

Kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội và đánh giá sự gia tăng cường độ do cứng nguội

Steel structure is formed into Thin shapes to achieve cold forming and Assess The increase in Strength due to cold hardening

> THS TRẦN THỊ PHƯƠNG LAN¹, TS NGUYỄN NGỌC THẮNG²

¹Khoa Xây dựng, Trường Đại học Hải Phòng, Email: bithoi06@gmail.com

²Bộ môn XDDD và CN, Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi, Email: thangnnn@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Hiện nay, kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội là loại kết cấu đã và đang sử dụng nhiều ở nước ta, thông dụng như xà gồ, tấm lợp mái, thanh giằng, các dạng kết cấu như khung nhà một tầng, khung nhà nhiều tầng, kết cấu mái, khung thép Zamil. Do có đặc điểm cấu tạo thành mỏng (bao gồm các loại thép và tôn định hình tạo hình nguội) khác biệt với các kết cấu thông thường nên lý thuyết đàn hồi thông thường và các phương pháp tính toán thiết kế đối với kết cấu thép không áp dụng được trong trường hợp này. Sự tăng ứng suất chảy và cường độ kéo giới hạn cũng như làm giảm độ cứng của vật liệu phụ thuộc trực tiếp vào mức độ của quá trình tạo hình nguội. Điều này thu được dựa trên cơ sở các thí nghiệm kéo nén vật liệu khi đường cong đờ tải trở về trạng thái không tải tại giai đoạn củng cố. Tuy nhiên, trong một số trường hợp không có thí nghiệm kiểm chứng, có thể tham khảo cách tính theo chỉ dẫn trong quy phạm Mỹ (AISI) để đánh giá đặc tính gia tăng cường độ do cứng nguội này. Bài báo trình bày một khảo sát cụ thể cho tiết diện chữ C thành mỏng tạo hình nguội.

Từ khóa: Thép mỏng tạo hình nguội; ứng suất chảy; cường độ kéo giới hạn; tiết diện chữ C.

ABSTRACT

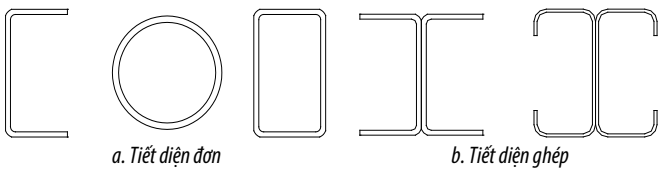
Currently, the use of cold-formed thin steel structures is prevalent in our country, including common applications such as purlins, roof panels, bracing, and various structures like single-story frames, multi-story frames, roof structures, and Zamil steel frames. Due to their thin profile characteristics, which include various types of cold-formed steel and shaped cold-formed sheeting, these structures differ from conventional ones. As a result, conventional elasticity theories and design calculation methods for steel structures are not applicable in this case. The increase in yield strength and tensile strength, as well as the reduction in material stiffness, directly depend on the extent of the cold-forming process. This is determined based on experiments involving the tensile compression of materials when the curved shape returns to an unloaded state during the consolidation phase. However, in some cases where there is no experimental validation, one can refer to calculation methods outlined in the American standards (AISI) to assess the enhanced properties of strength due to this cold-forming stiffness. The article presents a specific survey for the cold-formed C-section profile.

Keywords: Cold-formed thin steel; yield strength; tensile strength; cold-formed C-section.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Khái niệm về kết cấu thép nhẹ thành mỏng là hệ thống kết cấu thép xây dựng bằng thép thành mỏng có tiết diện dày không quá 4mm và được tạo hình bằng phương pháp gia công nguội (gia công ở nhiệt độ phòng) như dập, cán hoặc uốn nguội. Kết cấu thép thành mỏng có trọng lượng nhẹ hơn kết cấu thép thông dụng. Đó là giải pháp kỹ thuật mới trong lĩnh vực vật liệu và công nghệ. Ban đầu được sử dụng trong các lĩnh vực cơ khí, hàng không, ô tô... ngày nay được áp dụng vào kết cấu xây dựng, tạo nên một loại kết cấu mới có trọng lượng giảm nhẹ [1, 2]. Kết cấu thép nhẹ khác biệt so với kết cấu thép thông thường ở những đặc điểm cơ bản: Sử dụng các thanh thép tạo hình nguội từ các tấm thép rất mỏng có độ dày từ 0,3 đến 4mm; Sử

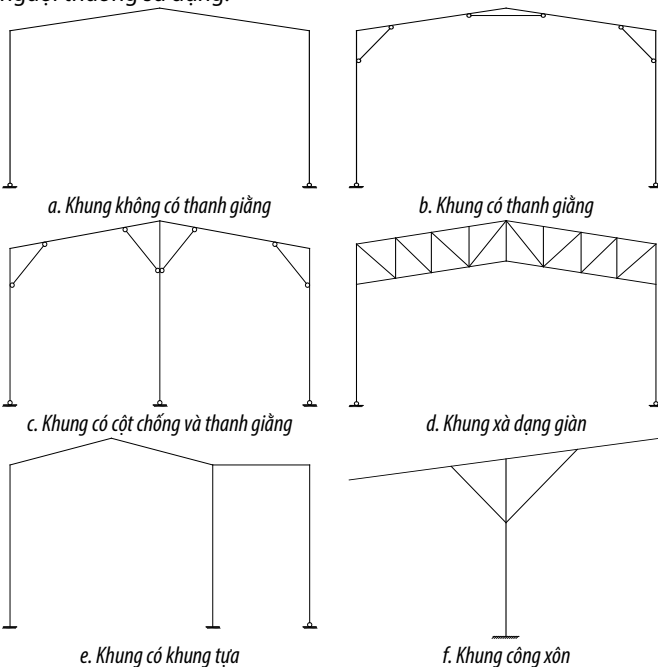
dụng các loại tiết diện đa dạng và tùy biến như tiết diện chữ Z, chữ I, chữ C, tiết diện chữ nhật, tiết diện tròn, chữ môn. Nói chung tiết diện thanh thành mỏng đa dạng hơn rất nhiều so với tiết diện thép hình cán nóng thông thường do thanh có chiều dày mỏng nên dễ tạo hình. Kết cấu sử dụng thanh thành mỏng có thể chọn được tiết diện tối ưu nên rất tiết kiệm vật liệu. Về phương diện kết cấu, thanh thành mỏng khác thanh thép thông thường ở vấn đề ứng xử của vật liệu và cách thức phá hoại, cấu kiện bị mất ổn định cục bộ không dẫn tới phá hoại mà có thể tiếp tục chịu lực được, thuộc tính của vật liệu thay đổi do phương pháp tạo hình và ảnh hưởng của ứng suất dư v.v... Kết cấu thép thành mỏng sử dụng các phương pháp liên kết không dùng trong kết cấu thép thường [3].



Hình 1. Dạng tiết diện thép tạo hình nguội dùng cho kết cấu khung [3]

Hình 1 chỉ ra một số dạng tiết diện thép tạo hình nguội thường được chế tạo dùng cho kết cấu khung chịu lực. Hiện nay, các hãng sản xuất thép thành mỏng tạo hình nguội đều cố gắng tiêu chuẩn hóa và điển hình hóa cao các loại tiết diện. Một tiết diện thành mỏng có thể được áp dụng cho nhiều loại công trình có công năng và sơ đồ kết cấu khác nhau. Việc tiêu chuẩn hóa cao sẽ dẫn đến làm tăng lượng thép, có những trường hợp mà vật liệu chưa làm việc hết khả năng, nhưng điều đó không có nghĩa là bất lợi về kinh tế. Việc tiêu chuẩn hóa kết cấu thép thành mỏng sẽ làm giảm được sự đa dạng của tiết diện, dẫn đến tăng số lượng sản xuất hàng loạt, chế tạo những chi tiết liên kết thống nhất, giảm công chế biến và lắp dựng [4].

Khung kết cấu thép thanh thành mỏng làm bộ phận chịu lực chính thường dùng trong các công trình một tầng cần không gian thông thoáng như nhà xưởng, kho, phòng trưng bày sản phẩm, nhà chợ quy mô vừa và nhỏ, nhà xe v.v... nhịp khung thường không vượt quá 30m. Trường hợp sử dụng kết cấu thép thành mỏng làm bộ phận chịu lực trong khung nhiều tầng, cấu kiện thép thành mỏng thường kết hợp với bộ phận chịu lực chính khác như cấu kiện bằng bê tông cốt thép hoặc thép cán nóng [1-3]. Kết cấu thép thành mỏng thường không sử dụng cho nhà xưởng có tải trọng lớn như trường hợp nhà có cầu trục, thường không sử dụng cho các công trình cao như cột thông tin, cột truyền tải điện và các dạng giàn thép chịu tải trọng lớn như giàn cầu, giàn cầu trục. Tuy nhiên kết cấu thép thành mỏng thường có kiến trúc đẹp, nhẹ nhàng, thanh thoát hơn so với khung thép sử dụng thép hình cán nóng thông thường [4]. Hình 2 dưới đây là một số sơ đồ kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội thường sử dụng:



Hình 2. Một số sơ đồ khung thép bằng thanh thành mỏng

Trong đó sơ đồ như ở hình 1.2a, b thường sử dụng cho nhà xưởng, nhà kho v.v... với nhịp trung bình và nhịp nhỏ, $L < 20m$; Sơ đồ

như ở hình 1.2c, d thường sử dụng cho nhà xưởng, nhà kho v.v... với nhịp lớn, $L > 20m$; Sơ đồ như ở hình 1.2e thường sử dụng khi cần mở rộng làm khu để thiết bị, khu để xe, khu nghỉ cho công nhân v.v... Sơ đồ như ở hình 1.2f thường sử dụng khi làm bến chờ ga tàu, bus hoặc nhà để xe v.v... [4, 5].

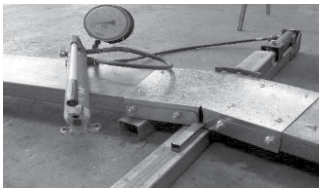
Cũng như các loại kết cấu chịu lực thông thường, kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội yêu cầu giàn giữ trong khi thi công và khi sử dụng là đặc biệt quan trọng, do kết cấu sử dụng thép thành mỏng tạo hình nguội có độ mảnh rất lớn nên vấn đề về ổn định phải đặc biệt chú trọng. Hầu hết các khung kết cấu thép thành mỏng đều có sử dụng giàn trong mặt phẳng khung ngang và giàn dọc nhà. Giàn có thể bằng các thanh đơn lắp dựng tại hiện trường hoặc có thể kết hợp với tường là các tấm panel lắp ráp sẵn bằng các thép thành mỏng, chúng được vận chuyển đến hiện trường và lắp ráp vào khung ngang. Một số trường hợp thanh giàn dọc mái vừa làm công tác giàn vừa làm xà gỗ để đỡ kết cấu mái che bên trên, cũng có trường hợp giàn dọc cột vừa làm giàn dọc nhà vừa làm sườn tường để lắp các kết cấu bao che. Trong quá trình thi công cũng sử dụng nhiều loại thanh giàn và chống khác nhau, sau khi thi công lắp dựng xong mới được tháo bỏ [6].

Khác với kết cấu khung thép sử dụng thép hình cán nóng thông thường kết cấu khung thép thành mỏng có trọng lượng nhẹ và các liên kết cấu tạo đơn giản, nên việc thi công lắp dựng rất dễ dàng và mang tính công nghiệp cao. Các phương án thi công có thể lắp dựng sẵn một số cấu kiện với nhau hoặc cả một khung ngang tại hiện trường sau đó cấu vào vị trí lắp dựng, và chúng được liên kết vào bản mã chân cột; hoặc có thể lắp dựng cả một tấm mái lớn tại hiện trường sau đó cấu lên và lắp dựng vào vị trí mái. Tính chính xác cao trong lắp dựng khung nhà bằng cách sử dụng nhiều thiết bị và máy móc chính xác, do thanh có chiều dày mỏng lên lực xiết phải đảm bảo chính xác nếu không sẽ gây ra méo thanh [6- 8].

Hình 3, 4 dưới đây tương ứng là một số hình ảnh thực tế các kiểu giàn trong khung kết cấu thép thành mỏng và biện pháp thi công khung kết cấu thép thành mỏng.



Hình 3. Một số kiểu giàn trong khung thép thành mỏng



c. Thi công bằng máy đo lực



d. Thi công lắp dựng khung trên cao

Hình 4. Biện pháp thi công khung thép bằng thanh thành mỏng [6- 8]

So với kết cấu thép thông thường, kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội có một loạt những ưu điểm sau [9]: Giảm lượng thép từ (25÷50)%, về lý thuyết có thể giảm nhiều hơn nữa nhưng sẽ kèm theo khó khăn tốn kém về chế tạo và không còn kinh tế nữa. Đặc trưng chịu lực của tiết diện là có lợi, do sự phân bố vật liệu hợp lý, nhất là khi dùng tiết diện kín. Việc thi công lắp dựng đơn giản và nhanh chóng. Giảm thời gian chế tạo và lắp ráp tới 30% đối với kết cấu mái nhà. Còn đối với các cấu kiện có thanh và nút điển hình hóa như dàn mái không gian thì thời gian còn giảm nhiều nữa. Mặt khác hình dáng tiết diện được tùy chọn tự do, đa dạng theo yêu cầu. Để dàng sản xuất số lượng lớn, tiết kiệm chi phí vận chuyển, cấu lắp, đồng thời tạo vẻ đẹp kết cấu, bớt che lấp bề mặt tích lũy ánh sáng.

Tuy nhiên dạng kết cấu thép này cũng có một số các nhược điểm như: Thường dùng cho kết cấu khung nhà thấp tầng từ 1 đến 2 tầng (nhà kho, nhà xưởng v.v...) do độ cứng hạn chế; Giá thành thép uốn nguội cao hơn thép cán nóng; Chi phí phòng gỉ cao hơn, vì bề mặt của tiết diện thép lớn hơn nên diện tích phủ bảo vệ nhiều hơn. Ngoài ra việc vận chuyển, bốc xếp, lắp dựng tuy nhanh chóng nhưng đòi hỏi những biện pháp và phương tiện riêng vì cấu kiện dễ bị hư hại. Và bên cạnh đó việc thiết kế khó khăn vì sự làm việc phức tạp của cấu kiện, tiết diện cấu kiện được chọn lựa tự do nên không có bảng tính toán sẵn [9].

2. VẬT LIỆU KẾT CẤU THÉP THÀNH MỎNG TẠO HÌNH NGUỘI

Thuộc tính của vật liệu đóng vai trò quan trọng trong quá trình làm việc của cấu kiện được tạo hình nguội. Vì vậy, trước khi tính toán cấu kiện, cần nghiên cứu các đặc tính riêng của cấu kiện được tạo hình nguội, các ảnh hưởng của phương pháp gia công nguội đến cường độ tính toán và áp dụng vào quá trình tính toán cấu kiện. Thuộc tính của vật liệu dùng cho cấu kiện được tạo hình nguội được quy định theo quy phạm ASTM "American Society for Testing and Materials" [9- 12].

Thép dùng trong chế tạo tiết diện cấu kiện được tạo hình nguội có thể dùng loại thép cacbon thấp loại tương đương với CT3 (Nga), CT38, CT42 (Việt Nam), có giới hạn chảy khoảng (220÷260)N/mm². Có thể dùng thép hợp kim thấp tương đương với 09Mn2, 14Mn có giới hạn chảy (340÷390)N/mm². Các loại thép này đều tương đối mềm dẻo, có độ dẫn dài cao (22÷26)%, chịu được thử nghiệm uốn gấp nguội. Như đã biết, biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng của thép có hai dạng đường cong. Một dạng có cường độ chảy rõ nét và một dạng có cường độ chảy không rõ nét. Vật liệu dùng cho kết cấu cán nóng thường có đường cong với cường độ chảy rõ nét còn vật liệu dùng cho thép tạo hình nguội thường có đường cong với giới hạn chảy không rõ nét [10, 11]. Đối với thép kết cấu thông thường, cường độ chảy là ứng suất ứng với thêm chảy trên biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng. Đối với thép tạo hình nguội do không có thêm chảy rõ ràng nên cường độ chảy được xác định theo một trong hai cách sau: 1) Theo phương pháp "offset", cường độ chảy được lấy ứng với đường xiên song song với đường ứng suất biến dạng ở giai đoạn đàn hồi, cắt trục biến dạng ở điểm có biến dạng dư $\epsilon = 0,2\%$. 2) Theo phương pháp tải trọng chưa đủ, cường độ chảy lấy tương ứng với

biến dạng dư $\epsilon = 0,5\%$. Môđun đàn hồi E của thép được xác định bằng tan của góc giữa đường ứng suất - biến dạng và trục hoành ở giai đoạn đàn hồi. Môđun đàn hồi của các loại thép tạo hình nguội lấy như nhau, $E = 2,0 \times 10^5$ Mpa. Môđun tiếp tuyến E_t được xác định bằng tang của góc giữa đường ứng suất - biến dạng và trục nằm ngang tại mỗi điểm. Với thép tạo hình nguội không có giới hạn chảy rõ nét lấy, $E_t = E$, cho tới ứng suất tỉ lệ và giảm đi khi ứng suất lớn hơn. Môđun kháng cắt, $G = E/2(1+\mu) = 0,8 \times 10^5$ Mpa [11, 12].

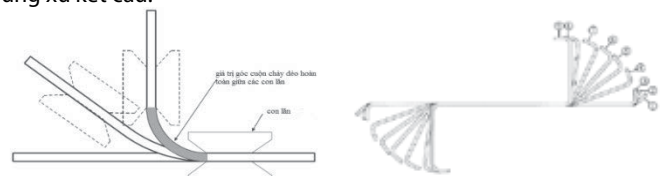
Tính dẻo được hiểu là khả năng của vật liệu có thể chịu được biến dạng dẻo mà không xuất hiện vết nứt. Tính dẻo không cần thiết cho quá trình tạo hình nguội nhưng cần cho sự phân bố ứng suất trong cấu kiện và liên kết khi có sự tập trung ứng suất. Theo quy phạm AISI, để đảm bảo tính dẻo cần thiết, thép dùng cho các bộ phận kết cấu và liên kết phải đảm bảo hai điều kiện là tỷ lệ cường độ bền trên cường độ chảy $F_u/F_y \geq 1,08$ và biến dạng tương đối $\epsilon \geq 10\%$ với chiều dài mẫu chuẩn 50,8mm. Tính dẻo cho thép tạo hình nguội phải phù hợp với dạng ứng dụng và khả năng thích ứng của vật liệu. Giá trị quy định cho các kết cấu chịu lực có thể không cần thiết cho các kết cấu bao che. Khả năng hàn được hiểu là khả năng của vật liệu đáp ứng các yêu cầu về hàn, không bị nứt, dễ liên kết, đáp ứng các yêu cầu về chế tạo mà không gặp khó khăn gì. Điều này phụ thuộc chủ yếu vào thành phần hóa học của vật liệu và công nghệ hàn sử dụng. Tất cả các vật liệu được quy định trong quy phạm AISI đều đáp ứng các yêu cầu về tính dẻo và khả năng hàn [12].

3. CHẾ TẠO THÉP THÀNH MỎNG

Cấu kiện tạo hình nguội thường được sản xuất bằng một trong hai cách sau: (1) Cuốn tạo hình và (2) dập tạo hình [3, 4].

a) Cuốn tạo hình

Cuốn tạo hình là cho dải thép chạy liên tục qua một loạt các con lăn trải qua quá trình chảy của thép để tạo thành hình dạng mong muốn. Mỗi cặp con lăn tạo ra một hình dạng cố định như trong Hình 5. Trong ví dụ này, tiết diện chữ Z được tạo thành bằng việc uốn tạo thành các sườn biên và sau đó uốn để tạo thành phần cánh, và nó trải qua các giai đoạn như Hình 5a. Nói chung, tiết diện càng phức tạp, càng đòi hỏi có nhiều giai đoạn. Trường hợp tiết diện rỗng hình chữ nhật, các con lăn đầu tiên tạo thành tiết diện hình tròn và hàn hai biên đối diện với nhau trước khi cuộn tạo thành hình chữ nhật hoặc hình vuông. Quá trình cuốn phổ biến hơn trong sản xuất số lượng lớn. Chi phí ban đầu cho máy móc cao hơn, nhưng chi phí lao động thấp hơn, một nhược điểm lớn của cuốn tạo hình là thời gian để thay đổi các con lăn cho các tiết diện có kích thước khác nhau. Dẫn đến các con lăn có thể di chuyển được sử dụng cho phép thay đổi nhanh chóng chiều rộng và chiều dày tiết diện. Cuốn tạo hình sẽ tạo ra nhiều dạng ứng suất dư trong tiết diện hơn khi so sánh với dập tạo hình, vì vậy cường độ tiết diện cũng khác nhau khi mất ổn định và chảy giao thoa với nhau. Đồng thời, các bán kính góc có xu hướng lớn hơn với tiết diện cuốn nguội, điều này ảnh hưởng đến ứng xử kết cấu.



a. Quá trình tạo hình của thép tấm

b. Quá trình tạo hình tiết diện

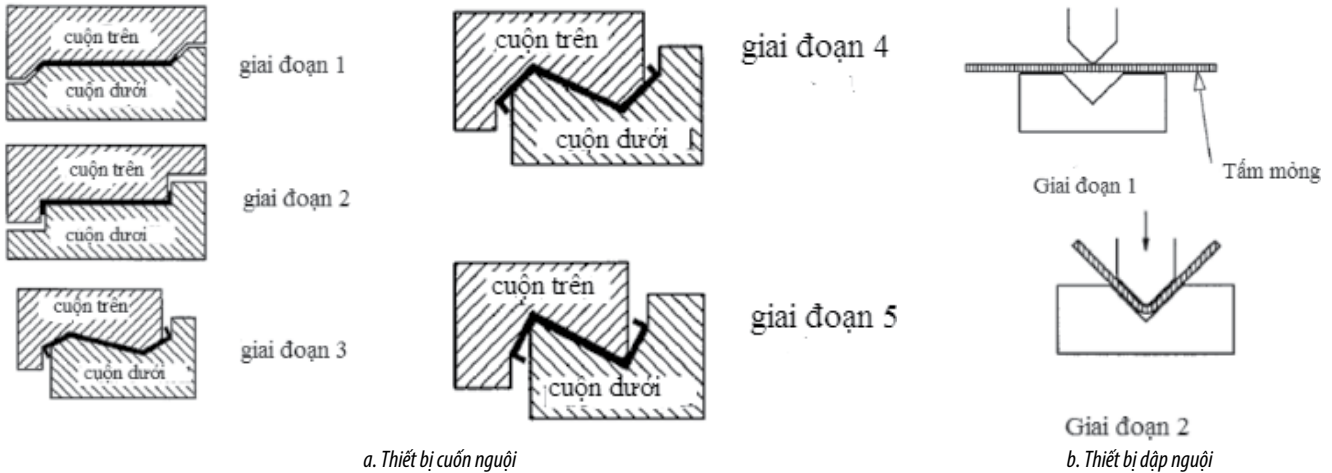
Hình 5. Tiết diện chữ Z cuốn nguội điển hình [3, 4]

b) Dập tạo hình

Dập tạo hình bao gồm quá trình dập hoàn toàn trong một lần trên toàn bộ chiều dài tiết diện, sử dụng một máy gọi là máy dập,

như trên Hình 1.18b. Với tiết diện có một số vị trí gập, bản thép cần được di chuyển để dập lại vài lần. Tiết diện hoàn thành sau đó được di chuyển ra khỏi máy dập và miếng mới được chèn vào cho tiết diện tiếp theo. Dập tạo hình thường sử dụng cho sản xuất số

lượng nhỏ khi yêu cầu đa dạng về hình dạng và không có chi phí cho máy móc cuộn tạo hình. Dập tạo hình có nhược điểm nữa là khó khăn trong sản xuất các tấm liên tục dài hơn 20 feet (6m).



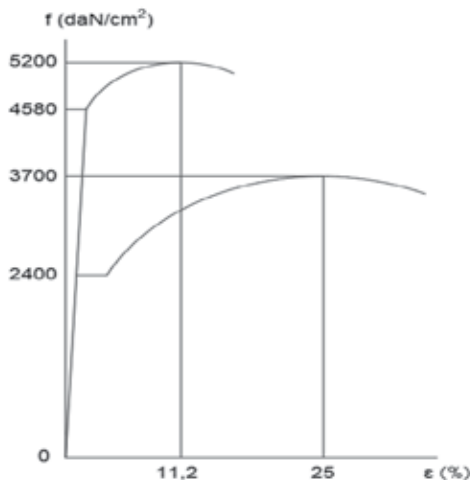
a. Thiết bị cuộn nguội

Hình 6. Các thiết bị tạo hình nguội [3, 4]

4. ẢNH HƯỞNG VỀ CƯỜNG ĐỘ CỦA THÉP TẠO HÌNH NGUỘI

a) Sự tăng cứng khi dập nguội

Khi bị gia công nguội, thép có hiện tượng cứng nguội, tăng giới hạn chảy, tăng giới hạn bền, giảm độ giãn. Xét trường hợp việc dập nguội một lần quá giai đoạn chảy, thép chuyển sang giai đoạn củng cố. Lúc này, cấu trúc tinh thể thép biến đổi, thép trở thành một loại thép khác, cứng hơn. Khi dập nguội nhiều lần, thép bị cứng nguội nhiều lần, cả ứng suất chảy và ứng suất bền đều tăng cao. Nguyên nhân là khi bị gia công nguội, thép bị biến dạng, chính sự biến dạng đó làm cho trong thép tồn tại ứng suất, gọi là ứng suất dư. Ứng suất dư luôn tự cân bằng trên toàn tiết diện [12], một ví dụ với thép CT3, qua dập nguội, ứng suất chảy tăng lên tới 80%, ứng suất bền tăng tới 35%. Sự tăng cường độ này diễn ra không đều trên tiết diện, tùy thuộc vào dụng cụ uốn nguội. Khi dùng máy cán, biến dạng trên toàn tiết diện, dù không đều. Khi dùng máy gập, chỉ có ở các góc là thay đổi nhiều nhất.



Hình 7. Đường cong ứng suất biến dạng

b) Xác định cường độ tính toán của thép sau khi dập nguội

Việc có thể sử dụng cường độ tăng cao của thép tạo hình nguội trong tính toán kết cấu được giải quyết khác nhau tùy Quy phạm của mỗi nước. Theo đó, Quy phạm Mỹ [11] đều cho phép nâng cao

cường độ của thép sau khi tạo hình nguội nếu thỏa mãn một số điều kiện. Khi tạo hình nguội, cường độ chảy của vật liệu tại các chỗ uốn cong lớn hơn cường độ chảy ban đầu do hiện tượng cứng nguội. Karman [12] đã thiết lập công thức xác định cường độ chảy nâng cao tại các góc:

$$\frac{F_{yc}}{F_{yv}} = \frac{B_c}{(R/t)^m} \tag{1.1}$$

Trong đó:

- F_{yc} - cường độ chảy tại góc uốn, Mpa;
- F_{yv} - cường độ chảy ban đầu của thép chưa gia công, Mpa;
- R - bán kính góc uốn phía trong, cm;
- t - chiều dày, cm;
- B_c, m là các hệ số xác định theo công thức dưới đây:

$$B_c = 3,69 \frac{F_{uv}}{F_{yv}} - 0,819 \left(\frac{F_{uv}}{F_{yv}} \right)^2 - 1,79 \tag{1.2}$$

$$m = 0,192 \frac{F_{uv}}{F_{yv}} - 0,068 \tag{1.3}$$

F_{uv} - cường độ kéo cực hạn ban đầu của thép chưa gia công, Mpa;

F_{yv} - như trong công thức (1.1),

Coi cường độ chảy nâng cao được phân đều cho các góc và các phần phẳng, trong tính toán thiết kế dùng cường độ chảy trung bình [12]:

$$F_{ya} = CF_{yc} + (1-C)F_{yf} \tag{1.4}$$

Trong đó:

- F_{ya} - cường độ chảy trung bình toàn tiết diện, Mpa;
- F_{yc} - cường độ chảy tại góc uốn xác định như trên, Mpa;
- F_{yf} - cường độ chảy trung bình tại các phần phẳng ($F_{yf} = F_{yv}$), Mpa;
- C - tỉ lệ diện tích góc trên toàn bộ diện tích tiết diện.

Ảnh hưởng của tạo hình nguội làm tăng cường độ chảy của vật liệu, kể đến trong tính toán theo một trong hai cách sau: 1) Xét đến sự phát triển giới hạn chảy ở các góc, bỏ qua sự phát triển giới hạn chảy tại các phần phẳng. Khi đó sự phát triển cường độ được xác định theo công thức (1.1) hoặc bằng thí nghiệm; 2) Xét sự phát triển cường độ tại góc và cả phần phẳng. Dùng công thức (1.4) để xác

