

# Mô hình toán học về khả năng chống xói mòn do xâm thực của vật liệu

■ **TS. LÊ THỊ NHUNG; THS. ĐOÀN XUÂN TRƯƠNG**  
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

**TÓM TẮT:** Hiện tượng xói mòn do xâm thực trên chân vịt tàu thủy ảnh hưởng xấu tới hiệu suất làm việc như giảm tốc độ, tăng mức tiêu thụ năng lượng và gây ra các rủi ro về kinh tế và tính an toàn. Bài báo trình bày về ứng xử của vật liệu khi bị xâm thực và xây dựng mô hình về khả năng chống xói mòn do xâm thực của vật liệu. Kết quả nghiên cứu đã đưa ra đồ thị biểu diễn tốc độ xói mòn và chiều sâu xói mòn do xâm thực của ba loại vật liệu là hợp kim nhôm, thép không gỉ và hợp kim đồng, qua đó dự đoán được tốc độ xói mòn lớn nhất của vật liệu và chiều sâu xói mòn do xâm thực theo thời gian.

**TỪ KHÓA:** Xâm thực, mô hình xói mòn, tốc độ xói mòn, chiều sâu xói mòn xâm thực.

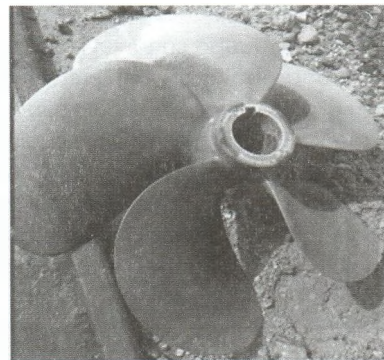
**ABSTRACT:** Cavitation erosion affects on performance of propeller such as speed declining, fuel consumption increasing, and contributing to economic and safety risks. This paper presents the behavior of materials in the cavitation erosion process and a model of the materials' cavitation erosion resistance. The results of the study show the curves of the erosion rate and cavitation erosion depth of aluminum alloy, stainless steel and copper alloy. The maximum erosion rate and the erosion depth versus time curves are predicted.

**KEYWORDS:** Cavitation, erosion modeling, erosion rate, cavitation erosion depth.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

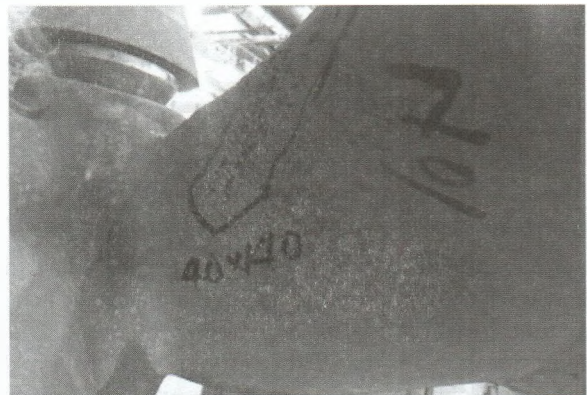
Chân vịt là một loại thiết bị truyền công suất bằng cách biến chuyển động quay của các cánh thành lực đẩy để tạo chuyển động cho tàu thủy. Do sự chênh lệch áp suất được tạo ra giữa bề mặt phía trước và phía sau của cánh quạt đã làm tăng mạnh áp suất nước ở mặt sau cánh. Trên thực tế, khi các cánh chân vịt hoạt động ở tốc độ quay cao hoặc dưới tải nặng sẽ đẩy nhanh tốc độ dòng chảy. Lúc này, nước sẽ không kịp lấp đầy mặt trước của cánh sau khi đã tạt ra xung quanh, áp suất trên bề mặt cánh chân vịt có thể giảm xuống dưới áp suất hơi của nước và hình thành các túi hơi ở vùng này. Vị trí đầu tiên xảy ra xâm thực là diện tích quanh vùng ranh giới chênh áp, trong đó độ nhám của các

cánh chân vịt cũng kích thích sự chuyển đổi dòng chảy từ dạng chảy tầng thành chảy rối [1, 2]. Quá trình xâm thực sẽ nghiêm trọng hơn tại vị trí hình thành các bong bóng xâm thực, sau đó các bong bóng này chảy đến cánh của chân vịt tại khu vực có áp suất cao, gây nổ túi bong bóng. Khi nổ, các bong bóng sẽ tạo ra sóng xung kích, làm thay đổi dòng chảy, giảm hiệu quả hoạt động và tốc độ của tàu. Các cánh của chân vịt khi bị xâm thực lâu dài sẽ tạo ra các lỗ hổng khác nhau trên bề mặt, làm tăng tốc độ xói mòn và hiện tượng bám bẩn [3].



Hình 1.1: Hình ảnh chân vịt bị xâm thực

Trong một số nghiên cứu và khảo sát thực tế, ảnh hưởng của sự xâm thực chân vịt không chỉ giảm tốc độ, tăng mức tiêu thụ năng lượng và có thể gây ra các rủi ro rất lớn về kinh tế và an ninh [4, 5].



Hình 1.2: Chiều sâu và diện tích bị xâm thực

Để giảm hiện tượng xâm thực, các nghiên cứu thường tập trung theo các hướng như tối ưu hóa hình dạng của chân vịt, thay đổi vật liệu hoặc tạo lớp phủ bề mặt. Dự đoán khả năng xói mòn xâm thực của vật liệu có vai trò quan

Tốc độ xói mòn

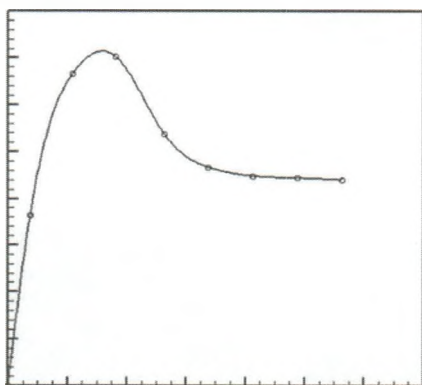
trọng trong việc thiết kế, tính toán và giảm chi phí thực nghiệm. Quá trình đánh giá khả năng chống xói mòn do xâm thực của vật liệu thường được thực hiện bằng cách so sánh các đường cong xói mòn (sự mất mát khối lượng theo thời gian và khối lượng tỉ lệ hao mòn) [6, 7], tuy nhiên chi phí thực hiện thường rất tốn kém và mất nhiều thời gian. Do đó, các mô hình toán học đã được sử dụng để mô phỏng khả năng xói mòn do xâm thực của vật liệu, giúp dự đoán trước được các hiện tượng xảy ra và đưa ra biện pháp khắc phục trước khi tiến hành thực nghiệm [8-11].

Bài báo này phân tích ứng xử của vật liệu ở các giai đoạn khác nhau trong quá trình xâm thực và đưa ra mô hình toán học để tính toán tốc độ ăn mòn và chiều sâu ăn mòn của các loại vật liệu khác nhau.

## 2. ỨNG XỬ CỦA VẬT LIỆU TRONG QUÁ TRÌNH XÂM THỰC

Xói mòn xâm thực là kết quả của vật liệu khi chịu tải xung động lặp đi lặp lại do áp suất cường độ cao, sóng xung kích hoặc phản lực của bọt khí gây ra. Các vật liệu có độ bền kém sẽ nhanh chóng bị hỏng hóc, trong khi các vật liệu bền hơn sẽ tích tụ vết nứt và xuất hiện phá hủy mỗi khi làm việc trong thời gian dài.

Hình 2.1 biểu diễn đường cong xói mòn do thâm thực được xác định trong phòng thí nghiệm [7]. Ban đầu, bề mặt của vật liệu bị biến dạng và gây biến cứng bề mặt. Giai đoạn này có thể xảy ra biến dạng vĩnh cửu, đôi khi kèm theo biến dạng dẻo và chuyển vị cục bộ vi mô, hoặc ở các vật liệu giòn sẽ xuất hiện các nguồn gây nứt vi mô. Đây là đoạn đầu tiên và thường khó xác định lượng hao hụt kim loại, tuy nhiên nó có vai trò quan trọng trong việc xác định tuổi thọ của thiết bị.

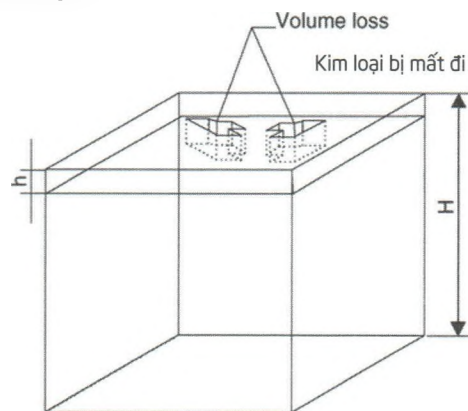


Hình 2.1: Đường cong xói mòn do xâm thực của hợp kim nhôm [7]

Trong giai đoạn 2, tốc độ xói mòn của vật liệu tăng nhanh và đạt tới mức tối đa, đây gọi là giai đoạn tích lũy hoặc tăng tốc. Trên bề mặt của vật liệu thường xuất hiện các vết nứt và giảm mạnh khối lượng. Tốc độ giảm khối lượng trong giai đoạn này phụ thuộc vào đặc tính biến cứng của từng loại vật liệu và sự lan truyền vết nứt ở giữa các hạt. Giai đoạn 2 kết thúc sau khi đặc tính bề mặt của vật liệu thay đổi nhiều và bắt đầu xuất hiện tương tác giữa bề mặt vật liệu mới và vùng xâm thực. Lúc này, độ nhám bề mặt sẽ ảnh hưởng đến động lực học của các khoang hình

thành, khí và chất lỏng bị cuốn vào các hố sâu sẽ tạo ra đệm cho bong bóng xẹp xuống. Giai đoạn này gọi là giai đoạn giảm tốc. Cuối cùng, khi mức độ xói mòn của môi trường xâm thực và ứng xử của vật liệu đạt cân bằng, tốc độ giảm khối lượng gần như không đổi.

## 3. MÔ HÌNH TOÁN HỌC VỀ SỰ XÂM THỰC TRONG THỜI GIAN DÀI



Hình 3.1: Mô hình xói mòn do xâm thực của Weibull

Mô hình biểu diễn xói mòn xâm thực của Weibull đã được sử dụng rộng rãi để xác định thể tích kim loại bị mất đi dựa trên thể tích ban đầu của mẫu và xác suất xói mòn thể tích tích lũy (Hình 3.1). Giả sử ban đầu vật liệu bị xói mòn xâm thực là một phần tử có thể tích là  $V_0$ , khi đó xác suất mất đi tính như sau:

$$P(V_0) = 1 - \exp \left[ -IV_0 \left( \frac{t}{K_c} \right)^{1/W_{pl}} \right] \quad (1)$$

Trong đó:  $V_0$  - Thể tích ban đầu của phần tử bị xói mòn ( $V_0 = Ah$ );  $K_c$  - Hệ số cường độ ứng suất trong điều kiện xâm thực;  $W_{pl}$  - Biến dạng dẻo trên bề mặt bị xói mòn.

Gọi  $n$  là số lượng phần tử thể tích bị xói mòn, khi đó thể tích bị xói mòn là  $V = nV_0$ .

Xác suất xói mòn thể tích tích lũy đối với toàn bộ thể tích bị xói mòn  $V$  được xác định như sau:

$$P(V) = [P(V_0)]^n = [P(V_0)]^{V/V_0} \quad (2)$$

Lấy logarit công thức (2) ta được:

$$\ln P(V) = \frac{V}{V_0} \ln P(V_0) \quad (3)$$

Hoặc:

$$P(V) = \exp \left\{ \frac{V}{V_0} \ln P(V_0) \right\} \quad (4)$$

Lấy logarit phương trình (1) và thay vào (4) thu được:

$$P(V) = \exp \left\{ \frac{V}{V_0} \ln \left[ 1 - \exp \left( -IV_0 \left( \frac{t}{K_c} \right)^{1/W_{pl}} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

Bởi vì  $V = AH$  và  $V_0 = Ah$ , do đó:

$$P(V) = \exp \left\{ \frac{H}{h} \ln \left[ 1 - \exp \left( -IAh \left( \frac{t}{K_c} \right)^{1/W_{pl}} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

Thể tích xói mòn của vật liệu là tích số của thể tích ban đầu và xác suất hao hụt thể tích tích lũy  $P(V)$ :

$$V(t) = V \exp \left\{ \frac{H}{h} \ln \left[ 1 - \exp \left( -IAh \left( \frac{t}{K_c} \right)^{1/W_{pl}} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

Sau khi đạo hàm phương trình (7) và rút gọn sẽ thu được phương trình tính tốc độ mất khối lượng do xói mòn.

$$\frac{dV}{dt} = V(t) \frac{VIt^{(1-w_{pl})/w_{pl}} \exp[-IAh(t/K_c)^{1/w_{pl}}]}{w_{pl}(K_c)^{1/w_{pl}} \{1 - \exp[-IAh(t/K_c)^{1/w_{pl}}]\}} \quad (8)$$

Weibull dựa trên giả thuyết tốc độ xói mòn đầu và cuối bằng 0, tuy nhiên điều này không phù hợp khi xét quá trình xói mòn trong thời gian dài. Trong mô hình mới này, mật độ xâm thực của vật liệu, kích thước của vùng bị xâm thực và thời gian xói mòn sẽ được biểu diễn thông qua giá trị chiều sâu xói mòn trung bình  $h$  là hàm của thời gian theo công thức sau:

$$h(t) = \frac{m(t)}{\rho A(t)} \quad (9)$$

Trong đó:

$m(t)$  - Khối lượng bị mất đi;

$A(t)$  - Diện tích bị xói mòn tại thời điểm  $t$ ;

$\rho$  - Tỷ trọng của vật liệu.

Ta có:

$$\text{Đặt } t' = t - t_0, \text{ khi } h = 0, \text{ thì } t' \leq 0 \quad (10)$$

$$h = h_1(1 - e^{-t'^n}) + h_2 t'^{\beta}$$

Trong đó:

$t_0$  - Thời gian ủ;

$h_1, h_2$  - Hệ số chiều sâu xói mòn;

$n, \beta$  - Tham số thời gian đặc trưng cho quá trình xói mòn xâm thực.

Chuẩn hóa phương trình (10) bằng cách sử dụng chiều sâu đặc trưng  $h^*$  và thời gian đặc trưng  $t^*$ . Gọi  $\bar{h}$  là chiều sâu xói mòn chuẩn hóa và  $\bar{t}$  là thời gian chuẩn hóa, ta có:

$$\bar{h} = \frac{h}{h^*}, \bar{t} = \frac{t - t_0}{t^*} \quad (11)$$

Phương trình chuẩn hóa cho quá trình xói mòn xâm thực như sau:

$$\bar{h} = 1 - e^{-\bar{t}^n} + \alpha \bar{t}^{\beta} \quad (12)$$

Trong đó:  $n, \alpha, \beta$  - Các tham số đặc trưng cho quá trình xói mòn xâm thực dựa trên số liệu thực nghiệm.

Cả 3 thông số ( $h^*, t^*$  và  $t_0$ ) đặc trưng cho phản ứng của từng loại vật liệu cụ thể trong môi trường xói mòn xâm thực. Khi thời gian nhỏ hơn  $t_0$  sẽ không xảy ra hiện tượng mất khối lượng, lúc này  $h = h^*$  tại  $t = t_0$  hay  $\bar{h} = 1$  tại  $\bar{t} = 1$ .

Lấy đạo hàm bậc 1 phương trình (12) sẽ được tốc độ xói mòn xâm thực của vật liệu ( $r$ ). Tốc độ này đạt lớn nhất tại  $t = 0,75t^*$ .

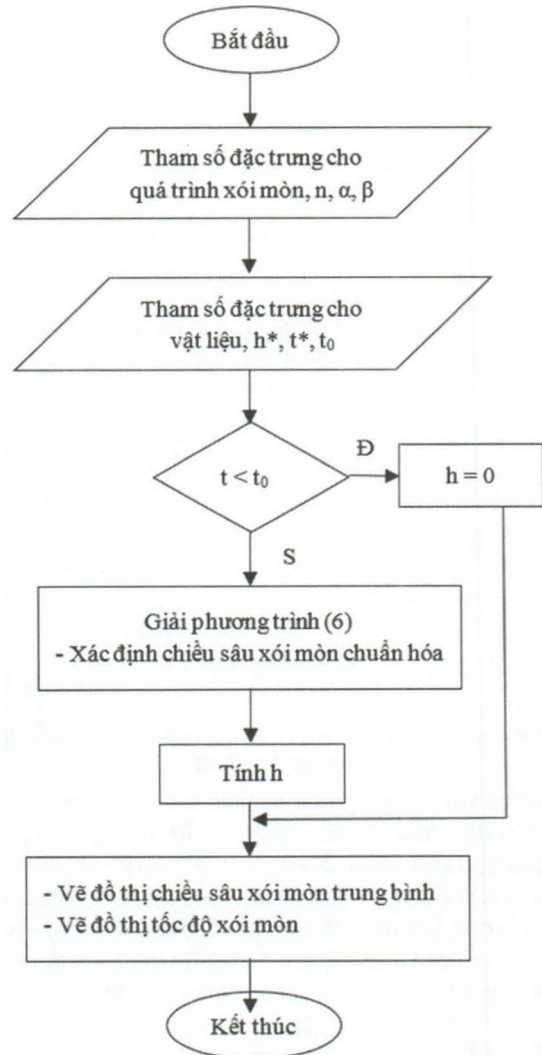
$$r = \frac{d\bar{h}}{d\bar{t}} = n\bar{t}^{(n-1)}e^{-\bar{t}^n} + \alpha\beta\bar{t}^{(\beta-1)} \quad (13)$$

#### 4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Để giải phương trình (12) (13), các tham số đặc trưng cho quá trình xói mòn được lấy từ thực nghiệm như sau:  $n = 2, \alpha = 1/e = 0,37, \beta = 1,2$ . Mô hình đánh giá khả năng chống xói mòn xâm thực được thực hiện trên 3 loại vật liệu được dùng để chế tạo chân vịt tàu thủy là hợp kim nhôm, thép không gỉ và hợp kim đồng. Các tham số đặc trưng cho 3 loại vật liệu đã cho như trong *Bảng 4.1*. Khi  $t < t_0$ , vật liệu không có hiện tượng xói mòn, nghĩa là  $h = 0$ . Quy trình tính toán được mô tả trong *Hình 4.1*.

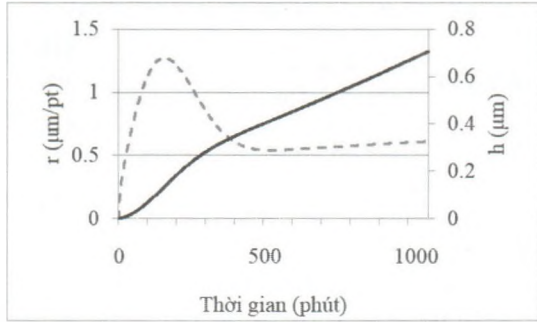
**Bảng 4.1. Tham số sử dụng trong mô hình tính toán**

Vật liệu	Hợp kim nhôm	Thép không gỉ	Đồng nhôm niken
Lớp phủ	Không	Không	Không
Chiều sâu xói mòn đặc trưng, $h^*$ , mm	0,197	0,0621	0,0498
Thời gian đặc trưng, $t^*$ , phút	2100	771	4190
Tốc độ xói mòn đặc trưng, $h^*/t^*$ (m/phút)	0,094	0,081	0,012

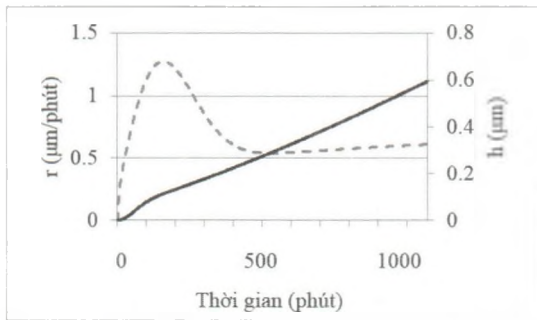


**Hình 4.1: Trình tự tính toán**

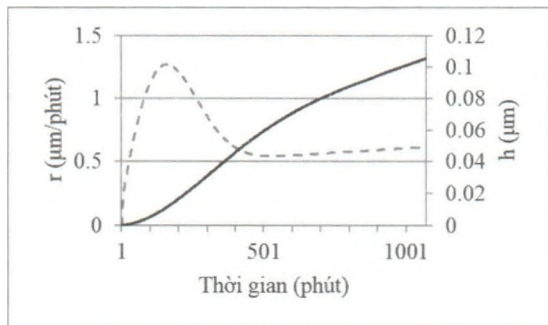
Từ mô hình toán học, đồ thị biểu diễn chiều sâu xói mòn trung bình do xâm thực và tốc độ xói mòn của các loại vật liệu được đưa ra trong *Hình 4.2, 4.3 và 4.4*. Kết quả thu được cho thấy, tốc độ xói mòn của vật liệu được chia thành 4 giai đoạn. Khi  $t < t_0$ , tốc độ xói mòn bằng 0, lúc này vật liệu không bị xói mòn. Khi  $t > t_0$ , tốc độ xói mòn tăng mạnh và đạt giá trị lớn nhất 1,2  $\mu\text{m/phút}$  cho hợp kim nhôm, thép không gỉ và hợp kim đồng. Sau đó, tốc độ xói mòn giảm dần và không đổi.



Hình 4.2: Đồ thị biểu diễn tốc độ và chiều sâu xói mòn xâm thực của hợp kim nhôm

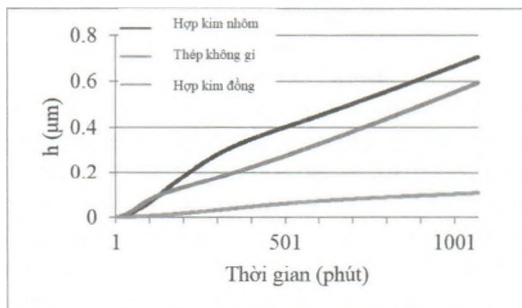


Hình 4.3: Đồ thị biểu diễn tốc độ và chiều sâu xói mòn xâm thực của thép không gỉ



Hình 4.4: Đồ thị biểu diễn tốc độ và chiều sâu xói mòn xâm thực của hợp kim đồng

Hình 4.5 là kết quả so sánh chiều sâu trung bình của lớp xói mòn cho 3 loại vật liệu đang xét. Khả năng chống xâm thực của hợp kim đồng tốt hơn so với thép không gỉ và hợp kim nhôm. Ví dụ, ở  $t = 500$  phút, hợp kim đồng bị xói mòn  $2,5 \mu\text{m}$ , trong khi thép không gỉ và hợp kim nhôm tương ứng là  $25 \mu\text{m}$  và  $80 \mu\text{m}$ . Đồ thị này giúp dự đoán được mức độ xói mòn theo thời gian của từng loại vật liệu.



Hình 4.5: So sánh chiều sâu xói mòn xâm thực của các loại vật liệu khác nhau

### 5. KẾT LUẬN

Mô hình toán học cho phép xác định tốc độ xói mòn và chiều sâu xói mòn xâm thực của các vật liệu khác nhau dựa trên đặc tính của vật liệu. Tuy nhiên, trong mô hình này chưa đề cập đến giai đoạn ủ, do đó cần phải có thêm các nghiên cứu sâu hơn về cơ chế hình thành rỗ hoặc vết nứt tế vi trong thời gian ủ để đưa ra mô hình tổng quát về xói mòn xâm thực.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT21-22.29.

### Tài liệu tham khảo

- [1]. Brennen, C. E. (2014), *Cavitation and bubble dynamics*, Cambridge university press.
- [2]. Acosta, A. J., & Parkin, B. R. (1975), *Cavitation inception - a selective review*, Journal of ship research, 19(04), 193-205.
- [3]. Cong, W. W., Wang, K., Jiang, J. M., Yu, X. Y., Zhang, H. Q., Guo, Y. D., ... & Gui, T. J. (2019, April), *An experimental investigation of the composite coating for marine propellers on cavitation characteristics and fouling release property*, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (vol.504, no.1, p.012030), IOP Publishing.
- [4]. Carlton, J. (2018), *Marine propellers and propulsion*, Butterworth-Heinemann.
- [5]. Okada, T., Iwai, Y., Hattori, S., & Tanimura, N. (1995), *Relation between impact load and the damage produced by cavitation bubble collapse*, Wear, 184(2), 231-239.
- [6]. 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, 244(1-2), 85-93.
- [7]. Szkodo, M. (2005), *Mathematical description and evaluation of cavitation erosion resistance of materials*, Journal of Materials Processing Technology, 164, 1631-1636.
- [8]. Soyama, H., Lichtarowicz, A., Momma, T., & Williams, E. J. (1998), *A new calibration method for dynamically loaded transducers and its application to cavitation impact measurement*.
- [9]. Hattori, S., & Takinami, M. (2010), *Comparison of cavitation erosion rate with liquid impingement erosion rate*, Wear, 269(3-4), 310-316.
- [10]. Bregliozzi, G., Di Schino, A., Ahmed, S. U., Kenny, J. M., & Haefke, H. (2005), *Cavitation wear behaviour of austenitic stainless steels with different grain sizes*, Wear, 258(1-4), 503-510.
- [11]. Dular, M., & Coutier-Delgosha, O. (2009), *Numerical modelling of cavitation erosion*, International journal for numerical methods in Fluids, 61(12), 1388-1410.

Ngày nhận bài: 05/4/2022

Ngày chấp nhận đăng: 14/4/2022

Người phản biện: PGS. TS. Nguyễn Dương Nam

TS. Nguyễn Thị Thu Lê