

**Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian giữ nhiệt của xử lý lạnh
đến tổ chức tế vi và độ cứng của thép SKD11**

Lê Thị Giang*, Trần Văn Khanh

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Thủy lợi,

175 Tây Sơn, phường Kim Liên, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 13/4/2026; ngày chuyển phản biện 14/4/2026;

ngày nhận phản biện 4/5/2026; ngày chấp nhận đăng 8/5/2026

Tóm tắt:

Nghiên cứu này khảo sát ảnh hưởng của các thông số công nghệ trong xử lý lạnh (nhiệt độ và thời gian giữ nhiệt) kết hợp với ram hai lần đến tổ chức tế vi và độ cứng của thép SKD11. Sau khi tôi, các mẫu thép được xử lý lạnh ở các nhiệt độ -20, -80 và -196°C với thời gian giữ nhiệt lần lượt là 2, 12 và 24 giờ, sau đó tiến hành ram hai lần ở 520°C. Kết quả cho thấy, quá trình xử lý lạnh đã làm thúc đẩy quá trình chuyển biến austenit dư thành mactenxit, đồng thời thúc đẩy sự hình thành cácbít thứ cấp kích thước nhỏ mịn, phân bố đều trên nền mactenxit. Hiệu quả này thể hiện rõ rệt nhất ở nhiệt độ -196°C với thời gian giữ nhiệt 24 giờ, và ram hai lần. Sau khi xử lý lạnh, độ cứng của thép tăng khi giảm nhiệt độ và kéo dài thời gian xử lý lạnh, đạt giá trị cao nhất tại điều kiện -196°C/24 giờ. Sau khi ram, độ cứng có xu hướng giảm do sự thoát cacbon khỏi nền mactenxit để hình thành cácbít. Tuy nhiên, sự kết hợp giữa xử lý lạnh và ram hai lần vẫn đảm bảo độ cứng cao, đồng thời hình thành nhiều hạt cácbít nhỏ mịn trên nền mactenxit ram. Đây là yếu tố cốt lõi góp phần nâng cao khả năng chống mài mòn cho thép SKD11 trong ứng dụng làm khuôn dập nguội.

Từ khóa: austenit dư, cácbít, độ cứng, mactenxit, xử lý lạnh.

Chỉ số phân loại: 2.3

**A study on the effect of temperature and holding time of cryogenic treatment on
microstructure and hardness of SKD11 steel**

Thi Giang Le*, Van Khanh Tran

Faculty of Mechanical Engineering, Thuy Loi University,

175 Tay Son Street, Kim Lien Ward, Hanoi, Vietnam

Received 13 April 2026; revises 4 April 2026; accepted 8 May 2026

*Tác giả liên hệ: Email: ltgiang@thlu.edu.vn

Abstract:

This study investigates the effects of cryogenic treatment parameters (temperature and holding time) combined with double tempering on the microstructure and hardness of SKD11 steel. After quenching, the steel samples were subjected to cryogenic treatment at temperatures of -20, -80, and -196°C with holding times of 2, 12, and 24 hours, followed by double tempering at 520°C. The results indicated that cryogenic treatment promotes the transformation of retained austenite into martensite. Furthermore, it enhances the precipitation of fine secondary carbides, which are uniformly distributed within the martensitic matrix. This effect was most pronounced in the specimen treated at -196°C for a 24-hour holding time combined with double tempering. After cryogenic treatment, the hardness of the steel increases with decreasing cryogenic treatment temperature and increasing holding time, reaching its highest value at -196°C for 24 h. Following tempering, the hardness tended to decrease due to carbon depletion from the martensitic matrix resulting from fine carbide precipitation. However, the combination of cryogenic treatment and double tempering still maintains high hardness and promotes the formation of a high density of fine secondary carbides in the tempered martensitic matrix. This is the core factor contributing to the enhancement of the wear resistance of SKD11 steel for cold-work die applications.

Keywords: carbide, cryogenic treatment, hardness, martensite, retained austenite.

Classification number: 2.3

1. Đặt vấn đề

SKD11 là loại thép dụng cụ với hàm lượng các nguyên tố hợp kim cao được sử dụng rộng rãi trong chế tạo khuôn dập nguội nhờ sự kết hợp tốt giữa độ cứng, khả năng chống mài mòn và độ ổn định kích thước [1-3]. Tuy nhiên, sau quá trình tôi, trong thép vẫn tồn tại một lượng đáng kể austenit dư do hàm lượng nguyên tố hợp kim cao và tốc độ làm nguội chưa đủ để chuyển biến hoàn toàn sang mactenxit. Sự tồn tại của austenit dư không chỉ làm giảm độ cứng mà còn ảnh hưởng đến độ ổn định kích thước và khả năng làm việc lâu dài của khuôn trong điều kiện tải trọng và mài mòn cao [4-6]. Trong thực tế, quá trình ram được áp dụng nhằm ổn định tổ chức và cải thiện cơ tính của thép sau tôi. Tuy nhiên, chỉ riêng quá trình ram chưa đủ để loại bỏ hoàn toàn austenit dư, đặc biệt đối với các loại thép hợp kim cao như SKD11. Do đó, việc nghiên cứu và áp dụng các phương pháp xử lý bổ sung nhằm giảm hàm lượng austenit dư và cải thiện tổ chức tế vi là mục tiêu quan trọng.

Xử lý lạnh là một trong những phương pháp hiệu quả nhằm thúc đẩy chuyển biến austenit dư thành mactenxit thông qua việc hạ thấp nhiệt độ xuống vùng rất thấp. Bên cạnh đó, xử lý lạnh thúc đẩy sự hình thành các cacbít thứ cấp kích thước nhỏ và phân bố

đồng đều trong nền mactenxit, từ đó góp phần cải thiện độ cứng, khả năng chống mài mòn cũng như độ dai va đập của vật liệu [7, 8]. Tuy nhiên, hiệu quả của quá trình này phụ thuộc vào các thông số công nghệ như nhiệt độ xử lý và thời gian giữ nhiệt, cũng như sự kết hợp với chế độ ram sau đó.

Một số nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng, ảnh hưởng của xử lý lạnh đối với thép dụng cụ, như sau khi xử lý lạnh âm sâu ở -196°C với giữ nhiệt 24 giờ giúp tăng đáng kể độ cứng đồng thời kết hợp với ram làm tăng mật độ cacbít nhỏ mịn và giảm hàm lượng austenit dư còn trong thép, từ đó cải thiện khả năng chống mài mòn cho thép SKD11 [9]. Tuy nhiên, mức độ chuyển biến pha và sự thay đổi cơ tính của thép dụng cụ khi kết hợp với các chế độ ram khác nhau vẫn chưa được nghiên cứu một cách cụ thể và đầy đủ [2, 4, 10, 11]. Do đó, việc làm rõ mối quan hệ giữa điều kiện xử lý lạnh, quá trình ram và sự biến đổi tổ chức tế vi cũng như độ cứng của thép SKD11 là cần thiết cả về mặt khoa học và thực tiễn.

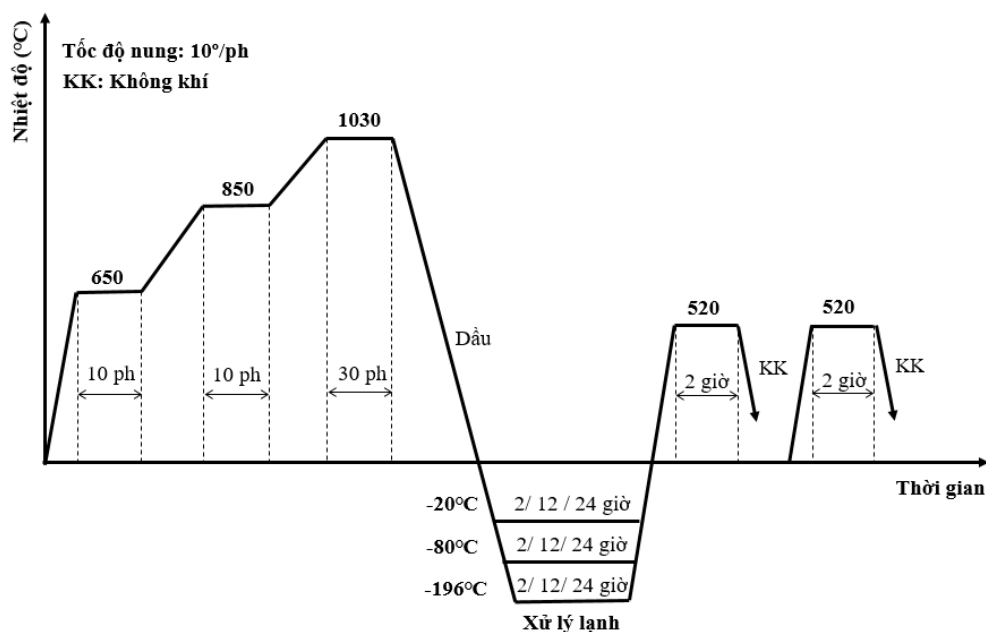
Trên cơ sở đó, nghiên cứu này tập trung khảo sát ảnh hưởng của xử lý lạnh ở các nhiệt độ khác nhau (-20 , -80 và -196°C) với các thời gian giữ nhiệt khác nhau (2, 12 và 24 giờ), kết hợp với quá trình ram, đến tổ chức tế vi và độ cứng của thép SKD11. Kết quả nghiên cứu nhằm góp phần làm sáng tỏ hơn cơ chế chuyển biến pha, sự hình thành và phân bố cacbít, từ đó đề xuất quy trình tối ưu hóa quy trình xử lý nhiệt tối ưu nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng của thép SKD11 trong ứng dụng khuôn dập nguội.

2. Thực nghiệm

2.1. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

Thanh thép SKD11 ở trạng thái cung cấp có thành phần hóa học theo phần trăm khối lượng gồm 1,44% C, 11,37% Cr, 0,84% Mo, 0,27% V, 0,26% Si, 0,23% Mn, 0,021% P, và 0,007% S [9], và được cắt thành các mẫu nhỏ có kích thước $20 \times 14 \times 14$ mm để thuận lợi cho việc nghiên cứu tổ chức tế vi và cơ tính của vật liệu.

Quy trình xử lý nhiệt cho thép SKD11 được thực hiện qua các giai đoạn như sau: Mẫu được nung phân cấp 2 lần ở nhiệt độ 650 và 850°C với thời gian giữ nhiệt 10 phút cho mỗi giai đoạn nhằm hạn chế xảy ra ứng suất nhiệt và đảm bảo sự đồng đều nhiệt trên toàn bộ mẫu trước khi được nung đến nhiệt độ tôi. Sau đó, mẫu được tôi ở nhiệt độ 1030°C giữ nhiệt 30 phút và làm nguội trong dầu. Tiếp theo, nguyên công xử lý lạnh được áp dụng ngay sau khi tôi với mục đích giảm hàm lượng austenit dư. Các chế độ xử lý lạnh được thực hiện ở ba nhiệt độ khác nhau là -20 , -80 và -196°C kết hợp với ba chế độ giữ nhiệt khác nhau là 2, 12 và 24 giờ. Sau khi xử lý lạnh, các mẫu được ram 2 lần ở 520°C với thời gian giữ nhiệt 2 giờ cho mỗi lần ram, sau đó mẫu được làm nguội ngoài không khí. Tốc độ nung được sử dụng trong toàn bộ quy trình xử lý nhiệt là 10°C/phút . Sơ đồ quy trình xử lý nhiệt kết hợp với xử lý lạnh được thể hiện như trong hình 1.



Hình 1. Sơ đồ tổng quát quy trình xử lý nhiệt của thép SKD11 trong nghiên cứu.

Ký hiệu các mẫu nghiên cứu tương ứng với từng quy trình xử lý nhiệt được trình bày chi tiết trong bảng 1.

Bảng 1. Ký hiệu mẫu nghiên cứu theo các quy trình xử lý nhiệt khác nhau.

Ký hiệu mẫu	Tôi		Xử lý lạnh		Ram		Chú thích
	Nhiệt độ (°C)	Thời gian (phút)	Nhiệt độ (°C)	Thời gian (h)	Nhiệt độ (°C)	Thời gian (h)	
CT-2				2	-	-	Tôi + xử lý lạnh ở -20/-80/-196°C trong 2 giờ
CT-12				12	-	-	Tôi + xử lý lạnh ở -20/-80/-196°C trong 12 giờ
CT-24				24	-	-	Tôi + xử lý lạnh ở -20/-80/-196°C trong 24 giờ
QCT-2				2	520	2	Tôi + xử lý lạnh ở -20/-80/-196°C trong 2 giờ + ram 1 lần
QCT-12	1030	30	-20/-80/-196	12	520	2	Tôi + xử lý lạnh ở -20/-80/-196°C trong 12 giờ + ram 1 lần
QCT-24				24	520	2	Tôi + xử lý lạnh ở -20/-80/-196°C trong 24 giờ + ram 1 lần
QCTT-2				2	520	2	Tôi + xử lý lạnh ở -20/-80/-196°C trong 2 giờ + ram 2 lần
QCTT-12				12	520	2	Tôi + xử lý lạnh ở -20/-80/-196°C trong 12 giờ + ram 2 lần
QCTT-24				24	520	2	Tôi + xử lý lạnh ở -20/-80/-196°C trong 24 giờ + ram 2 lần

Trong quá trình xử lý nhiệt các mẫu này được đặt trong hộp thép không gỉ có chứa than hoa để hạn chế hiện tượng thoát cacbon và tránh sự oxy hóa. Quy trình chuẩn bị mẫu để quan sát tổ chức tế vi được thực hiện qua các bước: mài thô trên giấy nhám SiC với nhiều cấp độ hạt, đánh bóng tinh bằng ni với bột mài Cr_2O_3 , và tẩy thực bằng dung dịch Nital 4%.

2.2. Thiết bị sử dụng trong nghiên cứu

Lò buồng có điều khiển (Nabertherm L15/11, Đức) công suất 3,6 kW và nhiệt độ làm việc tối đa 1300°C được sử dụng cho quá trình xử lý nhiệt tôi và ram.

Thiết bị xử lý lạnh bao gồm: Tủ lạnh âm sâu PHCbi (Panasonic MDF-U54V-PB, Nhật Bản) giữ ở nhiệt độ -80°C và HF-180T (Haier, Trung Quốc) giữ ở nhiệt độ -20°C ; và bình giữ nhiệt ở -196°C sử dụng khí nitơ lỏng YSD (YDS-3, Mỹ).

Kính hiển vi quang học (Olympus GX41, Nhật Bản) sử dụng cho quan sát tổ chức tế vi ở các trạng thái xử lý nhiệt khác nhau và các ảnh tổ chức tế vi thu được sử dụng trong việc tính toán hàm lượng cacbit ở các trạng thái xử lý nhiệt khác nhau.

Thiết bị nhiễu xạ tia X (X'Pert Pro, Hà Lan) dùng tia $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda \approx 1,54 \text{ \AA}$) với góc quét 2θ từ 30° đến 90° được sử dụng để phân tích thành phần pha của vật liệu.

Độ cứng Rockwell (HRC) của các mẫu nghiên cứu được đo bằng thiết bị Mitutoyo HR-400 (Nhật Bản) với tải trọng 150 kg. Đối với mỗi chế độ xử lý nhiệt, độ cứng được xác định bằng cách lấy giá trị trung bình từ 2 mẫu thử. Trên mỗi mẫu, phép đo được thực hiện ngẫu nhiên tại 3 vị trí khác nhau.

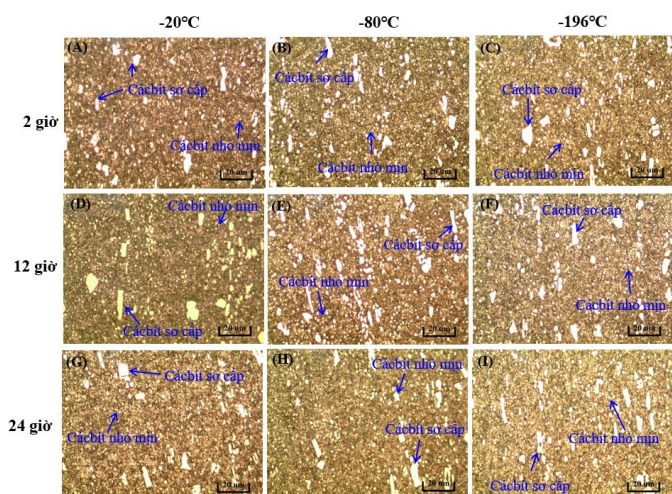
Trong nghiên cứu này, phần mềm ImageJ được sử dụng để xác định số lượng và kích thước của cacbit ở các trạng thái xử lý nhiệt khác nhau [12]. Đối với mỗi trạng thái, năm ảnh tổ chức tế vi kích thước $110 \times 80 \mu\text{m}$ được lựa chọn để đánh giá số lượng và kích thước cacbit.

3. Kết quả và bàn luận

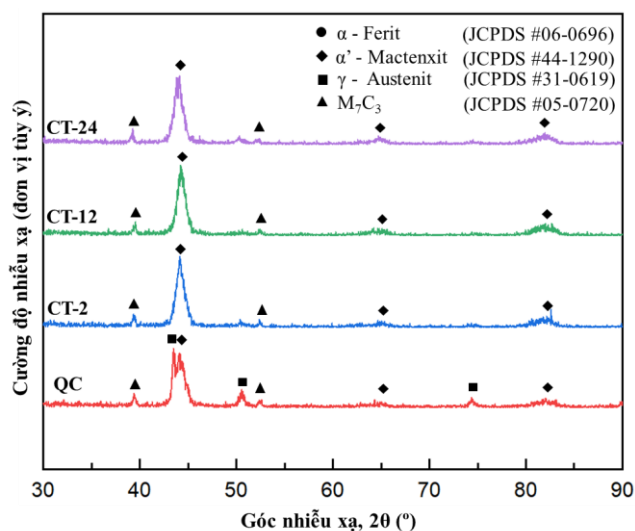
3.1. Tổ chức tế vi của thép SKD11 sau khi xử lý lạnh và ram

Hình 2(A-I) cho thấy, tổ chức tế vi của các mẫu xử lý lạnh ở nhiệt độ -20°C , -80°C và -196°C với thời gian giữ nhiệt 2, 12 và 24 giờ đều bao gồm cacbit sơ cấp thô to, cacbit thứ cấp nhỏ mịn phân bố trên nền mactenxit tôi và austenit dư. Có thể thấy, khi quá trình austenit hóa ở nhiệt độ cao, cacbit hòa tan vào austenit càng nhiều làm lượng lớn cacbon và các nguyên tố hợp kim trong austenit tăng lên, dẫn đến hạ thấp điểm bắt đầu chuyển biến mactenxit (M_s) và điểm kết thúc chuyển biến mactenxit (M_f). Do vậy, sau khi tôi vẫn còn dư một lượng lớn austenit chưa chuyển biến. Kết quả phân tích XRD đối với các mẫu được xử lý lạnh ở -196°C (CT-2, CT-12 và CT-24) với thời gian giữ nhiệt ở 2, 12 và 24 giờ như hình 3 cho thấy, tổ chức tế vi của mẫu sau khi xử lý lạnh chủ yếu bao gồm cacbit M_7C_3 và mactenxit. Đối với mẫu sau tôi (QC), các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng của pha austenit dư xuất hiện rõ rệt tại các góc nhiễu xạ $2\theta = 43,5^\circ$ (111), $50,7^\circ$ (200) và $74,5^\circ$ (220)

[9]. Tuy nhiên sau khi xử lý lạnh với các thời gian giữ nhiệt khác nhau, cường độ các đỉnh này suy giảm đáng kể hoặc gần như không xuất hiện, điều này cho thấy rằng hàm lượng austenit dư còn rất nhỏ hoặc austenit dư đã chuyển biến hoàn toàn thành mactenxit. Điều này được giải thích bởi khi nhiệt độ giảm sâu trong quá trình xử lý lạnh làm giảm độ ổn định của austenit và làm tăng động lực chuyển biến, từ đó thúc đẩy quá trình chuyển biến austenit dư thành mactenxit. Những kết quả này cho thấy hiệu quả của quá trình sau khi tôi kết hợp với xử lý lạnh đã làm giảm hàm lượng austenit dư trong thép SKD11. Sau đó, các mẫu tiếp tục được ram hai lần nhằm đánh giá toàn diện hơn sự thay đổi về tổ chức tế vi và độ cứng của vật liệu.



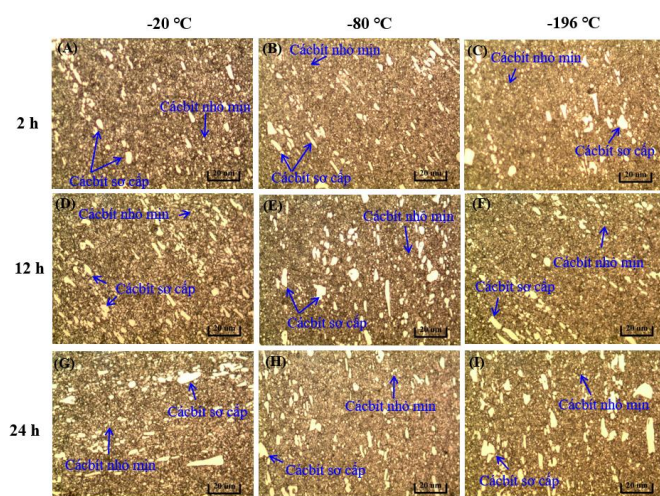
Hình 2. Ảnh OM tổ chức tế vi của các mẫu sau khi xử lý lạnh ở nhiệt độ -20, -80 và -196°C với thời gian giữ nhiệt 2, 12 và 24 giờ lần lượt là: (A-C) CT-2; (D-F) CT-12; (G-I) CT-24.



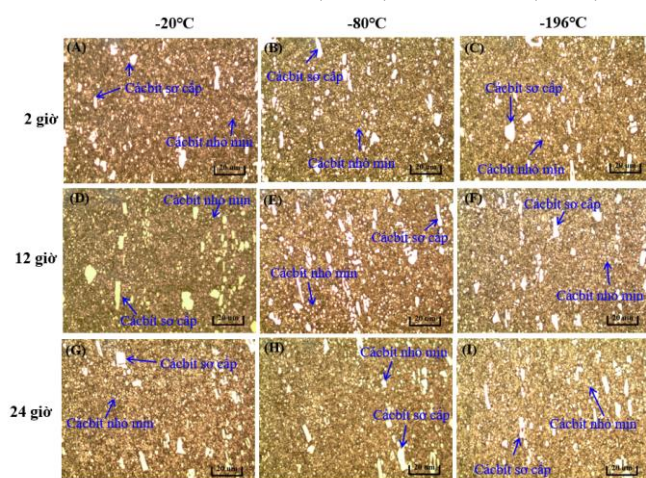
Hình 3. Phổ XRD của các mẫu CT-2, CT-12, và CT-24 sau khi xử lý lạnh ở -196°C với thời gian giữ nhiệt 2, 12 và 24 giờ.

Hình 4(A-I) cho thấy sau khi ram một lần, tổ chức tế vi của thép vẫn còn tồn tại một lượng nhỏ austenit dư, trong khi mactenxit tôi đã bắt đầu chuyển biến sang mactenxit

ram. Các cacbít sơ cấp có kích thước lớn gần như không thay đổi, đồng thời xuất hiện thêm các cacbít thứ cấp kích thước nhỏ mịn phân bố trên nền mactenxit ram. Sau khi tiến hành ram hai lần, austenit dư và mactenxit tôi gần như chuyển biến hoàn toàn thành mactenxit ram, đồng thời, mật độ các cacbít nhỏ mịn tăng lên rõ rệt (hình 5).



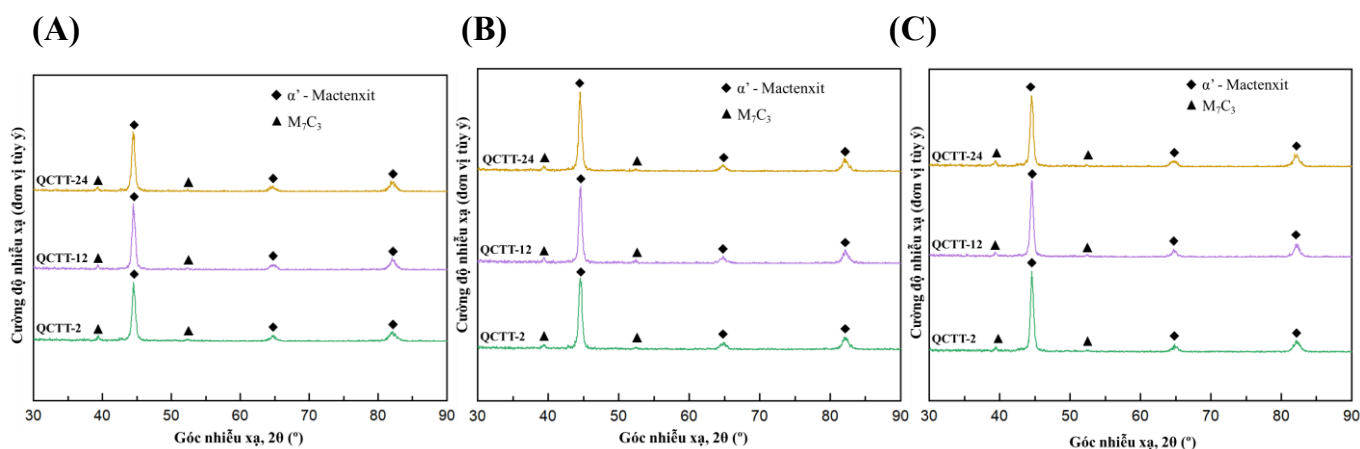
Hình 4. Ảnh OM tổ chức tế vi của các mẫu sau khi xử lý lạnh ở nhiệt độ -20, -80 và -196°C với thời gian giữ nhiệt 2, 12 và 24 giờ và ram 1 lần ở 520°C với thời gian giữ nhiệt 2 h lần lượt là: (A-C) QCT-2, (D-F) QCT-12, (G-I) QCT-24.



Hình 5. Ảnh OM tổ chức tế vi của các mẫu sau khi xử lý lạnh ở nhiệt độ -20, -80 và -196°C với thời gian giữ nhiệt 2, 12 và 24 giờ và ram 2 lần ở 520°C với thời gian giữ nhiệt 2 h lần lượt là: (A-C) QCTT-2; (D-F) QCTT-12; (G-I) QCTT-24.

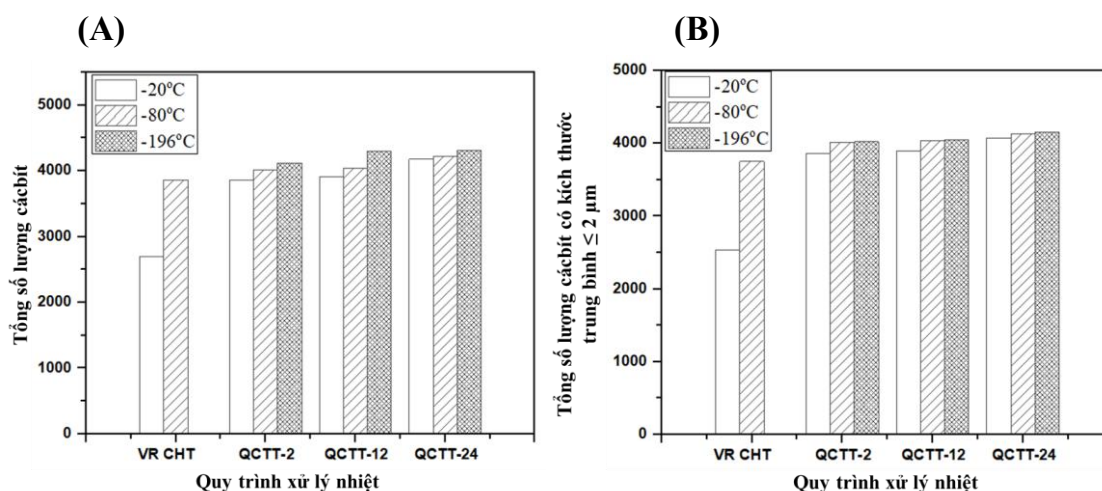
Xu hướng này được thể hiện rõ hơn trong kết quả nhiễu xạ tia X cho các mẫu QCTT-2, QCTT-12 và QCTT-24 tương ứng ở các nhiệt độ xử lý lạnh -20, -80, và -196°C với thời gian giữ nhiệt là 2, 12 và 24 giờ và ram 2 lần như trong hình 6. Việc áp dụng thêm nguyên công xử lý lạnh sau tôi thúc đẩy quá trình chuyển biến austenit dư và mactenxit tôi thành mactenxit ram tiếp tục diễn ra, đặc biệt ở nhiệt độ thấp. Khi nhiệt độ xử lý lạnh giảm từ -20 xuống -196°C, lượng austenit dư giảm đáng kể, đồng thời pha mactenxit tăng lên tương ứng. Kết quả XRD cho thấy cường độ đỉnh nhiễu xạ đặc trưng của austenit giảm dần, trong khi đó các đỉnh nhiễu xạ của mactenxit trở nên rõ nét hơn. Bên cạnh đó,

thời gian giữ nhiệt cũng ảnh hưởng đến quá trình chuyển biến pha tuy nhiên mức độ tác động thấp hơn so với nhiệt độ. Khi tăng thời gian giữ nhiệt từ 2 đến 24 giờ, lượng austenit dư vẫn tiếp tục giảm (hình 3) và chuyển biến xảy ra triệt để hơn sau khi ram 2 lần (hình 5 và hình 6).



Hình 6. Phổ XRD của các mẫu được xử lý lạnh ở các thời gian giữ nhiệt khác nhau gồm QCTT-2, QCTT-12 và QCTT-24 và ở nhiệt độ xử lý lạnh khác nhau: (A) -20, (B) -80 và (C) -196°C.

Ngoài quá trình chuyển biến pha, việc kết hợp giữa tôi, xử lý lạnh và ram còn thúc đẩy sự hình thành và phân bố lại các cacbít thứ cấp nhỏ mịn. Hình 7 cho thấy xu hướng gia tăng số lượng cacbít, đặc biệt là các hạt cacbít kích thước nhỏ, khi giảm nhiệt độ xử lý lạnh và tăng thời gian giữ nhiệt. Hiện tượng này có thể được giải thích bởi quá trình xử lý lạnh ở nhiệt độ thấp làm thúc đẩy chuyển biến austenit dư thành mactenxit, đồng thời tạo ra mật độ khuyết tật cao trong mạng tinh thể như lệch và song tinh. Các khuyết tật này đóng vai trò như là các vị trí ưu tiên cho sự tạo mầm cacbít trong quá trình ram, từ đó thúc đẩy sự hình thành cacbít thứ cấp có kích thước nhỏ và phân bố đồng đều trên nền của thép [13-15].



Hình 7. Biểu đồ mối quan hệ giữa số lượng cacbít và quy trình xử lý nhiệt khác nhau. (A) Tổng số lượng cacbít ; (B) Tổng số lượng cacbít có kích thước trung bình $\leq 2 \mu\text{m}$.

3.2. Độ cứng của thép SKD11 sau khi xử lý lạnh và ram

Từ kết quả bảng 2 cho thấy độ cứng có xu hướng tăng khi giảm nhiệt độ và tăng thời gian xử lý lạnh. Giá trị độ cứng cao nhất đạt được 69,1 HRC ở điều kiện -196°C với thời gian giữ nhiệt 24 giờ. Sự gia tăng này chủ yếu do quá trình austenit dư chuyển biến thành mactenxit làm tăng độ cứng tổng thể của thép [4, 9]. Tuy nhiên, việc kết hợp quá trình ram ngay sau khi xử lý lạnh làm cho độ cứng của thép SKD11 có xu hướng giảm. Các mẫu sau ram hai lần có độ cứng thấp hơn so với các mẫu sau ram một lần. Điều này được giải thích bởi quá trình ram xảy ra đồng thời hai quá trình: (1) tổ chức austenit chuyển thành mactenxit làm độ cứng tăng lên; (2) cácbít tiết ra từ nền mactenxit làm giảm độ cứng của nền do cacbon từ nền kết hợp với các nguyên tố hợp kim tạo cácbít làm cho nền mactenxit giảm nồng độ cacbon dẫn đến độ cứng của nền giảm.

Mặc dù độ cứng giảm sau ram, các mẫu được xử lý lạnh kết hợp ram hai lần vẫn duy trì giá trị độ cứng cao, đáp ứng yêu cầu làm việc của thép SKD11 trong ứng dụng làm khuôn dập nguội. Đồng thời, xử lý lạnh còn thúc đẩy sự hình thành các cácbít thứ cấp kích thước nhỏ mịn và phân bố đồng đều trên nền mactenxit ram. Các cácbít nhỏ mịn này đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện độ dai va đập và khả năng chống mài mòn của thép SKD11 [2, 5].

Bảng 2. Độ cứng (HRC) của các mẫu sau khi xử lý lạnh ở các nhiệt độ và thời gian giữ nhiệt khác nhau.

Ký hiệu mẫu	Nhiệt độ xử lý lạnh ($^{\circ}\text{C}$)		
	-20	-80	-196
CT-2	67,0	68,5	68,6
QCT-2	61,3	60,7	60,6
QCTT-2	59,9	59,6	58,2
CT-12	67,1	68,7	68,8
QCT-12	61,5	60,8	59,6
QCTT-12	60,2	59,7	58,4
CT-24	67,3	68,9	69,1
QCT-24	61,9	61,2	60,3
QCTT-24	60,4	60,0	58,7

4. Kết luận

Quá trình xử lý lạnh sau tôi cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc làm giảm hàm lượng austenit dư trong thép SKD11. Khi giảm nhiệt độ từ -20 xuống -196°C và tăng thời gian giữ nhiệt từ 2 đến 24 giờ, austenit dư chuyển biến mạnh sang mactenxit, thể hiện qua sự suy giảm đỉnh nhiễu xạ austenit và tăng cường ở pha mactenxit.

Xử lý lạnh kết hợp với ram hai lần thúc đẩy sự hình thành và phân bố lại các cacbít thứ cấp nhỏ mịn. Số lượng cacbít nhỏ mịn tăng khi giảm nhiệt độ xử lý lạnh và kéo dài thời gian giữ nhiệt.

Độ cứng của thép tăng khi giảm nhiệt độ và tăng thời gian xử lý lạnh, trong đó giá trị độ cứng cao nhất đạt được 69,1 HRC ở điều kiện -196°C trong 24 giờ. Sau quá trình ram, độ cứng của thép có xu hướng giảm do quá trình tiết cacbít làm giảm hàm lượng cacbon trong nền mactenxit.

Xử lý lạnh kết hợp ram hai lần không chỉ duy trì độ cứng cao mà còn thúc đẩy sự hình thành các cacbít thứ cấp nhỏ mịn phân bố đều trên nền thép, từ đó góp phần nâng cao độ dai va đập và khả năng chống mài mòn, đáp ứng yêu cầu làm việc của thép SKD11 trong ứng dụng làm khuôn dập nguội.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] H.G. Nanesa, M. Jahazi (2014), “Simultaneous enhancement of strength and ductility in cryogenically treated AISI D2 tool steel”, *Materials Science and Engineering A*, **598**, pp.413-419, DOI: 10.1016/j.msea.2014.01.065.

[2] N.B. Dhokey, C. Thakur, P. Ghosh (2021), “Influence of intermediate cryogenic treatment on the microstructural transformation and shift in wear mechanism in AISI D2 steel”, *Tribology Transactions*, **64(9)**, pp.91-100, DOI: 10.1080/10402004.2020.1804652.

[3] J.H. Park, K.S. Kim, J.Y. Kim, et al. (2022), “Microstructure and tensile properties of bulk AISI D2 tool steel fabricated by direct energy deposition”, *Materials Characterization*, **194**, DOI: 10.1016/j.matchar.2022.112355.

[4] V.V. Khanh, T.T. Mai, N.X. Truong (2022), “Effects of subzero treatments on carbide organization transfer of SKD11 steel after quenching method”, *TNU Journal of Science and Technology*, **227(2)**, pp.156-164, DOI: 10.34238/tnu-jst.5176 (in Vietnamese).

[5] H. Torkamani, S. Raygan, J. Rassizadehghani (2014), “Comparing microstructure and mechanical properties of AISI D2 steel after bright hardening and oil quenching”, *Materials and Design*, **54**, pp.1049-1055, DOI: 10.1016/j.matdes.2013.09.043.

[6] P.J. Klug, M.J. Klug, T. Sever, et al. (2021), “Impact of steel type, composition and heat treatment parameters on effectiveness of deep cryogenic treatment”, *Journal of Materials Research and Technology*, **14**, pp.1007-1020, DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.07.022.

[7] M. Koneshlou, K.M. Asl, F. Khomamizadeh (2021), “Effect of cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviors of AISI H13 hot work tool steel”, *Cryogenics*, **51**, pp.55-61, DOI: 10.1016/j.cryogenics.2010.11.001.

[8] S. Li, M. Xiao, G. Ye, et al. (2018), “Effects of deep cryogenic treatment on microstructural evolution and alloy phases precipitation of a new low carbon martensitic stainless bearing steel during aging”, *Materials Science and Engineering A*, **732**, pp.167-177, DOI: 10.1016/j.msea.2018.07.012.

[9] L.T. Giang, T.V. Khanh (2023), “A study on the effect of deep cryogenic treatment on the microstructure and hardness of SKD11 steel”, *Journal of Water Resources & Environmental Engineering*, **90**, pp.33-38 (in Vietnamese).

[10] T.V. Trung, N.V. Thành, H.V. Giang, et al. (2019), “Study on heat treatment of SKD11 steel for high precise gauges using for mechanical assembly”, *Journal Of Metallurgy and Materials Science*, **87**, pp.33-39, ISSN: 1859-4344 (in Vietnamese).

[11] D. Das, A.K. Dutta, V. Toppo, et. al. (2007), “Effect of deep cryogenic treatment on the carbide precipitation and tribological behavior of D2 steel”, *Materials and Manufacturing Processes*, **22(4)**, pp.474-480, DOI: 10.1080/10426910701235934.

[12] M.F.C. Moscoso, F.D. Ramos, C.R.D.L. Lessa, et. al. (2020), “Effects of cooling parameter and cryogenic treatment on microstructure and fracture toughness of AISI D2 tool steel”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **29**, pp.7929-7939, DOI:10.1007/s11665-020-05285-9.

[13] D. Das, A.K. Dutta, V. Toppo, et. al. (2007), “Effect of deep cryogenic treatment on the carbide precipitation and tribological behavior of D2 steel”, *Materials and Manufacturing Processes*, **22**, pp.474-480, DOI: 10.1080/10426910701235934.

[14] D. Das, A.K. Dutta, K.K. Ray (2009), “On the refinement of carbide precipitates by cryotreatment in AISI D2 steel”, *Philosophical Magazine*, **89(1)**, pp.55-76, DOI:10.1080/14786430802534552.

[15] J.Y. Huang, Y.T. Zhu, X.Z. Liao, et. al. (2009), “Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel”, *Materials Science and Engineering A*, **339**, pp.241-244, DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00165-X.