BẢN DỊCH THAM KHẢO do Công ty TNHH Kỹ thuật và Thương mại Vân Phong thực hiện. Bản gốc đã công bố là văn bản chính thức; hình vẽ xem trong bản gốc.

# Quy luật phá hủy vật liệu đầu đập khi chịu các va đập đơn lặp lại

**V.I. Bolobov, Le Thanh Binh**

Tạp chí Viện Mỏ (Zapiski Gornogo Instituta / Journal of Mining Institute), 2018, T. 233, tr. 525–533 · Chuyên mục: Cơ điện và chế tạo máy · UDC 620.172.2 · DOI: 10.31897/PMI.2018.5.525

## Tóm tắt

Bài báo trình bày phương pháp và kết quả thực nghiệm nghiên cứu quy luật của quá trình mòn mũi nhọn hình côn của đầu đập rơi tự do, được chế tạo từ các thép 38XM, У8, Х12МФ, đã qua nhiệt luyện tiêu chuẩn và được xử lý lạnh bổ sung, khi đầu đập thực hiện nhiều lần (đến 10000) va đập đơn lên đá granit trong điều kiện gần với điều kiện làm việc của mũi búa thủy lực. Để giải thích các quá trình, đã sử dụng giá trị ứng suất $\sigma_K$ phát sinh trên vùng tiếp xúc giữa đầu đập và đất đá, được tính toán bằng mô hình toán học do các tác giả xây dựng. Đã xác định rằng quá trình mòn đầu đập khi chịu va đập đơn lặp lại nhiều lần diễn ra theo ba giai đoạn, được phân cách bởi các giá trị tới hạn $\sigma_K^*$, $\sigma_K^{**}$, tương ứng với các đặc trưng bền mà vật liệu đầu đập thể hiện trong các điều kiện động lực học đã cho.

Khi số lần va đập nhỏ ($n \le n^*$) và kích thước mặt cùn nhỏ (giai đoạn tương tác I), giá trị $\sigma_K$ vượt quá $\sigma_K^*$ của thép, và thép tại vùng tiếp xúc bị phá hủy cục bộ, điều này được ghi nhận dưới dạng sự hao hụt khối lượng đáng kể của đầu đập; khi $n^* < n \le n^{**}$ (giai đoạn II), ứng suất phát sinh không đủ để phá hủy vật liệu nhưng đủ để gây biến dạng dẻo, kèm theo sự dịch chuyển kim loại từ phần trung tâm của vùng tiếp xúc ra phần ngoại vi và sự phá hủy một phần kim loại đã biến dạng bởi đất đá; khi $n > n^{**}$ (giai đoạn III), $\sigma_K$ phát sinh không đạt tới mức $\sigma_K^{**}$ và sự hao hụt khối lượng đầu đập được quyết định bởi khả năng chống mài xát của thép sử dụng đối với các sản phẩm phá hủy đất đá bị đầu đập đẩy ra khỏi hố. Xử lý lạnh đầu đập làm từ tất cả các loại thép thử nghiệm đều làm tăng khả năng chịu mài mòn của chúng; tổng chiều sâu các hố vỡ do đầu đập bằng thép Х12МФ đã xử lý lạnh tạo ra tính đến thời điểm chấm dứt khả năng xuyên vào đất đá lớn gấp bốn lần chỉ tiêu tương ứng của đầu đập bằng thép 38XM đã qua nhiệt luyện tiêu chuẩn.

***Từ khóa:*** *va đập đơn lặp lại nhiều lần; đầu đập thép hình côn; xử lý lạnh; mòn do mài; mòn kim loại*

**Cách trích dẫn bài báo:** Болобов В.И. Закономерности разрушения материала ударника при повторяющихся единичных ударах / В.И.Болобов, Ле Тхань Бинь // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 525-533. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.525

## Mở đầu

Các máy phá vỡ bằng va đập theo phương thức đập tách và đập vỡ được sử dụng rộng rãi khi đào các đường lò mỏ, khi tháo dỡ lớp lót chịu lửa trong sửa chữa lò cao và lò Mác-tanh, khi khai đào đất đóng băng và đất đá cứng, khi phá lớp mặt đường, phá hủy các kết cấu bê tông, bê tông cốt thép, gạch, v.v. [7]. Công cụ làm việc trong các máy này thường là mũi búa dạng trụ có phần đầu hình côn hoặc hình nêm, được mài nhọn với góc thường từ 30 đến 40° [5]. Quá trình phá vỡ bằng các máy này

bắt đầu từ việc đưa công cụ xuyên vào khối đá có các mặt tự do tương đối gần nhau, đến độ sâu đủ để các ứng suất kéo và ứng suất trượt phát sinh do sự xuyên tách khỏi khối đá một mảnh có kích thước cần thiết. Khả năng làm việc của máy được xác định bởi khả năng đưa công cụ va đập xuyên tới độ sâu cho trước, còn chỉ tiêu năng suất là tốc độ xuyên [5].

Trong quá trình khai thác sử dụng công cụ, do mòn va đập – mài mòn của vật liệu, kích thước mặt cùn hình thành ở phần mũi nhọn của mũi búa tăng dần. Điều này dẫn đến tăng diện tích tiếp xúc giữa công cụ và đất đá khi va đập, làm giảm cường độ phá vỡ do va đập. Kết quả là, kể từ một thời điểm nào đó, quá trình xuyên của mũi búa vào đất đá gần như chấm dứt, và để khôi phục nó cần thay thế hoặc mài lại mũi búa. Ví dụ, kinh nghiệm vận hành búa thủy lực DAEMO B180 cho thấy, đối với máy này thời điểm đó xảy ra khi phần mũi nhọn của mũi búa bị mòn khoảng 50 %, do đó mỗi mũi búa chỉ dùng được cho 4–5 lần mài lại. Xét đến việc thay thế mũi búa có khối lượng lớn và mài lại nó là những công việc rất tốn công, việc phát triển các phương pháp nâng cao khả năng chống mòn va đập – mài mòn của vật liệu mũi búa thủy lực, và do đó kéo dài thời gian sử dụng mũi búa giữa các lần mài lại, là một nhiệm vụ cấp thiết.

Vấn đề phá vỡ đất đá bằng công cụ va đập, đặc biệt là bằng búa thủy lực, đã được đề cập trong nhiều nghiên cứu. Trên cơ sở các định luật cơ học và lý thuyết Hertz cổ điển, lý thuyết va chạm cổ điển và lý thuyết sóng va chạm đã được xây dựng, liên hệ năng lượng, lực và thời gian tương tác giữa đầu đập và vật liệu bị phá hủy với độ sâu xuyên của đầu đập vào đất đá. Các vấn đề liên quan đến cơ chế mòn vật liệu đầu đập và ảnh hưởng của kích thước mặt cùn ở mũi nhọn – vốn thay đổi theo thời gian tùy thuộc vào khả năng chịu mài mòn của vật liệu – đến năng suất của búa thủy lực vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ.

Trong công trình này, trong điều kiện gần với điều kiện làm việc của mũi búa của các máy phá vỡ bằng va đập theo phương thức đập tách và đập vỡ, các tác giả đã nghiên cứu quy luật của quá trình mòn vật liệu của đầu đập rơi tự do khi nó thực hiện các va đập đơn lên đất đá.

## Phương pháp thực nghiệm

Đối tượng nghiên cứu là các đầu đập dài L = 25 mm, có phần trụ (D = 6 mm, $l_1$ = 13,8 mm) và phần mũi nhọn hình côn với góc ở đỉnh β = 30° trên chiều dài $l_2$ = 11,2 mm, được chế tạo từ các thép 38ХМ, У8, Х12МФ – là các vật liệu làm mũi búa thủy lực, khác nhau về độ bền và khả năng chịu mài mòn. Một phần các mẫu thép được nhiệt luyện tiêu chuẩn (NLTC) – tôi từ 800–1000 °C trong dầu và ram ở 200 °C, như cách thực hiện tại các nhà máy chế tạo mũi búa; phần còn lại được xử lý lạnh bổ sung [4] (giữ ở −75 °C trong 5 giờ) – một nguyên công được áp dụng rộng rãi để cải thiện khả năng chịu mài mòn của thép dụng cụ [8, 10, 11, 13]. Độ cứng của vật liệu đầu đập đạt được sau các chế độ nhiệt luyện được xác định bằng máy đo độ cứng vạn năng Zwick/Roell ZHU.

Các thử nghiệm được tiến hành trên thiết bị (hình 1) có kết cấu gần với thiết bị mô tả trong [2].

Đầu đập 2, chế tạo từ thép thuộc một trong các mác nêu trên, sau khi cân trên cân phân tích (±0,0001 g) được kẹp ở tư thế thẳng đứng trong khối búa nặng 3 (M = 2,8 kg). Dưới đầu đập đặt mẫu đá 1 – đá granit có độ cứng 6,2 theo thang M.M. Protodyakonov, độ cứng tổng hợp ~450 HV và độ cứng của các khoáng vật thành phần đến 1200 HV (đối với thạch anh), vượt quá độ cứng của các vật liệu đầu đập được sử dụng.

Cho khối búa cùng đầu đập rơi từ một độ cao xác định (H = 42 mm), thực hiện một loạt n lần va đập bằng mũi nhọn của đầu đập vào các điểm khác nhau trên bề mặt mẫu đá, mỗi lần va đập vào một điểm khác. Động năng $A_0$ và vận tốc trước va đập $v_0$ của khối búa cùng đầu đập, tính từ các giá trị M và H, lần lượt là 1,16 J và 0,91 m/s. Sau mỗi lần va đập, đầu đập được cân lại và đo lại chiều dài L (độ chính xác đo ±0,01 mm), từ đó xác định độ hao hụt khối lượng Δm và độ giảm chiều dài Δl của mũi

nhọn; từ Δl, có tính đến β, tính đường kính d của mặt cùn đã hình thành. Khi số lần va đập trên 40, việc xác định Δm và Δl được thực hiện sau mỗi khoảng n (từ 10 đến 100 lần) và được tính bằng thương của tổng giá trị các đại lượng trong khoảng đó chia cho số lần va đập trong khoảng. Hình dạng các hố vỡ trên đá được phân tích, đồng thời đo chiều sâu h của chúng (độ chính xác đo 0,01 mm). Thay đổi vật liệu đầu đập, với mỗi vật liệu xây dựng các quan hệ của Δl, d, h theo số lần va đập n.

[Hình 1 — xem PDF gốc, trang 2] Thiết bị nghiên cứu quá trình phá hủy do va đập của đất đá và vật liệu đầu đập (a) và sơ đồ nguyên lý của thiết bị (b). 1 – mẫu đá; 2 – đầu đập; 3 – khối búa; 4 – con lăn; 5 – cam; 6 – hộp giảm tốc; 7 – động cơ điện

## Kết quả thực nghiệm

Quan sát cho thấy quá trình va đập vào granit đi kèm với sự nảy ngược không đáng kể (vài milimét) của đầu đập. Kết quả của lần va đập đầu tiên là sự xuất hiện trên phần mũi nhọn của đầu đập một mặt cùn hình tròn, có đường kính d tăng dần theo số lần va đập.

Sự phá hủy granit đặc trưng bởi việc các hạt nhỏ và mảnh dạng bụi văng ra khỏi vùng phá hủy, tạo thành các hố vỡ có hình dạng gần với hình dạng của phần xuyên vào của đầu đập nhưng có đường kính lớn hơn. Ở đáy hố phát hiện một nhân nén chặt gồm các sản phẩm phá hủy dạng bột, khác biệt về màu sắc (màu trắng) so với phần còn lại của đất đá.

Đã xác định rằng khi số lần va đập tăng, các giá trị Δl và h giảm đơn điệu (hình 2). Hơn nữa, các đường cong Δl = f(n) của các thép được phân tích nằm trên đồ thị theo thứ tự ngược với thứ tự của các đường cong h = f(n) đối với cùng các vật liệu đó. Dạng điển hình của các quan hệ Δm = f(n) thu được được trình bày trên hình 3. Từ dạng các đường cong trên hình 3 có thể kết luận rằng quá trình hao hụt khối lượng đầu đập Δm theo số lần va đập n đối với tất cả các vật liệu được phân tích có ba giai đoạn. Ở giai đoạn thứ nhất (giai đoạn I), bao gồm vài lần va đập đầu tiên cho đến một số lần va đập tới hạn $n^*$ = 8–10, khác nhau đối với mỗi loại thép, giá trị Δm tính bằng phần mười miligam và giảm sau mỗi lần va đập tiếp theo với tốc độ đáng kể (0,3–0,4 mg/lần đập). Ở giai đoạn II, bắt đầu từ $n \geq n^*$ và kéo dài đến giá trị tới hạn thứ hai $n^{**}$ = 3600–5400, giá trị Δm chỉ còn vài phần trăm miligam, và tốc độ giảm của nó theo n chậm lại rõ rệt. Ở giai đoạn III, khi $n > n^{**}$, kéo dài đến cuối loạt thí nghiệm, độ hao hụt khối lượng Δm trở nên không phụ thuộc vào số lần va đập. Giá trị Δm này, xác định cho từng loại thép, được lấy làm tốc độ mòn va đập – mài mòn K của vật liệu ở giai đoạn ổn định của quá trình mòn, còn đại lượng I, nghịch đảo của K, được lấy làm khả năng chịu mòn va đập – mài mòn của vật liệu đầu đập đó.

Để giải thích các quá trình xảy ra ở mỗi giai đoạn mòn của đầu đập, đã sử dụng dữ liệu về độ lớn của ứng suất phát sinh trên vùng tiếp xúc giữa đầu đập và đất đá, được tính toán bằng mô hình toán học do các tác giả xây dựng.

[Hình 2 — xem PDF gốc, trang 3] Quan hệ giữa độ giảm chiều dài đầu đập Δl (a) và chiều sâu hố h (b) với số lần va đập n đối với các vật liệu đầu đập khác nhau. 1 – thép 38XM; 2 – thép X12MΦx (ở đây và các phần sau, chỉ số x biểu thị thép đã được xử lý lạnh)

[Hình 3 — xem PDF gốc, trang 3] Quan hệ giữa độ hao hụt khối lượng Δm của đầu đập bằng thép 38XM (a) và X12MΦx (b) với số lần va đập n

## Mô hình toán học của quá trình phá vỡ đất đá bằng va đập trong điều kiện thực nghiệm

Khi xây dựng mô hình, các tác giả xuất phát từ chỗ đầu đập cùng với khối búa là một kết cấu có chiều dài tương đối nhỏ ($L_\Sigma$ = 340 mm). Giả thiết rằng có thể bỏ qua ảnh hưởng của các quá trình sóng đến các thông số va đập, và quá trình tương tác giữa đầu đập và vật liệu bị phá hủy có thể được mô tả bằng các phương trình của hệ va đập cổ điển hai phần tử [5]. Kết quả tính toán cho thấy điều kiện áp dụng các phương trình này được thỏa mãn:

$$t_m \geq 3T,$$

trong đó $t_m$ – thời gian va đập, $t_m$ = 0,6–1,4 ms; T – chu kỳ dao động riêng của đầu đập và khối búa, T = 0,13 ms.

Căn cứ vào các kết luận của [5] về các dạng đặc tính tải trọng phá hủy hiện có, và có tính đến các quan sát của chúng tôi về quá trình va đập, giả thiết rằng sự xuyên của đầu đập vào đất đá trong điều kiện thực nghiệm có ba giai đoạn cơ bản:

- biến dạng đàn hồi của đất đá cho đến khi trên diện tích tiếp xúc với đầu đập đạt tới ứng suất $\sigma_к$, tại đó xảy ra sự phá hủy đất đá dạng nổ dưới vùng tiếp xúc;
- sự dịch chuyển của đầu đập qua nhân phá hủy của đất đá, kèm theo việc đẩy một phần sản phẩm ra khỏi hố và ép chặt phần sản phẩm còn lại mà không đạt tới đáy vùng phá hủy;
- sự hất ngược đầu đập bởi lực đàn hồi dư của các sản phẩm phá hủy đã bị ép chặt.

Quan hệ giữa lực cản của đất đá N và biến dạng α (hình 4) trong trường hợp này tương ứng với đặc tính tải trọng loại V [5] và gồm ba hàm lực: tải $N_1$ khi đất đá dưới vùng tiếp xúc biến dạng đàn hồi, tải $N_2$ khi đầu đập xuyên vào các sản phẩm phá hủy đất đá, và dỡ tải $N_3$, mỗi hàm được đặc trưng bởi độ cứng riêng của nó ($g_1$, $g_2$, $g_3$). Khi đó các hàm $N_1$, $N_2$, $N_3$, cũng như đối với trường hợp xuyên của vật thể có diện tích tiếp xúc không đổi, có dạng tuyến tính. Diện tích hình trên hình 4 là công chất tải $A_H$, diện tích phần gạch chéo là công $A_p$ tiêu tốn cho việc phá hủy.

Lực cản cực đại của đất đá $N_m$ và độ xuyên $\alpha_{вн}$, cũng như thời gian va đập $t_m$ đối với đặc tính tải trọng như vậy [5]:

$$N_m = N_p \cdot \sqrt{(1 - g_2/g_1 + 2A_н g_2/N_p^2)};$$

$$\alpha_{вн} = \alpha_m - N_m/g_3 = N_p \cdot (1/g_2 - 1/g_1) \cdot (\sqrt{(1 - g_2/g_1 + 2A_н g_2/N_p^2)} - 1);$$

$$t_m = \sqrt{(M/g_2)} \cdot arctg\ \sqrt{(2A_н g_2/N_p^2)},$$

trong đó M – khối lượng vật rơi; $N_p$ – lực phá hủy tiếp xúc của đất đá,

$$N_p = f_к \sigma_{кр},$$

$f_к = \pi d^2/4$ – diện tích tiếp xúc; $\sigma_{кр}$ – ứng suất tại chỗ tiếp xúc mà tại đó các ứng suất kéo và ứng suất trượt $\sigma_p$ phát sinh trong đất đá khi va đập dẫn đến sự phá hủy dạng nổ của đất đá dưới vùng tiếp xúc.

[Hình 4 — xem PDF gốc, trang 4] Dạng đặc tính tải trọng của hệ được chấp nhận khi tính toán các thông số va đập

Các giả thiết được chấp nhận khi tính toán:

- có thể lấy giá trị độ cứng động của đất đá (đối với granit là 1305 MPa [9]) làm giá trị của ứng suất tiếp xúc tới hạn $\sigma_{кр}$;

- để xác định độ cứng tiếp xúc $g_1$ của hệ, cũng như đối với vùng tiếp xúc hình tròn đường kính d, công thức trong [5] là đúng:

$$g_1 = 2E_n d / [3(1 - \mu_n^2)],$$

với mô đun đàn hồi $E_п$ = 50 GPa và hệ số Poisson $\mu_п$ = 0,2 của granit [5];

- tương tự với tỷ số độ cứng $g_2/g_1$ và $g_3/g_1$, có thể xác định từ việc phân tích các đặc tính lực thực nghiệm của sự phá hủy tiếp xúc các loại đá giòn được trình bày trong công trình [6], trong trường hợp của chúng tôi độ cứng $g_2$ có thể lấy bằng 0,16 $g_1$, còn $g_3$ lấy bằng $g_1$;
- chỉ khoảng một nửa động năng $A_0$ của đầu đập được tiêu tốn cho biến dạng đàn hồi và phá hủy đất đá (đối với granit là 58,6 % [5]), phần năng lượng còn lại tiêu tốn cho tổn thất nhiệt ra môi trường xung quanh, biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo của đầu đập, cũng như mòn bề mặt tiếp xúc của nó [9]; do đó lấy $A_н$ = 0,586 $A_0$ = 0,68 J.

[Hình 5 — xem PDF gốc, trang 5] Các thông số tính toán của va đập đơn $t_m$ (1), $N_m$ (2), $\sigma_к$ (3), $\alpha_{вн}$ (4) phụ thuộc vào đường kính vùng tiếp xúc d, so sánh với chiều sâu các hố thu được bằng thực nghiệm đối với đầu đập từ các thép được phân tích

Trên hình 5 trình bày các giá trị thời gian va đập $t_m$ (đường cong 1), lực cản cực đại của đất đá $N_m$ (đường cong 2), ứng suất tiếp xúc $\sigma_к = N_m/(\pi d^2/4)$ (đường cong 3) và độ xuyên $\alpha_{вн}$ của đầu đập vào đất đá (đường cong 4), được tính theo giá trị $N_p$ cho khoảng đường kính d của các vùng tiếp xúc (mặt cùn) xảy ra trong các thí nghiệm. Trên hình 5, ứng với các giá trị d tương ứng, cũng đưa ra các giá trị chiều sâu h của hố xác định bằng thực nghiệm (xem hình 2, b).

Như thấy từ đồ thị trên hình 5, với xung lực không đổi $M v_0 = N_m t_m$, khi đường kính d của diện tích tiếp xúc (mặt cùn của đầu đập) tăng, lực cản cực đại của đất đá $N_m$ tăng đơn điệu, còn thời gian va đập $t_m$, ứng suất tiếp xúc cực đại $\sigma_к$ và độ sâu xuyên $\alpha_{вн}$ của mũi ấn giảm. Từ việc so sánh vị trí các điểm thực nghiệm với đường cong 4 có thể kết luận rằng đường hồi quy của quan hệ $\alpha_{вн} = f(d)$ cho thấy sự phù hợp thỏa đáng với dữ liệu thực nghiệm đối với tất cả các loại thép.

Sự phù hợp thỏa đáng thu được giữa kết quả tính toán và thực nghiệm có thể coi là sự xác nhận cho mô hình toán học được đề xuất và tính hợp lý của các giả thiết đã chấp nhận.

## Quy luật phá hủy vật liệu đầu đập

Các giá trị K và I xác định được, sắp xếp theo thứ tự tăng dần khả năng chịu mài mòn của đầu đập từ các mác thép được phân tích, cùng với các giá trị độ cứng HV xác định bằng thực nghiệm và giới hạn chảy $\sigma_т$ và giới hạn bền $\sigma_в$ của thép tính theo độ cứng [12] cho điều kiện kéo tĩnh mẫu, được trình bày trong bảng 1. Trong bảng cũng đưa ra các giá trị số lần va đập $n^*$, $n^{**}$ mà tại đó đối với đầu đập từ mỗi loại thép quan sát thấy sự chuyển sang giai đoạn tương tác tiếp theo, các đường kính mặt cùn $d^*$, $d^{**}$ tương ứng, và các ứng suất $\sigma_к^*$, $\sigma_к^{**}$ trên vùng tiếp xúc giữa đầu đập và đất đá lấy từ đường cong 3 (hình 5) ứng với $d^*$, $d^{**}$.

Như rút ra từ dữ liệu bảng 1, khả năng chịu mòn va đập – mài mòn xác định được của các thép nhìn chung tương quan với độ cứng và giá trị các chỉ tiêu bền $\sigma_в$, $\sigma_т$ của chúng, tăng lên khi các thông số này tăng. Trong đó, khả năng chịu mài mòn thấp nhất quan sát thấy ở thép 38XM sau nhiệt luyện tiêu chuẩn, cao nhất – lớn hơn 2,7 lần – ở thép X12MФ sau xử lý lạnh. Có thể nhận thấy rằng xử lý lạnh cũng làm tăng khả năng chịu mài mòn của tất cả các thép khác (từ 11 đến 26 %).

**Bảng 1. Khả năng chịu mòn va đập – mài mòn của các vật liệu đầu đập được nghiên cứu, so sánh với các đặc trưng bền của chúng và các thông số tới hạn của tương tác giữa đầu đập và đất đá**

| Mác thép đầu đập | K, mg/lần đập | I, lần đập/mg | HV | $\sigma_в$, MPa | $\sigma_т$, MPa | $n^*$ | $n^{**}$ | $d^*$, mm | $d^{**}$, mm | $\sigma_к^*$, MPa | $\sigma_к^{**}$, MPa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 38ХМ | 0,0027 | 370 | 529 | 1933 | 1478 | 10 | ~ 5100 | 1,011 | 2,114 | 3643 | 1651 |
| $38ХМ_Х$ | 0,0023 | 435 | 536 | 1953 | 1529 | 10 | ~ 5400 | 0,986 | 2,047 | 3767 | 1691 |
| У8 | 0,0019 | 526 | 707 | 2540 | 1943 | 8 | ~ 3600 | 0,889 | 1,763 | 4340 | 1915 |
| $У8_Х$ | 0,0017 | 588 | 717 | 2577 | 1971 | 8 | ~ 3900 | 0,876 | 1,724 | 4435 | 1955 |
| Х12МФ | 0,0013 | 741 | 694 | 2492 | 1905 | 8 | ~ 4100 | 0,866 | 1,680 | 4502 | 2003 |
| $Х12МФ_Х$ | 0,0010 | 1000 | 708 | 2544 | 1946 | 8 | ~ 4900 | 0,836 | 1,620 | 4729 | 2076 |

Có thể thấy rằng khi độ bền và khả năng chịu mài mòn của thép tăng, các giá trị ứng suất tiếp xúc $\sigma_к^{**}$, $\sigma_к^*$ tương ứng với sự chuyển tiếp giữa các giai đoạn tương tác cũng tăng. Đồng thời, giữa các giá trị $\sigma_к^*$ và $\sigma_в$, cũng như $\sigma_к^{**}$ và $\sigma_т$ tồn tại một tương quan nhất định: các giá trị thứ nhất ($\sigma_к^*$, $\sigma_к^{**}$) lớn hơn các giá trị thứ hai xấp xỉ cùng một số lần. Từ thực tế tồn tại ba giai đoạn tương tác đặc trưng (xem hình 3) và sự tồn tại tỷ lệ nói trên đối với tất cả các thép, có thể giả định rằng các giá trị tới hạn $\sigma_к^*$, $\sigma_к^{**}$ của ứng suất tiếp xúc, xác định bằng phương pháp tính toán – thực nghiệm, tương ứng với ứng suất trong lớp vật liệu đầu đập kề với vùng tiếp xúc mà kể từ đó vật liệu này, trong điều kiện động, có thể bị phá hủy ($\sigma_к^*$) hoặc biến dạng dẻo ($\sigma_к^{**}$). Đối với điều kiện kéo tĩnh mẫu, tương tự của ứng suất $\sigma_к^*$ là thông số «ứng suất phá hủy thực $S_к$», còn của ứng suất $\sigma_к^{**}$ là giới hạn chảy $\sigma_т$ của vật liệu, với các giá trị nhỏ hơn các đặc trưng động tương ứng của thép. Có thể lưu ý rằng mức vượt xấp xỉ như vậy của giới hạn chảy $\sigma_т$ (đến 1,1 lần) và giới hạn bền $\sigma_в$ (đến 2 lần) xác định ở tốc độ biến dạng cao so với các giá trị xác định khi nén và kéo tĩnh mẫu đã được mô tả trong các công trình [2, 6] đối với sắt kỹ thuật và thép hợp kim cacbon trung bình.

Khi đường kính mặt cùn nhỏ ($n < n^*$, $d < d^*$, giai đoạn I), ứng suất tiếp xúc $\sigma_к$ phát sinh khi va đập vượt quá ứng suất phá hủy động thực $\sigma_к^*$ của thép đã cho, và trên vùng tiếp xúc xuất hiện các vết nứt; sự phát triển của chúng dẫn đến bong tróc những thể tích kim loại đáng kể, được ghi nhận dưới dạng sự hao hụt khối lượng rõ rệt của đầu đập. Khi đường kính lớn hơn ($d^* < d \le d^{**}$, $n^* < n \le n^{**}$, giai đoạn II), ứng suất phát sinh không đủ để phá hủy vật liệu đầu đập, nhưng đủ để gây biến dạng dẻo, kèm theo sự dịch chuyển kim loại từ phần trung tâm vùng tiếp xúc ra phần ngoại vi. Xuất phát từ thực tế có sự hao hụt khối lượng đáng kể của đầu đập ở giai đoạn này, có thể kết luận rằng một phần đáng kể thể tích kim loại bị biến dạng và bị suy yếu bởi các vết nứt bị các sản phẩm phá hủy đất đá đang chuyển động cuốn đi.

Kết luận như vậy về sự phá hủy và biến dạng dẻo đáng kể của mũi nhọn đầu đập ở các giai đoạn tương tác đầu tiên được củng cố bởi kết quả các thử nghiệm do các tác giả tiến hành riêng, trong đó đầu đập được cho va đập không phải vào vật liệu mài mà vào một tấm phẳng nhẵn làm từ vật liệu cứng hơn, không bị phá hủy. Từ kết quả của thí nghiệm này, được trình bày trên hình 6, có thể kết luận rằng khi số lần va đập nhỏ xảy ra sự bong vỡ các phần của mũi nhọn đầu đập, đồng thời xuất

hiện trên vùng tiếp xúc các gợn sóng kim loại biến dạng hướng từ tâm ra ngoại vi. Trên hình 6 có thể thấy biểu hiện của hiệu ứng mép – sự bong tróc các phần ngoại vi của vùng tiếp xúc.

Số lần va đập n ở các giai đoạn tương tác đầu tiên càng lớn và mặt cùn của đầu đập càng lớn thì ứng suất tiếp xúc $\sigma_к$ phát sinh và mức vượt của nó so với $\sigma_к^*$ hoặc $\sigma_к^{**}$ của thép sử dụng càng nhỏ, và tương ứng, vùng kim loại trên vùng tiếp xúc bị phá hủy hoặc biến dạng càng mỏng, do đó giá trị Δm càng nhỏ.

[Hình 6 — xem PDF gốc, trang 7] Hình dạng mặt cùn của đầu đập bằng thép У8 sau khi va đập vào nền kim loại cứng ở giai đoạn tương tác I (a) và vào granit ở giai đoạn III (b)

Khi $n \geq n^{**}$, $d \geq d^{**}$ (giai đoạn III), ứng suất tiếp xúc $\sigma_к$ phát sinh không đạt tới mức $\sigma_к^{**}$ và mũi nhọn đầu đập không bị biến dạng dẻo. Sự xuất hiện các vết xước song song trên mặt này khi chuyển sang va đập vào đất đá chứng tỏ rằng trong trường hợp này kim loại của mặt tiếp xúc chịu tác động của các hạt mài đang chuyển động. Kết quả của sự cào xước là sự hao hụt khối lượng kim loại nhỏ hơn đáng kể so với các giai đoạn I, II, với giá trị được quyết định bởi khả năng chịu mài mòn do hạt mài của thép dùng để chế tạo đầu đập, vốn phụ thuộc vào độ cứng và đặc điểm tổ chức của thép [3]. Cần lưu ý rằng sự có mặt, bên cạnh các vết xước, của các vết lõm trên vùng tiếp xúc có thể chứng tỏ rằng ngoài sự mòn do các hạt mài chuyển động, vật liệu đầu đập khi va đập còn chịu sự ấn lún của các hạt mài cố định [2], điều này xảy ra ở giai đoạn nén chặt các sản phẩm phá hủy đất đá còn lại trong hố.

Phần năng lượng tiêu tốn cho sự mòn đầu đập khi phá vỡ đất đá ở giai đoạn mòn ổn định (thứ ba) được đánh giá xuất phát từ tốc độ mòn K của vật liệu và các ứng suất tới hạn $\sigma_к^*$ của các thép tương ứng. Khi đó giả thiết rằng, vì trong trường hợp của chúng tôi sự mòn vật liệu xảy ra chủ yếu do sự phá hủy (cào xước) bề mặt của nó bởi hạt mài, công riêng $A_{уд}$ của quá trình này có thể được đánh giá theo công thức đề xuất trong công trình [1] cho sự phá hủy kim loại khi kéo mẫu:

$$A_{уд} = S_к/\rho,$$

trong đó $S_к$ – ứng suất phá hủy thực của kim loại, theo các giả định đã nêu của các tác giả, trong điều kiện động bằng $\sigma_к^*$ của từng loại thép trong bảng 1; ρ – khối lượng riêng, $\rho = 7{,}85 \cdot 10^3$ kg/m$^3$ đối với tất cả các thép.

Khi đó công tiêu tốn cho sự mòn vật liệu đầu đập trong một lần va đập:

$$A_{ме} = K A_{уд} = K \sigma_к^*/\rho,$$

và tỷ phần $A_{Ме}$ cho sự mòn kim loại trong năng lượng va đập $A_0$:

$$A_{ме\%} = A_{ме}/A_0 = K \sigma_к^*/(A_0 \rho).$$

Công $A_{упр}$ tiêu tốn cho biến dạng đàn hồi của đầu đập trong quá trình một lần xuyên vào granit ở giai đoạn tương tác ổn định III được tính bằng tích của lực cản cực đại của đất đá $N_m$ ứng với $d = d^{**}$ nhân với tổng độ giảm chiều dài $\Delta l_{\Sigma упр}$ của phần trụ $\Delta l_{1упр}$ và phần côn $\Delta l_{2упр}$ của đầu đập khi biến dạng đàn hồi, trong đó

$$\Delta l_{1упр} = N_m l_1/(S_1 E),$$

với $S_1$ – diện tích tiết diện phần trụ; E – mô đun Young, $E = 200 \cdot 10^9$ MPa đối với tất cả các thép.

Để xác định $\Delta l_{2упр}$ của hình nón cụt có các đáy bằng diện tích phần trụ của đầu đập và diện tích mặt cùn, diện tích tiết diện ngang $S_i$ thay đổi theo chiều cao được biểu diễn qua khoảng cách x tính từ đỉnh nón và góc mài nhọn β = 30°:

$$S_i = \pi x^2 tg^2(\beta/2)$$

và giải phương trình vi phân của sự thay đổi tương đối chiều cao hình nón do biến dạng đàn hồi như một hàm của x:

$$dl/dx = \sigma/E = N_m / (E\pi x^2 tg^2(\beta/2)),$$

phương trình này được tích phân theo tọa độ x từ đỉnh nón đến mặt cùn $x_1$ (Δl ứng với $d^{**}$) và đến đáy $x_2$ ($l_2$); kết quả phương trình cuối cùng có dạng:

$$\Delta l_{2упр} = [N_m / (E\pi\, tg^2(\beta/2))] \cdot \int_{x_1}^{x_2} (1/x^2)\, dx = -[N_m / (E\pi\, tg^2(\beta/2))] \cdot (1/x)|_{x_1}^{x_2} = [N_m / (E\pi\, tg^2(\beta/2))] \cdot (1/x_1 - 1/x_2).$$

Tương ứng, giá trị $A_{упр\%}$ bằng $A_{упр}/A_0$.

Với giả định rằng các tốc độ mòn va đập – mài mòn K của thép từ bảng 2 được duy trì trong các lần va đập tiếp theo cho đến đường kính 3,55 mm, tại đó sự hình thành hố chấm dứt, đã tính số lần va đập $n^{***}$ và tổng chiều sâu các hố $h_\Sigma$ thu được đến thời điểm này đối với đầu đập từ mỗi loại thép.

**Bảng 2. Các thông số năng lượng của quá trình mòn va đập – mài mòn và biến dạng đàn hồi của đầu đập từ các mác thép khác nhau**

| Mác thép | $A_{уд}$, J/mg | $A_{ме}$, J | $A_{ме}$, % | $A_{упр}$, J | $A_{упр}$, % | $n^{***}$ | $h_\Sigma$, mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 38ХМ | 0,464 | 0,0013 | 0,108 | 0,114 | 9,8 | ~ 68500 | 3410 |
| 38ХМ$_х$ | 0,480 | 0,0011 | 0,095 | 0,107 | 9,3 | ~ 79900 | 4219 |
| У8 | 0,553 | 0,0011 | 0,091 | 0,085 | 7,3 | ~ 93800 | 6352 |
| У8$_х$ | 0,565 | 0,0010 | 0,083 | 0,082 | 7,1 | ~ 104700 | 7376 |
| Х12МФ | 0,574 | 0,0008 | 0,067 | 0,080 | 6,9 | ~ 131000 | 9569 |
| Х12МФ$_х$ | 0,602 | 0,0006 | 0,052 | 0,076 | 6,6 | ~ 176200 | 13623 |

Như có thể kết luận từ bảng 2, công $A_{ме\%}$ tiêu tốn cho sự phá hủy vật liệu đầu đập trong quá trình một lần xuyên vào granit chiếm ~0,1 % năng lượng va đập. Đồng thời, khi khả năng chịu mài mòn của thép dùng chế tạo đầu đập tăng, tỷ phần công $A_{ме\%}$ giảm. Công $A_{упр\%}$ cho biến dạng đàn hồi của đầu đập chiếm vài phần trăm năng lượng va đập và, cũng như $A_{ме\%}$, giảm khi khả năng chịu mài mòn của vật liệu đầu đập tăng. Chẳng hạn, nếu đối với thép kém bền nhất 38ХМ giá trị này là 9,8 % ($d^{**}$ = 2,11 mm, $N_m$ = 5,80 kN, $\Delta l_{1упр}$ = 0,0182 mm, Δl = 3,94 mm, $\Delta l_{2упр}$ = 0,0211 mm), thì đối với thép bền nhất (Х12МФ$_х$) là 6,6 % ($d^{**}$ = 1,62 mm, $N_m$ = 4,28 kN, $\Delta l_{1упр}$ = 0,0127 mm, Δl = 3,02 mm, $\Delta l_{2упр}$ = 0,0229 mm). Tính toán cho thấy, khi tiếp tục tăng số lần va đập (vượt $n^{**}$) và tương ứng tăng đường kính mặt cùn (vượt $d^{**}$), tỷ phần công $A_{упр\%}$ tăng lên và, đối với tất cả các thép, đạt giá trị ~36 % vào thời điểm mũi nhọn đầu đập bị cùn hoàn toàn.

Từ bảng 2 suy ra rằng, tính đến thời điểm đầu đập ngừng xuyên vào đất đá, tổng chiều sâu các hố $h_\Sigma$ do đầu đập bằng thép Х12МФ$_х$ sau xử lý lạnh tạo ra lớn gấp bốn lần chỉ tiêu tương ứng của đầu đập bằng thép 38ХМ, do khả năng chịu mài mòn lớn hơn đáng kể của đầu đập bằng thép Х12МФ$_х$.

## Kết luận

Như vậy, các tính toán và thực nghiệm đã cho thấy quá trình mòn của đầu đập thép hình côn khi thực hiện các va đập đơn lên granit được đặc trưng bởi sự tồn tại của ba giai đoạn tương tác, mỗi giai đoạn được xác định bởi tương quan giữa các đặc trưng bền $\sigma^*$, $\sigma^{**}$ mà vật liệu đầu đập thể hiện trong điều kiện động với giá trị ứng suất $\sigma_K$ phát sinh trên vùng tiếp xúc giữa đầu đập và đất đá, vốn giảm dần khi số lần va đập n tăng. Ở giai đoạn tương tác ổn định cuối cùng, sự hao hụt khối lượng đầu đập hầu như không thay đổi khi số lần va đập tăng và được quyết định bởi khả năng chịu mài mòn của thép sử dụng; do đó số lần va đập cho đến khi mũi nhọn đầu đập bị cùn hoàn toàn và tổng chiều sâu các hố thu được đối với các thép được phân tích khác nhau lần lượt 2,6 và 4,0 lần.

## Lời cảm ơn

Các tác giả bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới PGS. A.P. Batalov vì sự giúp đỡ trong quá trình chuẩn bị bài báo này.

## Tài liệu tham khảo

1. Болобов В.И. К вопросу о разогреве фрагментов разрушения конструкций // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 2. С. 44-45
2. Виноградов В.Н. Изнашивание при ударе / В.Н.Виноградов, Г.М.Сорокин, А.Ю.Албагачиев. М.: Машиностроение. 1982. 192 с.
3. Ле Тхань Бинь. Влияние обработки холодом на механические свойства и износостойкость материалов пик гидромолотов / Ле Тхань Бинь, В.И.Болобов, Нгуен Кхак Линь // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 25). 12 с.
4. Обработка холодом как способ повышения износостойкости материала бурового инструмента / Ле Тхань Бинь, В.И.Болобов, Г.А.Юсупов, М.П.Мосеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 11. С. 108-114.
5. Соколинский В.Б. Машины ударного разрушения. М.: Машиностроение. 1982. 185 с.
6. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А.В.Третьяков, В.И.Зюзин. М.: Металлургия. 1973. 224 с.
7. Ушаков Л.С. Гидравлические машины ударного действия / Л.С.Ушаков, Ю.Е.Котылев, В.А.Кравченко. М.: Машиностроение. 2000. 416 с.
8. Холод в машиностроении / А.П.Клименко, Н.В.Новиков, Б.Л.Смоленский, В.И.Могильный, В.И.Климентьев, М.А.Рохленко. М.: Машиностроение. 1969. 248 с.
9. Шелковников И.Г. Использование энергии удара в процессах бурения. М.: Недра, 1977. 160 с.
10. Candane D. Effect of Cryogenic Treatment on Microstructure and Wear Characteristics of AISI M35 HSS / D.Candane, N.Alagumurthi, K.Palaniradja // International Journal of Materials Science and Applications. 2013. Vol. 2. P. 56-65
11. Metallurgical Principles of Cryogenically Treated Tool Steels – a Review on the Current State of Science / S.S.Gill, J.Singh, R.Singh, H.Singh // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010. Vol. 54. P. 59-82.
12. Pavlina E.J. Correlation of Yield Strength and Tensile Strength With Hardness for Steels / E.J.Pavlina, C.J.Van-Tyne // Journal of Materials Engineering and Performance. 2008. Vol. 17(6). P. 888-893

13. Tated R.G. Improvement in Tool Life of Cutting Tool by Application of Deep Cryogenic Treatment / R.G.Tated, S.R.Kajale, Iyer Kumar // 7th International Tooling Conference Held / Politecnico di Torino, Italy, 2006. P. 135-141.

**Tác giả:** V.I. Bolobov, TSKH kỹ thuật, giáo sư; Le Thanh Binh, nghiên cứu sinh.

Bài báo được gửi đến tòa soạn ngày 10.01.2018. Bài báo được chấp nhận đăng ngày 25.05.2018.