

Một phương pháp tính toán nhiệt độ tới hạn của cấu kiện kết cấu thép

A method for calculating the critical temperature of a steel structure members

> PGS.TS NGUYỄN HỒNG SƠN^{1*}, VÕ THANH LƯƠNG², LÊ MINH LONG³

¹Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

²Học viện Kỹ thuật quân sự

³Vụ Khoa học Công nghệ và Môi trường, Bộ Xây dựng; *Email: nguyenhongsondhkt@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp tính toán nhiệt độ tới hạn đối với các cấu kiện cơ bản của kết cấu thép theo Tiêu chuẩn thiết kế (dự thảo) của Liên bang Nga "Kết cấu thép - Quy tắc đảm bảo khả năng chịu lửa", và nghiên cứu một số tiêu chuẩn khác liên quan, chẳng hạn như GOST 27772:2021, SP 16.13330.2017 v.v... , cũng như một số tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép chịu lửa của Mỹ, châu Âu, Trung Quốc, Nhật Bản, Úc, Ấn Độ. Trên cơ sở đó, xây dựng phương pháp tính toán nhiệt độ tới hạn đối với kết cấu thép phù hợp với TCVN 5575:2024, TCVN 2737:2023 và một số tiêu chuẩn về vật liệu thép trong nước hiện hành. Đồng thời, thực hành tính toán nhiệt độ tới hạn đối với một số cấu kiện kết cấu thép, có so sánh với kết quả tính toán theo EN 1993-1-2, nhằm khẳng định độ tin cậy của phương pháp được áp dụng.

Từ khoá: Chịu lửa; nhiệt độ tới hạn; hệ số giảm cường độ và mô đun đàn hồi.

ABSTRACT

The article presents the method of calculating critical temperatures for basic components of steel structures according to the design standards (draft) of the Russian Federation "Steel structures - Rules for ensuring of fire resistance", and research a some of other related standards, such as GOST 27772:2021, SP 16.13330.2017, etc., as well as some fire-resistant steel structure design standards: American, Europe, China, Japan, Australia, India. On that basis, develop a method to calculate fire resistance limits for steel structures in accordance with TCVN 5575:2024, TCVN 2737:2023 and some current domestic steel material standards. At the same time, practice calculating the critical temperature for some structural steel members, comparing with the calculation results according to EN 1993-1-2, to confirm the reliability of the applied method.

Keywords: In fire; critical temperature; reduction factor of yield strength and elastic modulus.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kết cấu thép được sử dụng cho các nhà xưởng và nhà kho có một hoặc nhiều nhịp, cũng như có một hoặc nhiều tầng. Chúng được thiết kế về độ bền theo [8], ngoài ra cần đảm bảo yêu cầu về khả năng chịu lửa theo [1]. Việc tính toán chịu lửa kết cấu thép đối với các kỹ sư trong nước còn khá mới, do chưa có tiêu chuẩn riêng, và thường phải sử dụng các tiêu chuẩn nước ngoài, chẳng hạn như tiêu chuẩn của Mỹ [11], châu Âu [14] cũng như của Nhật Bản [10], Úc [12], Trung Quốc [13], Ấn Độ [15], Liên bang Nga [21], [22] và gần đây có [19]).

TCVN 5575:2024 được biên soạn dựa trên tiêu chuẩn của Liên bang Nga [20], QCVN 06:2022/BXD có nhiều quy định cũng được tham khảo từ Quy chuẩn của Liên bang Nga. Việc tìm hiểu và làm rõ được cách tính toán chịu lửa đối với kết cấu thép xây dựng theo Tiêu chuẩn [19] cũng là cần thiết, nhằm mở rộng phạm vi áp dụng đối với các quy định có trong [8].

Quy tắc đảm bảo khả năng chịu lửa đối với kết cấu thép được đề cập trong tài liệu [19], áp dụng đối với kết cấu chịu lực làm từ thép cán nóng dựa trên sự suy giảm khả năng chịu lực của nhà và công trình với mục đích khác nhau, không áp dụng đối với kết cấu bao che của nhà thép hoặc kết cấu thành móng làm từ tấm mạ kẽm tạo hình nguội hoặc tấm tôn.

Vấn đề về thiết kế kết cấu thép chịu lửa có nhiều nội dung, bài báo này tập trung vào việc nghiên cứu các mức thép theo Tiêu chuẩn Việt Nam tương đương với mức thép theo Tiêu chuẩn Liên bang Nga làm cơ sở để chuyển đổi bảng tra Dữ liệu sự thay đổi tính chất cơ học của thép xây dựng ở nhiệt độ cao phù hợp với các mức thép của Việt Nam, cũng như làm rõ cách tính toán hệ số suy giảm độ bền của các cấu kiện cơ bản, từ đó xác định được nhiệt độ tới hạn của kết cấu thép. Thuật ngữ "nhiệt độ tới hạn" được hiểu là: nhiệt độ trung bình của tiết diện kết cấu thép tại đó xảy ra trạng thái giới hạn mất khả năng chịu lực [19]. Các vấn đề về tính toán kỹ thuật nhiệt và tính toán khả năng chịu lửa đối với các cấu kiện kết cấu thép ứng với các giải pháp bọc chống cháy khác nhau sẽ được đề cập trong các công bố khác.

2. VẬT LIỆU THÉP KẾT CẤU VÀ CÁC ĐẶC TRƯNG

2.1 Vật liệu thép

a) Vật liệu thép thông thường

Theo Tiêu chuẩn Liên bang Nga: Vật liệu thép được quy định trong [16], theo đó có các mức thép C235, C245, C255 (thép cường độ thông thường), C345, C345K, C355, C355-1, C355K, C375 (thép cường độ nâng cao), C390, C390-1, C440, C550, C590 (thép cường độ cao), C355П, C390П (thép chịu lửa). Ký hiệu C là thép xây dựng, 235-590 quy ước thị giới hạn chảy của sản phẩm cán (tính bằng N/mm²), số 1 là biến thiên của thành phần hóa học, chữ "K" là thép

có khả năng chống ăn mòn được tăng cường, "П" là thép có khả năng chịu lửa được tăng cường.

- Theo tiêu chuẩn Việt Nam: Vật liệu thép được quy định trong các tiêu chuẩn về vật liệu thép, chẳng hạn: [2], [3], [4], [5], [6]. Quy định việc sử dụng mác thép cho kết cấu chịu lực có trong [8], nhưng không có yêu cầu về thành phần hóa học đối với thép xây dựng, quy định này xem trong các tiêu chuẩn về vật liệu [2], [3], [4], [5], [6].

b) Vật liệu thép chịu nhiệt

- Theo Tiêu chuẩn Liên bang Nga: Vật liệu thép chịu nhiệt được quy định trong [16], gồm có mác thép C355П, C390П.

- Theo tiêu chuẩn Việt Nam: Vật liệu thép chịu nhiệt được quy định tại [9].

Nhận xét:

Cần chú ý vào tính chất cơ học của thép (giới hạn chảy trên hoặc giới hạn chảy nhỏ nhất) theo [8], mác thép theo [16]. Theo đó, các mác thép theo TCVN tương đương với:

Nhóm 1: Thép cường độ thông thường (C235, C245, C255 theo [16]), gồm:

- (1) S235, S275 (theo TCVN 9986, TCVN 11228)
- (2) Thép kết cấu công dụng chung (TCVN 7571)
- (3) Thép kết cấu hàn (theo TCVN 7571)
- (4) Thép kết cấu xây dựng (theo TCVN 7571)

Nhóm 2: Thép cường độ nâng cao (C345, C345K, C355, C355-1, C355K, C375 theo [16]), gồm:

- (1) S355 (theo TCVN 9986, TCVN 11228)
- (2) Thép kết cấu hàn (theo TCVN 7571)

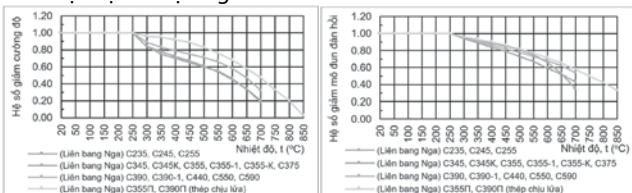
Nhóm 3: Thép cường độ cao (C390, C390-1, C440, C550, C590 theo [16]), gồm:

- (1) S460 (theo TCVN 11228)
- (2) Thép kết cấu công dụng chung (theo TCVN 7571)
- (3) Thép kết cấu hàn (theo TCVN 7571):

Nhóm 4: Thép chịu lửa (C355П, C390П theo [16]) theo TCVN 8997, gồm:

- (1) Thép ferit
 - (2) Thép austenit
- 2.2 Các đặc trưng

Giới hạn chảy và mô đun đàn hồi của thép bị giảm đi khi nhiệt độ tăng. [19] cho giá trị giảm cường độ γ_T và giảm mô đun đàn hồi γ_e của thép ở nhiệt độ cao (Phụ lục B) đối với 04 nhóm thép theo [16]. Minh họa quan hệ giữa nhiệt độ với hệ số giảm cường độ, và giữa nhiệt độ với hệ số giảm mô đun đàn hồi như ở Hình 1.



Hình 1. Quan hệ nhiệt độ với hệ số giảm cường độ và với hệ số giảm mô đun đàn hồi [19]

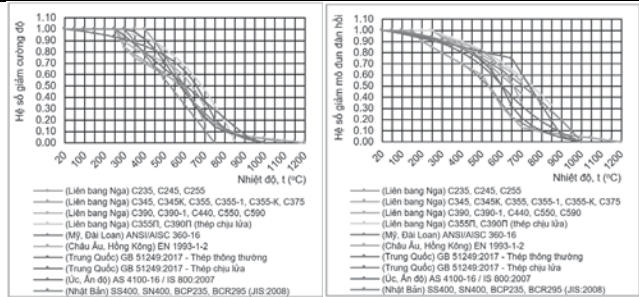
Thấy rằng, ứng với nhiệt độ dưới 250°C, giá trị $\gamma_T = \gamma_e = 1,0$, tức là giá trị cường độ và mô đun đàn hồi không thay đổi so với giá trị của chúng ở nhiệt độ tiêu chuẩn 20°C. Khi nhiệt độ tăng lên, giá trị γ_T thay đổi nhưng giá trị chênh lệch không nhiều đối với thép cường độ thông thường và thép cường độ nâng cao, tương tự giá trị γ_e thay đổi nhưng giá trị chênh lệch không nhiều đối với thép cường độ cao và thép chịu lửa. Giá trị hệ số γ_e đối với thép cường độ nâng cao có biến thiên bất thường, bởi sự giao cắt của đường biểu diễn với các thép cường độ thông thường và thép cường độ cao.

Trên cơ sở giá trị giảm cường độ và giảm mô đun đàn hồi đối với thép ở nhiệt độ cao, cũng như các mác thép tương đương theo [16] và [8], đề xuất Bảng 1, quan hệ nhiệt độ và các hệ số γ_T và γ_e .

Bảng 1. Hệ số giảm cường độ và hệ số giảm mô đun đàn hồi của thép ở nhiệt độ cao

T (°C)	Hệ số γ_T				Hệ số γ_e			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
250	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
300	0,84	0,84	0,89	0,96	0,94	0,96	0,95	0,96
350	0,78	0,75	0,83	0,95	0,89	0,92	0,90	0,93
400	0,72	0,70	0,79	0,92	0,84	0,88	0,86	0,90
450	0,67	0,65	0,75	0,89	0,79	0,85	0,82	0,86
500	0,61	0,60	0,71	0,83	0,73	0,81	0,78	0,82
550	0,54	0,55	0,66	0,76	0,67	0,75	0,73	0,77
600	0,45	0,46	0,58	0,68	0,59	0,66	0,68	0,71
650	0,34	0,34	0,47	0,58	0,52	0,53	0,62	0,65
700	0,20	0,18	0,32	0,47	0,43	0,35	0,54	0,58
750				0,33				0,50
800				0,20				0,42
850				0,02				0,33

Chú thích: (1) - mác thép S235, S275 hoặc tương đương; (2) - mác thép S355 hoặc tương đương; (3) mác thép S460 hoặc tương đương; (4) - thép chịu lửa.



Hình 2. Biểu đồ giá trị hệ số giảm cường độ, mô đun đàn hồi của thép theo một số tiêu chuẩn

Thấy rằng, một số tiêu chuẩn thiết kế quy định tỷ lệ giảm giới hạn chảy và mô đun đàn hồi không phụ thuộc vào mác thép (chẳng hạn: [14], [11], [12]), một số khác quy định phụ thuộc vào mác thép (chẳng hạn: [13], [10], [19]). Một số tiêu chuẩn cho giá trị tỷ lệ giảm thông qua các phương trình, một số khác cung cấp bảng tra đối với sự thay đổi của giới hạn chảy và mô đun đàn hồi của thép ở nhiệt độ cao dựa trên phân tích hồi quy dữ liệu nhận được từ các kết quả thử nghiệm đối bền kéo ở nhiệt độ cao.

Các công thức và bảng tra đặc xác định hệ số giảm cường độ γ_T , hệ số giảm mô đun đàn hồi γ_e theo một số tiêu chuẩn thiết kế. Biểu diễn mối quan hệ giữa nhiệt độ với hệ số giảm cường độ, và giữa nhiệt độ với hệ số giảm mô đun đàn hồi như ở Hình 2. Thấy rằng, các tiêu chuẩn khác nhau cho mối quan hệ khác nhau, cá biệt các quan hệ này theo [14] và [11] khá trùng nhau, và tương tự theo [12] và [15]. Tiêu chuẩn [13] và [19] cho mối quan hệ trên đối với thép thông thường và thép chịu nhiệt.

Ở nhiệt độ tới hạn $T = 350^\circ\text{C}$, yêu cầu trong [19] và một số tiêu chuẩn quy định không được đặt tải trọng, như thế với nhiệt độ này sẽ là ranh giới về khả năng chịu lực ở nhiệt độ cao, khi đó cần phải áp dụng giải pháp làm thay đổi khả năng chịu lực (thường phải tăng kích thước tiết diện).

3. TÍNH TOÁN NHIỆT ĐỘ TỚI HẠN CỦA CẤU KIỆN KẾT CẤU THÉP

3.1 Cường độ tính toán và mô đun đàn hồi của vật liệu thép ở nhiệt độ cao [24]

- Cường độ tính toán của thép theo giới hạn chảy khi đốt nóng:

$$f_{yT} = f_y \gamma_T \tag{1}$$

trong đó: γ_T là hệ số nhiệt độ làm giảm giới hạn chảy của thép khi đốt nóng, xác định theo trạng thái ứng suất – biến dạng; f_y là giới hạn chảy của thép.

- Mô đun đàn hồi của thép khi đốt nóng:

$$E_t = E\gamma_e \quad (2)$$

trong đó: γ_e là hệ số nhiệt độ suy giảm mô đun đàn hồi của thép khi đốt nóng; E là mô đun đàn hồi của thép.

Nhiệt độ tới hạn ($^{\circ}\text{C}$) đốt nóng tiết diện, theo mất khả năng chịu lực được xác định dựa theo giá trị thấp nhất của các hệ số γ_T và γ_e , theo Bảng 1. Hệ số γ_e được xác định khi tính toán theo trạng thái giới hạn thứ hai, với giới hạn cấu tạo về độ võng của các bộ phận kết cấu khi tiếp xúc với lửa.

Khi xác định ứng suất bằng tổ hợp tính toán, hệ số γ_T có thể xác định là $\gamma_T = \sigma_n/f_y$, trong đó σ_n là ứng suất theo kết quả tính toán tĩnh.

Hệ số γ_e cần được xác định là $\gamma_e = f/f_u$, trong đó f là biến dạng lớn nhất của cấu kiện xảy ra khi tính toán công trình từ tổ hợp tải trọng; f_u là độ võng (biến dạng) giới hạn trong cấu kiện, phù hợp với yêu cầu của [7].

3.2 Xác định nhiệt độ tới hạn của cấu kiện kết cấu thép

a) Cấu kiện chịu kéo hoặc nén đúng tâm

Hệ số nhiệt độ giảm độ bền của các cấu kiện thép khi kéo hoặc nén đúng tâm bởi lực N:

$$\gamma_T = \frac{N}{A_n f_y} \quad (3)$$

Tính toán hệ số nhiệt độ làm giảm độ bền thép có xét đến ổn định của cấu kiện tiết diện đặc khi nén đúng tâm bởi lực N:

$$\gamma_T = \frac{N}{\varphi_y A f_y} \quad (4)$$

Nhiệt độ tới hạn ($^{\circ}\text{C}$) đốt nóng tiết diện, khi kéo hoặc nén đúng tâm của cấu kiện theo mất khả năng chịu lực được xác định dựa theo giá trị của hệ số γ_T theo Bảng 1.

b) Cấu kiện chịu uốn

Tính toán hệ số nhiệt độ theo độ bền kết cấu dầm chịu uốn:

- khi tác động mô men vào một trong các mặt phẳng chính

$$\gamma_T = \frac{M}{W_{pl,min} f_y} \quad (5)$$

- khi tác động một lực ngang trong tiết diện

$$\gamma_T = \frac{VS}{I_t 0,58 f_y} \quad (6)$$

- khi tác động các mô men trong hai mặt phẳng chính (và khi có mặt bi-mô men):

$$\gamma_T = \frac{M_x}{I_{xn} f_y} y \pm \frac{M_y}{I_{yn} f_y} x \pm \frac{B \cdot \omega}{I_{on} f_y} \quad (7)$$

- khi tác động đồng thời mô men và lực cắt trong tiết diện

$$\gamma_T = \frac{0,87}{f_y} \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (8a)$$

$$\gamma_T \geq \tau_{xy} / (0,58 f_y) \quad (8b)$$

Giá trị ứng suất cục bộ do lực tập trung σ_{loc} được xác định theo [8], với $f_{yd} = f_y/\gamma_m$, trong đó lấy hệ số độ tin cậy về vật liệu $\gamma_m = 1,0$.

Cần xác định hệ số nhiệt độ làm giảm độ bền thép theo ổn định tổng thể của dầm chữ I loại 1 cũng như dầm hai loại thép loại 2 theo phân loại của [8], ngoại trừ ứng theo các công thức:

- khi uốn trong mặt phẳng bụng trùng với mặt phẳng đối xứng của tiết diện

$$\gamma_T = \frac{M_x}{\varphi_b W_{pl,x} f_y} \quad (9)$$

- khi uốn trong hai mặt phẳng chính (và khi có mặt bi-mô men)

$$\gamma_T = \frac{M_x}{\varphi_b W_{pl,x} f_y} \pm \frac{M_y}{W_{pl,y} f_y} \pm \frac{B}{W_{co} f_y} \quad (10)$$

Nhiệt độ tới hạn ($^{\circ}\text{C}$) đốt nóng tiết diện của phần tử chịu uốn làm mất khả năng chịu lực được xác định dựa theo giá trị lớn nhất của hệ số γ_T , được xác định theo các công thức ở mục 3.3b) theo Bảng 1.

c) Cấu kiện chịu nén kết hợp uốn

Tính hệ số nhiệt độ làm suy giảm độ bền của cấu kiện thép khi tác dụng của lực dọc cùng với uốn

Hệ số nhiệt độ làm giảm độ bền đối với cấu kiện chịu nén lệch tâm (uốn - nén) và kéo lệch tâm (kéo - uốn) xác định theo công thức

$$\gamma_T = \frac{N}{A_n f_y} + \frac{M_x}{W_{pl,x} f_y} + \frac{M_y}{W_{pl,y} f_y} + \frac{B}{W_{co} f_y} \quad (11)$$

Hệ số nhiệt độ làm giảm độ bền đối với các cấu kiện chịu nén lệch tâm (uốn - nén) có tiết diện không đổi (cột nhà nhiều tầng - trong một tầng) trong mặt phẳng tác dụng mô men trùng với mặt phẳng đối xứng khi tính toán ổn định được xác định theo công thức

$$\gamma_T = N / (\varphi_e A f_y) \quad (12)$$

Trong công thức (12), hệ số ổn định khi nén và uốn đồng thời φ_e được xác định theo Bảng D.3 trong [8], phụ thuộc vào độ mảnh quy ước $\bar{\lambda}$ và độ lệch tâm tương đối quy đổi m_{ef} , được xác định theo công thức $m_{ef} = \eta m$

Hệ số nhiệt độ làm giảm độ bền đối với các thanh chịu nén lệch tâm (uốn nén) có tiết diện đặc không đổi, ngoại trừ dạng hình hộp, ngoài mặt phẳng tác dụng mô men khi uốn chúng trong mặt phẳng có độ cứng lớn nhất ($I_x > I_y$), trùng với mặt phẳng đối xứng cũng như các chữ C khi tính toán độ ổn định cần xác định theo công thức

$$\gamma_T = N / (\varphi_y A f_y) \quad (14)$$

Hệ số nhiệt độ làm giảm độ bền đối với các cấu kiện chịu nén lệch tâm (uốn nén) có tiết diện không đổi, uốn trong mặt phẳng có độ cứng nhỏ nhất ($I_y < I_x$ và $e_y \neq 0$), cần tính theo công thức (12), còn khi độ mảnh $\bar{\lambda}_x > \bar{\lambda}_y$ cũng kiểm tra tính ổn định ngoài mặt phẳng tác dụng của mô men như các cấu kiện chịu nén đúng tâm

$$\gamma_T = N / (\varphi_x A f_y) \quad (15)$$

Hệ số nhiệt độ làm giảm độ bền khi tính toán ổn định các thanh có tiết diện đặc không đổi (trừ dạng hộp), chịu nén và uốn trong hai mặt phẳng chính, khi mặt phẳng có độ cứng lớn nhất ($I_x > I_y$) trùng với mặt phẳng đối xứng, cũng như đối với tiết diện dạng 3 (xem Bảng 12 trong [8]) cần được xác định theo công thức

$$\gamma_T = N / (\varphi_{exy} A f_y) \quad (16)$$

$$\text{trong đó: } \varphi_{exy} = \varphi_{ey} (0,6\sqrt{C} + 0,4\sqrt{C}) \quad (17)$$

Các yêu cầu về tính toán hệ số phải được lấy theo mục 9.2 trong [8], trong tính toán có tính đến mô men chống uốn dẻo tương ứng của các tiết diện.

Hệ số nhiệt độ làm giảm độ bền khi tính toán ổn định của các thanh đặc tiết diện hộp không đổi chịu nén uốn trên một hoặc hai mặt phẳng chính cần xác định theo các công thức

$$\gamma_T = N / (\varphi_{ey} A f_y) + M_x / (\delta_x W_{pl,x} f_y) \quad (18)$$

$$\gamma_T = N / (\varphi_{ex} A f_y) + M_y / (\delta_y W_{pl,y} f_y) \quad (19)$$

trong đó: φ_{ex} , φ_{ey} là hệ số ổn định khi nén cùng với uốn, xác định theo Bảng D.3 (Phụ lục D) trong [8]; δ_x , δ_y là các hệ số xác định theo công thức

$$\delta_x = 1 - 0,1N\bar{\lambda}_x^2 / (A f_y) \quad \text{và} \quad \delta_y = 1 - 0,1N\bar{\lambda}_y^2 / (A f_y) \quad (20)$$

và lấy tương ứng bằng 1,0 khi $\bar{\lambda}_x \leq 1$ và $\bar{\lambda}_y \leq 1$, trong khi N phải lấy dấu “-”.

Nhiệt độ tới hạn (°C) đốt nóng tiết diện của cấu kiện khi tác dụng lực dọc cùng với uốn gây mất khả năng chịu lực được xác định dựa theo giá trị lớn nhất của hệ số γ_T , được xác định theo các công thức ở tiểu mục 3.3c) và Bảng 1.

4. Ví dụ tính toán

Các ví dụ này nhằm minh họa cách tính toán nhiệt độ tới hạn đối với một số cấu kiện cơ bản. Số liệu ban đầu lấy theo tài liệu [17], nhằm kiểm chứng kết quả tính so với kết quả theo [14].

4.1. Cấu kiện chịu nén đứng tâm

Số liệu: Cột của nhà công nghiệp được làm từ các tấm bằng tổ hợp hàn. Cột nén đứng tâm, $N_{ed} = 307,7$ kN, chiều cao cột 4,65 m. Tiết diện cột chữ H có $h = 300$ mm, $b = 200$ mm, $h_w = 276$ mm, $t_w = 10$ mm, $t_f = 12$ mm, $A = 75,6$ cm². Cột được làm bằng thép S235, với chiều dày sơ bộ lớn nhất của các phần tử tiết diện cột $t < 16$ mm thì giới hạn chảy bằng $f_y = 235$ N/mm².

Yêu cầu: Xác định nhiệt độ tới hạn.

Kết quả:

(1) Xác định là hệ số ổn định khi nén đứng tâm φ_y (đường cong c tính cho trục yếu), với độ mảnh quy ước của thanh:

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{L_{cr}}{i_y} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{4650}{46} \sqrt{\frac{235}{2,06 \times 10^5}} = 3,41.$$

$$\varphi_y = 0,460 + \frac{0,493 - 0,460}{3,4 - 3,6} \times (3,41 - 3,6) = 0,491.$$

$$\gamma_T = \frac{N}{\varphi_y A f_y} = \frac{307,7 \times 10^3}{0,491 \times 75,6 \times 10^2 \times 235} = 0,353.$$

(2) Nhiệt độ tới hạn đốt nóng tiết diện, khi nén đứng tâm của cấu kiện theo mất khả năng chịu lực được xác định dựa theo giá trị của hệ số $\gamma_T = 0,353$ theo Bảng 1.

$$T_{cr} = 650 + \frac{0,353 - 0,34}{0,20 - 0,34} \times \frac{700 - 650}{1} = 645,36 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

So sánh với kết quả tính theo tài liệu [17]:

Kết quả tính theo tài liệu [17], $T_{cr} = 664,6^\circ\text{C}$. Chênh lệch kết quả tính là -2,98%.

4.2 Cấu kiện chịu uốn

Số liệu: Dầm chính có $L = 7,5$ m chịu tải trọng phân bố đều, bước dầm $B = 4,5$ m, đầu dầm tựa khớp trên các cột và cánh phía trên của nó không được cố định ngoài mặt phẳng, tải trọng lên dầm chính $G_k = 1,503$ kN/m², $Q_{k,1} = 4,9$ kN/m². Dầm tổ hợp hàn được làm từ các tấm có kích thước $h = 400$ mm, $b = 300$ mm, $h_w = 368$ mm, $t_w = 10$ mm, $t_f = 16$ mm, $A = 132,8$ cm². Dầm làm bằng thép S235. Với chiều dày tiết diện tối đa sơ bộ của tấm ≤ 16 mm, giới hạn chảy của thép $f_y = 235$ N/mm².

Yêu cầu: Xác định nhiệt độ tới hạn.

Kết quả:

(1) Tổng giá trị tính toán của tải trọng trên dầm chính q_n :

$$q_n = (G_k + \psi_{n1} Q_{k,1}) \cdot B = (1,503 + 1,0 \times 4,9) \times 4,5 = 28,81 \text{ kN/m}$$

đó:

G_k là giá trị tiêu chuẩn của tác động thường xuyên;

$G_k = 1,02$ (trọng lượng mái) + 0,483 (trọng lượng dầm sàn) = 1,503 kN/m²;

$Q_{k,1} = 4,9$ kN/m² là giá trị tiêu chuẩn chủ đạo hoặc (thứ nhất) của tác động tạm thời dài hạn;

$\psi_{n1} = \psi_{L,1} = 1,0$ là hệ số tổ hợp tải trọng, được giả định bằng $\psi_{L,1}$ (xem mục 6.3 trong [7]).

$$q_n = 28,81 \text{ kN/m}.$$

(2) Mô men uốn lớn nhất ở dầm chính với tải trọng phân bố đều ở giữa nhịp:

$$M = \frac{q_n L^2}{8} = \frac{28,81 \times 7,5^2}{8} = 202,6 \text{ kNm}.$$

(3) Tính toán hệ số nhiệt độ theo độ bền kết cấu dầm chịu uốn khi tác động mô men vào một trong các mặt phẳng chính theo công thức (5):

$$\gamma_{T1} = \frac{M}{W_{pl,min} f_y} = \frac{202,6 \times 10^6}{2080,95 \times 10^3 \times 235} = 0,414,$$

trong đó: $W_{pl,min} = 2080,95$ cm³ là mô đun chống uốn dẻo nhỏ nhất của tiết diện.

Xác định hệ số nhiệt độ làm giảm độ bền thép theo ổn định tổng thể của dầm chữ I loại 1 khi uốn trong mặt phẳng bụng trùng với mặt phẳng đối xứng của tiết diện theo công thức (9):

$$\gamma_{T2} = \frac{M_x}{\varphi_b W_{pl,x} f_y} = \frac{202,6 \times 10^6}{0,923 \times 2080,95 \times 10^3 \times 235} = 0,449.$$

Trong công thức (9): $\varphi_b = 0,923$ là hệ số ổn định khi uốn, được xác định theo Phụ lục F trong [8] cho dầm có tiết diện gổĩ đỡ được bảo đảm chống dịch chuyển ngang và quay;

$W_{pl,x} = 2080,95$ cm³ là mô đun chống uốn dẻo của tiết diện đối với trục $x-x$, tính cho thứ bị nén nhiều nhất của cánh chịu nén;

(4) Nhiệt độ tới hạn đốt nóng tiết diện của phần tử chịu uốn làm mất khả năng chịu lực được xác định dựa theo giá trị lớn nhất của hệ số γ_T , được xác định theo các công thức ở mục 3.3b), theo Bảng 1:

$$T_{cr1} = 600 + \frac{0,414 - 0,45}{0,34 - 0,45} \times \frac{650 - 600}{1} = 616,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$T_{cr2} = 600 + \frac{0,449 - 0,45}{0,34 - 0,45} \times \frac{650 - 600}{1} = 600,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Chấp nhận giá trị thấp nhất trong hai giá trị. Do đó, nhiệt độ tới hạn của dầm là $T_{cr} = 600,4^\circ\text{C}$.

(5) Nhiệt độ tới hạn đốt nóng tiết diện, theo mất khả năng chịu lực được xác định dựa theo giá trị thấp nhất của các hệ số γ_T và γ_e , theo Bảng 1. Hệ số γ_e được xác định khi tính toán theo trạng thái giới hạn thứ hai, với giới hạn cấu tạo về độ võng của các bộ phận kết cấu khi tiếp xúc với lửa.

Hệ số γ_e cần được xác định là $\gamma_e = f/f_u$, trong đó f là biến dạng lớn nhất của phần tử xảy ra khi tính toán công trình từ tổ hợp tải trọng; f_u là độ võng (biến dạng) giới hạn trong dầm, phù hợp với yêu cầu của TCVN 2737:2023 (f_u cho dầm chính $f_u = L/250 = 7500/250 = 30$ mm).

(6) Xác định độ võng lớn nhất của dầm f khi chịu tải trọng $q_n = 28,81$ kN/m

$$f = \frac{5 \cdot q_n L^4}{384 E I_x} = \frac{5}{384 \cdot 2,06 \times 10^5 \times 39452,44 \times 10^4} \times 28,81 \times 7,5^4 \times 10^{12} = 14,6 \text{ mm}.$$

$$\text{Như vậy ta có: } \gamma_e = \frac{f}{f_u} = \frac{14,6}{30} = 0,487.$$

Do $\gamma_e = 0,487 > 0,449 = \gamma_T$ nên nhiệt độ tới hạn được xác định theo γ_T .

So sánh với kết quả tính theo tài liệu [17]:

Kết quả tính theo tài liệu [17], $T_{cr} = 468,8^\circ\text{C}$. Chênh lệch kết quả tính là 28,07%.

4.3 Cấu kiện chịu nén kết hợp uốn

Số liệu: Cột đỡ giàn mái của nhà công nghiệp, bước cột 6,0 m. Cột chịu nén và uốn đồng thời ($N = 402,4$ kN; $M_x = 131,2$ kNm) với chiều cao hình học của cột $L_{ef} = 700$ cm, chiều dài tính toán trong mặt phẳng khung $L_{cr,x} = \mu \cdot L_{ef} = 2 \times 700 = 1400$ cm, và ngoài mặt phẳng khung $L_{cr,y} = 350$ cm. Tiết diện cột chữ H50 (theo GOST 8239-89), kích thước hình học $h = 500,0$ mm, $b = 170$ mm, $t_w = 10,0$ mm, $t_f = 15,2$ mm, $r = 17,0$ mm, $h_w = h - 2t_f = 469,6$ mm; các đặc trưng hình học sau: $A = 100,0$ cm², $I_x = 39\,727$ cm⁴, $I_y = 1043$ cm⁴, $W_x =$

1589 cm³, W_y = 123 cm³, W_{pl,x} = 1852,8 cm³, i_x = 19,0 cm; i_y = 3,23 cm. Chấp nhận rằng tiết diện chỉ làm việc trong giai đoạn đàn hồi.

Cột được làm bằng thép S275. Với chiều dày sơ bộ lớn nhất của các phần tử tiết diện cột t < 40 mm thì giới hạn chảy bằng f_y = 270 N/mm².

Yêu cầu: Xác định nhiệt độ tới hạn.

Kết quả:

(1) Hệ số nhiệt độ làm giảm độ bền đối với cấu kiện chịu nén lệch tâm (uốn - nén), theo công thức (11):

$$\gamma_{T1} = \frac{402,4 \times 10^3}{100 \times 10^2 \times 270} + \frac{131,2 \times 10^6}{1852,8 \times 10^3 \times 270} = 0,411,$$

trong đó: nội lực trong tổ hợp bất lợi nhất N = 402,4 kN; M_x = 131,2 kNm; M_y = B = 0. Các thông số A_n = A = 100,0 cm²; W_{pl,x} = 1852,8 cm³ và vật liệu f_y = 270 N/mm².

(2) Độ lệch tâm tương đối quy đổi m_{ef}, xác định theo công thức (13):

$$m_{ef} = \eta m = 1,40 \times 1,76 = 2,46$$

trong đó: η = 1,40; m = eA/W_{pl,x} = 32,6 × 100/1852,8 = 1,76 là độ lệch tâm tương đối (e = M/N = 131,2/402,4 = 0,326 m).

$$\bar{\lambda}_x = \frac{1400}{19} \times \sqrt{\frac{270}{2,06 \times 10^5}} = 2,67$$

Từ $\bar{\lambda}_x = 2,67$; m_{ef} = 2,46, nhận được φ_e = 0,314.

Thay vào (12) ta có:

$$\gamma_{T2} = \frac{402,4 \times 10^3}{0,314 \times 100 \times 10^2 \times 270} = 0,475.$$

(3) Hệ số nhiệt độ làm giảm độ bền đối với các thanh chịu nén lệch tâm (uốn nén) có tiết diện đặc không đối, xác định theo công thức (14):

$$\gamma_T = N / (\alpha_{\varphi_y} A f_y),$$

trong đó:

$$\bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{350}{3,23} \times \sqrt{\frac{270}{2,06 \times 10^5}} = 3,92.$$

$$\varphi_y = 0,402 + \frac{0,430 - 0,402}{3,8 - 4,0} \times (3,92 - 4,0) = 0,413.$$

φ_c = 0,537 là giá trị của φ_y khi $\bar{\lambda}_y = 3,14$;

$$\alpha = 0,65 + 0,05m_x = 0,65 + 0,05 \times 1,76 = 0,738;$$

$$\beta = \sqrt{\varphi_c / \varphi_y} = \sqrt{0,537 / 0,413} = 1,140;$$

$$c = \frac{\beta}{1 + \alpha m_x} = \frac{1,140}{1 + 0,738 \times 1,76} = 0,496.$$

Thay vào (14) ta có:

$$\gamma_{T3} = \frac{402,4 \times 10^3}{0,496 \times 0,413 \times 100 \times 10^2 \times 270} = 0,728.$$

(4) Nhiệt độ tới hạn đốt nóng tiết diện của cấu kiện khi tác dụng lực dọc và uốn đồng thời gây mất khả năng chịu lực được xác định dựa theo giá trị lớn nhất của hệ số γ_T, được xác định theo các công thức ở tiểu mục 3.3c) và Bảng 1.

$$\gamma_T = \max(\gamma_{T1}, \gamma_{T2}, \gamma_{T3}) = \max(0,411; 0,475; 0,728) = 0,728.$$

Do thép S275 nằm giữa hai loại thép thường và thép nâng cao nên cần phải kiểm tra theo cả hai loại đó.

$$T_{cr1} = 400 + \frac{0,728 - 0,78}{0,72 - 0,78} \times \frac{400 - 350}{1} = 443,3^\circ\text{C}.$$

$$T_{cr2} = 400 + \frac{0,728 - 0,75}{0,70 - 0,75} \times \frac{400 - 350}{1} = 422,0^\circ\text{C}.$$

(5) Chấp nhận giá trị xấu nhất trong hai giá trị. Do đó, nhiệt độ tới hạn của cột là T_{cr} = 422,0°C.

So sánh với kết quả tính theo tài liệu [17]:

Kết quả tính theo tài liệu [17], T_{cr} = 414,1°C. Chênh lệch kết quả tính là 1,91%.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Qua các nội dung nghiên cứu trong bài báo này, kết quả đạt được như sau:

- Đã làm rõ được một số vấn đề khi tính toán nhiệt độ tới hạn theo tiêu chuẩn thiết kế (dự thảo) của Liên bang Nga, có thể áp dụng để tính toán nhiệt độ tới hạn đối với một số cấu kiện cơ bản khi sử dụng [7] và [8] và các tiêu chuẩn về vật liệu thép.

- Thực hành tính toán nhiệt độ tới hạn đối với cấu kiện cơ bản. Qua ví dụ số thấy rằng, việc tính toán nhiệt độ tới hạn đối với một số cấu kiện cơ bản của kết cấu thép, có thể áp dụng trong thực tế thiết kế kết cấu thép trong điều kiện cháy ở Việt Nam.

- Kiến nghị tiếp tục nghiên cứu tính toán nhiệt độ tới hạn, giới hạn chịu lửa và khả năng chịu lửa của cấu kiện kết cấu thép khi được bọc bằng các vật liệu chống cháy khác nhau (sơn, thạch cao v.v...).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Quy chuẩn quốc gia QCVN 06:2022/BXD, An toàn cháy cho nhà và công trình.
- [2] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 9986-1:2013 (ISO 630-1:2011), Thép kết cấu - Phần 1: Điều kiện kỹ thuật chung khi cung cấp sản phẩm thép cán nóng.
- [3] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 9986-2:2013 (ISO 5264-2:2011), Thép kết cấu - Phần 2: Điều kiện kỹ thuật khi cung cấp thép kết cấu thông dụng.
- [4] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 9986-3:2014 (ISO 630-3:2012), Thép kết cấu - Phần 3: Điều kiện kỹ thuật khi cung cấp thép kết cấu hạt mịn.
- [5] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 11228 (ISO 12633), Thép kết cấu rỗng được gia công nóng hoàn thiện từ thép không hợp kim và thép hạt mịn.
- [6] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 7571:2019, Thép hình cán nóng.
- [7] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 2737:2023, Tải trọng và tác động.
- [8] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 5575:2024, Thiết kế kết cấu thép.
- [9] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 8997:2011 (ISO 4955:2005), Thép chịu nhiệt.
- [10] AII 2008, Recommendation for fire resistant design of steel structures.
- [11] ANSI/AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings.
- [12] AS 4100:2020, Steel structures.
- [13] GB 51249-2017, Code for fire safety of steel structures in buildings, tr 21.
- [14] EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.
- [15] IS 800:2007, General Construction In Steel - Code of Practice.
- [16] ГОСТ 27772-2021, Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия.
- [17] Расчет стальных конструкций зданий в соответствии с Еврокодом 3 и национальными приложениями Украины.
- [18] СП 296.1325800.2017, Здания и сооружения. Особые воздействия.
- [19] СП XX.XXXXX.2023, Конструкции стальные строительные. Правила обеспечения огнестойкости.
- [20] СП 16.13330.2017 «СНИП II-23-81* Стальные конструкции» (с изменением № 1, № 2, № 3, № 4, № 5).
- [21] СТО АРСС 1 1251254.001-018-03, Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных типов облицовок.
- [22] СТО АРСС 1125 1254.001-020-1, Огнестойкость строительных конструкций из стальных холодногнутых оцинкованных профилей, 2022.