

На правах рукописи

МИШИН Илья Игоревич



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДРОБЯЩИХ ПЛИТ
ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ
ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПРИ ДРОБЛЕНИИ ГРАНИТА**

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:

Лагунова Юлия Андреевна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра горных машин и комплексов, профессор;

Казаков Сергей Владимирович

кандидат технических наук, научно-производственная корпорация «Механобр-техника» (акционерное общество), ведущий инженер-конструктор.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово

Защита диссертации состоится 24 декабря 2020 г. в 10:30 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу; 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время значительная часть затрат горно-обогатительных предприятий приходится на замену быстроизнашиваемых элементов дробильного оборудования: бил, молотков и т.п. Это касается и основных рабочих органов щековых дробилок – футеровок дробящих плит. Поперечный профиль их рабочих поверхностей, применяемых при дроблении твердых горных пород, представляет собой, как правило, выступы треугольной формы. В процессе дробления из-за их изнашивания, возрастает радиус и площадка притупления, что ведет к снижению удельной нагрузки на поверхность дробимого куска и, как следствие, к снижению эффективности работы дробилки. Критерием, определяющим предельное состояние плиты и требующим ее замены, является полный износ двух средних выступов в нижней части плиты. Как показывает практика эксплуатации дробилок типа СМД-118 на гранитных карьерах, срок службы их дробящих плит не превышает 600 часов работы. Затраты на замену дробящих плит составляют до 20 % эксплуатационных расходов предприятия. В этой связи повышение износостойкости дробящих плит дробилок при снижении энергозатрат на дробление является весьма актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования

В работах Д.М. Айбашева, А.И. Богацкого, Д.Н. Гаркунова, Н.С. Глуховченко, Б.В. Клушанцева, А.В. Конорева, Ю.А. Лагуновой, Л.Б. Левенсона, М. Линдквиста, П.П. Липова, П.Н. Львова, П.И. Парфенова, Н.С. Пенкина, Г.А. Сорокина, А.Ф. Таггарта, В.М. Ткачева, О.Н. Шагаровой, М. Эвертссона и др. установлены основные закономерности процесса абразивного изнашивания горно-обогатительного оборудования, разработаны способы повышения его износостойкости, рассмотрены различные варианты рифлений дробящих плит и их влияние на эксплуатационные характеристики дробилки. В то же время вопросы повышения износостойкости дробящих плит технологическими методами при их изготовлении рассмотрены недостаточно глубоко, не установлен оптимальный вид рифления, обеспечивающий высокую эффективность дробления крепких пород, что требует

проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Цель работы: выявление закономерностей формирования заданной формы рифлений дробящей плиты повышенной износостойкости для разработки научно-обоснованного технологического решения изготовления дробящих плит щековых дробилок с образованием на рабочей поверхности плиты зон повышенной твердости, что имеет существенное значение для развития горного машиностроения.

Идея работы: повышение износостойкости дробящих плит и снижение работы дробления достигается формированием упрочненных выступов особой конфигурации путем включения в технологический процесс изготовления плит операции высокотемпературного пластического деформирования.

Основные задачи исследования

1. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации.

2. Проведение лабораторных экспериментальных исследований по установлению зависимости усилия разрушения куска гранита от радиуса индентора с разработкой математической модели процесса дробления гранита в щековой дробилке СМД-118 для установления зависимости работы дробления от радиуса притупления выступов дробящей плиты.

3. Оценка влияния интенсивности пластической деформации дробящей плиты на ее износостойкость.

4. Разработка рекомендаций по совершенствованию технологического процесса изготовления дробящих плит дробилки СМД-118, отличающихся повышенной износостойкостью и особой конфигурацией рифления, с оценкой эффективности их использования.

Научная новизна работы

Установлено, что расположение выступов с зонами повышенной твердости на поверхности дробящей плиты в поперечном направлении и на расстоянии между выступами, уменьшающимся к низу камеры дробления, по мере уменьшения кусков дробимой породы, обеспечивает снижение затрат энергии на дробление в щековой дробилке и способствует повышению износостойкости дробящей плиты.

Аналитически-расчетным путем показано, что применение дробящих плит дробилки СМД-118 с особой конфигурацией рифления обеспечивает уменьшение работы дробления на 25 % относительно плит, принятых к эксплуатации.

Теоретическая и практическая значимость работы

Установлена линейная зависимость между работой $A_{др}$ дробления щековой дробилки с простым движением щеки за один цикл и степенью износа, характеризуемой относительным радиусом притупления $R_{отт}$, выступов дробящих плит с особой конфигурацией рифления, позволяющая проводить оценку состояния дробящих плит по изменению величин тока и напряжения, подводимых к двигателю дробилки, и прогнозировать рост потребляемой приводом дробилки мощности по мере изнашивания дробящих плит при эксплуатации.

Установлена линейная зависимость изменения износостойкости J_i дробящей плиты щековой дробилки от твердости HV_i поверхностного слоя ее выступов, позволяющая оценивать эффект от введения операции высокотемпературной обработки давлением в технологический процесс изготовления плиты на ее износостойкость и срок службы.

Предложено научно обоснованное изменение технологического процесса изготовления дробящей плиты дробилки СМД-118 с рифлением особой конфигурации горячей их деформацией, что обеспечивает повышение ее износостойкости и срока службы в 1,14 раза при дроблении гранитов.

Методология и методы исследований

Исследование процесса изнашивания дробящих плит щековой дробилки на основе комплексного метода, включающего теоретические исследования с использованием аналитического синтеза, метода математического анализа, метода конечных элементов, а также экспериментальные исследования, проведенные на стендах.

Соответствие паспорту специальности: работа соответствует п. 6 области исследования паспорта специальности 05.05.06 – Горные машины «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».

Положения, выносимые на защиту

1. Применение дробящих плит с предложенной конфигурацией рифления дробящей плиты обеспечивает снижение затрат энергии на дробление в щековой дробилке СМД-118 на 25 % по сравнению с дробилкой, оснащенной дробящими плитами стандартного поперечного профиля.

2. Включение операции высокотемпературной обработки давлением в технологический процесс изготовления дробящих плит дробилки СМД-118 с использованием заготовки, конфигурация которой установлена компьютерным моделированием, обуславливает формирование в поверхностном слое выступов зон повышенной твердости HV_i , что способствует возрастанию износостойкости плит J_i до 17 %.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечиваются корректностью постановки задач исследования, комплексным подходом к их решению с использованием современных методов и методик, анализом литературных данных и критическим сопоставлением установленных в работе закономерностей.

Основные положения в результате работы докладывались на: XXVII Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2015), г. Москва, Россия, 2-4 декабря 2015 г.; IV Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении», Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, 28 апреля 2016 г.; Международном семинаре-симпозиуме «Нанозифика и нано-материалы» (НИН-2016), Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, 16-17 ноября 2016 г.; Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018», Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, 12-13 апреля 2018 г.; Международном семинаре-симпозиуме «Нано-физика и нано-материалы» (НИН-2018), Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, 28-29 ноября 2018 г.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в постановке цели, формулировке задач и разработке методик исследования, проведении анализа основных теоретических представлений о процессе дробления горных пород, проектировании и изготовлении лабораторного стенда, проведении экспериментальных и теоретических исследований процесса изнашивания фрагментов дробящих плит, разработке рекомендаций по усовершенствованию технологического процесса изготовления дробящих плит с особой конфигурацией рифления и подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 1 статье - в издании, входящем в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получен патент на изобретение.

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений, изложена на 121 странице машинописного текста, содержит 52 рисунка, 11 таблиц, список литературы из 104 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность работы, цель и задачи исследования, основные защищаемые положения, а также научная и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе анализируются существующие исследования по теме диссертации с формулировкой основных задач исследования.

Отмечается, что большинство современных щековых дробилок комплектуются дробящими плитами, изготовленными из стали 110Г13Л, известной, как сталь Гадфильда, с треугольными и трапециевидальными рифлениями, расположенными в продольном направлении по ходу перемещения породы.

Вторая глава посвящена изучению влияния радиуса выступа дробящей плиты на потребляемую дробилкой мощность и работу дробления и разработке конструкции плиты дробилки СМД-118, обеспечивающей уменьшение работы на дробление кусков за счет рационального расположения выступов.

При разработке модифицированной конфигурации рифления плит исходили из того, что усилие, требуемое для разрушения куска породы раскалыванием при изгибе, меньше, чем в случае его раздавливания. Поэтому считали, что для обеспечения эффекта раскалывания кусков необходимо обеспечить контакт каждого куска с выступами щеки в трех точках, для чего рифление должно располагаться в поперечном направлении, а расстояние между выступами должно уменьшаться к низу камеры дробления по мере уменьшения кусков дробимой породы.

Представляя щековую дробилку СМД-118 с шириной приемного отверстия $B = 1500$ мм, шириной выходной щели $b = 155$ мм (средней для дробилки этого типа), высотой камеры дробления $H = 2700$ мм в виде схемы по В.А. Бауману (рисунок 1), считали, что в ней по высоте может одновременно находиться пять кусков радиусами $R_{к1} = 113$ мм, $R_{к2} = 164$ мм, $R_{к3} = 238$ мм, $R_{к4} = 345$ мм, $R_{к5} = 500$ мм (максимальная допустимая крупность породы для дробилки СМД-118). Подобную схему принято использовать при расчете потребляемой мощности.

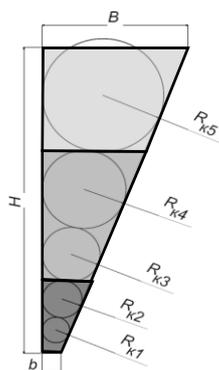


Рисунок 1 – Принятая схема раскалывания кусков в щековой дробилке

Поскольку поперечные выступы на дробящей плите затрудняют движение породы вниз, предлагается выступы подвижной плиты снабдить продольными впадинами, задачей которых является обеспечение вертикального движения кусков породы, разрушенных в результате воздействия поперечных выступов плит (рисунок 2).

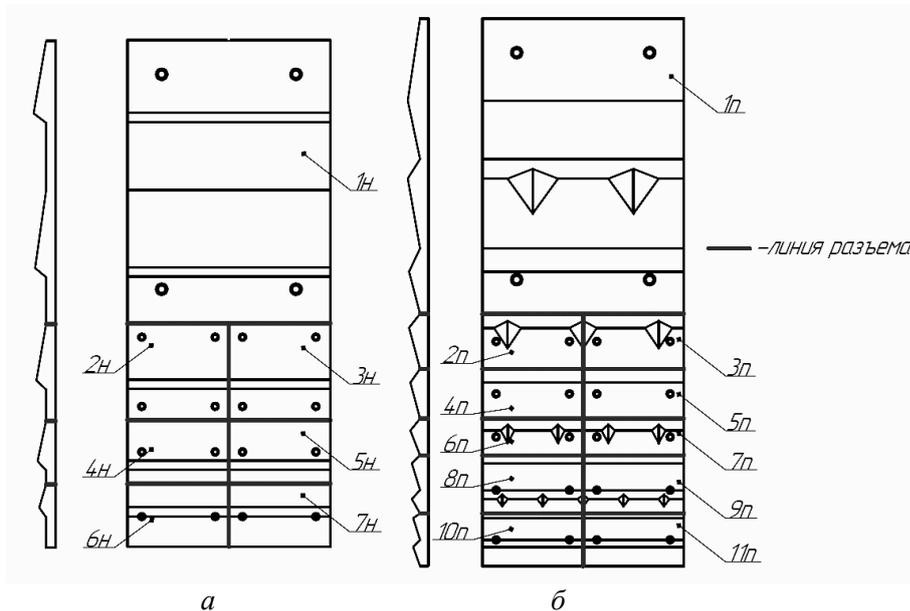


Рисунок 2 – Неподвижная (а) 7-ми секционная и подвижная (б) 11-ти секционная дробящие плиты с модифицированной конфигурацией рифления (1н-7н, 1п-11п - секции)

Работа дробления в дробилке с модифицированной конфигурацией рифления определялась через суммарное усилие, необходимое для одновременного дробления всех кусков породы, находящихся в рабочей камере, установленное экспериментально-расчетным путем.

Экспериментальные исследования проводились при воздействии на фрагмент (кern гранита Выборгского гранитного месторождения радиусом $R_{фр} = 28$ мм, длиной 55 мм, $\sigma_{сж} \sim 200$ МПа) усилия,

приложенного к 3-м образующим фрагмента, с использованием оснастки (рисунок 3), оснащенной инденторами 1 с различным радиусом R_u .

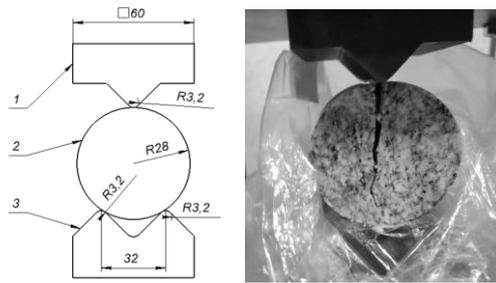


Рисунок 3 – Оснастка испытательной машины Zwick, разработанная для изучения влияния относительного радиуса выступа дробящей плиты на усилие и энергоёмкость процесса разрушения гранита: 1 - индентор, 2 - фрагмент породы, 3 - вставка

Для моделирования процесса раскалывания гранитных кусков различного радиуса R_x ($R_{к1} - R_{к5}$) выступами рифления дробилки постоянного радиуса R_e (принимался равным 20 мм) эксперименты проводились с использованием инденторов с радиусами $R_u = 3,2; 6; 8; 10; 12$ мм, что обеспечивало равенство относительных радиусов $R_{отн}$ выступов и индентора $R_{отн} = R_e / R_x = R_u / R_{фр}$. Для того чтобы обеспечить применимость получаемой зависимости к породам с другими прочностными характеристиками, вводился безразмерный параметр - относительное разрушающее напряжение $k_i = q / \sigma_p$, где q - разрушающее напряжение, определяемое как отношение экспериментально установленного усилия разрушения P фрагмента к площади вновь образованной поверхности S ($\sim 22 \text{ см}^2$), σ_p - предел прочности фрагментов на растяжение (для гранита $\sigma_p \sim 1/20 \sigma_{сж} \approx 10 \text{ МПа}$), экспериментально установленная зависимость которого от величины $R_{отн}$, представленная на рисунке 4, может описана выражением вида (1):

$$k_i = 1,6 \cdot R_{отн} + 1,6, \quad (1)$$

где k_i – относительное разрушающее напряжение; $R_{отн}$ – относительный радиус притупления.

При этом при переходе от $R_{отн} = 0,11$ ($R_u = 3,2$ мм) к $R_{отн} = 0,43$ ($R_u = 12$ мм) величина k_i возрастает на 40 %.

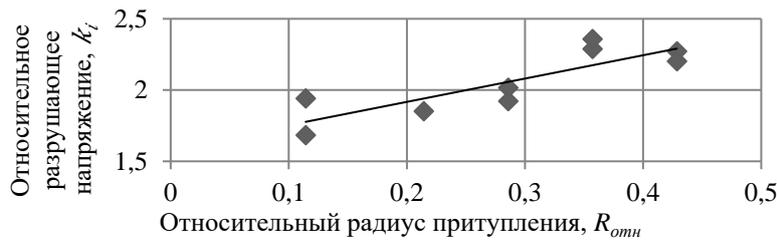


Рисунок 4 – Зависимость относительного разрушающего напряжения k_i фрагмента гранита от относительного радиуса $R_{отнi}$

Основываясь на гипотезе Риттингера о пропорциональности работы разрушения площади вновь образуемой поверхности, считалось, что каждому из кусков соответствует усилие разрушения (2):

$$P_i(R_{отнi}) = 2R_{ki}Lq_i(R_{отнi}) \quad (2)$$

где $q_i = \sigma_p k_i(R_{отнi})$ – разрушающее напряжение куска породы, L – длина камеры дробления (для дробилки СМД-118 $L=1,5$ м).

В предположении, что равнодействующая усилий дробления приложена к подвижной щеке в точке, соответствующей середине камеры дробления по высоте, суммарное усилие дробления определялось как $P(R_{отнi}) = \sum P_i(R_{отнi})$. Учитывая (1), потребляемая мощность по В.А. Олевскому представлялась в виде (3):

$$N = m \frac{f_0 s \beta \vartheta n}{\eta} \sum_{i=1}^5 2R_{ki} L_i \sigma_p \cdot (1,6 \cdot R_{отнi} + 1,6), \quad (3)$$

где m , f_0 , β , ϑ – коэффициенты, учитывающие: – отношение длины хода щеки в точке приложения равнодействующей усилий к ходу щеки внизу плиты ($m = 0,55$), – заполняемость дробилки ($f_0 = 0,25$), – отношение эффективного усилия дробилки к максимальному усилию ($\beta = 0,2$), – энергию, передаваемую маховиком в течение одного оборота ($\vartheta = 0,5$); n – частота вращения эксцентрикового вала; η – механический КПД ($\eta = 0,75$); s – ход щеки ($s = 0,04$ м).

Тогда работа дробления за один оборот может быть рассчитана по формуле (4)

$$A_{др} = m \frac{f_0 s \beta \vartheta}{\eta} \sum_{i=1}^5 2R_{ki} L_i \sigma_p \cdot (1,6 \cdot R_{отнi}(t) + 1,6), \quad (4)$$

учитывающей различие в усилиях раскалывания кусков породы по высоте камеры дробления.

Установленные (3), (4) значения мощности N , потребляемой дробилкой, и работы дробления кусков гранита $A_{др}$ для плит с предлагаемой конфигурацией рифления в сравнении со значениями N , $A_{др}$ для плит стандартной конфигурации, вычисленные по формулам различных авторов, представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Расчетные значения потребляемой мощности и работы дробления гранита в дробилке СМД-118 с плитами стандартной и модифицированной конфигурации рифления

| Вид конфигурации рифления дробящей плиты | Расчетные формулы | N , кВт | $A_{др}$ за оборот вала, кДж |
|--|--------------------|-----------|------------------------------|
| Стандартный | Олевского | 144,4 | 50,9 |
| | Левенсона | 158,2 | 55,8 |
| | Института Механобр | 165,2 | 58,3 |
| | Среднее значение | 155,9 | 55,0 |
| Модифицированный | (3), (4) | 116,5 | 41,2 |

Как видно из результатов сравнения, применение дробящих плит с предложенной конфигурацией рифления позволяет уменьшить на 25 % мощность, потребляемую дробилкой, и работу дробления.

Представлял интерес проанализировать, как изменяются значения N , $A_{др}$ дробилки по мере изнашивания ее выступов. Для этого устанавливалась зависимость радиуса выступов плиты от времени эксплуатации дробилки $R_{vi} = f(t)$. При этом, исходя из вида изношенных плит, предполагалось, что по относительной интенсивности изнашивания выступов j дробилку по высоте можно условно разделить на три зоны (рисунок 1): нижняя – зона интенсивного изнашивания, $j_1 = 1$; средняя – зона умеренного изнашивания, $j_2 = 0,5$; верхняя

– зона наименьшего изнашивания, $j_3 = 0,1$. Тогда, в соответствии с рисунком 1, радиусы выступов $R_{B1...5}$ равны (5), (6), (7):

$$R_{B1..2} = f(t) = R_{B0} + j_1(R_{B1..2max} - R_{B0})\frac{t}{T}, \quad (5)$$

$$R_{B3..4} = f(t) = R_{B0} + j_2(R_{B3..4max} - R_{B0})\frac{t}{T}, \quad (6)$$

$$R_{B5} = f(t) = R_{B0} + j_3(R_{B5max} - R_{B0})\frac{t}{T}, \quad (7)$$

где R_{B0} – исходный радиус выступов плиты, мм; R_{Bmax} – радиус полностью изношенного выступа, мм; t – время работы дробилки, ч; T – расчетный срок службы плиты по ОСТ 22-1679-87 (559 часов).

Тогда, выражения (3), (4) приобретают вид (8), (9):

$$N(t) = m \frac{f_0 s \beta \vartheta n}{\eta} \sum_{i=1}^5 2R_{ki} L_i \sigma_p \cdot (1,6 \cdot R_{отнi}(t) + 1,6) \quad (8)$$

$$A_{др}(t) = m \frac{f_0 s \beta \vartheta}{\eta} \sum_{i=1}^5 2R_{ki} L_i \sigma_p \cdot (1,6 \cdot R_{отнi}(t) + 1,6) \quad (9)$$

После подстановки значений параметров дробилки СМД-118 в (8), (9) были получены зависимости, представленные на рисунке 5.

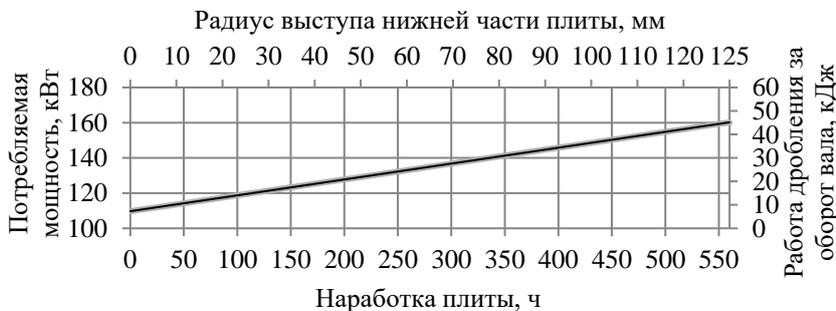


Рисунок 5 – Изменение мощности, потребляемой дробилкой СМД-118, и работы дробления за оборот вала по мере эксплуатации плит из-за изнашивания их выступов

Как видно из графика, по мере изнашивания выступов на дробящих плитах потребляемая мощность и работа дробления

возрастают, превышая исходные значения этих параметров к моменту расчетного срока службы плиты на 31 %.

Кроме прогнозирования изменения мощности и работы дробления в ходе эксплуатации дробилки, выведенные зависимости (8), (9) позволяют решать и обратную задачу - оценивать степень износа дробящих плит по энергетической характеристике электропривода дробилки.

Таким образом, **первое положение**, вынесенное на защиту, **считается доказанным**.

Третья глава посвящена изучению влияния высокотемпературной обработки давлением на износостойкость дробящих плит щековых дробилок.

Испытания проводились на установке (рисунок 6) при скорости вращения шпинделя 4 станка $11,4 \text{ с}^{-1}$. Образцы 2 цилиндрической формы ($D = 8 \text{ мм}$) вырезались из фрагментов литых дробящих плит из стали Гадфильда. Другую часть образцов того же диаметра отковывали при температуре $950 - 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ из прутков диаметром 12 и 14 мм, вырезанных из тех же фрагментов. Для оценки интенсивности пластической деформации ε , получаемой кованными образцами при высокотемпературной обработке давлением (ВОД), процесс их изготовления моделировался в программе *Deform-3d*: для образца, откованного с диаметра 12 мм, средняя по сечению образца величина ε оказалась равной 1,14, с диаметра 14 мм – 1,60. С использованием универсального твердомера *Zwick* замерялась твердость торцевой поверхности образцов. В качестве абразивной среды 1 использовались керны гранита Выборгского гранитного массива.

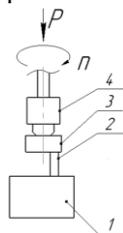
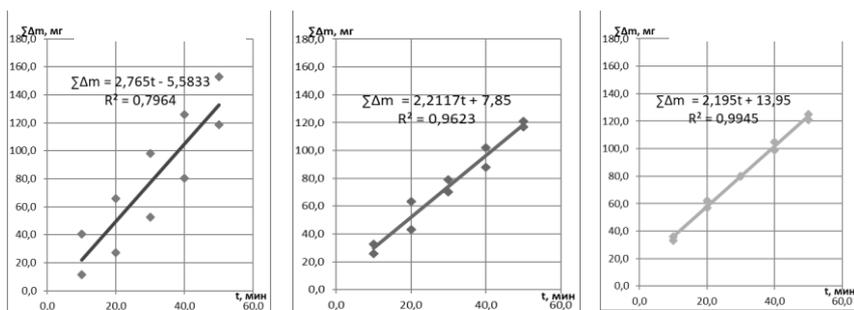


Рисунок 6 – Схема установки для испытания образцов на абразивное изнашивание: 1 – абразивный материал; 2 – испытуемый образец; 3 – держатель; 4 – шпиндель вертикально-сверлильного станка

При постоянной статической нагрузке торцевую поверхность образцов 2 изнашивали в течение 50 мин с замером потери массы Δm через каждые 10 мин.

Оказалось, что все экспериментальные точки полученных зависимостей $\sum \Delta m = f(t)$ удовлетворительно экстраполируются прямыми линиями (рисунок 7), тангенсы угла наклона которых принимались за скорости абразивного изнашивания образцов V_i , а обратные им величины – за абразивные износостойкости J_i . С повышением интенсивности пластической деформации образцов возрастает их твердость



a

б

в

Рисунок 7 – Зависимость суммарной потери массы образцов от продолжительности изнашивания по граниту: *a* – исходные литые образцы ($J_0 = 0,36$ мин/мг), *б* – образцы с $\varepsilon = 1,14$ ($J_1 = 0,45$ мин/мг), *в* – образцы с $\varepsilon = 1,60$ ($J_2 = 0,46$ мин/мг)

Как видно из полученных данных (рисунок 7), применение способа ВОД существенно (до 25 %) повышает абразивную износостойкость фрагментов дробящих плит, которая возрастает с повышением интенсивности пластической деформации металла в соответствии с зависимостью (10).

$$J_i = J_0 + U_1 \varepsilon_i \quad (10)$$

где $U_1 = 0,07$ мин/мг. При этом оказалось, что указанное повышение износостойкости образцов коррелирует (11) и с возрастанием их твердости

$$J_i = J_0 + U_2 \Delta HV_i, \quad (11)$$

при $U_2 = 7 \cdot 10^{-5}$ (мин/мг)/МПа, величина которой, соответственно, связана со значением ε зависимостью (12)

$$HV_i = HV_0 + U_3 \varepsilon_i, \quad (12)$$

где $HV_0 = 1840$ МПа – твердость исходного литого фрагмента; $U_3 = 909,1$ МПа.

Через закон Арчарда с использованием (10), (11), (12) доказывалось, что для отношения износостойкости дробящей плиты J'_i , полученной методом ВОД, к износостойкости литой плиты J'_0 справедливо выражение (13)

$$\frac{J'_i}{J'_0} = \frac{J_0 + U_1 \varepsilon_i}{J_0} = \frac{J_0 + U_2 \Delta HV_i}{J_0}. \quad (13)$$

Четвертая глава посвящена предлагаемому усовершенствованию технологического процесса изготовления дробящих плит дробилки СМД-118.

Снижение интенсивности изнашивания выступов плит предлагается достигать формированием в их поверхностном слое зон повышенной твердости, что осуществляется при изготовлении плит методом высокотемпературной обработки давлением (штамповкой). Для снижения требуемых высоких усилий при штамповке предлагается конструкция плиты (рисунок 2), отличающаяся, кроме модифицированного вида рифления, тем, что состоит из ряда сегментов. Преимуществом такой составной конструкции является возможность замены в процессе эксплуатации только наиболее изношенных ее частей, что сокращает затраты на приобретение плит.

Получение указанных зон достигается использованием заготовок специально рассчитанной конфигурации, при которой течение металла при штамповке происходит по траектории, обеспечивающей получение металлом выступов повышенной интенсивности пластической деформации ε и, в соответствии с зависимостями (10), (11), (12), твердости и износостойкости. Необходимая конфигурация заготовок (рисунок 8) устанавливалась по результатам компьютерного моделирования в программе *Deform-3d* процесса течения металла в штампе.

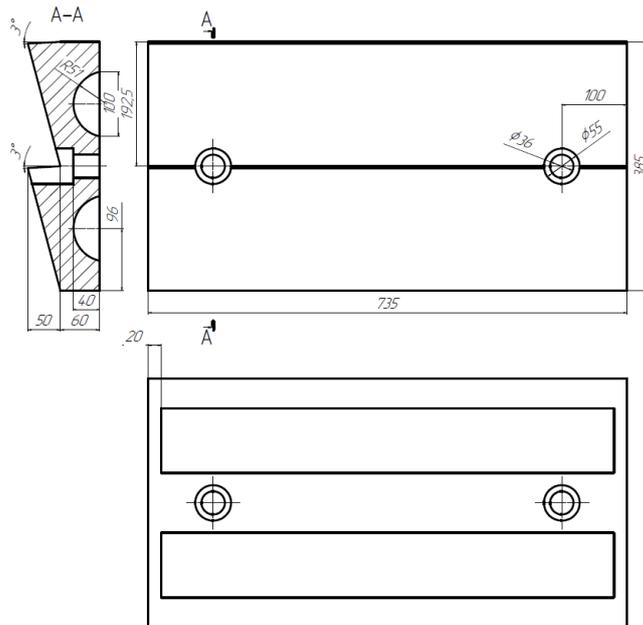


Рисунок 8 – Заготовка для штамповки сегмента нижней части подвижной дробящей плиты с модифицированной конфигурацией рифления

Результаты моделирования распределения ε в сегменте при использовании заготовки установленной конфигурации иллюстрирует рисунок 9.

Как показывают расчеты, такое распределение ε должно обеспечить повышение твердости и, как следствие, износостойкости фрагмента, полученного с применением ВОД, на 17 % по сравнению с литой плитой, а также увеличение его ресурса до 636 часов, что на 14 % превышает срок службы литой плиты.

Таким образом, второе положение, вынесенное на защиту, **считается доказанным.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи совершенствования конструкции дробящей плиты щековой дробилки и технологического процесса ее изготовления с целью снижения мощности, потребляемой дробилкой при разрушении гранита, и повышения срока службы плиты, что имеет существенное значение для развития горно-обогатительной промышленности.

1. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов разрушения кусков породы в щековой дробилке и изнашивания ее быстроизнашиваемых элементов показали, что вопросы повышения износостойкости дробящих плит технологическими методами при их изготовлении рассмотрены недостаточно глубоко, не установлен оптимальный вид рифления, обеспечивающий высокую эффективность дробления крепких пород, что требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

2. При проведении лабораторных исследований на разработанном экспериментальном стенде в условиях, моделирующих процесс разрушения породы в щековой дробилке, установлена зависимость усилия разрушения куска гранита от относительного радиуса выступа дробящей плиты, что, с использованием разработанной математической модели процесса дробления гранита в щековой дробилке СМД-118, позволило показать, что применение дробящих плит с предложенной модифицированной конфигурацией рифления позволяет уменьшить на 25 % мощность, потребляемую дробилкой, и работу дробления.

3. Установлено, что износостойкость дробящих плит, изготовленных способом высокотемпературной обработки давлением, до 17 % выше, чем полученных литьем и возрастает по мере повышения интенсивности пластической деформации их выступов.

4. Разработаны рекомендации по совершенствованию технологического процесса изготовления дробящих плит щековых дробилок, отличающихся повышенной износостойкостью, обеспечивающей им ресурс, на 14 % превышающий срок службы литой плиты.

Дальнейшее развитие темы диссертационного исследования может быть связано с внедрением метода высокотемпературной обработки давлением в производство другого породоразрушающего инструмента, например, резцов проходческих комбайнов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, из перечня ВАК:

1. Болобов, В.И. О влиянии режимов термомеханической обработки на износостойкость материалов быстроизнашиваемых элементов горно-обогатительного оборудования [Текст] / В.И. Болобов, **И.И. Мишин**, В.С. Бочков, А.А. Неструев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 1. – С. 52–59.

2. Болобов, В.И. Повышение износостойкости материалов быстроизнашиваемых элементов горно-обогатительного оборудования методом высокотемпературной термомеханической обработки [Текст] / В.И. Болобов, **И.И. Мишин**, В.С. Бочков, С.А. Чупин // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 3. – С. 20–23.

3. Болобов, В.И. Увеличение срока службы породоразрушающих резцов путем повышения износостойкости их державок термомеханической обработкой [Текст] / В.И. Болобов, С.А. Чупин, В.С. Бочков, **И.И. Мишин** // Горный журнал. – 2019. – № 5. С. 67–71. (Scopus)

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. **Mishin, I.** Effect of thermomechanical treatment on wear resistance of Hadfield's steel [Текст] / I. Mishin, V. Bolobov, T. Titova, D. Ratushev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Volume 194. – 042015.

Публикации в прочих изданиях:

5. **Мишин, И.И.** Оценка влияния упрочняющей обработки на износостойкость быстроизнашиваемых деталей горного оборудования [Текст] / И.И. Мишин, В.С. Бочков, Е.В. Ишуткин, А.Н. Карпишин // XXVII Международная инновационно-ориентированная

конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2015): материалы конференции. Москва. – 2015. – С. 38.

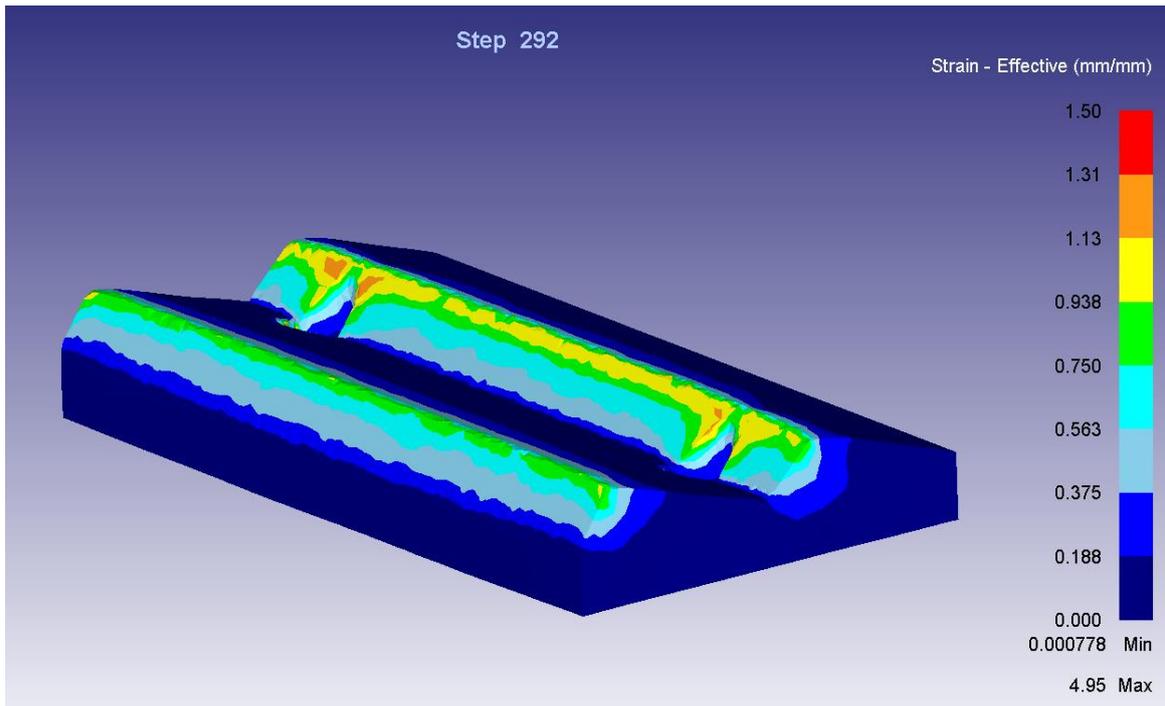
6. Болобов, В.И. Влияние термомеханической обработки на износостойкость материалов футеровок горно-обогатительного оборудования [Текст] / В.И. Болобов, **И.И. Мишин**, В.С. Бочков, А.Д. Лялин // Инновации на транспорте и в машиностроении: Труды IV международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург. – 2016. – С. 169.

7. Болобов, В.И. Влияние размеров зерна в структуре материалов быстроизнашиваемых элементов горного оборудования на их износостойкость [Текст] / В.И. Болобов, **И.И. Мишин**, С.А. Чупин, К.В. Карпов // Нанозифика и Наноматериалы: сб. тр., посвященный 15-летию работы Международн. симпозиума 28-29 ноября 2018 г. Санкт-Петербург. – 2018. – С. 33-36.

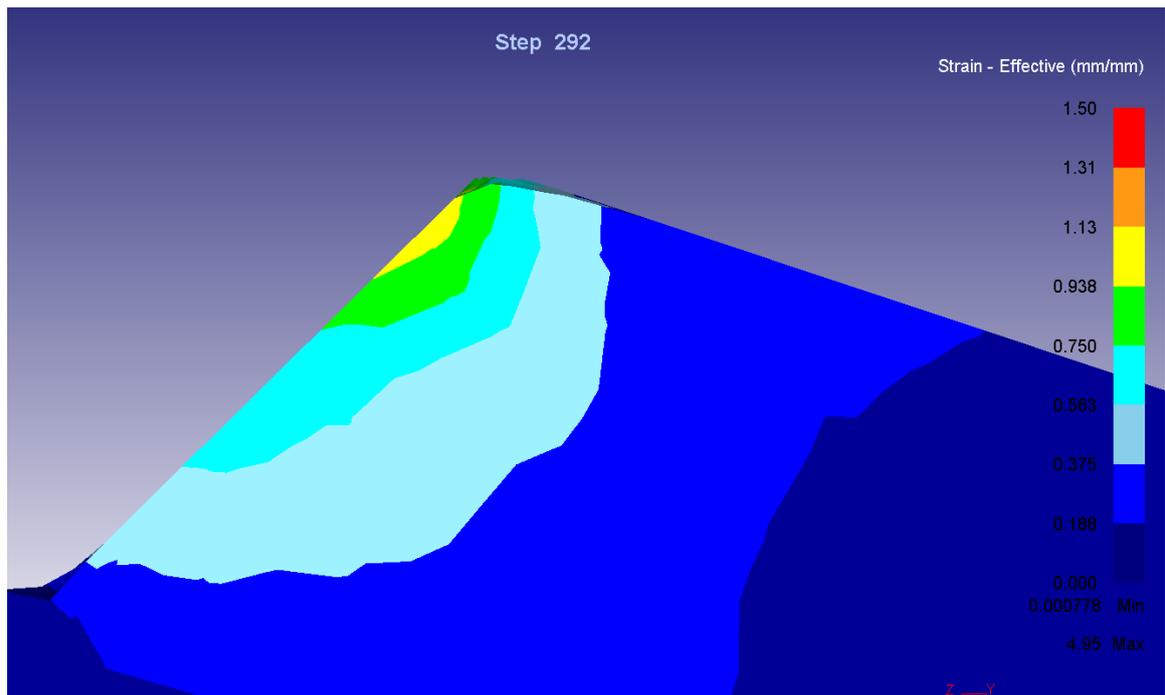
8. **Мишин, И.И.** Определение зависимости потребной мощности щековой дробилки от степени износа дробящих плит [Текст] / Мишин И.И., Болобов В.И. // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. Санкт-Петербург. – 2019 – № 3. – С. 18–25.

Патенты:

9. Патент № 2626481 Российская Федерация, МПК E21C 35/183 (2006.01). Способ изготовления износостойких поворотных резцов: № 2016115253 : заявлено 19.04.2016 : опубликовано 28.07.2017 / Болобов В.И., Бочков В.С., **Мишин И.И.**, Чупин С.А.; заявитель ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.



a



б

Рисунок 9 – Распределение интенсивности пластической деформации ϵ по поверхности (*a*) и сечению (*б*) выступа сегмента плиты