



TÍNH TOÁN KẾT CẤU HỢP KIM NHÔM THEO EUROCODE 9

Nguyễn Ngọc Linh¹

Tóm tắt: Bài báo trình bày một số đặc trưng cơ bản của vật liệu hợp kim nhôm và của tiết diện cấu kiện hợp kim nhôm, trình bày lý thuyết tính toán, kiểm tra khả năng chịu lực của cấu kiện hợp kim nhôm theo tiêu chuẩn Eurocode 9, làm việc chịu kéo, nén và uốn.

Từ khóa: Hợp kim nhôm; mất ổn định cục bộ; ảnh hưởng nhiệt (HAZ).

Summary: This paper presents basic characteristics of aluminium, as well as cross-section of aluminium member. The theory of determining the strength of aluminium member following EC9, in case of tension, compression and bending is also mentioned.

Keywords: Aluminium alloys; local buckling; heat affected zone (HAZ).

Nhận ngày 9/9/2014, chỉnh sửa ngày 26/9/2014, chấp nhận đăng 31/12/2014



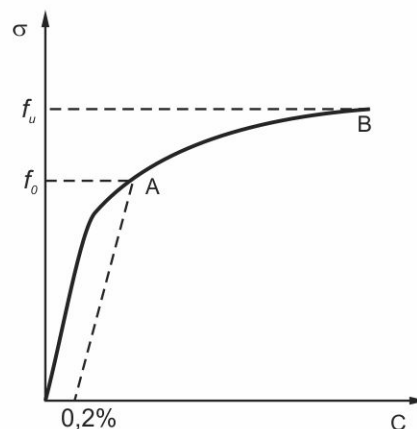
1. Đặt vấn đề

Ở Việt Nam, việc ứng dụng kết cấu chịu lực từ hợp kim nhôm còn khá hạn chế, chủ yếu chỉ sử dụng cho các dạng kết cấu bao che và nội thất công trình. Ở nhiều nước trên thế giới, hợp kim nhôm còn được sử dụng làm kết cấu chịu lực chính cho các công trình. Ví dụ cho kết cấu mái nhà nhịp lớn, giàn mái các công trình thể thao, công trình công cộng hoặc các công trình cầu... Bên cạnh đó, các nước châu Âu, Anh, Mỹ, Nga... đã ban hành các tiêu chuẩn và nhiều tài liệu nghiên cứu lý thuyết tính toán kết cấu hợp kim nhôm, điển hình như Cộng hòa Liên bang Nga [3], Anh [4], Châu Âu đã ban hành bộ Eurocodes, trong đó Eurocode 9 (EC9) về thiết kế kết cấu hợp kim nhôm [1]. Việt Nam mới bắt đầu tiếp cận và hiện tại chưa có tiêu chuẩn tính toán và còn ít các nghiên cứu về kết cấu từ hợp kim nhôm. Bài báo trình bày tóm tắt kết quả nghiên cứu của tác giả về các đặc trưng cơ bản của vật liệu và việc tính toán, kiểm tra cấu kiện từ hợp kim nhôm dựa trên tiêu chuẩn EC9.



2. Sự làm việc và các đặc trưng cơ bản của vật liệu và tiết diện kết cấu hợp kim nhôm (HKN) [2]

Trong đó: f_0 , f_u là giới hạn chảy và giới hạn bền; Mô đun đàn hồi: $E = 70000 \text{ N/mm}^2$, ở 100°C : $E_{100} = 67000 \text{ N/mm}^2$, ở 200°C : $E_{200} = 59000 \text{ N/mm}^2$; Hệ số giãn nở nhiệt: $\alpha = 23 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; Khối lượng riêng: $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$.

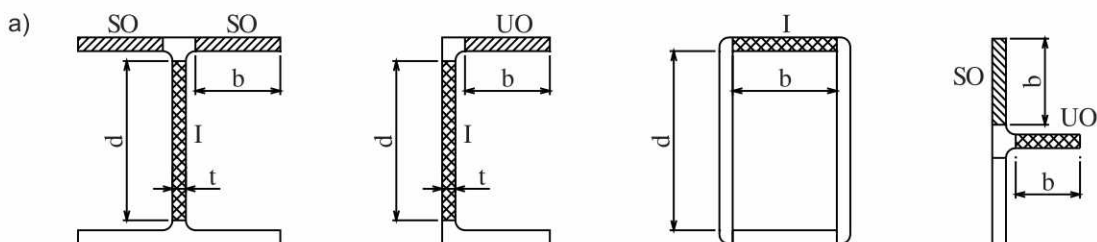


Hình 1. Biểu đồ ứng suất, biến dạng khi kéo của HKN

¹ TS, Khoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp. Trường Đại học Xây dựng. Email: ngoclinh2508@yahoo.com

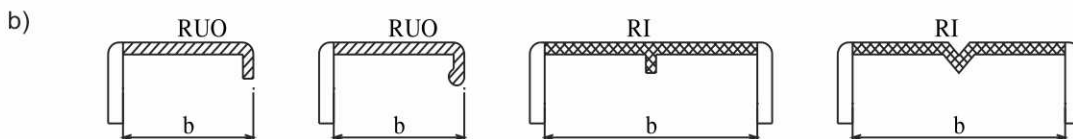
Theo EC9 kết cấu HKN được phân ra 4 loại tiết diện và được định nghĩa như sau: Tiết diện loại 1 là tiết diện có khả năng phát triển mômen bền dẻo và có khả năng xoay đủ để hình thành khớp dẻo. Tiết diện loại 2 là tiết diện có khả năng phát triển mômen bền dẻo, nhưng khả năng xoay bị hạn chế. Tiết diện loại 3 là tiết diện mà ứng suất tính toán ở thớ nén ngoài cùng có thể đạt đến ứng suất giới hạn nhưng chưa bị mất ổn định cục bộ, không phát triển mômen dẻo trên toàn bộ tiết diện. Tiết diện loại 4 là tiết diện mà mất ổn định cục bộ có thể xảy ra ở một hay nhiều vị trí trên tiết diện, ứng suất của tiết diện vẫn chưa đạt tới giới hạn đàn hồi.

Với mỗi loại tiết diện được gia cường và không được gia cường, thì phân loại theo thông số độ mảnh β như sau: Với tiết diện không gia cường, khi các phần tử trong không có sự biến thiên ứng suất hoặc các phần tử ngoài không có sự biến thiên ứng suất hay có bước nhảy của ứng suất nén tại đầu mút thì $\beta = b/t$. Trường hợp khi các phần tử trong có trục trung hòa đi qua trọng tâm tiết diện, hệ số $\beta = 0,4 b/t$. Đối các trường hợp có sự phân bố ứng suất khác, hệ số $\beta = g \times b/t$, đại lượng b, t là kích thước chiều rộng và chiều dày của các phần tử tiết diện, g hệ số phân bố ứng suất.



Hình 2. Tiết diện không được gia cường với I - phần tử trong; O - phần tử ngoài SO - phần tử ngoài đối xứng; UO - phần tử ngoài không đối xứng

Với tiết diện gia cường có thể có ba dạng mất ổn định. Dạng 1 là mất ổn định xoắn uốn cục bộ, tức là các thành mỏng của cấu kiện mất ổn định sẽ kéo theo phần sườn gia cường mất ổn định theo cùng độ cong với thành mỏng đó. Dạng 2 là mất ổn định cục bộ của thành mỏng, tức là các thành mỏng và các sườn gia cường sẽ mất ổn định riêng rẽ nhưng giao tuyến giữa chúng không bị ảnh hưởng. Dạng 3 là tổ hợp của mất ổn định dạng 1 và dạng 2

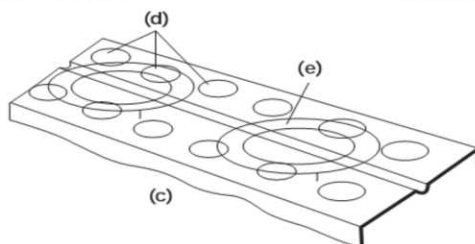


Hình 3. Tiết diện được gia cường cho phần tử trong RI và phần tử ngoài RUO



Dạng mất ổn định 1

Dạng mất ổn định 2



Dạng mất ổn định 3

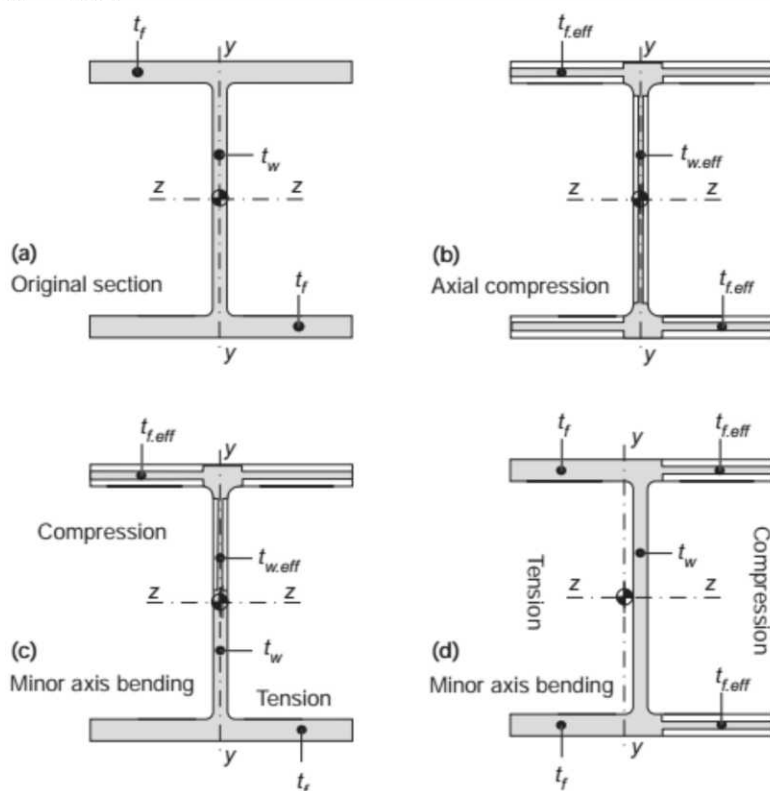
Hình 4. Các dạng mất ổn định của tiết diện được gia cường
d- mất ổn định cục bộ; e- mất ổn định toàn phần tử được gia cường

Thông số độ mảnh β đối với mắt ổn định dạng 1. Trường hợp ứng suất nén phân bố đều, tiết diện được gia cường bằng sườn đơn có cùng chiều dày ở thành hoặc mép cấu kiện, thông số độ mảnh β được tính theo công thức $\beta = \eta \times b/t$ (4), trong đó η phụ thuộc bề rộng sườn gia cường cũng như kích thước bề rộng và chiều dày thành cấu kiện. Với những trường hợp gia cường khác, không có sự chênh lệch ứng suất, giá trị β được tính theo công thức $\beta = (b/t)(\sigma_{cro}/\sigma_{cr})^{0.4}$ với σ_{cr} là ứng suất tới hạn của phần tử được gia cường; σ_{cro} là ứng suất tới hạn của phần tử không được gia cường. Thông số độ mảnh β đối với mắt ổn định dạng 2 được xác định bằng các công thức trên tính riêng cho từng phần tử của tiết diện.

Sau khi xác định thông số độ mảnh β , các tiết diện HKN được phân loại theo giá trị độ mảnh β . Đối với phần tử dầm khi $\beta \leq \beta_1$ được xem là tiết diện loại 1; $\beta_1 < \beta \leq \beta_2$ được xem là tiết diện loại 2; $\beta_2 < \beta \leq \beta_3$ được xem là tiết diện loại 3; $\beta_3 < \beta$ là tiết diện loại 4. Đối với phần tử cột khi $\beta \leq \beta_2$ được xem là tiết diện loại 1 hoặc 2; $\beta_2 < \beta \leq \beta_3$ được xem là tiết diện loại 3, khi $\beta_3 < \beta$ là tiết diện loại 4. Giá trị của các hệ số $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ phụ thuộc lớp độ bền HKN, phương pháp hàn và cường độ vật liệu, được xác định bằng cách tra theo bảng 6.2 [1].

Khả năng mất ổn định cục bộ thông thường xảy ra đối với cấu kiện có tiết diện thuộc loại 4 có độ mảnh lớn. Trường hợp này cấu kiện được tính toán và kiểm tra khả năng chịu lực với tiết diện hiệu quả. Đặc trưng cho loại tiết diện mảnh (tiết diện 4), xác định theo hệ số ρ_c . Tham số C_1, C_2 được xác định bằng cách tra theo bảng 6.3 [1].

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{C_2}{(\beta/\varepsilon)^2} \quad (1)$$



Hình 5. Tiết diện hiệu quả của tiết diện loại 4 trong các trường hợp chịu nén và uốn
a) tiết diện nguyên; b) nén dọc trục; c) uốn theo phương trục z; d) uốn theo phương trục y

Chiều dày hiệu quả bản cánh được xác định bằng công thức

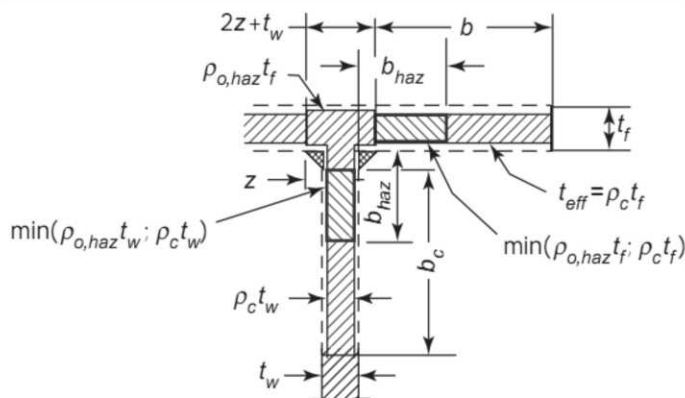
$$t_{eff} = t \times \rho_c \quad (2)$$

Một đặc điểm của hợp kim nhôm có ảnh hưởng tới khả năng chịu lực của chúng là trong quá trình hàn, lượng nhiệt sinh ra làm thay đổi các đặc tính cơ học của vật liệu ở các vùng lân cận đường hàn, được gọi là vùng ảnh hưởng của nhiệt và kí hiệu là HAZ. Sự giảm cường độ vật liệu trên tiết diện trong vùng HAZ

của cấu kiện xác định bằng hệ số giảm $\rho_{o,haz}$ và $\rho_{u,haz}$ tương ứng khi tính toán cấu kiện theo giới hạn chảy và giới hạn bền, được xác định theo công thức sau:

$$\rho_{o,haz} = f_{o,haz} / f_o \text{ và } \rho_{u,haz} = f_{u,haz} / f_u \quad (3)$$

Các giá trị $\rho_{o,haz}$; $\rho_{u,haz}$; $f_{o,haz}$; $f_{u,haz}$ được xác định bằng cách tra bảng theo EC9



Hình 6. Xác định tiết diện hiệu quả có kể đến HAZ tiết diện loại 4

Trong đó: b_c là bề rộng mắt ổn định; t là kích thước phần tiết diện; t_{eff} là chiều dày hiệu quả phần tiết diện; t_f là chiều dày cánh; t_w là chiều dày bụng; ρ_c là hệ số giảm mắt ổn định cục bộ; và $\rho_{o,haz}$ là hệ số giảm do HAZ.



3. Tính toán cấu kiện cơ bản

3.1 Cấu kiện chịu kéo đúng tâm

Được thiết kế sao cho khả năng chịu kéo $N_{t,Rd}$ luôn lớn hơn hoặc bằng lực kéo tác dụng N_{Ed} .

$$N_{Ed} / N_{t,Rd} \leq 1,0 \quad (4)$$

Khả năng chịu kéo $N_{t,Rd}$ được lấy là giá trị nhỏ nhất trong các giá trị sau:

- Khả năng chịu lực tới giới hạn chảy của vật liệu hợp kim nhôm:

$$N_{o,Rd} = A_g \times f_o / \gamma_{M1} \quad (5)$$

- Khả năng chịu lực tại vị trí có lỗ trên tiết diện:

$$N_{u,Rd} = 0,9 \times A_{net} \times f_u / \gamma_{M2} \quad (6)$$

- Khả năng chịu lực tại vị trí có HAZ trên tiết diện:

$$N_{u,Rd} = A_{eff} \times f_u / \gamma_{M2} \quad (7)$$

Trong các công thức trên A_g là diện tích tiết diện nguyên; A_{eff} là diện tích tiết diện hiệu quả kể tới ảnh hưởng vùng HAZ; A_{net} là diện tích tiết diện thực đã trừ đi các phần bị giảm yếu do có lỗ trên tiết diện; γ_{M1} , γ_{M2} là các hệ số an toàn vật liệu khi tính toán theo các trạng thái giới hạn chảy và giới hạn bền.

3.2 Cấu kiện chịu nén

Được tính theo trạng thái giới hạn bền, khi thiết kế cấu kiện chịu nén thì lực nén tác dụng luôn phải nhỏ hơn hoặc bằng khả năng chịu lực nén thiết kế.

$$N_{Ed} / N_{c,Rd} \leq 1,0 \quad (8)$$

Trong công thức trên N_{Ed} là lực nén tính toán và $N_{c,Rd}$ là khả năng chịu nén thiết kế, $N_{c,Rd}$ được lấy là giá trị nhỏ hơn trong hai giá trị sau:

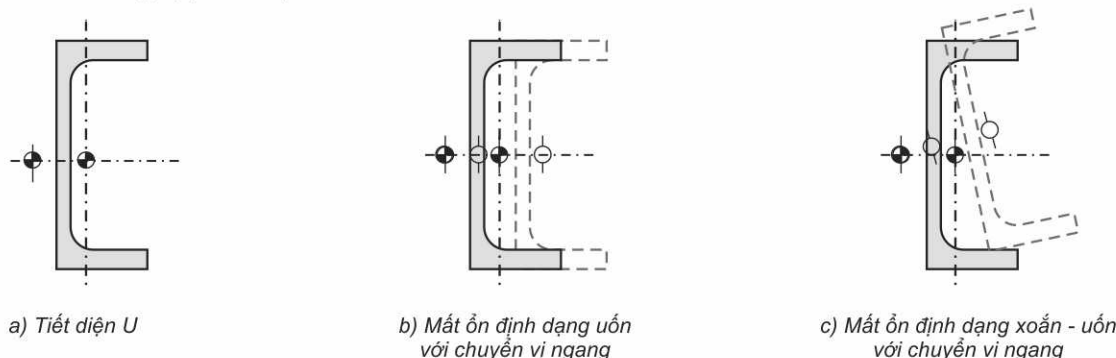
$$N_{u,Rd} = A_{net} \times f_u / \gamma_{M2}; \quad N_{c,Rd} = A_{eff} \times f_o / \gamma_{M1} \quad (9)$$

trong đó: A_{net} - diện tích còn lại của tiết diện sau khi đã trừ phần bị giảm yếu do khoét lỗ; A_{eff} - diện tích hữu dụng của tiết diện kể tới sự giảm chiều dày tiết diện do ảnh hưởng do nhiệt ở vùng HAZ và do mất ổn định cục bộ.

Với các cấu kiện chịu làm việc chịu nén, khả năng phá hoại có thể xảy ra do mất ổn định tổng thể, trong đó xét tới với các trường hợp như mất ổn định dạng uốn cong hay mất ổn định dạng xoắn hoặc xoắn uốn đồng thời. Do vậy, để đảm bảo khả năng chịu lực các cấu kiện làm việc chịu nén cần kiểm tra theo các điều kiện trên.

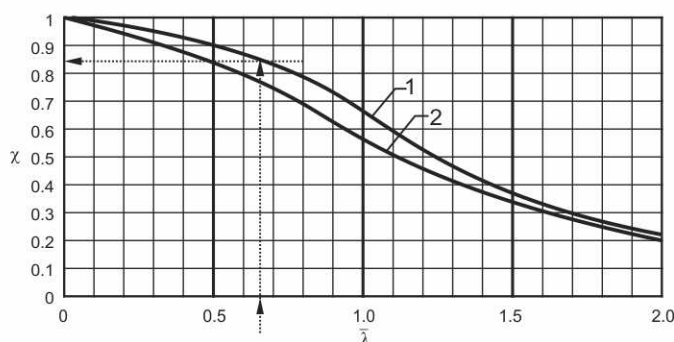
$$N_{Ed}/N_{b,Rd} \leq 1,0 \quad (10)$$

trong đó: N_{Ed} - lực nén tính toán; $N_{b,Rd}$ - khả năng chống mất ổn định của cấu kiện chịu nén được xác định theo các trường hợp sau đây:



Hình 7. Mất ổn định dạng xoắn - uốn của các cấu kiện chịu nén

Mất ổn định dạng uốn xảy ra với cấu kiện có độ mảnh lớn, khả năng mất ổn định được xét bởi hai yếu tố χ là hệ số uốn dọc và κ là hệ số suy giảm do ảnh hưởng của hàn nếu có. Hệ số χ phụ thuộc độ bền của HKN và độ mảnh qui đổi $\bar{\lambda}$. κ hệ số suy giảm do ảnh hưởng của nhiệt độ hàn, phụ thuộc lớp độ bền HKN, diện tích hữu hiệu A_{eff} và độ mảnh qui đổi $\bar{\lambda}$. Hệ số uốn dọc χ được xác định theo đường cong trên biểu đồ tương quan giữa χ và $\bar{\lambda}$ (Hình 8)



Hình 8. Biểu đồ xác định hệ số giảm χ do mất ổn định dạng uốn
1- Hợp kim nhôm, dạng mất ổn định A 2- Hợp kim nhôm, dạng mất ổn định B

Độ mảnh qui đổi $\bar{\lambda}$ xác định theo công thức sau:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{ff} \times f_0}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i \times \pi} \sqrt{\frac{A_{ff} \times f_0}{A_g \times E}} \quad (11)$$

trong đó: L_{cr} - chiều dài tính toán; i - bán kính quán tính tiết diện; A_{ff} - diện tích hữu hiệu; A_g - diện tích tiết diện; E - mô đun đàn hồi

Hệ số uốn dọc χ có thể được xác định bằng các công thức sau:

$$\chi = 1 / \left(\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2} \right) \quad (12)$$

$$\phi = 0.5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (13)$$

trong đó: α - hệ số không hoàn chỉnh, tra theo bảng 6.6 [1]; $\bar{\lambda}_0$ - Độ mảnh qui đổi giới hạn theo mặt phẳng ngang.

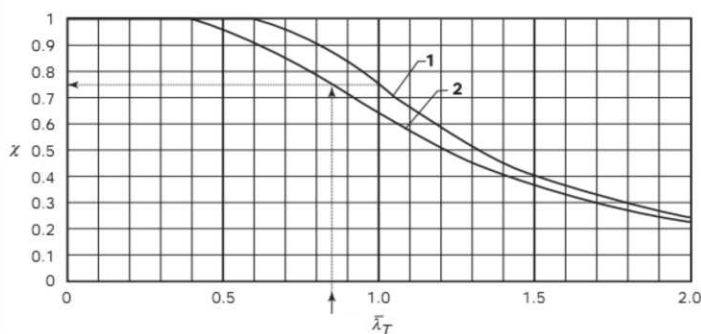
Khả năng mất ổn định uốn cong của cấu kiện chịu nén xác định theo công thức:

$$N_{b,f,Rd} = \kappa \times \chi \times A_{eff} \times f_o / \gamma_{M1} \quad (14)$$

Mất ổn định dạng xoắn và xoắn uốn đồng thời thường xảy ra với cấu kiện có tiết diện hở, có một hoặc không có trục đối xứng.

$$N_{b,t,Rd} = \kappa \times \chi \times A_{eff} \times f_o / g_{M1} \quad (15)$$

Khả năng chống mất ổn định dạng xoắn và dạng uốn - xoắn được tính toán như mất ổn định dạng uốn, tuy nhiên hệ số uốn dọc χ được xác định theo đường cong dưới đây. κ - hệ số giảm do ảnh hưởng hàn, phụ thuộc lớp độ bền HKN, tiết diện hữu dụng A_{eff} và độ mảnh qui đổi $\bar{\lambda}_T$.



1 - Tiết diện có phần tử ngoài ; 2 - Tiết diện thông thường

Hình 9. Biểu đồ xác định hệ số uốn dọc χ do mất ổn định dạng xoắn - uốn

3.3 Cấu kiện chịu uốn

Được tính toán theo trạng thái giới hạn về cường độ theo công thức sau:

$$M_{Ed} / M_{Rd} \leq 1,0 \quad (16)$$

trong đó: M_{Ed} - giá trị mômen uốn tính toán tác dụng; M_{Rd} - khả năng chịu uốn của cấu kiện.

Trong trường hợp không kể đến tác dụng của lực cắt, khả năng chịu uốn khi xét đến những vị trí bị giảm yếu do khoét lỗ trên cấu kiện $M_{u,Rd}$ hoặc do ảnh hưởng của hàn HAZ và/hoặc mất ổn định cục bộ. Khả năng chịu uốn của cấu kiện M_{Rd} được lấy là giá trị bé hơn của khả năng chịu uốn $M_{u,Rd}$ và $M_{c,Rd}$.

$$M_{u,Rd} = W_{net} \times f_u / \gamma_{M2} ; \quad M_{c,Rd} = \alpha \times W_{el} \times f_o / \gamma_{M1} \quad (17)$$

trong đó: α - hệ số hình dạng phụ thuộc loại tiết diện và phương pháp hàn, xác định bằng cách tra bảng 1; W_{net} là mômen kháng uốn đàn hồi của tiết diện bị giảm yếu (Hình 5) và W_{el} tương tự với tiết diện nguyên.

Bảng 1. Hệ số hình dạng α

Loại tiết diện	Không hàn	Hàn
1	W_{pl} / W_{el}	$W_{pl,haz} / W_{el}$
2	W_{pl} / W_{el}	$W_{pl,haz} / W_{el}$
3	$\alpha_{3,u}$	$\alpha_{3,w}$
4	W_{eff} / W_{el}	$W_{eff,haz} / W_{el}$

trong đó: W_{pl} - Mômen kháng uốn dẻo tiết diện nguyên; W_{eff} - Mômen kháng uốn đàn hồi của tiết diện hiệu quả đối với tiết diện loại 4. $W_{pl,haz}$ - mômen kháng uốn dẻo của tiết diện, kể tới sự giảm chiều dày $\rho_{0,haz}$ x t tại vùng HAZ, $W_{eff,haz}$ - mô men kháng uốn đàn hồi của tiết diện hiệu quả, kể tới sự giảm chiều dày do tiết diện loại 4 và ảnh hưởng của vùng HAZ. $\alpha_{3,u}$; $\alpha_{3,w}$ - hệ số xác định theo [1].

Cấu kiện uốn chịu uốn đồng thời theo hai trục y và z của tiết diện được xét với các trường hợp tiết diện hở, rỗng hoặc đặc được tính toán như sau:

$$\text{Đối với tiết diện hở: } \left(\frac{M_{y,Ed}}{\omega_o \times M_{y,Rd}} \right)^{\gamma_o} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_o \times M_{z,Rd}} \right)^{\xi_o} \leq 1.00 \quad (18)$$

$$\text{Đối với tiết diện rỗng hoặc đặc: } \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 \times M_{y,Rd}} \right)^{1.7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 \times M_{z,Rd}} \right)^{1.7} \right]^{0.6} \leq 1.00 \quad (19)$$

trong đó: $M_{y,Ed}$; $M_{z,Ed}$ giá trị của mômen do ngoại lực tác dụng theo phương trục y và z; $M_{y,Rd}$; $M_{z,Rd}$ là khả năng chịu uốn của cấu kiện theo hai phương trục y và z; ω_0 : hệ số kể đến ảnh hưởng cục bộ do hàn HAZ trên cấu kiện. Xác định ω_0 phụ thuộc độ lớn vùng ảnh hưởng HAZ được mở rộng dọc theo chiều dài so với bề rộng nhỏ nhất của cấu kiện; γ_0 , ξ_0 : Hệ số mũ xác định theo hệ số α_y và α_z , được lấy bằng 1,0; α_y , α_z tương ứng là hệ số hình dạng uốn theo trục y và z.

Khả năng chịu mômen uốn đối với trục y và z được tính như sau:

$$M_{y,Rd} = \alpha_y \times W_{y,el} \times f_0 / \gamma_{M1}; \quad M_{z,Rd} = \alpha_z \times W_{z,el} \times f_0 / \gamma_{M1} \quad (20)$$

Các cấu kiện chịu uốn phải được kiểm tra về biến dạng, công thức kiểm tra:

$$\Delta \leq [\Delta]; \quad \text{với } \Delta \text{ là biến dạng của kết cấu và } [\Delta] \text{ là biến dạng cho phép} \quad (21)$$

Bảng 2. Biến dạng cho phép của kết cấu

Loại kết cấu	Biến dạng cho phép
Đối với kết cấu dầm	L/250
Đối với kết cấu dầm công xôn	L/180
Chuyển vị ngang đỉnh cột	L/300

Trong đó: L - Nhịp dầm; H - Chiều cao cột

Cấu kiện uốn đồng thời chịu cắt. Kiểm tra khả năng chịu cắt của cấu kiện HKN bao gồm kiểm tra khả năng chịu cắt và khả năng mất ổn định cục bộ do lực cắt. Khi tính toán cấu kiện chịu cắt cũng phân thành cấu kiện có tiết diện mảnh và không mảnh. Với tiết diện không mảnh, kiểm tra mất ổn định do lực cắt đối với phần bản bụng có thể được bỏ qua, với tiết diện mảnh phải tiến hành kiểm tra. EC9 sử dụng thông số độ mảnh β để phân loại độ mảnh của tiết diện chịu cắt. Theo đó, nếu $\beta > 39\epsilon$ được xem là tiết diện mảnh, trong đó xác định $\beta = h_w/t_w$ và $\epsilon = \sqrt{250/f_0}$.

$$\text{Công thức kiểm tra khả năng chịu cắt: } V_{Ed}/V_{Rd} \leq 1 \quad (22)$$

$$\text{Với tiết diện không mảnh, khả năng chịu cắt được xác định: } V_{Rd} = A_v \times \frac{f_0}{\sqrt{3} \times \gamma_{M1}}$$

Với dầm chữ I tổ hợp, diện tích vùng chịu cắt A_v được lấy với tất cả phần bản bụng:

$$A_v = \sum_{i=1}^n \left[(h_w - \sum d) \times (t_w)_i - (1 - \rho_{0,haz}) \times b_{haz} \times (t_w)_i \right] \quad (23)$$

trong đó: $\sum d$ - Tổng đường kính lỗ trên cùng mặt cắt của tiết diện xét.

Với tiết diện mảnh, cần kiểm tra đồng thời khả năng chịu cắt và khả năng mất ổn định do lực cắt. Khả năng chịu cắt có kể tới mất ổn định cục bộ do lực cắt gây ra tính theo công thức:

$$V_{Rd} = v_1 \times b \times t \times \frac{f_0}{\sqrt{3} \times \gamma_{M1}} \quad (24)$$

trong đó: t là bề dày thành cấu kiện; b là khoảng cách giữa các sườn gia cường; v_1 là hệ số giảm do mất ổn định dưới tác dụng của lực cắt xác định theo EC9.

Khi kết cấu làm việc chịu uốn, thường xuất hiện đồng thời mômen và lực cắt, khi có sự tham gia đồng thời của ứng suất tiếp sẽ ảnh hưởng đến khả năng chịu uốn của kết cấu. Tuy nhiên, trong trường hợp lực cắt V_{Ed} nhỏ hơn một nửa khả năng chịu cắt V_{Rd} thì ảnh hưởng của nó tới khả năng chịu uốn có thể bỏ qua. Trường hợp này không áp dụng tại vị trí mất ổn định do ứng suất tiếp.

Cường độ suy giảm ở vị trí có ảnh hưởng của lực cắt $f_{0,v}$ (giới hạn chảy suy giảm) trong cấu kiện chịu đồng thời uốn - cắt được xác định như sau:

$$f_{0,v} = f_0 \times \left(1 - \left(\frac{2 \times V_{Ed}}{V_{Rd}} - 1 \right)^2 \right) \quad (25)$$

Giá trị mômen suy giảm $M_{v,Rd}$ do có sự xuất hiện của lực cắt tính theo công thức sau đây:

Trường hợp cánh tiết diện chữ I thuộc tiết diện loại 1 và 2 làm việc chịu uốn:

$$M_{v,Rd} = t_f \times b_f \times (h - t_f) \times \frac{f_0}{\gamma_{M1}} + \frac{t_w h_w^2}{4} \times \frac{f_{0,v}}{\gamma_{M1}} \quad (26)$$

Trường hợp cánh tiết diện chữ I thuộc tiết diện loại 3 làm việc chịu uốn:

$$M_{v,Rd} = t_f \times b_f \times (h - t_f) \times \frac{f_0}{\gamma_{M1}} + \frac{t_w h_w^2}{6} \times \frac{f_{0,v}}{\gamma_{M1}} \quad (27)$$

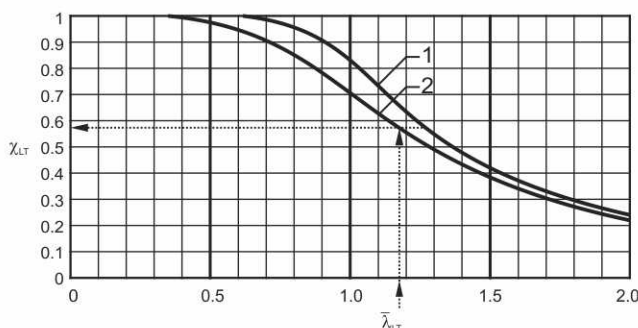
Mất ổn định dạng xoắn ngang. Khi dầm chịu uốn, mômen uốn làm cho phần tiết diện phía trên dầm chịu nén và phía dưới chịu kéo. Khi tải trọng đạt tới hoặc vượt quá lực tới hạn, phần cánh chịu nén sẽ có xu hướng xoay dẫn tới hiện tượng cong vênh, trong khi đó phần chịu kéo sẽ chống lại sự xoay tự do phần nén. Sự ảnh hưởng lẫn nhau của phần kéo và nén dẫn đến dầm bị uốn cong và đồng thời bị xoắn, nó sẽ làm cho bụng dầm I không thẳng đứng. Sự biến dạng như vậy gây nên hiện tượng xoắn ngang.

Khả năng chống mất ổn định dạng xoắn ngang:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \times \alpha \times W_{el} \times f_0 / \gamma_{M1} \quad (28)$$

trong đó: χ_{LT} : Hệ số uốn dọc LTB phụ thuộc lớp độ bền và $\bar{\lambda}_{LT}$; α : Hệ số hình dạng, α hệ số phụ thuộc $W_{pl,y}$; $W_{el,y}$; W_{pl} : Mômen kháng uốn dẻo tiết diện; W_{el} : Mômen kháng uốn đàn hồi của tiết diện.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}; \chi_{LT} \leq 1 \quad (29)$$



Hình 10. Biểu đồ xác định hệ số uốn dọc χ_{LT} : 1 - Tiết diện loại 1 và 2; 2 - Tiết diện loại 3 và 4

$$\phi_{LT} = 0.5 \times \left[1 + \alpha_{LT} \times (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0,LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (30)$$

trong đó: α_{LT} : Hệ số không hoàn chỉnh; $\bar{\lambda}_{LT}$: Hệ số độ mảnh qui đổi; $\bar{\lambda}_{0,LT}$: Hệ số độ mảnh qui đổi giới hạn theo phương ngang. Theo EC9, đối với tiết diện loại 1 và 2 thì $\alpha_{LT} = 0,1$ và $\bar{\lambda}_{0,LT} = 0,6$; đối với tiết diện loại 3 và 4 thì $\alpha_{LT} = 0,2$ và $\bar{\lambda}_{0,LT} = 0,4$

Ví dụ 1. Tính toán khả năng chịu nén cấu kiện HKN có tiết diện không hàn và kích thước không đổi, chiều dài tự do theo trục z và y là 2,00 m. Kiểm tra khả năng chịu nén của cấu kiện, biết:

Kích thước tiết diện H150x75, chiều dày bản bụng: $t_w = 5$ mm; chiều dày bản cánh: $t_f = 7$ mm; bán kính quán tính: $i_z = 6,11 \times 10$ mm; $i_y = 1,66 \times 10$ mm; bán kính chuyển tiếp giữa bụng và cánh $R_{root} = 8$ mm; các đặc trưng hình học $I_z = 666 \times 10^4$ mm⁴ (trục khỏe), $W_{el,z} = 88,8 \times 10^3$ mm³; $W_{pl,z} = 102 \times 10^3$ mm³, $A = 8,82 \times 10^2$ mm²; $I_y = 2,90 \times 10^4$ mm⁴ (trục yếu); $W_{el,y} = 13,2 \times 10^3$ mm³; $W_{pl,y} = 20,8 \times 10^3$ mm³. Vật liệu hợp kim nhôm EN AW-6061 T6, $f_0 = 240$ N/mm²; $f_u = 260$ N/mm², độ bền HKN loại A.

a) Xác định loại tiết diện

- Xác định loại tiết diện bản bụng (thuộc phần tử trong của tiết diện):

$\beta_w = 9,6$; $\epsilon_w = 1,02$; $\beta_{1,w} = 11 \times \epsilon = 11,226$ vậy $\beta_w < \beta_{1,w}$. Bản bụng thuộc tiết diện loại 1.

- Xác định loại tiết diện bản cánh (thuộc phần tử ngoài đối xứng của tiết diện):

$\beta_f = 4,05$; $\epsilon_f = 1,02$; $\beta_{1,f} = 4,05 \times \epsilon = 4,13$ vậy $\beta_f < \beta_{1,f}$. Cánh thuộc tiết diện loại 1.

Vậy tiết diện chữ H đang xét thuộc tiết diện loại 1.

b) Xác định khả năng chịu nén

- Khả năng chịu nén của cấu kiện có tiết diện đang xét:

$$N_{u,Rd} = 181\,621 \text{ N}; N_{c,Rd} = 192\,436 \text{ N}$$

- Khả năng chống mất ổn định dạng uốn theo [1]:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \times f_0}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i \times \pi} \sqrt{\frac{A_{eff} \times f_0}{A_g \times E}} = \left(\frac{2000}{16,6 \times \pi} \right) \sqrt{\frac{240}{70000}} = 2,25$$

$$\bar{\lambda}_0 = 0,10; \alpha = 0,20 \text{ ta có: } \phi = 3,32 \text{ và } \chi = 0,174$$

$$N_{b,f,Rd} = \kappa \times \chi \times A_{eff} \times f_0 / \gamma_{M1} = 1,0 \times 0,174 \times 882 \times 240 / 1,10 = 33\,483 \text{ kN}$$

- Khả năng chống mất ổn định dạng xoắn và dạng uốn - xoắn không phải kiểm tra vì tiết diện cấu kiện thuộc dạng mở có hai trục đối xứng.

- Khả năng chịu nén của cấu kiện $N_{Rd} = \min \{ N_{u,Rd}; N_{c,Rd}; N_{b,f,Rd} \}$.

Nhận xét: cấu kiện HKN tiết diện H150x75 chiều dài 2000 mm có khả năng chịu lực nén dọc trục là: $N_{Rd} = 33\,483 \text{ N}$ hay 33,48 kN.

Ví dụ 2. Cho dầm HKN có hình dạng và kích thước tiết diện, vật liệu như ví dụ 1, chịu tải trọng phân bố đều $q=3,00 \text{ kN/m}$. Nhịp tính toán dầm là 4,00 m. Kiểm khả năng chịu uốn, chịu cắt của dầm, biết tiết diện dầm có $I_t=2,9 \times 10^4 \text{ mm}^4$; $I_w=2,52 \times 10^9 \text{ mm}^6$. Vật liệu hợp kim nhôm EN AW-6061 T6, $f_0=240 \text{ N/mm}^2$; $f_u=260 \text{ N/mm}^2$; Độ bền HKN loại A. Mômen tính toán dầm: $M_{Ed}=6,0 \text{ kNm}$; Lực cắt tính toán: $V_{Ed}=6,0 \text{ kN}$.

a) Kiểm tra khả năng chịu uốn:

$$M_{u,Rd}=18,5 \text{ kNm} > 6,00 \text{ kNm}; M_{c,Rd}=22,3 \text{ kNm} > 6,00 \text{ kNm}, \text{ vậy } M_{Rd}=18,5 \text{ kNm}$$

b) Kiểm tra khả năng chịu cắt:

$$\varepsilon = 1,02; \beta = 24 \text{ Ta thấy } \beta = 24 < 39\varepsilon = 40,62 \text{ nên tiết diện được xem là không mảnh.}$$

$$A_{net}=600 \text{ mm}^2; V_{rd}=75,6 \text{ kN} > 6,0 \text{ kN}$$

- Uốn và cắt: $V_{Rd} > 2 \times V_{Ed}$ lực cắt nhỏ nên có thể bỏ qua ảnh hưởng tới khả năng chịu uốn.

- Khả năng chống mất ổn định:

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E \times I_z \times G \times I_t}}{L} = 15,38 \text{ kNm}; \mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \sqrt{1 + k_{wt}^2} = 1,2$$

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{E \times I_w}{G \times I_t}} = 0,37; \bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha \times W_{el,z} \times f_0}{M_{cr}}} = 1,26$$

$$\alpha_{LT}=0,1; \bar{\lambda}_{0,LT}=0,6 \text{ ta có } \phi_{LT}=1,32 \text{ và } \chi_{LT}=0,58; M_{b,Rd}=12,92 \text{ kNm} > 6,0 \text{ kNm}$$

c) Kiểm tra điều kiện về độ võng của dầm:

$$f = \frac{5}{384} \frac{q^c \times l^4}{E \times I_z} = \frac{5 \times 2,22 \times 256 \times 10^{12}}{384 \times 7 \times 10^4 \times 666 \times 10^4} = 15,8 \text{ mm} < [\Delta] = 16,0 \text{ mm}$$

Nhận xét: Dầm HKN tiết diện chữ I 150x75 với nhịp 4,00 m, có khả năng chịu được tải trọng phân bố đều 3,00 kN/m.



4. Kết luận

Nhìn chung tính toán kết cấu HKN đảm bảo một qui trình giống như đối với tính toán kết cấu thép theo Eurocodes. Tuy nhiên, do HKN có mô đun đàn hồi thấp nên cấu tạo tiết diện HKN thường được tăng cường bằng các phần tử gia cường, việc xác định đặc trưng hình học tiết diện sẽ phức tạp hơn. Khả năng mất ổn định cục bộ của cấu kiện HKN cũng chỉ được xét với tiết diện loại 4 theo bề dày hiệu quả. Trong tính toán cấu kiện HKN cần xét đến vùng ảnh hưởng của nhiệt độ khi hàn có thể làm suy yếu cường độ của vật liệu cũng như khả năng chịu lực của kết cấu.

Tài liệu tham khảo

1. The European Standard EN 1999-1-1:2007 has the status of a British Standard, Eurocode 9: *Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules*.
2. Ulrich Müller (2011), *Introduction to Structural Aluminium Design*, Whittles Publishing, Scotland.;
3. СНиП2.03.06-85, *Алюминиевые конструкции*.