

*На правах рукописи*

**ЛЕ Тхань Бинь**



**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧЕГО  
ИНСТРУМЕНТА ГИДРОМОЛОТОВ ТИПА JCB СРЕДНЕЙ  
СЕРИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ НЕГАБАРИТОВ В УСЛОВИЯХ  
КАРЬЕРОВ РАЙОНА БИНЬ ДИНЬ (СОЦИАЛИСТИЧЕСКАЯ  
РЕСПУБЛИКА ВЬЕТНАМ)**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

**Научный руководитель**

доктор технических наук, старший научный сотрудник

***Болобов Виктор Иванович***

**Официальные оппоненты:**

***Сысоев Николай Иванович***

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кафедра горного дела, профессор

***Шишлянников Дмитрий Игоревич***

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра горной электромеханики, доцент

**Ведущая организация** – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Защита диссертации состоится «03» сентября 2020 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан «03» июля 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ

Иван Евгеньевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Гранитные карьеры провинции Бинь Динь Вьетнама являются основными производителями щебня в стране. Они отличаются сравнительно невысокой производительностью (до 300 тыс. т/год) и применением в технологической цепи оборудования производства щебня щековых дробилок небольшой мощности (до 55-75 кВт) с размерами загрузочного отверстия не превышающем 600 мм. При этом негабаритные куски, составляющие 10-12 % от объема отбитой горной массы, требуют дополнительной разделки. Для выполнения этой операции применяют гидравлические молоты средней серии типа *JCB HM380*, *Daemo B90*, *Furukawa F6BHL* с инструментом в виде пика, который в процессе эксплуатации подвергается интенсивному ударно-абразивному изнашиванию.

Как показывает опыт, долговечность пик гидромолотов мала и их небольшая наработка негативно влияет на эффективность горных работ в целом. Все это делает актуальным задачу повышения долговечности пик гидромолотов. Одним из наиболее кардинальных решений выявленной задачи повышения износостойкости рабочего инструмента молотов является совершенствование технологического процесса его изготовления.

**Степень разработанности темы исследования.** В работах Александрова Е.В., Барона Л.И., Вихляева А.А., Ефремова Э.И., Иванова К.И., Кильчевского Н.А., Котылева Ю.Е., Недорезова И.А., Ровинского М.И., Соколинского В.Б., Ушакова Л.С., *Balci C.*, *Bilgin N.*, *Sopur H.* и др. установлены основные закономерности процесса разрушения горных пород ударным способом. При этом закономерности процесса изнашивания ударного инструмента и влияние степени притупления пики на интенсивность и энергоемкость процесса разделки негабаритов исследованы не достаточно полно, что требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

**Целью исследования** является установление закономерностей процесса ударно-абразивного изнашивания пики гидромолота при разделке негабарита для разработки научно-обоснованного технологического решения по повышению износостойкости рабочего инструмента гидромолотов при работе по крепким породам, имеющего существенное значение для развития горной промышленности Социалистической Республики Вьетнам.

**Идея исследования:** повышение износостойкости пики гидромолота достигается формированием в структуре ее поверхностного изнашиваемого слоя мелкодисперсных особо твердых включений путем совершенствования технологического процесса изготовления пики, включающем обработку холодом непосредственно после закалки с последующим низким отпускком.

**Задачи исследования:**

1. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации.
2. Разработка математической модели ударного взаимодействия пики гидромолота с породой, учитывающей притупление инструмента из-за изнашивания в процессе эксплуатации.
3. Разработка стенда и проведение лабораторных экспериментальных исследований по установлению основных закономерностей процесса изнашивания ударного инструмента при его взаимодействии с породой.
4. Оценка влияния обработки пик холодом на ударно-абразивную износостойкость инструмента.
5. Разработка рекомендаций по повышению износостойкости пики.

**Научная новизна исследования:**

1. Установлено, что доминирующим фактором процесса изнашивания пики гидромолота при ударном внедрении в гранит является микрорезание ее абразивными частицами, при этом ударно-абразивная износостойкость инструмента определяется наличием мелкодисперсных твердых включений в его поверхностном изнашиваемом слое и возрастает с увеличением их числа.
2. Показано, что введение в технологический процесс изготовления пики гидромолота из инструментальных сталей операции обработки холодом формирует в поверхностном слое пики, подвергаемом интенсивному изнашиванию, мелкодисперсные твердые включения, что снижает интенсивность абразивного изнашивания инструмента и повышает его наработку.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

На основе статистически достоверной информации, полученной в результате проведения лабораторных экспериментов, выявлены закономерности процесса изнашивания ударного инструмента при разделке негабаритов, изменение интенсивности  $K$  которого с числом ударов  $n$ , нанесенных пикой на первых стадиях изнашивания, целесообразно описывать функцией вида  $K = An^B$ , где  $A$  и  $B$  –

коэффициенты, зависящие от материала и вида термической обработки инструмента, в тоже время на завершающей, наиболее продолжительной стадии, интенсивность изнашивания с числом ударов заметным образом не изменяется, т.е.  $K \approx \text{const} (n)$ , что позволяет использовать величину  $I$ , обратную  $K$ , в качестве характеристики ударно-абразивной износостойкости пики в разработанной математической модели взаимодействия пики с породой.

Даны рекомендации по совершенствованию технологического процесса изготовления пики, обеспечивающего образование в поверхностном слое и теле пики мелкодисперсных твердых включений, что способствует повышению наработки инструмента до 31 % по сравнению со штатной пикой.

**Методология и методы исследования.** При решении поставленных задач используется комплексный метод, включающий анализ и обобщение литературных источников, получение экспериментальных данных на разработанной установке, их компьютерную обработку, разработку математической модели и, с использованием расчетных и экспериментальных данных, анализ процессов внедрения пики в породу и ее изнашивания.

**Соответствие паспорту специальности.** Тема исследования соответствует п. 6 «Разработка и совершенствование технологических процессов с целью обеспечения высокого качества горных машин на стадии проектирования, изготовления и эксплуатации с учетом специфики работы на горных предприятиях» области исследований паспорта специальности 05.05.06 – Горные машины.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Процесс изнашивания пики при ее многократном ударном взаимодействии с разрушаемым гранитным объектом протекает в три стадии, продолжительность которых зависит от прочностных характеристик поверхностного слоя инструмента в динамических условиях нагружения, а доминирующим фактором заключительной стадии процесса является микрорезание площадки контакта пики частицами абразива разрушаемого объекта.

2. Совершенствование технологического процесса изготовления пик гидромолотов из инструментальных сталей включением в процесс их термической обработки после операции закалки длительную обработку холодом, осуществляемую при температуре 198 К, с последующим нагревом до 473 К при отпуске, обеспечивает формирование в поверхностном слое и теле пики мелкодисперсных твердых включений, что способствует повышению наработки

инструмента до 31 % по сравнению со штатной пикой.

**Степень достоверности и апробация результатов работы.**

Достоверность результатов работы подтверждается сходимостью результатов экспериментов с результатами натуральных испытаний и общепризнанных исследований в области ударного разрушения горных пород.

Основные положения работы, результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались и получили положительную оценку на: IV международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении», г. С-Пб, 2016 г.; III Международной научно-практической конференции «Горная и нефтяная электромеханика – Проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования», г. Пермь, 2016 г.; Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018», г. С-Пб, 2018 г.

**Личный вклад соискателя** заключается: в постановке цели, формулировке задач и разработке методик исследования, проведении анализа основных теоретических представлений о процессе разрушения горных пород ударом, проектировании и изготовлении лабораторного стенда, проведении экспериментальных и теоретических исследований процесса изнашивания модельного инструмента и пикки, разработке рекомендаций по усовершенствованию технологического процесса изготовления пик гидромолотов.

**Публикации.** Основное содержание диссертации работы отражено в 9 научных статьях, из них 3 – в периодических научных изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 1 – в журнале, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus.

**Структура и содержание.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения общим объемом 150 страниц печатного текста, содержит 12 таблиц, 72 рисунка, список литературы из 101 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В **первой** главе проведен анализ процесса добычи гранита в Социалистической Республике Вьетнам, конструкции и области применения гидромолотов, возможные способы повышения износостойкости пик, закономерности скола пикой кусков породы.

**Вторая** глава посвящена разработке методики и экспериментального стенда по изучению процесса изнашивания ударного инструмента при его взаимодействии с породой с представлением полученных результатов.

Методика эксперимента разработана, исходя из соблюдения подобия условий взаимодействия с породой модельного ударного инструмента и пика гидромолота. Для этого в экспериментах обеспечиваются контактные напряжения  $\sigma_k$  близкие к напряжениям, имеющим место при взаимодействии пика с реальным объектом при работе гидромолота, что гарантирует одинаковую циклическую стойкость инструмента и неизменность энергозатрат на разрушение единицы объема породы.

Процесс внедрения модельного инструмента и пика в породу представлялся в виде функционала  $\varphi = (\sigma_{км}, \sigma_{кп}, A_{0м}, A_{0п}, d_m, D_p, \beta_m, \beta_p)$ , где  $\sigma_{км}, \sigma_{кп}, A_{0м}, A_{0п}, d_m, D_p, \beta_m, \beta_p$  – контактные напряжения, энергии удара, диаметры и углы приострения модельного инструмента и пика, из которого на основании  $\pi$ -теоремы получали необходимый критерий подобия (1)

$$\sigma_{км} A_{0м}^{-1} d_m^3 = \sigma_{кп} A_{0п}^{-1} D_p^3 \quad (1)$$

Для выполнения условия подобия  $\sigma_{км} = \sigma_{кп}$  должно обеспечиваться равенство  $A_{0м}^{-1} d_m^3 = A_{0п}^{-1} D_p^3$ , что было реализовано при разработке методики эксперимента.

Модельный инструмент 2 (рисунок 1) вида конической пика ( $\beta = 30^\circ$ ) с диаметром цилиндрической части  $d_m = 8$  мм (радиусом  $r_m = 4$  мм), как с размером, необходимым для выполнения критерия подобия, закреплялся в массивном бойке 3 установки (рисунок 1).

Материалом инструмента 2 служили стали 38ХМ (аналог стали AISI 4140 – материала пик, наиболее часто использующихся во Вьетнаме), а также У8А и Х12МФ. Каждая партия (10 штук) инструмента из соответствующего материала разделялась пополам и подвергалась термической обработке: одна часть – типовая термическая

обработка (ТТО), практикуемой на заводах-изготовителях пик, другая – дополнительно обрабатывалась холодом (5 часов при 198 К или 20 часов при 77 К) между операциями закалки и низким отпуском с последующим замером твердости  $HV$ , по которой рассчитывались пределы текучести  $\sigma_{0,2}$  и прочности  $\sigma_B$  материала, подтверждаемые экспериментально. Исследовалась структура инструмента после типовой обработки и дополнительной обработки холодом с оценкой количества в ней карбидов и остаточного аустенита.

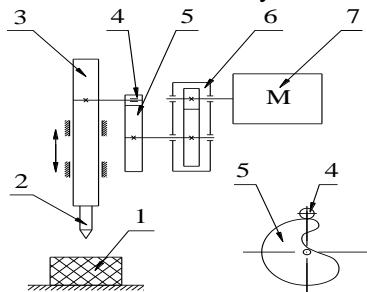


Рисунок 1 – Схема установки по изучению процесса изнашивания пика гидромолота: 1 – фрагмент породы; 2 – модельный инструмент; 3 – боек; 4 – ролик; 5 – кулачок; 6 – редуктор; 7 – электрический двигатель

Все измерения проводились на сертифицированном оборудовании с применением индикатора часового типа с точностью замера 0,01 мм, весов ВЛЭ-423С с ценой деления 0,001 г, универсального твердомера и разрывной машины Zwick / Roell, микроскопа Аxioplan-2 с программой KS 300 3.0.

В качестве разрушаемого фрагмента 1 использовался керн гранита Выборгского массива ( $\sigma_{сж} \sim 200$  МПа, 450  $HV$ ), как породы, близкой по составу и свойствам к гранитам района Бинь Динь Социалистической Республике Вьетнам.

При многократном ударном воздействии бойка с инструментом при его падении с заданной высоты ( $H = 42$  мм) осуществлялась серия ударов ( $A_{0м} = 1,16$  Дж,  $v_{0м} = 0,91$  м/с) в различные точки поверхности фрагмента. Фиксировались глубина  $h$  лунок выкола в породе, убыль массы  $\Delta m$  инструмента и радиус  $r_{пл}$  площадки притупления острия с последующей оценкой его степени притупления  $k$ , как  $r_{пл}/r_m$  для плоской и  $r_{сф}/r_m$  для полусферической площадки. Устанавливались зависимости  $h$ ,  $\Delta m$ ,  $k$  от числа ударов  $n$ .

В другой серии экспериментов торцы цилиндрической части модельного инструмента изнашивались в условиях трения скольжения по поверхности тех же фрагментов гранита с фиксацией убыли массы



$\Delta m$  от пройденного пути трения  $l$ , после чего определялась *абразивная износостойкость* каждого вида инструмента в условиях статического нагружения  $I_{ст} = l / \Delta m$  [м/мг].

В результате проведения экспериментов, их обработки и анализа данных было установлено, что полученные зависимости убыли массы (интенсивности изнашивания  $K$ ) 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, и характеризуются существованием 3-х стадий (*I, II, III*), разделенных между собой числом ударов  $n^*$ ,  $n^{**}$ , различающихся для каждого вида инструмента (рисунок 2).

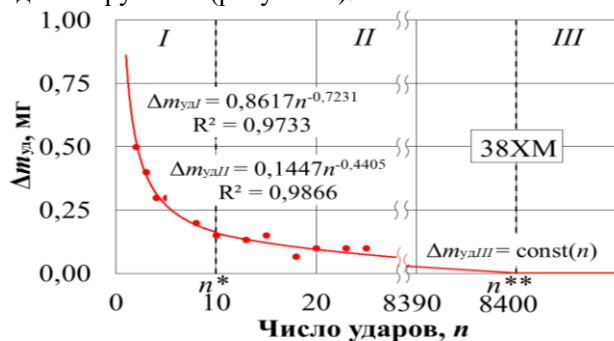


Рисунок 2 – Зависимость убыли массы  $\Delta m$  модельного инструмента из стали 38ХМ от числа нанесенных им единичных ударов

На стадии *I* убыль массы  $\Delta m_I$  инструмента чрезвычайно интенсивна. На стадии *II*, соответствующей числу ударов от  $n^*$  до  $n^{**}$ , интенсивность потери массы  $\Delta m_{II}$  с ростом  $n$  резко снижается.

На стадии *III* (при  $n > n^{**}$ ), соответствующей приобретению площадкой притупления формы полусферы,  $\Delta m_{III}$  становится практически не зависящей от числа ударов. Это значение  $\Delta m_{III}$  принималось за *интенсивность изнашивания*  $K$  инструмента на установившейся стадии процесса, а величина ему обратная  $I = 1/K$  – за его *ударно-абразивную износостойкость*.

Для объяснения установленных закономерностей изнашивания в **третьей главе** с использованием предложенной математической модели был рассчитан уровень контактных напряжений, возникающих при ударном взаимодействии модельного инструмента и пики с породой на каждой стадии их изнашивания.

На базе уравнений двухэлементной классической ударной системы профессора В.Б. Соколинского оценивались параметры удара –

максимальной силы сопротивления породы  $N_m$ , глубины внедрения в породу  $\alpha_m$ , времени удара  $t_m$  и контактного напряжения  $\sigma_k$  при внедрении модельного инструмента и реальной конической пики гидромолота JCB HM380 (радиус цилиндрической части  $R_{\Pi} = 37,5$  мм,  $\beta = 30^\circ$ , энергия удара  $A_{0\Pi} = 981$  Дж) в гранит в зависимости от степени притупления инструмента  $k$  или пики  $k_{\Pi}$ . За величину  $k_{\Pi}$  принималось отношение радиуса притупления  $R_{\Pi\text{пл}}$  пики к  $R_{\Pi}$  для плоской площадки притупления или  $R_{\text{сф}}$  к  $R_{\Pi}$  – для полусферической. Считали, что исходная пика выпускается с плоской площадкой притупления радиусом  $R_{\Pi\text{п}0} = 10$  мм, принимающей по мере изнашивания вид полусферы радиусом  $R_{\text{сф}}$ , возрастающим от  $R_{\text{сф}0} = 13$  мм до  $R_{\text{сфк}} = 39$  мм.

Принятые допущения:

- в связи со сравнительно небольшой длиной пики и модельного инструментов влияние волновых процессов на параметры удара пренебрежимо мало. Как подтвердили результаты исследования, это условие:  $t_m \geq 3T$ , где  $t_m$  – продолжительность соударения,  $T$  – период собственных колебаний ударяющего тела – выполняется;

- зависимость силы сопротивления породы  $N$  от глубины внедрения  $\alpha_{\text{вн}}$  в нее модельного инструмента и пики состоит из трех силовых функций  $N_1, N_2, N_3$  вида  $N = g\alpha$  для плоской площадки притупления или  $N = g\alpha^{3/2}$  – для полусферической (рисунок 3); каждая из зависимостей характеризуется своей жесткостью  $g_1, g_2, g_3$ ;

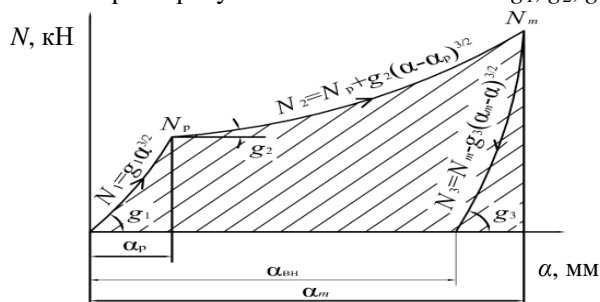


Рисунок 3 – Вид нагрузочной характеристики, принимаемой при расчетах параметров удара для полусферической площадки притупления модельного инструмента

- для откалывания каждого куска при разделке негабарита гидромолот наносит в выбранную точку его поверхности серию ударов ( $\sim 30$ ) с внедрением пики на значительную глубину  $\alpha_{\text{вн}}$ , при этом с каждым последующим ударом вследствие увеличения сил трения

величина  $\alpha_{вн}$  за удар уменьшается (рисунок 4).

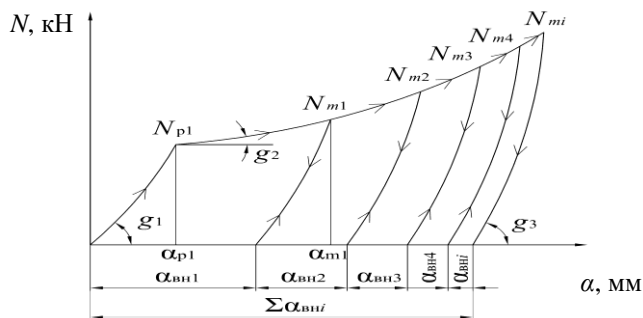


Рисунок 4 – Вид нагрузочной характеристики системы, принимаемой при расчетах параметров ударов в цикле для пика с полусферическим притуплением

Влияние изменения степени притупления  $k$ ,  $k_{п}$  на параметры удара учитывалось в выражении коэффициента жесткости породы  $g_1$ ,  $g_2$ .

В соответствии с результатами теоретических исследований оказалось, что по мере притупления инструмента и пика сила  $N_m$  монотонно возрастает, а глубина внедрения  $\alpha_{вн}$  и время удара  $t_m$  снижаются. При этом расчетные значения  $\alpha_{вн}$  модельного инструмента (кривая 2 рисунка 5) показывают удовлетворительную сходимость с экспериментально установленной глубиной лунок (точки на рисунке).

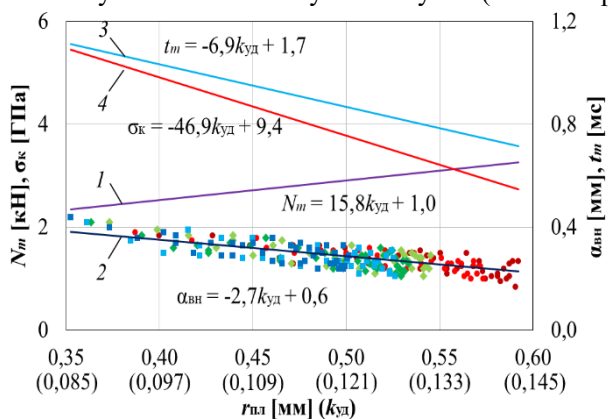


Рисунок 5 – Расчетные параметры удара  $N_m$  (1),  $\alpha_{вн}$  (2),  $t_m$  (3),  $\sigma_k$  (4) в зависимости от радиуса плоской площадки притупления (степени притупления) модельного инструмента в сопоставлении с экспериментально установленной глубиной полученных лунок

Контактное напряжение  $\sigma_k$  с увеличением степени притупления для плоской площадки контакта снижается, для полусферической – сохраняется на практически постоянном уровне. При этом его значение для пики ( $686 \text{ МПа} \pm 13 \%$ ) и модельного инструмента ( $780 \text{ МПа} \pm 15 \%$ ) близки, что подтверждает соблюдение критериев подобия процессов внедрения модельного инструмента и пики в породу.

Для проверки правомочности предложенной математической модели оценивалась глубина внедрения  $\Sigma\alpha_{\text{вн}i}$  пики в бетон ( $\sigma_{\text{сж}} \sim 50 \text{ МПа}$ ), которая сравнивалась со значением  $\Sigma\alpha_{\text{вн}i}$ , установленным при работе гидромолота JSB НМ380 при разделке бетонного фрагмента. После каждого удара фиксировалось перемещение метки на пике относительно неподвижных реперных точек на фрагменте, по которому устанавливалась величина внедрения  $\alpha_{\text{вн}i}$  за каждый удар и их цикл. Хорошая сходимость результатов расчета и эксперимента (рисунок 6) служила подтверждением предложенного математического описания процесса взаимодействия пики с породой.

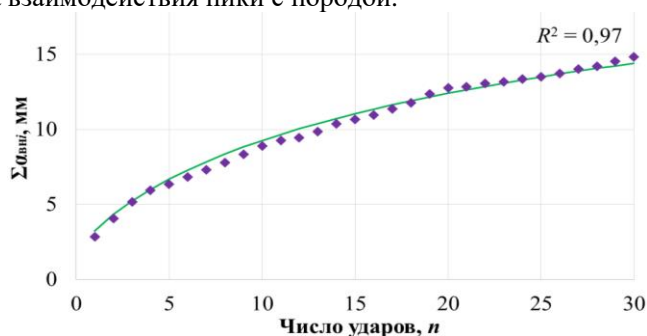


Рисунок 6 – Расчетная зависимость суммарной глубины внедрения пики в бетонный фрагмент от числа ударов в сопоставлении с результатами кинофотосъемки (♦)

В таблице 1 представлены оценочные значения контактного напряжения  $\sigma_k$ , соответствующие степеням притупления, при которых в экспериментах имеет место переход от стадии изнашивания  $I$  модельного инструмента к стадии  $II$  ( $\sigma_k^*$ ) и от стадии  $II$  к  $III$  ( $\sigma_k^{**}$ ). Там же приведены прочностные характеристики материала инструмента и его износостойкость  $I$  при ударе и при трении в статических условиях  $I_{\text{ст}}$ .

Отмечалось (таблица 1), что между значениями  $\sigma_k^*$  и  $\sigma_B$ , а также  $\sigma_k^{**}$  и  $\sigma_T$  инструмента наблюдается корреляция: критическое значение контактного напряжения  $\sigma_k^*$  в близкое количество раз (в 1,7 - 1,9) для

всех видов инструмента больше предела прочности  $\sigma_B$  их материала, величины  $\sigma_k^{**}$  и  $\sigma_T$  близки друг другу. Заключали, что установленные расчетно-экспериментальным путем значения  $\sigma_k^*$ ,  $\sigma_k^{**}$ , разграничивающие стадии изнашивания, представляют собой напряжения в контактном слое металла выше которых он в условиях удара способен разрушаться, т.е.  $\sigma_k^* = \sigma_{Bд}$ , или пластически деформироваться ( $\sigma_k^{**} = \sigma_{Тд}$ ), где  $\sigma_{Bд}$ ,  $\sigma_{Тд}$  – пределы прочности и текучести материала инструмента в динамических условиях нагружения.

Таблица 1 – Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по взаимодействию модельного инструмента с гранитом

Материал инструмента и вид ТО	$\sigma_k^*$ , МПа	$\sigma_k^{**}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$HV$	$I$ , мг <sup>-1</sup>	$I_{ст}$ , м/мг
Сталь 38ХМ	3651	1575	1933	1478	529	370	25,2
Сталь 38ХМ <sub>х</sub>	3776	1589	1953	1529	536	435	31,1
Сталь 38ХМ <sub>кр</sub>	-	-	-	-	539	486	33,9
Сталь У8А	4278	1860	2540	1943	707	526	31,8
Сталь У8А <sub>х</sub>	4446	1891	2577	1971	717	588	34,8
Сталь У8А <sub>кр</sub>	-	-	-	-	730	645	38,6
Сталь Х12МФ	4513	1892	2492	1905	694	741	57,1
Сталь Х12МФ <sub>х</sub>	4740	1964	2544	1946	708	1000	75,2
Сталь Х12МФ <sub>кр</sub>	-	-	-	-	750	1492	113,6

Примечание: обозначение стали без подстрочного индекса – типовая термическая обработка (ТТО) инструмента; с индексом “х” – обработка инструмента холодом; с индексом “кр” – криогенная обработка.

На стадии *I*, соответствующей начальной степени притупления *k* инструмента, на площадке контакта развиваются напряжения, превышающие предел прочности  $\sigma_{Bд}$  его материала, и металл площадки подвергается локальному разрушению (рисунок 7). Поскольку с увеличением степени притупления инструмента контактное напряжение  $\sigma_k$  убывает (кривая 4 рисунка 5), при снижении  $\sigma_k$  ниже  $\sigma_k^* = \sigma_{Bд}$ , возникающих при ударе напряжений оказывается достаточно только для пластической деформации металла, выражаемой в его перемещении с центральной на периферийную часть площадки притупления с частичным уносом (стадия *II*).

На стадии *III* при  $\sigma_k < \sigma_{Тд}$  металл площадки не подвергается пластической деформации и испещрен параллельными рисками – следами абразивного воздействия движущихся продуктов разрушения. Срезанием периферийной части площадки притупления этими

продуктами объясняется и изменение формы площадки на полусферическую, наблюдаемое на этой стадии взаимодействия. Поскольку с увеличением степени притупления инструмента контактное напряжение для полусферической площадки заметным образом не изменяется, убыль массы каждого инструмента за удар на стадии *III* изнашивания так же представляет собой постоянную величину.

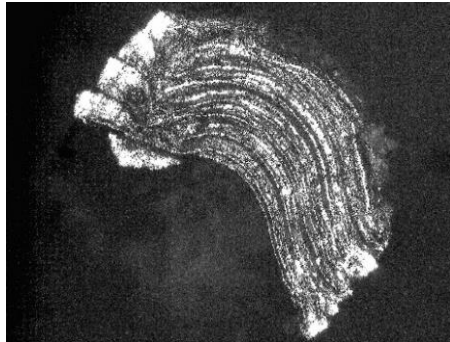


Рисунок 7 – Вид площадки контакта модельного инструмента со следами пластической деформации (в центре) и выкрашивания (на периферии) после 5-го удара (стадия *I* изнашивания)

Указанный вид площадки контакта, а также одинаковый порядок выстраивания инструмента по увеличению износостойкости в условиях трения  $I_{ст}$  и удара *I* (таблица 1) позволили заключить, что доминирующим фактором изнашивания инструмента при ударе на установившейся (*III*-ей) стадии процесса является микрорезание его площадки контакта твердыми частицами породы при продвижении инструмента через ее ядро разрушения.

Исходя из соблюдения условий подобия (1) считали, что процесс изнашивания пики гидромолота при ее многократном ударном взаимодействии с разрушаемым гранитным объектом также характеризуется существованием указанных трех стадий с присущими для каждой из них закономерностями. Таким образом, **первое положение** вынесенное на защиту **считается доказанным**.

**Четвертая** глава посвящена анализу влияния обработки холодом на ударно-абразивную износостойкость ударного инструмента и совершенствованию технологического процесса изготовления пик гидромолотов. Здесь же оценивается эффект от использования усовершенствованной технологии.

Из сопоставления данных таблицы 1 видно, что установленная

ударно-абразивная износостойкость  $I$  модельного инструмента не находится в прямой зависимости от его твердости. Так при близких значениях  $HV$  инструмента из сталей У8А и Х12МФ после криогенной обработки, второй в 2,3 раза превышает первый по износостойкости. Указанное расхождение объяснили результаты микроструктурных исследований инструмента, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Количество остаточного аустенита и мелкодисперсных твердых карбидов в инструменте в зависимости от вида его термической обработки

Марка стали инструмента	% остаточного аустенита			% карбидов		
	Типовая ТО	Обработка холодом	Криогенная обработка	Типовая ТО	Обработка холодом	Криогенная обработка
38ХМ	≤0,10	≤0,10	≤0,10	0,17	0,33 (+98,9 %)	0,58 (+243,2 %)
У8А	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 %)

Как следует из данных таблицы, выдержка инструмента из высокоуглеродистых сталей У8А (~0,8 %С) и Х12МФ (~1,5 %С) при отрицательных температурах приводит к существенному снижению содержания остаточного аустенита в их структуре, где он сохраняется после закалки в значительных количествах. Она же способствует увеличению содержания мелкодисперсных твердых включений, в виде карбидов легирующих элементов, в изнашиваемых слоях инструмента из легированных сталей 38ХМ, Х12МФ. Причем, чем ниже температура обработки холодом, тем выше ее эффективность.

Это позволило заключить, что износостойкость ударного инструмента из инструментальных сталей зависит не только от его твердости, но и от количества карбидов, присутствующих в поверхностных слоях инструмента, возрастая с их увеличением.

Для придания пике указанной структуры предлагается включить в процесс термической обработки пик гидромолотов операцию обработки холодом или криогенную обработку. В качестве реагентов холодильной установки для обработки холодом может быть использован твердый диоксид углерода с температурой сублимации 198 К, для криогенной обработки - жидкий азот с температурой кипения 77 К. Продолжительность и той и другой обработок - не менее 5 часов. Указанные операции проводятся непосредственно после закалки инструмента с 800 - 1000 °С в масле, после них осуществляется 3-х

часовая выдержка пик при температуре  $\sim 200$  °С (низкий отпуск).

При оценке влияния усовершенствованного технологического процесса термической обработки на наработку пики считали, что вследствие соблюдения условий подобия (1) и геометрических размеров острия пики и модельного инструмента, наработка пики  $N^*$ , как количество нанесенной ею ударов до момента полного изнашивания острия, может быть рассчитана по формуле (2)

$$N^* = I M_{\text{остр}}, \quad (2)$$

где  $I$ ,  $M_{\text{остр}}$  - ударно-абразивная износостойкость и масса острия модельного инструмента.

Результаты расчета  $N^*$  для всех видов анализируемой пики представлены на рисунке 8 и рисунке 9.

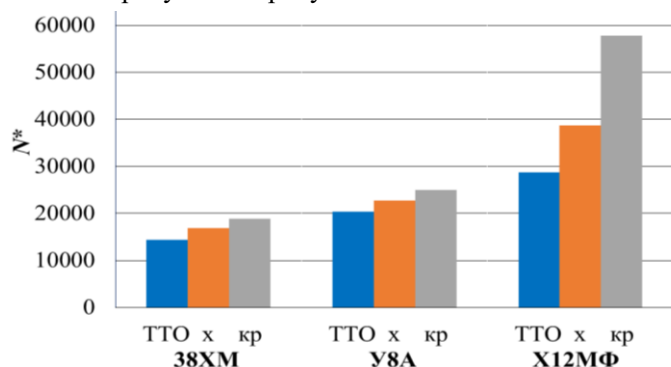


Рисунок 8 – Влияние обработки холодом (x) и криогенной обработки (кр) на наработку пики гидромолота JCB HM380 при разделке гранитного негабарита при изготовлении пики из различных инструментальных сталей

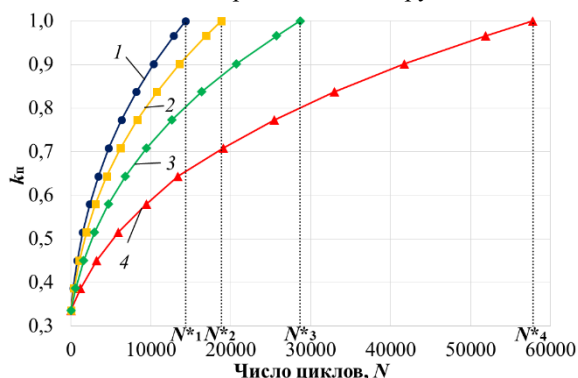


Рисунок 9 – Изменение степени притупления пики с числом циклов ударов для пики из стали 38XM (1), 38XM<sub>кр</sub> (2), X12MФ (3) и X12MФ<sub>кр</sub> (4)



Как следует из данных рисунка 8, обработка пики всех видов холодом, а также их криогенная обработка повышают наработку инструмента  $N^*$ : для штатной пики (из стали 38ХМ) на 17 и 31 %, для пики из стали Х12МФ на 35 и 101 %, соответственно.

Таким образом, изготовление пик по совершенствованной технологии обеспечит образование в поверхностном слое и теле пики мелкодисперсных твердых включений, что способствует повышению наработки инструмента до 31 % по сравнению со штатной пилой.

Для подтверждения энергетического подобия процессов разрушения породы в модельных экспериментах и натуральных условиях оценивалась энергоёмкость  $Q$  процесса разрушения гранита на лабораторной установке и при разделке негабарита пилой гидромолота.

Оценка  $Q$  производилась исходя (3) из работы удара гидромолота  $A_{0n}$ , числа серий ударов  $\Sigma N$ , которое необходимо нанести пилой с той или иной степенью притупления  $k_n$  для разделки негабарита (0,7x0,7x0,7 м), числа ударов в серии  $n$  и объема отколотого пилой куска  $V = 1/6 \sin\gamma \sin 2\gamma (\Sigma l_{tpi})^3 = 0,12 (\Sigma l_{tpi})^3$

$$Q = A_{0n} \Sigma N^* n / V, \quad (3)$$

где  $\Sigma l_{tpi} = \Sigma t_{tpi} v_{tp}$  – суммарное время распространения трещины за серию ударов, за которое принималось суммарное время удара  $\Sigma t_{mi}$ , убывающее с увеличением  $k_n$ ,  $v_{tp}$  – скорость распространения трещины разрушения по гранитному фрагменту, установленная в экспериментах по скалыванию модельным инструментом кусков от края гранитного фрагмента,  $\gamma$  – параметр места скола (рисунок 10).

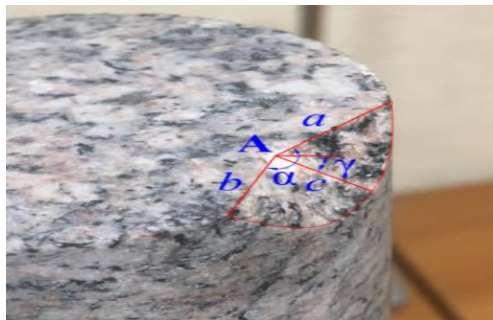


Рисунок 10 – Типичный вид места скола куска от гранитного фрагмента в модельных экспериментах

Было установлено (рисунок 11), что с увеличением  $k_n$  количество серий ударов, затрачиваемых на разрушение гранитного негабарита, как и энергоёмкость процесса разрушения, монотонно возрастают. Так,

если при работе пики в исходном состоянии ( $k_{п0} = 0,34$ ) величина  $\Sigma N$  составляет 54 цикла, а  $Q = 6,8$  МДж/м<sup>3</sup>, то в случае полного притупления ( $k_{пк} = 1$ ) уже 104 цикла и 13,2 МДж/м<sup>3</sup>, т.е. почти в 2 раз больше. При этом установленные значения энергоёмкости процесса разрушения гранита (6,8 - 13,2 МДж/м<sup>3</sup>) оказались близкими к величинам  $Q$  для этой породы, описанным в литературе (12,6 и 10,4 МДж/м<sup>3</sup>) и установленным при скалывании кусков модельным инструментом (13,9 МДж/м<sup>3</sup>), что подтверждает энергетическое подобие процессов разрушения гранита в модельных экспериментах и натуральных условиях.

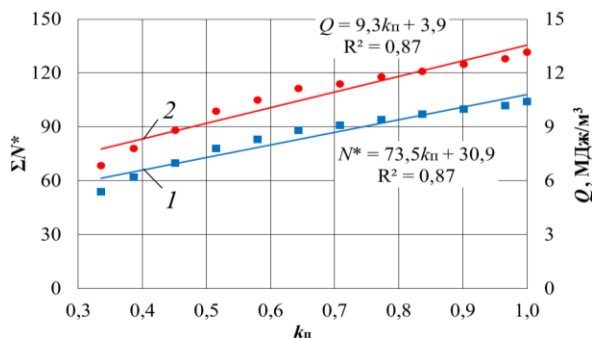


Рисунок 11 – Зависимость числа серий ударов, необходимых для разрушения гранитного негабарита пикой гидромолота JSB HM380 (1), и энергоёмкости процесса разрушения гранита (2) от степени притупления инструмента

Таким образом, второе положение вынесенное на защиту считается доказанным.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи совершенствования технологического процесса изготовления пик гидромолотов с целью повышения наработки инструмента, что имеет существенное значение для развития горной промышленности Социалистической Республики Вьетнам.

1. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований процесса разрушения горных пород ударным способом показали, что закономерности процесса изнашивания ударного инструмента и влияние степени притупления пики на интенсивность и энергоёмкость процесса разделки негабаритов

исследованы не достаточно полно и требуется проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

2. Разработана математическая модель ударного взаимодействия пики гидромолота с породой, учитывающая притупление инструмента в процессе эксплуатации.

3. При проведении лабораторных исследований на разработанном экспериментальном стенде в условиях, моделирующих процесс изнашивания пики гидромолота при взаимодействии с горной породой, установлено, что доминирующим фактором процесса изнашивания пики при ударном внедрении в гранит является микрорезание ее абразивными частицами, при этом ударно-абразивная износостойкость инструмента определяется наличием мелкодисперсных твердых включений в его поверхностном изнашиваемом слое и возрастает с увеличением их количества.

4. Установлено, что выдержка ударного инструмента из инструментальных сталей при отрицательных температурах приводит к существенному увеличению его износостойкости, что объясняется снижением содержания остаточного аустенита и увеличением содержания мелкодисперсных твердых включений в его структуре.

5. Разработаны рекомендации по совершенствованию технологического процесса изготовления пик гидромолотов внедрением в их термическую обработку операций обработки холодом или криогенной обработки, обеспечивающим образование в поверхностном слое и теле пики мелкодисперсных твердых включений, что способствует повышению наработки инструмента до 31 % по сравнению со штатной пикой, прошедшей штатную термическую обработку.

Дальнейшее развитие темы диссертационного исследования может быть связано с применением рабочего инструмента повышенной износостойкости для разрушения негабаритов горных пород на российских карьерах, а также внедрением методов обработки холодом в технологический процесс изготовления другого породоразрушающего инструмента, например, резцов проходческих комбайнов.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях из Перечня ВАК**

1. **Ле, Тхань Бинь** Обработка холодом, как способ повышения износостойкости материала бурового инструмента / Тхань Бинь Ле, В.И. Болобов, Г.А. Юсупов, М.П. Мосеев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 11. – С. 108-114.

2. Болобов, В.И. Закономерности разрушения горной породы единичным ударом / В.И. Болобов, А.П. Баталов, **Тхань Бинь Ле**, Г.А. Юсупов // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 6. – С. 43-48.

3. **Ле, Тхань Бинь** Влияние обработки холодом на механические свойства и износостойкость материалов пик гидромолотов / Тхань Бинь Ле, В.И. Болобов, Кхак Линь Нгуен // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 12 (специальный выпуск 25). – 12 с.

#### **Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования**

4. Bolobov, V.I. Influence of deep cryogenic treatment on structure and wear resistance of materials of hydraulic breaker chisels / V.I. Bolobov, **Thanh Binh Le** // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 327. – 2018. – 6 p.

#### **Публикации в других отечественных изданиях:**

5. **Ле, Тхань Бинь** Анализ влияния обработки холодом на механические свойства металлических / Тхань Бинь Ле // Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов III международной научно-практической конференции. Т. II. – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 2015. – С. 126-129.

6. **Ле, Тхань Бинь** Повышение износостойкости материала пик гидромолотов обработкой холодом / Тхань Бинь Ле, В.И. Болобов, Г.А. Юсупов, Динь Бао Чан // Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов IV международной научно-практической конференции. Т. II. – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 2016. – С. 164-168.

7. **Ле, Тхань Бинь** Обработка холодом, как способ повышения износостойкости пик гидромолотов / Тхань Бинь Ле, В.И. Болобов, Г.А. Юсупов // Проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования: труды III международной научно-практической конференции «Горная и нефтяная электромеханика». – г. Пермь. – 2016. – С. 86-91.

8. Болобов, В.И. Закономерности изнашивания ударника при единичных ударах по горной породе / В.И. Болобов, А.П. Баталов, **Тхань Бинь Ле** // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018: Труды межд. научн-практ. конф. – СПб: СПГУ. – 2018. – С. 92.

9. Болобов В.И. Влияние износостойкости материала рабочего инструмента на производительность гидромолота / В.И. Болобов, А.П. Баталов, **Тхань Бинь Ле** // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018 Труды межд. научн-практ. конф. – СПб: СПГУ. – 2018. – С. 117.