

Khảo sát khả năng chịu lực tiết diện của cột thép tạo hình nguội có xét đến hiện tượng cứng nguội

Investigation of sectional capacities of cold-formed steel columns considering the strain hardening

Thiếu tá, ThS. Thịnh Văn Thanh^{1,*}, Thượng tá, ThS. Lê Đức Linh¹, Thượng tá, ThS. Nguyễn Văn Khải¹ và PGS.TS. Phạm Ngọc Hiếu²

¹ Bộ môn Công sự, Khoa Công trình, Trường Sĩ quan Công binh;

² Bộ môn Kết Cấu Thép-Gỗ, Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến Trúc Hà Nội;

*Tác giả liên hệ: Thanhz756@gmail.com

■ Nhận bài: 26/11/2024 ■ Sửa bài: 18/12/2024 ■ Duyệt đăng: 22/01/2025

TÓM TẮT

Các hướng dẫn hiện tại cho kết cấu thép tạo hình nguội dựa trên giả định đơn giản về ứng xử của vật liệu trong quá trình biến dạng dẻo. Tuy nhiên, trên thực tế, ứng xử ứng suất - biến dạng của vật liệu phức tạp hơn do ảnh hưởng của hiện tượng cứng nguội do quá trình tạo hình nguội. Cứng nguội là thuật ngữ mô tả sự gia tăng cường độ vượt quá điểm chảy do biến dạng dẻo trong quá trình tạo hình nguội. Kết quả là, các tiêu chuẩn hiện tại thường đánh giá quá an toàn so với cường độ thực tế của các tiết diện thép hình nguội. Do đó, bài viết này giới thiệu một phương pháp thiết kế mới được gọi là Phương pháp Cường độ Liên tục, phương pháp này tính đến tác động của hiện tượng làm cứng nguội khi xác định khả năng chịu lực của tiết diện thép hình nguội chịu nén. Bài viết cung cấp ví dụ về thiết kế các tiết diện thép tạo hình nguội chữ nhật và thực hiện khảo sát về khả năng chịu lực của các tiết diện này với tính chất vật liệu khác nhau, rồi so sánh với các tính toán được đưa ra trong tiêu chuẩn Châu Âu.

Từ khóa: Khảo sát, Khả năng chịu lực tiết diện, Cột thép tạo hình nguội, Cứng nguội

ABSTRACT

The current guidelines for cold-formed steel structures rely on a simplified view of the material's plastic behavior. In reality, the stress-strain response is more complex due to strain hardening from the cold-forming process. Strain hardening refers to the increase in strength beyond the yield point caused by plastic deformation during this process. As a result, existing standards tend to underestimate the actual strength of cold-formed steel sections. This paper presents a new design approach called the Continuous Strength Method, which incorporates the effects of strain hardening in the design of cold-formed steel sections under compression. The paper includes examples of designing cold-formed steel rectangular sections and examines their capacities relative to various material properties, comparing these findings to strength predictions specified in the Eurocode.

Keywords: Investigation, Sectional capacity, Cold-formed steel column, Strain hardening.

1. GIỚI THIỆU

Kết cấu thép tạo hình nguội đã được sử dụng khá phổ biến cho các công trình xây dựng bởi những ưu điểm của nó so với kết cấu thép truyền thống [1]. Nhiều nước trên thế giới đã đưa ra các tiêu chuẩn thiết kế cho loại kết cấu này, điều này tạo nền tảng cho các ứng dụng

thực tế [2]. Các tiêu chuẩn này cơ bản dựa trên ứng xử chảy dẻo của vật liệu thép theo đường cong ứng suất – biến dạng lý tưởng. Tuy nhiên, trên thực tế đường cong ứng suất biến dạng này đã trở nên phức tạp hơn rất nhiều do ảnh hưởng của hiện tượng cứng nguội như đã trình bày trong tài liệu số [1]. Các phương

pháp chế tạo tiết diện thép tạo hình nguội và ảnh hưởng của quá trình tạo hình nguội này đến sự cứng nguội của vật liệu thép như thế nào được trình bày trong tài liệu số [1]. Kết quả là việc ứng dụng các tiêu chuẩn hiện tại cho thấy đưa ra các kết quả thiết kế quá thiên về an toàn khi tính toán kết cấu làm việc qua giai đoạn tuyến tính của vật liệu, như đã đề cập trong tài liệu số [3]. Do đó, Gardner đã đề xuất Phương pháp cường độ liên tục (CSM) được coi là một phương pháp tính toán mới trong thiết kế tiết diện thép tạo hình nguội. Nó có kể đến ảnh hưởng của sự cứng nguội do ảnh hưởng của quá trình tạo hình, đã cho phép tận dụng sự làm việc của vật liệu khi vượt qua giới hạn chảy và tăng tính hiệu quả của thiết kế [3-5]. Phương pháp CSM đã được áp dụng thành công trong đề xuất thiết kế cho kết cấu thép không gỉ và kết cấu nhôm mà đã chứng minh được các ưu điểm của nó [6-8].

Bài báo này nhằm mục đích trình bày Phương pháp Cường độ Liên tục và đưa ra cách áp dụng của nó trong việc đánh giá khả năng chịu lực của các tiết diện thép tạo hình nguội khi chịu nén. Phương pháp này được áp dụng để phân tích khả năng chịu lực của các tiết diện thép tạo hình nguội dạng hộp chữ nhật, so sánh những tính toán này với các tính toán dựa trên Tiêu chuẩn Châu Âu hiện hành [9] bằng cách sử dụng Phương pháp Bề rộng hiệu dụng (EWM). Khảo sát này xem xét sự thay đổi về độ dày tiết diện và các đặc tính cường độ của vật liệu thép. Các kết quả mang lại những hiểu biết quan trọng về cách mà sự cứng nguội của thép ảnh hưởng đến khả năng chịu lực của các tiết diện thép tạo hình nguội dạng hộp chữ nhật.

2. XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG CHỊU LỰC TIẾT DIỆN CỦA CỘT THÉP TẠO HÌNH NGUỘI CÓ XÉT ĐẾN ẢNH HƯỞNG CỦA SỰ CỨNG NGUỘI CỦA VẬT LIỆU

Gardner đã phát triển Phương pháp Cường độ Liên tục để xem xét ứng xử của thép tạo hình nguội khi vượt qua giai đoạn dẻo. Phương pháp này đặc biệt hữu ích cho thép tạo hình nguội, khi mà vùng dẻo có thể không được xác định rõ ràng, và nó có thể

được áp dụng cho nhiều loại thép và hợp kim nhôm khác nhau. Phương pháp này dựa trên các nguyên tắc của Tiêu chuẩn Châu Âu EN 1993-1-3 [9], nhưng nó có một số điều chỉnh quan trọng:

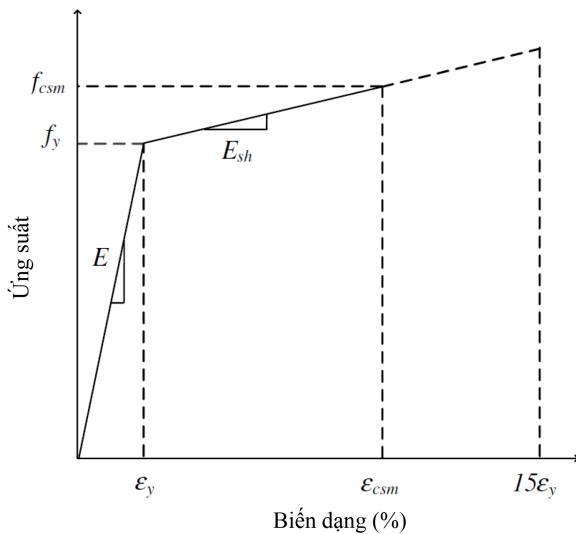
1) Thay vì phân loại các tiết diện như được nêu trong Tiêu chuẩn Châu Âu EN 1993-1-3 [9], phương pháp này giới thiệu một khái niệm không đơn vị về khả năng biến dạng được dựa trên kết quả thử nghiệm;

2) Quy trình thiết kế tính đến phản ứng ứng suất - biến dạng của vật liệu thép, bao gồm cả các tác động của hiện tượng cứng nguội.

Cách tiếp cận này dựa trên một tổ hợp của đường cong cơ sở và mô hình vật liệu. Đường cong cơ sở, được hình thành dựa trên các kết quả đầu ra của các thí nghiệm, mô tả được mối liên hệ giữa khả năng biến dạng danh nghĩa của tiết diện và độ mảnh của nó. Khả năng biến dạng này được xác định là tỉ số giữa biến dạng tại điểm tải phá hoại và ứng suất tại điểm chảy, trong khi đó độ mảnh được mô tả là căn bậc hai của tỉ số giữa ứng suất chảy và ứng suất gây mất ổn định tuyến tính của tiết diện. Độ mảnh này sau đó được nhân với tỉ số $(c_{flat}/c_{cl})_{max}$, đặc trưng cho giá trị tương đối của độ rộng phần cánh phẳng với đường trục của nó, như biểu diễn trong Công thức (1), trong đó c_{flat} và c_{cl} tương ứng là độ rộng phần cánh phẳng và đường trục của nó, $\sigma_{cr,cs}$ là ứng suất mất ổn định cục bộ. Với mô hình vật liệu, nó được đặc trưng bởi ứng xử tuyến tính sau đó đến giai đoạn cứng nguội, như được mô tả trong Hình 1. Trong hình này, E đặc trưng cho hệ số mô đun đàn hồi trong giai đoạn tuyến tính, trong khi đó E_{sh} là góc dốc của giai đoạn cứng nguội, được xác định theo Công thức (2). Các thông số (f_y, f_u) , (ϵ_y, ϵ_u) là các thành phần ứng suất và biến dạng ứng với trạng thái chảy và giới hạn bền của vật liệu. Những khái niệm này có thể tìm hiểu thêm trong tài liệu tham khảo [10].

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,cs}}} \left(\frac{c_{flat}}{c_{cl}} \right)_{max}$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0,16\epsilon_u - \epsilon_y} \tag{1}$$



Hình 1. Đường cong ứng suất-biến dạng của vật liệu theo phương pháp CSM [5]

Việc xác định khả năng chịu lực tiết diện khi chịu nén được dựa theo đường cong thiết kế cơ sở, kể đến khả năng biến dạng danh nghĩa của tiết diện ($\epsilon_{csm} / \epsilon_y$) như thể hiện trong công thức (3), trong đó các giá trị biến dạng cho phép được đưa ra như (Hình 1).

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \frac{0,25}{\lambda_p^{3,6}} \leq \min(15, \frac{0,1\epsilon_u}{\epsilon_y})$$

Phương pháp cường độ liên tục (CSM) chỉ được áp dụng nếu độ mảnh của tiết diện (λ_p) xác định theo công thức (1) nhỏ hơn hoặc bằng 0,68 ($\lambda_p \leq 0,68$) như trong tài liệu tham khảo số [10]. Khi độ mảnh vượt qua 0,68, khả năng chịu lực của tiết diện được tính toán theo các hướng dẫn của tiêu chuẩn Châu Âu EN 1993-1-3 [9]. Trong trường hợp độ mảnh lớn, ứng suất mất ổn định tuyến tính sẽ giảm đáng kể, điều này làm tăng khả năng mất ổn định cục bộ, và dẫn đến tiết diện sẽ bị phá hoại tại giá trị ứng suất nhỏ hơn giá trị ứng suất chảy. Khi $\lambda_p \leq 0,68$ thì quy trình xác định khả năng chịu lực tiết diện của thép tạo hình nguội chịu nén được xác định như sau:

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{A f_{csm}}{\gamma_{M0}}$$

Trong đó A là diện tích tiết diện; f_{csm} là ứng suất giới hạn được biểu diễn như trên Hình 1, và được xác định như sau:

$$f_{csm} = f_y + E_{sh} \epsilon_y \left(\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} - 1 \right) \quad (3)$$

Ví dụ tính toán cho việc áp dụng phương pháp Cường độ liên tục được trình bày trong Mục 3. Và khảo sát việc ảnh hưởng của sự cứng nguội đến khả năng chịu lực của tiết diện được trình bày trong Mục 4.

3. VÍ DỤ TÍNH TOÁN ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP CƯỜNG ĐỘ LIÊN TỤC

Xác định khả năng chịu nén của tiết diện hình hộp chữ nhật 200x100x8 có đặc trưng vật liệu bao gồm $E=193000$ (N/mm²); $f_y=360$ (N/mm²); $f_u = 600$ (N/mm²). Đặc trưng hình học: $h=200$ (mm); $b = 100$ (mm); $t = 8$ (mm); bán kính trong $r = 4,5$ mm; $A = 4468,92$ mm².

3.1. Phương pháp bề rộng hiệu dụng (EWM)

Các thông số hình học của tiết diện:

$$r_m = r + t/2 = 4,5 + 8/2 = 8,5 \text{ mm}$$

$$g_r = r_m (\tan 45^\circ - \sin 45^\circ) = 1,942 \text{ mm}$$

$$h_w = h - t - 2g_r = 200 - 8 - 2 \times 1,942 = 188,12 \text{ mm}$$

Mô đun chống uốn hiệu dụng của tiết diện:

Đặc trưng của tiết diện: Hệ số ứng suất:

$$\psi = 1$$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = \sqrt{\frac{235}{360}} = 0,808$$

Từ bảng 2.3 [9], xác định được hệ số ổn định: $k_\sigma = 4$

Độ mảnh của bản thép:

$$\begin{aligned} \lambda_p &= \frac{h_w / t}{28,4 \epsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{188,12 / 8}{28,4 \times 0,808 \times \sqrt{4,0}} \\ &= 0,512 < 0,673 \end{aligned}$$

Tiết diện hiệu dụng toàn bộ:

Xác định khả năng chịu nén của tiết diện

$$\begin{aligned} N_{c,Rd} &= \frac{4468,92 \times 360}{1,0} = 1608811(N) \\ &= 1608,811 (kN) \end{aligned}$$

3.2. Phương pháp cường độ liên tục (CSM)

Xác định biến dạng chảy và biến dạng bền:

$$\epsilon_y = \frac{360}{193000} = 0,001865$$

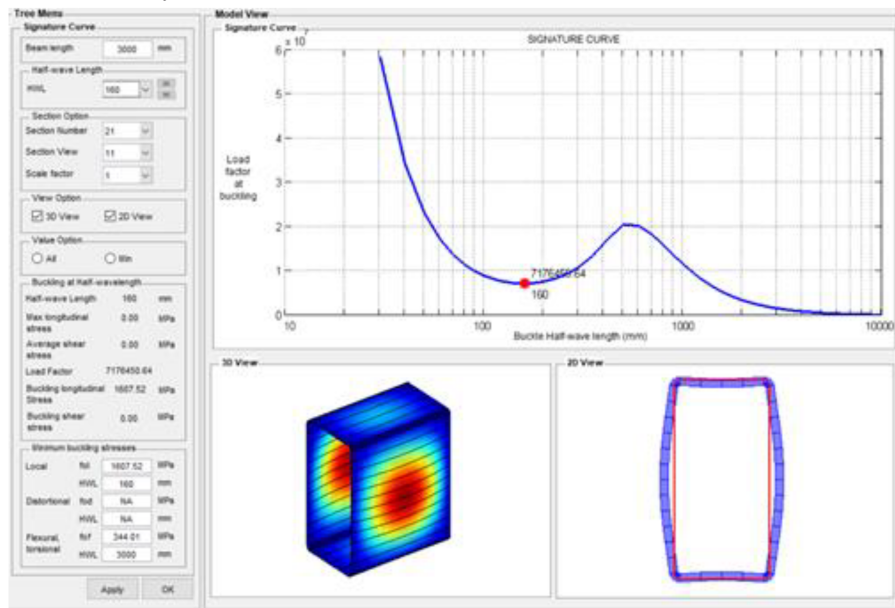
$$\epsilon_u = 1 - \frac{360}{600} = 0,4$$

Độ mảnh của tiết diện:

Dựa trên cơ sở phân tích ổn định đàn hồi sử dụng phần mềm THIN-WALL-2 [11], có kết quả biểu diễn như trên (Hình 2), thu được giá trị mất ổn định cục bộ

$$f_{ol} = \sigma_{cr,cs} = 1608 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,cs}}} = \sqrt{\frac{360}{1608}} = 0,473$$



Hình 2. Kết quả phân tích mất ổn định tiết diện hình hộp chịu nén

Nhân với tỷ số $(c_{flat} / c_{cl})_{max}$, trong đó c_{flat} là khoảng cách mép dưới hai bản cánh tới bán kính cong tại vị trí giao cánh và bụng và c_{cl} là bề rộng của phần tử đi qua đường trung tâm.

$$c_{flat} = 200 - (4,5 + 8) \times 2 = 175(mm);$$

$$c_{cl} = 200 - 8 = 192(mm)$$

$$\rightarrow \frac{c_{flat}}{c_{cl}} = \frac{175}{192} = 0,911$$

$$\bar{\lambda}_p = 0,473 \times 0,911 = 0,431 \leq 0,68$$

Xác định khả năng biến dạng của tiết diện:

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \frac{0,25}{0,431^{3,6}} = 5,162 < \min\left(15, \frac{0,1\epsilon_u}{\epsilon_y}\right)$$

Xác định góc nghiêng hay góc dốc của đường tăng cứng:

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0,16\epsilon_u - \epsilon_y} = \frac{600 - 360}{0,16 \times 0,4 - 0,001865} = 3862,575 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Xác định khả năng chịu nén của tiết diện:

$$f_{csm} = f_y + E_{sh}\epsilon_y \left(\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} - 1 \right) = 360 + 3862,575 \times 0,001865(5,162 - 1) = 389,99 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{4468,92 \times 389,99}{1,0} = 1742833(N) = 1742,833 \text{ (kN)}$$

4. KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA SỰ CỨNG NGUỘI ĐẾN KHẢ NĂNG CHỊU NÉN CỦA TIẾT DIỆN THÉP HỘP TẠO HÌNH NGUỘI

Bài báo tiến hành khảo sát dựa trên tiết diện thép hộp tạo hình nguội được lấy theo tiêu chuẩn Châu Âu EN 10219 S355J0H [12]. Vật liệu có giới hạn chảy quy ước tối thiểu bằng 355 MPa và cường độ phá hoại dao động

từ 470MPa đến 680 MPa. Khảo sát này chọn tiết diện hộp có kích thước 200mm × 100mm với chiều dày thay đổi 2 mm đến 10 mm, cụ thể như trong (Bảng 1). Ảnh hưởng của sự

cứng nguội được xem xét thông qua việc thay đổi cường độ kéo đứt của vật liệu f_u được lấy bao gồm 500 MPa, 600 MPa và 650 MPa và giới hạn chảy f_y được lấy bằng 360 MPa.

Bảng 1. Khả năng chịu nén của tiết diện khảo sát (Đơn vị: kN)

Tiết diện hộp 200×100 với chiều dày (mm)	Phương pháp EWM	Phương pháp CSM với sự thay đổi của giới hạn bền theo (MPa)			Độ chênh lệch lớn nhất theo (%)
		500	600	650	
2,0	130,8	-	-	-	-
3,0	293,8	-	-	-	-
4,0	589,9	-	-	-	-
5,0	890,9	-	-	-	-
6,0	1187,8	1237,7	1240,3	1241,7	4,5%
8,0	1608,8	1721,9	1742,8	1753,5	8,9%
10,0	1982,7	2369,0	2440,3	2476,9	24,9%

Từ bảng 1 đã chỉ ra rằng Phương pháp Cường độ liên tục này không được áp dụng nếu mất ổn định cục bộ xảy ra vì điều này sẽ làm cho tiết diện bị phá hoại trước khi đạt đến giới hạn chảy, có thể thấy như với các tiết diện có chiều dày từ 2,0 mm đến 5,0 mm. Khi chiều dày tiết diện tăng lên, khả năng ổn định của tiết diện cũng được tăng lên cho phép ứng suất phá hoại của tiết diện vượt qua giới hạn chảy. Do đó, phương pháp Cường độ Liên tục được áp dụng và đã thể hiện tính hiệu quả của nó là làm tăng khả năng chịu lực của tiết diện lên khoảng 5% cho tiết diện cho chiều dày 6,0mm và tăng đến khoảng 25% với tiết diện cho chiều dày 10 mm.

Về ảnh hưởng của giới hạn bền f_u , kết quả đã chỉ ra rằng việc thay đổi giới hạn bền này có ảnh hưởng không đáng kể đến khả năng chịu nén của tiết diện với độ chênh lệch nhỏ hơn 5% với giới hạn bền dao động từ 500 MPa đến 650 MPa.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã xem xét sự thay đổi về sự làm việc của vật liệu liên quan đến hiện tượng cứng nguội do quá trình tạo hình của tiết diện thép tạo hình nguội. Việc thay đổi này được kể đến

trong thiết kế thông qua việc áp dụng Phương pháp Cường độ Liên tục trong xác định khả năng chịu lực của tiết diện. Bài báo đã trình bày ví dụ cho việc áp dụng phương pháp mới này và so sánh kết quả tính toán với phương pháp bề rộng hiệu dụng (EWM) quy định theo tiêu chuẩn Châu Âu. Sau đó, báo cáo cũng tiến hành khảo sát khả năng chịu lực của một loạt các tiết diện thép hộp tạo hình nguội với chiều dày khác nhau để đánh giá ảnh hưởng của sự cứng nguội đến khả năng chịu lực của tiết diện. Kết quả khảo sát đã chỉ ra được tính hiệu quả trong việc áp dụng Phương pháp cường độ liên tục (CSM) khi xác định khả năng chịu lực tiết diện của các tiết diện có chiều dày lớn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] G.J. Hancock, T.M. Murray and D.S. Ellifritt, “Cold-formed Steel Structures to the AISI Specification”, The United States of America, 2001.

[2] W.W. Yu, R.A. Laboube and H. Chen, “Cold-formed Steel Design”, 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA: John Wiley and Sons, 2020.

[3] L. Gardner, “The Continuous Strength Method. Structures & Buildings”, vol. 161, 2008.

- [4] L. Gardner, “*The Continuous Strength Method*”, Proceeding of the 3rd International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, 2007.
- [5] L. Gardner, F. Wang and A. Liew, “*Influence of Strain Hardening on the Behavior and Design of Steel Structures*”, International Journal of Structural Stability and Dynamics, vol. 11, no. 05, 2011, pp. 855–875.
- [6] M. Ashraf and B. Young, “*Design formulations for non-welded and welded aluminium columns using Continuous Strength Method*”, Engineering Structures, vol. 33, no. 12, 2011, pp. 3197–3207.
- [7] M.N. Su, B. Young and L. Gardner, “*Continuous strength method for aluminium alloy structures*”, Advanced Materials Research, vol. 742, 2013, pp. 70–75.
- [8] O. Zhao, B. Rossi, L. Gardner and B. Young, “*Experimental and Numerical Studies of Ferritic Stainless Steel Tubular Cross Sections under Combined Compression and Bending*”, Journal of Structural Engineering, vol. 142, no. 2, 2016.
- [9] European Code 3: “*Design of Steel Structure*”, “*General rules Supplementary for Cold-formed Members and Sheeting*”, European Committee for Standardization, 2004, Part 1-3.
- [10] S. Afshan and L. Gardner, “*The continuous strength method for structural stainless steel design*”, Thin-Walled Structures, vol. 68, 2013, pp. 42–49.
- [11] V.V. Nguyen, G.J. Hancock, and C.H. Pham, “*Development of the Thin-Wall-2 for Buckling Analysis of Thin-Walled Sections Under Generalised Loading*”, in Proceeding of 8th International Conference on Advances in Steel Structures, 2015.
- [12] JF Engineering Product LLP, “*Cold-formed EN10219 S355J0H Rectangular hollow section*”, 2021. <https://www.hollowsectionpipe.com/cold-formed-en-10219-s355j0h-rhs-stockist-supplier.html>