NGHIÊN CỨU, LỰA CHỌN MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM MÒN THIẾT BỊ VẬN CHUYỂN ĐẤT ĐÁ MỎ, QUẶNG RẮN

RESEARCH AND SELECTION RELEVANVE LABORATORY WEAR TEST MODEL OF MINERAL HANDING AND PROCESSING EQUIPMENT

Phạm Thị Thủy*, Nguyễn Sơn Tùng
Khoa Cơ – Điện, Trường Đại học Mỏ - Địa chất
**Email: phamthithuy@humg.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo tập trung nghiên cứu phân tích cơ chế mòn xảy ra đối với các thiết bị được sử dụng trong lĩnh vực khai thác mỏ và chế biến khoáng sản. Thông qua việc nghiên cứu, tổng hợp các kết quả nghiên cứu thử nghiệm mòn của vật liệu được công bố trên các tạp chí khoa học có uy tín trên thế giới. Nhóm nghiên cứu phân tích, đánh giá ưu điểm, nhược điểm của các mô hình thử nghiệm mòn được sử dụng trong những công trình nghiên cứu đó. Trên cơ sở phân tích, lý giải một vài tuyên bố đối lập giữa các kết quả nghiên cứu thu được của các nhà khoa học về khả năng chống mòn của thép dụng cụ, thép hợp kim, gang trắng, hợp kim gang trước cùng tinh, nhóm nghiên cứu lựa chọn mô hình thử nghiệm mòn dạng máy đập hàm nghiên cứu thử nghiệm, khảo sát ứng xử mòn của vật liệu được ứng dụng chế tạo thiết bị vận chuyển, bốc xúc đất đá, quặng.

Từ khóa: *Mòn va đập; Thiết bị vận tải mỏ; Mô hình thử nghiệm mòn; Mô hình thử nghiệm mòn máy nghiền đập hàm; ASTM G81.*

ABSTRACT

This paper provide comprehensive knowledge of wear mechanism in mining field and mineral processing. Based on researching and analysis the previous obtained results which were published on well-know international science journals in the world, the authors took place analysing the advantages and limitation of these laboratory wear resistance test models. In this work, the authors deeply explained several conflict between the previous statements on abrasion wear resistance of materials: tool steels, manganese alloy, white cast euectic iron or alloy of near euectic iron. The authors propose using jaw crusher as laboratory experiment to analysis the behabiour and wear resistance of materials using to manufacture rock and ore handing, loading machines in mining and mineral processing field.

Keywords: *Abrasion and impact; Mining transport equipment; Wear testing model; Jaw crusher; ASTM G81.*

1. MỞ ĐẦU

Nghiên cứu về ứng xử mòn và khả năng chống mòn của vật liệu là một lĩnh vực có lịch sử phát triển lâu đời, bắt đầu từ mô hình của Robin vào năm 1910. Trải qua hơn một thế kỷ, mặc dù đã có nhiều tiến bộ, nhưng lý thuyết về ma sát và mòn vẫn tiếp tục là một thách thức lớn đối với khoa học vật liệu hiện đại. Đặc biệt, các tài liệu nghiên cứu chuyên sâu về mòn cho các chi tiết máy trong lĩnh vực khai thác mỏ và xây dựng hiện vẫn còn khá khiêm tốn [10], [12]. Những năm 70 của thế kỷ XX, các nghiên cứu của Khruschov đã đặt nền móng quan trọng cho việc hiểu về mài mòn, dẫn đến sự ra đời của các tiêu chuẩn như ASTM G65, ASTM B611 hay ASTM G81. Trong thực tế, vẫn tồn tại nhiều mâu thuẫn giữa các kết quả nghiên cứu thực nghiệm và thực tiễn vận hành như khả năng chống mòn của hợp kim mangan trong các ứng dụng như răng gầu xúc, tấm lót máy nghiền, hay lưỡi ủi vẫn còn nhiều tranh cãi [3], [7], [11].

Sự đối lập trong kết quả nghiên cứu giữa các nhóm tác giả (như J.A. Hawk và Jiang so với Tuomas) về khả năng chịu mòn của gang trắng trước cùng tinh và thép hợp kim mangan cho thấy việc lựa chọn mô hình thử nghiệm không phù hợp có thể dẫn đến những đánh giá sai lệch. Do đó, việc xác định một mô hình thực nghiệm đáp ứng được các tiêu chí: mô tả sát điều kiện làm việc thực tế, dễ dàng kiểm soát thông số và rút ngắn thời gian đánh giá là yêu cầu cấp thiết [8].

2. CƠ CHẾ MÒN XẢY RA VỚI MÁY, THIẾT BỊ KHAI THÁC MỎ

Mòn là hiện tượng thất thoát vật liệu từ bề mặt chi tiết, làm giảm dần kích thước, thể tích và khối lượng kim loại do ma sát. Nghiên cứu này tập trung đề cập hiện tượng mòn cơ học của thiết bị được sử dụng trong lĩnh vực khai thác mỏ và chế biến khoáng sản.

2.1. Mài mòn (Abrasion)

Mài mòn cọ xát (abrasive wear) là dạng mòn phổ biến nhất, là hiện tượng hao mòn vật liệu do hiện tượng vi cắt (micro cutting) xảy ra trên bề mặt chi tiết hoặc vật thể rắn (gọi chung là vật thể rắn). Bề mặt vật thể rắn không nhẵn hoàn toàn mà thường thô ráp, xù xì hoặc nhám. Khi hai vật thể rắn tiếp xúc với nhau và có sự xâm nhập hoặc đan xen của các mô nhám bề mặt, dưới tác động của chuyển động tương đối giữa hai vật thể rắn mà các mô nhám bị cắt đứt tách ra khỏi khối vật thể ban đầu [3], [7]. Tại vị trí lân cận xung quanh mô nhám bị cắt đứt hình thành một bề mặt với nhám mới. Trong trường hợp này, vật liệu nào mềm hơn sẽ bị cắt đứt nhanh chóng, một số nhà nghiên cứu gọi đây là trường hợp mòn tiếp xúc hai vật thể rắn (two-body abrasion). Khi xuất hiện hạt rắn có độ cứng lớn xen kẽ giữa hai bề mặt vật thể thì hiện tượng vi cắt diễn ra mạnh mẽ hơn. Hạt rắn xen kẽ hay còn gọi là mạt mài mòn có thể bám dính và chuyển động trượt hoặc lăn trên bề mặt vật thể. Trường hợp này được gọi là mài mòn tiếp xúc ba vật thể (three-body abrasion) [10], [12]. Đầu tiên, do biến dạng dẻo mà các hạt rắn sắc cạnh sẽ xâm nhập vào bề mặt vật rắn. Khi có tác động chuyển động tịnh tiến sẽ cắt đứt vật liệu tạo thành các vết cào xước. Nếu chênh lệch độ cứng giữa hạt rắn và vật liệu càng lớn thì vết cắt càng sâu và vật liệu hao mòn sẽ nhanh chóng.

2.2. Mòn va đập (Impact wear)

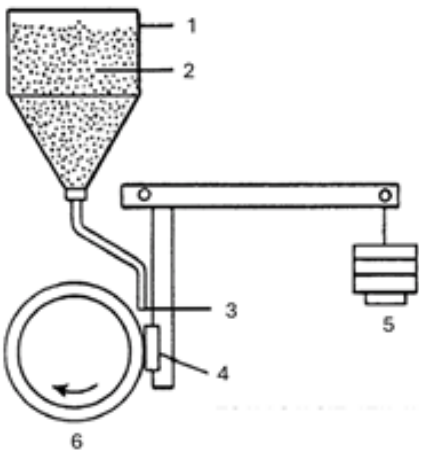
Mòn va đập là một dạng mài mòn bề mặt chi tiết, bộ phận máy dưới tác động của năng lượng va đập. Hiện tượng mòn này thường gặp ở các máng dẫn, phễu cấp liệu hạt rắn dạng rời rạc như đá dăm, băng chuyền sản xuất các ☞

chi tiết máy, máy nghiền quặng... Nếu hạt rắn sắc cạnh, có độ cứng cao (phần lớn các khoáng vật như đá thạch anh, đá granite...) va đập với vận tốc lớn thì hiện tượng mòn này còn được gọi là mòn va đập - mài mòn (impact-abrasion wear). Bề mặt vật liệu thường bị rỗ giống như dạng xói mòn (erosion) bề mặt chi tiết khi xảy ra hiện tượng xâm thực. Nếu va đập với vận tốc nhỏ nhưng năng lượng va đập đủ lớn do khối lượng vật thể lớn như va đập xảy ra ở thùng chứa đất đá của xe goòng, xe tải, gầu xúc đất đá của máy xúc đào, máy xúc lật... thì năng lượng va đập giải phóng ra gây biến dạng dẻo, dập nát trên bề mặt chi tiết và khi đạt tới giới hạn mỏi thì vật liệu bị bong tróc theo từng lớp mỏng (delamination) [3], [7].

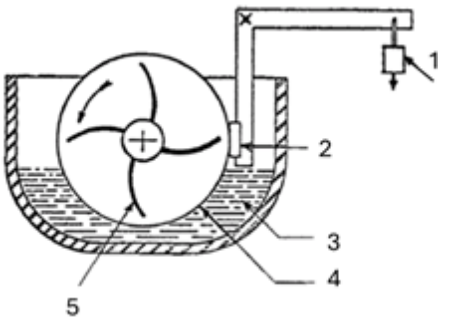
Phân tích cơ chế mòn của chi tiết, bộ phận máy khai thác mỏ và chế biến khoáng sản cho thấy mòn có các dạng sau [4], [5]: Mài mòn chà xát (gọi tắt là mài mòn) ứng suất nhỏ (low stress abrasion wear) khi mà các hạt rắn xen kẽ giữa bề mặt tiếp xúc hai vật thể rắn không bị nghiền nát; Mài mòn ứng suất lớn (high stress abrasion wear) khi mà các hạt rắn xen kẽ giữa bề mặt tiếp xúc hai vật thể rắn bị nghiền nát; Mòn va đập kết hợp mài mòn và yếu tố va đập, cào xước (gouging abrasion wear); Mòn va đập bong tróc, dập nát bề mặt chi tiết (ploughing abrasion wear) khi bề mặt bị phá hủy, cày xước bởi sự xâm nhập mãnh liệt của hạt mài mòn.

3. MÔ HÌNH THỬ NGHIỆM MÒN THIẾT BỊ KHAI THÁC MỎ VÀ CHẾ BIẾN KHOÁNG SẢN

Mô hình thực nghiệm có vai trò to lớn trong việc phân loại khả năng chống mòn của thép và thép chống mòn AR, thép hợp kim, gang,... từ đó đưa ra các khuyến cáo sử dụng chúng trong thực tế. Mô hình mài mòn bánh xe bọc cao su sử dụng hạt mài mòn khô (Hình 1), khảo sát khả năng chịu mài mòn ứng suất nhỏ, mẫu thử nghiệm dạng tấm, bề mặt đạt R_a = 0,8 μm. Mẫu thử được gá lên đòn bẩy, dưới tác dụng tải trọng mẫu tỳ sát vào bề mặt bánh xe với một lực nén nhất định. Khi bánh xe quay và hạt mài mòn được cấp vào bề mặt tiếp xúc sự nén ép các hạt mài mòn và chuyển động trượt mô tả quá trình tiếp xúc, chà xát và gây mài mòn. Môi trường mài mòn điều chỉnh bởi tải trọng nén, kích thước hạt cát và độ cứng của loại cát [1], [3]. Mô hình này được tiêu chuẩn hóa bởi ASTM G65 sử dụng là cát cỡ hạt 212 ÷ 300 μm, lưu lượng cấp 300 ÷ 400 g/phút.



Hình 1. Mô hình mòn bánh xe cát khô [7]:
1 - Phễu cấp liệu, 2 - Cát thạch anh, 3 - Vòi cấp cát, 4 - Mẫu thử, 5 - Tải trọng

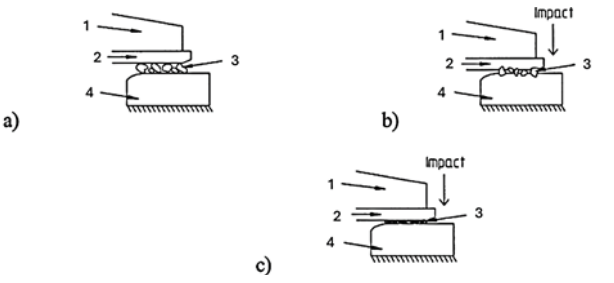


Hình 2. Mô hình mòn bánh xe ướt [7]:
1 - Tải trọng, 2 - Mẫu thử, 3 - Dung dịch Al_2O_3, 4 - Bánh xe thép, 5 - Cánh khuấy

Để đặc trưng cho mức độ mài mòn lãnh liệt, chất mài mòn có độ cứng lớn, mô hình sử

dụng chất mài mòn là bột Al_2O_3 có độ cứng 2200 HV, cỡ hạt 600 ÷ 700 μm, pha với nước, bánh xe thép, hai mặt bên bánh xe có cánh khuấy trộn dung dịch. Mô hình này được tiêu chuẩn hóa bởi ASTM B611 [9]. Mô hình mài mòn bánh xe ướt (Hình 2), nghiên cứu mòn cần khoan khi ma sát với thành lỗ khoan. Trong quá trình khoan, cần khoan quay tròn và dưới tác dụng của trọng lượng bản thân (vùng nén tạo tải trọng đáy) cần khoan bị uốn cong tỳ sát vào thành lỗ khoan. Khi khoan phá hủy đất đá cứng sử dụng choòng khoan ba chóp xoay theo cơ chế đập cắt, nghiền nát tải trọng động truyền lên cột cần khoan gây rung động và va đập mạnh với thành lỗ khoan. Khi va đập với đất đá thành lỗ khoan sẽ xảy ra hiện tượng biến dạng dẻo, xuất hiện mô nhám mới trên bề mặt cần khoan. Như vậy, mô hình thử nghiệm mài mòn ASTM B611 chưa phản ánh hết điều kiện làm việc thực tế của cần khoan.

Vấn đề mòn của các chi tiết như choòng khoan đập xoay, máy nghiền, thiết bị vận chuyển đất đá, quặng vẫn là một thách thức lớn. Nghiên cứu của K. Vatolnen, quá trình mòn xảy ra ở những thiết bị này là sự tác động hỗn hợp của nhiều yếu tố, sử dụng búa văng va đập với mẫu thử nghiệm hoặc mô hình xóc để mô tả sự va đập của đất đá với chi tiết [6]. Sau khi va đập giữa các khối đất đá và giữa khối đất đá với bộ phận máy sẽ xuất hiện các mảnh vụn sắc cạnh và cứng, để mô tả sự xuất hiện của các hạt mài mòn tại bề mặt tiếp xúc giống như điều kiện làm việc thực tế, các hạt mài mòn được cấp vào. Vận tốc rơi hoặc lăn và kích thước của khối đá quyết định năng lượng va đập. Trong mô hình thử nghiệm xung lực va đập (Hình 3) được điều chỉnh bởi vận tốc va đập giữa búa văng và mẫu thử nghiệm, mô hình này được Tuomas Terri nghiên cứu mòn bộ phận máy nghiền bi [3]. Khi thùng nghiền chứa các viên bi và khoáng sản quay, các viên bi và quặng va đập với nhau, va đập với tấm lót thùng nghiền, giúp quặng được nghiền nhỏ. Khảo sát khả năng chịu mòn va đập của gang trắng trước cùng tinh chứa nguyên tố hợp kim và so sánh với thép hợp kim (WR6). Kết quả cả hai vật liệu này chịu mòn va đập tốt và cao nhất là thép WR6 [12], [2].

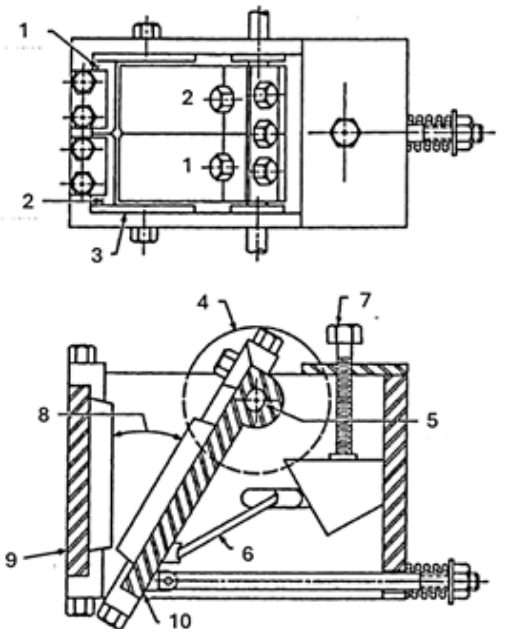


Hình 3. Mô hình thử nghiệm mòn va đập [5]: 1 - Búa, 2 - Bộ phận mòn, 3 - Hạt mài mòn, 4 - Mẫu thử nghiệm

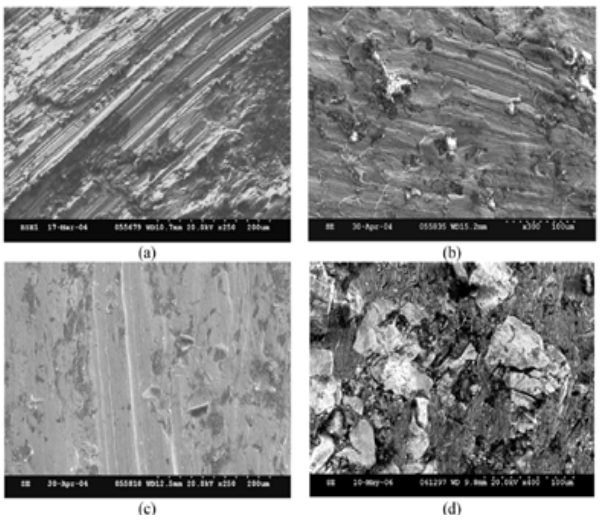
Mô hình thử nghiệm mài mòn "pin-on-disk" được nghiên cứu từ rất sớm, đầu tiên được đề xuất bởi Robin vào năm 1910. Tiếp đó là nghiên cứu chi tiết và cải thiện mô hình bởi Khruschov [11], mẫu thử nghiệm được gia công dạng chốt trụ và được ma sát với đá mài hoặc giấy nhám được dán trên đĩa quay. Mô hình này được nhiều nhà khoa học sử dụng khi nghiên cứu mòn trong trường hợp xuất hiện va đập với tải trọng lớn, hạt rắn mạt mài mòn ở bề mặt tiếp xúc tiếp tục bị nghiền nát sau khi bị bong tróc ra. Tuy nhiên, quan điểm này không hoàn toàn chính xác, bản chất quá trình mòn xảy ra ở đây vẫn là mài mòn, các hạt rắn bị nén ép lăn trượt tại bề mặt tiếp xúc chỉ thúc đẩy quá trình cào xước và vi cắt khiến quá trình mòn diễn ra với tốc độ lớn hơn. Mô hình này chỉ là trường hợp mài mòn mãnh liệt và mục đích chính là rút ngắn thời gian thử nghiệm đánh giá khả năng chịu mòn tương đối của vật liệu.

Tiêu chuẩn ASTM G81 quy định mô hình mòn tấm lót của máy nghiền đập hàm (Hình 4) - chi tiết bị mài mòn với cường độ cao, xung lực lớn, đặc trưng cho dạng mòn ☞

hỏng do sự kết hợp của các yếu tố va đập, cào xước và phá hủy bề mặt chi tiết. Vật liệu sẽ bị bong tróc từng lớp do biến dạng dẻo, do cắt đứt và do mỏi. Ưu điểm của mô hình là mô tả điều kiện làm việc của chi tiết một cách trực quan và sát với thực tế, được sử dụng nghiên cứu mòn chi tiết máy nghiền, lưỡi gạt của máy san gạt, lưỡi ủi máy ủi và gầu bốc xúc, vật liệu rời trong khai thác mỏ [3], [4], [7]. Theo Jiang, cơ bản khi nghiên cứu về hiện tượng mòn là việc hiểu rõ cơ chế mòn, từ đó xây dựng mô hình thử nghiệm hợp lý. Nhóm nghiên cứu đã thử nghiệm mòn với mô hình máy đập hàm, dùng các loại thép hợp kim cacbon thấp ASTM A514 so sánh với các loại thép chống mòn như thép Mangan, gang trắng, gang trắng chứa hợp kim và các-bít. Thử nghiệm nghiền đất đá có độ cứng 525 HB, sau mỗi mẻ đo lượng hao hụt do mòn.



Hình 4. Cấu tạo bộ thử nghiệm mòn tấm lót máy nghiền hàm [7]:
1 - Tấm mẫu thử nghiệm; 2 - Tấm mẫu tham chiếu; 3 - Tấm vách; 4 - Bánh đà; 5 - Trục lệch tâm; 6 - Tấm bảo vệ quá tải; 7 - Cơ cấu điều chỉnh độ mở của miệng hàm; 8 - Cặp mẫu thử đặt đối diện; 9 - Khung hãm tĩnh; 10 - Khung hàm động.



Hình 5. Bề mặt mẫu sau tiến hành thử nghiệm mòn [4]:
a - Bề mặt mẫu so sánh bị cào xước; b - Bề mặt mẫu thép AR 600; c - Bề mặt mẫu hợp kim gang trắng trước cùng tinh chứa Cr, Mo; d - Bề mặt mẫu được phủ WC

Mẫu được cắt ở vị trí có vết xước mòn lớn nhất để soi tổ chức (Hình 5). Kết quả, bề mặt mẫu chế tạo từ gang trắng và gang trắng chứa tổ chức các-bít bị mài mòn và cào xước ít nhất. Tuy nhiên, điểm đáng lưu ý là mảnh vụn của đất đá găm vào vào bề mặt mẫu gang trắng phủ các-bít WC nên lớp WC trên bề mặt bị chia cắt, biến dạng nghiêm trọng. Trong số các mẫu thì hợp kim mangan có khả năng chịu mòn còn thấp hơn thép dụng cụ, chỉ nhỉnh hơn thép kết cấu, do hiện tượng biến cứng nguội xảy ra chưa đủ để đạt độ cứng cần thiết, tại khu vực bề mặt của mẫu hợp kim mangan độ cứng là 378 HV. Tuy nhiên, trong cùng điều kiện thử nghiệm, thép hợp kim chống mài mòn AR 600 đạt độ cứng 569 HV sau biến cứng nguội do đặc điểm tiếp xúc điểm giữa đất đá nghiền và bề mặt tấm lót. Quan điểm này đã chỉ rõ hạn chế về việc mô tả điều kiện làm việc thực tế của mô hình thử nghiệm va đập dùng búa văng.

4. THẢO LUẬN

Phần lớn các mô hình thử nghiệm hiện nay chỉ dừng lại ở việc đánh giá khả năng chịu mòn tương đối giữa các loại vật liệu trong cùng một điều kiện phòng thí nghiệm. Để xác định tuổi thọ thực tế, cần kết hợp thực nghiệm tại hiện trường.

Mô hình thử nghiệm mòn va đập được nhóm nghiên cứu của Tuomas Teeri thực hiện nhằm khảo sát yêu cầu về cơ tính tổng hợp vừa cứng chống mòn, chống biến dạng dẻo (xâm nhập) và độ dai va đập của hợp kim gang, thép hợp kim. Tuy nhiên, mô hình này không phản ánh rõ đặc điểm tiếp xúc của đất đá với bề mặt chi tiết như tấm lót thùng xe tải, thùng chứa đất đá, máng dẫn cấp liệu bởi bề mặt của búa phẳng và diện tích tiếp xúc khá lớn. Mô hình thử nghiệm mòn dạng máy đập hàm thể hiện rõ hơn bản chất tiếp xúc của đất đá, quặng với các chi tiết này. Trong thực tế, đối với thiết bị vận tải đất đá, quặng thì đất đá được chất tải và va đập trực tiếp với chi tiết ở lần chất tải đầu tiên, sau đó các lớp đất đá được chất tải gây ra va đập gián tiếp thông qua lớp lót dưới cùng. Đất đá bị đập nát trong quá trình chất tải được mô tả bởi chuyển động của hàm động gây ra tác động đập ép đất đá theo chu kỳ. Sự trượt của các mảnh vụn khi hàm ở hành trình mở mô tả trượt của đất đất khi dỡ tải, khi cấp liệu. Chúng cọ xát vào chi tiết, dưới tác dụng cầu tải trọng nén ép các mảnh vụn có thể xâm nhập vào bề mặt vật liệu nếu độ cứng bề mặt không đủ lớn hoặc tổ chức tế vi ở bề mặt kém bền vững. Xung lực va đập do biến đổi động năng va đập phụ thuộc vào kích thước đất đá, quặng (dạng rời rạc) và độ cao rơi, có thể xác định được và quy đổi tương đương với lực nghiền vỡ đất đá theo phương pháp đập gây dập nát của hàm đập. Việc chọn loại đất đá thử nghiệm với cỡ hạt, hình dáng và độ cứng là các thông số xây dựng mô hình thử nghiệm mòn. Điểm đáng lưu ý là mài mòn đã được nghiên cứu tương đối đầy đủ nhưng đến cuối thế kỷ XX vẫn ở giai đoạn nghiên cứu hoàn thiện. Các thuật ngữ mô tả mòn thiết bị khai thác mỏ, chế biến khoáng sản cũng được các nhà nghiên cứu hoàn thiện dần. Ban đầu, các nhà nghiên cứu chỉ dùng chung thuật ngữ "impact wear" để mô tả mòn do sự va đập của các vật thể rắn [5], các thuật ngữ về dạng mòn gây ra bởi cơ chế va đập - chà xát xuất hiện ở máy nghiền, máy nghiền đập hàm, răng gầu xúc được phân chia cụ thể hơn gồm các dạng mòn cào xước "gouging abrasion wear", dạng mòn cầy xước, phá hủy bề mặt "ploughing abrasion wear", thậm chí mòn do mỏi, bong tróc phá hủy bề mặt theo lớp "delamination wear" [4].

5. KẾT LUẬN

Mô hình thử nghiệm mòn máy đập hàm (ASTM G81) là lựa chọn phù hợp để khảo sát ứng xử mòn của các thiết bị vận chuyển đất đá mỏ như thùng xe tải, xe goòng, máng dẫn và gầu xúc. Mô hình này mô tả rõ điều kiện làm việc của chi tiết, thông số mô hình được lựa chọn theo yêu cầu thực tế như loại đất đá, quặng được vận chuyển: cỡ hạt, độ cứng, tình trạng bề mặt, chiều cao rơi, lưu lượng vận chuyển.

Mô hình này cho phép mô tả chính xác điều kiện làm việc thực tế thông qua việc điều chỉnh các thông số về loại đất đá, cỡ hạt và tải trọng nén ép. Bên cạnh đó còn giúp nghiên cứu sâu về hiện tượng biến cứng nguội của thép Mangan trong ứng dụng chế tạo thiết bị phục vụ khai thác mỏ và chế biến khoáng sản, giúp giải quyết những băn khoăn về việc lựa chọn ứng dụng loại vật liệu này trong lĩnh vực mỏ. Cũng như các mô hình nghiên cứu thực nghiệm mòn khác, mô hình này chỉ xác định được khả năng chịu mòn tương đối. Việc xác định tuổi thọ, bền mòn cần căn cứ vào thực nghiệm.❖

Ngày nhận bài: **06/5/2026**
Ngày phản biện: **20/5/2026**

Tài liệu tham khảo:

[1]. A. J. Gant, M. G. Gee, B. Roebuck, "*Rotating wheel abrasion of WC/Co hardmetals*". Wear Journal Vol. 258, 04/2025.

[2]. Ann Sandström, José Rendón, Mikael Olosson, 2001, "*Wear behaviour of some low alloyed steels under combined impact/ abrasion contact condition*". Wear Journal Volume 25, page 744-754 (2001).

[3]. J. A. Hawk, R. D. Wilson, J. H. Tylczak, Ö. N. Doğan, 1999, "*Laboratory abrasive wear test: investigation of test method and allow correlation*". Elsevier Science.

[4]. Jiaren (Jimmy) Jiang, Yongsong Xie, Weimin Qian and Robert Hall, "*Important factor affecting the gouging abrasion resistance of materials*". Journal of Minerals Engineering, 2018.

[5]. K. Osara, T. Tiainen, 2001, "*Three-body impact wear study on conventional and new P/M + HIPed wear resistant materials*". Wear Journal Volume 25, pages 785-794.

[6]. K. Vatolnen, V. Ratia, N. Ojala, V. T. Kuokkala, "*Comparison of laboratory wear tests with the in-service performance of cutting edges of loader bucket*". Wear Journal, 2017.

[7]. Kati Vatolnen, 2018, "*Thesis for the degree of Doctor of Science in Technology: Relevance of laboratory wear experiments for the evaluation of in-service performance of Materials*". Tampere University of Technology, Australia.

[8]. Mateuz Dziubek, Malgorzata Rutkowzka-Gorczyka, Wlodzimierz Dudzincki and Dominika Grygier, 2022, "*Investigation into Changes of Microstructure and Abrasive Wear Resistance Occurring in High Manganese Steel X120Mn12 During Isothermal Annealing and Re-austenitisation Process*". MDPI journal.

[9]. M. G. Gee, A. Gant, I. M. Hutchings, 2002, "*Rotating Wheel Abrasive Wear Testing*". University of Cambridge – ISSN 1368-6550.

[10]. Minal Shah and Subhankar Das Bakshi, 2018, "*Three-body abrasive wear of carbide-free bainite, martensite and bainite-martensite structure of similar hardness*". Wear Journal.

[11]. M. M. Khruschov, "*Principle of abrasive wear*". Procceding Wear 28, 1974, pages 69-88 Elsevier Sequoia S. A. Lausane.

[12]. Tuomas Teeri, Veli-Tapani Kuokkala, Pekka Siitonen, Paivi Kivikyto and Jari Liimatainen, 2006, "*Impact wear in mineral crushing*". Proceedings of the Estonian Academy of Science Engineering.