Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ ram đến tổ chức và cơ tính của thép hợp kim độ bền cao 12Cr2NiWV

Lê Hải Ninh*, Nguyễn Văn Minh, Nguyễn Huynh

Viện Công nghệ/Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng.
*Email: lehaininh2003@gmail.com
Nhận bài: 02/4/2022; Hoàn thiện: 18/5/2022; Chấp nhận đăng: 08/6/2022; Xuất bản: 28/6/2022.
DOI: https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.80.2022.100-105

TÓM TẮT

Thép 12CrNiWV sau khi tôi (hóa bền ở 910 ^oC) cần tiến hành ram khử ứng suất cũng như làm cân bằng tổ chức trước khi đưa chi tiết vào trạng thái hoạt động. Trạng thái ứng suất dư lớn, tính dẻo kém sau hóa bền là nguyên nhân nguy hiểm trực tiếp cho chi tiết, đặc biệt khi chịu tải lớn có thể làm vết nứt phát triển nhanh, vật liệu có xu hướng phá hủy giòn. Do đó, lựa chọn chế độ ram để hoàn thiện quá trình xử lý nhiệt là bài toán quan trọng đối với thép đặc biệt. Kết quả thí nghiệm của bài báo hướng tới chế độ ram hợp lý, để thép hợp kim 12CrNiWV có thể phát huy được hết khả năng sử dụng trong các lĩnh vực công nghệ cao như chế tạo máy, hàng không, vũ trụ.

Từ khóa: Xử lý nhiệt; Thép hợp kim; Thép đặc biệt; Ram; Tổ chức thép ram.

1. MỞ ĐẦU

Thép hợp kim kết cấu 12Cr2NiWV được sản xuất theo GOST 4543-71, xuất hiện nhiều trong các lĩnh vực công nghiệp chế tạo máy (bao gồm chế tạo máy công nghiệp, máy nông nghiệp và công nghiệp ô tô), công nghiệp cơ khí nặng, trong các máy công cụ, khai khoáng và các ngành công nghiệp quan trọng khác (phù hợp để chế tạo các kết cấu chịu tải nặng). Điểm nổi bật của thép 12Cr2NiWV khi xử lý nhiệt hợp lý sẽ đạt được độ bền cao mà vẫn đảm bảo tính dẻo và độ dai va đập tương đối tốt.

Ngoài ra, thép có tính bền nhiệt nên được dùng trong chế tạo thiết bị năng lượng làm việc dài ngày trong điều kiện nhiệt độ cao 600 ÷ 650 ºC (trong khoảng nhiệt độ đến 500 ºC độ bền vẫn duy trì ở 1050 MPa đến 1010 MPa [1]). Khi đó hàm lượng Cr có vai trò rất quan trọng trong thép cùng với sự bổ sung các nguyên tố tạo carbide mạnh (như Mo, W, Nb, V). Chính sự hình thành cácbit (của các nguyên tố tạo cácbit mạnh), các pha liên kim cũng như sự hóa bền dung dịch rắn đã tăng tính bền nhiệt cho thép. Hàm lượng Cr trong thép (khoảng 2%) cùng với niken (1%), silic, mangan nằm trong trạng thái dung dịch rắn làm tăng tính thấm tôi cho thép. Niken và crom tạo dung dịch rắn hoàn toàn trong γ-Fe và α-Fe, có tính dẻo và tăng cường độ dai va đập [2]. Mặc dù theo lý thuyết, khả năng giòn ram tăng lên khi xuất hiện Cr, Ni, Mn (đặc biệt Cr+Ni, Cr+Mn, Cr+Mn+Si,...) nhưng nếu đảm bảo hàm lượng W (1,2÷1,5%) và Mo (0,4 ÷ 0,5 %) thì sẽ phòng ngừa được hiện tượng này. Theo tài liệu, với thành phần của thép 12Cr2NiWV sẽ không có hiện tượng giòn ram và đốm trắng.

Quá trình nung xử lý nhiệt thép 12Cr2NiWV căn cứ theo lý thuyết chuyển pha. Nung thép lên nhiệt độ cao hơn đường chuyển biến A_{c3} (đối với mác thép này A_{c3} khoảng 860 °C [3]) để đạt trạng thái pha đồng nhất γ rồi làm nguội với mục tiêu mactenxit hóa tối đa. Ni, Cr, W, V về cơ bản làm hạ nhiệt độ bắt đầu và kết thúc của chuyển biến γ → α-Fe, tuy nhiên, nhiệt độ tới hạn để bắt đầu xảy ra chuyển biến mactenxit đối với thép này cũng đạt khoảng 320 ÷ 340 °C. Nhìn chung mặc dù các pha nhận được sau quá trình này không đơn nhất nhưng cơ bản sẽ là chuyển pha không khuếch tán, tức là nguyên tử của nguyên tố hòa tan không thoát khỏi mạng tinh thể α-Fe (vẫn nằm dạng dung dịch rắn xen kẽ quá bão hòa), gây ra xô lệch mạng đáng kể, mật độ khuyết tật và nội ứng suất cũng tăng lên [4].

Như vậy, sau tôi cần phải ram thép để chống giòn cho vật liệu cũng như khử bớt nội ứng suất

xô lệch mạng do kết quả quá trình hình thành dung dịch rắn quá bão hòa α gây ra [5, 6]. Về bản chất, khi tăng nhiệt độ ram sẽ làm giảm hệ số chính phương của mạng tinh thể c/a mactenxit (dưới 315 ^oC, c/a<1) [6, 7]. Các chế độ ram được tiến hành trong giới hạn nhiệt độ quy định và cần được khảo sát, đánh giá, nghiên cứu lựa chọn cụ thể, phù hợp bằng thực nghiệm.

Khảo sát hiệu quả ram của mác thép này là một trong những vấn đề vừa có tính khoa học vừa có tính thực tiễn. Thông qua cơ chế xử lý nhiệt phù hợp, các ưu điểm của thép được bộc lộ rõ nét, những minh chứng về chất lượng của vật liệu ở góc độ kim loại học được sáng tỏ hơn, từ đó có những nhận định, tính toán và định hướng sử dụng vật liệu đạt hiệu quả cao nhất.

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Các thiết bị và vật tư nghiên cứu

Thực nghiệm sử dụng mac thép 12Cr2NiWV được chế tạo tại Việt Nam. Thép được nấu luyện 3 giai đoạn: nấu luyện trong lò hồ quang, hợp kim hóa trong lò trung tần, tinh luyện bằng thiết bị điện xỉ; phôi được gia công rèn, cán và xử lý cơ khí đạt quy cách cần thiết. Tiến hành xử lý nhiệt, thử nghiệm cơ tính theo tiêu chuẩn.

Về chất lượng phôi thép, tiêu chuẩn giới hạn tạp chất đã được nhóm nghiên cứu lựa chọn ở mức rất thấp (P, S ≤ 0,012), thấp hơn đáng kể so với giới hạn thông thường của mác thép kết cấu [3]. Theo căn cứ lý thuyết, giới hạn tạp chất đối với thép chất lượng cao là P, S không vượt quá 0,025 %, còn đối với thép chất lượng đặc biệt cao thì giới hạn này cũng chỉ là không quá 0,015 % [2]. Trên thực tế, thành phần của thép đạt được sau khi tinh luyện như trong bảng 1.

Bảng 1. *Thành phần của thanh thép được lấy mẫu.*

Nguyên tố	**C**	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**Cr**	**Ni**	**V**	**W**
Hàm lượng, %	*0,152*	*0,192*	*0,449*	*0,009*	*0,007*	*2,11*	*0,990*	*0,190*	*1,127*

a) Thanh thép Φ40×500mm

b)Lò xử lý nhiệt Nabertherm

Hình 1. *Một số vật tư đầu vào và thiết bị phục vụ nghiên cứu.*

Sử dụng các phương pháp nghiên cứu vật liệu học như khảo sát ảnh hiển vi quang học, đo độ cứng, đo độ bền,... Tạo mẫu nghiên cứu từ thanh thép có kích thước Φ40×500mm (hình 1a) và tiến hành thực nghiệm xử lý nhiệt bằng lò nung Nabertherm của Đức (hình 1b). Gia công phôi thép trên các máy gia công cơ khí; đo độ cứng, độ bền bằng các thiết bị chuyên dụng (máy đo độ cứng FM-100, thiết bị test nhanh độ cứng EQUO TIP2, thiết bị kéo nén TT HW2-1000), tẩm thực bằng dung dịch 5-8% HNO_3 trong etanol và tạo ảnh bằng kính hiển vi Axio Observer D1M.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Tiến hành nghiên cứu thực nghiệm: sử dụng mẫu thử để tôi, ram, tìm hiểu quy luật thay đổi cơ tính theo chế độ ram. Đo độ cứng, thử bền, khảo sát tổ chức tế vi tương ứng với chế độ xử lý nhiệt để kiểm chứng.

Căn cứ vào số liệu và kết quả thực nghiệm để rút ra kết luận trên cơ sở lý thuyết cũng như tham khảo kết quả các nghiên cứu liên quan đã được công bố.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

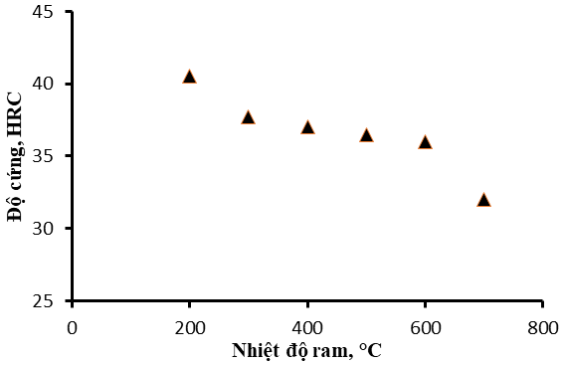
3.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ ram đến cơ tính vật liệu

Trên lý thuyết, nhiệt độ tôi họ thép hợp kim thấp độ bền cao 12Cr2NiWV có thể dao động

trong khoảng 900 ÷ 950 °C. Đối với nghiên cứu này, lựa chọn nhiệt đột tôi ở mức 910 °C (là nhiệt độ nằm giữa khoảng cho phép và trên thực tế cũng thường được sử dụng như nhiệt độ tôi "tiêu chuẩn" để gia công một số sản phẩm cho hàng không) và thực nghiệm đối chứng, sau đó tiến hành ram mẫu để kiểm tra cơ tính. Nhìn chung, phôi thép biến dạng không đáng kể (có thể bỏ qua) sau khi xử lý nhiệt.

Ban đầu cần lựa chọn khảo sát dải nhiệt độ ram từ thấp đến cao (từ 200 °C đến 700 °C) để nhận định quy luật thay đổi độ cứng trên bề mặt mẫu thép (hình 2). Kết quả kiểm tra cơ tính cho thấy khi ram thấp (khoảng 120 ÷ 200 °C) và ram trung bình (khoảng 350 ÷ 450 °C) cả hai giá trị độ bền (σ, $\sigma_{0,2}$) đều tương đối cao và nằm cách xa nhau; ngược lại, khi nhiệt độ ram vượt quá 600 ÷ 650 °C, độ bền của thép giảm đột ngột (hình 3).

So với thép cácbon cao thì thép 12Cr2NiWV tương đối dẻo (mềm), khi tôi do hàm lượng các nguyên tố hợp kim (gồm Cr, Ni, W, V) duy trì độ cứng không quá cao (theo tính toán đạt trung bình khoảng 36 HRC) nhưng đảm bảo khả độ dai tốt. Theo quy luật của thép hợp kim thấp độ bền cao, muốn độ cứng cao hơn (khoảng 58 ÷ 62 HRC) thì chi tiết buộc phải tiến hành thấm carbon rồi mới tôi, ram.



Hình 2. *Sự thay đổi độ cứng khi ram thép.*

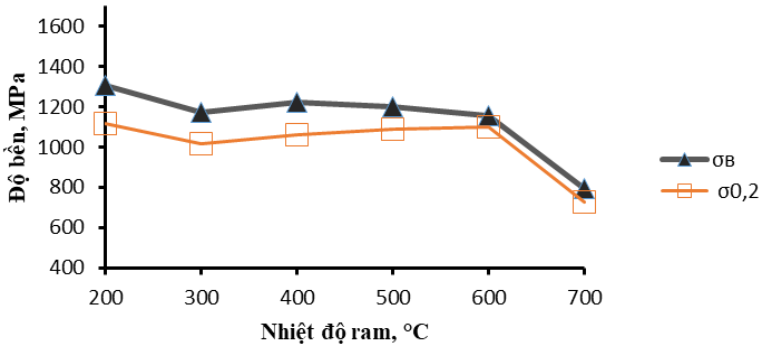
Sự thay đổi cơ tính trên đồ thị thực nghiệm về cơ bản được lý giải bằng hiện tượng biến đổi của tổ chức vật liệu từ quan điểm kim loại học: theo đó, trong khoảng nhiệt độ dưới 250 °C, chỉ hình thành mactenxit ram nên thép còn tương đối cứng độ dẻo và dai va đập còn thấp; ở khoảng nhiệt độ 300 ÷ 450 °C, tạo thành trôxtit ram dưới dạng tổ chức hỗn hợp ferit và cácbit đồng thời giảm mật độ lệch (khuyết tật mạng) về khoảng 10^9 cm^{-2} (ở mức độ tăng bền thì mật độ lệch vào khoảng $10^{10} \div 10^{12}$ cm^{-2}, trong khi đó ở mật độ khoảng 10^6 cm^{-2} thì độ bền đạt giá trị cực tiểu)[1], làm giảm mạnh ứng suất dư và do đó hạ độ cứng cho thép, tăng độ dai va đập [2, 5]; nhiệt độ ram ở 700 °C bắt đầu được coi là cao vì khi nâng nhiệt tiệm cận điểm tới hạn A_{c1} (khoảng 800 ÷ 820 °C) [3], có thể bắt đầu dẫn tới chuyển biến pha γ làm mất bền thép một cách rõ rệt (hình 3).

Theo lý thuyết có thể lựa chọn nhiệt độ ram cao trong dải rộng, từ 500 °C đến 700 °C [7, 8]. Tham khảo tài liệu, đối với thép này nên ram để đạt độ bền kéo theo lý thuyết vào khoảng 1030 MPa [2, 3]. Thực nghiệm sơ bộ (hình 3) dự báo nên ram cao trong khoảng 500 ÷ 600 °C (quá 600 °C, độ bền bắt đầu giảm mạnh) để hướng đến tổ chức pha xoocbit ram; khi đó giá trị độ bền của thép tương đối ổn định (có độ chụm), đảm bảo cân bằng các yêu cầu cơ tính tiêu chuẩn về xử lý nhiệt, đáp ứng yêu cầu chịu tải trong quá trình ứng dụng vật liệu [4, 7].

Như vậy, sau khi tôi ở chế độ tôi phù hợp, kết quả ram ảnh hưởng rất rõ rệt đến độ bền vật liệu (giới hạn chảy quy ước, giới hạn bền), đồng thời ảnh hưởng đến khả năng chịu va đập của

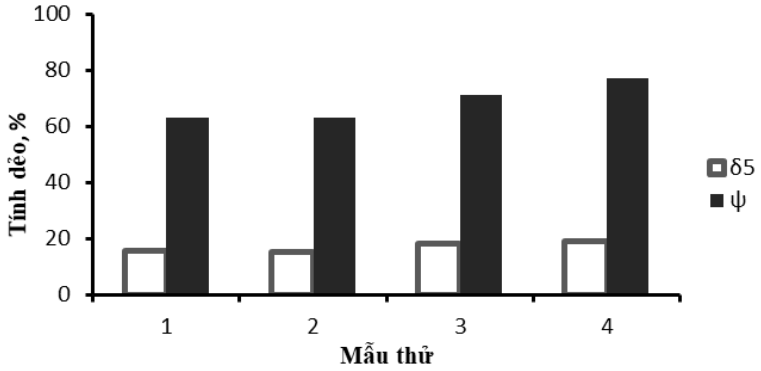
[1] Mật độ lệch là độ dài tổng của lệch trên một đơn vị thể tích $\rho = \frac{\sum l}{V} cm^{-2}$

thép 12Cr2NiWV. Nhiệt độ ram đã thực nghiệm được đề xuất khi xem xét cơ tính tổng hợp (hình 2, hình 3) tương ứng với chế độ sau: tôi ở 910 °C trong 30 phút, làm nguội trong môi trường dầu, ram 580 °C trong 3 h (độ dai va đập đạt được a_k = 8,7 Kgf.m/cm^2).



Hình 3. *Sự thay đổi cơ tính theo nhiệt độ ram (sau khi tôi ở 910 °C).*

Với ưu điểm rõ rệt về tổ chức và cơ tính khi ram cao thép 12Cr2NiWV, tiến hành thực nghiệm bổ sung cho chế độ ram cao để so sánh và kết luận nhiệt độ tối ưu thông qua sử dụng 4 mẫu khác nhau trong dải nhiệt độ ram cao theo lý thuyết (mẫu 1 ram 550 °C, mẫu 2: 600 °C, mẫu 3: 650 °C, mẫu 4: 700 °C). Kiểm tra độ dẻo của mẫu, thấy rằng nhiệt độ ram tăng thì tính dẻo cũng tăng; ban đầu tăng không đáng kể (mẫu 2 và 3) nhưng có biểu hiện tăng mạnh hơn khi vượt quá nhiệt độ 650 °C (mẫu 3 và 4). Điều này cho phép xác định khoảng ổn định cơ tính tương ứng với nhiệt độ ram trong khoảng 550 ÷ 600 °C (hình 4).



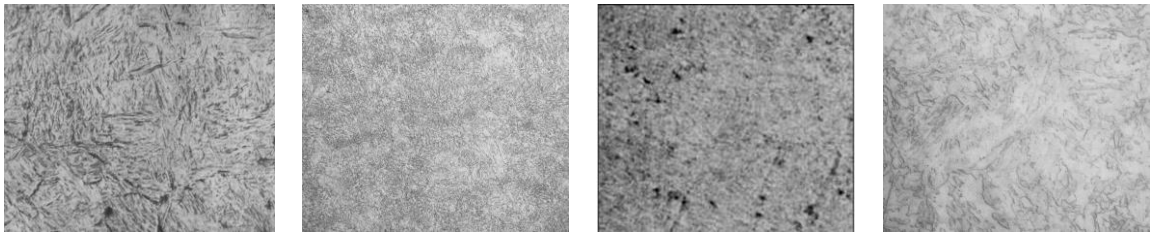
Hình 4. *So sánh độ dẻo của các mẫu thử.*

3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ ram đến tổ chức vật liệu

Để làm rõ sự tăng bền của mẫu thử dưới góc độ chuyển biến pha và kiểm chứng ảnh hưởng của nhiệt độ ram, tiến hành khảo sát ảnh tổ chức tế vi của vật liệu. Về nguyên tắc, không có chế độ ram nào vượt quá 650 °C nên không khảo sát ở nhiệt độ cao; đồng thời, để làm rõ hơn hiệu quả của ram cao thép 12Cr2NiWV so với các chế độ ram khác thì tiến hành khảo sát một số chế độ ram dưới 500 °C để đối chứng. Căn cứ trên kết quả kiểm tra cơ tính sau ram (hình 2, hình 3), lựa chọn thêm chế độ ram ở nhiệt độ 580 °C (nằm trong khoảng 550 ÷ 600 °C, là khoảng nhiệt độ có các chỉ số cơ tính tốt).

Khảo sát ảnh hiển vi của tổ chức mẫu sau khi xử lý nhiệt ở chế độ lựa chọn (tôi ở 910 °C trong 30 phút, làm nguội trong môi trường dầu, ram 580 °C trong 3 h). Tổ chức nhận được của thép tương đối mịn khó phân biệt biên giới hạt ở độ phóng đại ×200 (hình 5b). Đặc điểm như vậy thể hiện tổ chức xoocbit ram với các hạt nền trắng có các điểm dạng cầu màu đen. Sự xuất hiện nền trắng với các hạt đen trên ảnh hiển vi của thép là do quá trình khuếch tán mạnh làm tăng kích

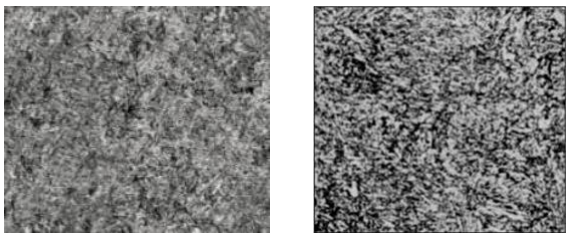
thước hạt ferit cũng như cácbit, từ đó làm giảm mật độ lệch và khử bỏ ứng suất dư. Nếu quan sát thô đại, hình ảnh của xoocbit ram này có nét tương đồng với mactenxit, bảo lưu hướng của mactenxit nhưng khi phóng đại dần lên ×500 và 1000 (hình 5c, 5d) sẽ quan sát được các hạt cácbit tiết ra nhỏ mịn mà mactenxit không có (mactenxit dạng kim của thép sau tôi thể hiện trên hình 4a tương đối sắc cạnh). Trong trường hợp xử lý nhiệt các loại thép hóa tốt, cácbit ram dạng cầu phân tán có tác dụng làm tăng độ dẻo và độ dai va đập và làm tăng cơ tính tổng hợp cho vật liệu [9].



a) 1000× *b) 200×* *c) 500×* *d) 1000×*

Hình 5. *Ảnh hiển vi quang học của mẫu thép: tôi ở 910 °C (a) và tôi ở 910 °C + ram ở 580 °C (b, c, d).*

Một lần nữa xác thực ở trạng thái này, thép đạt độ dai va đập ở mức tối ưu nhất (a_k=8,7 Kgf.m/cm^2) cùng với độ bền cao do tổ chức tế vi là các lớp dẻo và cứng xếp xen kẽ nhau (hình 5d, xoocbit có dạng các sọc rằn ri). Do đó, cơ tính tổng hợp thép 12Cr2NiWV đo được thực tế đảm bảo vừa chịu tải vừa chịu va đập, có độ dẻo, dai tương đối lớn (chế độ ram 580 °C đạt δ_5: 15%, ψ: 63%, $\sigma_{0,2}$: 1030 MPa, $\sigma_в$: 1100 MPa là đảm bảo cân bằng; nếu đưa nhiệt độ ram lên 650 °C mặc dù δ_5 đạt: 18%, ψ: 71% nhưng độ bền $\sigma_{0,2}$ chỉ còn: 940 MPa và $\sigma_в$: 980 MPa). Đối chiếu với đường cong Oding - Botrvar về mối quan hệ giữa mật độ lệch với giới hạn bền của kim loại đa tinh thể, mật độ khuyết tật khoảng $10^7 \div 10^8$ cm^{-2}.



a) Ram 200 °C (500 ×) *b) Ram 400 °C (500 ×)*

Hình 6. *Tổ chức của thép ở các chế độ ram.*

Ở các nhiệt độ ram thấp hơn, có thể thấy tổ chức của thép khi ram ở nhiệt độ 200 °C (hình 6a), dấu hiệu hình ảnh chủ yếu là mactenxit ram. Kết quả độ cứng ở mức tương đối thấp (~ 40 HRC) do hiện tượng phân rã cácbon khỏi dung dịch rắn quá bão hòa và làm tăng tính dẻo. Khi ram tới mức 400 °C (hình 6b), trên ảnh là các điểm đen trắng phân biệt rõ hơn và có xu hướng cầu hóa cho thấy mactenxit tiếp tục phân rã thành trôxtit (hỗn hợp 2 pha ferrit-xêmentit) ổn định hơn, độ cứng của thép 12Cr2NiWV khi đó giảm về khoảng 36,5 ÷ 37,5 HRC.

4. KẾT LUẬN

- Nghiên cứu tổ chức khi tiến hành tôi ở 910 °C kết hợp ram cao, kết quả cho thấy có sự phân rã mactenxit thành pha hỗn hợp cùng tinh phân tán cao, do đó, đáp ứng cơ tính tổng hợp đảm bảo yêu cầu làm việc trong điều kiện chịu tải lớn mà vẫn duy trì được độ dẻo, dai va đập;

- Nghiên cứu dải nhiệt độ ram đối với thép hợp kim độ bền cao 12Cr2NiWV đã chứng thực sự thay đổi cơ tính của thép có tính quy luật và phụ thuộc vào nhiệt độ ram, từ đó cho phép xác định được nhiệt độ ram cao (550 ÷ 600 °C) phù hợp với yêu cầu mác thép chịu tải;

- Thép đạt hiệu quả xử lý nhiệt hóa bền tương đối tốt và cho cơ tính tổng hợp tối ưu: xuất phát ở trạng thái thường hóa với độ bền 550 MPa (độ giãn dài 15%), sau tôi và ram phù hợp, thép có thể đạt độ bền 940 ÷ 1000 MPa trong khi độ giãn dài về cơ bản không bị giảm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. В.С. Кушнер, Д.А. Негров, О.Ю. Бургонова и др, *"Материаловедение и технология конструкционных материалов"*, Омск: Изд-во, ОмГТУ, с. 447, (2012).

[2]. С.А. Никулин, В.Ю. Турилина, *"Материаловедение и термическая обработка"*, 2-е изд., перераб. и доп., М.: Изд. Дом МИСиС, 171с, (2013).

[3]. А.С. Зубченко (ред.), *"Марочник сталей и сплавов",* 2-е изд., перераб. и доп, М.: Машиностроение-1, 784с, (2003).

[4]. А.А. Ковалева, Е.С. Лопатина, В.И. Аникина и др, *"Специальные стали и сплавы",* СФУ, 232с, (2016).

[5]. Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. "*Материаловедение*", 3-е изд., перераб. и доп., М.: Машиностроение, 528с. Ил, (1990).

[6]. 吴承建, 陈国良, 强文江, *"金属材料学"* (第2版). 冶金工业出版社, (2009), 436页.

[7]. George E. Totten, *"Heat treatment metallurgy and technologies",* Portland State University Portland, Oregon, (2006).

[8]. V.Yu. Turilina (Edited by professor S.A. Nikulin), *"Material Science: Mechanical properties of metals. Heat treatment of metals. Special steels and alloys*", MISiS Publishing House, p. 154, (2013).

[9]. 崔振铎，刘华山, *"金属材料及热处理"*, 中南大学出版社, (2019).

ABSTRACT

The influence of the tempering temperature on the structures and the mechanical properties of the high-strength alloy steel 12Cr2NiW

Quenched steel 12CrNiWV (after hardening at 910 ^oC) needs to apply tempering to eliminate stress and to equalize the structure of steel before operation. A highly stressed state and low plasticity after hardening cause a direct danger for the parts, especially under heavy load, the material tends to be a brittle fracture. The choice of tempering to complete the heat treatment process is an important issue for special steels. The experimental results of the article direct towards a reasonable tempering regime, so that alloy steel 12CrNiWV can develop its ability in high-tech industries such as mechanical engineering, aircraft engineering, and aerospace technology.

Keywords: Heat treatment; Alloy steel; Special steel; Tempering process; Tempering structure steel.