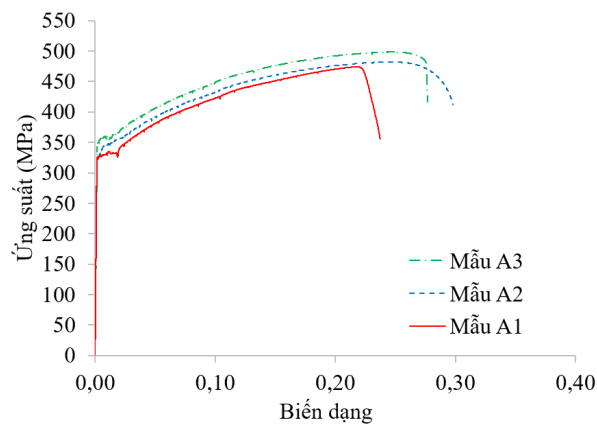
Mẫu	Giới hạn chảy F_y (MPa)	Giới hạn bền kéo F_u (MPa)	Mô đun đàn hồi E (GPa)	Hệ số Poisson ν
A1	320	470	200	0,3
A2	340	480	205	0,3
A3	350	500	210	0,3

Để xác định các đặc trưng cơ học của vật liệu, các mẫu thử kéo được gia công theo đúng hình dạng và kích thước quy định trong tiêu chuẩn TCVN 197-1:2014 [16]. Hình dạng và kích thước chi tiết của mẫu thử được trình bày trong Hình 2.



Hình 2. Hình dạng và kích thước mẫu thử kéo thép theo tiêu chuẩn TCVN 197-1:2014 [16].

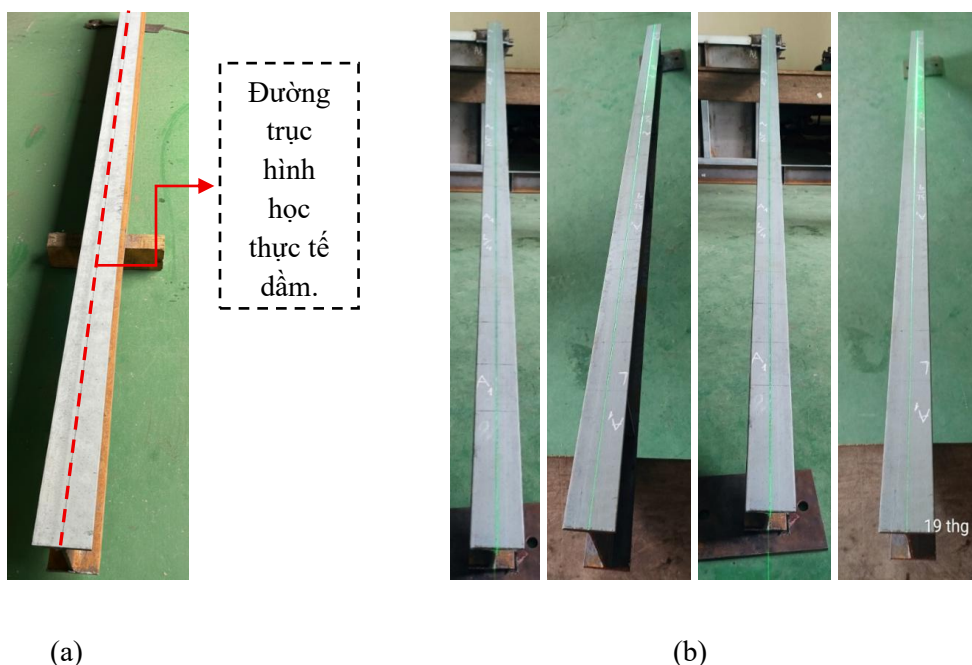
Các mẫu thử được kiểm tra trên thiết bị kéo nén điều khiển tải nhằm xác định quan hệ ứng suất – biến dạng và các chỉ tiêu cơ học đặc trưng của vật liệu. Quan hệ ứng suất – biến dạng thu được từ các mẫu thép được trình bày trong Hình 3.



Hình 3. Quan hệ ứng suất – biến dạng thu được từ thí nghiệm kéo các mẫu thép.

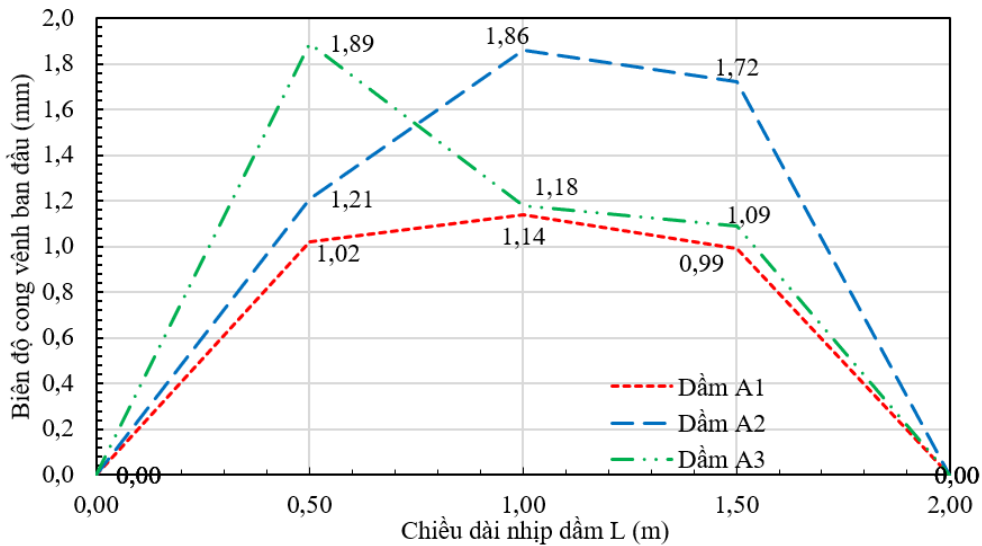
2.3. Xác định khiếm khuyết hình học ban đầu

Để xác định khiếm khuyết hình học ban đầu của dầm thép chữ I, một quy trình đo hình học được thực hiện trên bản cánh chịu nén trước khi thí nghiệm uốn. Trục thực tế của dầm được xác định bằng cách đo bề rộng bản cánh tại các tiết diện phân bố dọc theo nhịp (0, $L/4$, $L/2$, $3L/4$ và L), xác định trung điểm mỗi tiết diện và nối các điểm này thành đường liên tục. Đường cong thu được biểu diễn trực hình học thực tế của dầm sau chế tạo và cho phép định lượng độ lệch so với trục lý tưởng (xem Hình 4).



Hình 4. Xác định trục hình học thực tế và trục hình học lý tưởng của dầm (a) đường trục hình học thực tế của dầm (b) đường trục hình học lý tưởng của dầm.

Đường chuẩn hình học của dầm được xác lập bằng thiết bị laser phát tia tuyến tính, cho phép xây dựng một trục tham chiếu thẳng dùng để xác định mức độ sai lệch hình học của từng mẫu dầm trước khi tiến hành thí nghiệm. Trong quá trình đo, dầm được đặt ở trạng thái không chịu tải nhằm bảo đảm các sai lệch ghi nhận chỉ phản ánh cong vênh ban đầu. Tại các vị trí đặc trưng ($L/4$, $L/2$ và $3L/4$), độ lệch giữa trục thực tế và trục lý tưởng được đo bằng thước cặp điện tử, với hai mỏ đo lần lượt tiếp xúc tại đường nối trung điểm bản cánh và vệt laser. Các số liệu đo được được tổng hợp để xây dựng đường cong mô tả dạng cong vênh ban đầu của dầm theo phương ngang dọc theo chiều dài cấu kiện. Từ đường cong này có thể xác định biên độ cong vênh lớn nhất cũng như dạng phân bố của cong vênh, như thể hiện ở Hình 5.



Hình 5. Giá trị biên độ cong vênh ban đầu đo được của các mẫu dầm thí nghiệm.

Để làm rõ hơn mức độ ảnh hưởng của khiếm khuyết hình học ban đầu đến ứng xử của dầm, các giá trị cong vênh đo được được xử lý theo hướng định lượng thông qua biên độ cong vênh lớn nhất δ_0 của từng mẫu. Kết quả được tổng hợp trong Bảng 3. Mặc dù các mẫu dầm A1, A2 và A3 có cùng kích thước hình học danh nghĩa và chiều dài nhịp, biên độ cong vênh ban đầu giữa các mẫu có sự khác biệt nhất định. Khi chuẩn hóa theo chiều dài nhịp dầm L, các giá trị này được biểu diễn dưới dạng tỷ số không thứ nguyên δ_0/L , cho phép so sánh trực tiếp mức độ sai lệch hình học giữa các mẫu thí nghiệm.

Bảng 3. Giá trị định lượng khiếm khuyết hình học ban đầu của các mẫu dầm.

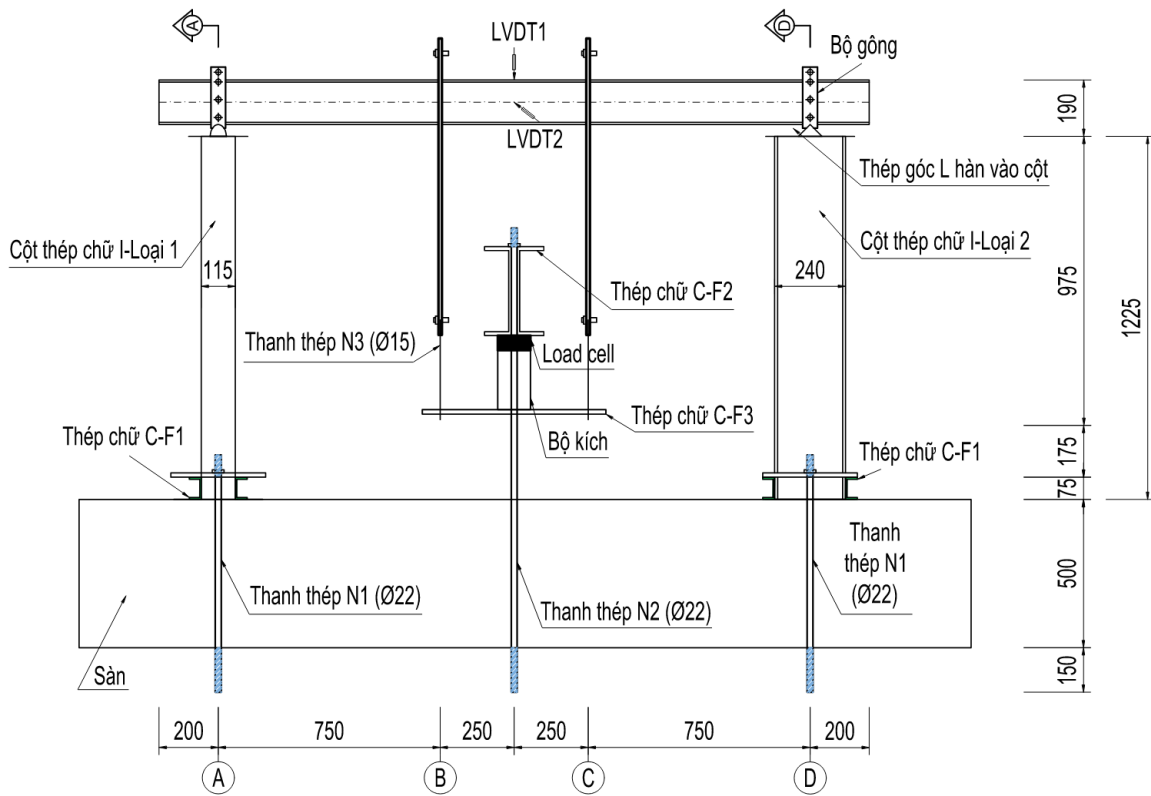
Mẫu	Biên độ cong vênh ban đầu lớn nhất δ_0 (mm)	Nhịp dầm L (m)	Tỷ số δ_0/L	Nhận xét
A1	1,14	2	$5,7 \cdot 10^{-4}$	Khiếm khuyết hình học nhỏ nhất
A2	1,86	2	$9,3 \cdot 10^{-4}$	Khiếm khuyết hình học trung bình
A3	1,89	2	$9,5 \cdot 10^{-4}$	Khiếm khuyết hình học lớn nhất

Như vậy, việc xác định và định lượng khiếm khuyết hình học ban đầu thông qua các thông số đặc trưng như δ_0 và δ_0/L là cơ sở quan trọng để liên hệ trực tiếp giữa đặc điểm hình học ban đầu và ứng xử thực nghiệm của dầm, đồng thời góp phần nâng cao độ tin cậy của việc phân tích và đánh giá sức kháng mất ổn định xoắn ngang.

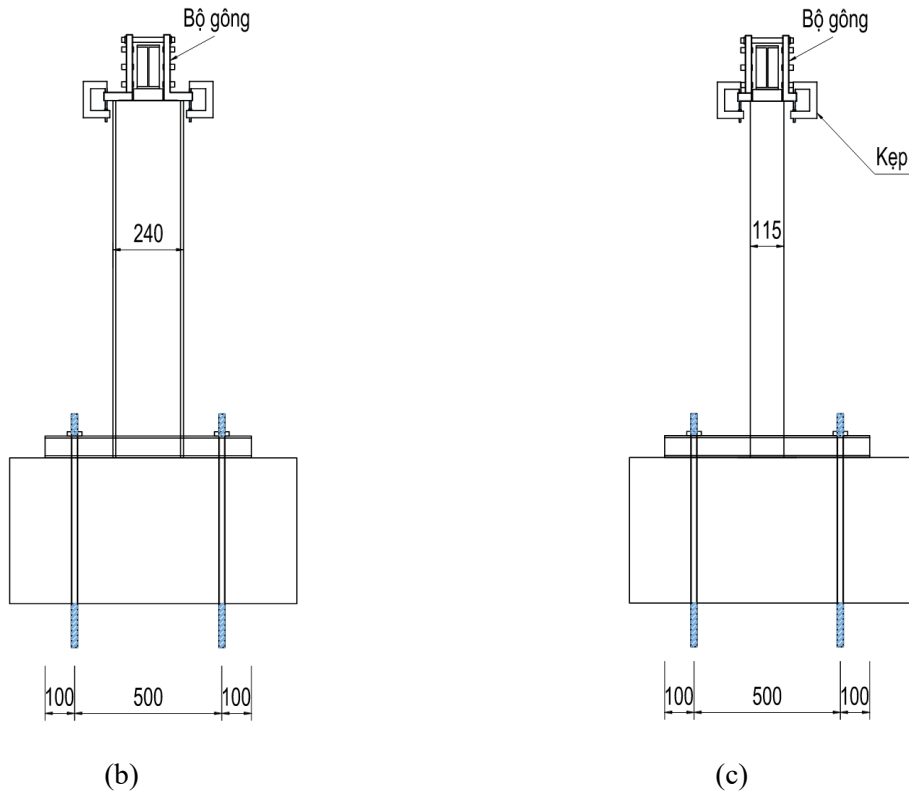
2.4. Sơ đồ thí nghiệm và hệ thống đo đạc

Thí nghiệm uốn bốn điểm được thực hiện trên dầm đơn giản với một gối cố định và một gối di động theo sơ đồ Hình 6, trong đó khoảng cách từ gối đến điểm đặt tải là $L_1 = 750$ mm

và khoảng cách giữa hai điểm đặt tải là $L_o = 500$ mm. Tải trọng tác dụng lên mẫu được tạo bởi hệ kích thủy lực vận hành thủ công và được giám sát liên tục thông qua cảm biến lực đã hiệu chuẩn nhằm bảo đảm độ chính xác trong suốt quá trình gia tải. Chuyển vị được theo dõi bằng hai cảm biến LVDT, gồm một cảm biến đo chuyển vị đứng tại giữa bản cánh trên và một cảm biến đo chuyển vị ngang tại giữa nhịp thông qua bản bụng. Toàn bộ tín hiệu lực, chuyển vị và biến dạng được thu nhận liên tục bằng hệ thống SDA-830C. Hệ thống gia tải bao gồm khung phản lực, dầm phân phối tải và cơ cấu truyền lực, bảo đảm tải trọng tác dụng theo phương thẳng đứng, đúng vị trí thiết kế và hạn chế các chuyển vị ngoài ý muốn, qua đó nâng cao tính ổn định của hệ thống và độ tin cậy của dữ liệu thí nghiệm.



(a)



Hình 6. Hệ thống gia tải cho dầm thép (a) mặt đứng (b) mặt cắt tại trục A (c) mặt cắt tại trục D.

Hình 7 trình bày bố trí thực tế của thí nghiệm đối với mẫu dầm A1. Hệ khung thép phụ trợ được lắp dựng nhằm định vị chính xác thiết bị đo và hệ gia tải, bảo đảm tải trọng tác dụng theo phương thẳng đứng và đúng sơ đồ thí nghiệm. Cách bố trí này góp phần nâng cao độ tin cậy của dữ liệu và đảm bảo điều kiện thí nghiệm gần với giả thiết phân tích.



Hình 7. Bố trí thí nghiệm uốn bốn điểm cho mẫu dầm A1.

2.5. Các bước tiến hành thí nghiệm

Quá trình gia tải được thực hiện theo phương thức tăng tải từng bước với tốc độ ổn định nhằm đảm bảo điều kiện gần tĩnh và hạn chế ảnh hưởng của hiệu ứng động. Tải trọng được tăng dần cho đến khi xuất hiện trạng thái phá hoại, cho phép ghi nhận đầy đủ diễn biến ứng xử của dầm từ giai đoạn đàn hồi đến khi xảy ra mất ổn định xoắn – uốn và biến dạng không hồi phục; thí nghiệm được dừng khi quan sát thấy các dấu hiệu phá hoại rõ rệt. Lực tác dụng được tạo bởi hệ kích – bơm thủy lực TECPOS vận hành bằng tay và đo liên tục thông qua loadcell để đảm bảo độ chính xác và độ tin cậy của dữ liệu. Chuyển vị được theo dõi bằng hai cảm biến LVDT, bao gồm một cảm biến đo chuyển vị đứng tại giữa bản cánh trên và một cảm biến đo chuyển vị ngang tại giữa nhịp qua bản bụng. Toàn bộ tín hiệu lực, chuyển vị và biến dạng được thu nhận và xử lý bằng hệ thống SDA-830C phục vụ cho phân tích kết cấu.

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

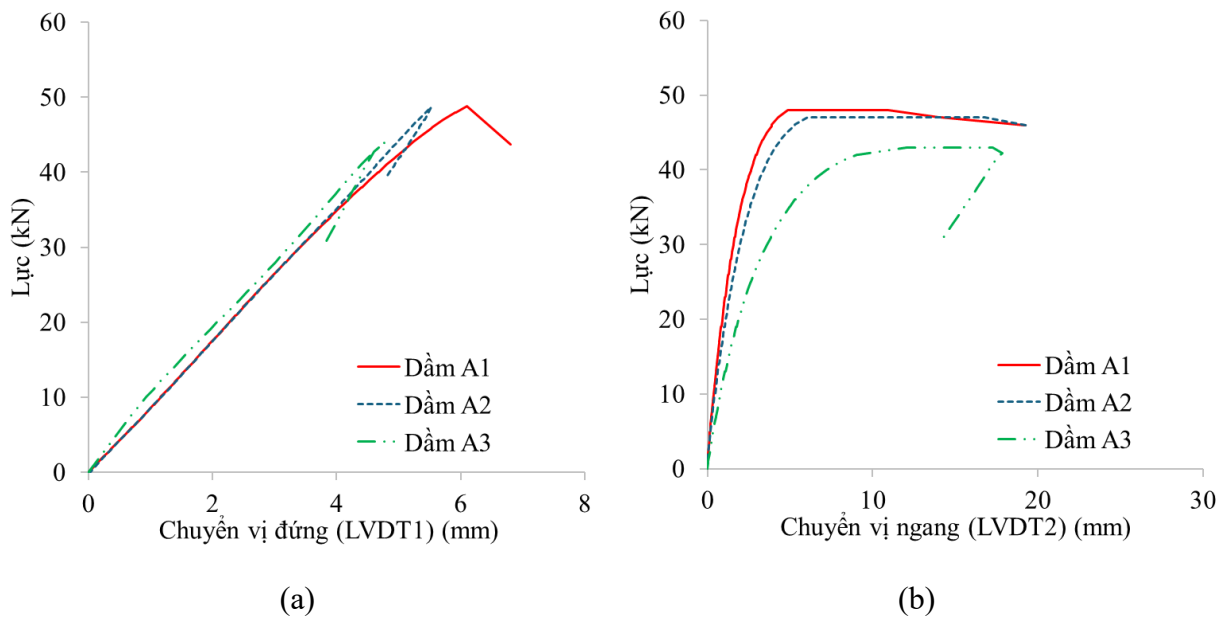
Kết quả thí nghiệm cho thấy cả hai mẫu dầm A1, A2 và A3 đều phá hoại theo cơ chế mất ổn định tổng thể dạng xoắn ngang (Lateral torsional buckling – LTB), và không ghi nhận sự xuất hiện của hiện tượng mất ổn định cục bộ tại vị trí đặt tải cũng như tại các gối tựa. Hình dạng phá hoại và sự phân bố biến dạng quan sát được trong quá trình thí nghiệm xác nhận rằng cơ chế chi phối ứng xử của hai mẫu dầm là sự tương tác giữa uốn và xoắn khi cấu kiện chịu tác dụng của hai tải trọng tập trung bằng nhau, như được minh họa trong Hình 8.



Hình 8. Diễn biến biến dạng và cơ chế mất ổn định dầm A1, A2 và A3 trong thí nghiệm uốn bốn điểm.

Dựa trên các quan hệ tải trọng – chuyển vị thu được từ thí nghiệm uốn bốn điểm, ba mẫu dầm A1, A2 và A3 thể hiện đặc trưng ứng xử điển hình của dầm thép cán nóng chịu uốn trong miền mất ổn định tổng thể. Các đường cong tải trọng – chuyển vị thẳng đứng và tải trọng – chuyển vị ngang (Hình 9(a) và Hình 9(b)) cho phép đánh giá toàn diện quá trình làm việc của dầm từ giai đoạn đàn hồi tuyến tính đến khi đạt tải trọng tới hạn và sau tới hạn. Đối với mẫu

A1, tải trọng tới hạn xác định trong thí nghiệm đạt 48,8 kN. Tại thời điểm này, chuyển vị thẳng đứng giữa nhịp đạt 6,1 mm, cho thấy độ cứng uốn đã suy giảm đáng kể khi dầm tiến gần trạng thái mất ổn định. Đồng thời, chuyển vị ngang giữa nhịp đạt 4,9 mm, phản ánh sự phát triển rõ rệt của cơ chế xoắn – uốn và vai trò chi phối của nó trong giai đoạn sau tới hạn. Đối với mẫu A2 đạt tải trọng tới hạn 47 kN, thấp hơn so với mẫu A1, cho thấy mức độ nhạy cảm lớn hơn đối với các sai lệch khiếm khuyết hình học và điều kiện làm việc. Tại tải trọng cực đại, chuyển vị thẳng đứng giữa nhịp đạt 5,5 mm, trong khi chuyển vị ngang tăng lên 6,1 mm, thể hiện sự kích hoạt mạnh hơn của cơ chế xoắn – uốn. Sự gia tăng nhanh của chuyển vị ngang kéo theo suy giảm độ cứng nhanh hơn và làm dầm nhanh chóng mất khả năng duy trì cân bằng sau tới hạn. Đối với mẫu A3, tải trọng tới hạn đạt 44,1 kN, là giá trị nhỏ nhất trong ba mẫu, cho thấy mức độ nhạy cảm cao hơn đối với các ảnh hưởng khiếm khuyết hình học ban đầu. Tại tải trọng cực đại, chuyển vị thẳng đứng giữa nhịp đạt 4,8 mm, trong khi chuyển vị ngang tăng mạnh lên 12,1 mm. Giá trị này phản ánh sự phát triển vượt trội của biến dạng xoắn – uốn, dẫn đến suy giảm độ cứng nhanh và trạng thái mất ổn định rõ rệt ngay sau khi đạt tải trọng cực đại.



Hình 9. So sánh quan hệ tải trọng – chuyển vị của các mẫu dầm A1, A2 và A3 thu được từ kết quả nghiên cứu thực nghiệm (a) quan hệ tải trọng – chuyển vị đứng (LVDT1) (b) quan hệ tải trọng – chuyển vị ngang (LVDT2).

Mặc dù sự khác biệt về đặc trưng cơ học của vật liệu giữa các mẫu là không lớn, kết quả thí nghiệm cho thấy các sai lệch hình học ban đầu đóng vai trò quyết định đối với quá trình phát triển mất ổn định. Các mẫu có biên độ cong vênh ban đầu lớn hơn thường đạt tải trọng tới hạn thấp hơn và xuất hiện chuyển vị ngang đáng kể hơn trong giai đoạn sau tới hạn. Các khiếm khuyết hình học ban đầu, dù có biên độ không lớn, đã ảnh hưởng rõ rệt đến quá trình suy giảm độ cứng, thời điểm kích hoạt cơ chế xoắn – uốn và khả năng duy trì cân bằng của dầm trong giai đoạn sau tới hạn. Phân tích định lượng cho thấy xu hướng rõ rệt: mẫu dầm có biên độ cong vênh ban đầu lớn hơn có xu hướng thể hiện tải trọng tới hạn thấp hơn và sự phát

triển chuyển vị ngang lớn hơn trong giai đoạn sau tới hạn. Cụ thể, mẫu A3 với mức độ cong vênh ban đầu lớn hơn, có tải trọng tới hạn nhỏ nhất và chuyển vị ngang lớn nhất; trong khi mẫu A1 có mức độ cong vênh nhỏ hơn, đạt tải trọng tới hạn lớn hơn và chuyển vị ngang nhỏ hơn. Xu hướng này khẳng định rằng khiếm khuyết hình học ban đầu không chỉ ảnh hưởng đến giá trị tải trọng cực hạn mà còn chi phối cơ chế phát triển mất ổn định xoắn ngang của dầm.

Như vậy, kết quả nghiên cứu cho thấy ứng xử ổn định tổng thể của dầm không chỉ phụ thuộc vào đặc trưng vật liệu và điều kiện biên, mà còn rất nhạy cảm với dạng và biên độ cong vênh ban đầu của cấu kiện. Do đó, việc xác định và xem xét đầy đủ khiếm khuyết hình học ban đầu là yêu cầu cần thiết để đánh giá chính xác sức kháng mất ổn định xoắn ngang và mô tả đúng cơ chế làm việc thực tế của dầm thép chữ I cán nóng.

4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày kết quả thí nghiệm uốn bốn điểm trên ba mẫu dầm thép chữ I cán nóng A1, A2 và A3 nhằm đánh giá ứng xử mất ổn định xoắn ngang (LTB) trong điều kiện có khiếm khuyết hình học ban đầu khác nhau. Trên cơ sở các quan hệ tải trọng – chuyển vị đứng và tải trọng – chuyển vị ngang, nghiên cứu đã làm rõ ảnh hưởng của khiếm khuyết hình học ban đầu đến cơ chế mất ổn định và tải trọng tới hạn của dầm. Kết quả thực nghiệm cho thấy khiếm khuyết hình học ban đầu có vai trò đáng kể trong quá trình phát triển chuyển vị ngang và xoắn, làm suy giảm độ cứng và dạng phá hoại so với trường hợp lý tưởng. Trên cơ sở các kết quả thu được, có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

- Tải trọng tới hạn của các mẫu dầm sai khác rõ rệt mặc dù kích thước hình học danh nghĩa và điều kiện thí nghiệm tương đương. Giá trị tải trọng cực đại đo được lần lượt là 48,8 kN (mẫu A1), 47,0 kN (mẫu A2) và 44,1 kN (mẫu A3). So với mẫu A1, tải trọng tới hạn của mẫu A2 giảm 1,8 kN (khoảng 3,7%) và của mẫu A3 giảm 4,7 kN (khoảng 9,6%). Chênh lệch giữa mẫu A2 và A3 đạt 2,9 kN (khoảng 6,2%). Kết quả này cho thấy sự thay đổi khiếm khuyết hình học ban đầu có thể làm thay đổi khoảng 10% khả năng chịu lực của dầm.
- Ứng xử tổng thể của các dầm thể hiện ba giai đoạn đặc trưng: (i) làm việc đàn hồi tuyến tính ở giai đoạn đầu; (ii) suy giảm dần độ cứng khi chuyển vị ngang và xoắn bắt đầu phát triển mạnh; và (iii) mất ổn định xoắn ngang chi phối trong vùng sau tới hạn. Tại tải trọng cực đại, chuyển vị đứng giữa nhịp lần lượt đạt 6,1 mm (mẫu A1), 5,5 mm (mẫu A2) và 4,8 mm (mẫu A3). So với mẫu A1, chuyển vị đứng của mẫu A3 nhỏ hơn 1,3 mm (giảm 21,3%), cho thấy ở mẫu dầm nhạy cảm hơn, trạng thái mất ổn định xảy ra tại mức biến dạng uốn nhỏ hơn.
- Chuyển vị ngang tăng nhanh và đóng vai trò chi phối cơ chế sau tới hạn. Tại tải trọng cực đại, chuyển vị ngang giữa nhịp đạt 4,9 mm (mẫu A1), 6,1 mm (mẫu A2) và 12,1 mm (mẫu A3). Giá trị chuyển vị ngang của mẫu A3 lớn gấp 2,47 lần mẫu A1 và 1,98 lần mẫu A2. Tỷ lệ chuyển vị ngang/chuyển vị đứng tại tải trọng cực đại tăng từ 0,80 (mẫu A1) lên 1,11 (mẫu A2) và 2,52 (mẫu A3), cho thấy cơ chế làm việc của dầm chuyển dần từ uốn thuần túy sang trạng thái uốn – xoắn khi biên độ khiếm khuyết hình học tăng lên.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.02-2023.54.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. G. Xiong, J. Shi, Y. Wang, J. Yu, Experimental and numerical studies on lateral torsional buckling of welded Q460GJ structural steel beams, *Engineering Structures*, 126 (2016) 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.050>
- [2]. T. Tankova, F. Rodrigues, C. Leitão, C. Martins, L.S.D. Silva, Lateral-torsional buckling of high strength steel beams: Experimental resistance, *Thin-Walled Structures*, 164 (2021) 107913. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107913>
- [3]. T. Le, M.A. Bradford, X. Liu, H.R. Valipour, Buckling of welded high-strength steel I-beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 168 (2020) 105938. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.105938>
- [4]. N. Boissonnade, H. Somja, Influence of imperfections in FEM modeling of lateral torsional buckling, *Proceedings of the Annual Stability Conference*, Structural Stability Research Council (SSRC), 2012, pp. 1–15.
- [5]. C. Couto, P. Vila Real, Numerical investigation on the influence of imperfections in the lateral-torsional buckling of beams with slender I-shaped welded sections, *Thin-Walled Structures*, 145 (2019) 106429. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106429>
- [6]. J. Valeš, T.C. Stan, FEM modelling of lateral-torsional buckling using shell and solid elements, *Procedia Engineering*, 190 (2017) 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.365>
- [7]. M.I. Kabir, A.K. Bhowmick, Lateral torsional buckling of welded wide flange beams under constant moment, *Proceedings of the Annual Stability Conference*, Structural Stability Research Council (SSRC), Orlando, FL, USA, 2016. <https://doi.org/10.1139/cjce-2017-0499>
- [8]. M.A. Bradford, X. Liu, Flexural-torsional buckling of high-strength steel beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 124 (2016) 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.05.009>
- [9]. A. Bachiri, A. Boussouar, A. Kabouche, M.F. Suleiman, Numerical study on lateral torsional buckling of high strength welded I-section beam, *Proceedings of the 1st Arab Conference on Mechanical Engineering*, Biskra, Algeria, 2017.
- [10]. P.V. Phe, N.X. Huy, Moment resistances of wide flange beams with initial imperfection and residual stresses, *Journal of Materials and Engineering Structures*, 7 (2020) 651–658.
- [11]. P.V. Phe, Enhancement of moment resistance of steel beams with initial imperfections and residual stresses by using stiffeners and GFRP plates, *Journal of Materials and Engineering Structures*, 7 (2020) 659–667.
- [12]. American Institute of Steel Construction (AISC), *Specification for Structural Steel Buildings*, AISC 360-16, Chicago, IL, USA, 2016.
- [13]. CEN, EN 1993-1-1: Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- [14]. Standards Australia, AS 4100–1998 (R2016): *Steel structures*, Sydney, Australia, 2016.
- [15]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 7571-15:2019 – Thép hình cán nóng – Phần 15: Thép chữ I, Hà Nội, Việt Nam, 2019.
- [16]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 197-1:2014 – Vật liệu kim loại – Thử kéo – Phần 1: Phương pháp thử ở nhiệt độ phòng, Hà Nội, Việt Nam, 2014.