

Ảnh hưởng của nhiệt độ austenit hóa đến quá trình tiết pha cacbit thứ cấp của gang trắng 27 % crôm

Effect of austenitizing heat treatment on the precipitation of secondary carbide in 27 wt. % chromium white cast iron

HOÀNG THỊ NGỌC QUYÊN^{1,*}, PHẠM MAI KHÁNH¹

1. Viện Khoa học và Kỹ thuật vật liệu, Đại học Bách khoa Hà Nội, Số 1, Đại Cồ Việt, Hà Nội

Email: quyen.hoangthingoc@hust.edu.vn.

Ngày nhận bài: 18/12/2022, Ngày duyệt đăng: 9/2/2023

TÓM TẮT

Gang trắng 27 % Cr đã được xử lý tại các nhiệt độ austenit hóa khác nhau. Sự biến đổi của pha nền austenit cũng như sự tiết ra cacbit thứ cấp nhờ xử lý nhiệt đã được xác định trong bài báo này. Kết quả cho thấy ở nhiệt độ austenit hóa 900 °C, các cacbit thứ cấp được tiết ra dọc theo các vị trí khuyết tật của pha austenit tại nhiệt độ nung cao. Chúng hình thành và phát triển trong nền austenit và đôi khi austenit có thể sẽ còn dư. Khi nhiệt độ austenit hóa tăng lên đến 1000 °C thì số lượng, khối lượng và kích thước của cacbit thứ cấp cũng tăng tương ứng. Ở nhiệt độ nung 1050 °C/3 h, kích thước của các cacbit thứ cấp giảm đáng kể với mật độ phân bố cao trong pha nền. Ở nhiệt độ lớn hơn 1050 °C, nền austenit trở nên ổn định hơn, cacbit thứ cấp khó được tạo ra và do đó tạo ra nhiều khuyết tật hơn cho pha nền. Số lượng và kích thước hạt cacbit thứ cấp ảnh hưởng đáng kể đến độ cứng tế vi của pha nền austenit. Độ cứng tế vi đạt cao nhất tại nhiệt độ austenit hóa 1050 °C/3 h giữ nhiệt, sau đó giảm dần khi nhiệt độ austenit cao hơn 1050 °C.

Từ khóa: cacbit thứ cấp, cacbit eutectic, austenit, xử lý nhiệt austenit hóa.

ABSTRACT

A 27 wt. % Cr white cast iron has been subjected to various austenitization heat treatments. The transformation of the matrix phase as well as the precipitation of secondary carbides at the austenitization temperature have been clearly determined in this paper. The results showed that secondary carbides precipitated along the defect sites of the austenitic phase at 900 °C during the austenitization. They grew up within austenit matrix, and there exist some retained austenit. The amount and size of secondary carbides increase as the austenitization temperature rises to 1000 °C. At 1050 °C/3 h, the size of secondary carbides reduces significantly with a high distribution density in the matrix phase. Higher austenitization temperatures cause the matrix to become more stable and make it more difficult to produce secondary carbides, as well as increase the number of defects in the matrix. The micro-hardness of the austenit matrix is affected a lot by how many and how big the secondary carbide particles are. At 1050 °C/3 h, the micro-hardness is the highest one. When the temperature of austenitization goes above 1050 °C, the micro-hardness of the matrix reduces.

Keywords: secondary carbide, eutectic carbide, austenit, austenitizing heat treatment

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Gang trắng crôm hay còn gọi là hệ hợp kim Fe-Cr-C có thành phần crôm lên đến 40 % và thành phần cacbon có thể đến 4 %. Gang trắng có thành phần Cr lớn hơn 10 % được gọi là gang trắng crôm cao. Trong tổ chức ở trạng thái đúc của gang trắng crôm có một số lượng lớn cacbit làm cho các gang này rất cứng nhưng giòn, rất khó gia công. Gang crôm cao có tính chống mài mòn, độ dai va đập, tính chống ăn mòn tốt. Gang trắng được

được dùng để chế tạo các tấm lót trong máy nghiền xi măng, bi nghiền đá, bi nghiền clinke,... [1-3]. Có rất nhiều nghiên cứu về gang trắng crôm cao trong hơn bốn thập kỷ qua. Các nghiên cứu tập trung phần lớn để giải quyết các vấn đề: hợp kim hóa gang trắng crôm với các nguyên tố như Ti, Mn, Mg, Ni, Cu, Al, biến đổi tổ chức gang trắng bằng các nguyên tố đất hiếm; quá trình xử lý nhiệt; nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố đó tới tổ chức đông đặc, nghiên cứu số lượng, loại cacbit,

sự thay đổi của nền,... Tất cả các nghiên cứu đó đều có mục đích tìm hiểu sự thay đổi tổ chức dẫn đến thay đổi tính chất, mà chủ yếu là cơ tính của vật liệu, nhất là khả năng tăng độ chịu mài mòn, ăn mòn, độ dai va đập. Nhiều nghiên cứu đã được công bố và đã có những đóng góp làm cải thiện đáng kể tính chống mài mòn và độ dai va đập, làm cho loại vật liệu này có tuổi thọ rất cao khi làm việc trong môi trường cần tải trọng lớn và cần tính bền nhiệt, chống ăn mòn.

Gang trắng có hàm lượng crôm cao có thể là gang trước cùng tinh, cùng tinh và sau cùng tinh dựa trên tỷ lệ các nguyên tố cacbon và các nguyên tố hợp kim được hợp kim hóa trong gang [4]. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng các cacbit thứ cấp đóng vai trò quan trọng trong việc xác định các tính chất cơ học của gang trắng có hàm lượng crôm cao [5-6]. Kích thước, số lượng, thể tích và sự phân bố cacbit thứ cấp trong gang trắng crôm cao phụ thuộc vào thành phần hóa học, nhiệt độ và thời gian giữ nhiệt của quá trình xử lý nhiệt [7]. Hợp kim gang crôm thường được tôi ở nhiệt độ austenit hóa. Nhiệt độ tôi được chọn đủ cao để các thành phần tổ chức sau đúc đều được đồng đều hóa thành austenit. Nhiệt độ austenit hóa thay đổi theo thành phần của hợp kim. Tuy nhiên có một khoảng nhiệt độ austenit tối ưu để đạt độ cứng tối đa.

Cacbit thứ cấp có thể là M_7C_3 và $M_{23}C_6$ hoặc cả hai [8-9]. Cacbit thứ cấp tiết ra trong pha nền austenit, sự tiết ra cacbit thứ cấp này phụ thuộc vào các phương pháp austenit hóa, vào nhiệt độ và thời gian giữ nhiệt trong quá trình nung. Do đó, sự tiết ra pha cac-bit thứ cấp sẽ ảnh hưởng phần lớn bởi pha nền austenit, bởi sự ổn định hay sự mất ổn định của nền. Sự ổn định hay mất ổn định của pha nền sẽ phụ thuộc vào thành phần hóa học của pha nền, vào nhiệt độ và thời gian giữ nhiệt khi xử lý nhiệt đồng đều hóa austenit. Quá trình tiết pha này luôn bao gồm ba giai đoạn khác nhau: tạo mầm, phát triển và quá trình lớn lên của hạt. Hơn nữa, ngay cả ở thời gian giữ lâu hơn và nhiệt độ giữ cao hơn cũng làm cho cacbit thô hơn và làm giảm số lượng cacbit thứ cấp [8].

Nhiều nghiên cứu về quá trình tiết pha cacbit thứ cấp từ quá trình xử lý nhiệt đồng đều hóa austenit của hợp kim gang trắng crôm cao. Tuy

nhien, các nghiên cứu này chủ yếu đánh giá ảnh hưởng của xử lý nhiệt đến sự hình thành và phát triển của cacbit thứ cấp và hình dạng của chúng mà bỏ qua sự thay đổi của pha nền austenit với sự gia tăng nhiệt độ tại các vị trí mất ổn định, tạo mầm cho sự tiết pha cacbit thứ cấp. Khi nhiệt độ austenit hóa tăng lên đến một nhiệt độ nhất định, một nền austenit mới được hình thành sau khi được làm giàu với một số nguyên tố như C và Cr và từ đó bắt đầu hình thành và phát triển các cacbit thứ cấp trong đó.

Bài báo này phân tích ảnh hưởng của nhiệt độ austenit đồng đều hóa đến tổ chức pha nền, sự hình thành và phát triển cacbit thứ cấp cũng như đánh giá độ cứng của pha nền austenit của gang trắng 27 Cr.

2. THỰC NGHIỆM

Mẫu gang crôm nghiên cứu có thành phần nêu trong bảng 1. Mẫu được nấu chảy trong lò cảm ứng tần số trung bình ở $1550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$), được đúc trong khuôn cát nước thủy tinh có hút chân không với kích thước các mẫu thử nghiệm là $\phi 30 \times 300$ (mm). Các mẫu được xử lý nhiệt đồng đều hóa austenit ở các nhiệt độ từ 800 đến 1150 oC với thời gian giữ khác nhau (từ 1 đến 4 h) rồi làm nguội trong lò. Bảng 2 mô tả các chế độ nhiệt luyện của các mẫu nghiên cứu. Các mẫu được cắt theo kích thước 10 mm \times 10 mm \times 10 mm, mài trên giấy mài SiC và đánh bóng bằng dung dịch các hạt nhỏ mịn Cr_2O_3 . Các mẫu này được đánh bóng và ăn mòn màu bằng dung dịch (3 g $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ cùng với 30 ml nước cất và 2 ml HNO_3 96 %) hoặc tẩm thực bằng dung dịch H_2SO_4 5 %. Thời gian ăn mòn có thể từ vài phút trước khi phân tích tổ chức tế vi của hợp kim gang crôm.

Tổ chức tế vi của hợp kim gang crôm được phân tích bằng kính hiển vi quang học, hiển vi điện tử quét. Độ cứng tế vi của pha nền được đo bằng máy đo độ cứng tế vi Leica Vickers (với tải trọng 10 g, thời gian đâm 15 s, mũi đâm kim cương hình nón).

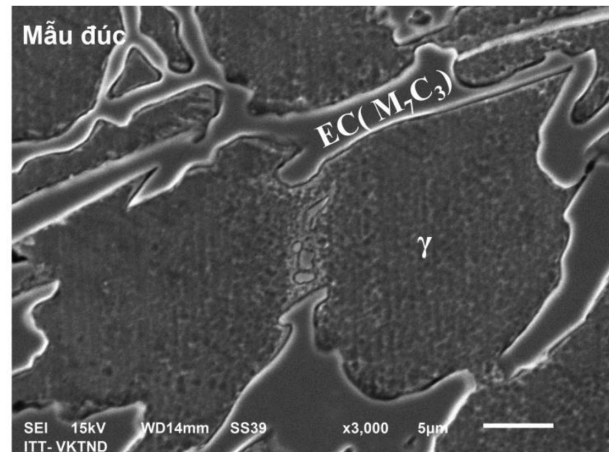
Mẫu được mài và đánh bóng và phân tích thành phần pha bằng phương pháp nhiễu xạ Rơnghen, thiết bị sử dụng anot Cu (K α), có bước sóng $\lambda = 1,5418\text{ \AA}$, tốc độ quét 0,06 o/s với góc 2 θ biến thiên từ 10 đến 80o.

Bảng 1. Thành phần hóa học của mẫu gang (% t.l)

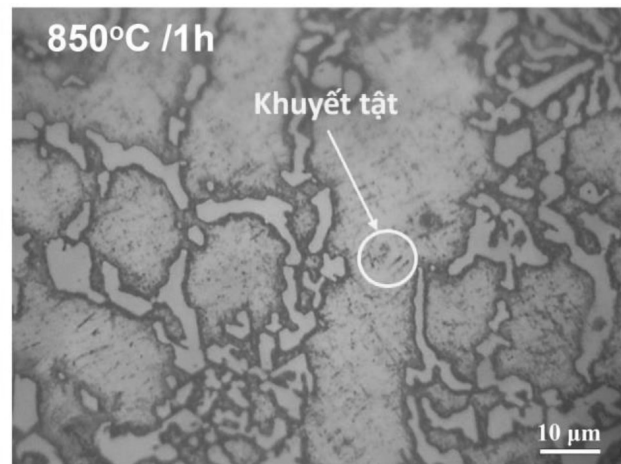
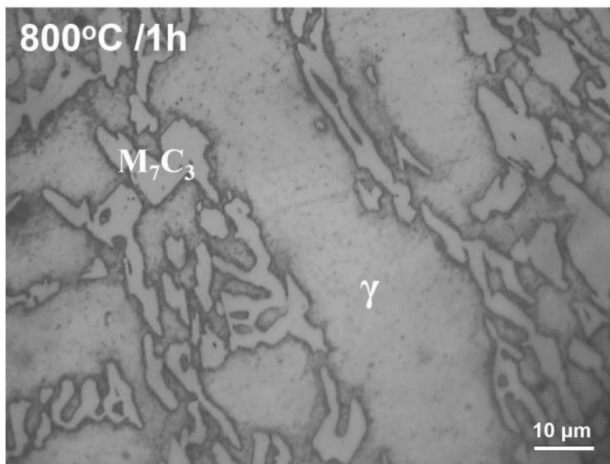
Hợp kim	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe
Sau đúc	2,03	0,46	0,33	27,5	1,37	0,84	0,023	0,0067	Còn lại

Bảng 2. Các chế độ nhiệt luyện mẫu

Mẫu	Chế độ nhiệt luyện
S1	Mẫu ở trạng thái đúc
S2	800 oC, 1 giờ giữ nhiệt, nguội cùng lò
S3	850 oC, 1 giờ giữ nhiệt, nguội cùng lò
S4	850 oC, 2 giờ giữ nhiệt, nguội cùng lò
S5	900 oC, 3 giờ giữ nhiệt, nguội cùng lò
S6	900 oC, 4 giờ giữ nhiệt, nguội cùng lò
S7	950 oC, 3 giờ giữ nhiệt, nguội cùng lò
S8	1000 oC, 3 giờ giữ nhiệt, nguội cùng lò
S9	1050 oC, 3 giờ giữ nhiệt, nguội cùng lò
S10	1100 oC, 3 giờ giữ nhiệt, nguội cùng lò
S11	1100 oC, 4 giờ giữ nhiệt, nguội cùng lò
S12	1150 oC, 3 giờ giữ nhiệt, nguội cùng lò



Hình 1. Ảnh tổ chức mẫu gang crôm 27 % ở trạng thái đúc (EC: cacbit cùng tinh; γ: austenit)



Hình 2. Hình ảnh hiển vi quang học của mẫu gang khi được nhiệt luyện tại nhiệt độ 800 °C trong 1 h và tại 850 °C trong 1 h và đều được làm nguội trong lò

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Gang trắng crôm có thể tồn tại ở dạng gang trước cùng tinh, cùng tinh và sau cùng tinh tùy thuộc vào mức độ cùng tinh. Mức độ cùng tinh được đánh giá thông qua cacbon đương lượng (CE) theo công thức sau:

$$\text{Mức độ cùng tinh} = \text{CE}/4,3$$

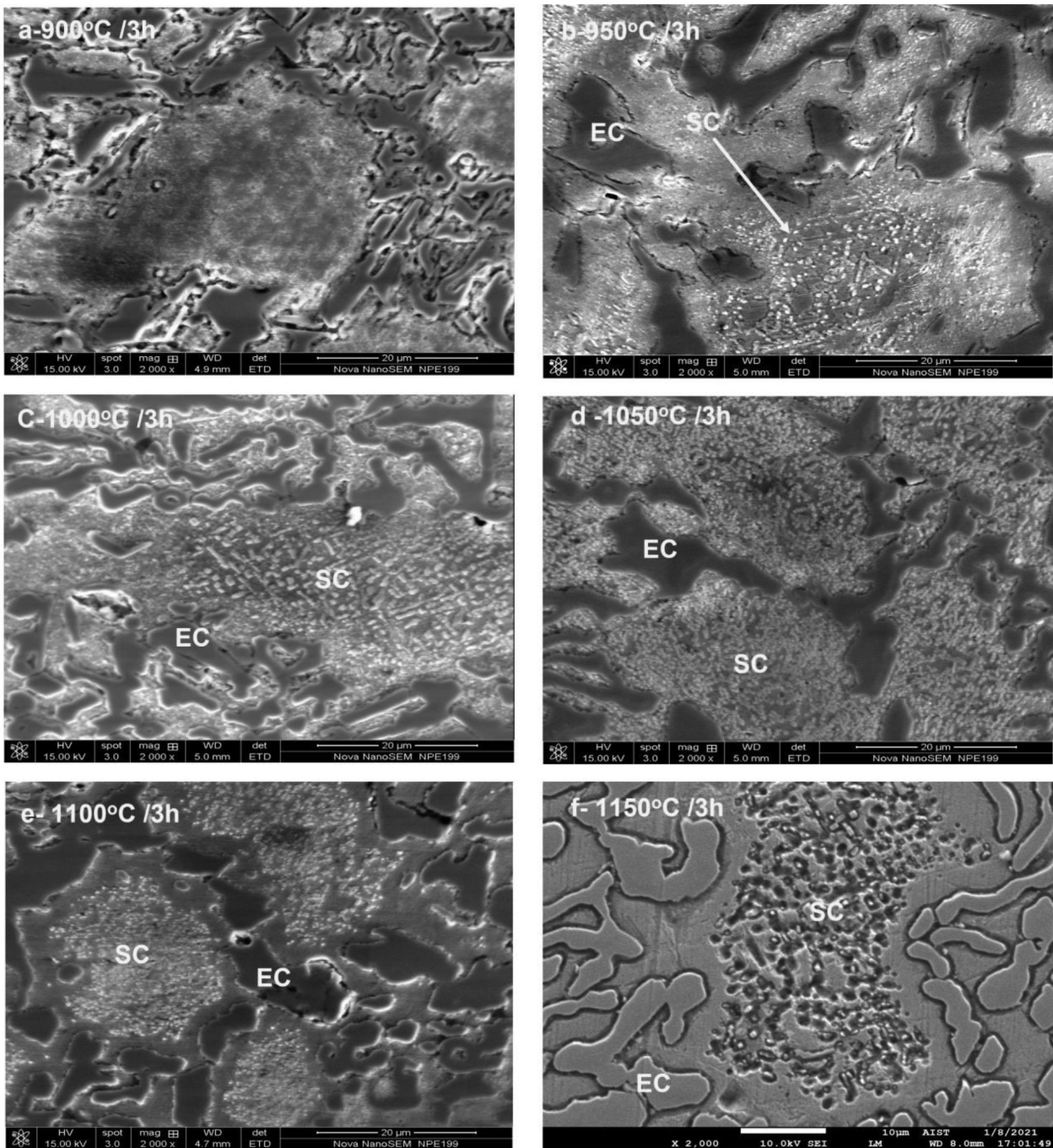
Lu và các cộng sự [10] đã đưa ra công thức tính hàm lượng cacbon đương lượng (khi hàm lượng các nguyên tố như Mn, Si, Ti là không đáng kể) như sau:

$$[\%C] + 0.0474 \times [\%Cr] = \text{CE}$$

Hợp kim gang crôm trong nghiên cứu này có mức độ cùng tinh là $0,775 < 1$. Vậy kiểu kết tinh của gang trắng crôm trong trường hợp này thuộc

về gang trắng trước cùng tinh. Gang trắng crôm trước cùng tinh có đặc điểm kết tinh bao gồm sự tiết nhánh cây austenit sơ cấp trước tiên, sau đó cùng tinh giữa cacbit và austenit tiết ra và điền đầy vào khoảng trống giữa các nhánh cây austenit sơ cấp [6-7]. Tổ chức hợp kim ở trạng thái đúc được chỉ trên hình 1. Tổ chức bao gồm cacbit cùng tinh trên nền austenit. Cacbit cùng tinh trong trường hợp này là M_7C_3 [11].

Hình ảnh hiển vi quang học của mẫu gang khi được nhiệt luyện tại nhiệt độ 800 °C trong 1 h và tại 850 °C trong 1 h và được làm nguội trong lò xem trên hình 2. Tại nhiệt độ austenit hóa 800 °C giữ nhiệt trong 1 giờ thì tổ chức pha austenit bắt đầu có sự thay đổi, khi nhiệt độ tăng lên 850 °C



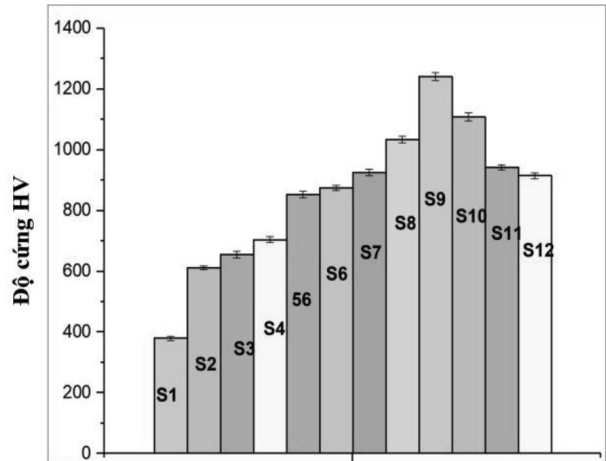
Hình 3. Tổ chức mẫu gang thay đổi theo nhiệt độ austenit hóa
 (EC: cacbit cùng tinh M7C3; SC: cacbit thứ cấp)

cùng 1 giờ giữ nhiệt, pha austenit thay đổi rõ hơn, các vết nứt tế vi trong pha nền đã bắt đầu xuất hiện (được chỉ trên hình 2b) nhưng chưa thấy rõ nét sự xuất hiện của pha cacbit thứ cấp. Cacbit thứ cấp xuất hiện tại nhiệt độ nung 900 °C trong 3 h giữ nhiệt, sau đó cacbit thứ cấp phát triển về cả số lượng lẫn kích thước khi tăng nhiệt độ nhiệt

luyện đến 1050 °C. Tại chế độ xử lý nhiệt 1050 °C /3 h, cacbit thứ cấp tiết ra với tổng lượng lớn nhất cùng với kích thước hạt khá đồng đều ồng đều, giảm tính dị hướng khi so với mẫu nhiệt luyện ở 1000 °C /3 h (hình 3c và d). Khi nhiệt độ nhiệt xử lý nhiệt tăng đến 1150 °C số lượng và kích thước các hạt cacbit thứ cấp lại bắt đầu theo chiều

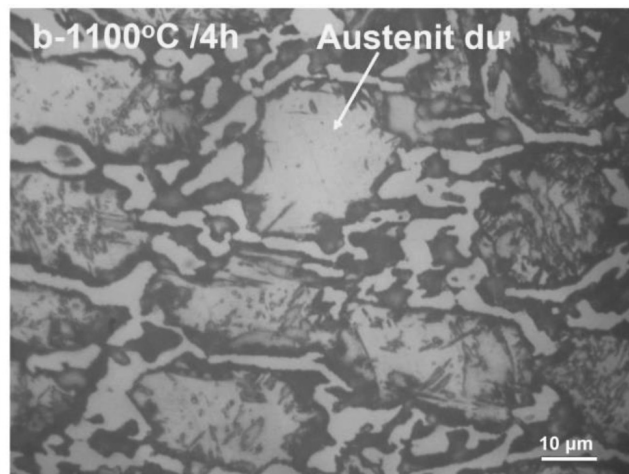
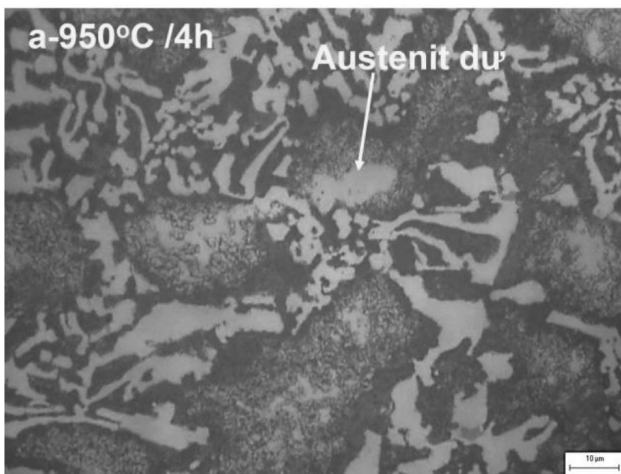
hướng giảm, điều này được thể hiện rõ trong hình 3e-f. Khi nung nóng trên nhiệt độ chuyển biến austenit, các nguyên tố hợp kim hòa tan vào austenit. Khi nguội cacbit thứ cấp được tiết ra. Theo sự tăng lên của nhiệt độ hay thời gian giữ nhiệt, chúng phát triển. Sự hình thành và phát triển của cacbit thứ cấp liên quan đến sự ổn định hay mất ổn định của pha nền austenit tại nhiệt độ nung. Độ cứng tế vi của pha nền các mẫu S1-S12 cũng được ghi nhận trên hình 4.

Kết quả độ cứng của pha nền của các mẫu S1-S12 cho thấy rằng độ cứng pha nền tăng lên từ S1-S9 tương ứng với các mẫu đúc và các mẫu được nhiệt luyện từ 800 °C /2 h đến 1050 °C /3 h sau đó độ cứng giảm từ S10 - S12. Sự tăng và sự giảm độ cứng trong trường hợp này liên quan chủ yếu đến sự tiết ra của cacbit thứ cấp. Ở nhiệt độ 800 oC/1 h giữ nhiệt, cacbit chưa xuất hiện rõ nhưng pha austenit đã được tăng bền bởi quá trình nhiệt luyện tại nhiệt độ cao có sự phân tán các nguyên tố hợp kim cũng như nguyên tố cacbon từ cacbit cùng tinh vào trong pha nền [12]. Độ cứng các mẫu tăng dần từ S2, do cacbit thứ cấp tiết ra ngày càng nhiều và thô hơn dẫn đến độ cứng tăng. Khi nhiệt độ austenit hóa vượt quá 1050 °C, đến 1150 °C, độ cứng của gang hợp kim cũng giảm. Độ cứng có giá trị giảm là do austenit được ổn định ở nhiệt độ cao nên khi làm nguội, cacbit thứ cấp tiết ra rất khó, vì vậy số lượng cũng như kích thước hạt rất nhỏ. Bên cạnh đó hàm lượng austenit dư sẽ tăng lên (hình 3f).

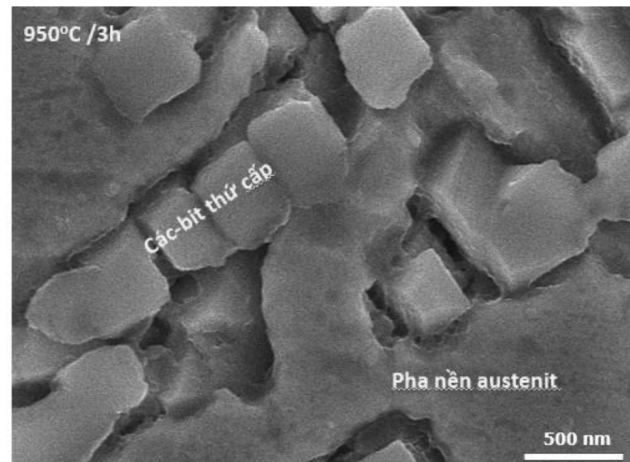
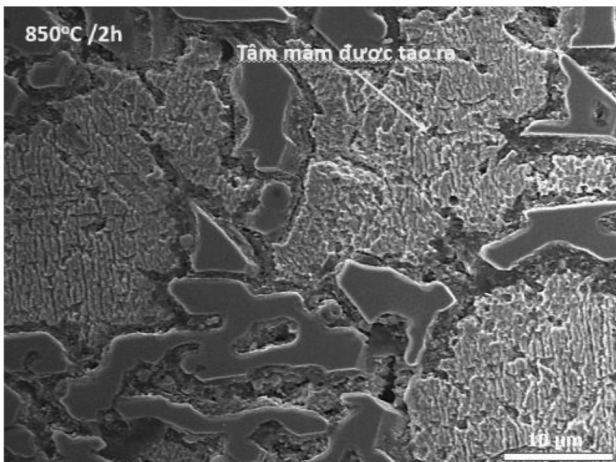


Hình 4. Sự thay đổi độ cứng pha nền các mẫu S1-S12 (theo thang đo độ cứng Vicker -HV)

Hợp kim gang crôm cao thường được tôi ở nhiệt độ austenit hóa để tổ chức pha nền có được tổ chức austenit đồng đều, giữ nhiệt để quá trình austenit hóa hoàn toàn. Nhiệt độ tôi được chọn đủ cao để các thành phần tổ chức sau đúc đều được chuyển thành austenit. Nhiệt độ austenit hóa hay thời gian giữ nhiệt có thể làm thay đổi thành phần tổ chức pha nền do có sự khuếch tán các nguyên tố như C, Cr trong cacbit cùng tinh vào pha nền, sự tiết ra này sẽ bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ austenit hóa hay thời gian giữ nhiệt. Nhiệt độ tôi cao làm tăng tính ổn định của austenit và lượng austenit dư cao hơn sẽ làm giảm độ cứng cũng như giảm sự tiết pha cacbit thứ cấp.



Hình 5. Hàm lượng austenit dư tăng khi tăng thời gian austenit hóa: 4 giờ giữ nhiệt với nhiệt độ nung tương ứng là a) 950 °C và b) 1100 °C



Hình 6. Ảnh hiển vi điện tử SEM chỉ ra tổ chức tế vi của các mẫu nhiệt luyện ở 850 °C trong 2 giờ và 950 °C trong 3 giờ. Tâm mầm được tạo tại các vị trí khuyết tật của pha nền và phát triển thành các cacbit thứ cấp.

Sự tiết ra cacbit thứ cấp trong các mẫu được nhiệt luyện theo những quy trình khác nhau là khác nhau. Điều này là do hàm lượng cacbon tan trong nền austenit của mỗi hợp kim và hàm lượng các nguyên tố hợp kim trong pha nền là khác nhau. Khi hàm lượng cacbon hòa tan trong nền cao thì lượng cacbit thứ cấp tiết ra sẽ tăng, nhưng sự tăng này của cacbit thứ cấp sẽ chỉ tăng đến một mức độ giới hạn do pha nền austenit khi đạt độ ổn định cao, khi nhiệt độ austenit lớn hơn 1050 °C thì sự tiết pha cacbit thứ cấp lại giảm.

Hình 6 mô tả rõ sự tạo thành cacbit thứ cấp. Cacbit thứ cấp tiết ra trong pha nền austenit khi nhiệt luyện. Khi nhiệt độ nung ở 850 °C /2 giờ giữ nhiệt, pha nền xuất hiện nhiều các vị trí khuyết tật và chính những vị trí này mà tâm mầm được tạo thành và phát triển. Ban đầu tâm mầm được tạo ra tại các vị trí khuyết tật của nền austenit, khi nhiệt độ nung tăng hay thời gian giữ nhiệt tăng, các tâm mầm sẽ lớn lên tại đó và tạo thành các hạt cacbit thứ cấp. Như vậy cacbit thứ cấp xuất hiện sẽ làm giảm sự tập trung năng lượng tại các vị trí này, giúp cho hợp kim gang crôm trở nên ổn định hơn. Sự tiết ra của cacbit thứ cấp với một số lượng lớn cùng với kích thước nhỏ mịn sẽ làm tổ chức pha nền giảm tập trung ứng suất sẽ làm tăng cơ tính cho hợp kim gang crôm. Tại nhiệt độ austenit hóa cao (1100 °C hay 1150 °C), cacbit thứ cấp tiết ra ít vì pha nền khi đó trở nên khá bền vững và do vậy làm giảm khả năng tạo cacbit thứ cấp. Khi cacbit thứ cấp tạo thành ít thì dẫn đến năng lượng

tập trung trong pha nền chưa được giải phóng và tập trung trong vật liệu, điều này dẫn đến trong pha nền tạo ra rất nhiều khuyết tật (như hình 3 f).

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu quá trình tạo thành cacbit thứ cấp từ quá trình xử lý nhiệt hợp kim gang 27 % crôm với nhiều cấp độ. Sự hình thành, sự phân bố, kích thước hạt, tổng lượng của cacbit thứ cấp trong gang trắng crôm cao bị ảnh hưởng đáng kể bởi nhiệt độ cũng như thời gian nung đồng đều austenit hóa. Các kết quả chính đã đạt được trong nghiên cứu này như sau:

1. Quá trình nhiệt luyện đã làm tăng nhiều vị trí khuyết tật trong pha nền austenit và qua đó các tâm mầm được hình thành và phát triển thành các cacbit thứ cấp.

2. Số lượng, độ lớn của cacbit thứ cấp tăng lên theo chế độ nhiệt luyện từ S5 -S10 ứng với nhiệt độ austenit hóa từ 900 - 1050 °C. Khi nhiệt độ austenit hóa lớn hơn 1050 °C, cacbit thứ cấp giảm cả về số lượng và kích thước hạt.

3. Độ cứng tế vi của pha nền tăng từ S2 -S9 và giảm dần với các mẫu S10- S12 do ảnh hưởng bởi sự tiết ra cacbit thứ cấp. Độ cứng tế vi đạt cao nhất tại nhiệt độ austenit hóa 1050 °C /3 giờ giữ nhiệt. Sau đó giảm dần khi nhiệt độ austenit lớn hơn 1050 °C.

TÀI LIỆU TRÍCH DẪN

1. R.J. Llewellyn., S.K. Yick and K.F. Dolman; *Scouring erosion resistance of metallic materials used in slurry pump service*, *Wear*, 6, 2004, p. 592.
2. Nguyen Thi Hoang Oanh and Nguyen Hoang Viet; *Precipitation of M23C6 Secondary Carbide Particles in Fe-Cr-Mn-C Alloy during Heat Treatment Process*, *Metals*, 10(2), 2020, p.157.
3. M. Mirjana Filipović; *Iron-chromium-carbon-vanadium white cast irons: Microstructure and properties*, *Hemijska industrija*, 68, 2014, p. 413.
4. F. Israa, Yousif and H. Ali Ataiwi; *Destabilization heat treatment effect on erosive wear characteristics of high chromium white cast iron*, *Kufa Journal of Engineering*, 09(02), 2018, p. 45.
5. Jun Wang, CongLi, Haohuai Liu, Hong Shan Yang, Baoluo Shen, Shenji Gao and Sijiu Huang; *The precipitation and transformation of secondary carbides in a high chromium cast iron*, *Materials Characterization*, 56, 2007, p. 73.
6. A. Hadji, K. Bouhamla and H. Maouche; *Improving Wear Properties of High-Chromium Cast Iron by Manganese Alloying*, *International Journal of Metalcasting*, 10, 2016, p. 43.
7. A.E. Karantzalis, A. Lekatou, & E. Diavati; *Effect of Destabilization Heat Treatments on the Microstructure of High-Chromium Cast Iron: A Microscopy Examination Approach*, *The Journal of Materials Engineering and Performance (JMEP)*, 18, 2009, p. 1078.
8. A. Wiengmoon; *Carbides in High Chromium Cast Irons*, *Naresuan University Engineering Journal*, 6, 2011, p. 64
9. A. Wiengmoon, T. Chairuang Sri and J. T. H. Pearce; *A Microstructural Study of Destabilised 30 wt %Cr-2.3 wt %C High Chromium Cast Iron*, *ISIJ International*, 44, 2004, p. 396.
10. Liming Lu, Hiroshi Soda, Alexander McLean; *Microstructure and mechanical properties of Fe–Cr–C eutectic composites*, *Materials Science and Engineering A*, 347, 2003, p. 214.
11. Jackson R S (1970); *The Austenit Liquidus Surface and Constructional Diagram for the Fe-Cr-C Metastable System*, *The Journal of the Iron and Steel Institute*, 1970, 208, p. 163.
12. Hong Hue, Hong Hai, Ngoc Minh and Quyen Hoang; *Effects of the Destabilisation Heat Treatments on the Precipitation of Secondary Carbides and Their Effect on the Corrosion of 27 wt. % Chromium White Cast Iron*, *ISIJ International*, 61, 2021, p.1660.