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.

Về tỷ số cường độ mòn của đầu đập trong điều kiện động và tĩnh

V. Bolobov, S. Chupin, Lê Thanh Bình

IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Hội nghị khoa học và công nghệ quốc tế "EarthScience"), 2020, tập 459, bài 062085 · doi:10.1088/1755-1315/459/6/062085

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả các thí nghiệm xác định độ hao hụt khối lượng phần trụ của các đầu đập hình côn chế tạo từ thép 38XM (AISI P20), У8 (AISI W1-A) và X12MΦA (AISI D2), đã qua chế độ nhiệt luyện được các nhà sản xuất dụng cụ đập áp dụng và qua xử lý lạnh bổ sung, khi chúng bị mòn ma sát – mài mòn trên đá granit. Kết quả cho thấy trong điều kiện mài mòn (điều kiện tĩnh), các đầu đập bằng thép X12MΦA với mọi chế độ nhiệt luyện có khả năng chịu mài mòn cao nhất, còn các đầu đập bằng thép 38XM có khả năng chịu mài mòn thấp nhất. Xử lý lạnh sâu và, ở mức độ thấp hơn, xử lý lạnh làm tăng khả năng chịu mài mòn của tất cả các vật liệu. Việc so sánh các giá trị xác lập của khả năng chịu mài mòn I_{st} và độ cứng HV của các đầu đập, cũng như phân tích tổ chức tế vi của chúng, cho phép kết luận rằng khả năng chịu mài mòn của dụng cụ không chỉ phụ thuộc vào độ cứng mà còn phụ thuộc vào loại, thể tích và hình dạng của các cacbit tạo nên tổ chức của vật liệu dùng để chế tạo dụng cụ. Vì lý do đó, sau xử lý lạnh sâu, dụng cụ bằng thép X12MΦA thể hiện khả năng chịu mài mòn cao nhất, do vật liệu của nó có hàm lượng cacbon (~1,5%) và nguyên tố hợp kim (~13%) cao nhất; điều này giúp số lượng hạt cacbit mịn trong tổ chức tăng tới 10,8% sau xử lý lạnh, qua đó bảo đảm tăng khả năng chịu mài mòn. Các kết quả thu được đối với I_{st} được so sánh với dữ liệu đã thu được trước đây về khả năng chịu mài mòn của chính các đầu đập đó khi đập vào đá granit (trong điều kiện động). Từ đó rút ra kết luận về sự tương đồng của cơ chế mòn của các đầu đập được phân tích trong điều kiện động và tĩnh.

1. Mở đầu

Tách đá khỏi khối nguyên là một quá trình rất phức tạp, đòi hỏi nguồn lực đáng kể về năng lượng, vật tư và lao động. Giảm mức tiêu hao các nguồn lực này luôn là một thách thức và hiện là một trong những mục tiêu then chốt của lĩnh vực kỹ thuật mỏ. Theo truyền thống, các phương pháp phá vỡ đất đá thường được chia thành các loại: cơ học, thủy lực, nổ mìn, vật lý, hóa học và kết hợp [1–12]. Mặc dù có nhiều lựa chọn về kỹ thuật phá vỡ đất đá, phương pháp cơ học vẫn được sử dụng rộng rãi nhất do mức độ nghiên cứu còn hạn chế về các kỹ thuật khai thác khoáng sản thay thế và chi phí áp dụng chúng cao. Theo số liệu [1], phương pháp cơ học chiếm tới 85% tổng khối lượng công tác khai thác và đào lò. Độ bền của vật liệu cần phá vỡ là yếu tố giới hạn hiệu quả của phương pháp cơ học. Giá trị độ bền cao không cho phép sử dụng phương pháp hiệu quả nhất – cắt. Các máy sử dụng bộ phận cắt không có khả năng phá vỡ khối đá một cách chọn lọc hoặc trong không gian hạn chế và đòi hỏi nhiều thiết bị phụ trợ. Trong những trường hợp như vậy, việc phá vỡ được thực hiện bằng va đập. Máy đập được sử dụng rộng rãi trong việc mở rộng và tạo biên các đường lò, tháo dỡ khối xây gạch chịu lửa của lò luyện kim, lò chuyển, gầu rót thép và gang, đào đất đóng băng và đất đá cứng, bóc lớp mặt đường và phá vỡ các vật liệu composite đá [11–16]. Sự tương tác của dụng cụ đập với đất đá gây ra

sự mòn mạnh của dụng cụ. Dụng cụ bị phá hủy theo các cơ chế đã được mô tả và phân tích trong các công trình [17–22]; các cơ chế phá hủy này khác nhau và phụ thuộc vào tính chất của đất đá bị phá vỡ, vật liệu đầu đập, chế độ nhiệt luyện đầu đập, năng lượng va đập v.v. [13–16].

Trong công trình [23], các tác giả đã trình bày kết quả thí nghiệm xác định độ hao hụt khối lượng phần mũi của các đầu đập hình côn chế tạo từ 4 mác thép và qua hai chế độ nhiệt luyện, khi chúng được đập lặp lại vào đá granit. Kết quả cho thấy, bất kể mác thép và chế độ nhiệt luyện, quá trình mòn của đầu đập cho đến khi cùn hoàn toàn gồm ba giai đoạn, khác nhau về giá trị hao hụt khối lượng kim loại và tốc độ giảm của nó theo số lần đập. Mô hình toán học được trình bày cho thấy sự chuyển từ giai đoạn mòn này sang giai đoạn khác được quyết định bởi tương quan giữa ứng suất hình thành tại điểm tiếp xúc của đá với đầu đập, cũng như giới hạn bền và giới hạn chảy của vật liệu đầu đập trong điều kiện động. Như vậy, ở giai đoạn mòn cuối cùng, kéo dài nhất, độ hao hụt khối lượng kim loại trên mỗi lần đập thay đổi không đáng kể theo số lần đập và, theo các tác giả, có thể dùng làm chỉ tiêu cường độ mòn (K_{dyn}, mg/lần đập) của đầu đập làm từ một vật liệu nhất định. Trong bài báo này, dữ liệu thực nghiệm [23] về cường độ mòn va đập – mài mòn của các đầu đập nói trên trong điều kiện động được so sánh với kết quả thí nghiệm mòn ma sát – mài mòn của chính các đầu đập đó trên đá granit trong điều kiện tĩnh, nhằm rút ra kết luận về yếu tố chi phối trong quá trình mòn.

2. Phương pháp thí nghiệm và vật liệu

Đối tượng mòn là các đầu đập chế tạo từ các mác thép 38XM, У8, X12МФА – là những mác thép được dùng để chế tạo dụng cụ công tác (mũi búa) của các máy đập [23]. Thành phần hóa học được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hóa học.

Thép	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Cu	V	Fe
38XM (AISI P20)	0,4	0,2	0,5	0,2	0,02	0,02	1,0	0,25	0,2	-	97,21
У8 (AISI W1-A)	0,8	0,2	0,25	0,1	0,01	0,01	0,1	-	0,05	-	98,48
X12МФА (AISI D2)	1,55	0,3	0,25	0,1	0,01	0,01	11,5	0,5	-	0,15	85,63

Các đầu đập từ mỗi mác thép được xử lý theo ba chế độ nhiệt luyện:

- tiêu chuẩn (SHT), được áp dụng tại các nhà máy sản xuất mũi búa, gồm tôi dầu từ 800–1000 °C và ram thấp ở 200 °C;
- xử lý lạnh [24], gồm giữ nhiệt các đầu đập ở –75 °C trong 5 giờ giữa nguyên công tôi và ram;
- xử lý lạnh sâu, cũng được thực hiện giữa nguyên công tôi và ram, gồm giữ các đầu đập trong nitơ lỏng ở nhiệt độ âm 193 °C trong 5 giờ.

Con lắc Zwick/Roell RKP 450 và máy đo độ cứng vạn năng Zwick/Roell ZHU được dùng để xác định độ dai va đập của vật liệu đầu đập và độ cứng bề mặt HV của chúng đạt được với từng chế độ nhiệt luyện.

Môi trường mài mòn là các mẫu lõi granit lấy từ khối granit Vyborg (30–35% thạch anh, 25–30% plagiocla, 30–35% fenspat kali, 5–10% biotit (hình 1)) có độ kiên cố f = 13 theo thang M.M. Protodyakonov và giới hạn bền nén σ_{com} ~200 MPa.

[Hình 1 — xem PDF gốc, trang 3] Hình dạng các hạt thạch anh (sáng màu) và hạt plagiocla (xám) trong cấu trúc các mảnh granit.

Độ cứng tổng hợp của các mảnh granit, xác định bằng phương pháp Brinell và quy đổi sang độ cứng Vickers, đạt ~450 HV; độ cứng của các thành phần cấu trúc của nó đạt 1200 HV (đối với thạch anh) và vượt quá độ cứng của tất cả các đầu đập được sử dụng.

Các thử nghiệm được tiến hành trên một máy (hình 2) với tốc độ quay trục chính v = 7,5 s^{-1}. Dưới tải trọng tĩnh không đổi (P = 100 N), mặt đầu của phần trụ (D = 8 mm) của các đầu đập đã được cân trước (± 0,1 mg), làm từ các mác thép nêu trên và đã qua một chế độ nhiệt luyện nhất định, được mài mòn trong một khoảng thời gian định trước (t = 50 phút) trên tấm granit đã dùng trong các thử nghiệm động [23] (f ~ 13 theo thang M.M. Protodyakonov; độ cứng tổng hợp ~450 HV). Khối lượng mẫu m được đo sau mỗi 10 phút và độ hao hụt Δm của nó được tính toán. Sau mỗi lần đo, tấm granit được dịch chuyển so với mẫu, bảo đảm kim loại tiếp xúc với bề mặt mài mới trong mỗi chu kỳ.

[Hình 2 — xem PDF gốc, trang 3] Thiết bị thử mòn ma sát và mài mòn của các đầu đập: 1 – tấm mài; 2 – đầu đập thử nghiệm; 3 – giá kẹp; 4 – trục chính của máy khoan đứng.

Theo kết quả thí nghiệm, với mỗi đầu đập đã dựng đồ thị phụ thuộc của tổng hao hụt khối lượng ΣΔm vào thời gian thử t, sau đó dựng lại trong hệ tọa độ ΣΔm – L, trong đó L là quãng đường ma sát trên đá (L = 2πRvt, với R = 18 mm là bán kính quỹ đạo chuyển động của đầu đập trên vật mài).

3. Kết quả thí nghiệm

Đã xác định được rằng, đối với tất cả các đầu đập thử nghiệm, quá trình mòn ma sát – mài mòn của chúng ngay từ khi bắt đầu tác động của granit được mô tả bằng quan hệ tuyến tính $\Sigma\Delta m = K_{st} l$ với hệ số xác định R^2 ~ 0,99. Tang góc nghiêng của các đường K_{st} [m/mg] được coi là cường độ mòn mài của dụng cụ trong điều kiện tĩnh; giá trị này khác nhau đối với mỗi đầu đập và phụ thuộc vào vật liệu và chế độ nhiệt luyện của nó. Giá trị nghịch đảo của K_{st} được coi là khả năng chịu mài mòn I_{st} [m/mg] của đầu đập trong các điều kiện này.

[Hình 3 — xem PDF gốc, trang 4–5] Sự phụ thuộc của tổng hao hụt khối lượng vào quãng đường ma sát trên granit đối với các đầu đập làm từ các mác thép 38XM (a), У8 (b) và X12МФА (c) với các chế độ nhiệt luyện khác nhau: SHT (1), xử lý lạnh ở -75 °C (2), xử lý lạnh sâu ở -196 °C (3).

So sánh độ nghiêng của các đường trên hình 3 cho phép kết luận rằng trong điều kiện mài mòn, các đầu đập bằng thép X12МФ với mọi chế độ nhiệt luyện có khả năng chịu mài mòn cao nhất, còn các đầu đập bằng thép 38XM có khả năng chịu mài mòn thấp nhất. Xử lý lạnh sâu và, ở mức độ thấp hơn, xử lý lạnh làm tăng khả năng chịu mài mòn của tất cả các vật liệu.

Các giá trị xác lập của khả năng chịu mài mòn I_{st}, độ dai va đập KCV và độ cứng HV của các vật liệu dụng cụ, sắp xếp theo thứ tự tăng dần của I_{st}, được trình bày trong bảng 2. Hình 4 thể hiện sự phụ thuộc của các thông số trên vào nhiệt độ giữ nhiệt các đầu đập sau khi tôi.

Bảng 2

Vật liệu dụng cụ	Chế độ xử lý	Giá trị thông số		
		K_{st} [mg/m] / I_{st} [m/mg]	HV	KCV, J/cm^2
Thép 38XM	SHT	0,040/25,2	529	40,6
Thép 38XM_c	SHT + giữ nhiệt -75 °C	0,032/31,1 (+23,3%)	536 (+1,4%)	33,0 (-18,7%)
Thép 38XM_{cr}	SHT + giữ nhiệt -196 °C	0,030/33,9 (+34,6%)	539 (+2,0%)	35,0 (-13,8%)
Thép У8	SHT	0,031/31,9	707	5,1

Vật liệu dụng cụ	Chế độ xử lý	Giá trị thông số		
		K_{st} [mg/m] / I_{st} [m/mg]	HV	KCV, J/cm^2
Thép У8$_c$	SHT + giữ nhiệt -75 °C	0,029/34,8 (+9,4%)	717 (+1,4%)	3,9 (-23,5%)
Thép У8$_{cr}$	SHT + giữ nhiệt -196 °C	0,026/38,6 (+21,2%)	730 (+3,2%)	5,1 (+0,0%)
Thép Х12МФ	SHT	0,018/57,1	694	3,1
Thép Х12МФ$_c$	SHT + giữ nhiệt -75 °C	0,013/75,2 (+31,6%)	708 (+2,1%)	2,5 (-19,4%)
Thép Х12МФ$_{cr}$	SHT + giữ nhiệt -196 °C	0,009/113,6 (+98,9%)	750 (+8,2%)	4,1 (+32,3%)

Ghi chú: từ đây trở đi, các chỉ số dưới "c", "cr" biểu thị dụng cụ đã qua xử lý lạnh hoặc xử lý lạnh sâu.

Từ dữ liệu thu được có thể kết luận rằng việc giữ nhiệt các đầu đập làm từ mọi loại thép ở nhiệt độ thấp, cùng với việc tăng khả năng chịu mài mòn I_{st}, cũng làm tăng độ cứng HV của chúng. Hiệu ứng này rõ rệt nhất ở dụng cụ bằng thép Х12МФА sau khi giữ nhiệt ở âm 196 °C (xử lý lạnh sâu): I_{st} tăng gần 2 lần (97,8%), HV tăng 8,2% (hình 4, a, b). Độ dai va đập của tất cả các đầu đập giảm nhẹ khi hạ nhiệt độ giữ nhiệt xuống âm 50 °C (xử lý lạnh) và tăng lên khi tiếp tục hạ xuống -196 °C (nhiệt độ xử lý lạnh sâu) (hình 4, c), vượt giá trị KCV của thép Х12МФА sau SHT 1,3 lần: 4,1 J/cm^2 so với 3,1 J/cm^2.

[Hình 4 — xem PDF gốc, trang 6] Ảnh hưởng của nhiệt độ giữ nhiệt sau khi tôi đến khả năng chịu mài mòn (a), độ cứng (b) và độ dai va đập (c) của các đầu đập làm từ các mác thép 38ХМ (1), У8 (2) và Х12МФА (3).

So sánh các giá trị trong bảng 1 cho thấy khả năng chịu mài mòn xác lập I_{st} của các đầu đập không phụ thuộc trực tiếp vào độ cứng HV của chúng. Các đầu đập bằng thép У8 và Х12МФА có giá trị độ cứng tương đương, nhưng sau xử lý lạnh sâu, loại thứ hai vượt loại thứ nhất về khả năng chịu mài mòn khoảng 3 lần: 2,2 m/mg so với 0,76 m/mg. Sự khác biệt này được giải thích bằng kết quả nghiên cứu tổ chức tế vi của đầu đập trình bày trong bảng 3.

Bảng 3

Thép	Lượng austenit dư, %			Lượng cacbit, %		
	SHT	SHT + giữ nhiệt -75 °C	SHT + giữ nhiệt -196 °C	SHT	SHT + giữ nhiệt -75 °C	SHT + giữ nhiệt -196 °C
38ХМ	≤0,10	≤0,10	≤0,10	0,17	0,33 (+98,9%)	0,58 (+243,2%)
У8	2,21	1,24 (-43,8%)	0,84 (-61,9%)	≤0,10	≤0,10	≤0,10
Х12МФ	15,65	2,78 (-82,3%)	0,50 (-96,8%)	5,41	6,80 (+25,7%)	10,84 (+100,4%)

Như dữ liệu bảng 3 cho thấy, việc giữ nhiệt ở nhiệt độ âm các đầu đập bằng thép cacbon cao У8 (~0,8% C) và Х12МФА (~1,5% C) dẫn đến giảm đáng kể hàm lượng austenit dư trong tổ chức của chúng, vốn còn lại với lượng đáng kể sau khi tôi. Điều này cũng góp phần làm tăng hàm lượng cacbit trong tổ chức của dụng cụ bằng các thép hợp kim 38ХМ và Х12МФА. Hơn nữa, nhiệt độ xử lý lạnh càng thấp thì hiệu quả của nó càng cao.

Về vấn đề này, có thể kết luận rằng khả năng chịu mài mòn của dụng cụ làm từ các loại thép khác nhau không chỉ phụ thuộc vào độ cứng mà còn phụ thuộc vào loại, thể tích, hình dạng của các cacbit trong tổ chức của vật liệu dùng để chế tạo dụng cụ. Vì lý do đó, sau xử lý lạnh sâu, dụng cụ bằng thép Х12МФА$_{cr}$ thể hiện khả năng chịu mài mòn cao nhất, do vật liệu của nó có hàm lượng cacbon (~1,5%) và nguyên tố hợp kim (~13%) cao nhất; điều này giúp số lượng hạt cacbit mịn trong tổ chức tăng tới 10,8% sau xử lý lạnh, qua đó bảo đảm tăng khả năng chịu mài mòn. Độ dai va đập được cải

thiện của vật liệu đầu đập sau xử lý lạnh sâu có thể được giải thích bằng sự phân bố đồng đều hơn của các cacbit đồng nhất và mịn trong tổ chức của nó [25, 26, 27].

4. Thảo luận kết quả thí nghiệm

Các giá trị I_{st} và K_{st} của các đầu đập trong điều kiện tĩnh xác định trong nghiên cứu này, sắp xếp theo thứ tự tăng dần của I_{st}, cùng với các giá trị I_d và K_d của chính các dụng cụ đó xác định trong [23] ở điều kiện động, và tỷ số I_d/I_{st}, được trình bày trong bảng 4.

Dữ liệu bảng 4 cho thấy thứ tự sắp xếp các đầu đập theo mức tăng khả năng chịu mài mòn trong điều kiện va đập gần như trùng khớp với thứ tự của chúng khi ma sát trên vật mài: trong cả hai điều kiện thí nghiệm, khả năng chịu mài mòn thấp nhất được ghi nhận ở dụng cụ bằng thép 38XM sau nhiệt luyện tiêu chuẩn, và cao hơn là ở dụng cụ cùng mác thép sau xử lý lạnh và xử lý lạnh sâu. Dụng cụ bằng thép У8 thể hiện khả năng chịu mài mòn cao hơn nữa sau tất cả các chế độ xử lý. Bảng được khép lại bởi các đầu đập bằng thép X12МФА sau xử lý lạnh sâu, có khả năng chịu mài mòn cao gần 4 lần so với dụng cụ bằng thép 38XM trong cả hai loại thử nghiệm.

Thứ tự sắp xếp các đầu đập theo mức tăng khả năng chịu mài mòn trong điều kiện va đập và mài mòn như vậy, cũng như việc tỷ số khả năng chịu mài mòn I_d/I_{st} đối với dụng cụ từ tất cả các vật liệu và chế độ nhiệt luyện được phân tích là rất gần nhau (13,0–16,9), có thể chỉ ra rằng yếu tố chi phối sự mòn bề mặt tiếp xúc của dụng cụ đập khi đập là sự cào xước bởi các hạt granit khi chúng bị đẩy ra khỏi lỗ trong lúc dụng cụ di chuyển qua các mảnh vỡ. Phần đóng góp của sự mòn do các hạt mài không chuyển động ấn vào bề mặt kim loại ở giai đoạn biến dạng đàn hồi của granit ít rõ rệt hơn.

Bảng 4

Thép	I_{st} (K_{st}), m/mg (mg/m)	I_d (K_d), mg^{-1} (mg/lần đập)	I_d/I_{st}
38XM	25,2 (0,040)	370 (0,0027)	14,7
$38XM_c$	31,1 (0,032)	435 (0,0023)	14,0
$38XM_{cr}$	33,9 (0,030)	486 (0,0021)**	14,3*
У8	31,8 (0,031)	526 (0,0019)	16,5
$У8_c$	34,8 (0,029)	588 (0,0017)	16,9
$У8_{cr}$	38,6 (0,026)	645 (0,0016)**	16,7*
X12МФ	57,1 (0,018)	769 (0,0013)	13,0
$X12МФ_c$	75,2 (0,013)	1000 (0,0010)	13,3
$X12МФ_{cr}$	113,6 (0,009)	1492 (0,0007)**	13,1*

* do thiếu dữ liệu thực nghiệm, tỷ số I_d/I_{st} sau xử lý lạnh sâu được xác định bằng giá trị trung bình của I_d/I_{st} đối với dụng cụ cùng mác thép với các chế độ nhiệt luyện khác.

** tính toán dựa trên các giá trị I_{st} (K_{st}) và tỷ số I_d/I_{st} đã chấp nhận.

5. Kết luận

1. Kết quả cho thấy trong điều kiện mài mòn (điều kiện tĩnh), các đầu đập bằng thép X12МФА với mọi chế độ nhiệt luyện có khả năng chịu mài mòn cao nhất, còn các đầu đập bằng thép 38XM có khả năng chịu mài mòn thấp nhất.

2. Xử lý lạnh sâu và, ở mức độ thấp hơn, xử lý lạnh làm tăng khả năng chịu mài mòn của tất cả các vật liệu.
3. Khả năng chịu mài mòn của dụng cụ không chỉ phụ thuộc vào độ cứng mà còn phụ thuộc vào loại, thể tích, hình dạng của các cacbit trong tổ chức của vật liệu dùng để chế tạo dụng cụ.
4. Đã xác định được rằng cơ chế mòn trong thử nghiệm động và tĩnh là như nhau và biểu hiện rõ hơn ở dạng cắt vật liệu.

6. Tài liệu tham khảo

[1] Britariev V A 1984 Mining machines and systems (Nedra, Moscow)
[2] Baron L I, Loguncov B M 1962 Analysis of various ways of destruction of rocks with reference to the creation of roadheaders (Moscow)
[3] Baron L I, Glatman L B, Gubenkov E K 1968 Destruction of rock by roadheaders (Nedra, Moscow)
[4] Turgel D K 2007 Mining machines and equipment for underground mining (UGTU, Ekaterinburg)
[5] Chechenkov M S 1987 Development of strong soils (Standard, Saint Petersburg)
[6] Cigankov D A 2005 The new technology of hard rock mining Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal) 3 98-102
[7] Kyu N G, Chernov O I 1997 RU Patent 2131032
[8] Lebedev Yu A, Gorkov A K, Makarov A B 1996 Extraction of granite blocks in South Africa Mining Journal 6 43-44
[9] Sakhno I G 2010 Laboratory studies of the features of the work of non-explosive destructive substances with a fixed resistance to their volumetric expansion Mountain pressure problems 18 135-149
[10] Yungmeister D A 2016 Research of modernized perforator-hammer for drifting special roadway the underground mines «Metrostroy» Journal of Mining Institute 218 281-288
[11] Jianming Peng, Dong Ge, Xinxin Zhang, Maosen Wang, Dongyu Wu, Fluidic DTH hammer with backward-impact-damping design for hard rock drilling Journal of Petroleum Science and Engineering 171 1077-1083
[12] Marek Sokolski, Piotr Sokolski, Strength estimation of the impact zone – A critical area of the tools of the hydraulic hammers Archives of Civil and Mechanical Engineering 16 767-776
[13] Jiang-fu, He, Bing-xing Sun, Yun-pei Lianga, Yong-jiang Luo 2018 Research on suction capacity and dust suppression performance of a reverse circulation air hammer in tunnel drilling Tunnelling and Underground Space Technology 71 391-402
[14] Ibrahim Ocak, Sadi Evren Seker, Jamal Rostamic 2018 Performance prediction of impact hammer using ensemble machine learning techniques Tunnelling and Underground Space Technology 80 269-276
[15] Long Risheng, Sun Shaoni, Lian Zisheng, Liao Yaoyao, Qin Xiaofeng 2018 A new technology for hard-rock tunneling based on drilling and hydraulic impact breaking International Journal of Mining Science and Technology 25 1053-1058
[16] Tunçdemir H 2008 Impact hammer applications in Istanbul metro tunnels Tunnelling and Underground Space Technology 23 264-272
[17] Zum Gahr K-H 1987 Microstructure and Wear of Materials (North Holland)
[18] Vilma Ratia, Ilkka Miettunen, Veli-Tapani Kuokkala 2013 Surface deformation of steels in impact-abrasion: The effect of sample angle and test duration (Wear) 301 94–101
[19] Shi-guang Peng, Ren-bo Song, Ting Sun, Fu-qiang Yang, Peng Deng, Chun-jing Wu 2016 Surface failure behavior of 70Mn martensite steel under abrasive impact wear (Wear) 362-363 129–134
[20] Zhongzheng Pei, Renbo Song, Qinan Ba, Yifan Feng 2018 Dimensionality wear analysis: Three-body impact abrasive wear behavior of a martensitic steel in comparison with Mn13Cr2 (Wear) 414–

415 341–351
[21] Yahia Ali C D, Garcia-Mendoza J D 2019 Gates, Effects of ‘impact’ and abrasive particle size on the performance of white cast irons relative to low-alloy steels in laboratory ball mills (Wear) 426–427 83-100
[22] Hutchings I, Shipway P 2017 Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials (Second edition) (Oxford)
[23] Bolobov V I, Le Tkhan' Bin' 2019 Regularities of material destruction of the impactor in repeated single punch Journal of Mining Institute 233 525-533 DOI: 10.31897/PMI.2018.5.525
[24] Le Thanh Binh, Bolobov V I, Yusupov G A, Moseev M P 2016 Cold treatment as a way to improve the wear resistance drilling tools material Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten’ 11 108-114
[25] Bensely A, Venkateswaran S, Subisak A D, Lal D M, Rajadurai A, Lenkey G B, Paulin P 2012 Influence of deep cryogenic treatment on alloy carbide precipitations and mechanical properties of AISI M2 high speed tool steel 28 4-9
[26] Das D, Sarkar R, Dutta A K, Ray K K 2010 Influence of sub-zero treatments on fracture toughness of AISI D2 steel Materials Science and Engineering: A. 528 589-603
[27] Tushar Sonar, Sachin Lomte, Chandrashekhar Gogte Cryogenic 2018 Treatment of Metal A Review, Materials today: Proceedings 5 25219-25228