

Tính toán liên kết dầm - cột trong khung thép với mô hình liên kết khớp theo tiêu chuẩn châu Âu EN 1993-1-8

Design beam-column joints in steel frames with hinge connections according to Eurocode EN 1993-1-8

Lê Dũng Bảo Trung, Nguyễn Hồng Sơn

Tóm tắt

Bài báo trình bày về cách tính toán liên kết dầm - cột trong khung thép theo phương pháp thành phần, với mô hình liên kết khớp (không truyền mô men) theo tiêu chuẩn châu Âu EN 1993-1-8. Thực hiện ví dụ tính toán một số kiểu liên kết khớp thông dụng, nhằm minh họa lý thuyết tính toán và áp dụng trong tính toán thực hành.

Từ khóa: Phương pháp thành phần, nút liên kết dầm cột, Tiêu chuẩn châu Âu

Abstract

This paper presents the method of designing beam-column joints in steel frame by component method, with a hinge connections model (without moment transmission) according to European standard EN 1993-1-8. Perform example calculation of some common types of hinge joints, to illustrate calculation theory and apply it in the practical calculation.

Key words: Component method, beam - column joints, Eurocode

1. Đặt vấn đề

Liên kết dầm với cột (liên kết dầm - cột) trong kết cấu khung thép là bộ phận quan trọng, chúng có tác dụng truyền lực từ dầm sang cột và bảo đảm sự làm việc tổng thể của các cấu kiện trong khung. Các quy định về cấu tạo và tính toán liên kết dầm - cột phụ thuộc vào sơ đồ tính của chúng và vẫn còn có nhiều quan điểm tính toán khác nhau. Các tài liệu, giáo trình dùng để giảng dạy cho các sinh viên ngành Kỹ thuật xây dựng có đề cập đến loại liên kết dầm - cột trong khung, theo đó các liên kết được chia thành: liên kết khớp, liên kết mềm và liên kết cứng, nhưng quy định tính toán chúng còn sơ sài [1], Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 5575:2012 lại không có quy định cụ thể việc tính toán liên kết dầm - cột như thế nào, thậm chí cũng chỉ có quan niệm là liên kết khớp hoặc liên kết ngàm (liên kết cứng). Trong khi đó, nhiều tiêu chuẩn tiên tiến trên thế giới, chẳng hạn như tiêu chuẩn Mỹ (AISC 360-16) hoặc châu Âu (EN 1993-1-8) [3, 13]... cũng đã có các quy định chi tiết việc phân loại và tính toán các liên kết dầm - cột, với quan niệm chúng được xem như là liên kết khớp, liên kết đàn hồi (liên kết nửa cứng) hoặc liên kết cứng, quan niệm này phụ thuộc vào khả năng truyền mô men tại đầu dầm hoặc độ bền của chúng. Cũng thấy rằng, tiêu chuẩn TCVN 5575:2012 được chuyển dịch từ tiêu chuẩn TCXDVN 338:2006, và chúng được biên soạn trên cơ sở tiêu chuẩn của Liên xô cũ (SNIPII-23-81*) vào những năm 80. Cho đến nay, tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép của Nga cũng đã được soát xét nhiều lần, và gần đây nhất Nga cũng đã ban hành phiên bản cập nhật SP16.13330.2017[15] và 294.1325800.2017[16] về Tiêu chuẩn Thiết kế kết cấu thép và Hướng dẫn Thiết kế kết cấu thép, nội dung chính cũng đã cập nhật Tiêu chuẩn châu Âu. Chính vì thế, việc nghiên cứu tiêu chuẩn châu Âu cũng là hướng tiếp cận tốt, phục vụ cho công tác đào tạo cũng như áp dụng trong thực hành theo hướng hội nhập Quốc tế, bổ sung cho tiêu chuẩn hiện hành của Việt Nam về Thiết kế kết cấu thép, sẽ có ý nghĩa thực tiễn.

2. Tính toán liên kết dầm - cột

2.1. Một số hình thức liên kết dầm - cột

Liên kết dầm - cột trong khung thép rất đa dạng, theo đó EN 1993-1-8 đưa ra một số hình thức sau (Hình 1).

Theo đó, chúng được phân ra thành liên kết khớp, liên kết nửa cứng (liên kết đàn hồi) và liên kết cứng. Việc cấu tạo chúng để đảm bảo sự làm việc như quan niệm tính toán sẽ rất khác nhau. Về hình thức liên kết sẽ có các loại sau:

- (1) Liên kết hàn trực tiếp các cấu kiện (Hình 1a),
- (2) Sử dụng liên kết bu lông với mặt bích mở rộng cho cột biên và cột giữa (Hình 1b,c),
- (3) Sử dụng liên kết bu lông với gối tựa bằng cánh thép góc (Hình 1d),
- (4) Liên kết cột và xà đặt nghiêng (Hình 1e),
- (5) Liên kết khuếch đại dầm với dầm ((Hình 1f,g),
- (6) Liên kết dầm ngang với dầm dọc (Hình 1h).

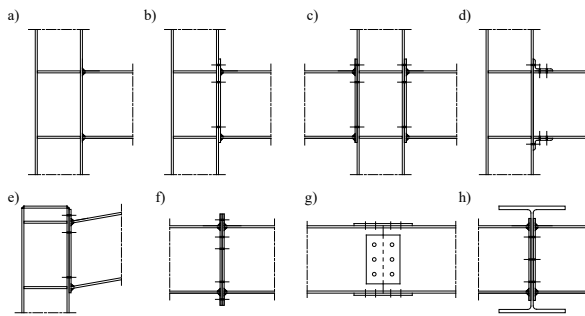
Như vậy, hình thức liên kết rất đa dạng, sau đây chỉ đề cập đến tính toán liên kết dầm - cột, có cấu tạo theo mô hình khớp.

2.2. Tính toán liên kết dầm - cột với mô hình khớp

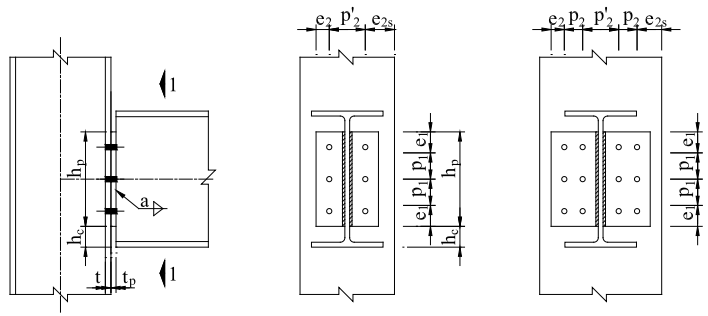
Mục 6 của EN 1993-1-8 trình bày phương pháp tính toán các đặc trưng của nút liên kết, với tên gọi là "phương pháp thành phần - component method". Áp dụng phương pháp này, nút liên kết cần được mô hình hóa như một tổ hợp các thành phần cơ bản. Phương pháp tính toán các thành phần cơ bản của nút liên

Lê Dũng Bảo Trung, Nguyễn Hồng Sơn
Bộ môn Kết cấu Thép Gỗ, Khoa Xây dựng
Email: trungldb@gmail.com

Ngày nhận bài: 05/5/2020
Ngày sửa bài: 18/5/2020
Ngày duyệt đăng: 20/12/2022



Hình 1. Minh họa một số kiểu nút liên kết dầm – cột được đề cập trong EN 1993-1-8



Hình 2. Ký hiệu dành cho liên kết sử dụng mặt bích ngăn

kết được đưa ra trong tiêu chuẩn để áp dụng chung và áp dụng cho các thành phần tương tự của các hình thức liên kết khác nhau. Tuy nhiên, phương pháp cụ thể để xác định độ bền của nút dựa trên giả thuyết sự phân bố nội lực đối với hình thức liên kết được cho trong EN 1993-1-8.

Bảng 1. Danh sách các thành phần cơ bản

Stt	Thành phần	Minh họa	Stt	Thành phần	Minh họa
1	Ô bụng cột chịu cắt		7	Cánh dầm hoặc cột và bản bụng chịu nén	
2	Bụng cột chịu nén ngang		8	Bụng dầm chịu kéo	
3	Bụng cột chịu kéo ngang		9	Tấm chịu kéo hoặc nén	
4	Cánh cột chịu uốn		10	Bu lông chịu kéo	
5	Mặt bích chịu uốn		11	Bu lông chịu cắt	
6	Cánh thép góc chịu uốn		12	Bu lông chịu ép mặt (cánh dầm, cánh cột ...)	

Để nhận được giá trị tham số ứng xử của nút liên kết, chi tiết cấu tạo của chúng được “chia nhỏ ra” thành các thành phần cơ bản, ví dụ ô bụng cột chịu kéo, bản bụng cột chịu nén ngang, bản bụng cột chịu kéo ngang, bản cánh cột chịu uốn, mặt bích chịu uốn, thép góc ở bản cánh dầm chịu uốn, bản cánh dầm hoặc bản cánh cột chịu nén, bản bụng dầm chịu kéo, bản thép chịu kéo hoặc nén, bu lông chịu kéo, bu lông chịu cắt, bu lông chịu ép mặt (ở bản cánh dầm, bản cánh cột, mặt bích hoặc ở thép góc ở bản cánh dầm, bê tông bao gồm vữa chèn chịu nén, bản đế chịu uốn do nén, bản đế chịu uốn do kéo, bu lông neo chịu kéo, bu lông neo chịu cắt, bu lông neo chịu ép mặt và các mối hàn..., được liệt kê ở Bảng 1.

Trong các mục 6.2, mục 6.3 và mục 6.4 của EN 1993-1-8 đã đưa ra biểu thức để xác định độ bền của các thành phần này đối với một số kiểu nút liên kết vừa kể trên (kể cả nút liên kết chân cột với móng).

Quy định đối với nút đặc trưng

Yêu cầu về góc xoay và độ dẻo dai (ductility) cần phải thỏa mãn, thiết kế nút không truyền mô men (nút khớp) được giới hạn áp dụng cho độ bền chịu cắt. Tính toán trình bày dưới đây cho hai kiểu nút liên kết: (1) nút liên kết sử dụng mặt bích ngăn, (2) nút liên kết sử dụng bản ốp. Trường hợp nút liên kết sử dụng bản gối (hoặc thép góc gối) có thể tham khảo trong EN 1993-1-8. Lực tác dụng lên nút ở trạng thái giới hạn là kết quả của phân tích kết cấu, xác định theo EN 1993-1-1. Độ bền của nút được xác định trên cơ sở độ bền của thành phần riêng lẻ: bu lông, mối hàn và thành phần khác như đã nêu.

Kiểu 1: Liên kết sử dụng mặt bích ngăn

Ký hiệu sử dụng riêng cho mục này đối với mỗi nối sử dụng mặt bích ngăn được chỉ ra ở Hình 2.

Yêu cầu để bảo đảm phạm vi áp dụng của phương pháp, tất cả các bất đẳng thức (1) đến (5) dưới đây phải thỏa mãn:

$$h_p \leq d_b \quad (1)$$

$$\frac{t_p}{h_c} > \phi_{\text{required}} = \frac{\gamma_p L^3}{24EI} \quad (2)$$

trong đó:

h_p – chiều cao của mặt bích ngăn;

d_b – chiều cao thông thủy của phần bản bụng;

h_c – chiều cao tính từ mép mặt bích ngăn đến mép biên của cánh dầm;

γ_p – tải trọng thực trên dầm;

L, I – chiều dài và mô men quán tính của dầm;

f_{yp} – giới hạn chảy của vật liệu làm mặt bích;

t_{cf} – chiều dày cánh cột;

t_w – chiều dày bụng cột hoặc dầm;

f_{ycf} – giới hạn chảy của vật liệu cánh cột;

d – đường kính danh định của bu lông.

- Nếu cấu kiện gối đỡ là bụng dầm hoặc cột:

$$\frac{d}{t_p} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{yp}}{f_{ub}}} \text{ hoặc } \frac{d}{t_w} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{yw}}{f_{ub}}} \quad (3)$$

trong đó:

f_{yw} – giới hạn chảy của vật liệu làm bụng cột hoặc dầm;

f_{ub} – giới hạn bền của bu lông,

- Nếu cấu kiện gối đỡ là cánh cột:

$$\frac{d}{t_p} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{yp}}{f_{ub}}} \text{ hoặc } \frac{d}{t_{cf}} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{ycf}}{f_{ub}}} \quad (4)$$

$$a \geq \frac{\beta_w f_{yb} \gamma_{M2} t_{bw}}{\sqrt{2} f_{ubw} \gamma_{M0}} \quad (5)$$

(β_w cho trong EN 1993-1-8)

Độ bền chịu lực cắt: Độ bền cắt của mối nối sử dụng mặt bích ngắn được xác định bởi 8 thành phần:

(1) Bu lông khi cắt:

$$V_{Rd1} = 0,8nF_{v,Rd} \quad (6)$$

trong đó:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (7)$$

- Khi mặt phẳng cắt đi qua phần ren của bu lông:

$A = A_s$ - diện tích chịu kéo của bu lông;

$\alpha_v = 0,6$ - cho cấp bền bu lông 4.6, 5.6 và 8.8;

$\alpha_v = 0,5$ - cho cấp bền bu lông 4.8, 5.8, 6.8 và 10.9.

- Khi mặt phẳng cắt đi qua phần thân của bu lông:

A - diện tích tiết diện nguyên của bu lông;

$\alpha_v = 0,6$.

(2) Mặt bích khi ép mặt

$$V_{Rd2} = nF_{b,Rd} \quad (8)$$

trong đó:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{up} d t_p}{\gamma_{M2}} \quad (9)$$

$$k_1 = \min \left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right)$$

$$\alpha_b = \min \left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_{up}}; 1,0 \right)$$

(3) Bộ phận gối khi ép mặt:

$$V_{Rd3} = nF_{b,Rd} \quad (10)$$

trong đó:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (11)$$

- Khi cấu kiện gối là cánh cột:

$$k_1 = \min \left(2,8 \frac{e_{2s}}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right)$$

$$\alpha_b = \min \left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right)$$

$f_u = f_{ucf}$

$t = t_{cf}$

- Khi cấu kiện gối là bụng cột:

$$k_1 = \min \left(1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right)$$

$$\alpha_b = \min \left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right)$$

$f_u = f_{ucw}$

$t = t_{cw}$

- Khi cấu kiện gối là bụng dầm:

$$k_1 = \min \left(1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right)$$

$$\alpha_b = \min \left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right)$$

$f_u = f_{ubw}$

$t = t_{bw}$

Các công thức trên đây áp dụng cho nút liên kết dầm - cột theo trục chính (liên kết với cánh cột), cũng như cho nút liên kết dầm - cột theo trục phụ (liên kết với bụng cột) một phía và nút liên kết dầm - dầm một phía. Trong các trường hợp khác, lực ép mặt là kết quả từ phía trái và phải của cấu kiện được liên kết, với vấn đề bổ sung là số lượng của bu lông liên kết có thể khác nhau đối với liên kết ở phải bên trái và phải. Quy trình tính cũng bao trùm cho các trường hợp, không có bất kỳ khó khăn đặc biệt.

(4) Mặt bích khi cắt (tiết diện nguyên):

$$V_{Rd4} = \frac{2h_p t_p f_{yp}}{1,27 \sqrt{3} \gamma_{M0}} \quad (2 \text{ tiết diện chịu}) \quad (12)$$

(5) Bản ngang khi cắt, đối với tiết diện thực:

$$V_{Rd5} = 2A_{v,net} \frac{f_{up}}{\sqrt{3} \gamma_{M2}} \quad (2 \text{ tiết diện chịu}) \quad (13)$$

với $A_{v,net} = t_p (h_p - n_1 d_0)$

(6) Mặt bích khi cắt (cắt khối):

$$V_{Rd6} = 2F_{eff,Rd} \quad (2 \text{ tiết diện chịu}) \quad (14)$$

Nếu $h_p < 1,36p_{22}$ và $n_1 > 1$:

$$F_{eff,Rd} = F_{eff,2,Rd} = 0,5 \frac{f_{up} A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} f_{yp} \frac{A_{nv}}{\gamma_{M0}} \quad (15)$$

còn không, ngược lại:

$$F_{eff,Rd} = F_{eff,1,Rd} = \frac{f_{up} A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} f_{yp} \frac{A_{nv}}{\gamma_{M0}} \quad (16)$$

với:

$p_{22} = p_2$ đối với $n_2 = 2$

$p_{22} = p_2 + p_2$ đối với $n_2 = 4$

A_{nt} - diện tích thực chịu kéo.

- đối với một dãy bu lông đứng ($n_2 = 2$):

$A_{nt} = t_p (e_2 - d_0 / 2)$

- đối với hai dãy bu lông đứng ($n_2 = 4$):

$A_{nt} = t_p (p_2 + e_2 - 3d_0 / 2)$

A_{nv} - diện tích thực chịu cắt

$A_{nv} = t_p (h_p - e_1 - (n_1 - 0,5)d_0)$

(7) Mặt bích khi uốn:

Nếu $h_p \geq 1,36p_{22}$; $V_{Rd7} = \infty$

còn không, ngược lại

$$V_{Rd7} = \frac{2W_{el} f_{yp}}{\left(\frac{p_{22} - t_w}{2} \right) \gamma_{M0}} \quad (17)$$

với

$p_{22} = p_2$ đối với $n_2 = 2$

$$p_{22} = p_{2'} + p_2 \quad \text{đối với } n_2 = 4$$

$$W_{el} = \frac{t_p h_p^2}{6}$$

(8) Bụng dầm khi cắt:

$$V_{Rd8} = t_w h_p \frac{f_{ybw}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

Độ bền cắt của nút:

$$V_{Rd} = \min_{i=1}^8 \{V_{Rdi}\}$$

Kiểu 2: Liên kết sử dụng bản ốp

Các ký hiệu dành riêng cho liên kết sử dụng bản ốp trong mục dưới đây được chỉ ra ở Hình 3.

Yêu cầu để bảo đảm phạm vi áp dụng của phương pháp, tất cả các bất đẳng thức dưới đây cần phải thỏa mãn:

- Yêu cầu bảo đảm đủ khả năng xoay

Hai bất đẳng thức dưới đây cần phải thỏa mãn:

$$1. \quad h_p \leq d_b \quad (20)$$

$$2. \quad \phi_{available} > \phi_{required} \quad (21)$$

trong đó:

Nếu

$$z > \sqrt{(z - g_h)^2 + \left(\frac{h_p}{2} + h_e\right)^2}$$

thì $\phi_{available} = \infty$

còn không, ngược lại:

$$\phi_{available} = \arcsin \left(\frac{z}{\sqrt{(z - g_h)^2 + \left(\frac{h_p}{2} + h_e\right)^2}} \right) - \arctg \left(\frac{z - g_h}{\frac{h_p}{2} + h_e} \right)$$

- Yêu cầu tránh phá hoại sớm mối hàn

Bất đẳng thức dưới đây cần thỏa mãn:

$$1. \quad a \geq \frac{\beta_w f_{yp} \gamma_{M2}}{\sqrt{2} f_{up} \gamma_{M0}} t_p \quad (22)$$

(β_w cho trong EN 1993-1-8)

Độ bền chịu lực cắt: Độ bền cắt của nút liên kết sử dụng bản ốp được xác định bởi 11 thành phần:

(1) Bu lông khi cắt:

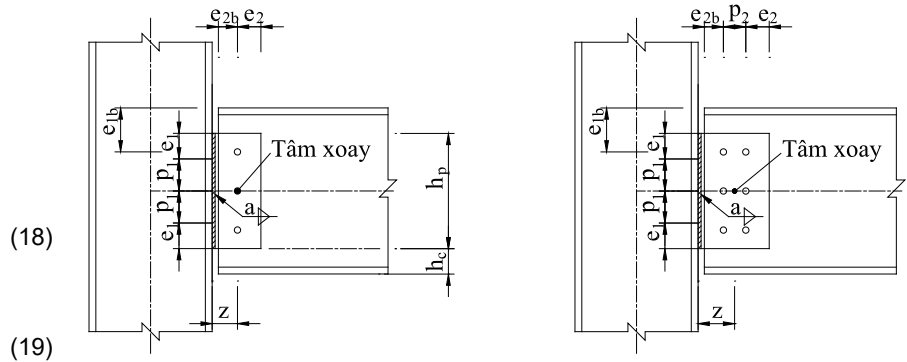
$$V_{Rd1} = \frac{n F_{v,Rd}}{\sqrt{1 + \left(\frac{6z}{(n+1)p_1}\right)^2}} \quad \text{đối với } n_2 = 1 \quad (23)$$

$$V_{Rd1} = \frac{F_{v,Rd}}{\sqrt{\left(\frac{zp_2}{2l} + \frac{1}{n}\right)^2 + \left(\frac{zp_1}{2l}(n_1 - 1)\right)^2}} \quad \text{đối với } n_2 = 2 \quad (24)$$

$$l = \frac{n_1}{2} p_2^2 + \frac{1}{6} n_1 (n_1^2 - 1) p_1^2$$

với:

trong đó:



Hình 3. Ký hiệu dành cho liên kết sử dụng bản ốp

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (25)$$

- Khi mặt phẳng cắt đi qua phần có ren của bu lông:

$A = A_s$ - diện tích chịu kéo của bu lông

$\alpha_v = 0,6$ cho bu lông lớp độ bền 4.6, 5.6 và 8.8

$\alpha_v = 0,5$ cho bu lông lớp độ bền 4.8, 5.8, 6.8 và 10.9

- Khi mặt phẳng cắt đi qua phần không có ren của bu lông:

A - diện tích tiết diện nguyên của bu lông;

$\alpha_v = 0,6$.

(2) Bản ốp khi ép mặt:

$$V_{Rd2} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{F_{b,ver,Rd}} + \alpha\right)^2 + \left(\frac{\beta}{F_{b,hor,Rd}}\right)^2}} \quad (26)$$

- Đối với $n_2 = 1$:

$$\alpha = 0, \quad \beta = \frac{6z}{p_1 n(n+1)}$$

$$\text{- Đối với } n_2 = 2: \quad \alpha = \frac{z p_2}{l} \frac{p_2}{2}, \quad \beta = \frac{z n_1 - 1}{l} \frac{p_1}{2} p_1$$

$$l = \frac{n_1}{2} p_2^2 + \frac{1}{6} n_1 (n_1^2 - 1) p_1^2$$

với

- Độ bền chịu ép mặt theo phương đứng:

$$F_{b,ver,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{up} d t_p}{\gamma_{M2}} \quad (27)$$

trong đó:

$$k_1 = \min \left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right)$$

$$\alpha_b = \min \left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right)$$

- Độ bền chịu ép mặt theo phương ngang:

$$F_{b,hor,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{up} d t_p}{\gamma_{M2}} \quad (28)$$

trong đó:

$$k_1 = \min \left(2,8 \frac{e_1}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{p_1}{d_0} - 1,7; 2,5 \right)$$

$$\alpha_b = \min \left(\frac{e_2}{3d_0}; \frac{p_2}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_{yp}}; 1,0 \right)$$

(3) Bản ốp khi cắt (tiết diện nguyên):

$$V_{Rd3} = \frac{h_p t_p f_{yp}}{1,27 \sqrt{3} \gamma_{M0}} \quad (29)$$

(4) Bản ốp khi cắt (tiết diện thực):

$$V_{Rd4} = A_{v,net} \frac{f_{up}}{\sqrt{3} \gamma_{M2}} \quad (30)$$

với $A_{v,net} = t_p (h_p - n_1 d_0)$

(5) Bản ốp khi cắt (cắt khối):

$$V_{Rd5} = F_{eff,2,Rd} \quad (31)$$

trong đó:

$$F_{eff,2,Rd} = 0,5 \frac{f_{up} A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} f_{yp} \frac{A_{nv}}{\gamma_{M0}} \quad (32)$$

A_{nt} - diện tích thực chịu kéo,

- Đối với một dây bu lông theo phương đứng ($n_2 = 1$):

$$A_{nt} = t_p (e_2 - d_0/2)$$

- Đối với hai dây bu lông theo phương đứng ($n_2 = 2$):

$$A_{nt} = t_p (p_2 + e_2 - 3d_0/2)$$

A_{nv} - diện tích thực chịu cắt: $A_{nv} = t_p (h_p - e_1 - (n_1 - 0,5)d_0)$

(6) Bản ốp khi uốn:

$$\text{Nếu } h_p \geq 2,73z: \text{ thì } V_{Rd6} = \infty \quad (33)$$

$$\text{còn không: } V_{Rd6} = \frac{W_{el} f_{yp}}{z \gamma_{M0}} \quad (34)$$

$$\text{với } W_{el} = \frac{t_p h_p^3}{6}$$

(7) Oằn của bản nổi:

Bắt nguồn từ BS 5950-1 (BSI, 2000; BCSA/SCI nhóm liên kết và cộng sự):

$$V_{Rd7} = \frac{W_{el} f_{pLT}}{z_p 0,6 \gamma_{M1}} \leq \frac{W_{el} f_{yp}}{z_p \gamma_{M0}} \text{ nếu } z_p > t_p/0,15 \quad (35)$$

$$V_{Rd7} = V_{Rd6} \text{ nếu } z_p \leq t_p/0,15 \quad (36)$$

trong đó:

$$W_{el} = \frac{t_p h_p^2}{6}$$

f_{pLT} - cường độ oằn bên kèm xoắn của tấm, xem EN 1993-1-8.

(8) Bụng dầm khi ép mặt:

$$V_{Rd8} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\frac{n}{F_{b,ver,Rd}}} + \alpha \right)^2 + \left(\frac{\beta}{F_{b,hor,Rd}} \right)^2}} \quad (37)$$

$$\text{- Đối với } n_2 = 1: \alpha = 0, \beta = \frac{6z}{p_1 n(n+1)}$$

$$\text{- Đối với } n_2 = 2: \alpha = \frac{z p_2}{l^2} \quad \beta = \frac{z n_1 - 1}{l^2} p_1$$

$$l = \frac{n_1}{2} p_2^2 + \frac{1}{6} n_1 (n_1^2 - 1) p_1^2$$

với

- Độ bền khi ép mặt theo phương đứng:

$$F_{b,ver,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{ubw} d t_{bw}}{\gamma_{M2}} \quad (38)$$

trong đó:

$$k_1 = \min \left(2,8 \frac{e_{2b}}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right)$$

$$\alpha_b = \min \left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_{ubw}}; 1,0 \right)$$

- Độ bền khi ép mặt theo phương ngang:

$$F_{b,hor,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{ubw} d t_{bw}}{\gamma_{M2}} \quad (39)$$

trong đó:

$$k_1 = \min \left(1,4 \frac{p_1}{d_0} - 1,7; 2,5 \right)$$

$$\alpha_b = \min \left(\frac{e_{2b}}{3d_0}; \frac{p_2}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_{ubw}}; 1,0 \right)$$

(9) Bụng dầm khi cắt (tiết diện nguyên):

$$V_{Rd9} = A_{b,v} \frac{f_{ybw}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \quad (40)$$

(10) Bụng dầm khi cắt (tiết diện thực):

$$V_{Rd10} = A_{b,v,net} \frac{f_{ubw}}{\sqrt{3} \gamma_{M2}} \quad (41)$$

với $A_{b,v,net} = A_{b,v} - n_1 d_0 t_{bw}$

(11) Bụng dầm khi cắt (cắt khối):

$$V_{Rd11} = F_{eff,2,Rd} \quad (42)$$

trong đó:

$$F_{eff,2,Rd} = 0,5 \frac{f_{ubw} A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} f_{ybw} \frac{A_{nv}}{\gamma_{M0}} \quad (43)$$

A_{nt} - diện tích thực chịu kéo, xác định như sau:

- Đối với một dây bu lông ($n_2 = 1$): $A_{nt} = t_{bw} (e_{2b} - d_0/2)$;

- Đối với hai hàng ngang bu lông ($n_2 = 2$):

$$A_{nt} = t_{bw} (p_2 + e_{2b} - 3d_0/2),$$

A_{nv} - diện tích thực chịu cắt, $A_{nv} = t_{bw} (e_{1b} + (n_1 - 1)p_1 - (n_1 - 0,5)d_0)$.

Độ bền khi cắt của nút:

$$V_{Rd} = \min_{i=1}^{11} \{ V_{Rdi} \} \quad (44)$$

b) Yêu cầu cho phép phân bố lại nội lực do dèo tiết diện

Tất cả các bất phương trình sau cần phải thỏa mãn:

$$1. V_{Rd} < \min\{V_{Rd1}; V_{Rd7}\}$$

$$2. \text{ Đối với } n_2 = 1.$$

- Với bản bụng dầm $F_{b,hor,Rd} \leq \min\{F_{v,Rd}; V_{Rd7}\beta\}$, hoặc

- Với bản ốp $F_{b,hor,Rd} \leq \min\{F_{v,Rd}; V_{Rd7}\beta\}$

Đối với $n_2 = 2$:

- Với bụng dầm:

$$\max\left(\frac{1}{F_{v,Rd}^2}(\alpha^2 + \beta^2); \frac{1}{V_{Rd7}^2}\right) \leq \left(\frac{\alpha}{F_{b,ver,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\beta}{F_{b,hor,Rd}}\right)^2$$

hoặc

- Với tấm gối:

$$\max\left(\frac{1}{F_{v,Rd}^2}(\alpha^2 + \beta^2); \frac{1}{V_{Rd7}^2}\right) \leq \left(\frac{\alpha}{F_{b,ver,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\beta}{F_{b,hor,Rd}}\right)^2$$

hoặc

$$V_{Rd6} \leq \min\left(\frac{2}{3\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}F_{v,Rd}; \frac{2}{3}V_{Rd7}\right)$$

3. Hơn nữa, nếu $V_{Rd} = V_{Rd3}, V_{Rd4}, V_{Rd5}, V_{Rd6}, V_{Rd9}, V_{Rd10}$ hoặc V_{Rd11} bất phương trình sau cần được kiểm tra:

$$V_{Rd1} > \min\{V_{Rd2}; V_{Rd8}\}.$$

3. Ví dụ tính toán

Ví dụ 1. Liên kết xà ngang vào cột bằng mặt bích ngắn

Thiết kế mặt bích ngắn liên kết đối đầu các dầm phụ IPE bằng bu lông M16, lớp độ bền 4.6 (Hình 4). Lực cắt thẳng đứng ở đầu dầm, $V_{Ed} = 100$ kN. Dầm phụ được liên kết vào bản bụng cột tiết diện HEB260, loại thép S235.

Độ bền chịu cắt của bản bụng dầm quyết định đến khả năng chịu lực của liên kết. Kiểm tra độ bền chịu cắt của bản bụng dầm khi truyền lực cắt cho bản đầu dầm:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{6,2 \times 130 \times 235}{\sqrt{3} \times 1,0} \times 10^{-3}$$

$$= 109,4 \text{ kN} > V_{Ed}$$

trong đó:

A_v – diện tích tiết diện phần bản bụng dầm liên kết với mặt bích (chiều dày bản bụng dầm $t_w = 6,2$ mm, $L_{pl} = 130$ mm);

γ_{M0} – hệ số riêng của liên kết hàn, $\gamma_{M0} = 1,0$.

Độ bền chịu cắt của dầm thỏa mãn yêu cầu.

Độ bền thiết kế của một bu lông khi chịu cắt (M16, lớp độ bền 4.6) theo công thức:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v A_s f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \times 157 \times 400}{1,25} \times 10^{-3}$$

$$= 30,1 \text{ kN}$$

trong đó:

A_s – diện tích tiết diện chịu cắt của mặt bích (chiều dày mặt bích 8 mm);

γ_{M2} – hệ số riêng của liên kết bu lông, $\gamma_{M2} = 1,25$.

Độ bền của 4 bu lông là:

$$4F_{v,Rd} = 4 \times 30,1 = 120,4 \text{ kN} > 100 \text{ kN} = V_{Ed}.$$

Bu lông thỏa mãn điều kiện chịu lực cắt.

Độ bền thiết kế chịu ép mặt của 4 bu lông, theo công thức với chiều dày bản bụng cột $t = 10,0$ mm có tính quyết định:

$$\alpha_b = \min\left\{\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - 0,25; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0\right\}$$

$$= \min\left\{\frac{35}{3 \times 18}; \frac{60}{3 \times 18} - 0,25; \frac{400}{360}; 1,0\right\}$$

$$= \min\{0,648; 0,861; 1,11; 1,0\} = 0,648$$

$$k_1 = \min\left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right) =$$

$$= \min\left(2,8 \times \frac{25}{18} - 1,7; 1,4 \times \frac{80}{18} - 1,7; 2,5\right)$$

$$= \min(2,188; 4,522; 2,5) = 2,188$$

$$F_{b,Rd} = 4 \frac{k_1 \alpha_b d t f_u}{\gamma_{M2}} = 4 \frac{2,188 \times 0,648 \times 16 \times 10 \times 360}{1,25}$$

$$= 261333 \text{ N} = 261,3 \text{ kN} > 200 \text{ kN} = 2 \times 100 = 2 \times V_{Ed}$$

Bu lông thỏa mãn điều kiện chịu ép mặt.

Độ bền của mối hàn góc liên kết bụng dầm với mặt bích có chiều cao mối hàn 5 mm, và chiều dài mối hàn 130 mm là:

$$F_{w,Rd} = \frac{a l f_u}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{M2}} = \frac{2 \times 5 \times 130 \times 360}{\sqrt{3} \times 0,8 \times 1,25} \times 10^{-3}$$

$$= 270,2 \text{ kN} > 100 \text{ kN}$$

Liên kết hàn được thiết kế thỏa mãn về độ bền.

Ví dụ 2. Liên kết xà ngang vào cột ở bên cạnh cột

Kiểm tra độ bền của liên kết xà ngang vào cột khung bằng bản ốp có sơ đồ liên kết khớp (Hình 5). Liên kết truyền lực cắt $V_{Ed} = 90$ kN. Loại thép S235, bu lông M20 lớp độ bền 5.6 có ren dọc theo toàn bộ chiều dài bu lông.

Độ bền thiết kế của một bu lông chịu cắt (tính cho tiết diện có ren):

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v A_s f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \times 245 \times 500}{1,25} \times 10^{-3} = 58,8 \text{ kN}$$

Độ bền của một bu lông chịu ép mặt do bản ốp (the fin plate), phụ thuộc vào khoảng cách của các bu lông. Hệ số k_1 và α_b :

$$k_1 = \min\left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right) = \min\left(2,8 \times \frac{40}{22} - 1,7; 2,5\right)$$

$$= \min(3,4; 2,5) = 2,5$$

$$\alpha_b = \min\left\{\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - 0,25; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1\right\}$$

$$= \min\left\{\frac{40}{3 \times 22}; \frac{60}{3 \times 22} - 0,25; \frac{500}{360}; 1,000\right\}$$

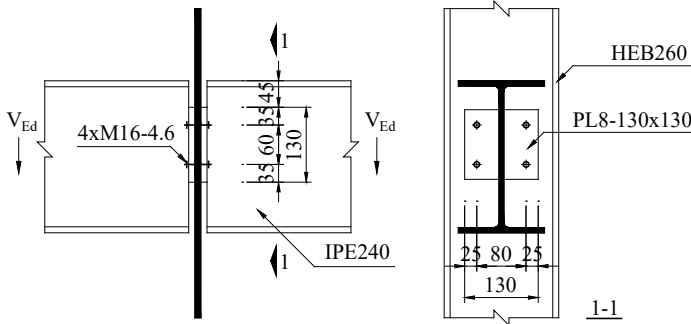
$$= \min\{0,606; 0,659; 1,389; 1,000\} = 0,606$$

Độ bền thiết kế của một bu lông chịu ép mặt:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b d t f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \times 0,606 \times 20 \times 10 \times 360}{1,25} \times 10^{-3}$$

$$= 87,3 \text{ kN}$$

Độ bền thiết kế của bu lông chịu ép mặt do bản bụng dầm, được xác định tương tự (hệ số k_1 lấy như trên):



Hình 4. Liên kết dầm phụ IPE bằng mặt bích ngắn và bu lông

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - 0,25; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right\}$$

$$= \min \left\{ \frac{65}{3 \times 22}; \frac{60}{3 \times 22} - 0,25; \frac{500}{360}; 1 \right\}$$

$$= \min \{0,985; 0,659; 1,389; 1\} = 0,659$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b d f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$= \frac{2,5 \times 0,659 \times 20 \times 5,6 \times 360}{1,25} \times 10^{-3} = 53,1 \text{ kN}$$

Như vậy, độ bền của liên kết với hai bu lông là:

$$V_{Rd} = 2 \min \{F_{v,Rd}; F_{b,Rd}\} = 2 \times \min \{58,8; 87,3; 53,1\} = 106,2 \text{ kN}$$

$> 90 \text{ kN} = V_{Ed}$.

Độ bền của liên kết bu lông được thỏa mãn.

Xuất hiện mô men uốn trong mỗi hàn do ảnh hưởng lực cắt tác dụng lệch tâm:

$$M_{Ed} = V_{Ed} e = 90 \times 0,05 = 4,5 \text{ kN.m.}$$

Mô men này gây ra ứng suất σ_w tác dụng trong mặt phẳng bản ốp:

$$\sigma_w = \frac{M_{Ed}}{W_{el,w}} = \frac{M_{Ed}}{2aL_w/6} = \frac{4,5 \times 10^6}{2 \times 4 \times 140^2 / 6}$$

$$= 172,2 \text{ MPa}$$

Ứng suất này được chuyển thành ứng suất tác dụng trong tiết diện tới hạn của mỗi hàn:

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{172,2}{\sqrt{2}} = 121,8 \text{ MPa}$$

Lực cắt gây ra ứng suất tiếp song song với trục mỗi hàn:

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{2aL_w} = \frac{90 \times 10^3}{2 \times 4 \times 140} = 80,4 \text{ MPa}$$

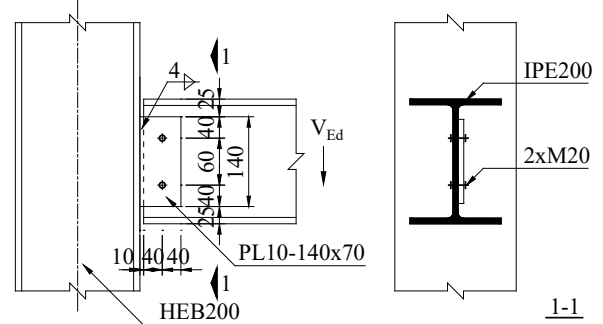
Độ bền thiết kế của mối hàn góc là đủ, nếu thỏa mãn điều kiện:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{121,8^2 + 3 \times (121,8^2 + 80,4^2)}$$

$$= 280,5 \text{ MPa} < 360,0 \text{ MPa} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0,8 \times 1,25}$$

$$\sigma_{\perp} = 121,8 \text{ MPa} < \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{360}{1,25} = 288 \text{ MPa}$$

Mỗi hàn liên kết bản ốp với cánh cột thỏa mãn yêu cầu chịu lực.



Hình 5. Liên kết xà ngang vào cột khung bằng bản ốp

Độ bền chống lại sự phá hoại trượt của bản gối là tổng độ bền của tiết diện tới hạn khi chịu kéo và cắt (Hình 6a).

$$V_{eff2,Rd} = \frac{0,5 A_{nt} f_u}{\gamma_{M2}} + \frac{A_{nv} f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \geq V_{Ed}$$

trong đó: A_{nt} - diện tích thực của tiết diện chịu lực kéo;

A_{nv} - diện tích thực của tiết diện chịu cắt:

$$A_{nt} = 10 \times \left(40 - \frac{22}{2} \right) = 290 \text{ mm}^2$$

$$A_{nv} = 10 \times \left(40 + 60 - 22 - \frac{22}{2} \right) = 670 \text{ mm}^2$$

Độ bền chống lại sự phá hoại của cắt khối (phá hoại do ép mặt) của bản ốp (the design block tearing resistance):

$$V_{eff2,Rd} = \frac{0,5 \times 290 \times 360}{1,25 \times 10^3} + \frac{670 \times 235}{\sqrt{3} \times 1,0 \times 10^3}$$

$$= 132,7 \text{ kN} > V_{Ed}$$

→ Thỏa mãn.

Độ bền chịu cắt của tiết diện nguyên:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{10 \times 140 \times 235}{\sqrt{3} \times 1,0 \times 10^3}$$

$$= 189,9 \text{ kN} > 90 \text{ kN} = V_{Ed}$$

→ Thỏa mãn.

Độ bền chịu cắt của bản bụng dầm được xác định tương tự như độ bền của bản ốp, diện tích của tiết diện tới hạn như ở Hình 6b:

$$A_{nt} = 5,6 \times \left(40 - \frac{22}{2} \right) = 162,4 \text{ mm}^2$$

$$A_{nv} = 5,6 \times \left(25 + 40 + 60 - 22 - \frac{22}{2} \right) = 515,2 \text{ mm}^2$$

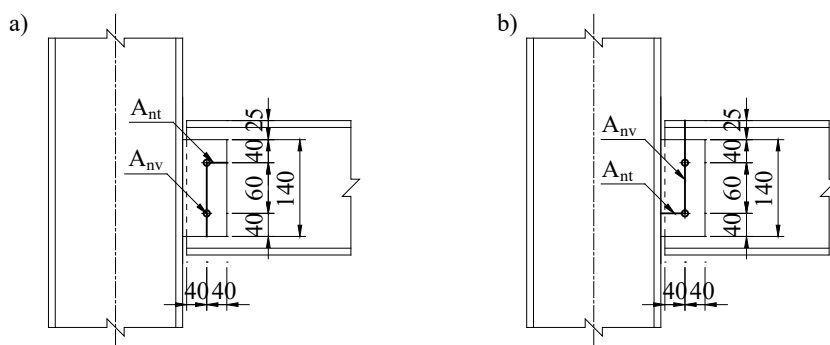
Độ bền chịu cắt của bản bụng:

$$V_{eff2,Rd} = \frac{0,5 \times 162,4 \times 360}{1,25 \times 10^3} + \frac{515,2 \times 235}{\sqrt{3} \times 1,0 \times 10^3}$$

$$= 93,3 \text{ kN} > V_{Ed}$$

→ Thỏa mãn

Độ bền chịu uốn được kiểm tra cho tiết diện ngang thuộc lớp 3:



Hình 6. Tiết diện tối hạn của bản ốp (a) và dầm (b)

$$M_{el,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{10 \times 140^2}{6} \times 235$$

$$= 7,7 \text{ kNm} > 4,5 \text{ kNm} = M_{Ed}$$

→ Thỏa mãn.

3. Kết luận và kiến nghị

Qua nội dung trình bày ở trên, bài báo đã đạt được một số kết quả chính như sau:

- Đã trình bày cách tính toán liên kết dầm – cột theo mô hình liên kết khớp, sử dụng phương pháp thành phần có trong tiêu chuẩn châu Âu EN 1993-1-8. Đã bổ sung một số quy định có trong một số tài liệu khác về phạm vi áp dụng các công thức ở trong tiêu chuẩn đối với kiểu liên kết như đã nêu.

- Đã làm rõ cách tính toán, qua đó có thể bổ sung vào các tài liệu hiện có ở trong nước một phương pháp tính hiện đại, mà chúng được áp dụng ở nhiều nước châu Âu, và một số nước châu Á khác như Singapore, Malaysia. Cũng giúp các kỹ sư trong nước vận dụng trong thực tế khi thiết kế kết cấu thép trong giai đoạn hội nhập quốc tế./.

Tài liệu tham khảo

1. Phạm Văn Hội, Nguyễn Quang Viên và nnk (2003), “Kết cấu thép – Công trình dân dụng và công nghiệp”, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
2. Đoàn Đình Kiên (2004), Thiết kế kết cấu thép theo tiêu chuẩn Anh BS 5950. Part 1:2000, Nhà xuất bản Xây dựng.
3. Wald F., Macháček J., Vraný T., Sokol Z. a Dolejš J. (2012), Thiết kế kết cấu thép theo tiêu chuẩn EN 1993-1-1 và EN 1993-1-8. Biên dịch: Giang Bergero và Nguyễn. Praha, František Wald.
4. Designers' Guide to Eurocode 3: Design of Steel Buildings, 2nd edition, National Annex for EN 1993-1-1 (UK NA to BS EN 1993-1-1).
5. Veljkovic Milan, Simões Da Vilva Luís, Simões Rui, (2015), Eurocodes: Background & Applications. Design of Steel Building. Worked examples, JRC Scientific and Policy Report, Publications Office of the European Union.
6. Claudio Bernuzzi, Benedetto Cordova (2016), Structural Steel Design to Eurocode 3 and AISC Specifications, Wiley-Blackwell.
7. Luís Simões da Silva, Rui A. D. Simões Helena Gervásio (2010), Design of Steel Structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, Ernst & Sohn; 1 edition (June 14, 2010).
8. Dan Dubina, Raffaele Landolfo, Viorel Ungureanu (2012), Design of Cold-formed Steel Structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-3: Design of cold-formed Steel Structures. European Convention for Constructional Steelwork (Editor).
9. Ioannis Vayas, John Ermopoulos George Ioannidis (2019), Design of Steel Structures to Eurocodes, Springer Tracts in Civil Engineering, Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland
10. Jean-Pierre Jaspart, Klaus Weynand (2016), Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-8 – Design of Joints in steel and composite structures. ECCS – European Convention for Constructional Steelwork.
11. Martin L.H., Purkiss J.A. (2008), Structural Design of Steelwork to EN 1993 and EN 1994, Elsevier's Science & Technology Rights Department in Oxford, UK.
12. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: Design of Steel Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings.
13. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints
14. (ČSN EN 1993-1-1, 2006) ČSN EN 1993-1-1: Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.1, General rules and rules for buildings, in Czech, ČNI, Prague, 2006, 98 p.
15. СП 16.13330.2017 (2017) “Стальные конструкции”, Актуализированная редакция СНиП II-23-81*, Москва.
16. СП 294.1325800.2017 (2017). Свод правил. Конструкции стальные. Правила проектирования. Москва.
17. Л. Гарднер, Д.А. Нетеркот (2013), Руководство для проектировщиков к Еврокоду 3: Проектирование стальных конструкций EN 1993-1-1, 1993-1-3, 1993-1-8. Московский государственный строительный университет - МГСУ.