

ẢNH HƯỞNG CỦA TIẾT PHA HÓA BỀN TRONG HỢP KIM ĐỒNG LÀM TĂNG CƯỜNG CHẤT LƯỢNG BỀ MẶT CÁNH BƠM GIẢM TÁC ĐỘNG CỦA HIỆN TƯỢNG XÂM THỰC

EFFECT OF PRECIPITATION STRENGTHENING IN COPPER ALLOYS ON IMPROVING IMPELLER SURFACE QUALITY TO REDUCES THE IMPACT OF CAVITATION

VŨ ANH TUẤN*, NGUYỄN HẢI YẾN

Khoa Cơ sở - Cơ bản, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: anhtuan.cscb@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo này sẽ thảo luận về hiện tượng xâm thực trong cánh bơm và ảnh hưởng tiết pha hóa bền của hợp kim đồng nhằm tăng cường chất lượng bề mặt cánh bơm, giảm tác hại của hiện tượng xâm thực. Nghiên cứu được thực hiện trên hai hệ hợp kim Cu-Al-Fe và Cu-Al-Fe-Ni đã được xử lý nhiệt để tạo ra các tổ chức hóa bền. Dựa theo kết quả tổ chức tế vi chụp được từ kính hiển vi quang học, XRD, EDS và TEM, các pha Martensit và pha liên kim hình thành sẽ giúp tăng cường độ cứng và khả năng chống mài mòn của vật liệu.

Từ khóa: Hợp kim đồng, xâm thực, Martensit, cánh bơm.

Abstract

In this work, the cavitation phenomenon of impellers and the effect of durable phase deposition on improving the surface quality to reduce the impact of cavitation of copper alloys were investigated. The study was carried out on two copper alloys Cu-Al-Fe and Cu-Al-Fe-Ni which have been heat treatment to create durable phase deposition. Based on the results of optical microscope, XRD, EDS and TEM, the martensite and intermetallic phases formed were enhance the hardness and wear resistance of the material.

Keywords: Copper alloy, Cavitation, Martensite, impeller.

1. Mở đầu

Xâm thực là hiện tượng vật lý phổ biến xảy ra trong các bộ phận của máy bơm, van, ống giảm tốc và giãn nở, tấm lỗ thoát nước, tuabin thủy lực và cánh quạt... Hiện tượng xâm thực trong máy bơm được hình thành tại vùng hút của máy bơm, dưới tác động quay của các cánh sẽ làm tăng dòng chảy chất lỏng ở khu vực gần bánh công tác. Khi đó, vận tốc dòng chảy

sẽ tăng lên do sự kết hợp của vận tốc theo phương tiếp tuyến và vận tốc dọc trục. Chất lỏng chuyển động theo cánh quạt và di chuyển tới mặt hút của cánh, hình thành sự chênh áp giữa mặt trước và mặt sau của cánh. Khi áp suất nhỏ hơn áp suất hơi, các bong bóng khí được hình thành và chuyển động cùng dòng chảy. Nếu được di chuyển đến các vùng có áp suất cao, các bong bóng khí sẽ bị nổ và tác động lên bề mặt gọi là hiện tượng xâm thực vật liệu [1-5]. Khi xảy ra hiện tượng xâm thực sẽ tác động lên máy bơm với ba hiện tượng cơ bản sau: (i) xói mòn - là sự sụp đổ của các bong bóng ở khu vực có áp suất cao hơn, gây ra ứng suất cục bộ rất lớn trên bề mặt dẫn tới hư hỏng cánh bơm. (ii) Tiếng ồn và rung động sinh ra là âm thanh của bong bóng sụp đổ dưới áp suất cao hơn. Vị trí tìm thấy thường ở trong và xung quanh đầu hút của máy bơm. (iii) giảm hiệu suất bơm là do các bong bóng khí hình thành trong các giai đoạn xung quanh bánh công tác, làm cản trở dòng chảy chất lỏng được bơm và làm giảm năng suất [6-7].



Hình 1. Xâm thực cánh bơm

Xâm thực thường hình thành trên bề mặt của các chi tiết, do đó việc cải thiện tính chất vật liệu và nâng cao cơ tính bề mặt là một phương pháp hứa hẹn sẽ mang lại hiệu quả trong việc ngăn chặn các hư hỏng có thể xảy ra. Hai hướng nghiên cứu chính thường được thực hiện bao gồm: (i) chế tạo ra các nhóm vật liệu mới thay thế vật liệu truyền thống nhằm giảm khả năng xâm thực như nhóm thép hợp kim, hợp kim

Niken, hợp kim Titan; (ii) hoặc tập trung vào các quy trình xử lý nhiệt nhằm cải thiện chất lượng vật liệu có sẵn [8-10].

Hợp kim Đồng là loại vật liệu được sử dụng lâu đời để chế tạo cánh bơm do khả năng chống ăn mòn tuyệt vời trong môi trường chất lỏng. Các hợp kim đồng điển hình được sử dụng gồm Đồng thau Mangan, Đồng Mangan - Nhôm hay Đồng Niken - Nhôm [11-13]. Hợp kim Đồng Mangan thường chế tạo các cánh bơm có tốc độ quay thấp vì giá thành rẻ. Tuy nhiên, nhóm vật liệu này dễ bị ăn mòn khử vôi hóa trong môi trường nước biển, qua đó giảm mạnh tính chất cơ học của chúng. Hai nhóm còn lại đã được bổ sung thêm Mangan, Sắt, Niken giúp làm tăng khả năng chống mài mòn, ăn mòn nên thường sử dụng để chế tạo cánh bơm có kích thước lớn và tốc độ quay cao. Do hầu hết các loại cánh bơm được sản xuất bằng phương pháp đúc nên độ bền của chúng bị ảnh hưởng bởi tổ chức tế vi, kích thước hạt, số lượng mặt phân cách giữa các pha khác nhau, các pha hình thành và hình thái của chúng [14-15]. Một số nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, khả năng chống xâm thực của vật liệu tăng lên khi độ cứng tăng [14, 16].

Dựa trên các kết quả thu được, hướng nghiên cứu chính trong bài báo này sẽ là sự kết hợp của hợp kim hóa và quy trình xử lý nhiệt áp dụng cho hệ hợp kim đồng nhằm hiện tượng xâm thực trên bề mặt cánh bơm ứng dụng trong một số chi tiết cơ khí, đóng tàu. Trong đó sẽ tiến hành phân tích các pha hóa bền và đánh giá ảnh hưởng của chúng tới khả năng xâm thực của vật liệu.

2. Hiện tượng tiết pha hóa bền trong hợp kim Cu-Al-Fe và Cu-Al-Fe-Ni

Hệ hợp kim đồng nhôm là các hợp kim dựa trên cơ sở Đồng với nguyên tố hợp kim chính là Nhôm chiếm từ 4-14%, ngoài ra còn có một số các nguyên tố khác (như Niken, Sắt,...) nhằm tạo ra các nhóm vật liệu có cơ tính khác nhau khi kết hợp với các phương pháp xử lý nhiệt. Sắt là nguyên tố hòa tan rất ít trong đồng. Khi tăng hàm lượng sắt sẽ hình thành các pha liên kim Fe₃Al nhỏ mịn, ở dạng cầu và phân bố đều

trong tổ chức. Qua đó giúp tăng độ bền, độ cứng và khả năng chịu mài mòn của hợp kim. Niken cũng là nguyên tố được hòa trộn trong hợp kim Đồng-Nhôm để góp phần tăng khả năng chịu mài mòn, chống ăn mòn và cải thiện tính công nghệ. Kết quả này được giải thích là do khi bổ sung thêm Niken sẽ làm thu hẹp mạnh vùng dung dịch rắn α , do đó có thể thực hiện hóa bền hợp kim bằng quy trình tôi và hóa già. Bên cạnh đó, nếu hợp kim hóa 5% Niken kết hợp với xử lý nhiệt phù hợp sẽ giúp tạo ra các pha liên kim có độ cứng cao, phân tán đều trên nền [19].

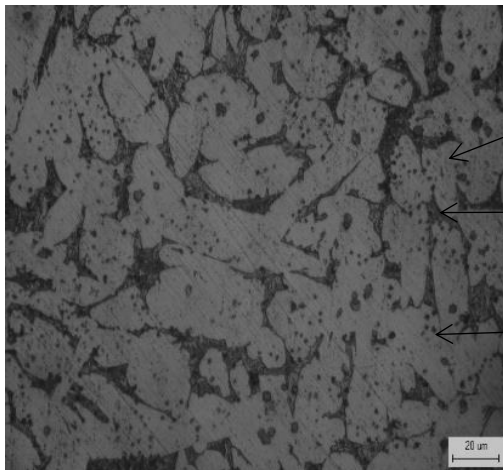
Quy trình xử lý nhiệt sau đúc thường được sử dụng để tạo ra được cơ tính theo yêu cầu dựa trên sự thay đổi kích thước hạt và sự hình thành các pha. Trong đó, pha hóa bền Mactenxit và các pha liên kim hình thành trong hợp kim Đồng thu được sau khi tôi và ram có vai trò quan trọng tới tính chất sau cùng của vật liệu. Ví dụ, đối với hợp kim Cu-10Al-5Fe-5Ni, khi nung tới vùng có tổ chức 100% β và làm nguội nhanh, các pha giàu sắt sẽ được tiết ra trước khi xảy ra chuyển biến Mactenxit có cấu trúc 9R. Khi tôi hợp kim tới vùng có tổ chức hai pha $\alpha+\beta$, pha β có mật độ cao hơn sẽ chuyển biến thành Mactenxit có cấu trúc 18R và 2H. Ngược lại với Mactenxit trong thép vừa cứng vừa bền, Mactenxit thu được sau khi tôi hợp kim Đồng là pha mềm. Tuy nhiên, sau khi tiến hành ram ở khoảng 500°C sẽ nhận được hiệu ứng hóa bền do các pha Mactenxit tiết ra pha liên kim Nhôm, Sắt, Niken, Fe₃Al, NiAl,... trên nền giàu đồng giúp tăng mạnh độ cứng và khả năng chống mài mòn của vật liệu [17-18]. Theo kết quả nghiên cứu về hiện tượng xâm thực, các pha Mactenxit hình thành trong vật liệu giúp tăng cường khả năng chống xói mòn do xâm thực. Ngoài ra, Mactenxit sẽ ngăn chặn sự hình thành và lan truyền các vết nứt từ ranh giới hạt, do đó các hạt không bị tách ra khỏi bề mặt trong quá trình xâm thực [20-21].

3. Thực nghiệm

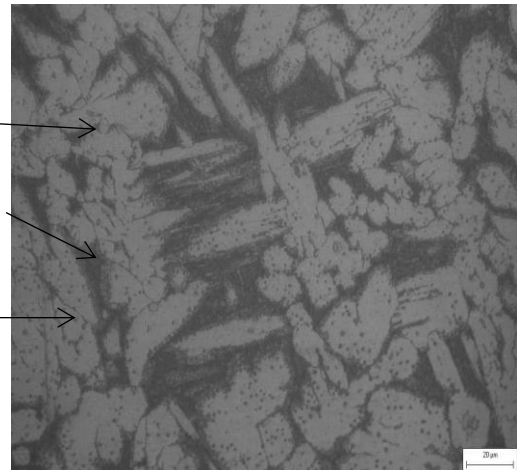
Nghiên cứu sử dụng hai mẫu hợp kim đúc Cu-Al-Fe và Cu-Al-Fe-Ni được nấu trong lò điện cảm ứng trung tần. Thành phần hóa học các mẫu cho trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hóa học của mẫu

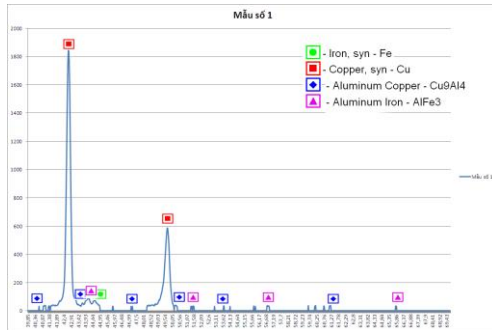
| Ký hiệu mẫu | Hợp kim | Al | Fe | Mn | Ni | Sn | Zn | Pb | Si | Cu |
|-------------|-------------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|---------|
| M1 | CuAl9Fe4 | 9,2 | 3,9 | 0,1 | 0,15 | 0,28 | 0,96 | 0,22 | 0,21 | Còn lại |
| M2 | CuAl9Fe4Ni2 | 9,41 | 4,9 | 0,2 | 2,44 | 0,04 | 0,09 | 0,07 | 0,07 | Còn lại |



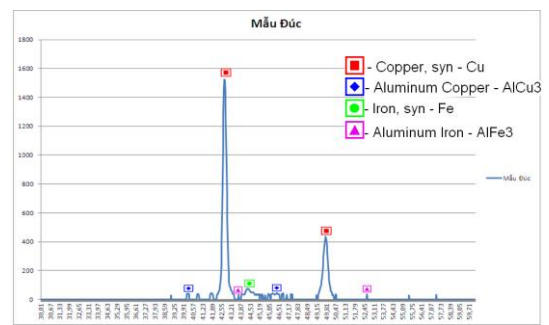
Hình 2. Tổ chức tế vi của mẫu 1 sau đúc



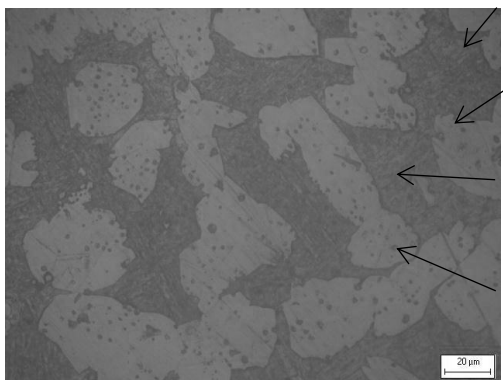
Hình 3. Tổ chức tế vi của mẫu 2 sau đúc



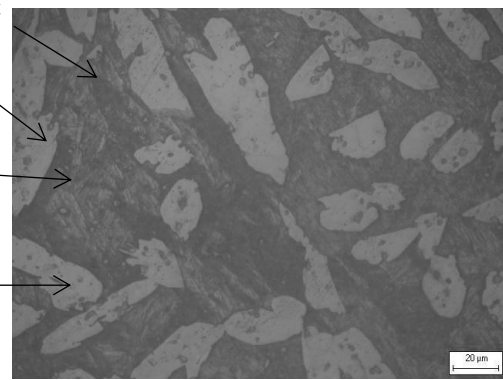
Hình 4. Kết quả XRD của mẫu 1 sau đúc



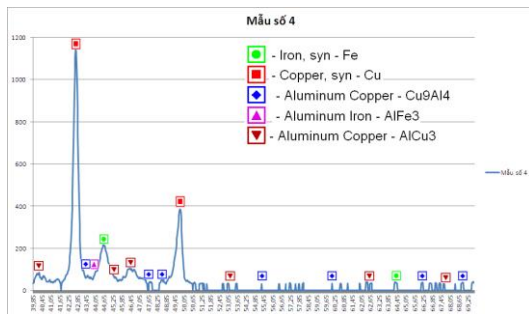
Hình 5. Kết quả XRD của mẫu 2 sau đúc



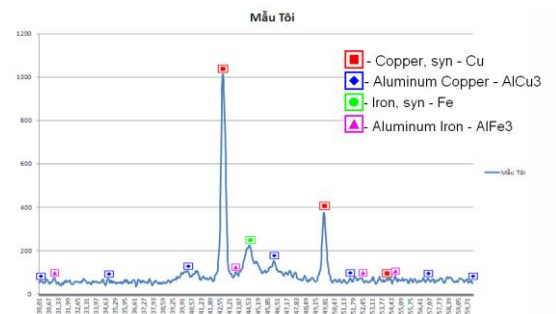
Hình 6. Hình ảnh tổ chức tế vi sau khi xử lý nhiệt của mẫu 1



Hình 7. Hình ảnh tổ chức tế vi sau khi xử lý nhiệt của mẫu 2



Hình 8. Kết quả XRD hợp kim Cu-Al-Fe sau xử lý nhiệt của mẫu 1



Hình 9. Kết quả XRD hợp kim Cu-Al-Fe-Ni sau xử lý nhiệt của mẫu 2

Các mẫu được tôi ở nhiệt độ 850°C trong 2 giờ, sau đó ram ở 350°C trong 2 giờ để tạo điều kiện tiết pha hóa bền. Tiến hành chuẩn bị để quan sát và phân tích các pha hóa bền tiết ra trong vật liệu bằng kính hiển vi quang học, XRD, TEM, SEM. Các mẫu được đo độ cứng và thử nghiệm khả năng chống mài mòn trên máy Tribotech nhằm đánh giá ảnh hưởng của các pha tới cơ tính của vật liệu.

4. Kết quả và thảo luận

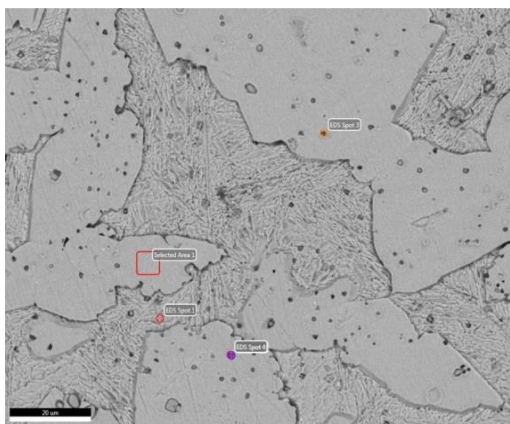
4.1. Sự tiết pha hóa bền trong vật liệu

* Sau khi đúc

Hai mẫu hợp kim Cu-Al-Fe và Cu-Al-Fe-Ni sau khi đúc thu được tổ chức tế vi như Hình 2, Hình 3. Dựa trên ảnh tổ chức quang học, các mẫu đều thu được pha α (vùng màu trắng) và pha $\alpha+\beta$ (vùng màu

đen). Khi so sánh giữa hai mẫu, mặc dù pha α có còn thô đại, nhưng kích thước hạt ở mẫu 2 đã nhỏ hơn so với mẫu 1 (giảm từ 100 μm xuống 90 μm). Điều này được giải thích là do sự xuất hiện của Niken sẽ giúp kích thước pha α tạo ra sẽ bị thu hẹp lại. Sự thay đổi kích thước hạt sẽ có tác động tích cực tới cơ tính của vật liệu.

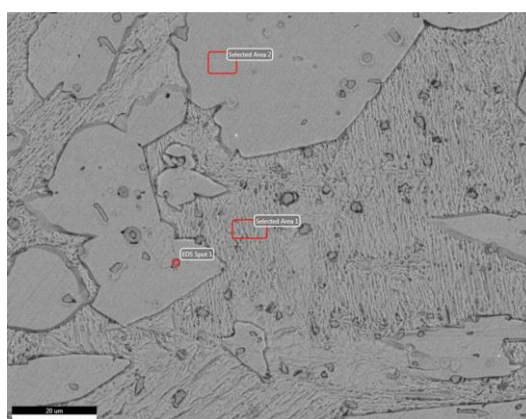
Ngoài ra, trên ảnh tổ chức tế vi của hai mẫu đều xuất hiện các chấm đen phân tán đều trên nền pha α và được dự đoán là các pha liên kim hình thành sau đúc. Tuy nhiên, ảnh tổ chức tế vi không thể xác định cụ thể loại pha liên kim hình thành, do đó các mẫu sẽ tiếp tục được phân tích XRD. Từ kết quả thu được thể hiện trong Hình 4, Hình 5 có thể kết luận sự xuất hiện của các pha liên kim Fe_3Al , FeAl , Cu_3Al và Cu_9Al_4 .



Hình 10. Ảnh SEM của mẫu 1 sau xử lý nhiệt
 Bảng 2. Thành phần nguyên tố tại các vị trí khác nhau của mẫu 1

| Pha Mactenxit | | |
|---------------|---------------|-------------|
| Nguyên tố | % Trọng lượng | % Nguyên tử |
| Cu | 86,6 | 77,1 |
| Al | 8,8 | 18,3 |
| Fe | 4,6 | 4,7 |

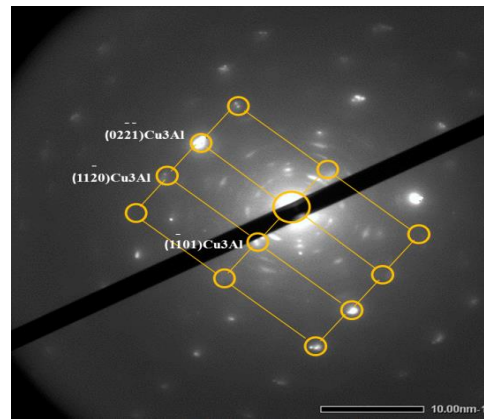
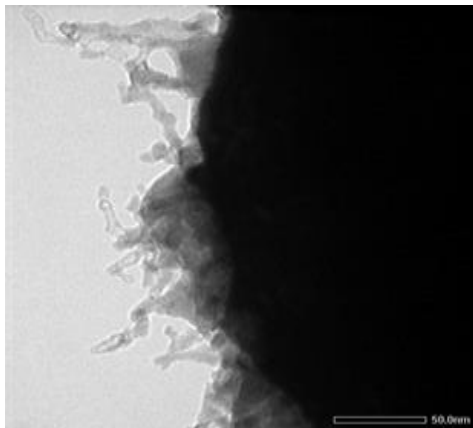
| Pha liên kim | | |
|--------------|---------------|-------------|
| Nguyên tố | % Trọng lượng | % Nguyên tử |
| Cu | 88,2 | 79,5 |
| Al | 7,7 | 16,3 |
| Fe | 4,2 | 4,3 |



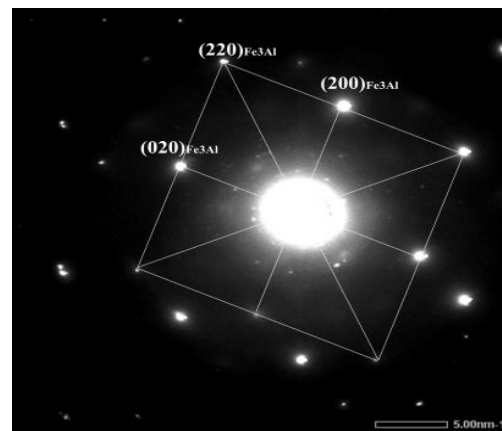
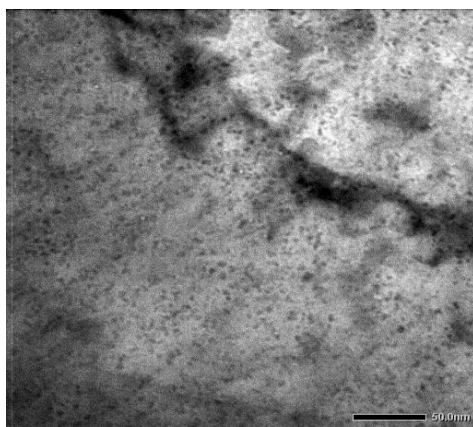
Hình 11. Ảnh SEM của mẫu 2 sau xử lý nhiệt
 Bảng 3. Thành phần nguyên tố tại các vị trí khác nhau của mẫu 2

| Pha liên kim | | |
|--------------|---------------|-------------|
| Nguyên tố | % Trọng lượng | % Nguyên tử |
| Ni | 3,92 | 3,56 |
| Cu | 6,48 | 5,44 |
| Al | 5,38 | 10,63 |
| Fe | 84,22 | 80,37 |

| Pha Mactenxit | | |
|---------------|---------------|-------------|
| Nguyên tố | % Trọng lượng | % Nguyên tử |
| Ni | 6,25 | 5,93 |
| Cu | 78,79 | 69,08 |
| Al | 9,44 | 19,49 |
| Fe | 5,51 | 5,50 |



Hình 12. Ảnh TEM của Mactenxit sau xử lý nhiệt



Hình 13. Ảnh TEM của pha liên kim

Bảng 4. Giá trị độ cứng trung bình

| Trạng thái | Độ cứng trung bình (HRB) | |
|------------|--------------------------|-------------|
| | Cu-Al-Fe | Cu-Al-Fe-Ni |
| Sau đúc | 88 | 98 |
| Sau tôi | 86 | 94,5 |
| Sau ram | 98 | 107,5 |

Bảng 5. Độ hụt khối

| Trạng thái | Độ hụt khối (g) | |
|------------|-----------------|-------------|
| | Cu-Al-Fe | Cu-Al-Fe-Ni |
| Sau đúc | 0,83 | 0,81 |
| Sau tôi | 0,80 | 0,75 |
| Sau ram | 0,12 | 0,10 |

* Sau khi tôi và ram

Mục đích của quy trình xử lý nhiệt sau đúc là tạo ra các pha tăng bền cho hợp kim đồng. So sánh tổ chức sau khi đúc với tổ chức sau khi tôi và ram cho thấy có sự thay đổi rõ rệt về kích thước hạt và các pha hình thành. Quan sát trên Hình 6 cho thấy, sau khi xử lý nhiệt mẫu 1, kích thước của pha α nhỏ hơn và đồng đều so với sau đúc, đạt khoảng 40 μ m-50 μ m. Đặc biệt, tại vùng đen $\alpha+\beta$ xuất hiện các pha có dạng hình kim được dự đoán là Mactenxit hình thành sau khi tôi. Trên nền α vẫn còn các chấm đen nhỏ là các pha liên kim Fe₃Al hoặc FeAl đã xuất hiện sau đúc. Đối với mẫu 2 (Hình 7), có thể nhìn thấy rõ các pha Mactenxit đan xen trên mặt cắt ngang theo cùng một hướng hoặc đa hướng. Kích thước vùng α đạt khoảng 20 μ m và các

pha liên kim (chấm đen) trên nền α cũng nhỏ hơn so với mẫu 1 và so với trước khi xử lý nhiệt. Điều này hoàn toàn phù hợp với chuyển biến pha của tổ chức sau đúc.

Để làm rõ các pha hóa bền sau khi tôi, các mẫu được phân tích XRD. Sau khi tính toán, cả hai mẫu đều xuất hiện Cu₃Al là cấu trúc pha của Mactenxit (pha β') có kiểu mạng BCC và HCP. Để xác định chính xác các pha hóa bền hình thành thì cần tiếp tục được phân tích bằng phương EDS và TEM.

Phân tích EDS mẫu 1 sau khi xử lý nhiệt để xác định thành phần ở các vị trí bao gồm: Pha dạng chấm đen trên nền α , pha dạng kim trên nền $\alpha+\beta$ và vùng α (Hình 10, Bảng 2). Tiến hành tính toán theo kết quả thu được có thể kết luận pha dạng chấm đen hình

thành là pha liên kim Fe_3Al . Kết quả này hoàn toàn phù hợp với phân tích XRD ở trên. Kết quả EDS của mẫu 2 được hiển thị trên Hình 11 và Bảng 3. Kết quả tính toán dựa theo thành phần thu được ở điểm 1 có thể kết luận là pha liên kim Fe_3Al , tuy nhiên không tìm ra được pha liên kim của Niken, mặc dù có thấy sự xuất hiện của Niken theo EDS. Điều này có thể được giải thích là do Niken hòa tan vào trong đồng tạo thành dung dịch rắn. Dựa vào phân tích thành phần các điểm và tính toán thông số mạng trên ảnh TEM (Hình 12, Hình 13) có thể đưa ra kết luận về sự hình thành của Mactenxit sau tôi và pha liên kim Fe_3Al . Đây được coi là cơ sở làm tăng độ cứng, độ bền và khả năng chống mài mòn xâm thực của vật liệu.

4.2. Sự tiết pha hóa bền đến cơ tính của vật liệu

Để đánh giá ảnh hưởng của các pha hóa bền đến khả năng chống xâm thực của vật liệu, các mẫu sẽ được đo độ cứng và thử nghiệm khả năng chống mài mòn ở các chế độ sau đúc và sau khi tôi và ram. Theo kết quả bảng so sánh giá trị độ cứng (Bảng 4), các mẫu sau khi đúc có độ cứng cao hơn so với trạng thái tôi. Nguyên nhân là do tổ chức sau khi đúc là α và các pha liên kim kích thước thô sẽ có độ cứng cao hơn so với pha α và Mactenxit β' . Sau khi ram, Mactenxit bị phân hủy thành các pha α và pha liên kim phân tán đều và nhỏ mịn nên độ cứng sẽ tăng lên.

Khi so sánh hai mẫu có thành phần khác nhau, hợp kim có bổ sung Niken giúp làm tăng độ cứng của vật liệu. Điều này hoàn toàn phù hợp với các kết quả phân tích tổ chức tế vi ở trên.

Dựa theo kết quả thử nghiệm khả năng chống mài mòn cho thấy (Bảng 5), khi các pha hóa bền tiết ra càng nhiều, độ cứng càng cao thì khả năng chống mài mòn của vật liệu được nâng cao. Cụ thể hợp kim được hợp kim hóa Niken có khả năng chống mài mòn tốt hơn so với mẫu còn lại.

6. Kết luận

1. Dựa theo kết quả phân tích tổ chức quang học, XRD, EDS và TEM đã tìm ra được các pha Mactenxit và pha liên Fe_3Al , và pha Fe_3Al là pha hóa bền trong hợp kim Cu-Al-Fe và Cu-Al-Fe-Ni.

2. Khi hợp kim hóa thêm Niken sẽ giúp làm giảm kích thước vùng α , làm tăng độ cứng và tăng khả năng chống mài mòn của vật liệu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT22-23.107.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Sreedhar, B. K., Albert, S. A., & Pandit, A. B. (2017). *Cavitation damage: Theory and measurements-A review*. Wear, 372, pp.177-196.
- [2] Knapp, R. T., & Hollander, A. (1948). *Laboratory investigations of the mechanism of cavitation*. Transactions of the ASME, 70, pp.419-433.
- [3] Hucińska, J., & Głowack, M. (2001). *Cavitation erosion of copper and copper-based alloys*. Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.32(6), pp.1325-1333.
- [4] Karimi, A., & Martin, J. L. (1986). *Cavitation erosion of materials*. International Metals Reviews, Vol.31(1), pp.1-26.
- [5] Wang, D., Xiao, B. L., Ni, D. R., & Ma, Z. Y. (2014). *Friction stir welding of discontinuously reinforced aluminum matrix composites: a review*. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), Vol.27(5), pp.816-824.
- [6] Zhang, L. M., Ma, A. L., Yu, H., Umoh, A. J., & Zheng, Y. G. (2019). *Correlation of microstructure with cavitation erosion behaviour of a nickel-aluminum bronze in simulated seawater*. Tribology International, Vol.136, pp.250-258.
- [7] Wood, R. J. (2017). *Marine wear and tribocorrosion*. Wear, Vol.376, pp.893-910.
- [8] Wade, E. H. R., & Preece, C. M. (1978). *Cavitation erosion of iron and steel*. Metallurgical Transactions A, Vol.9(9), pp.1299-1310.
- [9] Wu, S. K., Lin, H. C., & Yeh, C. H. (2000). *A comparison of the cavitation erosion resistance of TiNi alloys, SUS304 stainless steel and Ni-based self-fluxing alloy*. Wear, Vol.44(1-2), pp.85-93.
- [10] Mochizuki, H., Yokota, M., & Hattori, S. (2007). *Effects of materials and solution temperatures on cavitation erosion of pure titanium and titanium alloy in seawater*. Wear, Vol.262(5-6), pp.522-528.
- [11] Li, X. Y., Yan, Y. G., Ma, L., Xu, Z. M., & Li, J. G. (2004). *Cavitation erosion and corrosion behavior of copper-manganese-aluminum alloy weldment*. Materials Science and Engineering: A, Vol.382(1-2), pp.82-89.
- [12] Tang, C. H., Cheng, F. T., & Man, H. C. (2004). *Effect of laser surface melting on the corrosion and cavitation erosion behaviors of a manganese-nickel-aluminium bronze*. Materials Science and Engineering: A, Vol.373(1-2), pp.195-203.

- [13] Wharton, J. A., Barik, R. C., Kear, G., Wood, R. J. K., Stokes, K. R., & Walsh, F. C. (2005). *The corrosion of nickel-aluminium bronze in seawater*. Corrosion science, Vol.47(12), pp.3336-3367.
- [14] Vaidya, S., & Preece, C. M. (1978). *Cavitation erosion of age-hardenable aluminum alloys*. Metallurgical Transactions A, Vol.9(3), pp.299-307.
- [15] Ye, H. (2003). *An overview of the development of Al-Si-alloy based material for engine applications*. Journal of Materials Engineering and Performance, Vol.12(3), pp.288-297.
- [16] Zou, J., Zhu, Y., Pan, M., Xie, T., Chen, X., & Yang, H. (2017). *A study on cavitation erosion behavior of AlSi10Mg fabricated by selective laser melting (SLM)*. Wear, Vol.376, pp.496-506.
- [17] S. Vedantam and R. Abeyaratne (2005), *A Helmholtz free-energy function for a Cu - Al - Ni shape memory alloy*, Vol. 40, pp.177-193.
- [18] P. Jain and P. K. Nigam (2013), *Influence of Heat Treatment on Microstructure and Hardness of Nickel Aluminium Bronze (Cu-10Al-5Ni-5Fe)*, IOSR journal of mechanical and Civil Engineering, Vol.04, Issue.6 (Jan - Feb. 2013), pp.16-21
- [19] N. N. Myuller and A. V. Agafonova (1979), *Mechanical properties of Cu-Al-Fe alloys*, Met. Sci. Heat Treat., Vol.21, No.3, pp.217-220.
- [20] S. Stanciu and L. G. Bujoreanu (2008), *Formation of β' stress-induced martensite in the presence of γ -phase, in a Cu-Al-Ni-Mn-Fe shape memory alloy*, Mater. Sci. Eng. A, Vol.481-482, pp.494-499.
- [21] N. N. Myuller and A. V. Agafonova (1979), *Mechanical properties of Cu-Al-Fe alloys*, Met. Sci. Heat Treat., Vol.21, No.3, pp.217-220.

| | |
|--------------------|------------|
| Ngày nhận bài: | 30/11/2022 |
| Ngày nhận bản sửa: | 16/12/2022 |
| Ngày duyệt đăng: | 31/12/2022 |