

## ЗАВИСИМОСТЬ НАРАБОТКИ ПИКИ ГИДРОМОЛОТА ОТ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЕЕ МАТЕРИАЛА

В.И. Болобов<sup>1</sup>, Ле Тхань Бинь<sup>2</sup>, С.А. Чупин<sup>1</sup>, В.А. Плащинский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: boloboff@mail.ru

<sup>2</sup> Vinacom, Институт энергетики и горномашиностроения (IEMM),  
Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам

**Аннотация:** Представлены результаты экспериментов по влиянию энергии удара на интенсивность ударно-абразивного изнашивания модельного инструмента из трех марок инструментальных сталей вида конической пики при ударном взаимодействии с фрагментом гранита. Часть инструмента подвергалась типовой термической обработке, практикующей на заводах-изготовителях пик, другая — дополнительной обработке холодом или криогенной обработке. Для обоснования возможности переноса экспериментальных данных на натурные условия устанавливались рабочие параметры эксперимента, при соблюдении которых его условия будут подобны условиям работы пики гидромолота. Для выполнения указанного подобия уровень контактных напряжений между модельным инструментом и породой в экспериментах был таким же, как и при ударном внедрении пики. Установлена зависимость между интенсивностью ударно-абразивного изнашивания и энергией удара модельного инструмента, на основании которой рассчитаны интенсивности изнашивания пики гидромолота JCB HM380 при разрушении гранитных фрагментов. Оценивалась наработка пики, за которую принималось количество нанесенных ей ударов до полного изнашивания острия. Из сравнения наработки пик, изготовленных из анализируемых сталей и подвергнутых указанным видам термической обработки, сделан вывод о целесообразности внедрения операций обработки холодом и криогенной обработки в технологический процесс изготовления пик гидромолотов.

**Ключевые слова:** пика гидромолота, ударное воздействие, энергия удара, гранит, ударно-абразивное изнашивание, контактное напряжение, притупление острия, обработка холодом, криогенная обработка, наработка пики.

**Для цитирования:** Болобов В. И., Ле Тхань Бинь, Чупин С. А., Плащинский В. А. Зависимость наработки пики гидромолота от износостойкости ее материала // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 5. – С. 68–79. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-68-79.

### Dependence of the lifelength of a hydraulic hammer pick on the wear resistance of its material

V.I. Bolobov<sup>1</sup>, Le Thanh Binh<sup>2</sup>, S.A. Chupin<sup>1</sup>, V.A. Plashchinsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,  
e-mail: boloboff@mail.ru

<sup>2</sup> Vinacom, Institute of Energy and Mining Engineering (IEMM),  
Hanoi, Socialist Republic of Vietnam

---

**Abstract:** The article presents the experimental data on the blow energy impact on the rate of percussion–abrasion wear of a prototyping conical pick made of instrumental steel of three different grades in percussive interaction with granite block. A part of the tool was subjected to standard thermal treatment practiced at pick manufacturing plants, the other part was exposed to cold or cryogenic treatment. For validating extensibility of the test data to the in-situ conditions, the experimental parameters were set to be such that to be similar to the working conditions of the hydraulic hammer pick. In order to reach the similarity, the level of the contact stresses between the prototyping tool and rock in the tests was the same as in the real-life percussive penetration of the pick. The dependence between the rate of percussion–abrasion wear resistance and blow energy of the prototyping tool was determined, and the wearability rates were calculated for the pick of hydraulic hammer JCB HM380 in destruction of granite blocks. The pick lifelength was assumed as the number of blows made by the pick until total wear of its tip. From the comparison of the lifelength of picks made of the test steel grades and subjected to the mentioned thermal treatment, the conclusion is drawn that it is expedient to introduce the low-temperature and cryogenic treatment in the manufacturing technology of picks for hydraulic hammers.

**Key words:** hydraulic hammer pick, percussion, blow energy, granite, percussion–abrasion wear, contact stress, tip dulling, cold treatment, cryogenic treatment, pick lifelength.

**For citation:** Bolobov V. I., Le Thanh Binh, Chupin S. A., Plashchinsky V. A. Dependence of the lifelength of a hydraulic hammer pick on the wear resistance of its material. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(5):68-79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-68-79.

---

## Введение

Изучению взаимодействия ударного инструмента с разрушаемой породой и способам повышения его износостойкости посвящено значительное количество работ, например [1 – 14].

В работе авторов [15] представлены результаты экспериментов по изнашиванию площадки притупления конусообразного модельного инструмента в результате его многократного ударного внедрения в гранитный фрагмент. Установлено, что полученные зависимости убыли массы инструмента от числа ударов описываются обратной степенной функцией вида  $\Delta m = An^{-B}$ , где  $A$  и  $B$  — коэффициенты, зависящие от материала и вида термической обработки инструмента, с 3-мя стадиями, каждая из которых отличается величиной убыли массы металла и скоростью ее снижения с увеличением числа ударов. С использованием представленной матема-

тической модели показано, что переход от одной стадии изнашивания к другой определяется соотношением между напряжениями, достигаемыми в месте контакта инструмента с породой, а также пределами прочности и текучести его материала, демонстрируемыми в динамических условиях. При этом на заключительной, основной по продолжительности, стадии изнашивания убыль массы металла за удар существенно не изменяется с числом ударов и может служить показателем интенсивности ударно-абразивного изнашивания инструмента из данной стали  $K_m$  [мг за удар].

В настоящей статье устанавливается зависимость величины  $K_m$  [15] от энергии удара  $A_m$  модельного инструмента, с использованием которой оценивается интенсивность ударно-абразивного изнашивания пика гидромолота  $K_n$  и ее наработка (число ударов) до полного изнашивания острия.

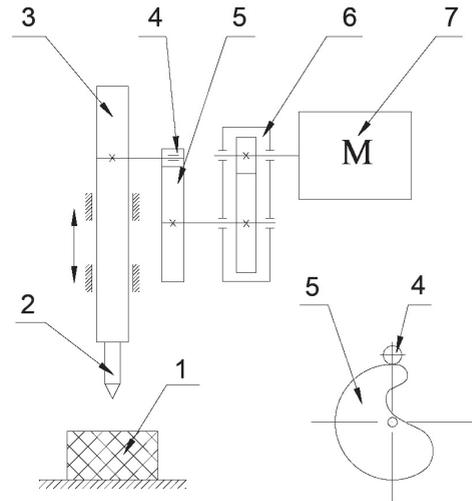
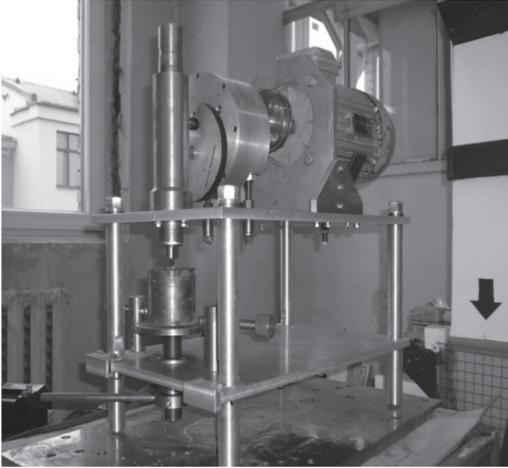


Рис. 1. Общий вид и принципиальная схема установки по изучению закономерностей изнашивания модельного ударного инструмента: 1 – фрагмент породы; 2 – модельный ударный инструмент; 3 – боек; 4 – ролик; 5 – кулачок; 6 – редуктор; 7 – электродвигатель

Fig. 1. General view and basic diagram of experimental assembly for studying wearability of prototyping percussion tool: 1 – rock block; 2 – prototyping percussion tool; 3 – piston; 4 – roller; 5 – cam; 6 – reduction unit; 7 – electric drive

### Методика эксперимента

Общий вид и схема экспериментальной установки представлены на рис. 1.

Модельный инструмент 2 (см. рис. 1) вида конической пики с углом заострения при вершине  $\beta = 30^\circ$  и радиусом цилиндрической части  $r_m = 4$  мм, необходимым для выполнения критерия



Рис. 2. Вид поверхности гранитного фрагмента после нанесения серии ударов модельным инструментом

Fig. 2. Surface of granite block after a series of blows by prototyping tool

подобия, после взвешивания на аналитических весах ( $\pm 0,1$  мг) закрепляли в массивном бойке 3 установки.

Под инструментом размещали цилиндрический фрагмент керна гранита 1 Выборгского массива крепостью  $f = 13$  по шкале М.М. Протождьяконова с пределом прочности на сжатие  $\sigma_{\text{сжк}} \sim 200$  МПа. Инструмент 2 вместе с бойком 3 совершал свободное падение с заданной высоты ( $h_m = 42$  мм) с нанесением ударов острием по поверхности фрагмента. Предударная скорость инструмента, рассчитанная из величины  $h$ , составляла  $0,91$  м/с. Тем же модельным инструментом осуществляли серию ударов  $n$  по поверхности фрагмента 1 со смещением точки нанесения каждого последующего удара на расстояние  $\geq 3d_n$ , где  $d_n$  – диаметр лунки (рис. 2).

После каждого удара измеряли массу модельного инструмента с определением ее убыли  $\Delta m$  в результате удара. При значительном числе ударов (свыше 40) установление  $\Delta m$  за удар произ-

водили через интервал ударов ( $n = 10 - 100$ ), как частное от деления суммарной величины функции за  $n$  ударов на число  $n$  в интервале. Изменяя массу бойка  $Z$  (2,8; 4,2; 5,6 и 7,0 кг), исследовали влияние величины кинетической энергии удара ( $A_m = 1,16; 1,74; 2,32$  и  $2,90$  Дж) на вид зависимости убыли массы инструмента  $\Delta m$  от числа нанесенных им ударов  $n$ .

В качестве материалов модельного инструмента были выбраны стали 38ХМ, У8А и Х12МФ. Первая — как типичный материал пик отечественного и зарубежного (сталь AISI P20) производства. Вторая — как материал ударных зубьев ковшей экскаваторов активного действия, удовлетворительно себя зарекомендовавшая в испытаниях [16], а третья — как материал, обладающий в закаленном состоянии высокой твердостью и вязкостью, прошедший натурные испытания [16] в качестве наплавки для предотвращения изнашивания зубьев.

Часть инструмента из указанных сталей подвергали типовой термической обработке (ТТО), практикуемой на заводах-изготовителях пик — закалке при  $800 - 1000$  °С в масле с последующим отпуском при  $200$  °С, другую — дополнительной обработке холодом (выдержке после закалки при минус  $75$  °С в течение  $5$  ч) или криогенной обработке (выдержке после закалки  $20$  ч в жидком азоте при минус  $196$  °С), как операциям, широко используемым для повышения износостойкости металлорежущего инструмента [17 — 26].

### Обоснование подобия процессов внедрения в породу модельного инструмента и пики гидромолота

Для обоснования возможности переноса экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях с применением модельного инструмента, на натурные условия устанавливали ра-

бочие параметры эксперимента, при соблюдении которых его условия будут подобны условиям работы пики гидромолота.

Исходя из заключения К.И. Иванова [27], считали, что для обеспечения подобия условий внедрения модельного ударного инструмента и пики в породу необходимо обеспечить в эксперименте уровень контактных напряжений между модельным инструментом и породой, близкий к имеющемуся при ударном внедрении пики. Это гарантирует одинаковую циклическую стойкость инструмента и неизменность энергозатрат на разрушение единицы объема породы.

Физическое уравнение процесса внедрения инструмента и пики в породу представляли в виде функционала

$$\varphi = (A, E_{ME}, \mu_{ME}, r, \beta, \sigma_k, E_{\square}, \mu_{\square}), \quad (1)$$

где  $A, E_{ME}, \mu_{ME}, r, \beta, \sigma_k, E_{\square}, \mu_{\square}$  — энергия удара, модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона инструмента, радиус цилиндрической части, угол заострения модельного инструмента и пики; контактное напряжение; модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона породы.

Размерность параметров, определяющих процесс внедрения:

$$\begin{aligned} [\beta] &= [L^0 M^0 T^0] \Rightarrow P_5, \\ [\sigma_k] &= [L^{-1} M^1 T^{-2}] \Rightarrow P_6, \\ [E_{\square}] &= [L^{-1} M^1 T^{-2}] \Rightarrow P_7, \\ [\mu_{\square}] &= [L^0 M^0 T^0] \Rightarrow P_8, \\ [A] &= [L^2 M^1 T^{-2}] \Rightarrow P_1, \\ [E_{ME}] &= [L^{-1} M^1 T^{-2}] \Rightarrow P_2, \\ [\mu_{ME}] &= [L^0 M^0 T^0] \Rightarrow P_3, \\ [r] &= [L^1 M^0 T^0] \Rightarrow P_4, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $L$  — длина;  $M$  — масса;  $T$  — время.

Таким образом, полная матрица размерностей имела размер  $n \times q$ , где  $n = 8$  — общее число параметров, определяющих процесс внедрения;  $q = 3$  — число основных единиц измерения параметров.

После исключения из (2) безразмерных параметров ( $P_3, P_5$  и  $P_8$ ) и сокращения до одного параметра, имеющих одинаковые размерности (в нашем случае из параметров  $P_2, P_6$  и  $P_7$  целесообразно оставить параметр  $P_6$ ), получали сокращенную матрицу вида

$$\|A\| = \begin{vmatrix} 2 & 1 & -2 \\ -1 & 1 & -2 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \Rightarrow A \quad (3)$$

$$\Rightarrow \sigma_k \cdot r$$

Общее количество критериев подобия  $N_\pi$ , определяемое, как  $N_\pi = m - l$ , (здесь  $m$  и  $l$  — общее количество ( $A, \sigma_k$  и  $r$ ) и число независимых ( $A$  и  $r$ ) параметров), для нашего случая равно  $3 - 2 = 1$ . Конкретное выражение критерия подобия  $\pi$  для независимых параметров  $A$  и  $r$  имело вид

$$\pi = P_5(P_1^x, P_2^y)^{-1} = \sigma_k(A^x, r^y)^{-1}, \quad (4)$$

здесь  $x$  и  $y$  — неизвестные показатели степеней при независимых параметрах для раскрытия конкретного вида критерия подобия.

Поскольку критерий подобия безразмерная величина, то размерности числителя и знаменателя должны быть одинаковы и из соотношения (4) записывали

$$[\sigma_k] = [A]^x [r]^y. \quad (5)$$

Раскрывая размерность параметров последнего выражения

$$[L^{-1}M^1T^{-2}] = [L^2M^1T^{-2}]^x [L^1M^0T^0]^y \quad (6)$$

и решая полученную систему уравнений

$$\begin{cases} 2x + y = -1 \\ x = 1 \\ -2x = -2 \end{cases}, \quad (7)$$

получали  $x = 1$ ;  $y = -3$ .

Таким образом, критерий подобия для условий моделирования ( $\pi_M$ ) и условий работы пики ( $\pi_\Pi$ ) имел вид

$$\pi = idem \Leftrightarrow \pi_M = \pi_\Pi \Leftrightarrow \sigma_{k,\Pi} A_M^{-1} r_M^3 = \sigma_{k,\Pi} A_\Pi^{-1} r_\Pi^3 \quad (8)$$

Откуда для обеспечения равенства  $\sigma_k$  получали

$$\frac{\sigma_{k,M}}{\sigma_{k,\Pi}} = \frac{A_M}{A_\Pi} \left( \frac{r_M}{r_\Pi} \right)^{-3}, \quad (9)$$

где  $A_M$  и  $r_M$ ;  $A_\Pi$  и  $r_\Pi$  — энергии удара и радиусы цилиндрической части модельного инструмента и пики гидромолота соответственно.

Выбрав высоту падения модельного инструмента  $h_M = 42$  мм, как удобную для проведения эксперимента, получали значение энергии удара  $A_M = 1,16$  Дж (для массы бойка = 2,8 кг). После подстановки значения  $A_M$  в (9) совместно со значениями  $A_\Pi, r_\Pi$  пики гидромолота ( $A_\Pi = 981$  Дж,  $r_\Pi = 39$  мм для гидромолота JCB HM380) устанавливали радиус цилиндрической части модельного инструмента  $r_M = 4$  мм, при котором выполняется условие подобия.

Таким образом, для моделирования условий внедрения пики в породу высота падения  $h_M$  инструмента и его радиус  $r_M$  должны составлять 42 мм и 4 мм соответственно, что и было осуществлено в экспериментах.

Что касается обеспечения равенства энергозатрат на разрушение породы, то, как показало сопоставление этого показателя для условий эксперимента (исходя из данных [29] может быть оценен в 14 МДж/м<sup>3</sup>) с соответствующим показателем для гидромолота (10,4 МДж/м<sup>3</sup> [16]), их значения близки.

Следовательно, при обеспечении в эксперименте установленных значений  $h_M$  и  $r_M$  силовое и энергетическое подобие систем «модельный ударный инструмент» — «порода» и «пика» — «порода» соблюдается.

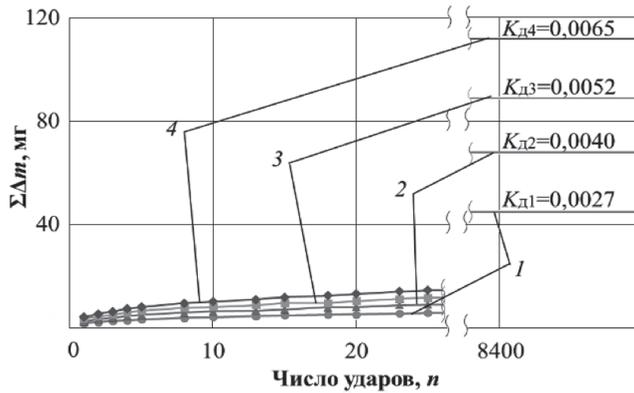


Рис. 3. Зависимость суммарной убыли массы модельного инструмента из стали 38ХМ от числа  $n$  при различных энергиях удара: 1 –  $A_{м1} = 1,16$  Дж; 2 –  $A_{м2} = 1,74$  Дж; 3 –  $A_{м3} = 2,32$  Дж; 4 –  $A_{м4} = 2,90$  Дж  
 Fig. 3. Relationship between total loss in weight of prototyping tool made of steel 38KHM and number  $n$  at different blow energies: 1 –  $A_{m1} = 1.16$  J; 2 –  $A_{m2} = 1.74$  J; 3 –  $A_{m3} = 2.32$  J; 4 –  $A_{m4} = 2.90$  J

### Результаты эксперимента

Результаты экспериментов по изучению влияния энергии удара  $A_m$  на убыль массы модельного инструмента и интенсивность  $K_m$  его ударно-абразивного изнашивания на примере инструмента из стали 38ХМ иллюстрирует рис. 3.

Оказалось, что с увеличением энергии удара  $A_m$  кривые  $\Sigma\Delta m = f(n)$  для модельного инструмента из всех сталей смещаются кверху (рис. 3), а интенсивность ударно-абразивного изнашивания  $K_m$  возрастает. При этом величины  $K_m$  и  $A_m$  находятся в прямо пропорциональной зависимости: при возрастании  $A_m$  в  $n$  раз

практически в такое же количество раз увеличивается и величина  $K_m$ . Так, например, при увеличении работы удара от  $A_{m1} = 1,16$  Дж до  $A_{m4} = 2,9$  Дж, т.е. в 2,5 раза, отношение интенсивностей изнашивания  $K_{m4}/K_{m1}$  составляет для сталей 38ХМ – 2,41; У8А – 2,63 и Х12МФ – 2,37 (рис. 4), т.е. практически наблюдается равенство

$$K_{mi} = K_{m1} \frac{A_{mi}}{A_{m1}} \quad (10)$$

С учетом выполнения критерия подобия (9) в экспериментах считали, что установленная зависимость (10) между  $K_m$  и  $A_m$  может быть использована для

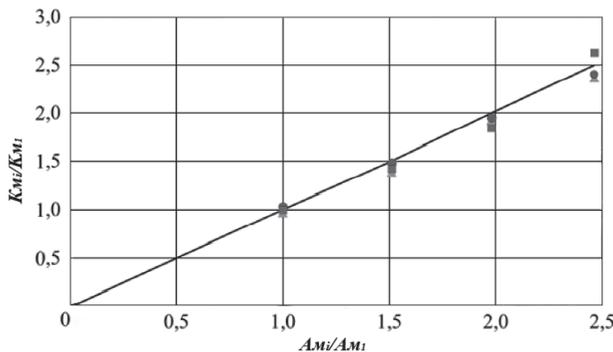


Рис. 4. Соотношение между величинами  $K_{mi}/K_{m1}$  и  $A_{mi}/A_{m1}$  для инструмента из сталей 38ХМ (●), У8А (■) и Х12МФ (▲)

Fig. 4. Ratio of  $K_{mi}/K_{m1}$  and  $A_{mi}/A_{m1}$  for tool made of steel grades 38KHM (●), У8А (■) and Х12МФ (▲)

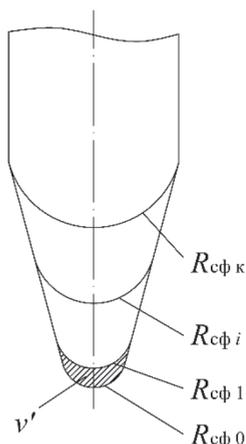


Рис. 5. Принятая схема изменения радиуса притупления пика в результате изнашивания

Fig. 5. Accepted scheme of change in dulling radius of pick as a result of wear

установления интенсивности ударно-абразивного изнашивания пика гидромолота  $K_n$ , исходя из величины интенсивности изнашивания  $K_m$  модельного инструмента из соответствующего материала и соотношения энергии удара пика  $A_n$  и инструмента  $A_m$

$$K_n = K_m \frac{A_m}{A_n} \quad (11)$$

### Установление интенсивности ударно-абразивного изнашивания пика гидромолота и ее наработки

Считали, что предельное состояние пика (наработка) наступает при полном изнашивании ее острия, т.е., когда радиус  $r_{сф}$  полусферического притупления острия пика сравнивается с радиусом ее цилиндрической части

$$r_{сфк} = r_n \quad (12)$$

В предположении, что подавляющая часть изношенного металла приходится на площадку контакта пика с породой, рассчитывали число ударов  $N^*$ , которое должна нанести пика по гранитному фрагменту для изменения радиуса  $r_{сф}$  от  $r_{сф0} = 13$  мм (радиус притупления исходной пика) до  $r_{сфк} = r_n = 39$  мм за счет уменьшения объема полусферы при каждом ударе на величину  $v'$ , соответствующую  $K_n$ ,

$$v' = \frac{K_n}{\rho} \quad (13)$$

где  $\rho$  — плотность материала пика ( $7,85 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> для всех сталей) (рис. 5). Установленную величину  $N^*$  принимали за наработку пика.

### Параметры ударно-абразивного изнашивания модельного инструмента и пика гидромолота JCB HM380 при внедрении в гранит в сравнении с наработкой пика Percussion-abrasion wear parameters of prototyping tool and JCB HM380 hydrohammer pick in penetration in granite versus lifelength

Марка стали и вид термической обработки пика	$K_m$ , мг	$K_n$ , мг	$v'$ , мм <sup>3</sup>	$N \cdot 10^{-5}$
38ХМ <sub>ТТО</sub>	0,0027	2,28	0,29	4,3
38ХМ <sub>х</sub>	0,0023	1,94	0,25	5,1
38ХМ <sub>кр</sub>	0,0021	1,74	0,22	5,7
У8А	0,0019	1,61	0,20	6,1
У8А <sub>х</sub>	0,0017	1,44	0,18	6,8
У8А <sub>кр</sub>	0,0016	1,31	0,17	7,5
Х12МФ	0,0013	1,14	0,15	8,6
Х12МФ <sub>х</sub>	0,0010	0,85	0,11	11,6
Х12МФ <sub>кр</sub>	0,0007	0,57	0,07	17,3

ТТО — типовая термическая обработка; х — обработка холодом; кр — криогенная обработка пика.

Установленные в опытах значения  $K_m$  модельного инструмента (для  $A_{m1} = 1,16 \text{ Дж}$ ), рассчитанные (18) по ним интенсивности изнашивания  $K_n$  (для  $A_n = 981 \text{ Дж}$ ), соответствующие  $K_n$  объемы  $v'$  и установленные значения  $N^*$  представлены в таблице.

Как видно из сравнения данных таблицы, в случае замены традиционно используемого материала пики стали 38ХМ на более износостойкий материал — стали У8А и Х12МФ наработка инструмента возрастет с  $4,3 \cdot 10^5$  до  $6,1 \cdot 10^5$  и  $8,6 \cdot 10^5$  числа ударов соответственно, т.е. в 1,4 и 2 раза.

Обработка холодом и криогенная обработка инструмента из всех рассмотренных сталей способны от 1,1 до 2 раз повысить количество ударов, которое может нанести пика до ее полного притупления по сравнению с аналогичной пикикой после типовой термической обработки.

Указанное положительное влияние обработок холодом объясняется тем, что выдержка инструмента из высокоуглеродистых сталей У8А (~0,8%С) и Х12МФ (~1,5%С) при отрицательных температурах приводит к существенному снижению содержания «мягкого» остаточного аустенита в их структуре, где он сохранился после закалки в значительных количествах.

Она же способствует увеличению содержания карбидов в структуре инструмента из легированных сталей 38ХМ и Х12МФ. Причем, чем ниже температура обработки холодом, тем выше ее эффективность [29].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А. П. Напряженно-деформированное состояние ударника для дробления негабаритов горных пород при динамическом нагружении // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 12. — С. 156–159.

2. Родин М. С., Иванов С. Л. Обоснование и выбор параметров устройства для разрушения негабаритов в подземных условиях рудников компании «Де Бирс» // Записки Горного института. — 2009. — Т. 182. — С. 105–109.

## Основные выводы

- Представлена методика лабораторных испытаний по изучению закономерностей изнашивания модельного ударного инструмента из различных сталей и термической обработки в условиях, моделирующих условия изнашивания пики гидромолота при ее внедрении в породу.

- Результатами испытаний модельного инструмента, изготовленного из трех марок инструментальных сталей, показано, что интенсивность его ударно-абразивного изнашивания  $K_m$  при внедрении в гранитный фрагмент возрастает с увеличением энергии удара в прямо пропорциональной зависимости.

- Исходя из установленных значений интенсивностей изнашивания  $K_m$  модельного инструмента и вида его зависимости от энергии удара рассчитаны интенсивность ударно-абразивного изнашивания  $K_n$  и наработка пики гидромолота JCB HM380, изготовленной из трех марок сталей и подвергнутой трем видам термической обработки, при ее внедрении в гранит.

- Показано, что в случае замены традиционно используемого материала пики стали 38ХМ на более износостойкие материалы — стали У8А и Х12МФ количество ударов, которое способна нанести пика до полного изнашивания ее острия, (наработка пики) возрастет в 1,4 и 2 раза. Обработка холодом и криогенная обработка инструмента из указанных сталей способны от 1,1 до 2 раз повысить наработку пики по сравнению с ее типовой термической обработкой.

3. Толстунов С.А., Половинко А.В. Определение эффективности применения машин ударного действия при добыче крепких горных пород // Записки Горного института. – 2013. – Т. 205. – С. 36–39.
4. Гречнева М.В., Толкачев С.А., Владимирцев И.К. Повышение износостойкости деталей горных машин // Вестник ИрГТУ. – 2011. – № 12(59). – С. 26–29.
5. Первов К.М., Коровин С.К., Аракчеев С.Н., Сафронов Д.В. Способы и средства упрочнения породоразрушающих инструментов горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 10. – С. 168–172.
6. Ушаков Л.С., Климов В.Е. Выбор определяющих параметров для разработки математической модели разрушения горных пород ударным инструментом таранного типа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 10. – С. 100–105. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-0-100-105.
7. Yang Daolong, Li J., Du C., Liu S., Zheng Kehong, Jiang H. Wear performance of conical pick in rotary-drilling cutting process // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2015. Vol. 20, No 8. Pp. 2031–2040.
8. Li Xuefeng, Wang Shibo, Ge S., Malekian Reza, Li Z. A theoretical model for estimating the peak cutting force of conical picks // Experimental Mechanics. 2018. Vol. 58, Pp. 709–720. DOI: 10.1007/s11340-017-0372-1.
9. Zverev E.A., Skeebe V. Yu., Martyushev N.V., Skeebe P. Yu. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 736. Pp. 132–137.
10. Prokopenko S.A., Ludzish V.S., Kurzina I.A. Improvement of cutting tools to increase the efficiency of destruction of rocks tunnel harvesters // Journal of Mining Science, 2016, Vol. 52, no 1, pp. 153–159.
11. Прокопенко С.А., Лудзиш В.С., Курзина И.А. Разработка комбайновых резцов нового класса // Горный журнал. – 2017. – № 2. – С. 75–78.
12. Krasnyu V.A. The use of nanomaterials to improve the wear resistance of machine parts under fretting corrosion conditions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560(1), Article 012186. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012186.
13. Ольт Ю., Максаров В.В., Красный В.А. Исследование износостойкости подшипниковых узлов двигателей карьерных автосамосвалов, работающих в условиях фреттинг-коррозии // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 70–77. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.70.
14. Gabov V. V., Zadkov D. A., Nguyen Khac Linh Features of elementary burst formation during cutting coals and isotropic materials with reference cutting tool of mining machines // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 236, pp. 153–161. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.153.
15. Болобов В.И., Ле Тхань Бинь Закономерности разрушения материала ударника при повторяющихся единичных ударах // Записки Горного института. – 2018. – Т. 233. – С. 525–533. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.525.
16. Ушаков Л.С., Котылев Ю.Е., Кравченко В.А. Гидравлические машины ударного действия. – М.: Машиностроение, 2000. – 416 с.
17. Клименко А.П. Холод в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1969. – 248 с.
18. Candane D., Alagumurthi N., Palaniradja K. Effect of cryogenic treatment on microstructure and wear characteristics of AISI M35 HSS // International Journal of Materials Science and Applications. 2013. Vol. 2. Issue 2, pp. 56–60.
19. Gill S. S., Singh J., Singh R., Singh H. Metallurgical principles of cryogenically treated tool steels – a review on the current state of science // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 54, pp. 59–82.
20. Patil P. I., Tated R. G. Comparison of effects of cryogenic treatment on different types of steels: a review // International Conference in Computational Intelligence (ICCI) – Proceedings published in International Journal of Computer Applications® (IJCA). 2012. pp. 10–29.

21. Tated R. G., Kajale S. R., Iyer K. Improvement in tool life of cutting tool by application of deep cryogenic treatment // 7th International Tooling Conference Held, Politecnico di Torino, Italy. 2006. Pp. 135 – 141.
22. Collins D. N., Dormer J. Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel // Heat Treatment of Metals. 1997, no 3, Pp. 71 – 74.
23. Kalsi N. S. Cryogenic treatment of tool materials: a review // Materials and Manufacturing Processes. 2012. Vol. 25. Pp. 1077 – 1100.
24. Ivancivsky V. V., Skeebe V. Y., Bataev I. A., Lobanov D. V., Martyushev N. V., Sakha O. V., Khlebova I. V. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 156(1). 012025.
25. Plotnikova N. V., Skeebe V. Y., Martyushev N. V., Miller R. A., Rubtsova N. S. Formation of high-carbon abrasion-resistant surface layers when high-energy heating by high-frequency currents // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 156(1). 012022.
26. Martyushev N. V. Alignment of the microstructure of castings from the heterophase lead bronzes // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 880. Pp. 163 – 167.
27. Иванов К. И., Варич М. С., Дусев В. И., Андреев В. Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. Изд. 2. – М.: Недра, 1974. – 408 с.
28. Болобов В. И., Ле Тхань Бинь, Плащинский В. А. О распространении трещины разрушения по горной породе при ударе // Обогащение руд. – 2019. – № 6. – С. 3–7.
29. Ле Тхань Бинь, Болобов В. И., Нгуен Кхак Линь Влияние обработки холодом на механические свойства и износостойкость материалов пик гидромолотов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – СВ 25. – 12 с. **ПИАБ**

## REFERENCES

1. Fedoseev A. P. Stress-strain behavior of a hammer for crushing oversize rocks by dynamic loading. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 12, pp. 156 – 159. [In Russ].
2. Rodin M. S., Ivanov S. L. Justification and selection of tool parameters for fracturing oversize rocks in underground mines of De Beers. *Journal of Mining Institute*. 2009, vol. 182, pp. 105 – 109. [In Russ].
3. Tolstunov S. A., Polovinko A. V. Efficiency of percussive machines in strong rock mining. *Journal of Mining Institute*. 2013, vol. 205, pp. 36 – 39. [In Russ].
4. Grechneva M. V., Tolkachev S. A., Vladimirtsev I. K. Improvement of wearability of mining machine parts. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011, no 12(59), pp. 26 – 29. [In Russ].
5. Pervov K. M., Korovin S. K., Arakcheev S. N., Safronov D. V. Methods and means for strengthening of rock-cutting tools of mining machines. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2003, no 10, pp. 168 – 172. [In Russ].
6. Ushakov L. S., Klimov V. E. Selecting key parameters for mathematical modeling of rock destruction by ram-type percussive tool. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 10, pp. 100–105. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-0-100-105.
7. Yang Daolong, Li J., Du C., Liu S., Zheng Kehong, Jiang H. Wear performance of conical pick in rotary-drilling cutting process. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2015. Vol. 20, No 8. Pp. 2031 – 2040.
8. Li Xuefeng, Wang Shibo, Ge S., Malekian Reza, Li Z. A theoretical model for estimating the peak cutting force of conical picks. *Experimental Mechanics*. 2018. Vol. 58, Pp. 709–720. DOI: 10.1007/s11340-017-0372-1.
9. Zverev E. A., Skeebe V. Yu., Martyushev N. V., Skeebe P. Yu. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings. *Key Engineering Materials*. 2017. Vol. 736. Pp. 132 – 137.

10. Prokopenko S.A., Ludzish V.S., Kurzina I.A. Improvement of cutting tools to increase the efficiency of destruction of rocks tunnel harvesters. *Journal of Mining Science*, 2016, Vol. 52, no 1, pp. 153 – 159.

11. Prokopenko S.A., Ludzish V.S., Kurzina I.A. Design of new-class picks for cutter – loaders. *Gornyi Zhurnal*, 2017, no 2, pp. 75 – 78. [In Russ].

12. Krasnyy V.A. The use of nanomaterials to improve the wear resistance of machine parts under fretting corrosion conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 560(1), Article 012186. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012186.

13. Olt J., Maksarov V.V., Krasnyy V.A. Study of bearing units wear resistance of engines career dump trucks, working in fretting corrosion conditions. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235, pp. 70 – 77. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.70.

14. Gabov V.V., Zadkov D.A., Nguyen Khac Linh Features of elementary burst formation during cutting coals and isotropic materials with reference cutting tool of mining machines. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 236, pp. 153 – 161. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.153.

15. Bolobov V.I., Le Thanh Binh Regular patterns of material failure in hammer under repetitive unit blows. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 233, pp. 525 – 533. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.525.

16. Ushakov L.S., Kotylev Yu.E., Kravchenko V.A. *Gidravlicheskie mashiny udarnogo deystviya* [Hydraulic percussive machines], Moscow, Mashinostroenie, 2000, 416 p.

17. Klimenko A.P. *Kholod v mashinostroenii* [Cold in machine building], Moscow, Mashinostroenie, 1969, 248 p.

18. Candane D., Alagumurthi N., Palaniradja K. Effect of cryogenic treatment on microstructure and wear characteristics of AISI M35 HSS. *International Journal of Materials Science and Applications*. 2013. Vol. 2. Issue 2, pp. 56 – 60.

19. Gill S.S., Singh J., Singh R., Singh H. Metallurgical principles of cryogenically treated tool steels – a review on the current state of science. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 54, pp. 59 – 82.

20. Patil P.I., Tated R.G. Comparison of effects of cryogenic treatment on different types of steels: a review. *International Conference in Computational Intelligence (ICCIA) – Proceedings published in International Journal of Computer Applications® (IJCA)*. 2012. pp. 10 – 29.

21. Tated R.G., Kajale S.R., Iyer K. Improvement in tool life of cutting tool by application of deep cryogenic treatment. *7th International Tooling Conference Held*, Politecnico di Torino, Italy. 2006. Pp. 135 – 141.

22. Collins D.N., Dormer J. Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel. *Heat Treatment of Metals*. 1997, no 3, Pp. 71 – 74.

23. Kalsi N.S. Cryogenic treatment of tool materials: a review. *Materials and Manufacturing Processes*. 2012. Vol. 25. Pp. 1077 – 1100.

24. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Y., Bataev I.A., Lobanov D.V., Martyushev N.V., Sakha O.V., Khlebova I.V. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 156(1). 012025.

25. Plotnikova N.V., Skeebe V.Y., Martyushev N.V., Miller R.A., Rubtsova N.S. Formation of high-carbon abrasion-resistant surface layers when high-energy heating by high-frequency currents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 156(1). 012022.

26. Martyushev N.V. Alignment of the microstructure of castings from the heterophase lead bronzes. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 880. Pp. 163 – 167.

27. Ivanov K.I., Varich M.S., Dusev V.I., Andreev V.D. *Tekhnika bureniya pri razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh*. Izd. 2 [Drilling equipment in mineral mining, 2nd edition], Moscow, Nedra, 1974, 408 p.

28. Bolobov V.I., Le Thanh Binh, Plashchinskiy V.A. Propagation of fracture in rocks under impact. *Obogashchenie rud*. 2019, no 6, pp. 3 – 7. [In Russ].

29. Le Thanh Binh, Bolobov V.I., Nguyen Khac Linh Effect of cold treatment on mechanical properties and wear resistance of materials of hydraulic hammer picks. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017. Special edition 25, 12 p. [In Russ].

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Болобов Виктор Иванович*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: boloboff@mail.ru,  
*Ле Тхань Бинь* — научный сотрудник, Vinacomin, Институт энергетики и горномашиностроения (ИЕММ), Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам,  
*Чупин Станислав Александрович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент,  
*Плащинский Вячеслав Алексеевич*<sup>1</sup> — аспирант,  
<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет.

**Для контактов:** Болобов В.И., e-mail: boloboff@mail.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.I. Bolobov*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: boloboff@mail.ru,  
*Le Thanh Binh*, Researcher, Vinacomin, Institute of Energy and Mining Engineering (IEMM), Hanoi, Socialist Republic of Vietnam,  
*S.A. Chupin*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
*V.A. Plashchinsky*<sup>1</sup>, Graduate Student,

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

**Corresponding author:** V.I. Bolobov, e-mail: boloboff@mail.ru.

Получена редакцией 12.12.2019; получена после рецензии 30.01.2020; принята к печати 20.04.2020.

Received by the editors 12.12.2019; received after the review 30.01.2020; accepted for printing 20.04.2020.



---

## ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

---

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНЕЧНЫХ КОНТУРОВ КАРЬЕРА В ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

(2020, № 3, СБ 8, 24 с.)

В 1960–70 гг. были предложены алгоритмы оптимизации конечных контуров карьеров, в т.ч. алгоритмы Лерча-Гроссмана, плавающего (подвижного) конуса, pseudoflow. Они позволяют получить оптимальный контур карьера по критерию максимизации прибыли, который имеет максимальную экономическую оценку (ценность), но не отвечает ряду технологических требований. Построение конечного контура карьера на основе оптимального связано со снижением экономической оценки, полученной в результате оптимизации. Общая цель исследований — минимизация потери экономической ценности карьера при проектировании конечного контура на основании результатов оптимизации в горно-геологических информационных системах.

### FEATURES OF DESIGNING THE FINAL CONTOURS OF A QUARRY IN MINING AND GEOLOGICAL INFORMATION SYSTEMS

In 1960-70, algorithms for optimizing the final contours of quarries were proposed, including the Lurch-Grossman algorithm, floating (mobile) cone, and pseudoflow. They allow you to get the optimal contour of the quarry according to the profit maximization criterion, which has the maximum economic assessment (value), but does not meet a number of technological requirements. The construction of the final contour of the quarry based on the optimal one is associated with a decrease in the economic assessment obtained as a result of optimization. The overall goal of the research is to minimize the loss of economic value of the quarry when designing the final contour based on the results of optimization in mining and geological information systems.