

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
Болобов Виктор Иванович

Санкт-Петербург - 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1 Аналитический обзор.....	9
1.1 Анализ способов дробления горных пород.....	9
1.2 Конструкция щековой дробилки	12
1.3 Условия эксплуатации щековых дробилок	16
1.4 Дробящие плиты щековых дробилок и технология их изготовления	19
1.5 Условия эксплуатации и причины отказа дробящих плит	26
1.6 Способы повышения механических характеристик деталей горных машин	28
1.7 Влияние высокотемпературной обработки давлением на механические свойства и износостойкость материала плит	30
1.8 Выводы по Главе 1	32
Глава 2 Анализ влияния радиуса выступа дробящей плиты на потребляемую дробилкой мощность. Разработка конструкции плиты дробилки СМД-118, обеспечивающей уменьшение работы на дробление	33
2.1 Особенности конструкции и эксплуатации щековой дробилки СМД-118	33
2.2 Существующие методы определения мощности, потребляемой дробилкой	42
2.3 Разработка математической модели дробления породы в дробилке СМД-118, учитывающей износ выступов плит в процессе эксплуатации.....	48
2.4 Разработка модифицированной конфигурации рифления дробящей плиты дробилки СМД-118	51
2.5 Анализ существующих методов испытаний пород на прочность	53
2.6 Методика испытания образцов породы для определения зависимости разрушающего усилия от радиуса притупления выступа плит	59
2.7 Определение потребляемой дробилкой СМД-118 мощности при дроблении гранита	63
2.8 Выводы по Главе 2.....	68

Глава 3 Исследование влияния высокотемпературной обработки давлением на износостойкость дробящих плит при видах изнашивания, имеющих место при дроблении гранита в щековой дробилке СМД-118	70
3.1 Разработка методики испытаний по исследованию влияния высокотемпературной обработки давлением на износостойкость фрагментов дробящих плит в условиях абразивного изнашивания	71
3.2 Результаты сравнительных испытаний образцов	78
3.3 Оценка интенсивности деформации образцов, прошедших ВОД, с помощью компьютерного моделирования	79
3.4 Определение скорости изнашивания футеровки при дроблении гранита дробилкой СМД-118	86
3.5 Выводы по Главе 3	88
Глава 4 Совершенствование технологического процесса изготовления дробящих плит щековой дробилки СМД-118 для повышения их износостойкости при дроблении гранита	89
4.1 Установление рациональной геометрии поковки для изготовления футеровки дробящей плиты штамповкой	89
4.2 Усовершенствованный технологический процесс изготовления дробящих плит щековой дробилки СМД-118	96
4.3 Выводы по Главе 4	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	101
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	103
Список литературы	107
Приложение А Патент на изобретение.	119
Приложение Б Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс	120

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительная часть затрат горно-обогатительных предприятий приходится на замену быстроизнашиваемых элементов горно-обогатительного оборудования – футеровок, молотков, бил и др. Дробящие плиты, как основные рабочие органы щековой дробилки, подвергаются интенсивному абразивному истиранию в ходе работы. Основная причина отказов дробящих плит – полное истирание ее выступов. После этого плиты, как правило, заменяют или, в редких случаях, реставрируют, наплавляя выступы порошковой проволокой марки ПП-Г13Н4-О. Такая практика носит ограниченный характер, т.к. требует высокой квалификации сварщика, а геометрия выступов и качество наплавки зачастую не соответствуют нормам.

Замена дробящих плит, в следствие их изнашивания, представляет собой дорогостоящий и трудоёмкий процесс [77]. Поэтому разработка мероприятий по увеличению срока службы дробящих плит дробилок является важной научной и практической задачей.

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, а также 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 простым движением щеки с образованием на рабочей поверхности плиты зон повышенной твердости, что имеет существенное значение для развития горного машиностроения.

Идея исследования

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.

Задачи исследования:

- Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации.
- 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 с простым движением щеки для установления зависимости работы дробления от радиуса притупления выступов дробящей плиты.
- Оценка влияния интенсивности пластической деформации дробящей плиты на ее износостойкость.
- Разработка рекомендаций по совершенствованию технологического процесса изготовления дробящих плит дробилки СМД-118, отличающихся повышенной износостойкостью и особой конфигурацией рифления, с оценкой эффективности их использования.

Методы и методология исследований

В работе использован комплексный подход, включающий анализ и моделирование процесса дробления в щековой дробилке и экспериментальные исследования, проведенные на разработанном стенде.

Научная новизна диссертационной 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 с простым движением щеки 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.

Защищаемые положения

1. Применение дробящих плит с предложенной конфигурацией рифления дробящей плиты обеспечивает снижение затрат энергии на дробление в щековой дробилке СМД-118 с простым движением щеки 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 %.

Теоретическая и практическая значимость работы

- Установлена линейная зависимость между работой $A_{др}$ дробления щековой дробилкой с простым движением щеки за один цикл и степенью износа, характеризуемой относительным радиусом притупления $R_{отн}$, выступов дробящих плит с особой конфигурацией рифления, дающая возможность 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 HVi 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 её деформацией, что обеспечивает повышение ее износостойкости и срока службы плиты в 1,14 раза при дроблении гранита.

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.

Апробация работы

Основные положения в результате работы докладывались на:

- XXVII Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2015), г. Москва, Россия, 2015 г.;

- IV Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении», Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, 2016 г.;

- Международном семинаре-симпозиуме «Нанозифика и наноматериалы» (НиН-2016), Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, 2016 г.;

- Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018», Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, 2018 г.;

- Международном семинаре-симпозиуме «Нанозифика и нано-материалы» (НиН-2018), Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, 2018 г.

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 1 патент.

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.

Структура и объем работы

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

Глава 1 Аналитический обзор

1.1 Анализ способов дробления горных пород

Дробление - процесс уменьшения размеров кусков горных пород путем их разрушения воздействием внешних сил, преодолевающих внутренние силы сцепления, связывающие между собой частицы твердого вещества [3].

Операция дробления используется для разрушения пород до необходимой крупности или гранулометрического состава. Разрушение характеризуется появлением и ростом трещин и пор. Процесс зарождается в ослабленных зонах, которые имеют трещиноватости или другие структурные дефекты. Разрушение происходит при превышении предела прочности нормальных и касательных напряжений, появляющихся в кусках породы при их деформациях: сжатии, растяжении, изгибе или сдвиге.

Одним из важных параметров, характеризующих процесс дробления, является степень дробления, которая представляет из себя отношение размеров кусков исходного материала перед дроблением к размеру кусков продукта. Описать степень дробления можно выражением (1.1):

$$i = D/d, \quad (1.1)$$

где i – степень дробления, D – диаметр кусков породы, поступающих в дробилку, d – диаметр кусков породы на выходе из дробилки.

В условиях работы горно-обогатительных фабрик невозможно в рамках одной операции дробления получить необходимую крупность продукта из исходной горной породы, в связи с чем этот процесс делится на несколько стадий, показанных в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Стадии дробления [3]

Стадия дробления	Крупность, мм		Степень дробления
	исходная	продукта	
Крупное	1200-500	350-100	3-5
Среднее	350-100	100-40	3-8
Мелкое	100-40	40-10	3-8

Существует несколько различных способов разрушения породы, в зависимости от способа приложения разрушающих усилий. Они показаны на рисунке 1.1 [3].

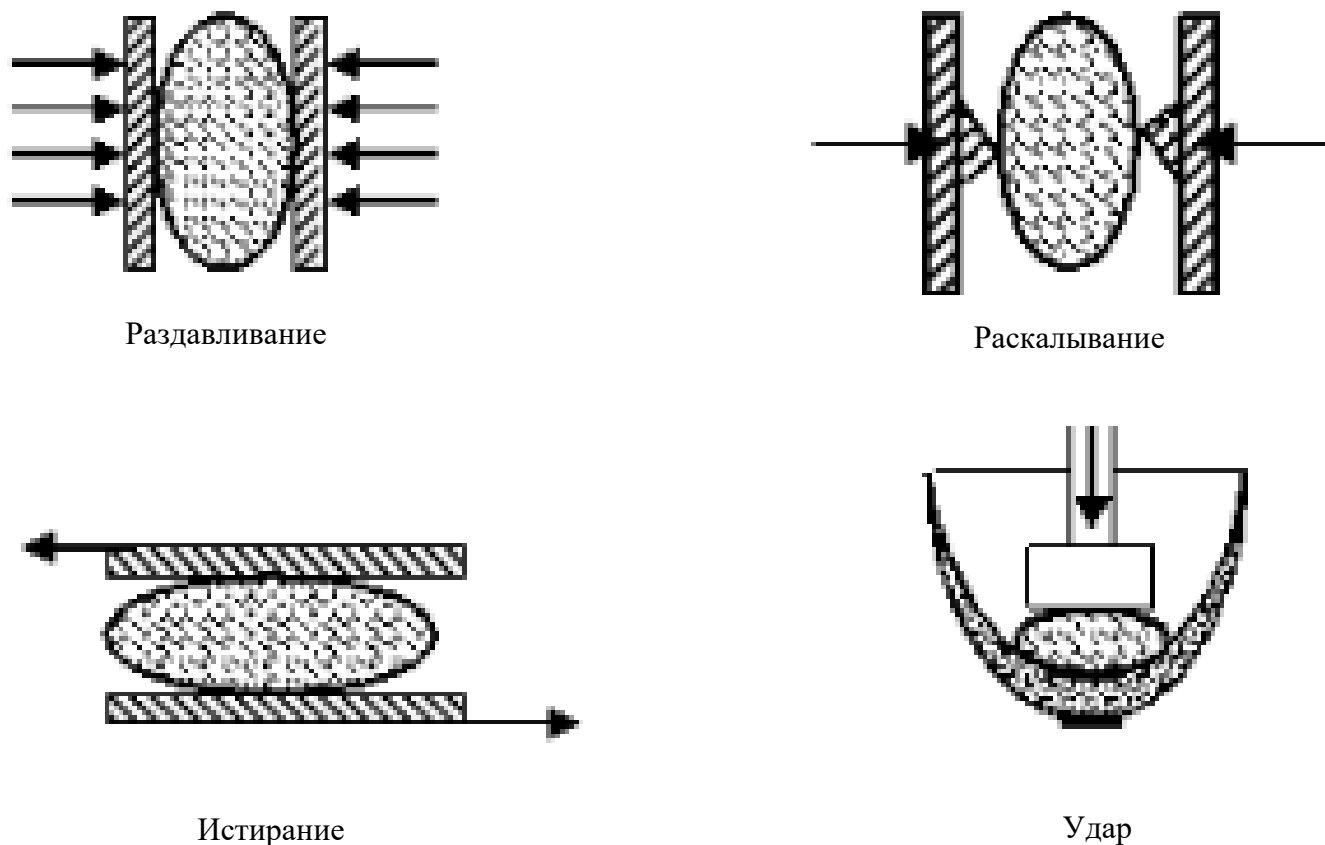


Рисунок 1.1 – Способы дробления

Необходимые нагрузки для разрушения горной породы развиваются в дробилках, которые конструктивно осуществляют определенный способ дробления. В производственных условиях, из-за случайного размещения кусков породы в камере дробления обычно реализуются сразу несколько различных способов дробления, но всегда преимущественно осуществляется тот способ, для которого и была сконструирована дробилка.

Выбор способа дробления зависит от физико-механических параметров дробимой горной породы и размеров ее кусков. Устойчивость горных пород к разрушению зависит от их прочности, наличия трещиноватости и способа приложения разрушающих нагрузок. Наличие трещин увеличивает склонность

кусков породы к разрушению. Наилучшим образом горные породы устойчивы к раздавливанию, меньше - изгибу и хуже всего они противостоят растяжению.

Дробление прочных и хрупких горных пород наиболее целесообразно осуществлять чистым раздавливанием, а твердых и вязких – раздавливанием при наличии истирания. Крупное дробление мягких и хрупких пород предпочтительно производить раскалыванием, а среднее и мелкое – ударом [3].

Дробление, как правило, проводится при отсутствии влаги. Мокрое дробление используют только в тех случаях, когда дробимая порода включает глину, которую необходимо вымывать по мере дробления. Промывочная вода подается непосредственно в рабочее пространство дробилок. В некоторых случаях вода поступает в небольшом количестве из брызгал в завалочную воронку дробилки крупного дробления для увлажнения дробимой горной породы и снижения образования пыли.

Дробилки, используемые на горно-обогатительных предприятиях, по конструкции делятся на четыре основных класса: дробилки щековые, конусные, валковые, ударные (молотковые, роторные) (рисунок 1.2).

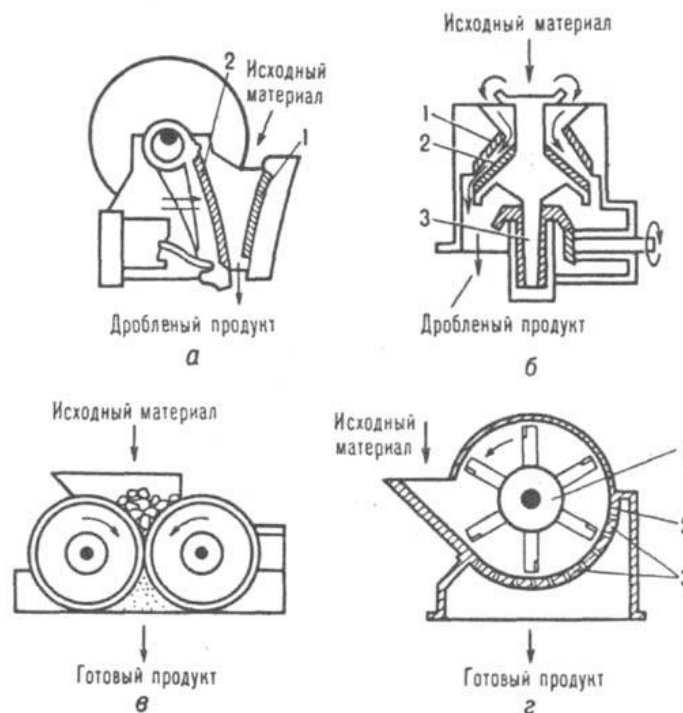


Рисунок 1.2 – Основные типы дробилок: *а* - щековая (1, 2 – соотв. неподвижная и подвижная щеки); *б* – конусная (1, 2 – соотв. неподвижный и качающийся конусы, 3 – вал); *в* – валковая; *г* – роторная (1 – ротор с молотками либо билами, 2 – статор, 3 – колосники)

В настоящее время для крупного дробления используют щековые дробилки ЩДП и ЩДС, и конусные КРД и ККД [50], для среднего применяют конусные дробилки типа КСД, а для мелкого - КИД и КМД. Роторные, молотковые, а также валковые дробилки используют, как правило, для дробления каменного угля, марганцевых руд, бокситов, известняков и т.п. [28, 62].

1.2 Конструкция щековой дробилки

Широкое применение в горнорудной промышленности получили щековые дробилки с шарнирно-рычажным механизмом, который передает движение от эксцентрикового вала к подвижной щеке. Такое оборудование обычно используется для измельчения пород на фракции крупной и средней величины. Его принцип действия заключается в том, что измельчаемый материал подвергается воздействию двух щек – неподвижной и подвижной (качающейся).

Подача материала предусмотрена в верхней части установки, откуда он направляется непосредственно в камеру дробления. После измельчения, руда выгружается в нижней части дробилки в момент отклонения подвижной щеки. Величина фракций дробимого материала зависит от зазора между подвижной и неподвижной щеками. Этот показатель устанавливается предварительно, исходя из требований к руде на выходе.

Щековые дробилки могут быть с верхним и нижним подвесом щеки (рисунок 1.3). В первом случае подвижная щека обладает максимальной амплитудой внизу, где предусмотрено удаление дробленого материала. У таких установок ширина выходной щели может варьироваться. Во втором наибольшая амплитуда движения имеет место вверху, где загружается обрабатываемый материал. У такого оборудования ширина выходной щели не изменяется [31, 58, 79].

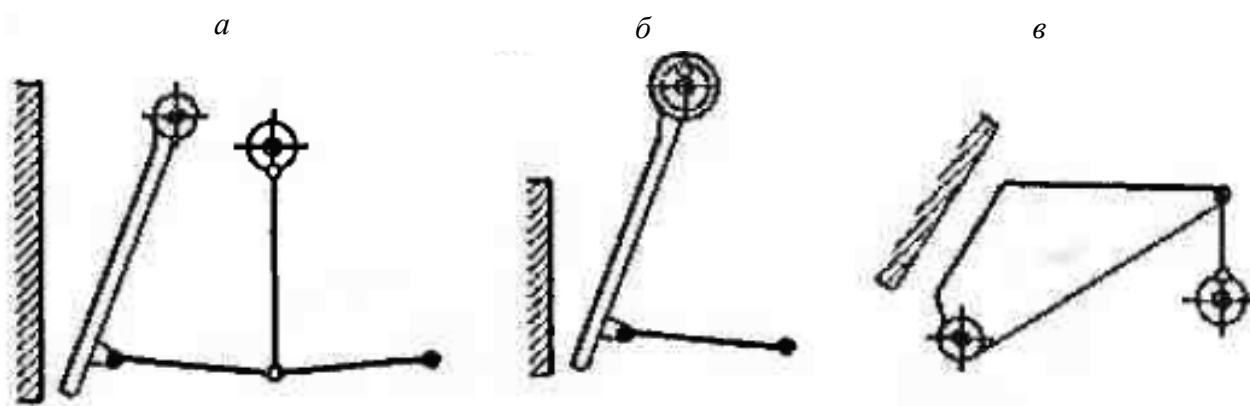


Рисунок 1.3 – Структурные схемы щековых дробилок: *а* – с верхним подвесом щеки и вертикальным шатуном; *б* – с верхним подвесом и сложным движением щеки; *в* – с нижним подвесом

Преимуществом дробилок с нижним подвесом (ширина выходной щели не изменяется) является то, что они обеспечивают гарантированное дробление материала с величиной фракций не более чем предусмотренная техническими характеристиками данной установки. В качестве основных недостатков следует назвать менее высокую производительность и возможность забивания при интенсивной эксплуатации, что привело к ограниченному их применению.

Отечественная промышленность предлагает потребителям несколько разновидностей дробилок такого типа:

- ЩДП - щековые дробилки с простым движением щеки;
- ЩДС-I - щековые дробилки со сложным движением щеки и отношением длины приемного отверстия к его ширине более 1,6;
- ЩДС-II - щековые дробилки со сложным движением щеки и отношением длины приемного отверстия к его ширине до 1,6 включительно.

Щековые дробилки с верхним подвесом подвижной щеки являются оптимальным решением задачи дробления материалов на крупные и средние фракции. Также они применяются, когда предел прочности на сжатие породы достигает 300 МПа (гранитные и базальтовые породы, кварциты и т.д.).

В условиях обогатительных комбинатов наиболее распространены дробилки с верхним подвесом и простым движением щеки (рисунок 1.3, *а*). Установки со сложным движением подвижной щеки (рисунок 1.3, *б*) характерны для

строительных и дорожных работ и небольших обогатительных фабрик. Также они используются при малых объемах производства и на подвижных дробильно-сортировочных комплексах.

Щековая дробилка с простым движением щеки изображена на рисунке 1.4. Ее главными элементами является станина 1, подвижная 2 и неподвижная 3 щеки. Опорой подвижной щеки является ось 4 установленная в подшипники на боковинах станины. В качестве опоры неподвижной щеки используется станина. Рабочий цикл подвижной щеки происходит благодаря шатунно-рычажному механизму. Он состоит из эксцентрикового вала 5 и шатуна 6, а также передней 7 и задней 8 распорных плит. Торцы плит упираются в сухари 10, смонтированные на подвижной щеке, шатуне и упоре задней стенки станины дробилки. Эксцентриковый вал опирается на подшипники в боковых стенках станины и при вращении передает движение шатуну, передвигающему распорные плиты. Плиты обеспечивают изменение угла наклона, благодаря чему осуществляется качание подвижной щеки.

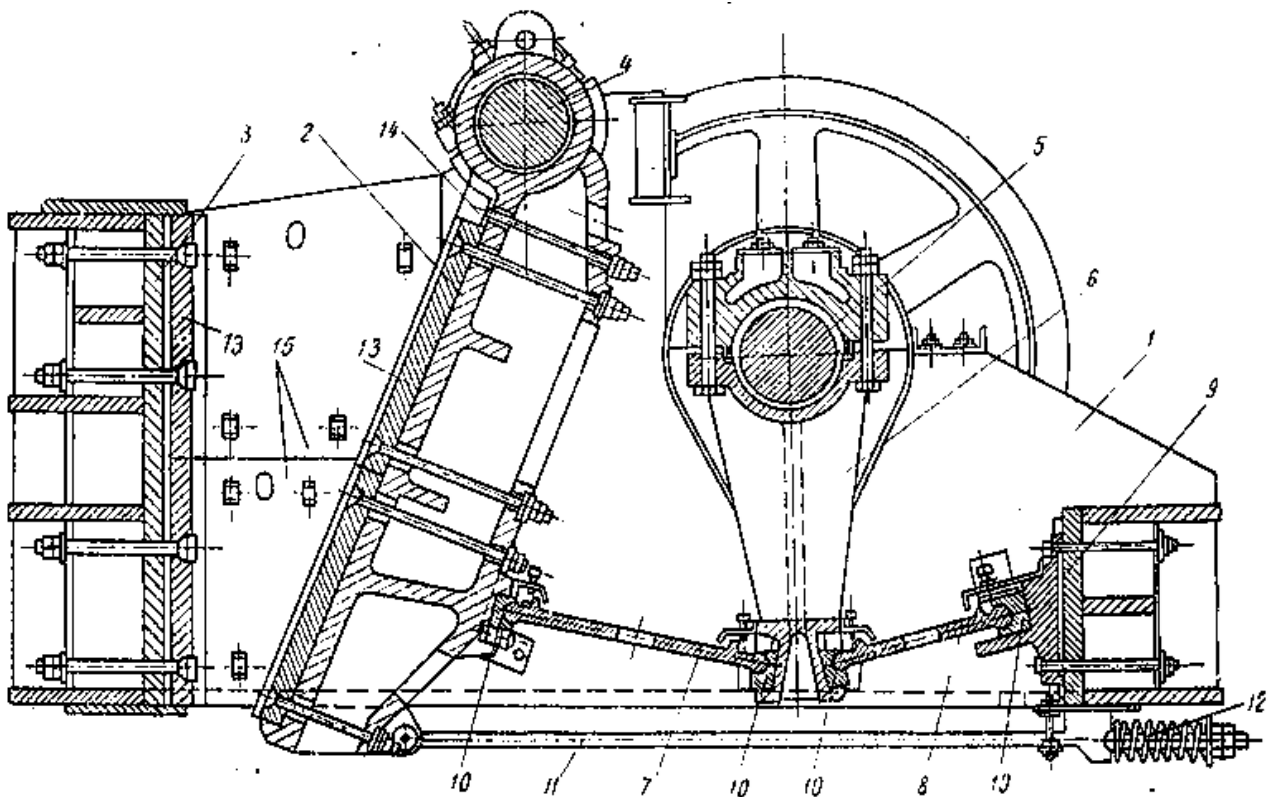


Рисунок 1.4 – Щековая дробилка с простым движением щеки [60]

Ширина выходной щели регулируется установкой под сухарь задней распорной плиты на станине дробилки соответствующих мерных прокладок 9. Взаимодействие подвижной щеки, распорных плит и шатуна обеспечивает замыкающее устройство, состоящее из двух тяг 11 и пружин 12.

Щеки футеруются разъемными плитами 13 которые изготовлены из стали с высоким содержанием марганца. Они крепятся к щекам с использованием болтов и клиньев. Клин 14 не допускает смещение футеровочных плит вверх, и дает возможность в ходе монтажа выставить зазор между плитами. Боковые стенки футеруются плитами 15, крепящимися с помощью болтов.

Футеровочные плиты обеих щек имеют продольные выступы, которые способствуют процессу дробления. Необходимо отметить, что впадины футеровки одной щеки расположены напротив выступов другой. Наиболее распространены дробящие плиты, у которых продольный профиль криволинейный. При проектировании следует также следить за тем, чтобы высота камеры дробления превышала ширину приемного отверстия в 2-2,3 раза. Выполнение этого условия значительно повышает качество измельчения. Помимо этого, обеспечивают скос футеровки статичной щеки в нижнем основании для формирования в сегменте выгрузки параллельной зоны [4].

В конструкции дробилки предусмотрена защита от разрушения на случай попадания внутрь предметов с повышенной твердостью. Решение этой задачи возлагается на заднюю распорную плиту 8. В случае резкого возрастания нагрузки свыше расчетной, она разрушается, а затем монтируется запасная.

Рабочим ходом дробилки называют перемещение шатуна вверх, на протяжении полуоборота вала, при котором происходит максимальное сближение щек, обеспечивающее дробление породы.

Перемещение шатуна вниз вызывает также движение концов распорных плит. За счет собственной массы, а также воздействия, которое оказывает оттягивающая пружина, происходит поворот вокруг оси подвижной щеки, при этом она отодвигается от неподвижной. Это, в свою очередь, приводит к увеличению выходной щели, и удалению из установки отработанного материала.

Те пол-оборота вала, когда происходит сброс измельченной руды, принято называть холостым ходом.

Тот факт, что у щековых дробилок имеется два вида хода - холостой и рабочий, обуславливает возникновение колебаний нагрузки на двигатель. Чтобы избежать этого осуществляют монтаж на вал 2-х массивных маховиков, задачей которых является накопление энергии в процессе работы на холостом ходу и расходование ее при рабочем [42].

В случае с верхним подвесом щеки и вертикальным шатуном дробящее усилие передается через распорные плиты. Для повышения надежности и ремонтпригодности дробилки сухари и сами концы плит изготавливаются в виде съемных деталей из высокопрочных материалов. Такое конструкционное решение позволяет минимизировать последствия поломок и износа.

Вращательное движение, необходимое для работы щековой дробилки, передается клиноременной передачей от электродвигателя.

При проведении технического обслуживания установок используются консистентные и жидкие масла. В подшипниках коленчатого вала и головках шатуна используются жидкие сорта технических масел. В ходе обслуживания подшипников подвижной щеки, гнезд распорных плит и сухарей – консистентные масла. При проведении смазочных работ применяется специальная станция, подающая масло по системе трубок через заданный период времени. По конструкции и принципу действия оборудование системы жидкой и густой смазки аналогично для большинства дробилок, но может отличаться по показателю производительности [3, 101].

1.3 Условия эксплуатации щековых дробилок

Применение щековых дробилок в процессе функционирования обогатительных предприятий связано с дроблением породы на крупные фракции [9, 10, 16, 33, 59, 73, 91]. В условиях невозможности работы под завалом, для щековых дробилок на фабриках обустраиваются приемные воронки, обеспечивающие дозированное поступление сырья (рисунок 1.5). Из приемника

горная порода через пластинчатый питатель поступают в грохота, где после первичного воздействия руда попадает непосредственно в дробилку.

Пластинчатые питатели в свою очередь подразделяются на два типа в зависимости от фракции используемого сырья. При предельных размерах кусков породы не более 300-400 мм используются стандартные питатели. Если же размер элементов породы превышает эти показатели (до 1500 мм включительно), требуется применение механизмов тяжелого типа. Перемещение дробленой породы для дальнейшей переработки осуществляется посредством ленточных конвейеров.

С учетом значительных вибрационных нагрузок, возникающих в процессе работы щековых дробилок, для них требуется обустройство отдельного фундамента, не имеющего связи с фундаментом строения, в котором установлено оборудование. Тем не менее, даже в такой ситуации не исключен факт вибрационного воздействия на окружающие элементы в случае ошибок в расчетах. Нормативы строительства фундамента предусматривают наличие у него массы в 5,5 раз выше, чем вес самой дробилки [60]. Обязательным условием является установка амортизирующих прокладок (войлочные, пробковые, деревянные), отделяющих фундамент от конструктивных элементов строений и фундаментов иного технологического оборудования.

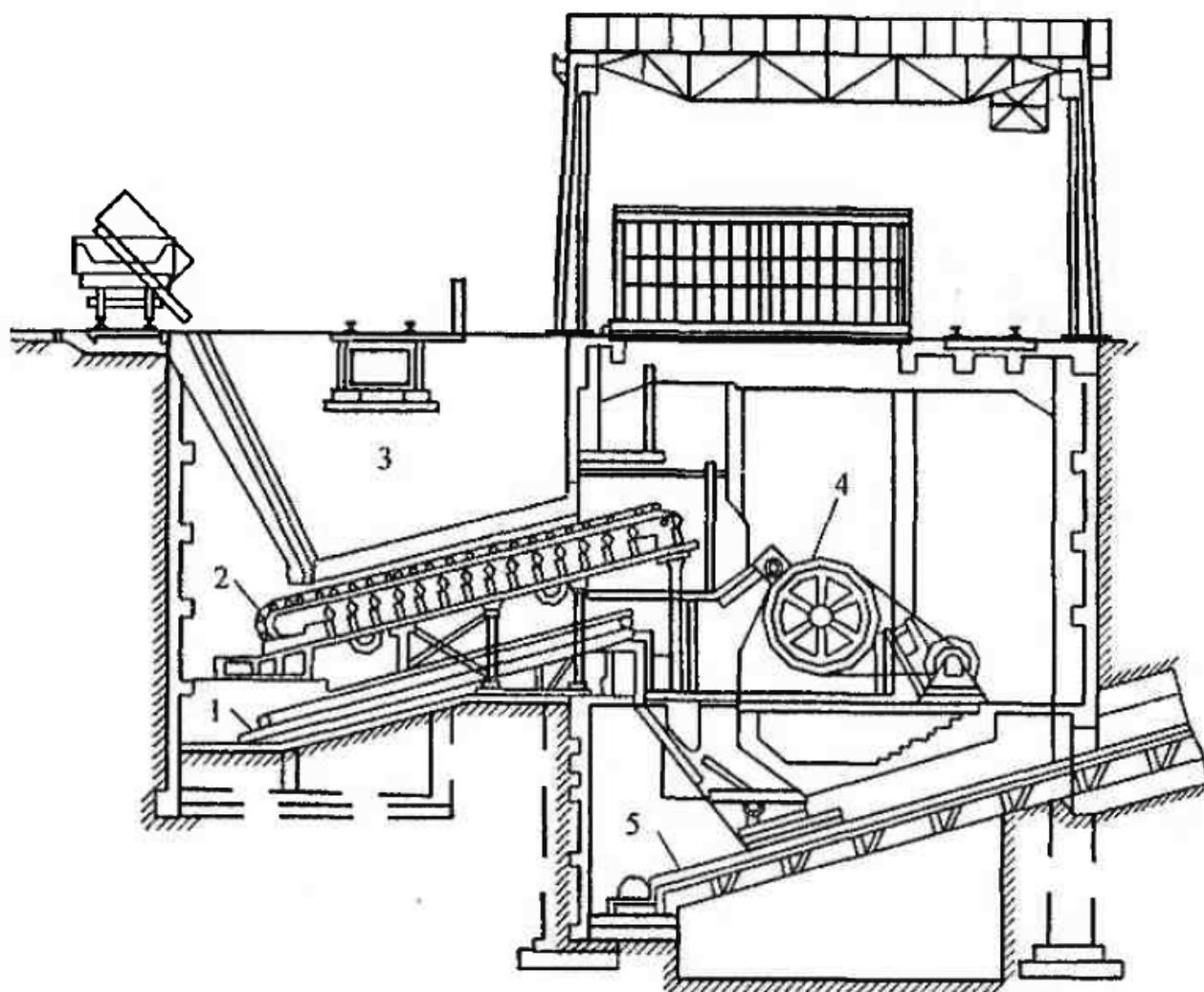


Рисунок 1.5 – Схема установки щековой дробилки [3]:

1 - ленточный конвейер для просыпи; 2 - пластинчатый питатель; 3 - приемная воронка; 4 - щековая дробилка; 5 - ленточный конвейер для дробленого продукта

В большинстве случаев для оборудования данного типа предусматривается степень дробления сырья 3-4, с максимальным возможным показателем до 8 единиц. Показатели потребления электроэнергии дробилок, имеющих степень дробления 6, варьируются в пределах 0,3-1,3 кВт/ч на тонну перерабатываемой породы. Настройка степени дробления осуществляется в условиях максимального раскрытия выходной щели. Определение ее размера проводится определением расстояния между выступом и впадиной дробящих плит. Изменение размера щели осуществляется посредством применения клиньев.

1.4 Дробящие плиты щековых дробилок и технология их изготовления

Дробящие плиты являются основными рабочими органами щековых дробилок. Плиты имеют рифление со смещением, при котором выступы подвижной плиты совмещены со впадинами неподвижной. Благодаря такому расположению для разрушения кусков необходимо меньшее усилие, поскольку такая схема нагружения увеличивает изгибающую составляющую, а горные породы имеют предел прочности на изгиб гораздо меньший, чем на сжатие.

Дробящие плиты по исполнению можно разделить на литые и сборные [13]. Как литые, так и сборные плиты могут быть цельными и составными (рисунок 1.6). Преобладающее распространение в мировой практике получили литые плиты, как наиболее надежные и простые в изготовлении. Создание сборных плит обосновывалось тем, что при работе дробилки изнашиваются только выступы, масса которых составляет до 25 % массы плиты. Экспериментальные сборные плиты состояли из основного тела, изготовленного из обычных сортов стали, и из рабочей поверхности, изготавливаемой из марганцовистой стали. Во ВНИИстройдормаше было испытано несколько вариантов сборной конструкции, состоящих из чугунной основы и высокомарганцовистой рабочей поверхности, закрепленной как болтами, так и методом сварки. При испытаниях оба способа крепления оказались недостаточно надежны, поэтому опыт использования плит сборной конструкции следует признать неудачным [43].

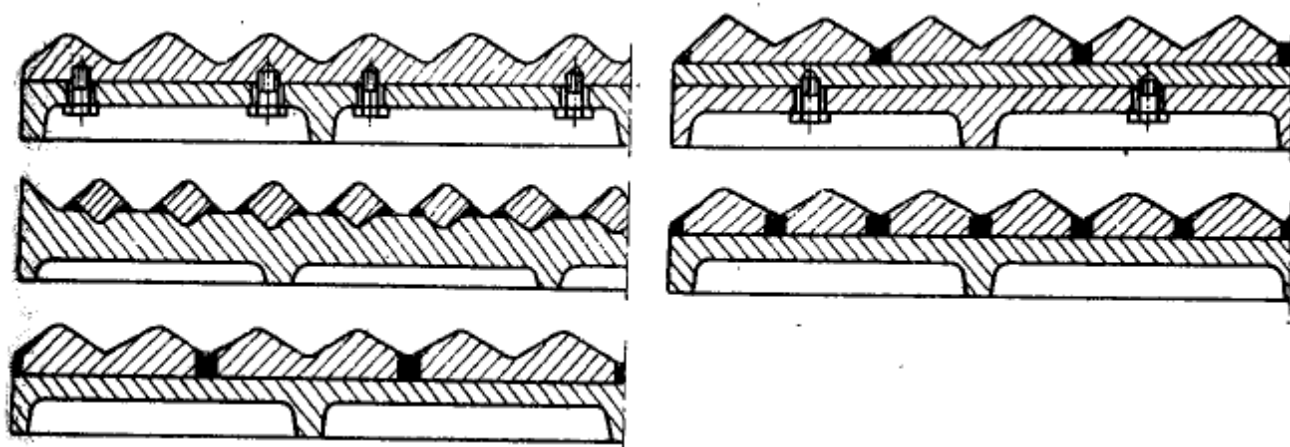


Рисунок 1.6 – Конструкция экспериментальных дробящих плит [43]

Применение цельных или составных плит зависит от типоразмера дробилок. Цельные плиты преимущественно используются на малых дробилках, однако на дробилках мелкого дробления, где плиты изнашиваются, как правило, быстрее, чем на дробилках крупного и среднего дробления, также целесообразно устанавливать составные плиты. Они более сложны в установке, но позволяют наиболее рационально использовать рабочую поверхность плит, т.к. составные части могут изготавливаться симметричными для их переворачивания и перестановки.

Большое влияние на основные параметры дробления (производительность, удельный расход энергии на тонну продукта и т.п.) оказывает геометрия поверхности дробящих плит, определяемая продольным и поперечным профилями.

На рисунке 1.7 приведены продольные профили дробящих плит, наиболее часто встречающихся в практике машиностроения. Продольный профиль плиты значительно влияет на условия протекания процесса дробления, т.к. он определяет геометрические параметры камеры дробления.

Обычный прямолинейный профиль (рисунок 1.7, *а*) с постоянным по всей камере дробления углом захвата получил наибольшее распространение. Двояковыпуклый профиль (рисунок 1.7, *б*) применяют в дробилках со сложным движением щеки, предназначенных для мелкого дробления. Также производят плиты с криволинейной нижней частью (рисунок 1.7, *в*). Такая форма плит, получивших название «незабывающихся», исключает забивание камеры дробления, ведет к получению однородного материала и увеличивает срок службы плит. Эти преимущества объясняются постепенным уменьшением угла захвата в нижней зоне и увеличением площади рабочих поверхностей плит по сравнению с прямолинейными профилями.

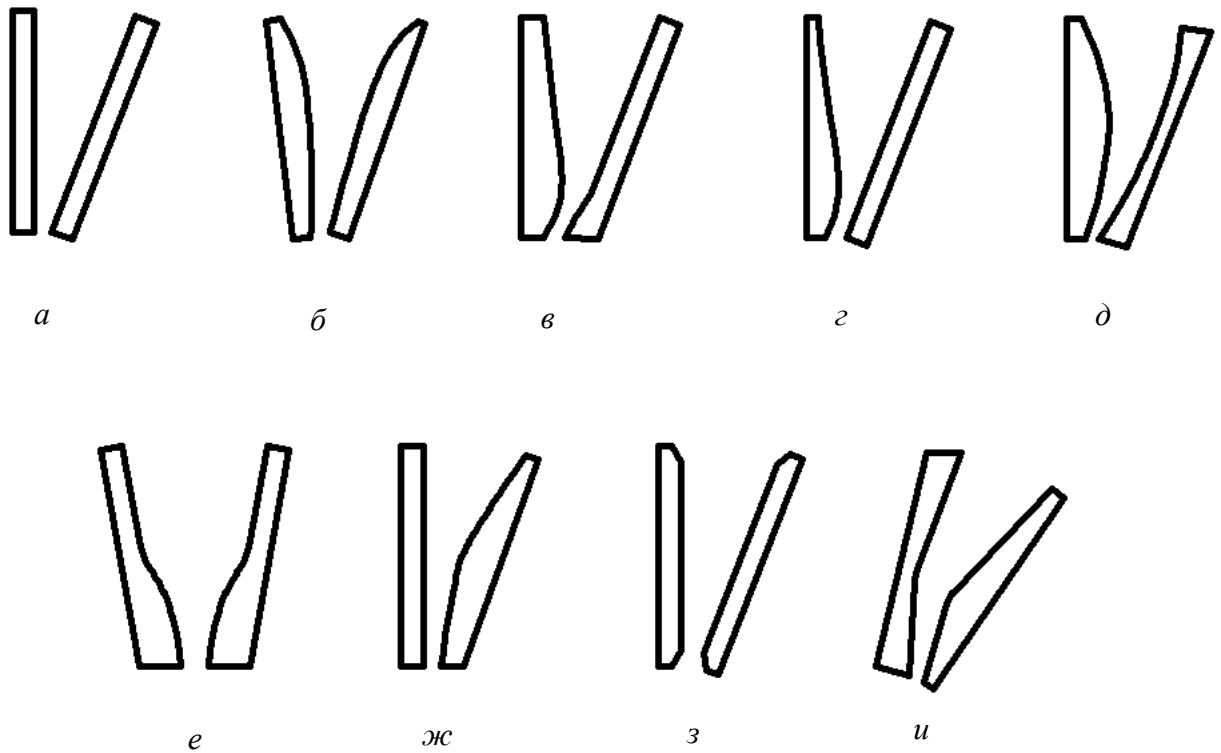


Рисунок 1.7 – Продольные профили дробящих плит щековых дробилок

Близким к этому продольному профилю является профиль, показанный на рисунке 1.7, *г*, с небольшой зоной параллельности в нижней части. Также существует выпукло-вогнутый профиль (рисунок 1.7, *д*), полагая, что при этом материал будет подвергаться изгибу и разрушаться более легко, чем при чистом сжатии, однако на практике это не подтвердилось. Тем не менее такой профиль способствует улучшению формы зерен, и его обычно применяют в дробилках-грануляторах. Профиль, показанный на рисунке 1.7, *е*, используется только на дробилках, отличающихся сильно вынесенной над загрузочным отверстием осью подвеса.

Дополнительно можно указать на профиль с уменьшенным углом захвата в нижней зоне (рисунок 1.7, *ж*), применяемый обычно, как и двояковыпуклый профиль (рисунок 1.7, *б*), для мелкого дробления. Широкое распространение имеет прямолинейный профиль со скосами у торцов, образующих небольшую зону параллельности (рисунок 1.7, *з*).

Существуют ударно-щековые дробилки, камера дробления которых имеет продольный профиль (рисунок 1.7, *и*), близкий к профилю камеры дробления

конусной дробилки типа «Саймонс». В таких дробилках подвижная и неподвижная щеки имеют перелом, способствующий уменьшению угла захвата в нижней части камеры дробления. Такой профиль в сочетании с увеличенным ходом подвижной щеки повышает производительность и существенно улучшает форму фрагментов продукта дробления. Однако этот профиль приемлем только для ударно-щековых дробилок и не может дать положительных результатов при использовании на обычных дробилках со сложным и простым движением щеки, имеющих меньший ход.

Общей тенденцией в развитии формы камеры дробления является упрощение продольного профиля. Сложные многоступенчатые или волнистые профили в настоящее время почти не предлагаются и не используются фирмами-производителями.

В настоящее время подавляющее большинство щековых дробилок по умолчанию комплектуются дробящими плитами с выступами трапецеидального и треугольного поперечного сечения по ОСТ 22-1679-87 – «Плиты дробящие щековых дробилок» [4] (рисунок 1.8).

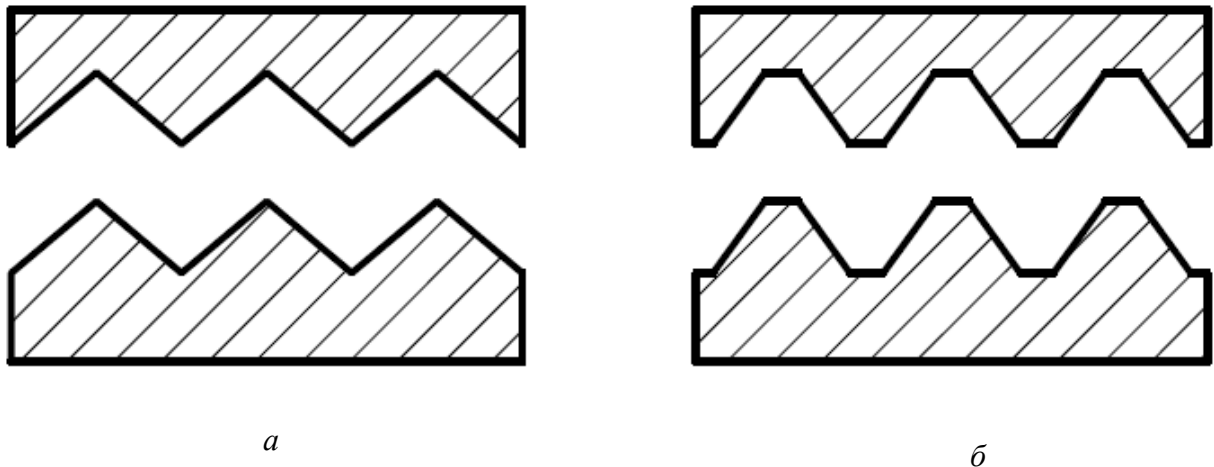


Рисунок 1.8 – Схемы профиля дробящих плит: *а* – треугольный; *б* – трапецеидальный

Плиты с выступами трапецеидального профиля обычно используют в щековых дробилках с приемным отверстием шириной не более 600 мм для предварительного дробления. Выступами треугольного профиля оснащаются дробящие плиты, предназначенные для предварительного дробления в дробилках

с приемным отверстием шириной более 600 мм и в дробилках всех типоразмеров для окончательного дробления.

По литературным данным [56] при дроблении мягких и средних пород наиболее целесообразны полукруглые выступы, а при дроблении твердых горных работ выступы должны иметь форму равнобедренных треугольников. Хотя в эксплуатационных условиях, по данным [60], эти гипотезы не подтверждаются.

Существует мнение, что для обеспечения лучших условий раскалывания зубья противоположных плит должны быть установлены один против другого. В то же время в технической литературе [89] отмечалось, что в ряде случаев более эффективными являются дробящие плиты без выступов, т.е. гладкие. Так А.Ф. Таггарт заключает [83], что для мелкого дробления крупной породы наилучшими являются дробящие плиты с гладкой поверхностью. Поскольку гладкая плита не имеет выдающихся частей, она будет иметь больший срок службы, чем плита с выступами. Хотя на заключительных стадиях дробления применение рифленых плит существенно улучшает качество готового продукта, что важно, например, при производстве строительного щебня.

Исследования процесса разрушения куска породы под воздействием дробящих плит позволили разработать ряд практических рекомендаций по их конструированию. Установлено, что в нижней части камеры дробления у выходной щели размеры и форма выступов существенно влияют на зерновой состав, форму зерен, производительность и расход энергии на дробление, т.е. выступы вполне оправданы, хотя они и подвержены интенсивному изнашиванию, особенно при дроблении высокоабразивных пород [35, 43].

Для увеличения срока службы выступов предпринимались попытки выполнить их самозатачивающимися, например выступы с высокими параллельными гранями. По мере изнашивания таких плит форма выступов будет сохраняться, но эксплуатация подобных плит показала, что куски дробимого материала застревают в узких щелях между выступами, препятствуя свободному движению материала вниз и тем самым снижая производительность.

Поставляемые заводами-изготовителями дробящие плиты обычно имеют некоторое коробление, в следствие которого часть хода сжатия может расходоваться на упругую деформацию плиты, что приводит к значительному снижению производительности дробилки и повышению удельного расхода материала плит при дроблении породы. Для придания жесткости броневым плитам и обеспечения их плотного прилегания к щекам, пустотелые карманы опорной поверхности плит заливают цементным раствором. На больших дробилках заливка цементным раствором нецелесообразна, так как цемент при работе дробилки выкрашивается.

Исследования с целью определения оптимальной геометрии выступов ведутся и по сей день. В частности, разрабатываются плиты с переменным поперечным профилем (рисунок 1.9).

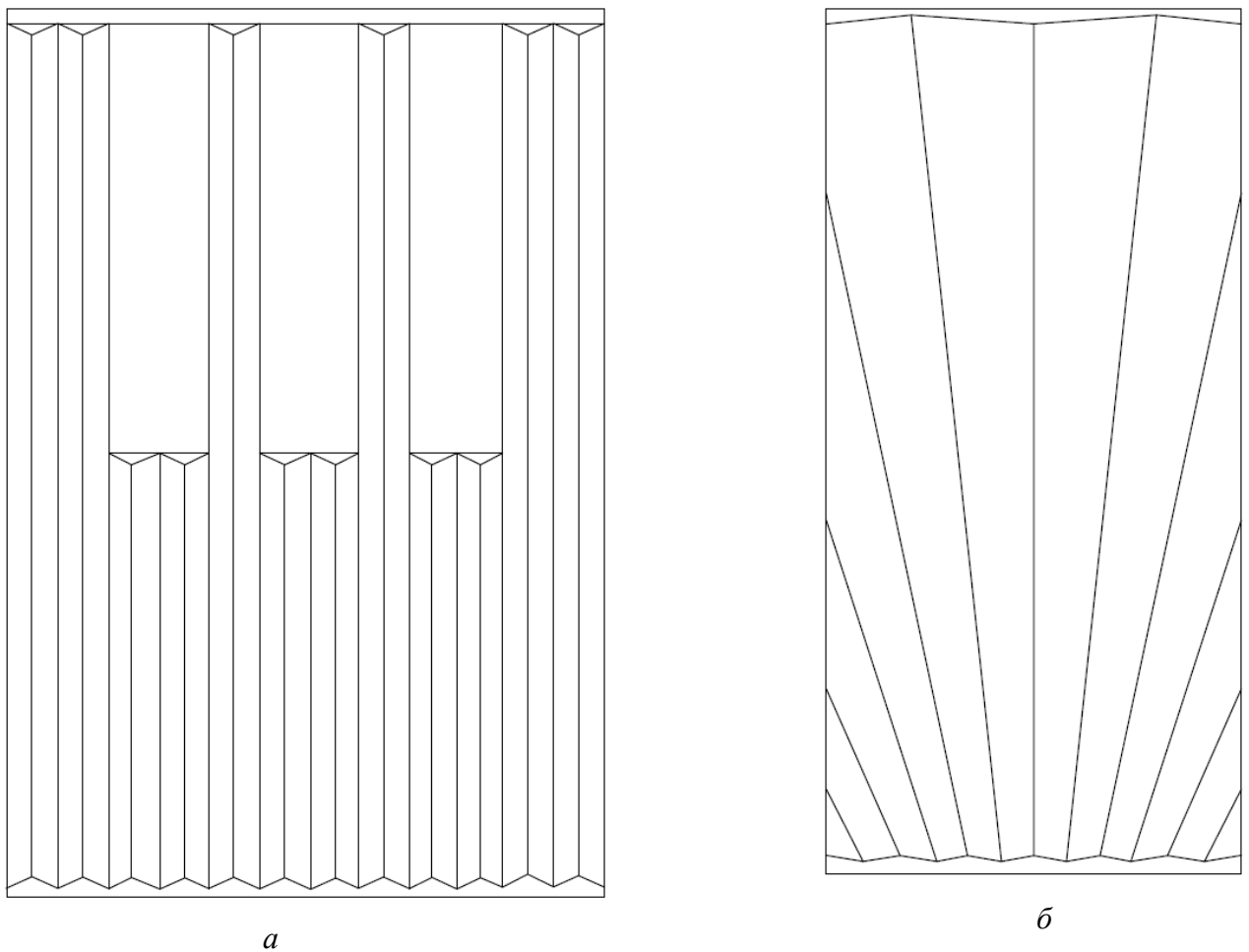


Рисунок 1.9 – Дробящие плиты с переменным поперечным профилем

На рисунке 1.9 *а* представлена плита разработки Ж.И. Кузбакова [49]. По мнению автора, данная конструкция обеспечивает повышенный выход однородного продукта дробления при одновременном снижении отходов. Такой вывод основан на использовании теории взаимодействия контактирующих тел для оценки образования мелких фракций в процессе разрушения крупнокусковых материалов. Похожие идеи рассматривались в работе Д.М. Айбашева [1], в которой была предложена плита с веерообразным расположением выступов (рисунок 1.9, *б*). Идея данной работы заключается в установлении соответствия геометрических параметров выступов плит размерам кусков дробимого материала по высоте камеры дробления, что обеспечивает повышение эффективности процесса дробления.

Согласно [68] дробящие плиты изготавливаются из сталей 110Г13Л и 60Г10Х5МЛ методом литья в песчаные формы с последующей термической обработкой. Наибольшее распространение получили плиты из стали 110Г13Л, также известной как сталь Гадфильда. После термообработки сталь 110Г13Л обладает аустенитной структурой с твердостью до 250 НВ. Основной особенностью этой стали является то, что под действием динамических нагрузок (ударов) происходит ее самоупрочнение вплоть до 600 НВ.

В структуре стали Гадфильда после литья представлены аустенит и избыточные карбиды $(Mn, Fe)_3C$. При нагреве литой стали до 1050...1100 °С карбиды растворяются в железе. Типовая термическая обработка заключается в закалке отливок в воде с температуры порядка 1100 °С. При быстром охлаждении останавливается выделение карбидов и образуется аустенитная структура. Этот процесс происходит при соотношении содержания марганца и углерода $>10\%$. Сталь такой структуры имеет следующие параметры: предел прочности $\sigma_B = 800...900$ МПа; предел текучести $\sigma_{0.2} = 260...400$ МПа; относительное сужение $\psi = 40...50\%$; относительное удлинение при разрыве $\delta = 20...40\%$; твердость в исходном состоянии 200...220 НВ, а в результате самоупрочнения – до 600 НВ; модуль Юнга $E \sim 200$ ГПа; модуль сдвига $G = 78\,000$ МПа; плотность 7820 кг/м³ [87].

1.5 Условия эксплуатации и причины отказа дробящих плит

Дробящие плиты, как основные рабочие органы дробилки, подвергаются интенсивному абразивному истиранию в ходе работы.

Основная причина отказов дробящих плит – полное истирание выступов. После этого плиты, как правило, заменяют и, в редких случаях, реставрируют. Реставрация заключается в наплавке подслоя порошковой проволокой марки ПП-Г13Н4-О. Толщина наплавленного подслоя должна быть на 15 мм меньше размеров новой бронеплиты. После этого плиту подвергают наплавке износостойкой порошковой проволокой марки ПП-У25Х17Т-О. Толщина этого слоя должна быть не более 15 мм [30]. Такая практика носит ограниченный характер, т.к. требует высокой квалификации сварщика, а геометрия выступов и качество наплавки зачастую не соответствуют нормам.

Срок службы плит зависит от ряда факторов, таких как физико-механические свойства дробимой породы, конструкция дробящих плит (продольный, поперечный профиль), параметры дробилки (типоразмер, кинематика, ход сжатия, ширина выходной щели) и др. Так, например, ресурс дробящих плит дробилок с простым движением щеки в 4-5 раз превышает ресурс плит дробилок со сложным движением. Причиной этому является вертикальное перемещение подвижной щеки относительно неподвижной во втором случае, что обуславливает повышенное истирающее воздействие породы. Кроме того, характер изнашивания футеровок щек в щековой дробилке различный на подвижной и неподвижной щеке. В дробилках со сложным движением щеки (рисунок 1.10, а) наиболее интенсивному изнашиванию подвергается нижняя часть неподвижной дробящей плиты 1. В то же время изнашивание подвижной плиты 2 до двух раз менее интенсивное и носит более равномерный характер. Дробящие плиты дробилок с двумя подвижными щеками 2 (рисунок 1.10, б) изнашиваются меньше и в основном в нижней части плит.

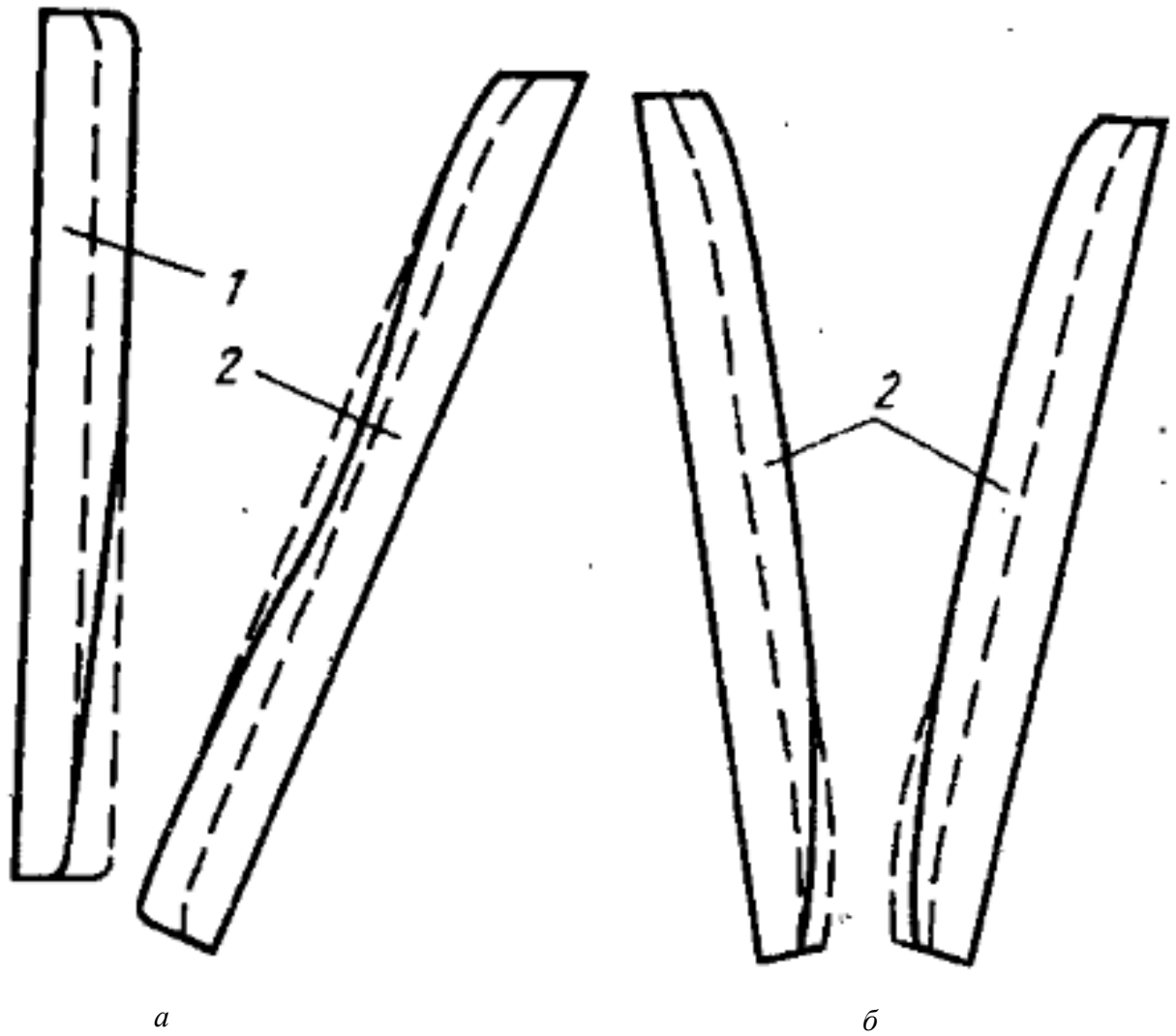


Рисунок 1.10 – Характер изнашивания плит на щековых дробилках с разными кинематическими схемами: *а* – со сложным движением щеки; *б* – с двумя подвижными щеками [43]

У дробилок с простым движением щеки относительное перемещение дробящих плит по вертикали незначительно, поэтому изнашивание обуславливается только лишь воздействием нагрузки и пятном контакта кусков породы с дробящими плитами. Так как площадь поперечного сечения камеры дробления уменьшается к низу дробилки, а проходит через эти сечения одно и то же количество дробимой породы, при прочих равных условиях интенсивность изнашивания увеличивается к нижней части камеры дробления.

1.6 Способы повышения механических характеристик деталей горных машин

С целью повышения эффективности эксплуатации оборудования и роста его работоспособности, применяются разнообразные технологии дополнительной обработки деталей [8, 17, 27, 32, 36, 37, 54, 71, 72, 80]. Они могут предусматривать термическое воздействие, механическую обработку, нанесение различных напылений, комбинированное воздействие одновременно несколькими способами. Результатом подобной работы оказывается повышение прочности материала в целом или его поверхностного слоя.

Термическая обработка. Наиболее распространенный вариант повышения прочностных характеристик стали. Она предполагает осуществление закаливания металла с последующим отпуском с целью надления стали необходимыми физико-химическими свойствами. Проведение поверхностной закалки носит целью внесение изменений в характеристики исключительно поверхностного слоя обрабатываемой детали. На сегодня наиболее массовое распространение имеет электротермическое закаливание, проводимое посредством нагрева изделия высокочастотными токами, газоплазменная и лазерная закалка [8].

Механическая обработка. Возможно два варианта воздействия на материал. Во-первых, слесарным способом для удаления с поверхности изделия любых дефектов или придания изделию шероховатой структуры. Во-вторых, посредством воздействия давлением. В первом случае проводимый комплекс мероприятий способствует росту стойкости к износу [80], а во втором росту прочностных характеристик изделия.

При использовании технологии обработки давлением, наибольшее распространение получили такие способы как дробеструйное воздействие, роликовая прокатка, вибрационная обкатка и ряд других [27, 54, 88].

К числу современных технологий обработки, последовательно набирающих популярность, необходимо отнести интенсивную пластическую деформацию, обеспечивающую воздействие и изменение первоначальных характеристик во всем объеме металла. Рост прочностных свойств связан с формированием

нанокристаллических структур повышенной устойчивости. К числу таких технологий относятся мультиосевая деформация, равноканальное угловое прессование и так далее [29, 75, 98].

Химико-термическая обработка. Данная процедура носит название легирования, и предусматривает одновременное применение температурных факторов воздействия на деталь и химическое воздействие с целью внесения изменений в параметры поверхностного слоя металла [80]. Среди наиболее распространенных методик обработки азотирование, сульфидирование, цементация и другие.

Газотермическое напыление предполагает обработку металла с формированием на поверхности дополнительного слоя из материала, обладающего заданными параметрами. В качестве напылений могут применяться металлы и сплавы на их базе, керамика. Способы нанесения покрытия при этом могут быть самыми разнообразными [24].

Комбинированные методики предполагают сочетание нескольких способов воздействия с целью достижения необходимого результата. Используются для изменения свойств деталей и технологии наплавления сваркой металлического слоя [80].

При изготовлении дробящих плит для повышения их износостойкости регулируют процесс литья. Существуют гипотезы [87], что при некотором сужении границ допустимого содержания в стали 110Г13Л вредных примесей, а также при упорядочении технологии литья срок службы дробящих плит может быть увеличен до 1,5 раз. Вместе с тем качество дробящих плит, отлитых из высокомарганцовистой стали 110Г13Л не может полностью удовлетворить ни машиностроителей, ни эксплуатационников. Слишком трудоемки работы по замене изношенных деталей и велика при этом стоимость простоев оборудования; сама сталь дорогая, трудоемкая в изготовлении и обработке.

Известны многочисленные работы, проводимые с целью применения плит, отлитых из чугуна. Чугунные плиты имели обычно небольшую твердую корку отбеленного чугуна (1,5-2,0 мм), которая при работе дробилки довольно быстро

изнашивалась. Дальнейшее изнашивание более мягких слоев чугуна происходило еще быстрее. Как правило, чугунные плиты работали не более 1-2 смен. Испытания показали, что плиты из нелегированного чугуна перерабатывают 400-600 м³ материала, что примерно в 3 раза меньше, чем плиты из стали 110Г13Л в тех же условиях [23].

1.7 Влияние высокотемпературной обработки давлением на механические свойства и износостойкость материала плит

Из-за трудности обработки резанием практически все изделия из стали Гадфильда получают только литьем без последующей механической обработки. Такое поведение стали 110Г13Л объясняется повышенной способностью составляющего ее марганцовистого аустенита к упрочнению (наклепу) при резании с повышением твердости с 200 до 600 НВ, что обычно связывают с возникновением большего количества дефектов в кристаллической решетке стали [5, 81] или превращением аустенита в мартенсит [48, 55].

Принято считать [27], что при чисто абразивном воздействии сталь 110Г13Л демонстрирует низкое сопротивление износу, в то время как в условиях больших удельных нагрузок и ударных воздействий, когда металл поверхностного слоя подвергается интенсивному наклепу, сталь приобретает исключительно высокую абразивную износостойкость. Хотя, как показано в работах [18, 84, 90] данное утверждение справедливо только для изнашивания стали по сравнительно мягким породам (менее 1100 НВ), твердость которых уступает твердости стали в наклепанном состоянии. В случае изнашивания по породам большей твердости значительные удельные нагрузки, как и ударные воздействия, способствующие наклепу материала, не приводят к повышению износостойкости стали Гадфильда и она по этому параметру не отличается от обычной среднеуглеродистой стали типа 45. В то же время в литературе имеются отдельные сведения о возможных способах термической и термомеханической обработки стали 110Г13Л, способных повысить ее износостойкость.

Так, в [69] предложен режим термической обработки стали Гадфильда, включающий в себя двукратный отжиг с температурой нагрева 800-830 °С и медленное охлаждение со скоростью не более 25 град/ч до 600 °С с последующей закалкой от 1050-1100 °С в воде. Назначение отжига, по мнению авторов [69], заключается в перераспределении карбидных включений, изменении их величины и формы, а также выравнивании химического состава по зерну и сечению отливок. Сравнительные испытания, проведенные при дроблении гравия в щековой дробилке ДЩ 150x80 с использованием дробящих плит из стали 110Г13Л, прошедших термическую обработку без двукратного отжига и предлагаемую, показали 50 % увеличение стойкости плит, обработанных по второму способу.

В работе [12] обнаружено повышение физико-механических свойств и износостойкости высокомарганцевой стали в результате ее горячего пластического деформирования ковкой и последующей закалки, т.е. в результате высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) [11, 19, 66]. Деформирование предлагается проводить при температурах 950-1200 °С, при которых сталь 110Г13Л обладает наиболее высокой ковкостью, а образцы, изготовленные из поковок после закалки их в воде с температуры концаковки, имеют наиболее высокие механические свойства. В результате такой ВТМО повышаются как прочностные, так и пластические свойства стали. Для определения износостойкости образцы стали, обработанные указанным образом, помещали в галтовочный барабан, загруженный стальными шарами диаметром 40 мм. После непрерывной работы барабана в течение 100 ч образцы взвешивали с определением их массового износа. В результате данного эксперимента было выявлено, что по мере повышения степени укова образцов до 3 сопротивление стали к изнашиванию при контакте со стальными шарами возрастает на 40 %, после чего изменяется незначительно. С учетом этого, можно было ожидать, что применение термомеханической обработки при изготовлении плит, позволит повысить износостойкость их материала и при контакте с абразивом в условиях работы дробилки. Поскольку сведений о влиянии ВТМО на стойкость стали 110Г13Л к абразивному изнашиванию в литературе не обнаружено, представлялось

необходимым провести соответствующее экспериментальное исследование, чему посвящена глава 4 работы.

1.8 Выводы по Главе 1

1. Анализ литературных источников показал, что для крупного дробления горных пород наиболее рационально применение щековых дробилок.
2. Проанализированы условия эксплуатации дробящих плит щековых дробилок.
3. Рассмотрены виды конструкций щековых дробилок, применяемых на горно-обогатительных предприятиях в настоящее время.
4. Обобщены наиболее распространенные способы повышения прочностных свойств материалов, применяемых для изготовления быстроизнашивающихся элементов в горном машиностроении.
5. В результате литературного обзора сделан вывод, что стойкость дробящих плит к износу определяется физическими параметрами дробимой породы. Обнаружено, что применяемая технология производства дробящих плит не использует свойство повышения прочностных показателей вследствие обработки давлением.

Глава 2 Анализ влияния радиуса выступа дробящей плиты на потребляемую дробилкой мощность. Разработка конструкции плиты дробилки СМД-118, обеспечивающей уменьшение работы на дробление

2.1 Особенности конструкции и эксплуатации щековой дробилки СМД-118

Щековая дробилка марки СМД-118 – одна из наиболее подходящих установок для грубого измельчения крупных кусков материала. Куски в подобных устройствах можно переработать до диаметра в 5 мм. Дробилка СМД-118 – это устройство, конструкционные особенности которого позволяют эксплуатировать его даже в условиях сурового климата. Данный тип дробильных машин может полноценно работать при температурах от +40 °С до таких же величин при минусе. Однако при этом должны обязательно соблюдаться технологические нормы эксплуатации смазочных систем, а маслопроводы должны быть оснащены теплоизоляцией при условии использования системы жидкой смазки (при низких температурах работа маслостанции без ТЭНов для подогрева масла не рекомендуется).

Передача движения приводному (малому) шкиву клиноременной передачи осуществляется электродвигателем. Станина дробильной машины СМД-118 представляет собой сварную стальную конструкцию, которая оснащена боковыми, передней и задней стенками. Есть специальное исполнение данного устройства с разъемной станиной. Дробилки в таком исполнении получили широкое распространение в шахтах.

Рассматриваемое устройство получило широкое использование и на дробильно-сортировочных фабриках ОАО «Гранит-Кузнечное» (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Дробилки СМД-118 в ОАО «Гранит-Кузнечное»

Дробилки СМД-118 нередко используются для переработки твердых материалов с высокими показателями абразивности (мрамора, доломита и т.д.), а также глинистых материалов, обладающих высоким уровнем прочности. Механизм устройства имеет достаточно простую конструкцию и надежен в эксплуатации.

Главная особенность конструкции СМД-118 заключается в возможности выбора необходимой ширины выходного отверстия для переработанного материала. Её регулировка осуществляется ходом нижнего края дробящей плиты.

Существуют дробилки с простым и сложным движением дробящей плиты. Щековая дробилка СМД-118 (рисунок 2.2) имеет простое качание щеки и предназначена для крупного дробления. Основные характеристики дробилки СМД-118 представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики дробилки СМД-118.

Наименование основных параметров и размеров	Нормы
1. Размеры приемного отверстия, м ширина предельные отклонения длина предельные отклонения	1,2 $\pm 0,06$ 1,5 $\pm 0,075$
2. Максимальные размер наибольшего куска загружаемого материала, м	1
3. Выходная щель, м номинальная ширина диапазон регулирования, не менее	0,15 $\pm 0,040$
4. Производительность при номинальной ширине выходной щели, м ³ /час	310
5. Установленная мощность электродвигателя основного привода, кВт	160
6. Габаритные размеры, м, не более длина ширина высота	6,4 6,8 5,0
7. Масса дробилки, т, не более (без электрооборудования, комплектных устройств управления электроприводами, запчастей, сменных (быстроизнашивающихся) частей, инструмента, привода, систем жидкой и густой смазок)	140,7

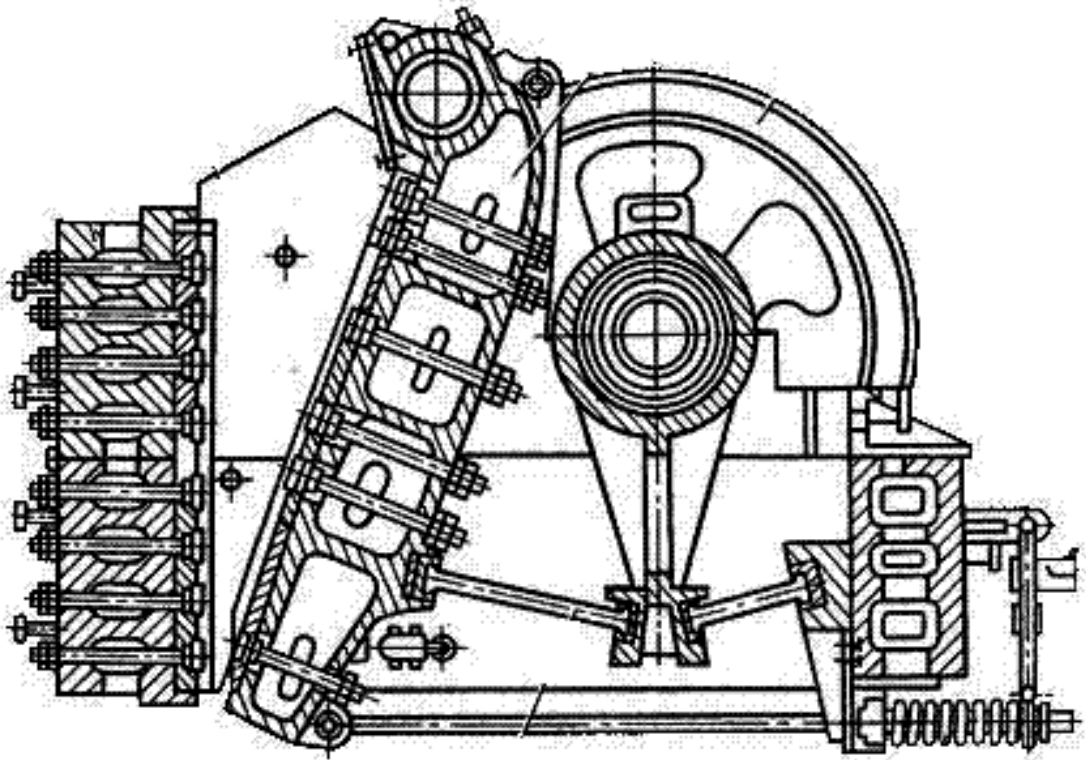


Рисунок 2.2 – Дробилка СМД-118

К числу основных рабочих узлов дробилки СМД-118 относятся:

1. Пара дробящих щек. Подвижная и неподвижная щека – это элементы, которые сжимают материал для измельчения. Щека подвижная – одна из составных частей дробильного устройства. Именно эта деталь осуществляет дробление. Подвешенная на неподвижной оси подвижная щека дробилки начинает совершать колебательные движения благодаря эксцентриковому валу и шатуну, который шарнирно связан с данной щекой рычагами (распорные плиты) и регулировочными клиньями. Ширину выпускной щели, которая определяет степень дробления горной породы, регулируют клиньями путем их перемещения. Расположение клиньев изменяют при помощи предусмотренных для этих целей болтов. Натяжение в движущейся системе создается тягой и пружинами, которые обеспечивают так же обратное движение подвижной щеки. Щеки оснащены дробящими плитами, которые обладают продольными выступами. Для защиты передней части щеки предусмотрена съемная футеровка, изготовленная из углеродистой стали.

2. Шкивы большой и малый для клиноременной передачи. Большой по размеру шкив соединен с шатуном, который приводит в действие подвижную щеку. Малый шкив – приводной, и большой шкив выступает не только противовесом для него, но и маховиком для накопления полезной кинетической энергии устройства.

3. Станина. Сварная металлоконструкция в виде 4-х стенок. Боковые стенки – открыто-ребристые, имеющие три отверстия для проведения визуального осмотра узлов трения. Они отливаются из углеродистой стали и прикрыты футеровкой. Передняя стенка ограничивает камеру дробления в виде неподвижной щеки и прикрыта от износа специальными дробящими плитами, которые отливаются из высокомарганцовистой стали.

4. Система густой и жидкой смазки. Густая смазка бывает с автоматической и ручной подачей. Для смазки маховика и подшипников применяется густая смазка. Ее подача производится вручную при помощи специального шприца. Для смазки подшипников основного вала в дробильной машине предусмотрена циркуляционная система смазки жидко типа.

Дробилка имеет, несомненно, целый ряд преимуществ. Она отличается повышенной надежностью и способностью работать в самых неблагоприятных внешних условиях. На глинистые и вязкие материалы ее обычно не ставят, в основном используется для рудных и не рудных пород, причем не важно какой они прочности, насыщенности водой и абразивности. Между дробящими плитами может развиваться усилие сжатия до 2500 кгс/см^2 . Так как она была разработана для эксплуатации в течение долгого срока ее устройство отличается простотой, что снижает вероятность поломки, а количество составляющих деталей довольно ограничено.

Одним из основных параметров щековой дробилки является величина угла между подвижной щекой и неподвижной, который принято называть углом захвата. Если величина угла будет слишком большой, то куски материала могут попросту выскакивать из входного отверстия оборудования. При маленькой величине угла степень дробления будет весьма незначительной по причине чересчур близко поставленных друг к другу щек.

В основе механизма дробления – давящая сила между щеками, одна из которых совершает качательные движения. Куски горной породы дробятся таким образом до тех пор, пока не проваливается дальше. Для безаварийной работы дробилки необходимо соблюдать правила эксплуатации и ухода. Важно проверять натяжение клиновых ремней, наличие смазки, крепежи деталей и болтов.

Для эффективного использования дробильных машин на многих заводах прибегают к использованию системы планово-предупредительного ремонта (ППР). Благодаря этому не нужно проводить ремонтные работы по потребности. Проведение такого вида работ обуславливается:

- отсутствием четкого порядка действий по ремонту машин;
- отсутствием профилактических мероприятий с целью снижения износа рабочих узлов и агрегатов;
- неуклонным ухудшением в процессе эксплуатации состояния дробилки и ее работоспособности и т.д.

В процессе разработки системы ППР используют график ТО устройства. Это в свою очередь позволяет избежать быстрого износа и выхода из строя отдельных узлов и агрегатов дробильной машины.

Межремонтный цикл дробилки СМД-118 принимается равным 15 000 ч. В середине межремонтного цикла предусматривается выполнение одного среднего ремонта, четырех технических обслуживаний ТО №4, шести ТО №3, двенадцати ТО №2, и 48-ми ТО №1.

Дробильная машина, как и любое другое устройство требует регулярного технического ухода (ТУ). За выполнение такого рода работ отвечают сотрудники, которые эксплуатируют данное оборудование.

Перечень работ по ТУ приведен в таблице 2.2 [85].

Таблица 2.2 – Перечень и содержание работ по техническому уходу дробилки СМД-118.

Содержание работ методика их проведения	Технические требования	Приборы, инструмент, приспособления и материалы необходимые для выполнения работ	Периодичность выполнения работы
Перечень и содержание работ по ТО№1			
1. Очистка дробилки от пыли и подтяжка крепежа плит дробящих.	Подтяжка крепежа при ослаблении.	Ключи	Ежедневно
2. Проверка уровня масла в редукторе привода и корпуса насоса станции густой смазки.	–	–	Ежедневно
3. Очистка фильтрующего патрона фильтра станции жидкой смазки от загрязнений.	Пока перепад давления в фильтре не достигнет менее 1кг/см ² .	С помощью рукоятки фильтра производить поворот патрона.	Не реже 1 раза в неделю.
4. Проверка наличия масла в разделителе для манометров станции густой смазки.	–	–	Не реже 2-х раз в месяц.
5. Смазывания шприцем втулок шкива и маховика.	–	ШРГ-630-1	Не реже 2-х раз в месяц.

Продолжение таблицы 2.2

Содержание работ методика их проведения	Технические требования	Приборы, инструмент, приспособления и материалы необходимые для выполнения работ	Периодичность выполнения работы
Перечень и содержание работ по ТОН№2 Выполнить работы по техническому уходу, перечень которых приведен выше.			
6. Регулировка разгрузочной щели дробилки.	–	–	Через 208 часов при необходимости.
7. Удаление осевшей грязи из фильтра станции жидкой смазки.	–	С помощью вывинчивания пробки со дна стакана фильтра и прокачиванием масла.	Через 208 часов.
8. Подтягивание всего крепежа.	–	Ключи	Через 208 часов.
Перечень и содержание работ по ТОН№3 Выполнить работы по ТОН№2, перечень которых приведен выше.			
9. Перестановка местами плит дробящих	–	–	Через 625 часов в связи с неравномерностью износа
10. Регулировка зажатия пружинами дисков фрикционных муфт на передачу момента необходимого для дробления.	–	Ключи	Через 625 часов. Для обеспечения надежной пробуксовки фрикционных дисков при попадании в камеру дробления недробимого тела, затяжка пружин должна быть минимальной, но достаточной для дробления материала без видимой пробуксовки.
11. Промывка фрикционных дисков.	–	Бензин или Уайт спирит	Через 625 часов в целях чистки дисков от масла.
12. Подтягивание кольцом уплотнения коренных подшипников главного вала.	–	Ключи	Через 625 часов при наличии течи масла.

Продолжение таблицы 2.2

Содержание работ методика их проведения	Технические требования	Приборы, инструмент, приспособления и материалы необходимые для выполнения работ	Периодичность выполнения работы
13. Регулировка резинового кольца для предохранения от пыли подшипников главного вала.	—	Ключи	Через 625 часов.
14. Регулировка натяжения клиновых ремней главного и вспомогательного привода.	—	Ключи	Через 625 часов при необходимости.
Перечень и содержание работ по ТО№4 Выполнить работы по ТО№3, перечень которых приведен выше.			
15. Промывка фильтрующих устройств, фильтров станций жидкой смазки от налипшей грязи.	—	—	Не менее 2-х раз в год.
16. Смена моста в маслобаке станции жидкой смазки.	—	—	Через 1250 часов.
17. Регулировка зазоров между бронзовыми вкладышами и шейками оси подвижной щеки.	—	Уменьшение зазора производится путем снятия определенного количества прокладок.	Через 1250 часов при необходимости.
18. Замена плит дробящих.	—	Ключи	Через 1250 часов при полном износе выступов.
19. Смена боковых футеровок и футеровки щеки подвижной.	—	Ключи	Через 1250 часов при полном износе футеровок.
20. Смазка подшипников электродвигателя.	—	—	—

Плиты дробящие для дробилки СМД-118 изготавливаются из стали 110Г13Л и имеют треугольный поперечный профиль. Плиты являются составными, т.е. имеют верхнюю и нижнюю часть. Неподвижная плита состоит из двух одинаковых частей, изготавливаемых по чертежу (рисунок 2.3).

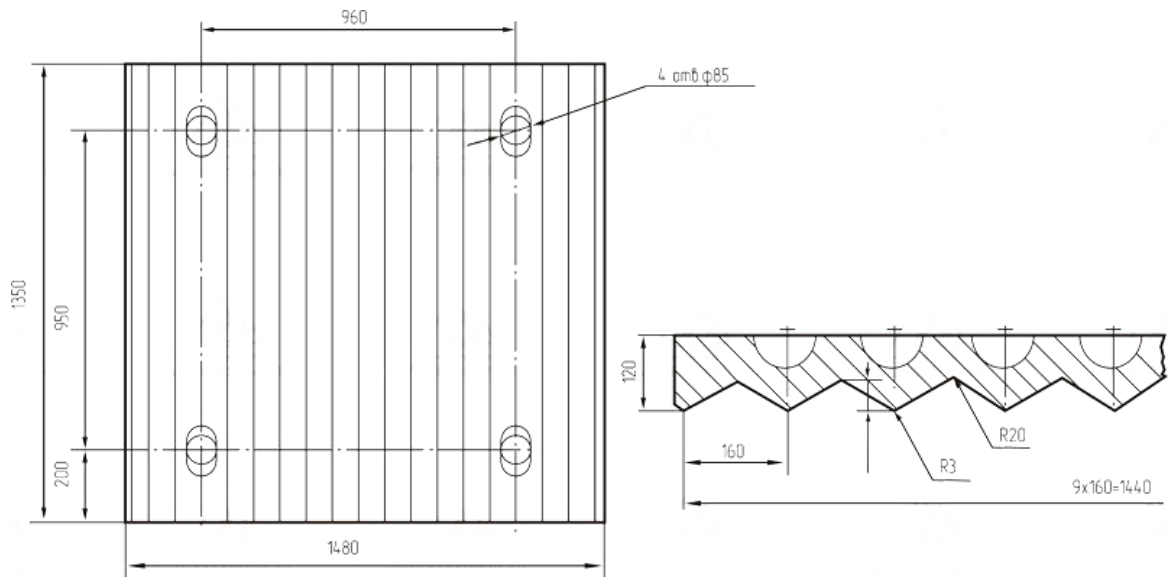


Рисунок 2.3 – Плита неподвижная дробящая для СМД-118

Подвижная плита состоит из двух частей, верхней и нижней, изготавливаемых по чертежам на рисунках 2.4 и 2.5 соответственно.

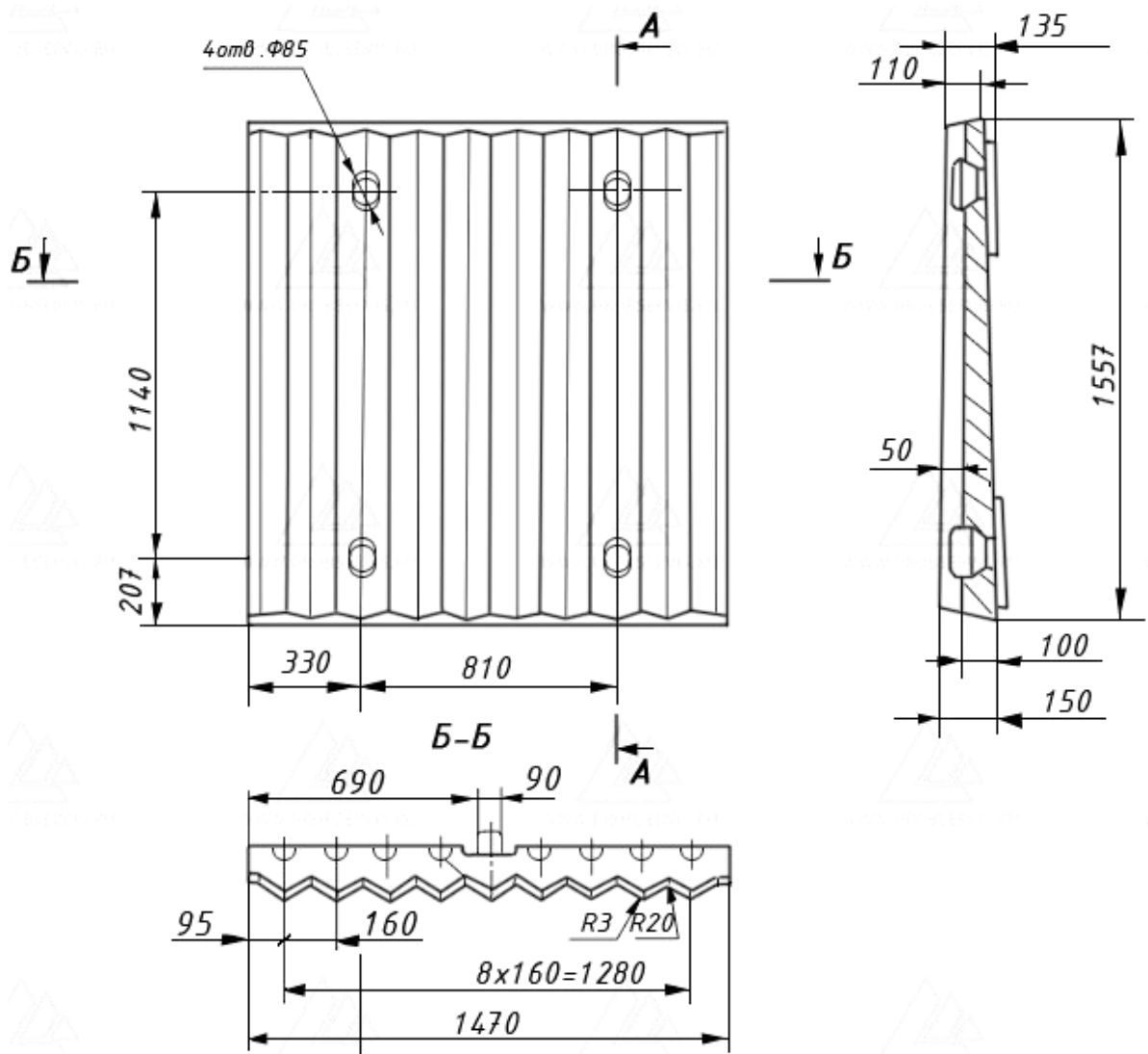


Рисунок 2.4 – Плита подвижная дробящая (верхняя часть) для СМД-118

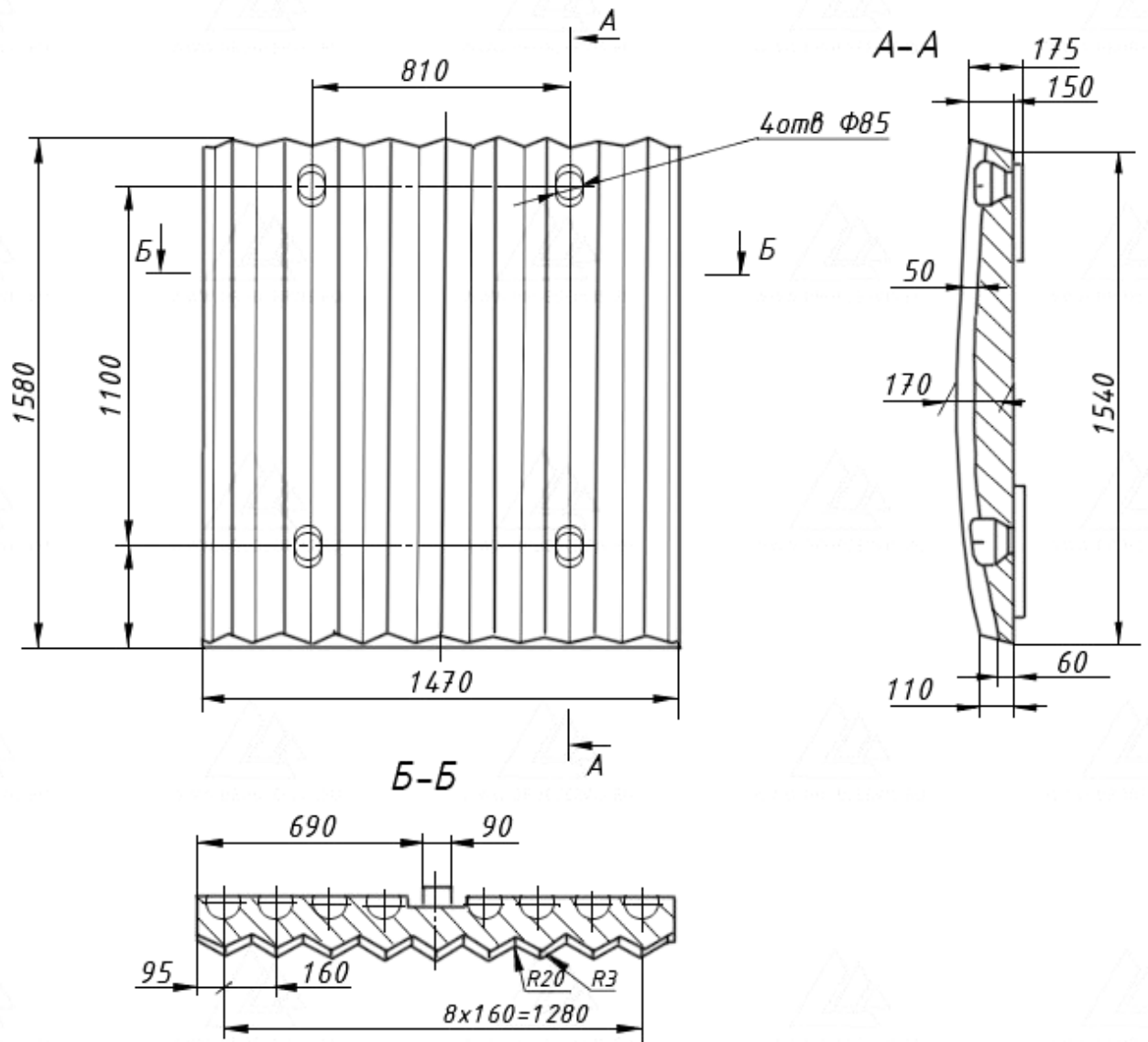


Рисунок 2.5 – Плита подвижная дробящая (нижняя часть) для СМД-118

Масса части неподвижной плиты составляет 1340 кг, масса верхней части подвижной плиты 1640 кг, а нижней 1900 кг.

2.2 Существующие методы определения мощности, потребляемой дробилкой

Потребляемая мощность дробилки характеризует энергоёмкость процесса дробления и является определяющей при выборе электродвигателя. Поскольку процесс дробления во многом случайный, существует несколько способов определения мощности.

А.К. Рундквистом была предложена общая формула (2.1), отражающая несколько гипотез дробления [41, 76].

$$N = K \frac{i^{n'-1} - 1}{D^{n'-1}} Q, \quad (2.1)$$

где n' – показатель степени зависимости расхода энергии для дробления от начального D до конечного d размера дробимой породы; K – коэффициент зависимости затрат энергии от вида породы; Q – производительность дробления, м³/ч.

При подстановке различных показателей n' в формулу (2.1), она преобразуется в выражения, соответствующие различным гипотезам по теории дробления [44].

При $n'=2$ получается формула (2.2), соответствующая гипотезе Риттингера. Он предположил, что работа, затрачиваемая на дробление, пропорциональна вновь обнаженной поверхности в дробимом материале. По гипотезе Риттингера, при дроблении твердых тел на первом месте стоят такие деформации, при которых материал разрушается по плоскостям раскола. В связи с этим необходимая для дробления энергия расходуется на образование и развитие трещин. Риттингер не учитывает затраты энергии на упругую деформацию кусков породы.

$$N_1 = K_1 \frac{i - 1}{D} Q, \quad (2.2)$$

где D – начальный диаметр дробимой породы, м; K_1 – коэффициент зависимости затрат энергии от вида породы; Q – производительность дробления, м³/ч; i – степень дробления.

При $n'=1,5$ получается формула (2.3), соответствующая гипотезе Бонда, которая взята за основу в [43]. Гипотеза Бонда является эмпирической зависимостью, выведенной на основании анализа результатов периодического измельчения большого числа руд.

$$N_2 = K_2 \frac{\sqrt{i} - 1}{\sqrt{D}} Q, \quad (2.3)$$

где D – начальный диаметр дробимой породы, м; K_2 – коэффициент зависимости затрат энергии от вида породы; Q – производительность дробления, м³/ч; i – степень дробления.

При $n'=1$ получается формула (2.4), соответствующая гипотезе Кирпичева-Кика. Гипотеза Кирпичева-Кика утверждает, что энергия деформации пропорциональна объему деформируемого тела и позволяет оценить предельное значение энергии упругой деформации, выше которого упругая деформация переходит в необратимую деформацию – разрушение. Эта гипотеза не описывает поведение кусков породы в запредельном состоянии.

$$N_3 = K_3 \lg i Q, \quad (2.4)$$

где K_3 – коэффициент зависимости затрат энергии от вида породы; Q – производительность дробления, м³/ч; i – степень дробления.

Предложенные выше гипотезы Риттингера, Кика-Кирпичева и Бонда, устанавливающие взаимосвязь затрат энергии и крупности при разрушении, содержат различные коэффициенты пропорциональности. По сути, эти гипотезы выведены для упрощенных схем разрушения, не учитывают развитие трещин в напряженно-деформированном состоянии материала и другие физические явления при разрушении. В связи с этим перечисленные законы не подходят для количественных расчетов работы дробления и крупности продукта. Гипотезы Риттингера, Кирпичева-Кика и Бонда можно применять для качественного анализа процесса дробления в дробилке или для прогноза производительности дробилки по опытным данным, полученным для другой дробилки для той же горной породы.

Зарубежные заводы изготовители предлагают рассчитывать мощность по гипотезе Бонда. Для этого определяют индекс «чистой» работы W_i для конкретной горной породы с помощью специального разработанного испытания дробимости 30-40 кусков диаметром 50-75 мм. Порода дробится в результате воздействия двух встречных молотов, падающих, как маятники, и ударяющими кусок. Индекс «чистой» работы W_i , определенный по данным, полученным в результате испытания, имеет размерность «киловатт-час на тонну».

Работа дробления тонны породы в дробилке по данной теории определяется по формуле (2.5).

$$W = 0,75 \left(\frac{10W_i}{\sqrt{B_{\Pi}}} - \frac{10W_i}{\sqrt{B_{\text{исх}}}} \right), \quad (2.5)$$

где W_i – индекс «чистой» работы, (кВт·ч/кор.т)мкм^{-0,5}; B_{Π} – крупность дробленого продукта (принимается применительно к размеру выходной щели дробилки), мкм; $B_{\text{исх}}$ – крупность исходного материала (в расчетах принимается $B_{\text{исх}} = (0,5 \dots 0,67B)$), мкм; B – ширина приемного отверстия дробилки.

Весьма мягкие горные породы имеют индекс «чистой» работы менее 9 (кВт·ч/кор.т)мкм^{-0,5}, а весьма крепкие – более 26 (кВт·ч/кор.т)мкм^{-0,5}.

Потребляемая дробилкой мощность определяется по формуле (2.6).

$$N = WQ', \quad (2.6)$$

где Q' – производительность дробилки по питанию, т/ч.

В [43] на основании экспериментальных данных была разработана формула (2.7) для практических расчетов привода щековых дробилок.

$$N = 1,1E_iK_M \frac{\sqrt{i} - 1}{\sqrt{D}} Q\gamma, \quad (2.7)$$

где E_i – энергия, затрачиваемая на дробление тонны породы при уменьшении крупности от максимальной до 1 мм, кВт·ч/т; K_M – коэффициент масштабного фактора, характеризующий изменение E_i с изменением крупности материала; γ – насыпная масса породы, т/м³.

Значение E_i авторы рекомендуют принимать по специальным таблицам в зависимости от вида горной породы и месторождения. Значение E_i колеблется в довольно широких пределах: для гранита Могилянського месторождения $E_i = 4,56$ кВт·ч/т; для гранита Житомирського месторождения $E_i = 6,94$ кВт·ч/т; для диорита Клесовського месторождения $E_i = 8,51$ кВт·ч/т. Кроме того, в работах [51–53] говорится о различии необходимой энергии дробления для одной и той же породы в зависимости от ее относительной деформации.

Рационально выбирать электропривод по результатам теоретического расчета, учитывающего конкретные условия эксплуатации, но на практике с

дробилкой поставляется универсальный двигатель, и для его расчета принимают наибольшее значение энергетического показателя $E_i = 8 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ [43].

Коэффициент масштабного фактора отражает увеличение предела прочности отдельных кусков материала по мере уменьшения их размеров в связи с тем, что разрушение кусков зарождается в зонах, имеющих различные дефекты (трещинами, раковинами и др.), а с уменьшением размеров кусков удельное число таких дефектов уменьшается.

Институт «Механобр» рекомендует использовать формулу (2.8) для определения потребляемой мощности [3].

$$N = 1,5P_{уд}LH(b_2 - b_1)n, \quad (2.8)$$

где $P_{уд}$ – удельная энергия дробления, для дробилок с простым движением щеки принимают $P_{уд}=5 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3$, дробилок со сложным движением $P_{уд}=4,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3$; L – длина камеры дробления, м; H – высота подвижной щеки, м; b_2 – максимальная ширина выходной щели, м; b_1 – минимальная ширина выходной щели, м.

Беренов [82] предложил использовать эмпирическое выражение (2.9) для определения необходимой мощности электропривода.

$$N = cLB, \quad (2.9)$$

где L – длина приемного отверстия дробилки, см; B – ширина приемного отверстия дробилки, см; c – коэффициент, определяемый в зависимости от размеров приемного отверстия.

$$c = \frac{1}{60} \text{ – для дробилок размером меньше } 250 \times 400 \text{ мм;}$$

$$c = \frac{1}{100} \text{ – для дробилок размером меньше от } 250 \times 400 \text{ мм до } 900 \times 1200 \text{ мм;}$$

$$c = \frac{1}{120} \text{ – для дробилок размером больше } 900 \times 1200 \text{ и более.}$$

Бонвич предлагал похожие эмпирические выражения, формулу (2.10) для крупного дробления, (2.11) для среднего и (2.12) для мелкого.

$$N = \frac{LB}{200}, \quad (2.10)$$

$$N = \left(\frac{LB}{100} \cdots \frac{LB}{150} \right), \quad (2.11)$$

$$N = \frac{LB}{60}. \quad (2.12)$$

Эмпирические выражения представляют лишь усредненные значения, и могут применяться только для грубо приближенных расчетов [44].

Профессором Л.Б. Левенсоном была предложена формула (2.13) для определения необходимой для дробления мощности.

$$N = \frac{\sigma_{сж}^2 n L (B^2 - b^2)}{2340000E}, \quad (2.13)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности породы на сжатие, Па; n – частота вращения эксцентрикового вала, c^{-1} ; b – ширина выходной щели, м; E – модуль упругости дробимой породы, Па.

Формула, предложенная В.А. Олевским основана на результатах испытаний дробилок. Он предложил определять необходимую мощность по выражению (2.14) [67].

$$N = P_m e \frac{n}{102 \cdot 60\eta}, \quad (2.14)$$

где P_m – средняя величина усилия дробления, т; e – расстояние, на котором приложена сила, м; η – механический КПД дробилки.

Подставив в формулу (2.14) экспериментальные данные и преобразовав полученное выражение, В.А. Олевский получил формулу (2.15) для дробилок с простым движением щеки и для дробилок со сложным движением щеки – формулу (2.16).

$$N = 11,7mLHsn, \quad (2.15)$$

$$N = 12LHrn, \quad (2.16)$$

где m – конструктивный коэффициент, равный 0,5-0,6; s – ход щеки в нижней зоне, м; r – эксцентриситет, м.

Все вышеизложенные теории и выражения имеют различные теоретические основы, но ни одна из них не учитывает изменение геометрии дробящих плит вследствие изнашивания. В то время, как степень износа плит напрямую влияет на усилие дробления поскольку от радиуса притупления выступов дробилки зависит площадь контакта плиты с породой и характер ее разрушения.

2.3 Разработка математической модели дробления породы в дробилке СМД-118, учитывающей износ выступов плит в процессе эксплуатации

За основу разрабатываемой модели взята теория, предложенная В.А. Олевским в работе [67], как основанная на исследовании работы щековой дробилки и включающая в себя такие важные параметры, как размеры дробилки, частоту вращения вала и механические характеристики дробимой породы.

Если представить дробилку СМД-118 в виде схемы раскалывания по В.А. Бауману (рисунок 2.6) с шириной приемного отверстия $B=1200$ мм, шириной выходной щели $b=155$ мм (среднее для дробилки этого типа), высотой камеры дробления $H=2700$ мм, то в нее можно уместить пять кусков цилиндрической формы 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) [64].

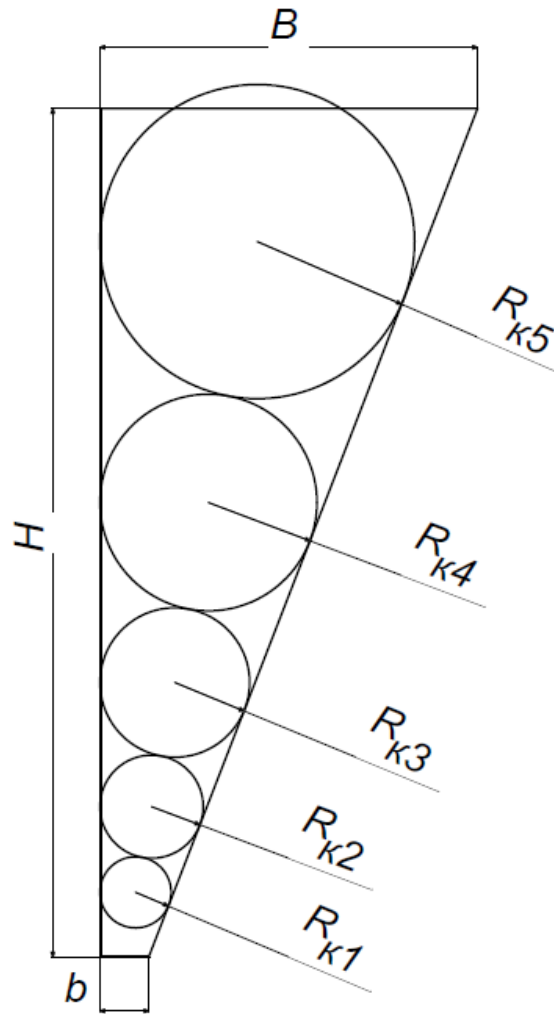


Рисунок 2.6 – Схема раскалывания кусков в щековой дробилке СМД-118

Каждому из пяти кусков соответствует усилие разрушения, определяемое по формуле (2.17).

$$P_i = S_0 q_i = 2R_{ki} q_i L, \quad (2.17)$$

где S_0 – удельное q_i – удельное давление разрушения куска породы, Па; L – длина камеры дробления, для дробилки СМД-118 $L=1500$ мм.

Напряжение разрушения в дробилке определяли по формуле (2.18).

$$q_i = k\sigma_p, \quad (2.18)$$

где σ_p – предел прочности породы на растяжение, Па; k – относительное разрушающее напряжение, характеризующее зависимость удельного давления

разрушения от относительного радиуса $R_{отн}$, который является отношением радиуса выступов дробящей плиты $R_в$ и радиусом куса породы $R_к$, $k = f(R_{отн})$.

Равнодействующая усилий дробления приложена к подвижной щеке в точке, соответствующей середине камеры дробления по высоте [67]. Суммарное усилие дробления для СМД-118 определяли по формуле (2.19).

$$P(R_{отн}) = P_1(R_{отн}) + P_2(R_{отн}) + P_3(R_{отн}) + P_4(R_{отн}) + P_5(R_{отн}). \quad (2.19)$$

Потребляемую мощность тогда можно представить выражением (2.20), а работу дробления за оборот вала – выражением (2.21).

$$N(R_{отн}) = m \frac{f_0 s \beta \vartheta n}{60 \eta} \sum 2R_{ки} L_i \sigma_p \cdot k(R_{отн}), \quad (2.20)$$

$$A_{др}(R_{отн}) = m \frac{f_0 s \beta \vartheta}{\eta} \sum 2R_{ки} L_i \sigma_p \cdot k(R_{отн}), \quad (2.21)$$

где m – коэффициент, учитывающий отношение длины хода щеки в точке приложения равнодействующей усилий (середина камеры дробления) к ходу щеки внизу плиты, принимается равным 0,5 [67]; f_0 – коэффициент заполненности дробилки, можно ориентировочно принять равным 0,25 [67]; β – коэффициент, характеризующий отношение эффективного усилия дробилки к максимальному усилию, для дробилок с простым движением щеки принимается равным 0,2 [67]; γ' – коэффициент, учитывающий энергию, передаваемую маховиком в течение одного оборота, принимается равным 0,5 [45, 67, 74]; n – частота вращения эксцентрикового вала, об/мин; η – механический КПД, учитывающий потери в приводном и передаточном механизме (для щековых дробилок можно принять равным 0,75); s – ход щеки, для дробилки СМД-118 примем равным 40 мм.

Выведенное выражение (2.20) позволяет оценивать влияние степени износа, характеризуемой относительным радиусом $R_{отн}$, на потребляемую дробилкой мощность N , что необходимо для определения эффекта от увеличения износостойкости плит на потребляемую дробилкой мощность и работу дробления за оборот вала.

2.4 Разработка модифицированной конфигурации рифления дробящей плиты дробилки СМД-118

При разработке модифицированной конфигурации рифления плит, обеспечивающей снижение работы дробления, 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. Согласно схеме раскалывания (рисунок 2.6) предложена конфигурация рифления неподвижной и подвижной дробящей плиты (рисунок 2.7).

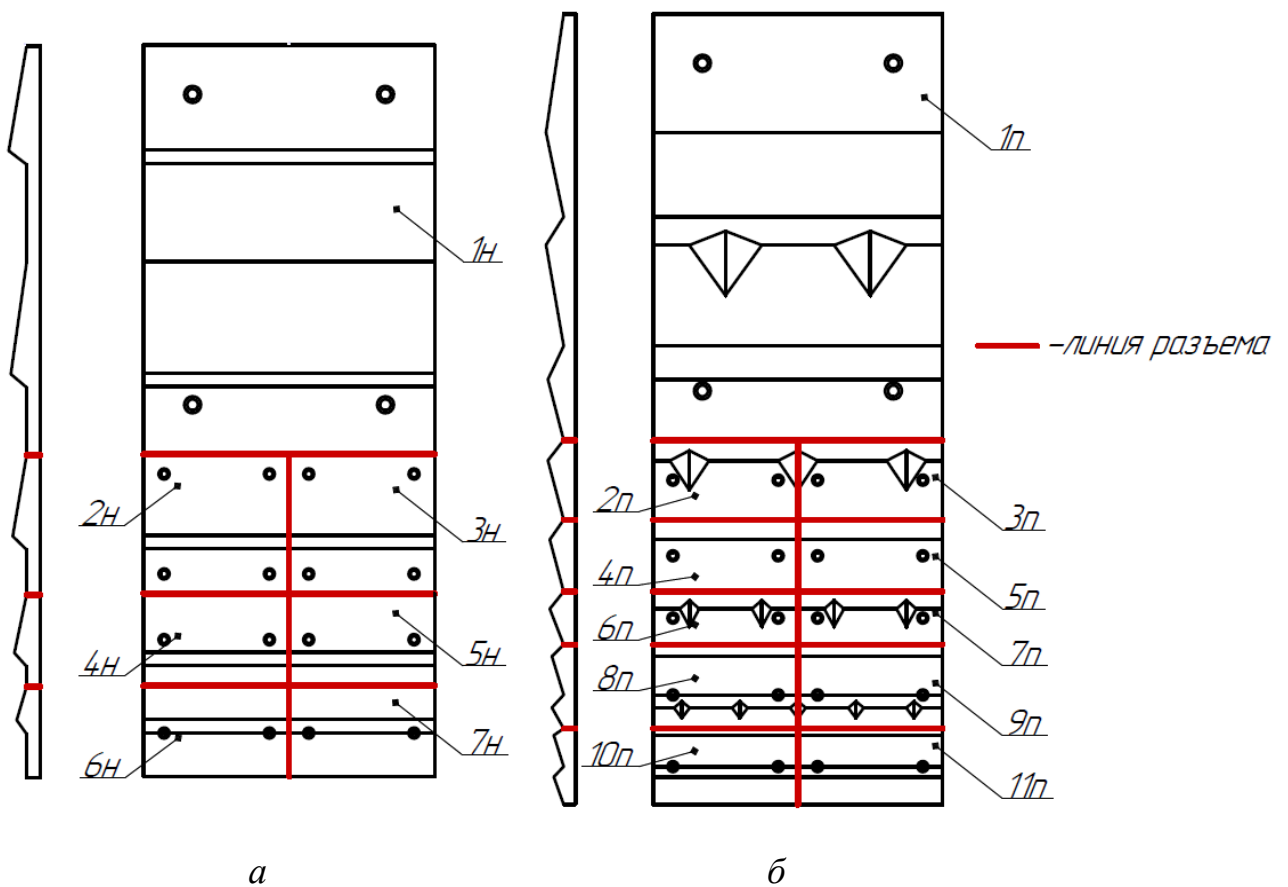


Рисунок 2.7 – Неподвижная (а) 7-ми секционная и подвижная (б) 11-ти секционная дробящие плиты с модифицированной конфигурацией рифления (1н-7н, 1п-11п - секции)

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.

Для ответа на вопрос, не снизится ли скорость разгрузки продукта при применении плит с модифицированной конфигурацией рифления моделировался процесс дробления одинаковых кусков гранита в дробилке СМД-118. Моделирование проводилось в программе *Rocky DEM* с построением зависимости выхода продукта дробления от времени работы дробилки. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.8, где красный график соответствует выходу продукта из дробилки со стандартными плитами, а синий – с модифицированной конфигурацией рифления. Количество времени, затраченного на дробление кусков представлено в таблице 2.3.

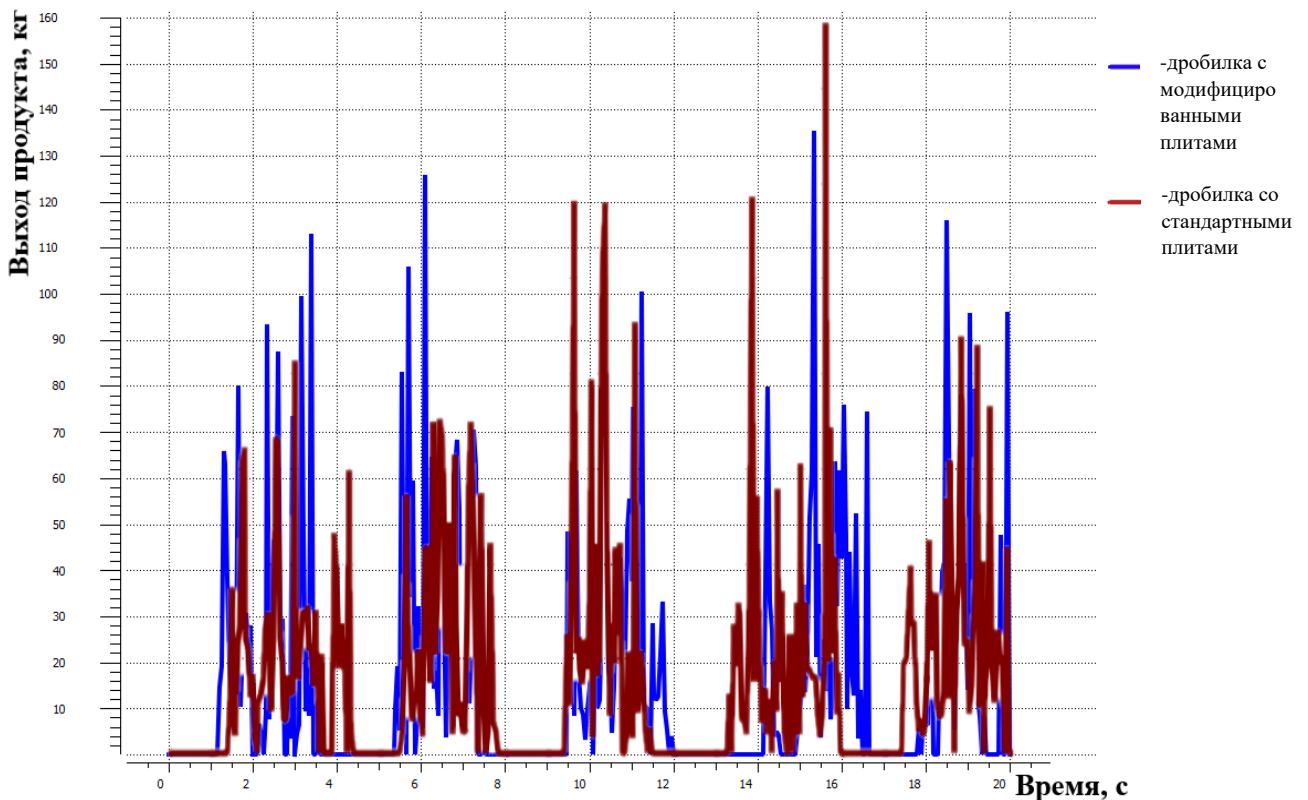


Рисунок 2.8 – Выход продукта дробления в ходе работы щековой дробилки

Таблица 2.3 – Количество времени, затраченного на дробление куска

№ куска	Время дробления куска в дробилке со стандартными плитами, с	Время дробления куска в дробилке с плитами с модифицированной конфигурацией рифления, с
1	3,0	2,5
2	2,5	2,0
3	2,0	2,5
4	2,5	2,5
5	2,5	2,5
Среднее	2,5	2,4

Как видно из полученных данных, применение дробящих плит с модифицированной конфигурацией рифления не оказывает негативного влияния на скорость разгрузки продукта по сравнению с дробилкой с дробящими плитами стандартной конфигурации.

Плиты предлагается выполнять разъемными для облегчения изготовления плит, а также снижения стоимости замены их изношенных элементов.

Работа дробления в дробилке с модифицированной конфигурацией рифления определялась с помощью выражения (2.21). Для его решения потребовалась зависимость относительного разрушающего напряжения от относительного радиуса, которая была установлена при разрушении фрагментов гранита на разработанном экспериментальном стенде.

2.5 Анализ существующих методов испытаний пород на прочность

Сегодня принято выделять три главных способа расчета степени крепости горных пород при линейном растяжении, сжатии. Их описание представлено в ГОСТ 21153.3-85 и 24941-81 [25, 26].

Во время применения указанного способа анализа осуществляется процедура изучения образцов, имеющих вид цилиндра, призмы. Каждый из указанных экспериментов – измерение силы разрушения, возникающей при продольном растяжении образца через обоймы из стали устройства, необходимого для загрузки.

Для осуществления эксперимента нужно воспользоваться оборудованием, инструментарием, материалами, соблюдать ГОСТ 21153.0-75. Кроме того еще понадобятся:

- Станок обдирочно-шлифовальный различной конструкции. В этом механизме должен быть установлен диск плоской формы, материалом для которого стал чугун. При этом диск должен вращаться вокруг оси вертикали. Кроме указанного агрегата можно использовать механизм типа 31710 для обработки поверхностей деталей абразивом или токарный станок;
- Машины для испытаний (прессы). Максимальное усилие, развиваемое прессом, должно на треть превышать предполагаемый предел прочности испытуемой породы;
- Нагрузочное устройство, которое обеспечивает центральное и линейное приложение растягивающего усилия к образцу. При этом должна быть заблокирована передача усилий, которые вызывают другие типы деформации.

Для закрепления образца в установке применяются материал для сцепления с обоймами, что позволяет осуществить сразу центрирование образца в обоймах и обеспечить их соосность (рисунок 2.9).

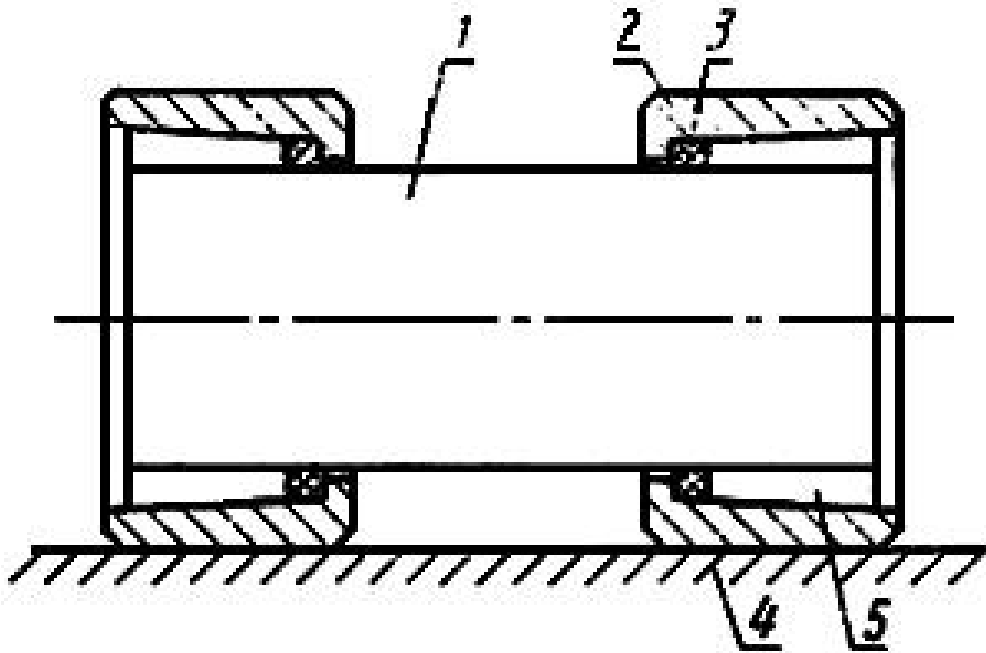


Рисунок 2.9 – Схема установки для определения предела прочности цилиндрических и призматических образцов прямым растяжением: 1 – образец; 2 – обойма; 3 – центрирующее кольцо; 4 – направляющая; 5 – скрепляющий материал

После того, как материал для скрепления станет твердым, кусок породы, установленный в нагрузочное устройство, переносится в пресс. Затем на него воздействуют постепенно до полного разрушения. Скорость приложения нагрузки составляет 1-5 МПа/с.

Полученная величина учитывается в килоньютонах. Для ее записи используется силоизмеритель прессы.

Для определения крайнего значения надежности в МПа по любому образцу при линейном растяжении используется формула (2.22).

$$\sigma_p = \frac{P_0}{S_0} \cdot 10, \quad (2.22)$$

где P_0 - разрушающая сила, кН; S_0 - площадь сечения испытуемого образца, см².

Суть второго способа – разрушение образцов в виде цилиндра за счет сжатия по образующей. Он применяется при осуществлении испытаний массового характера (рисунок 2.10).

Описанный вариант представляет собой проведение экспериментов в отношении цилиндрических кусков породы. Каждое из таких испытаний – фиксация величины силы разрушения, для приложения которой использовались встречно к образующим образца направленные плиты из стали, клинья нагрузочного оборудования. Их применяют на диаметральной сечении куска породы.

Для проведения испытаний используется оборудование, инструментарий и материалы по ГОСТ 21153.0-75. Данный список можно еще дополнить:

- Оборудованием для изготовления кусков породы необходимой формы и размера;
- Стальной оснасткой в виде плит и клиньев, соответствующих по своим параметрам ГОСТ 2789-73;
- Цилиндрический шарнир, необходимого при отсутствии у прессы верхней подвесной плиты, располагающегося между опорой прессы и плитой.

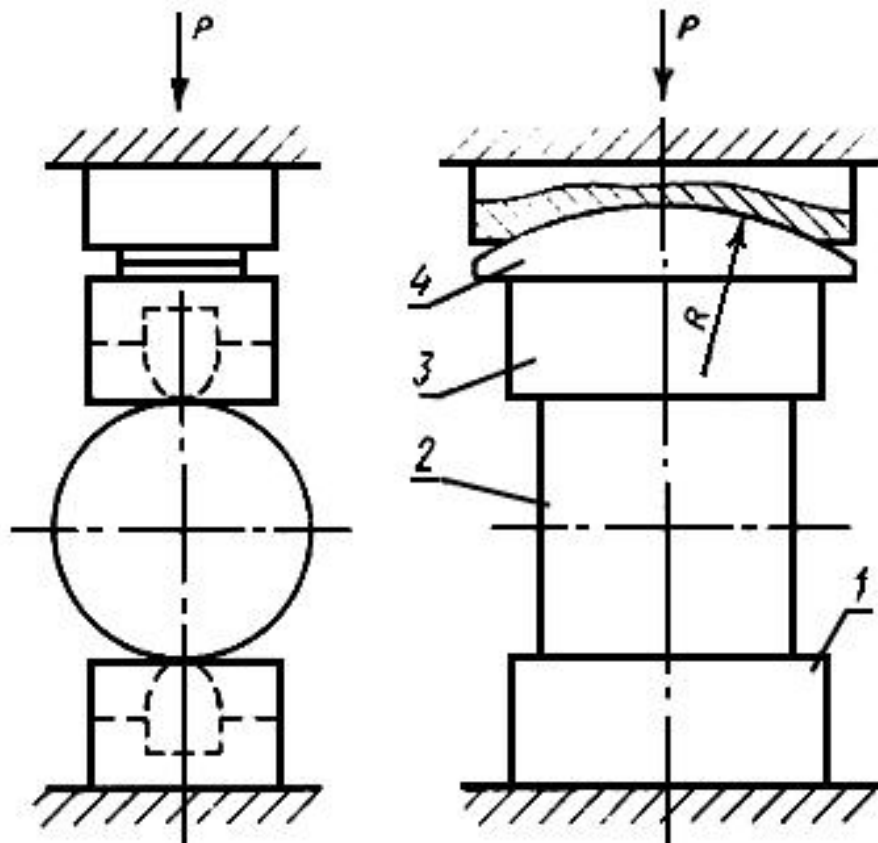


Рисунок 2.10 – Схема установки для определения предела прочности цилиндрических образцов сжатием по образующим: 1 – нижняя плита (нижний клин); 2 – образец; 3 – верхняя плита (верхний клин); 4 – сегмент

Для определения крайнего значения надежности в МПа по любому образцу при одноосном растяжении также используется формула (2.22).

Третий способ подразумевает разрушение образцов любой формы. Для этого используются встречные сферические инденторы. Описанный метод получил распространение при проведении исследований горных пород в лабораториях, полевых испытаний. Его главная задача – выявление предельного значения прочности при одноосном растяжении перпендикулярно к самому слабому сечению.

Данный способ представляет собой определение силы разрушения, которая была приложена к образцу при помощи встречно направленных сферических инденторов, выполненных из стали.

Для проведения научных изысканий нужны устройства, инструментарий и материалы по ГОСТ 21153.0-75, дополнительные элементы:

- Техника для получения образцов, оборудование для шлифовки и заточки с ручным и электроприводом, молоток для осуществления геологических работ, тиски, набор напильников, используемый в слесарных целях;
- Прессы;
- Оснастка (рисунок 2.11), устанавливаемая на опорную плиту прессы. Оснастка позволяет осуществить линейное приложение нагрузок к образцу за счет сферических инденторов. Их диаметр должен составлять 15 мм, твердость 60 HRC по Роквеллу.

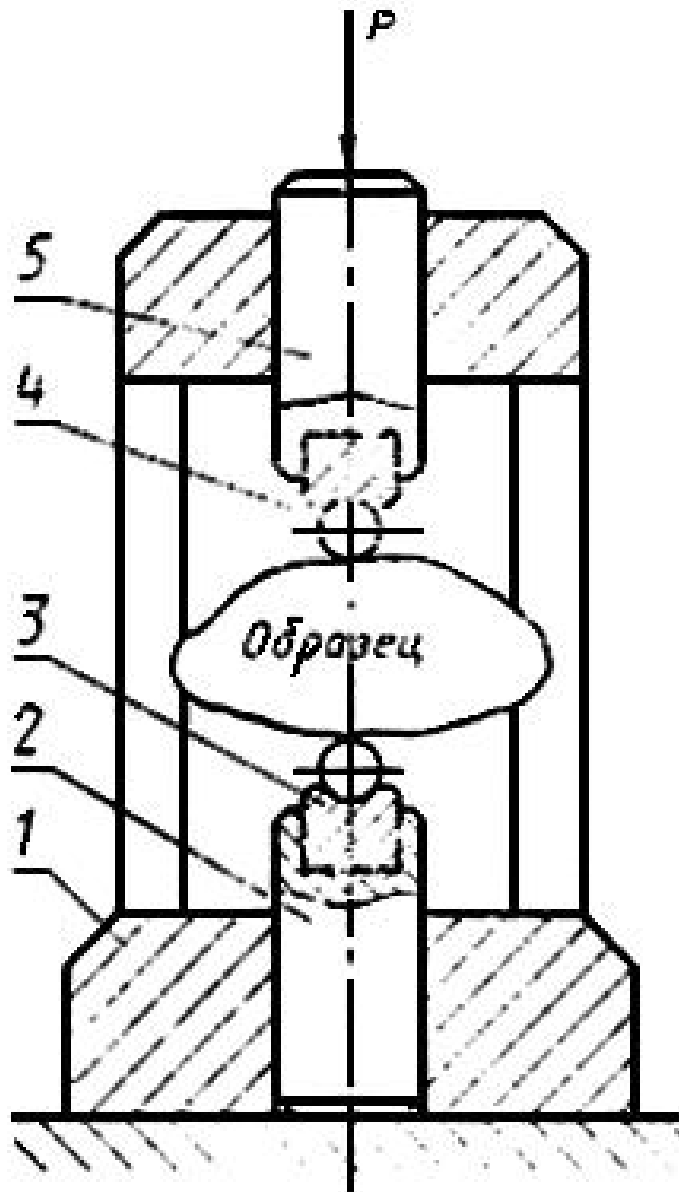


Рисунок 2.11 – Схема установки для определения предела прочности образцов произвольной формы встречными сферическими инденторами: 1 – корпус; 2 – нижний шток; 3 – вкладыш; 4 – индентор; 5 – верхний шток

Размеры кусков испытуемой горной породы, места приложения нагрузок от встречных инденторов должны соответствовать определенным условиям: площадь разрыва должна находиться в интервале от 3 до 100 см². Оптимальное значение - 15 см². Площади в одной выборке не должны отличаться друг друга более чем 2 раза. Для пометки мест нагружения потребуется воспользоваться карандашом.

Расстояние от оси нагружения образца до самой близкой точки поверхности должно быть больше 0,5 высоты самого образца [7].

Ознакомиться с самыми оптимальными схемами установки образцов можно на рисунке 2.12.

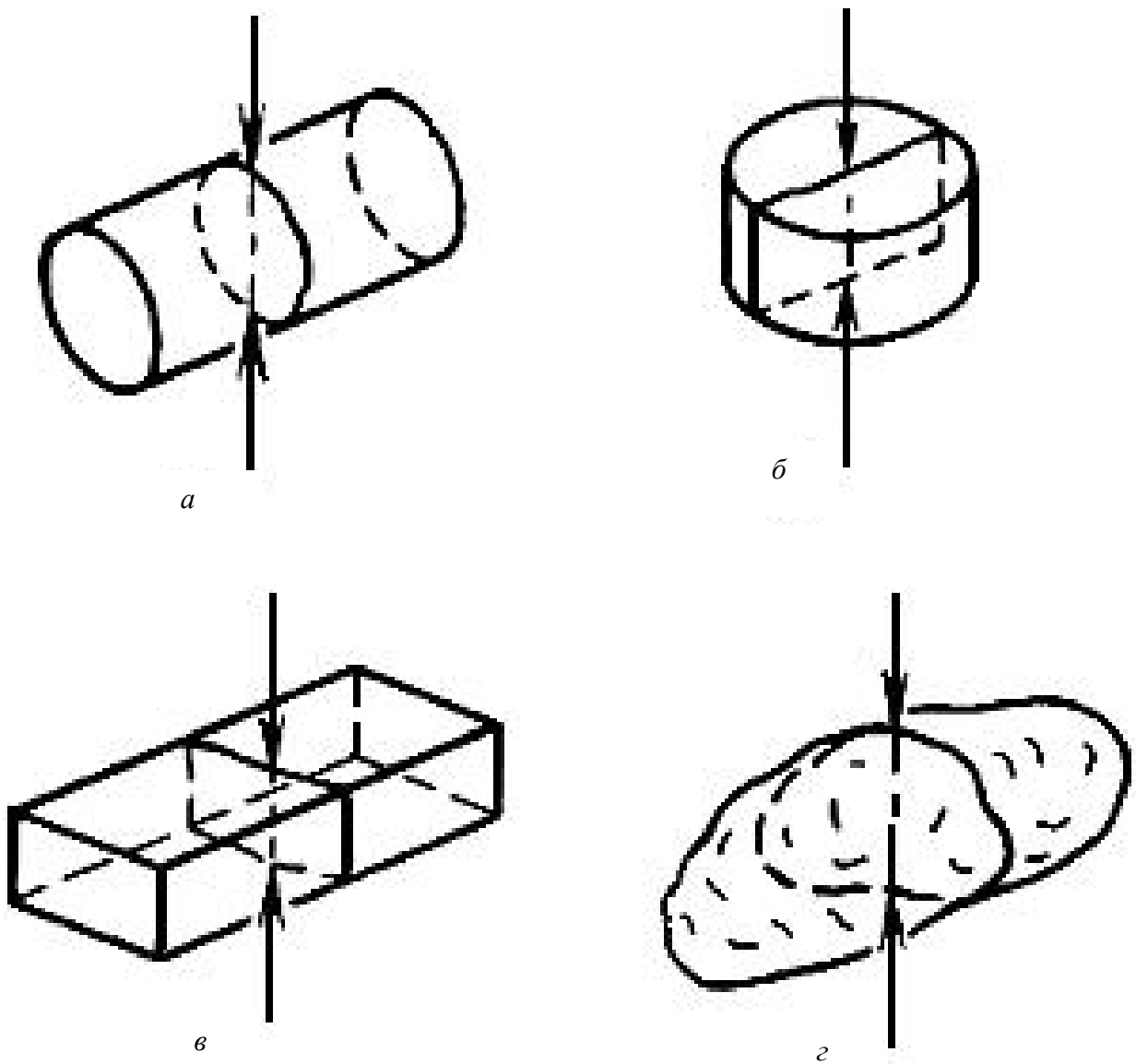


Рисунок 2.12 – Схема установки образцов для испытания: *а* – цилиндрический образец, поперечная установка; *б* - цилиндрический образец, продольная установка; *в* – образец в форме параллелепипеда; *г* – образец неправильной формы

Для определения прочности породы в МПа по образцу любой формы при линейном растяжении используется формула (2.23).

$$\sigma_p = 7,5 \frac{P_0}{S_0} \cdot K', \quad (2.23)$$

где K' - безразмерный масштабный коэффициент, который равен 1, если $S_0 = (15 \pm 3) \text{ см}^2$.

В остальных случаях коэффициент определяется по таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Значения безразмерного коэффициента K' в зависимости от площади поперечного сечения образца S_0

$S_0, \text{ см}^2$	3	4	5	8	10	15	20
K'	0,67	0,72	0,76	0,85	0,90	1,00	1,08
$S_0, \text{ см}^2$	30	35	40	45	50	80	100
K'	1,19	1,24	1,28	1,32	1,35	1,52	1,61

Недостатком всех указанных методов является то, что все они не позволяют оценивать влияние величины радиуса притупления индентора внедрения на усилие разрушения. Поэтому потребовалось разработать метод, который бы учитывал указанное обстоятельство.

2.6 Методика испытания образцов породы для определения зависимости разрушающего усилия от радиуса притупления выступа плит

Исходя из заключения, что разрушение породы в щековой дробилке происходит преимущественно раскалыванием в результате сжатия, экспериментальные исследования проводились при испытании образцов породы на одноосное сжатие с использованием универсальной испытательной машины Zwick, снабженной специально разработанной оснасткой (рисунок 2.13), оснащенной инденторами с различным радиусом притупления. За основу разработанной методики испытаний был взят второй метод испытаний, описанный в пункте 2.5 с модернизированной оснасткой. Разработанная оснастка позволяет производить разрушение образцов породы при схеме нагружения близкой к той, которая имеет место в нижней части камеры дробления щековой дробилки СМД-118.

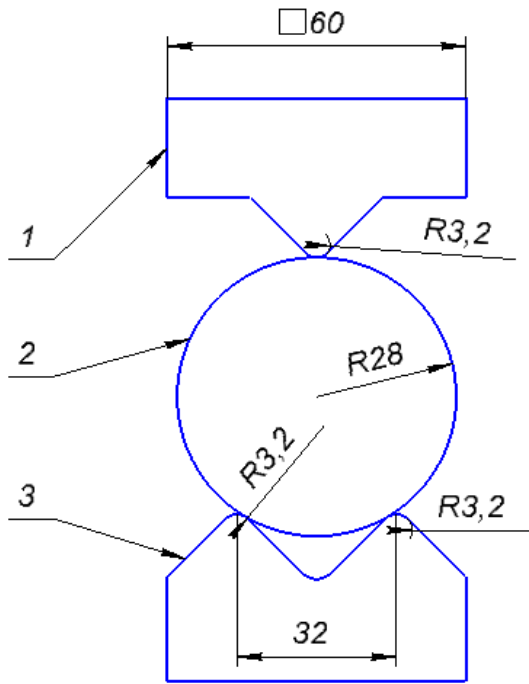


Рисунок 2.13 – Оснастка экспериментального стенда по изучению влияния радиуса притупления индентора на усилие и энергоёмкость процесса разрушения гранита: 1 – индентор, 2 – фрагмент породы, 3 – вставка

Для моделирования процесса раскалывания гранитных кусков различного радиуса R_k ($R_{k1}=113$ мм, $R_{k2}=164$ мм, $R_{k3}=238$ мм, $R_{k4}=345$ мм, $R_{k5}=500$ мм) выступами рифления дробилки постоянного радиуса R_b (принимался равным 20 мм) эксперименты проводились с использованием инденторов с радиусами $R_u = 3,2; 6; 8; 10; 12$ мм, что обеспечивало при постоянном радиусе фрагмента $R_{фр} =$ равенство относительных радиусов $R_{отн}$ выступов и индентора (2.24).

$$R_{отн} = \frac{R_b}{R_k} = \frac{R_u}{R_{фр}}. \quad (2.24)$$

Для обеспечения применимости получаемых экспериментальных зависимостей для расчета параметров дробилки вводился безразмерный параметр k_i - относительное разрушающее напряжение (2.25):

$$k_i = \frac{q}{\sigma_p}, \quad (2.25)$$

где q - разрушающее напряжение, определяемое как отношение экспериментально установленного усилия разрушения P фрагмента к площади вновь образованной поверхности S (~ 22 см²), σ_p - предел прочности фрагментов на растяжение.

В качестве разрушаемой горной породы – образцов 2 рисунка 2.13 – использовались керны гранита Выборгского гранитного массива (30-35 % кварц, 25-30 % плагиоклаз, 30-35 % калиевый полевой шпат, 5-10 % биотит (рисунок 2.14) с пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ ~ 200 МПа и пределом прочности на растяжение σ_p ~ 10 МПа.

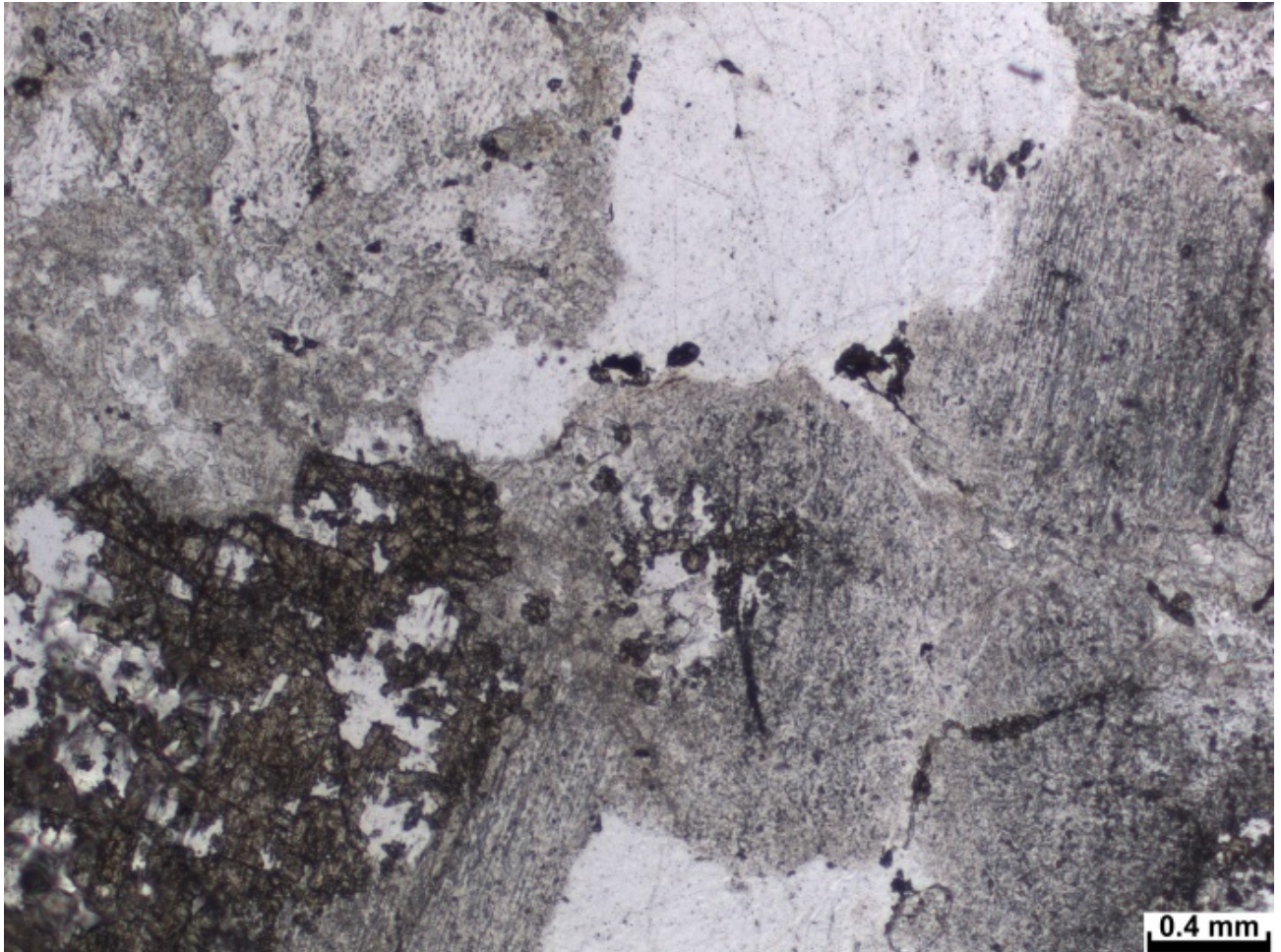


Рисунок 2.14 – Вид зерен кварца (светлый) и плагиоклаза (серый) в структуре гранитных фрагментов

Целью экспериментов являлось получение семейства кривых "усилие сжатия" - "глубина внедрения" с фиксацией усилия P , соответствующего разрушению фрагмента, используемого для вычисления относительного разрушающего напряжения по формуле (2.25).

Вид полученных кривых иллюстрирует рисунок 2.15.

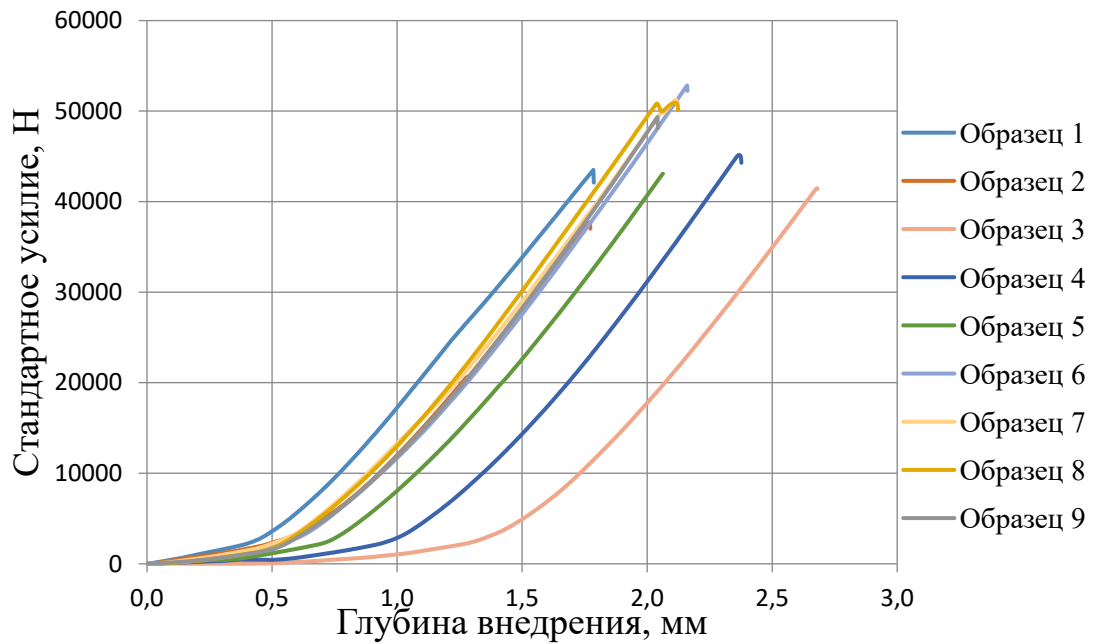


Рисунок 2.15 – Кривые зависимостей усилия от глубины внедрения, полученные в результате эксперимента

Установленные значения относительного напряжения разрушения, как функции от относительного радиуса притупления (отношение радиуса притупления индентора к радиусу образца) представлены в таблице 2.5 и на рисунке 2.16.

Таблица 2.5 – Результаты испытаний образцов на разрушение

№ образца	Радиус индентора R_u , мм	Усилие разрушения P , Н	Относительный радиус притупления $R_{отн}$	Относительное напряжение разрушения k
1	3,2	43502	0,114	1,942
2	3,2	37730	0,114	1,684
3	6	41478	0,214	1,852
4	8	45163	0,286	2,016
5	8	43079	0,286	1,923
6	10	52829	0,357	2,358
7	10	51260	0,357	2,288
8	12	50899	0,429	2,272
9	12	49341	0,429	2,203

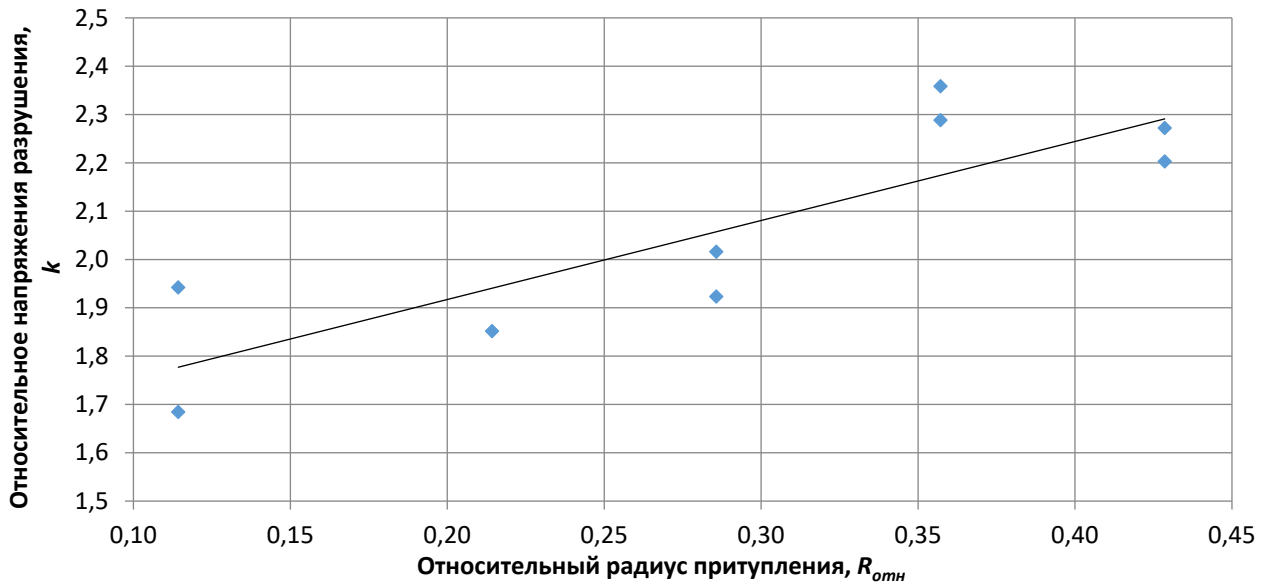


Рисунок 2.16 – Зависимость относительного напряжения разрушения k от относительного радиуса притупления $R_{отн}$

Как следует из вида полученных зависимостей, с увеличением радиуса притупления (относительного радиуса притупления) индентора усилие, потребное для разрушения, растет согласно зависимости (2.26): 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 %.

$$k_i = 1,6 \cdot R_{отн} + 1,6. \quad (2.26)$$

2.7 Определение потребляемой дробилкой СМД-118 мощности при дроблении гранита

Учитывая (2.20), (2.21), (2.26), потребляемую мощность и работу дробления дробилки СМД-118 можно представить в виде выражений (2.27) и (2.28):

$$N(R_{отн}) = m \frac{f_0 s \beta \vartheta n}{60 \eta} \sum 2R_{ki} L_i \sigma_p \cdot (1,6 \cdot R_{отн i} + 1,6), \quad (2.27)$$

$$A_{др}(R_{отн}) = m \frac{f_0 s \beta \vartheta}{\eta} \sum 2R_{ki} L_i \sigma_p \cdot (1,6 \cdot R_{отн i} + 1,6). \quad (2.28)$$

Установленные (2.27), (2.28) значения мощности N , потребляемой дробилкой, и работы дробления кусков гранита $A_{др}$ для плит с предлагаемой конфигурацией рифления, отличающейся поперечным расположением выступов с уменьшающимся расстоянием между ними, что обеспечивает разрушение каждого

куска при нагрузке в трех точках, в сравнении со значениями N , $A_{др}$ для плит стандартной конфигурации, вычисленные по формулам различных авторов, представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – 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 (2.14)	144,4	50,9
	Левенсона (2.13)	158,2	55,8
	Института Механобр (2.8)	165,2	58,3
	Среднее значение	155,9	55,0
Модифицированный	(2.27), (2.28)	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.

В связи с необходимостью прогнозирования необходимой для дробления энергии по мере изнашивания дробящих плит представляет интерес изменение значения N , $A_{др}$ дробилки по мере изнашивания выступов ее дробящих плит. 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 , представляющей из себя отношение скорости изнашивания на выбранном участке плиты к максимальной скорости изнашивания в камере дробления, дробилку по высоте можно, условно, разделить на три зоны: нижняя (на рисунке 2.17 выделена красным цветом) - зона интенсивного изнашивания, $j_1 = 1$; средняя (желтая) – зона умеренного изнашивания, $j_2 = 0,5$; верхняя (зеленая) – зона наименьшего изнашивания, $j_3 = 0,1$. Тогда, в соответствии с рисунком 2.17, радиусы выступов $R_{v1...5}$ подчиняются зависимостям (2.29), (2.30) и (2.31):

$$R_{B1..2} = f(t) = R_{B0} + j_1(R_{B1..2max} - R_{B0})\frac{t}{T}, \quad (2.29)$$

$$R_{B3..4} = f(t) = R_{B0} + j_2(R_{B3..4max} - R_{B0})\frac{t}{T}, \quad (2.30)$$

$$R_{B5} = f(t) = R_{B0} + j_3(R_{B5max} - R_{B0})\frac{t}{T}, \quad (2.31)$$

где R_{B0} – исходный радиус выступа плиты, 0,003 м; R_{Bmax} – радиус выступа изношенной плиты, для каждого выступа указан в таблице 2.7; t – время работы дробилки, ч; $j_{1..3}$ – коэффициент, определяемый зоной изнашивания по высоте дробилки; T – нормативный срок службы дробящей плиты, ч.

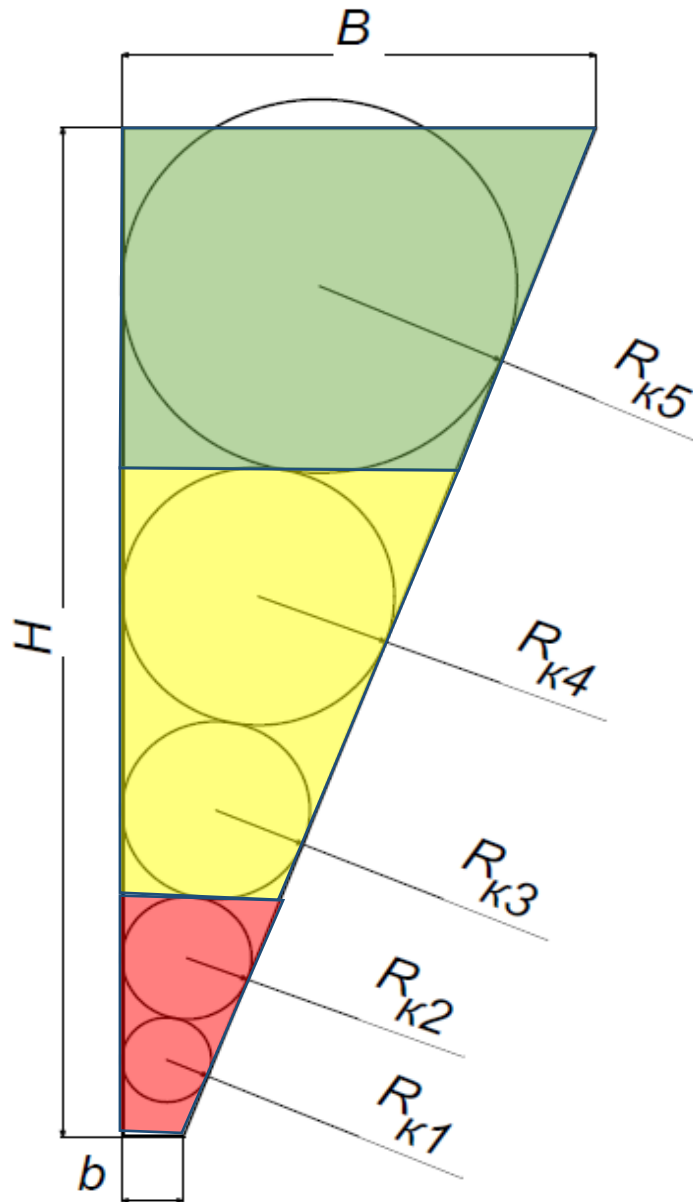


Рисунок 2.17 – Схема распределения зон изнашивания в камере дробления

Таблица 2.7 – Значение радиусов выступов изношенной дробящей плиты

Выступ	Значение, мм
R_{B1}	125
R_{B2}	150
R_{B3}	190
R_{B4}	270
R_{B5}	440

Определить срок службы плиты можно через ресурс дробящей плиты, вычисляемый по методике [68], описываемой выражением (2.32).

$$Q_{\text{рес}} = \frac{(m_{\text{п}} + m_{\text{н}})}{\gamma q_{\text{р}}} k_1 k_2 k_3, \quad (2.32)$$

где $Q_{\text{рес}}$ – количество материала, переработанного плитой, м³; $m_{\text{п}}$ – масса подвижной плиты, для СМД-118 1900 кг; $m_{\text{н}}$ – масса неподвижной плиты, для СМД-118 1340 кг; $q_{\text{р}}$ – удельный расход металла плит, г/т, по таблице 2.8 для дробилки СМД-118 и гранита принимается равным 15 г/т; k_1 – коэффициент, зависящий от конструкции плиты и дробилки, для дробилок с простым движением щеки равен 1,0; k_2 – коэффициент, зависящий от типа плит, для используемых плит по [68] принимается равным 1,0; k_3 – коэффициент, зависящий от материала плит, для плит из стали 110Г13Л равен 1,0. Результат расчета ресурса показывает выражение (2.33).

Таблица 2.8 – Значение удельного расхода металла плит для различных типоразмеров дробилок

Ширина приемного отверстия дробилки, мм	Вид движения щеки	Средневзвешенный предел прочности дробимого материала на сжатие, МПа					
		80	120	160	200	240	300
		Удельный расход металла плит, г/т					
250	Простое	7,0	14	25	39	55	80
	Сложное	17,0	48	61	93	132	190
400	Простое	6,0	11	20	32	45	70
	Сложное	14,0	28	50	77	114	165
600	Простое	5,0	9	17	25	45	55
	Сложное	13,0	21	37	60	83	125
900	Простое	4,0	7	12	19	27	42
1200	Простое	3,0	6	10	15	21	32
1500	Простое	2,5	5	8	11	17	25
2100	Простое	2,0	4	6	9	12	20

$$Q_{\text{рес}} = \frac{(2 \cdot 1,9 + 1,64 + 1,34)}{2,6 \cdot 15 \cdot 10^{-6}} = 173846 \text{ м}^3. \quad (2.33)$$

Таким образом определен ресурс дробилки СМД-118 с литыми плитами. Чтобы привести значение ресурса к сроку службы необходимо определить производительность дробилки по формулам (2.34) и (2.35).

$$V_q = 60nv = 60n \frac{(b_2 + b_1)(b_2 - b_1)}{2tg(\xi)} L, \quad (2.34)$$

$$V_q = 60 \cdot 170 \frac{(0,195 + 0,155)(0,195 - 0,155)}{2tg(19^\circ)} \cdot 1,5 = 311,04 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}, \quad (2.35)$$

где ξ – угол захвата щековой дробилки СМД-118, целесообразно принять равным 19° [43, 57]; b_2 и b_1 – максимальное и минимальное раскрытие выходной щели, для дробилки СМД-118 0,195 м и 0,155 м соответственно, n – частота вращения эксцентрикового вала, для СМД-118 170 об/мин; v – объем призмы выпадения продукта из дробилки, м^3 .

Для определения срока службы плиты использовали формулы (2.36) и (2.37):

$$T = \frac{Q_{\text{рес}}}{V_q}, \quad (2.36)$$

$$T = \frac{173846}{311,04} = 559 \text{ ч}. \quad (2.37)$$

Тогда, выражения (2.27) и (2.28) принимают вид (2.38) и (2.39) соответственно:

$$N(t) = m \frac{f_0 s \beta \vartheta n}{\eta} \sum 2R_{ki} L_i \sigma_p \cdot (1,6 \cdot R_{\text{отн}i}(t) + 1,6), \quad (2.38)$$

$$A_{\text{др}}(t) = m \frac{f_0 s \beta \vartheta}{\eta} \sum 2R_{ki} L_i \sigma_p \cdot (1,6 \cdot R_{\text{отн}i}(t) + 1,6). \quad (2.39)$$

После подстановки значений параметров дробилки СМД-118 в (2.38), (2.39) были получены зависимости, представленные на рисунке 2.18.

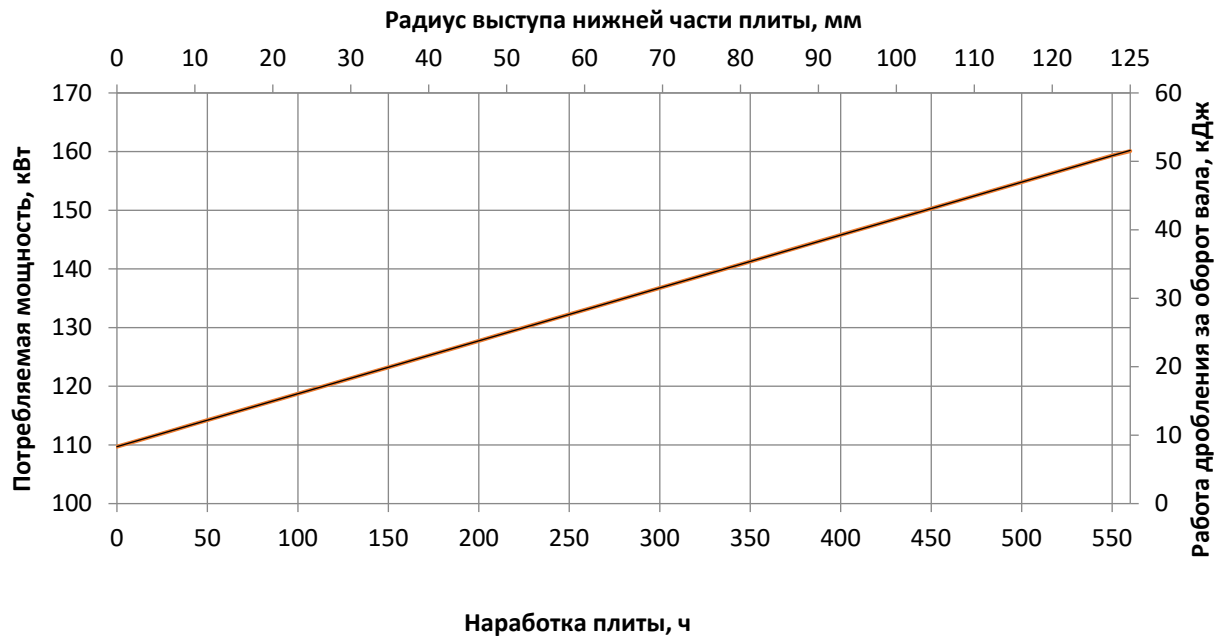


Рисунок 2.18 – Изменение мощности потребляемой дробилкой СМД-118 и работы дробления за оборот вала по мере эксплуатации плит из-за изнашивания их выступов

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 (2.38), (2.39) позволяют решать и обратную задачу - оценивать степень износа дробящих плит по энергетической характеристике электропривода дробилки.

2.8 Выводы по Главе 2

1. Проанализированы условия работы и особенности конструкции дробилки СМД-118.
2. Рассмотрены существующие методы определения потребляемой дробилки мощности.
3. Разработана схема дробления для определения усилий дробления в дробилке СМД-118.
4. Проанализированы существующие методы испытания горных пород на прочность.

5. Сконструирована экспериментальная установка, позволяющая исследовать закономерности разрушения кусков гранита при различных радиусах притупления индентора.

6. По результатам экспериментов получены кривые "усилие сжатия" - "глубина внедрения".

7. Выведена зависимость, устанавливающая связь между усилием разрушения куска, его размером и прочностными характеристиками, а также радиусом притупления индентора.

8. Определена зависимость усилия разрушения от радиуса притупления выступа плиты.

9. Установлено, что потребляемая мощность дробилки зависит от степени износа дробящей плиты.

10. Доказано, что полученная модель позволит прогнозировать потребляемую мощность дробления в зависимости от времени ее работы.

Глава 3 Исследование влияния высокотемпературной обработки давлением на износостойкость дробящих плит при видах изнашивания, имеющих место при дроблении гранита в щековой дробилке СМД-118

Все необходимые испытания на износостойкость плит проводятся в строгом соответствии со всеми установленными нормами – в условиях, идентичных реальным условиям использования дробящих плит. Стоит отметить, что в точности невозможно воспроизвести реальные условия при проведении лабораторных исследований, в связи с чем все полученные результаты носят сравнительный характер. Это говорит о том, что необходимо провести дополнительные исследования в реальных условиях, для получения наиболее точных результатов. Вместе с тем, реальные исследования просты и не требуют затраты большого количества ресурсов.

В реальных условиях на скорость изнашивания любого элемента конструкции оказывает прямое влияние множество факторов. Среди наиболее распространенных факторов целесообразно выделить нижеследующие:

1. Температура.
2. Скорость движения самого элемента и объем нагрузки, действующей на него.
3. Свойства, качество абразивных материалов [14].

Стоит отметить, что все вышеперечисленные факторы невозможно учесть при проведении лабораторных исследований. Дело в том, что во время проведения таких испытаний принято учитывать влияние лишь одного фактора на исследуемый элемент. Предельно важным фактором является то, что механизм изнашивания исследуемых образцов должен максимально точно соответствовать механизму изнашивания, который будет актуален при использовании в реальных условиях данного элемента.

Как показывает осмотр дробящих плит щековых дробилок после эксплуатации по крепким абразивным породам, каким является гранит, основным видом изнашивания плит является абразивное истирание, что подтверждают и литературные источники [2, 4, 60, 61]. В этой связи для воспроизводства характера

изнашивания материала плит, имеющего место в дробилке, образцы в экспериментах должны подвергаться именно этому виду изнашивания, что и было учтено при разработке методики испытаний.

3.1 Разработка методики испытаний по исследованию влияния высокотемпературной обработки давлением на износостойкость фрагментов дробящих плит в условиях абразивного изнашивания

В настоящее время существует огромное множество методик, при помощи которых целесообразно проводить испытания элементов по степени их изнашивания. Тем не менее, большинство методик имеют общую основу [63].

Одной из первых и наиболее эффективных методик по изнашиванию, признана отечественная методика по М.М. Хрущеву и М.А. Бабичеву [90]. Ученые создали специальную машину, которая позволяет исследовать материал на износостойкость. Данная машина носит название – Х4-Б (рисунок 3.1).

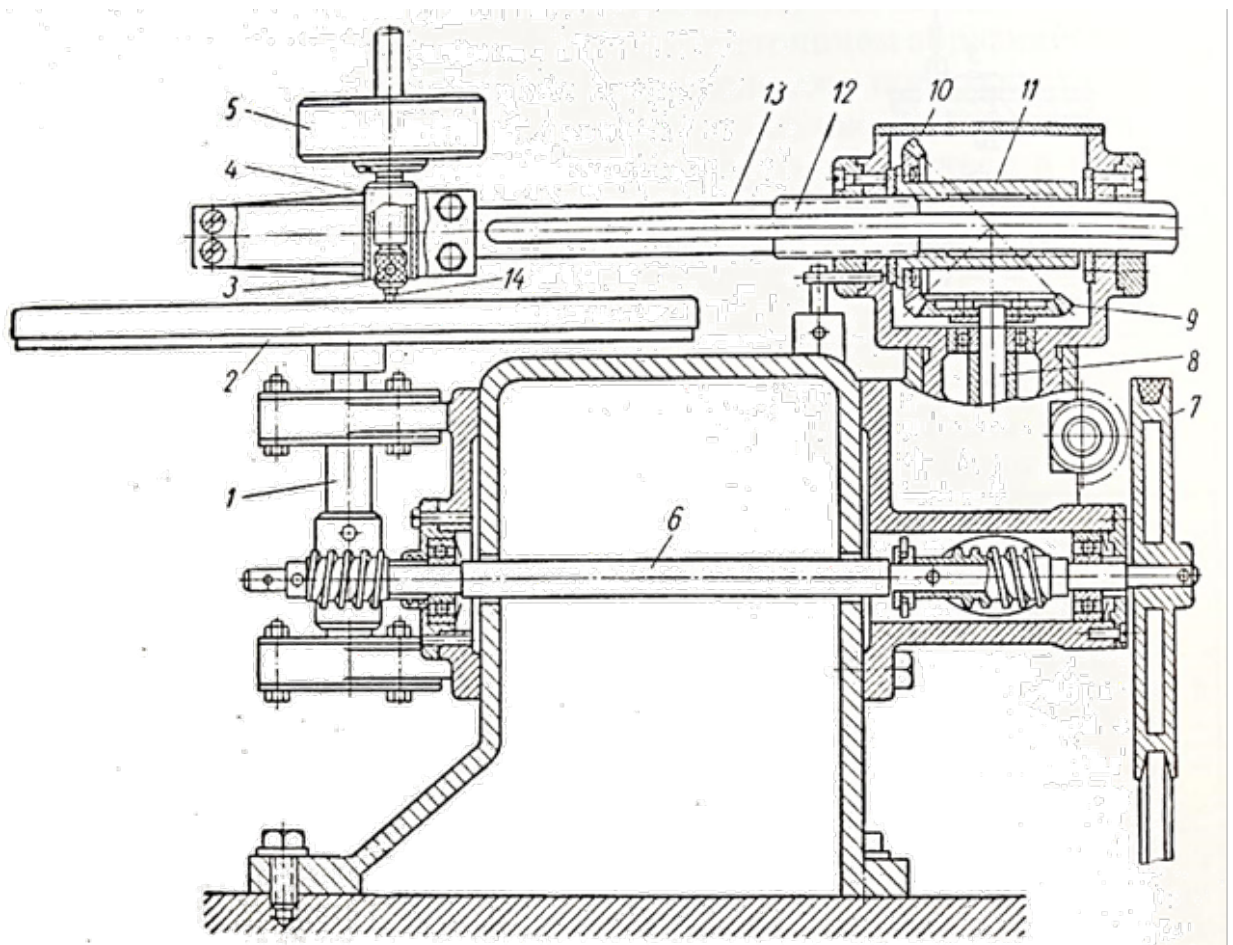


Рисунок 3.1 – Схема машины Х4-Б

Рассмотрим более детально представленную схему, для более полного понимания процесса. Итак, под номером 1 представлен вертикальный вал, который крепится к диску 2. Под 14 номером изображен цилиндрический образец, который проверяется на вопрос износостойкости. Диаметр образца – 2 мм, длина – от 15 до 20 мм.

Исследуемый образец дополнительно нагружается грузом 5. После этого, диск под номером 2 начинает вращаться с частотой 60 мин⁻¹. Причем вращение осуществляется при помощи электродвигателя, при дополнительной работе 7 и 6 элементов – шкива и горизонтального вала, так же в процессе участвует червячная передача. Шток 13 устанавливается строго в направляющих втулках. Для этого предусмотрена специальная резьба – 12 и гайка 11. В свою очередь элементу 11 передается вращение от горизонтального вала 6. Вращение передается благодаря трем дополнительным элементам машины Х4-Б: вертикальному валу – 8, коническим шестерням – 9,10.

Сам образец в процессе проведения настоящего эксперимента прижат к абразивной поверхности шлифовальной шкурки. Во время работы машины 50 % поверхности опытного образца постоянно соприкасается с абразивной шкуркой – трется об нее. Такой подход позволяет однородно и планомерно «стирать» поверхность цилиндрического образца. При этом, движение образца реверсивное [86].

Важно отметить, что все испытания проводятся при нагрузке $P = 3$ Н, которая считается относительно небольшой.

Степень износа, после проведения соответствующего эксперимента, обуславливается изменениями размера исходного образца. Для этого необходимо провести контрольные замеры образца до и после проведения эксперимента. Можно использовать и другой подход к определению степени износа образца – замер его веса до и после испытания [86]. Для получения более точных результатов целесообразно использовать эти два замера одновременно.

Для того, чтобы обосновать данную методику испытаний авторы [90] отметили важный факт – непосредственно механизм разрушения обычно различен.

Но сила и глубина царапания обычно одинакова для каждого отдельного образца. К сожалению, данная методология не подходит для проведения эксперимента в рамках настоящей работы. Дело в том, что абразивная способность всех материалов, которые используются для изготовления шкурок, кардинальным образом отличается от абразивной способности гранита [84].

Далее рассмотрим второй метод для определения износостойкости материалов (рисунок 3.2) [46].

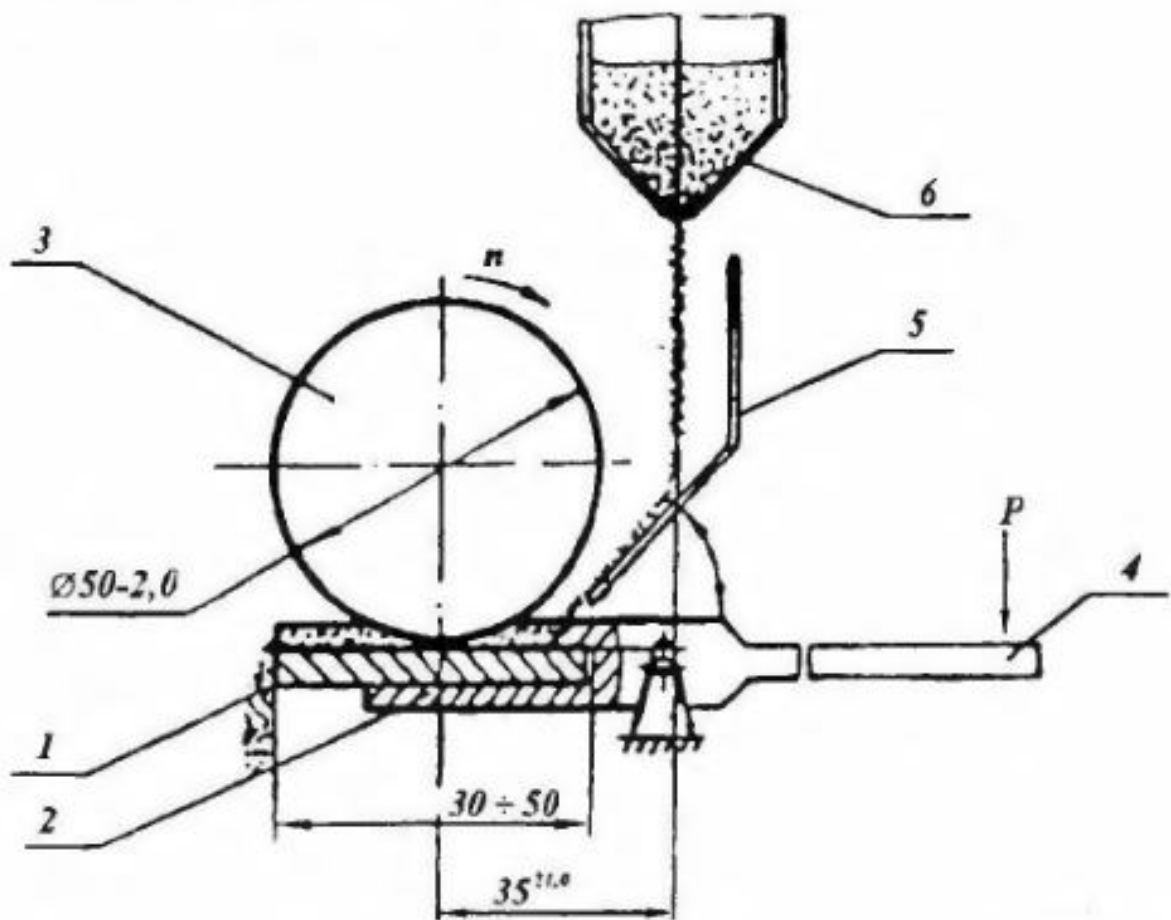


Рисунок 3.2 – Схема трения испытательного образца о незакрепленную абразивную прослойку

На данной схеме образец, проходящий испытание, представлен под номером 1. При помощи рычага 4, его закрепляют в держателе 2. Далее его прижимают к резиновому ролику 3. Сила прижимания – $F = 44,1$ Н. Причем, сам ролик 3 вращается со скоростью 1 с^{-1} . После этого из дозатора под номером 6 по лотку 5 сыпется абразив.

Продолжительность испытания варьируется в зависимости от исходного материала образца и от нужд экспериментатора. Допускается 600-3600 оборотов ролика за один эксперимент.

Исходя из описания данной методики, можно сделать обоснованный вывод о том, что методика не может быть применена в рамках настоящей исследовательской работы. Все дело в том, что при помощи данного метода возможно провести испытания только образцов материалов об незакрепленные абразивные частицы. Это не соответствует условиям работы с исследованием изнашивания плит.

В работе [12] в качестве примера испытания на износостойкость был использован галтовочный барабан (рисунок 3.3).

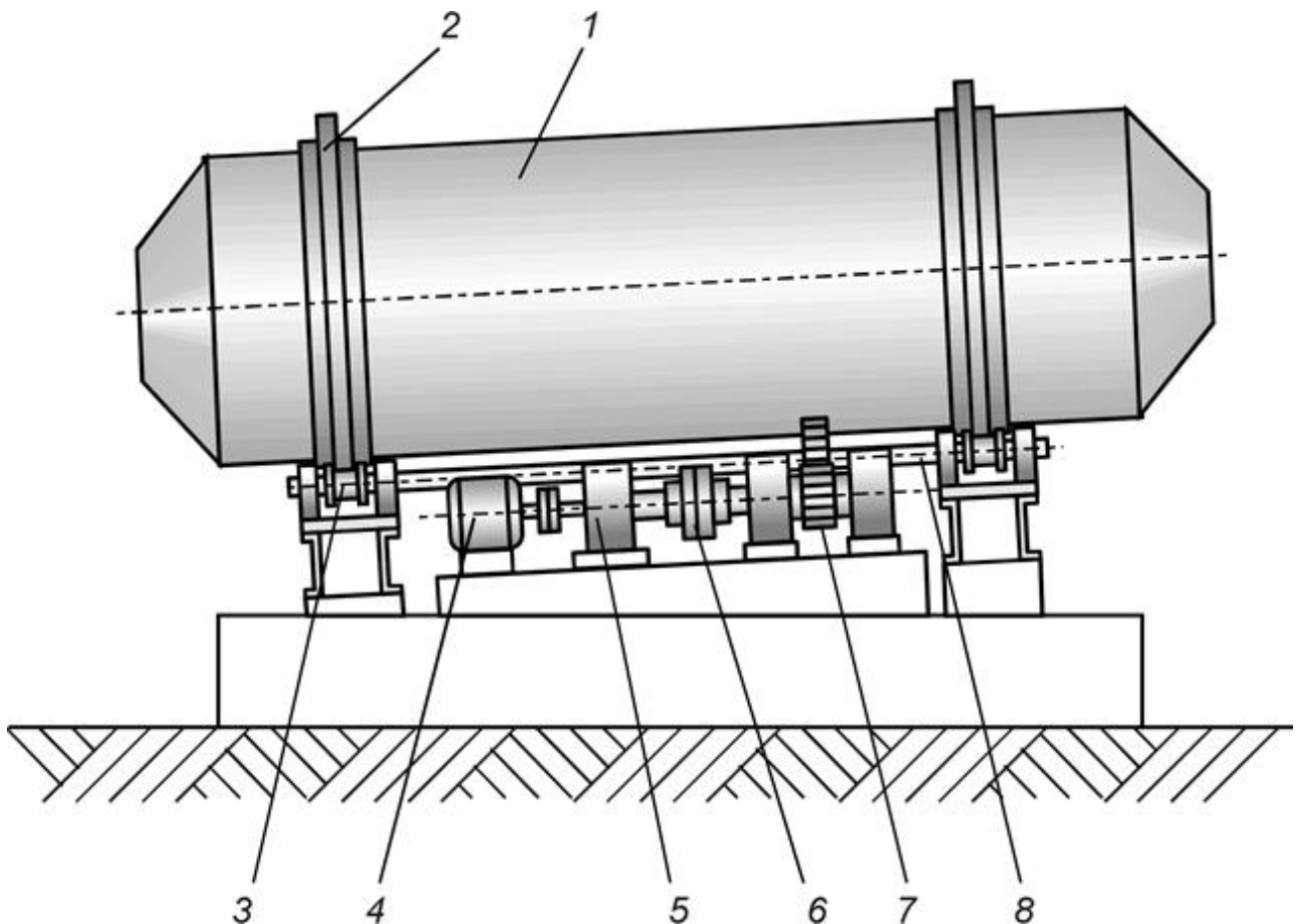


Рисунок 3.3 – Галтовочный барабан непрерывного действия

Галтовочный барабан непрерывного действия состоит из обечайки 1, открытая с торцов. Привод вращения барабана включается за счет сразу

нескольких элементов 4, 5, 6, 7 и 3 – электродвигатель, редуктор, муфта, зубчатая пара и ролики соответственно.

Исследуемые образцы помещаются в основание барабана вместе со стальными шариками. После того, как испытание завершится, опытный образец взвешивается, а полученные результаты сравниваются с исходными. Данный метод позволяет оценить степень массового износа изделия.

Данная методика также не подходит для испытания фрагментов плит на износостойкость, т.к. методика основана на металлическом трении и не позволяет оценивать интенсивность контакта образцов с абразивом [15].

Испытания проводили по модернизированной методике [18, 20, 21, 65, 92] на установке, схема которой представлена на рисунке 3.4, при скорости вращения шпинделя станка $11,4 \text{ с}^{-1}$ и нормальном усилии 80 Н .

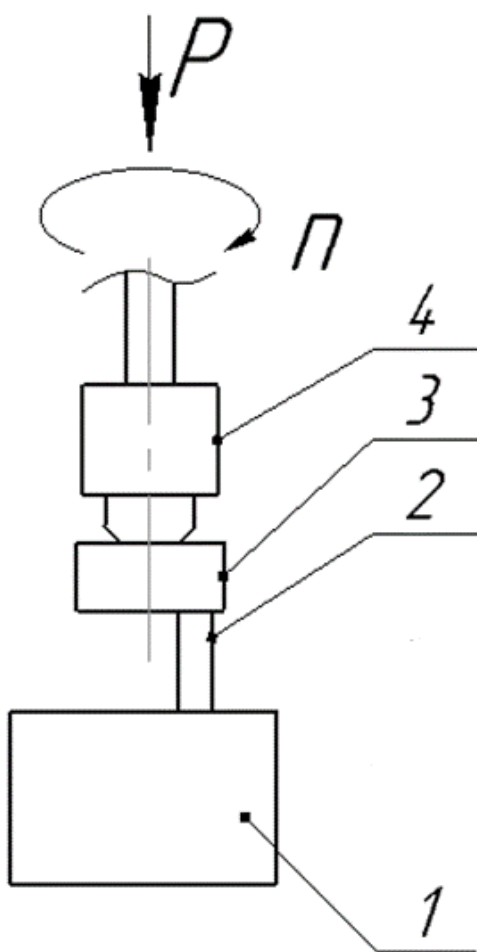


Рисунок 3.4 – Схема установки для испытания образцов на абразивный износ: 1 – гранит; 2 – испытуемый образец; 3 – держатель; 4 – шпиндель вертикально-сверлильного станка

Объектом изнашивания 2 являлись фрагменты полученных литьем плит дробилки СМД-118 из стали 110Г13Л в виде цилиндрических образцов диаметром 8 мм. Часть из них была подвержена высокотемпературной обработке давлением, т.е. ВОД, что достигалось следующим образом.

Из плиты вырезались цилиндрические прутки большей толщины (диаметром 12 и 14 мм), которые нагревались и вытягивались при повышенных температурах в цилиндры необходимого диаметра (8 мм) методом свободнойковки на кузнечном молоте (рисунок 3.5). С температурыковки прутки охлаждались на воздухе и разрезались на образцы необходимой длины. Схема процесса изготовления представлена на рисунке 3.6 [39, 78].



Рисунок 3.5 – Кузнечный молот марки МА-4129А

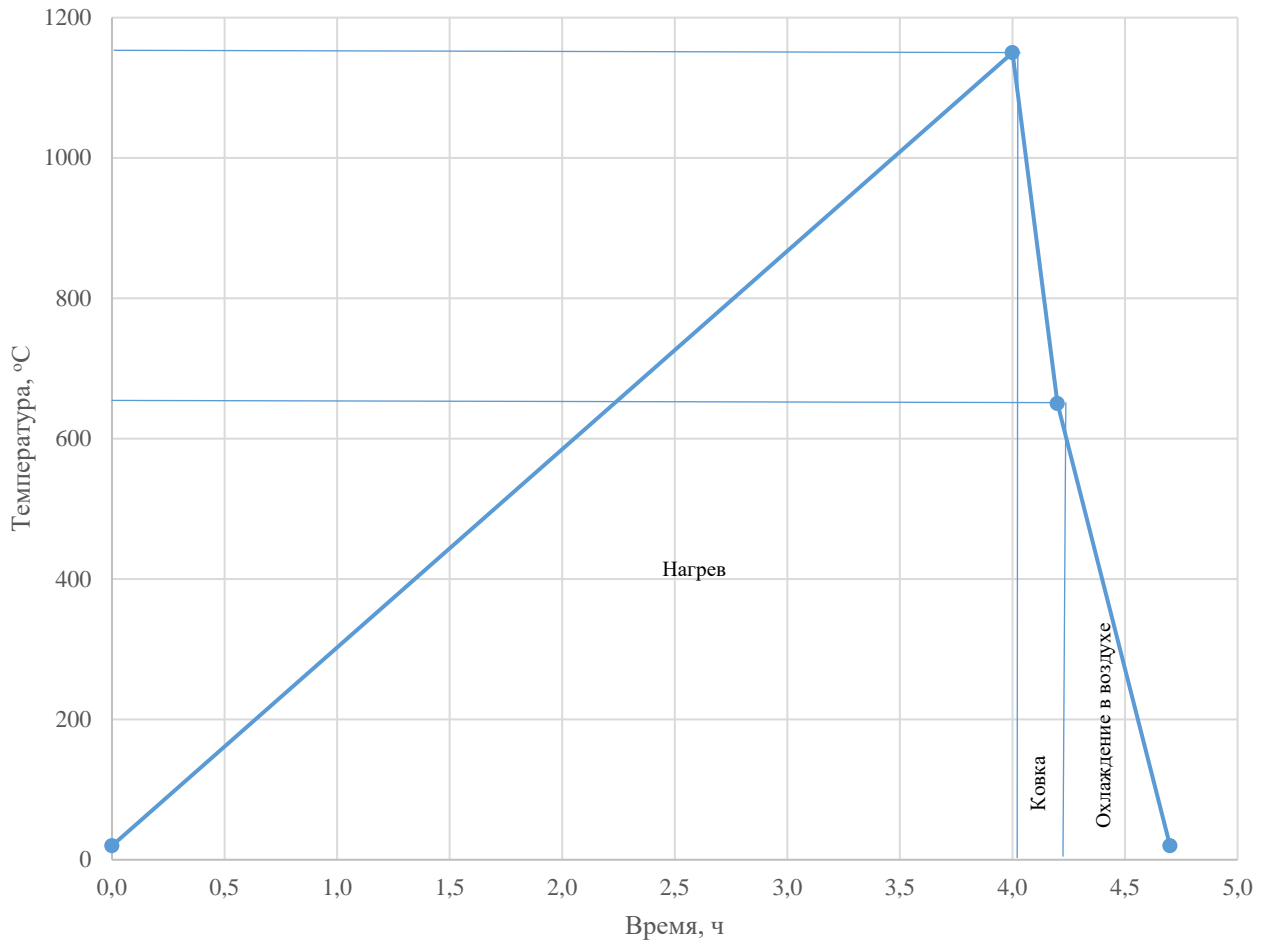


Рисунок 3.6 – Схема процесса изготовления образцов

В качестве величины, характеризующей степень деформации, принята степень укова α , которая определялась по формуле (3.1).

$$\alpha = \frac{S_{\text{исх}}}{S_0} = \frac{d_{\text{исх}}^2}{d_0^2}, \quad (3.1)$$

где $S_{\text{исх}}$ – площадь сечения исходного цилиндра, мм²; S_0 – площадь сечения получившегося образца, мм²; $d_{\text{исх}}$ – диаметр исходного цилиндра, мм; d_0 – диаметр получившегося образца, мм. Таким образом образец, откованный с 12 мм на 8 мм, получил степень укова $\alpha=2,25$, а образец, откованный с 14 мм, – $\alpha=3,06$.

В качестве абразивного материала 1 использовались керны гранита Выборгского гранитного массива состава (рисунок 2.13), с агрегатной твердостью компонентов ~ 2000 HV.

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

По результатам замера массы образца до и после воздействия абразива определяли ее потерю Δm . Данные по суммарной убыли 2-х образцов каждого вида аппроксимировали прямой линией, тангенс угла наклона которой принимался за скорость изнашивания K_i , мг/мин, а обратную величину – за износостойкость J_i , мин/мг, образцов данного вида. Также производились замеры твердости полученных образцов по Виккерсу.

3.2 Результаты сравнительных испытаний образцов

Оказалось, что все экспериментальные точки зависимостей $\sum \Delta m = f(t)$ исходных (литых) образцов материала плит и полученных с использованием ВОД при разной степени укова удовлетворительно аппроксимируются прямыми линиями, тангенсы угла наклона которых (скорости абразивного изнашивания K_i), обратные величины (износостойкости J_i) и результаты замера твердости представлены в таблице 3.1 и на рисунке 3.7.

Таблица 3.1 - Результаты испытаний образцов при изнашивании по граниту

№	Способ обработки	Степень укова, α	$\sum \Delta m$, мг за время t , мин.					K_i , мг/мин	J_i , $\cdot 10^{-3}$ мин/мг	HV_i , МПа
			10	20	30	40	50			
1	Литой	-	11,3	27,3	52,7	80,3	118,7	2,765	361,7	1840
			40,3	66,0	98,0	126,0	153,0			
2	ВОД	2,25	32,7	63,3	79,0	102,0	121,0	2,212	452,1	2950
			26,0	43,0	70,0	88,0	117,0			
3	ВОД	3,06	33,0	57,0	80,0	105,0	125,0	2,195	455,6	3270
			36,0	62,0	80,0	99,0	121,0			

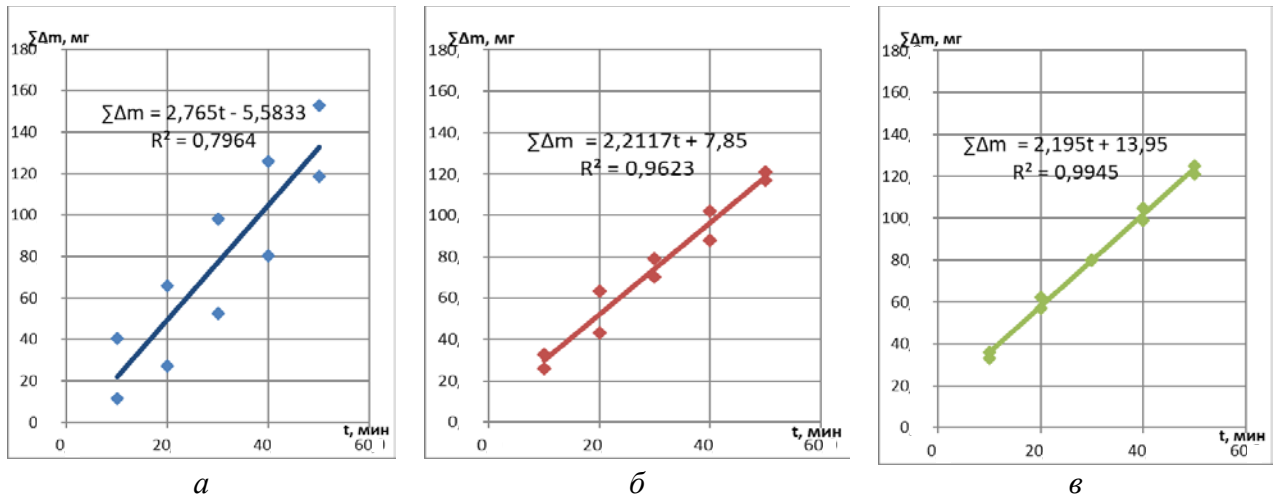


Рисунок 3.7 – Зависимость суммарной потери массы образцов от продолжительности изнашивания по граниту: а – исходные литые образцы ($J_0 = 0,36$ мин/мг), б – образец, подвергнутый ВОД со степенью укова 2,25 ($J_1 = 0,45$ мин/мг), в – образец, подвергнутый ВОД со степенью укова 3,06 ($J_2 = 0,46$ мин/мг)

Как видно из полученных данных, применение способа ВОД существенно (до 25 %) повышает абразивную износостойкость стали 110Г13Л, которая возрастает с повышением интенсивности пластической деформации (степени укова) металла [22, 104].

3.3 Оценка интенсивности деформации образцов, прошедших ВОД, с помощью компьютерного моделирования

К настоящему времени программы, основанные на методе конечных элементов (МКЭ), получили широкое распространение в реальной практике. С помощью МКЭ возможно получить достоверные сведения о напряженно-деформированном состоянии заготовки, которая была подвержена обработке давлением.

Суть настоящего метода заключается в том, что объем исследуемого объекта условно разделяется на несколько геометрических элементов. При этом каждый элемент обладает собственными показателями. Если говорить об упругопластических материалах, то важнейшим показателем считается механические свойства данных материалов. Соотношения МКЭ чаще всего основываются на теории пластического течения. Вместе с тем, не редко используется теория пластичности [6, 38].

Наиболее известными программами в настоящее время, являются нижеследующие:

1. *ANSYS*.
2. *Deform-3d*.
3. *Qform*.
4. *SIMULIA Abaqus*.

Наибольшее распространение получила программа *Deform-3d* [93]. Это связано с простотой и удобствам ее использования для получения необходимой информации об испытуемом объекте.

Рассмотрим более подробно причины популярности именно данной программы.

Основное преимущество *Deform-3d* состоит в возможности импортирования геометрии, исследуемого материала из *CAD* программ. Это означает, что для проведения исследований будет затрачиваться меньше времени и ресурсов.

Система *Deform* состоит из трех основных компонентов [70, 99]. Рассмотрим более подробно эти компоненты:

Pre Processor или препроцессор. Данный компонент позволяет собирать и изменять данные, которые необходимы для расчетов. Вместе с тем благодаря ему появляется возможность создания отдельной базы данных, в которой будет храниться вся необходимая информация.

Simulator, симулятор или процессор. Создан для проведения расчетов и записи полученных результатов в единую базу данных. Вместе с тем, благодаря компоненту, компьютер записывает все ошибки, произошедшие в процессе исследования. Благодаря этому в дальнейшем исследователи будут избегать повторения ошибок.

Post Processor или постпроцессор используется в целях прочтения базы данных, после завершения экспериментов и моделирования. Компонент отображает конечные данные в виде сводных графиков и диаграмм. Вместе с тем он отдельно показывает числовые значения.

В данной работе анализ деформирования образцов производили с использованием программного комплекса *Deform-3d*.

Поскольку степень укова α не позволяет сравнивать деформации, полученные в результате свободнойковки, с деформациями, получаемыми при штамповке, была проведена оценка интенсивности деформации ε в программе *Deform-3d*.

При моделировании важно корректно задать параметры деформируемой стали. Зависимости, позволяющие определять механические свойства стали 110Г13Л, деформируемой при высоких температурах, приведены в работах [94, 96, 97, 100, 102, 103]. Для получения механических характеристик стали 110Г13Л в условиях высокотемпературной обработки давлением была использована зависимость (3.2) [97]:

$$\sigma = 1161e^{237/T'} \dot{\varepsilon}^{0,01} \varepsilon^{0,257} e^{194/T'} \dot{\varepsilon}^{0,01}, \quad (3.2)$$

где σ – предел текучести, МПа; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, с⁻¹; T' – температура стали, К; ε – интенсивность деформации.

С помощью выражения (3.2) в программе *Deform-3d* были построены кривые зависимости «предел текучести» - «интенсивность деформации» для температурыковки при различных скоростях деформации (рисунок 3.8).

Результаты моделирования распределения интенсивности деформации по сечению образца представлены на рисунке 3.9.

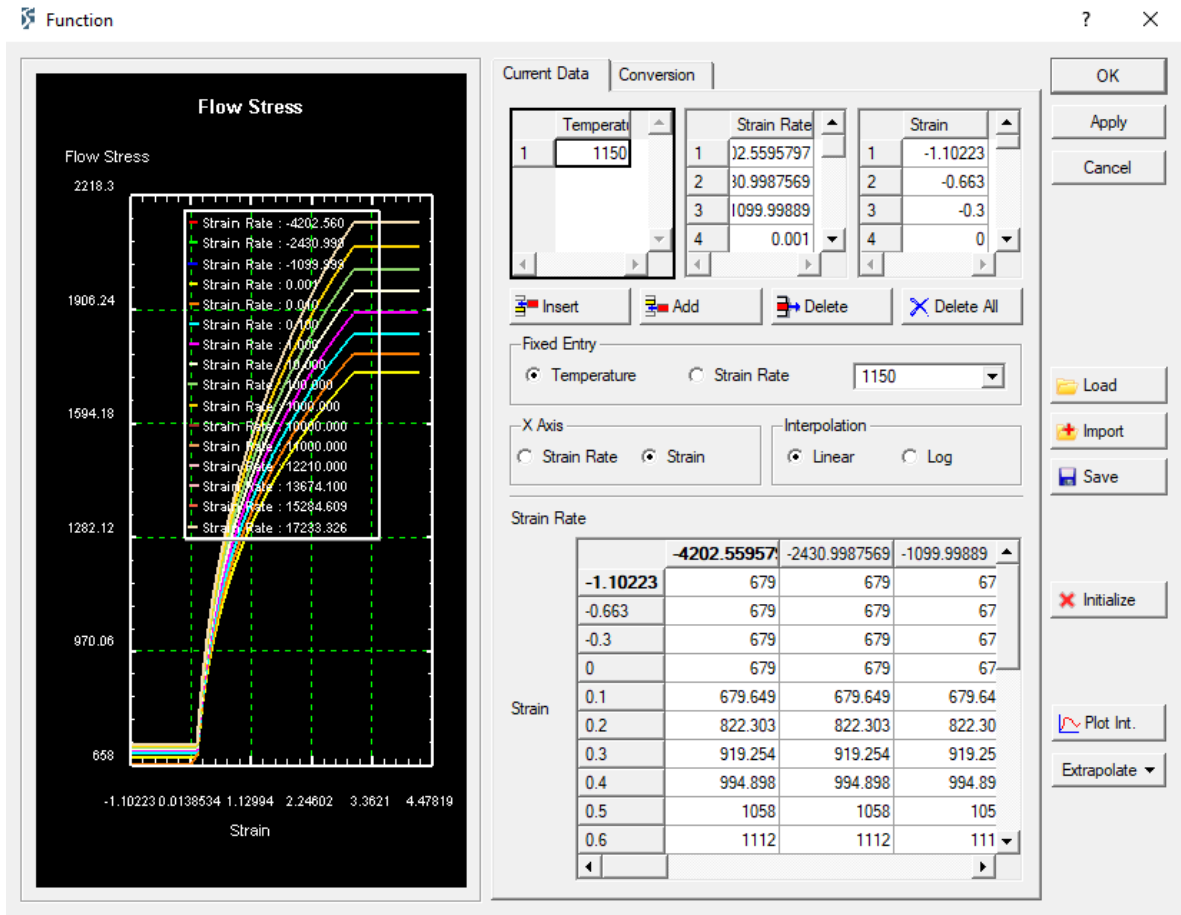
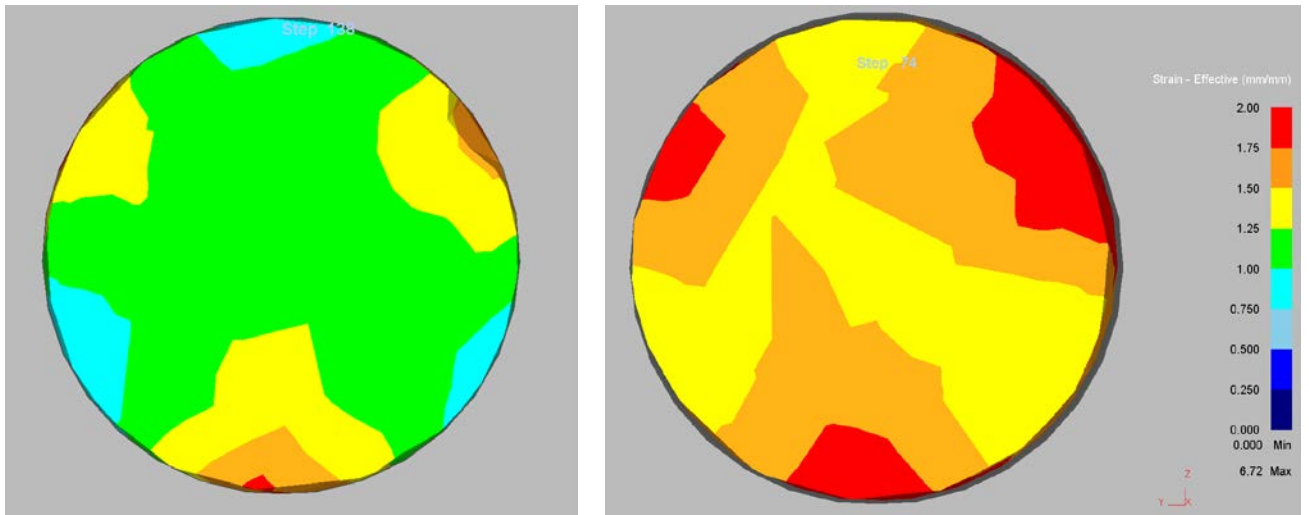


Рисунок 3.8 – Вид окна в программе *Deform-3d* с параметрами стали 110Г13Л



а

б

Рисунок 3.9 – Результат моделирования процесса изготовления образцов для испытаний в программе *Deform-3d*: а – обработка давлением с диаметра 12 мм до диаметра 8 мм, б – обработка давлением с диаметра 14 мм до диаметра 8 мм

На поперечных разрезах видно, что в образцах есть зоны различной интенсивности деформации. Для определения усредненной интенсивности деформации по сечению были также построены гистограммы распределения интенсивности деформаций по сечению образцов. С их помощью определено, что для образца, откованного с диаметра 12 мм, средняя величина интенсивности деформации по сечению равна 1,14 (рисунок 3.10). Для образца, откованного с диаметра 14 мм, эта величина составила 1,60 (рисунок 3.11).

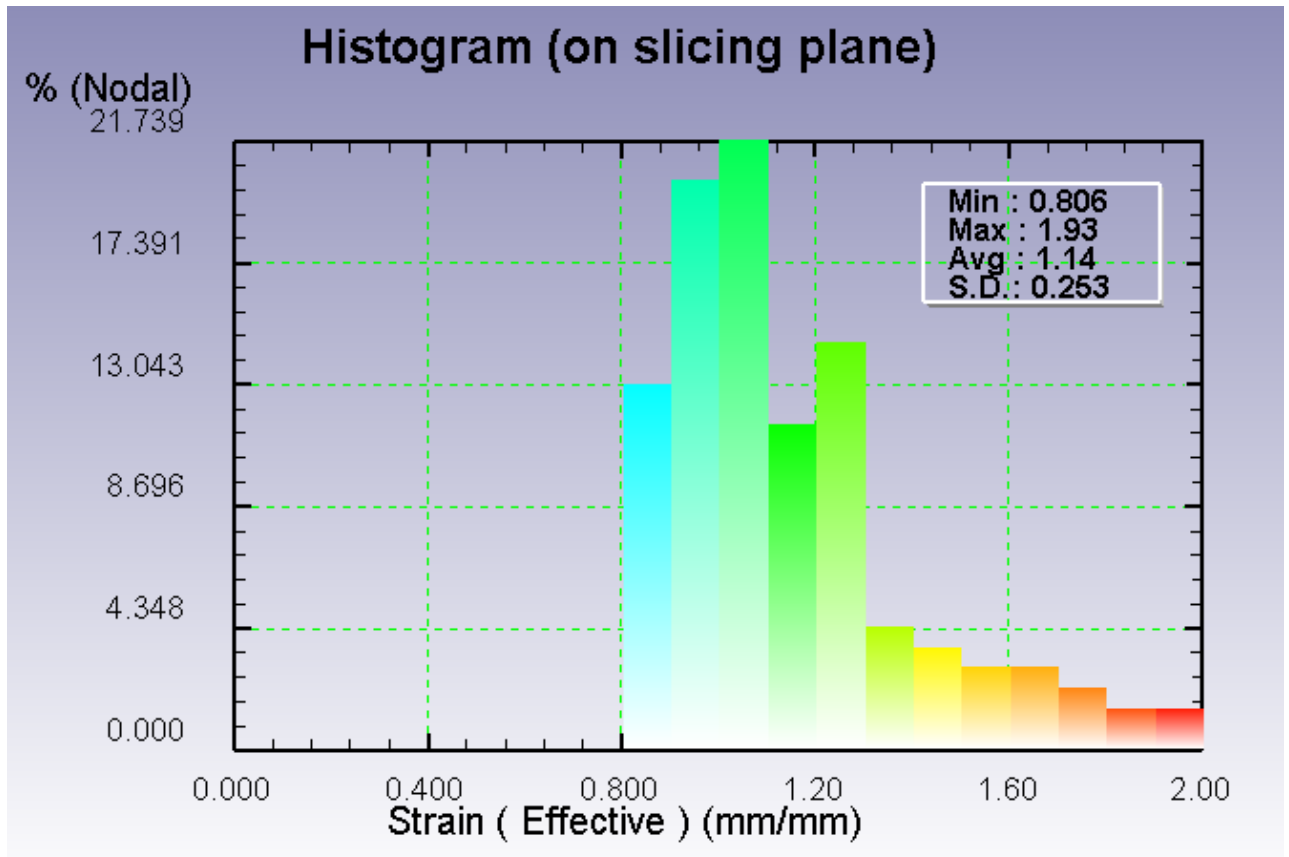


Рисунок 3.10 – Гистограмма распределения интенсивности деформаций по сечению образца, откованного с диаметра 12 мм до диаметра 8 мм, полученная в результате моделирования в программе *Deform-3d*

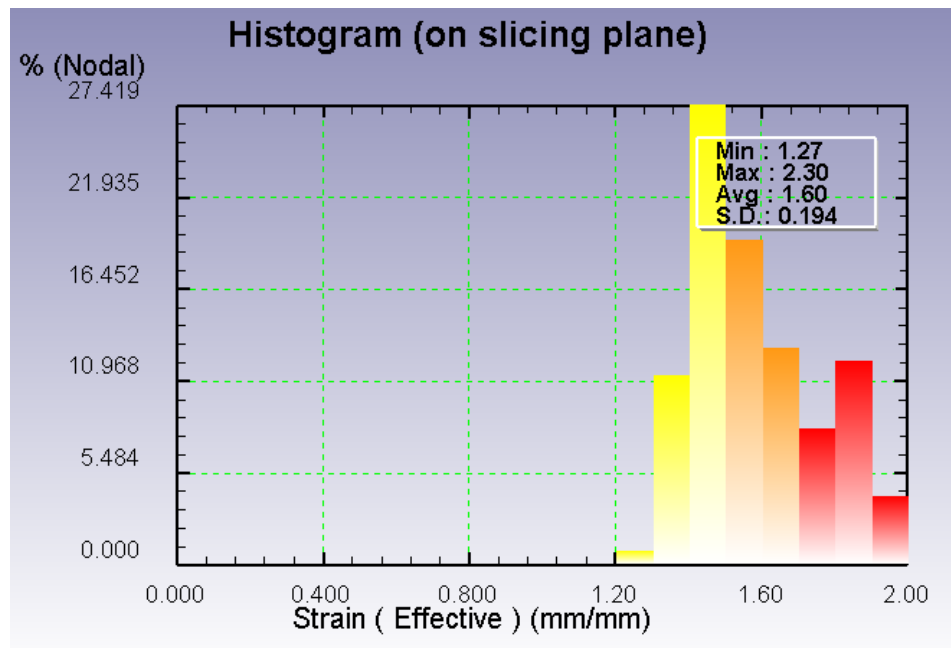


Рисунок 3.11 – Гистограмма распределения интенсивности деформаций по сечению образцов, откованного с диаметра 14 мм до диаметра 8 мм, полученная в результате моделирования в программе *Deform-3d*

Полученные средние значения интенсивности деформации использовались для установления зависимости скорости изнашивания образцов из материала плит от деформации, полученной при изготовлении образцов при проведении ВОД (рисунок 3.12).

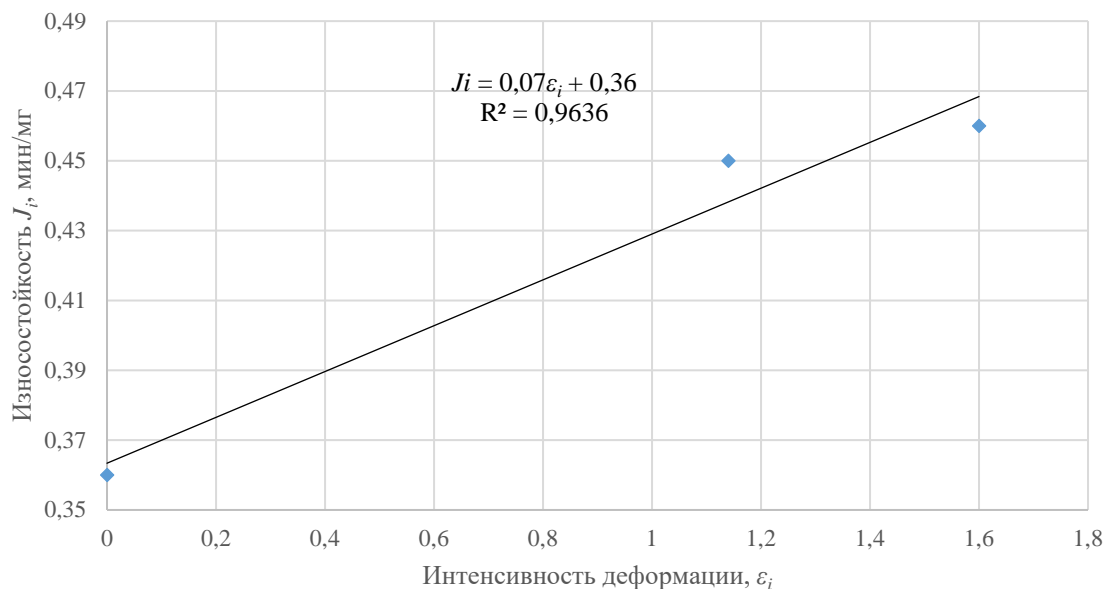


Рисунок 3.12 – Зависимость износостойкости J_i образцов при изнашивании по граниту от интенсивности их деформации ε_i

Как оказалось (рисунок 3.12), полученная зависимость имеет вид (3.3), близкий к линейному:

$$J_i = J_0 + U_1 \cdot \varepsilon_i, \quad (3.3)$$

где $U_1=0,07$ мин/мг. При этом, повышение износостойкости образцов коррелирует (3.4) и с возрастанием их твердости (рисунок 3.13):

$$J_i = J_0 + U_2 \cdot \Delta HV_i, \quad (3.4)$$

где U_2 – коэффициент, равный $7 \cdot 10^{-5}$ мин/(мг·МПа), величина которой, соответственно, связана со значением ε_i зависимостью (3.5) (рисунок 3.14):

$$HV_i = HV_0 + U_3 \cdot \varepsilon_i, \quad (3.5)$$

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

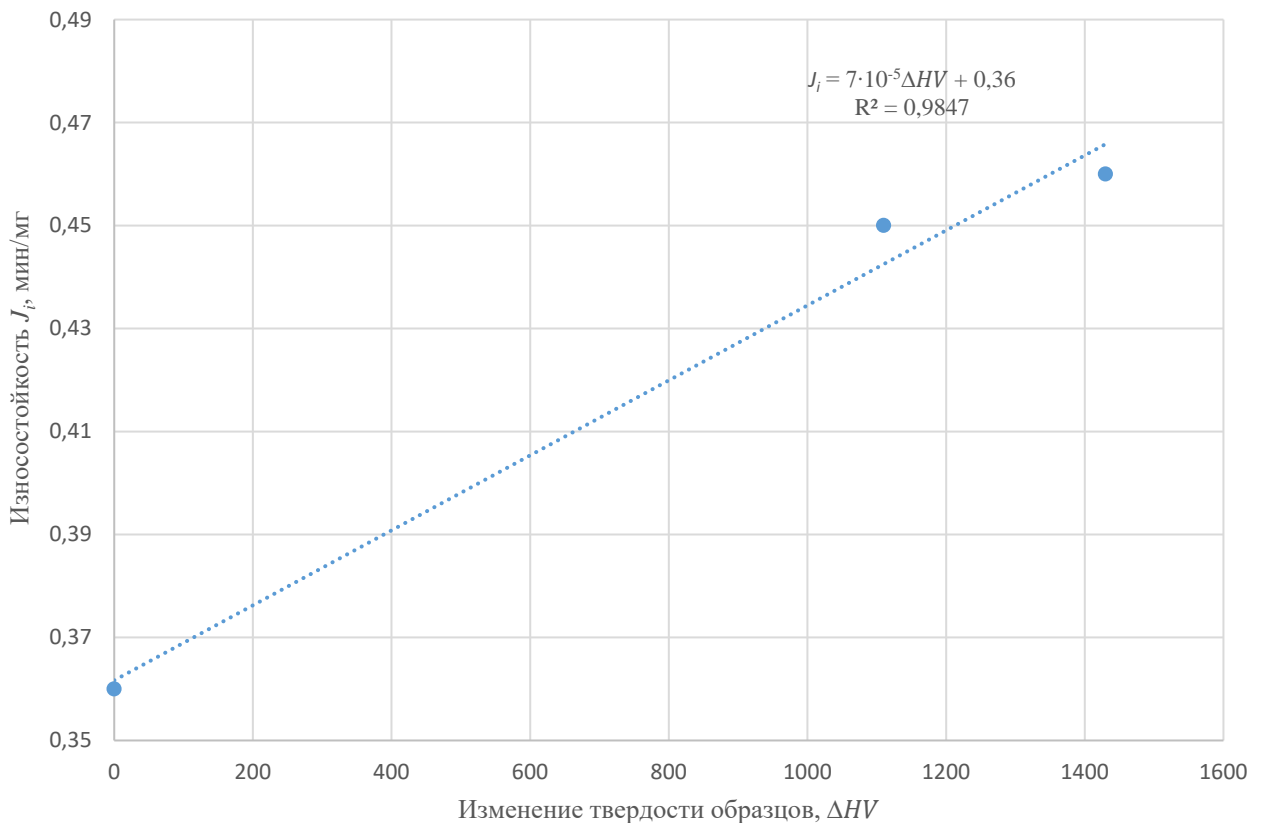


Рисунок 3.13 – Зависимость износостойкости J_i образцов при изнашивании по граниту от изменения их твердости ΔHV

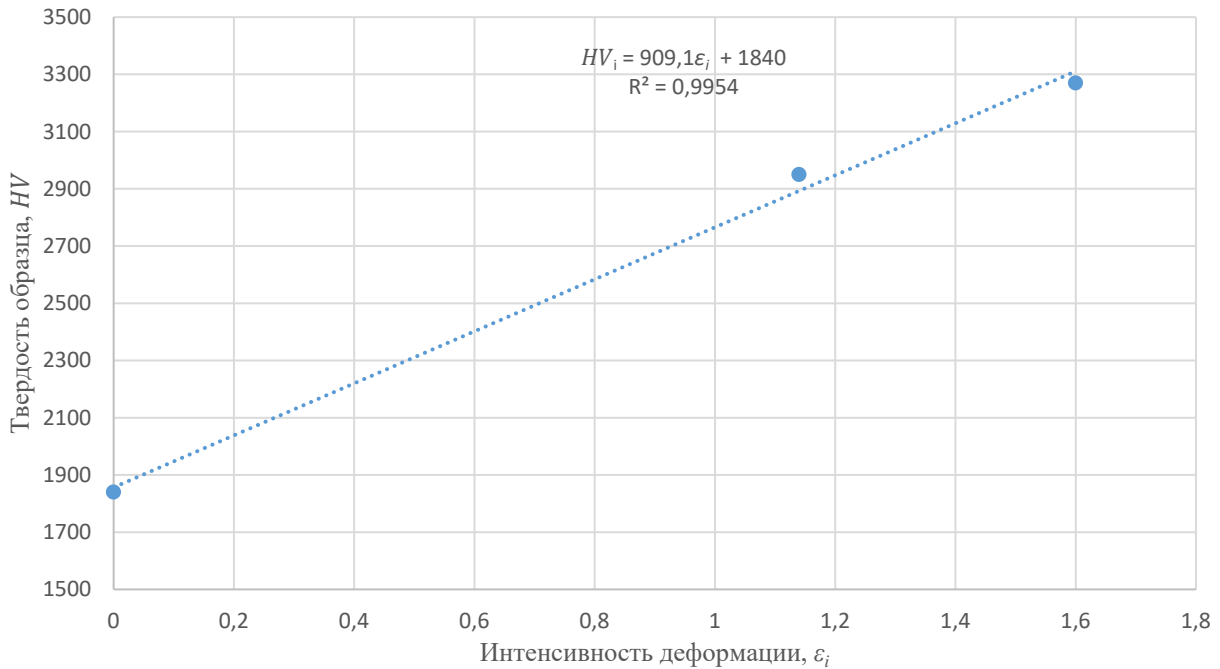


Рисунок 3.14 – Зависимость твердости образцов HV от интенсивности их деформации ϵ_i

3.4 Определение скорости изнашивания футеровки при дроблении гранита дробилкой СМД-118

Экстраполяция результатов экспериментов по изнашиванию фрагментов футеровки на лабораторной установке (глава 3.2) на условия работы дробящих плит дробилки проводилась с использованием закона Арчарда [95], позволяющего оценивать степень износа твердых поверхностей оборудования за счет воздействия абразива. Он связывает потерю материала твердой поверхности с работой сил трения, возникающих между трущимися поверхностями, и имеет вид (3.6):

$$h_w = c' \frac{P s_t}{HRA}, \quad (3.6)$$

где h_w – линейный износ, м; P – нормальная сила, действующая на поверхность, Н; s_t – расстояние скольжения по поверхности, м; HR – твердость материала, подверженного износу, Па; A – площадь контакта с абразивной поверхностью, м²; c' – безразмерная эмпирическая постоянная.

Для перехода от массовой скорости изнашивания, устанавливаемой в экспериментах, к линейному износу использовалось соотношение (3.7):

$$h_w = \frac{t}{J_i \cdot \rho \cdot A}, \quad (3.7)$$

где J_i – износостойкость, с/кг; t – продолжительность испытания, с; ρ – плотность изнашиваемого материала, кг/м³.

Было установлено равенство (3.8), с помощью которого получено выражение (3.9).

$$\frac{t}{J_i \cdot \rho \cdot A} = c' \frac{P s_t}{H R A}, \quad (3.8)$$

$$J_i = c' \frac{H R t}{P s_t \rho}. \quad (3.9)$$

Исходя из выражения (3.9), можно через выражения (3.10) и (3.11) перейти к скорости изнашивания в условиях щековой дробилки (величины, относящиеся к условиям дробилки, отмечены знаком ').

$$\frac{J_i'}{J_i} = \frac{c P s_t}{H R t} \cdot \frac{H R t'}{P' s_t' \rho'}, \quad (3.10)$$

$$\frac{J_i'}{J_i} = \frac{P s_t}{t} \cdot \frac{t'}{P' s_t'}. \quad (3.11)$$

Используя выражение (3.11) и уравнение (3.3), представляли скорость изнашивания плит для щековой дробилки (3.12).

$$J_i' = \frac{P s_t}{t} \cdot \frac{t'}{P' s_t'} \cdot \frac{60 \cdot (J_0 + K_1 \cdot \varepsilon_i)}{10^6} \quad (3.12)$$

где t_1 – продолжительность испытания, 3,5 мин (210 с); P_1 – нормальная сила, прижимающая образец к абразиву, 80 Н, s_{t1} – расстояние скольжения при испытании, м, которое можно определить по формуле (3.13):

$$s_t = n \pi d' = 11,4 \text{ с}^{-1} \cdot 210 \text{ с} \cdot \pi \cdot 0,04 \text{ м} = 300,69 \text{ м}, \quad (3.13)$$

где d' – диаметр траектории, описываемой образцом при вращении, 0,04 м; n – скорость вращения шпинделя станка, 11,4 с⁻¹.

Подставив известные величины в выражение (3.12), получали (3.14) и (3.15):

$$J_i' = \frac{t'}{P' s_t'} \cdot \frac{80 \cdot 300,69}{210} \cdot \frac{60 \cdot (0,07 \varepsilon_i + 0,36)}{10^6}, \quad (3.14)$$

$$J_i' = \frac{6,87(0,07\varepsilon_i + 0,36)}{10^3} \cdot \frac{t'}{P's_t'} \quad (3.15)$$

Эффект применения ВОД при изготовлении дробящих плит на их износостойкость и, следовательно, ресурс оценивали из соотношения (3.16).

$$\frac{J_i'}{J_0'} = \frac{0,07\varepsilon_i + 0,36}{0,36} = \frac{7 \cdot 10^{-5} \Delta HV_i + 0,36}{0,36}, \quad (3.16)$$

где J_0' – износостойкость литой плиты, с/кг; J_i' – износостойкость плиты, подвергнутой ВОД, с/кг; ε_i – интенсивность деформации плиты, подвергнутой ВОД; ΔHV_i – прирост твердости плиты, подвергнутой ВОД, МПа.

3.5 Выводы по Главе 3

1. Сконструирована экспериментальная установка, позволяющая исследовать закономерности изнашивания о горные породы фрагментов дробящих плит, пластически деформированных с различной интенсивностью.
2. Разработана методика высокотемпературной обработки давлением фрагментов дробящих плит.
3. Получена зависимость износостойкости фрагментов дробящих плит от интенсивности их пластической деформации и твердости.
4. Определена зависимость увеличения износостойкости дробящих плит от полученной в результате их изготовления интенсивности пластической деформации и твердости.

Глава 4 Совершенствование технологического процесса изготовления дробящих плит щековой дробилки СМД-118 для повышения их износостойкости при дроблении гранита

4.1 Установление рациональной геометрии поковки для изготовления футеровки дробящей плиты штамповкой

С целью повышения износостойкости футеровок дробящих плит предлагается ввести в процесс их изготовления высокотемпературную обработку давлением, заключающуюся в изготовлении футеровки горячей штамповкой и последующей ее закалкой в воде. Для того чтобы выяснить, какую геометрию поковки принять для достижения наибольшей интенсивности деформации металла в области выступов футеровки, как наиболее интенсивно изнашиваемых ее элементов, было произведено моделирование течения металла при штамповке футеровки из заготовок с выступами различного профиля. Рассматривались литые заготовки, имеющие выступы в местах будущих выступов в виде треугольника с разным расположением вершины. Результаты моделирования процесса течения металла выступа треугольной формы при высокотемпературной штамповке представлены на рисунках 4.1, 4.2.

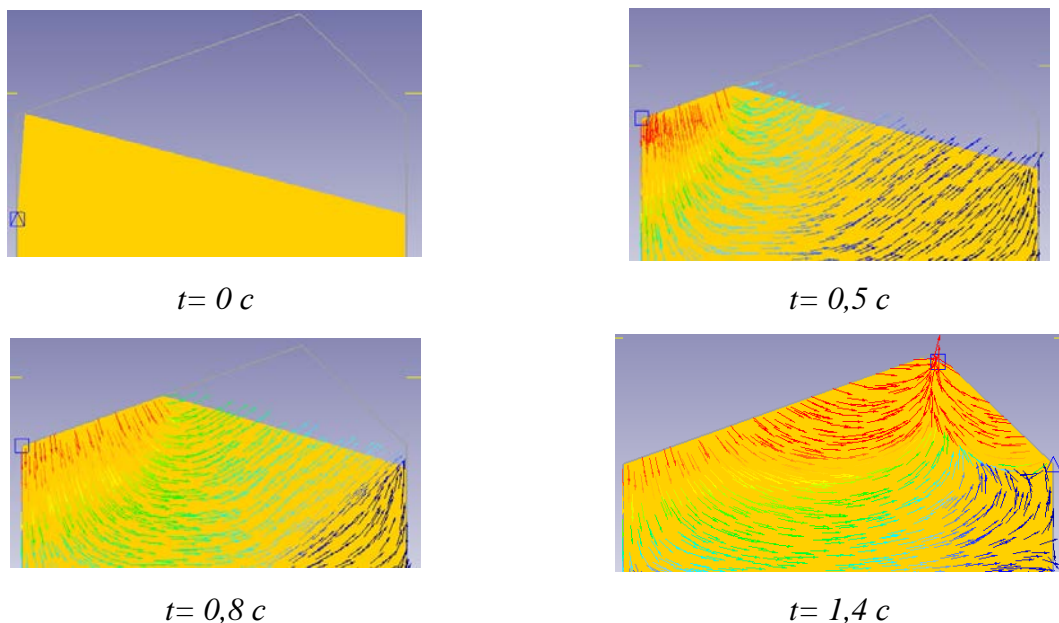


Рисунок 4.1 – Течение материала при штамповке заготовки треугольного профиля с вершиной, расположенной на стороне длинной грани, полученное в результате моделирования в программе *Deform-3d*

Как видно на рисунке 4.1, при штамповке заготовки треугольного профиля с вершиной, расположенной на стороне длинной грани, наиболее интенсивной деформации образуется на длинной грани заготовки. В последствии материал перетекает к короткой грани и в вершину выступа. В условиях работы щековых дробилок зона наиболее интенсивного изнашивания располагается на вершине и короткой грани выступа, на которых, при данной конфигурации заготовки, зоны интенсивной деформации не располагается

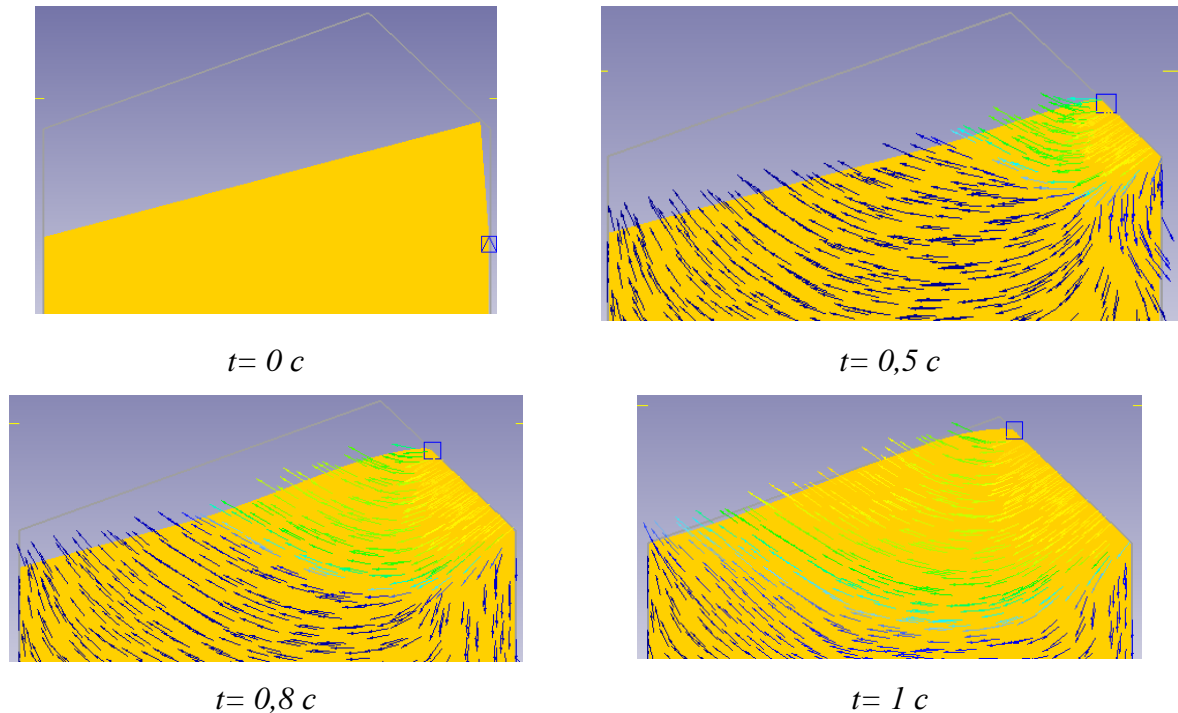


Рисунок 4.2 – Течение материала при штамповке заготовки треугольного профиля с вершиной, расположенной на стороне короткой грани, полученное в результате моделирования в программе *Deform-3d*

В то же время, использование заготовки треугольного профиля с вершиной, расположенной на стороне короткой грани (рисунок 4.2), позволяет обеспечить вершину и грани выступов зонами интенсивной деформации. Поэтому решено было взять этот профиль за основу.

Для уменьшения усилий при штамповке футеровку дробящей щеки дробилки предлагается изготавливать в виде секций (рисунок 4.3). Плиту неподвижной щеки разделили на 7 секций 1н-7н, подвижной – на 11 секций 1п-11п. При этом, секции 1н и 1п подвергать штамповке нецелесообразно в связи с их габаритами и расположением в верхней части камеры дробления, где интенсивность

изнашивания минимальна. Для крепежа к щеке фрагменты снабжены отверстиями под крепящие болты.

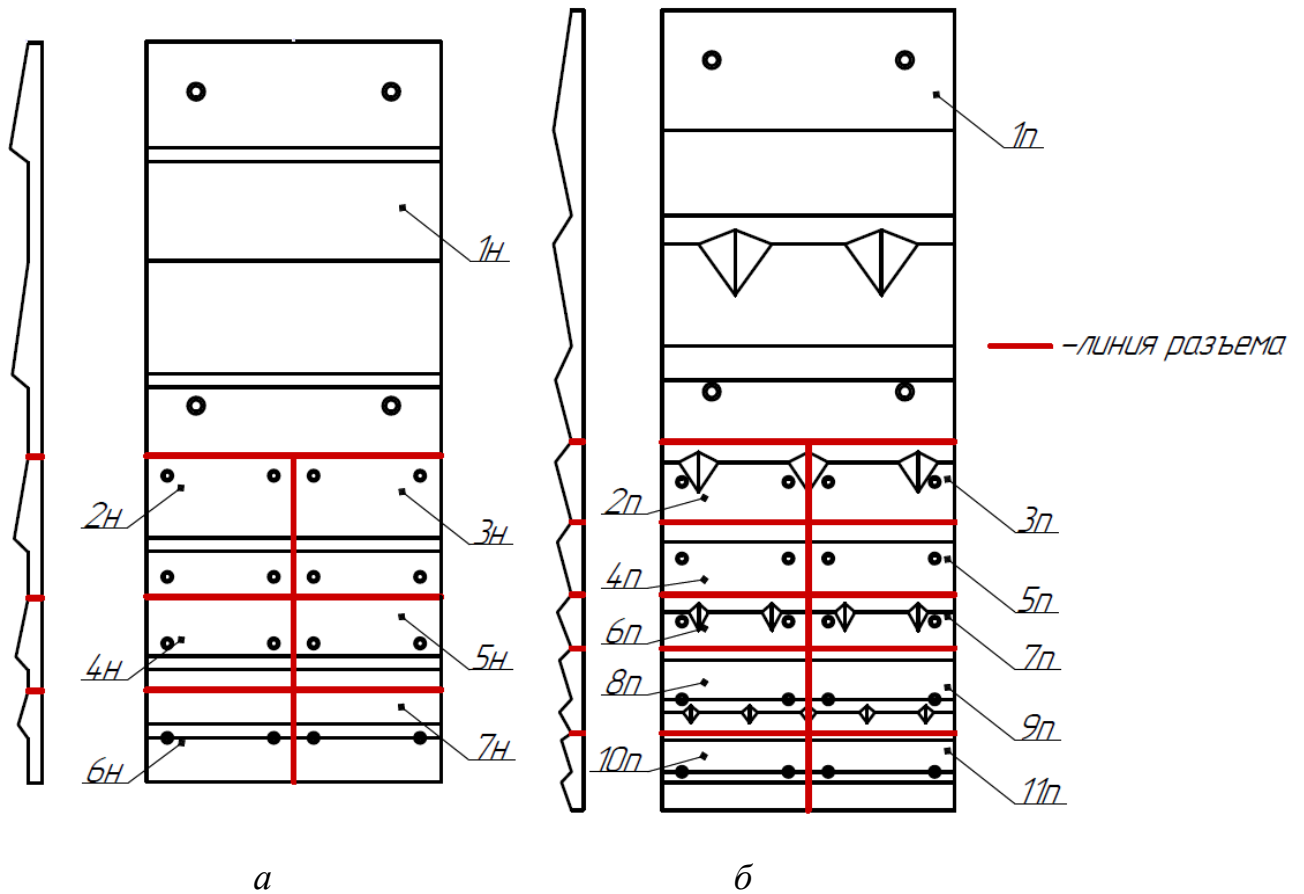


Рисунок 4.3 – Неподвижная (а) 7-ми секционная и подвижная (б) 11-ти секционная дробящие плиты с модифицированной конфигурацией рифления (1н-7н, 1п-11п - секции)

В качестве способа деформации была выбрана штамповка в закрытом штампе, как дающая возможность получать большие степени деформации и, как следствие, обеспечивать высокую износостойкость деформируемого металла. Главное преимущество штамповки в закрытом штампе относительно других способов является сниженный расход металла, в связи с отсутствием отхода в заусенец. Кроме того, поковки, полученные в закрытых штампах, имеют лучшую структуру, волокна не перерезаются в месте выхода металла в заусенец. При штамповке в закрытом штампе металл подвергается всестороннему неравномерному сжатию при значительно больших сжимающих напряжениях, чем напряжения, достигаемые в открытых штампах [47].

В связи с использованием закрытого штампа заготовки сегментов плит должны иметь одинаковый объем с готовым изделием. Поэтому высота выступа заготовки должна быть равна высоте выступа секции, а заготовка снабжается уклоном в 3° для облегчения процесса штамповки. Отливка, которую предлагается использовать в качестве заготовки для штамповки нижней секции подвижной дробящей плиты (10п-1п), как наиболее изнашиваемой части плиты, представлена на рисунке 4.4. Для заготовок остальных секций дробящих плит предлагается использовать отливки с параметрами, разработанными по этому же принципу.

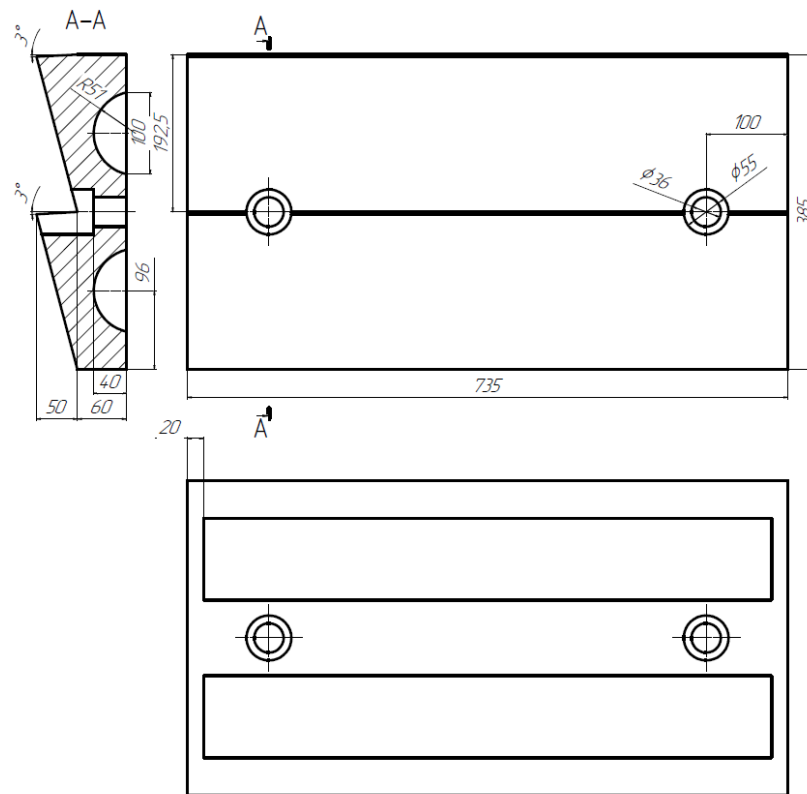


Рисунок 4.4 – Отливка для штамповки секции плиты

Закрытый штамп для изготовления секции плиты повышенной износостойкости представлен на рисунке 4.5. Полость штампа повторяет форму готового изделия, за исключением штамповочных уклонов 3° на поверхностях, перпендикулярных плоскости разъема штампа, для облегчения извлечения поковки из штампа.

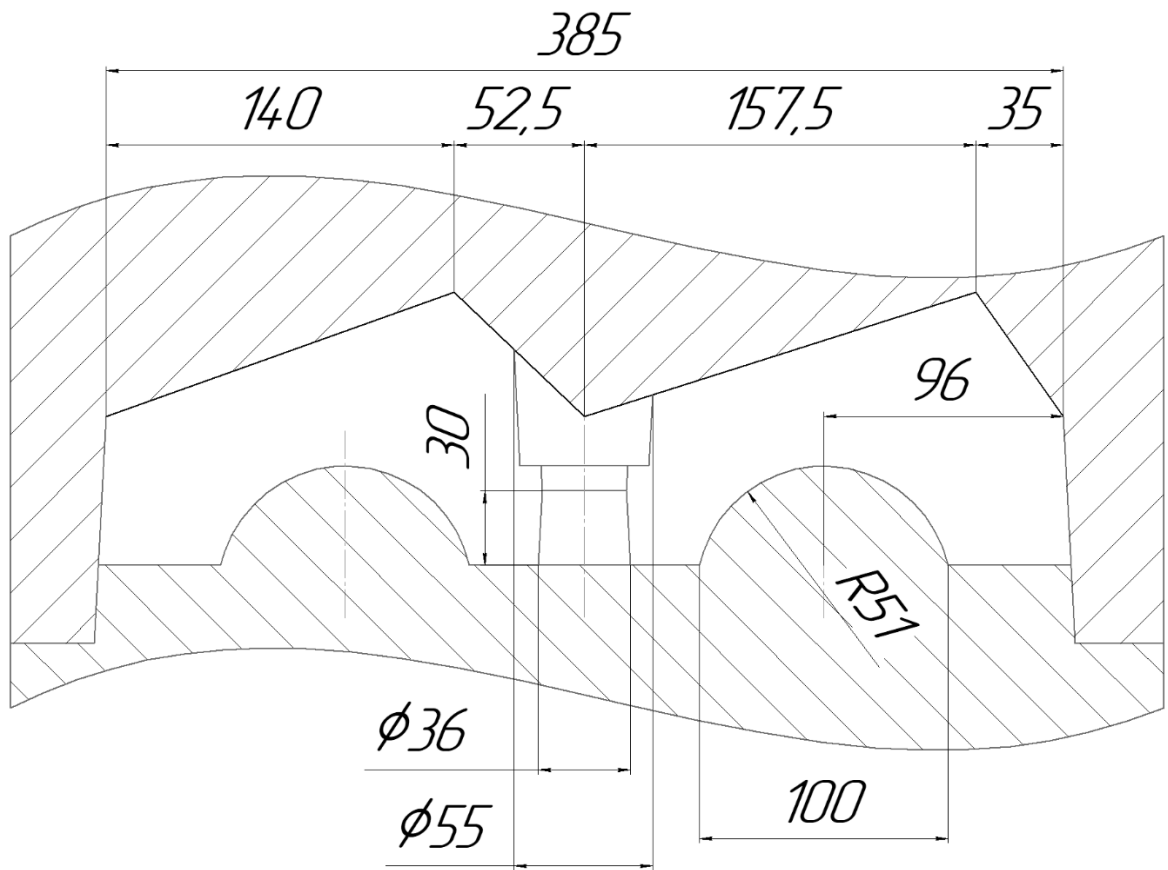
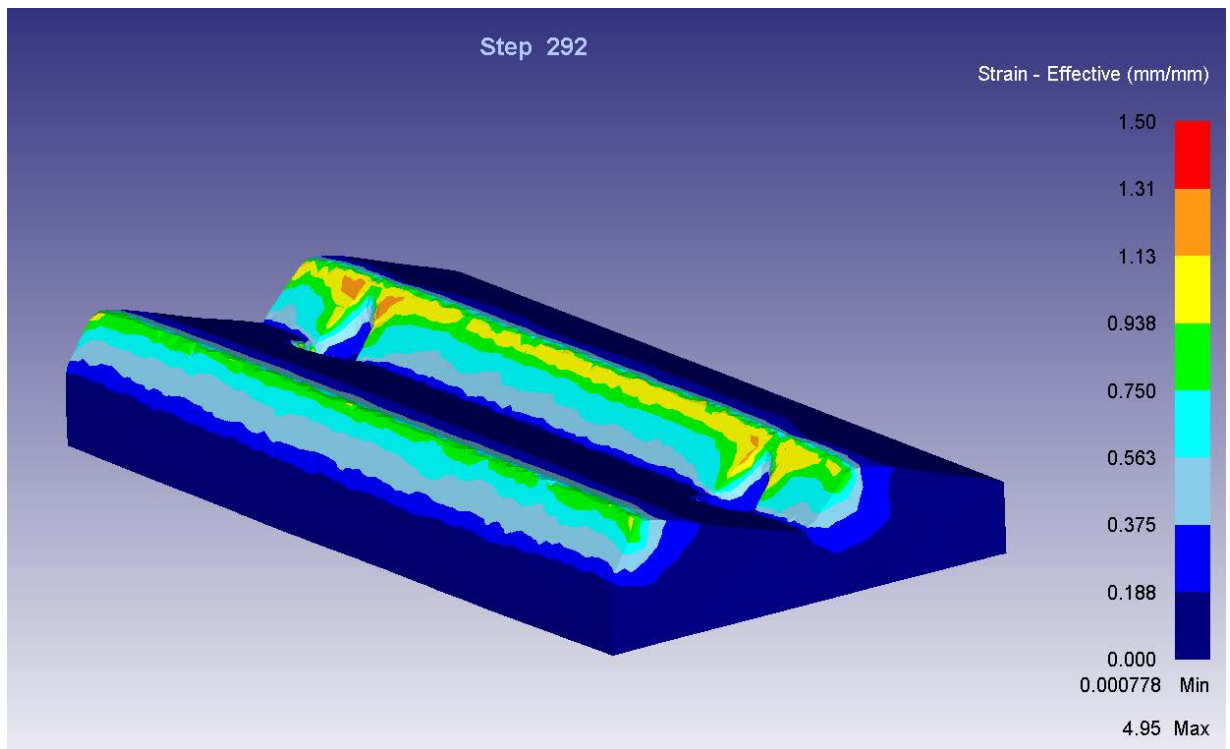


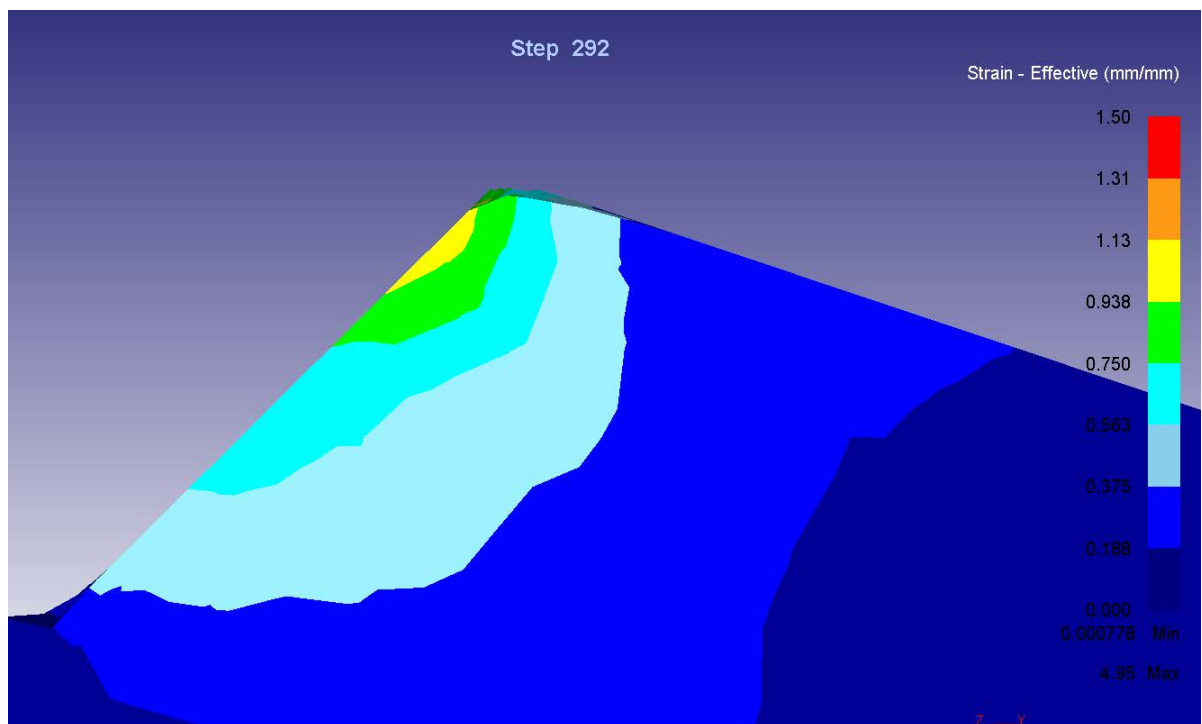
Рисунок 4.5 – Разрез закрытого штампа для изготовления секции плиты повышенной износостойкости

Результаты моделирования распределения интенсивности деформации металла по поверхности и сечению выступа футеровки, полученной штамповкой из заготовки предлагаемой конфигурации (рисунок 4.4), иллюстрирует рисунок 4.6.

В таблице 4.1. представлены интенсивности деформации различных слоев металла по высоте выступа от его вершины и соответствующий каждому слою радиус притупления R_b выступа, увеличивающийся по мере истирания металла при работе дробилки.



a



б

Рисунок 4.6 – Моделирование процесса штамповки секций плит для дробилки СМД-118 в программе *Deform-3d*: *a* – общий вид штампованной плиты; *б* – разрез выступа с распределением деформации по его высоте.

Таблица 4.1 – Распределение интенсивности пластической деформации, полученное в результате моделирования в программе *Deform-3d*

Соответствующий радиус притупления выступа, мм	Интенсивность пластической деформации
3-10	0,85
10-25	0,82
25-50	0,76
50-75	0,67
75-100	0,60
100-125	0,58

Видно (таблица 4.1), что наибольшая интенсивность деформации имеет место в слоях металла, прилегающих к вершине исходного выступа. Так для слоев, соответствующих радиусу притупления выступа $R_B = 3-10$ мм среднее значение ε_i составляет величину $\sim 0,85$, что обеспечивает (3.16) повышение износостойкости плиты до 17 %. По мере истирания металла и увеличения радиуса выступа величина ε_i уменьшается и имеет значение для $R_B = 100-110$ только 0,58. То есть уменьшается в 1,5 раза. Оказалось, что указанное соотношение между радиусом притупления выступа и интенсивностью пластической деформации металла в поверхностном слое этого выступа удовлетворительно экстраполируется прямой (рисунок 4.7) и описывается уравнением вида (4.1)

$$\varepsilon_i = -0,003 \cdot R_B + 0,879. \quad (4.1)$$

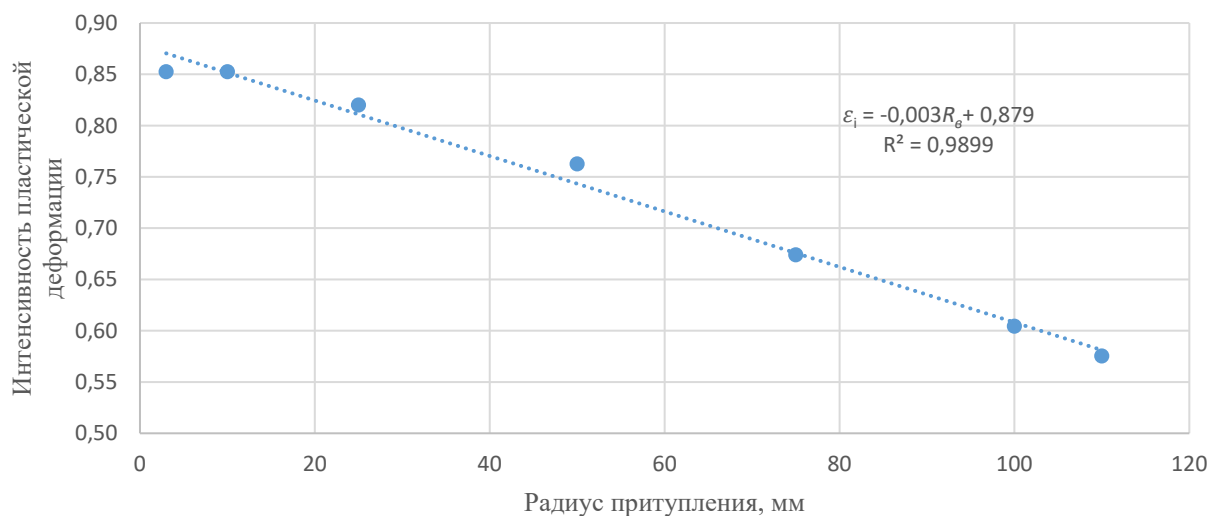


Рисунок 4.7 – Зависимость интенсивности деформации в слое металла выступа от радиуса притупления, соответствующего данному слою

Данное уравнение было использовано для определения износостойкости дробящей плиты в зависимости от степени износа ее выступов.

4.2 Усовершенствованный технологический процесс изготовления дробящих плит щековой дробилки СМД-118

Как описано в главе 1.4, в настоящее время дробящие плиты изготавливаются методом литья в песчаные формы. Для изготовления дробящих плит повышенной износостойкости предлагается выполнять плиты в виде отдельных секций, подвергнутых высокотемпературной обработке давлением

При этом операция литья в песчаную форму остается неизменной, но изменяется форма отливки на форму необходимой заготовки, установленную в результате компьютерного моделирования (рисунок 4.4). Полученную заготовку предлагается нагревать до 1150 °С и штамповать в закрытом штампе, изображенном на рисунке 4.5.

Для подбора необходимого штамповочного оборудования при моделировании процесса течения металла в программе *Deform-3D* производился замер усилия при штамповке (рисунок 4.8), максимальное значение которого составило 102,72 МН.

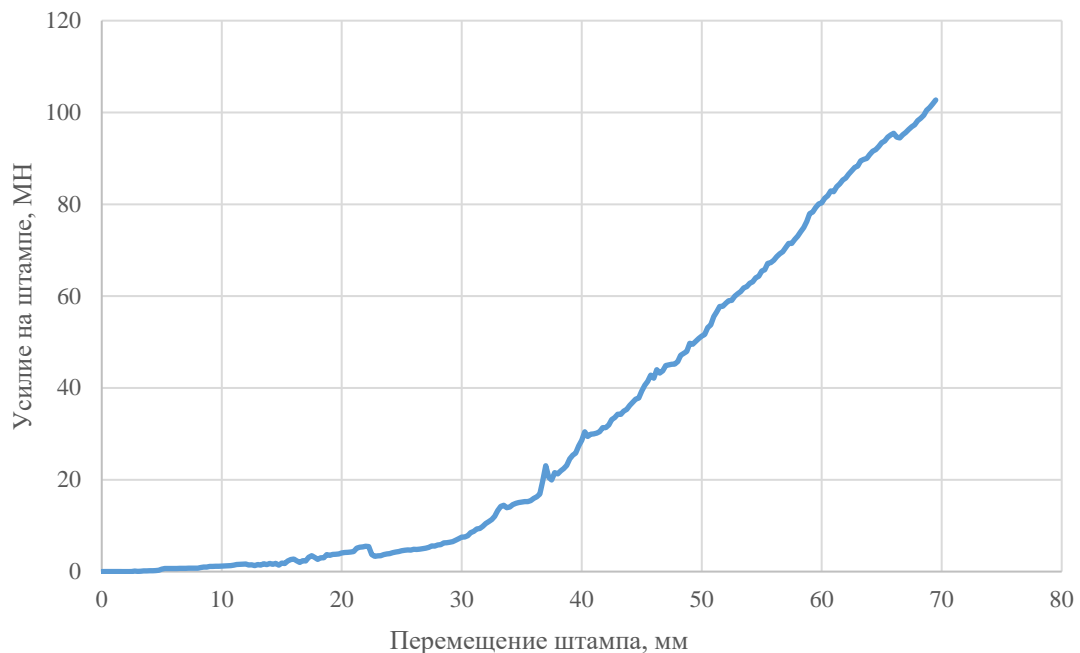


Рисунок 4.8 – Зависимость усилия штамповки от перемещения штампа

По максимальному усилию был выбран штамповочный пресс производства УЗТМ с усилием 200 МН [40] (рисунок 4.9).



Рисунок 4.9 – Штамповочный пресс УЗТМ, развивающий усилие 200 МН

Перед горячей штамповкой заготовку требуется нагреть до температурыковки (1150 °С). Важно подобрать рациональное время нагрева, т.к. при слишком быстром повышении температуры возможно образование трещин, а слишком медленный нагрев нецелесообразен с точки зрения организации технологического процесса изготовления плит. Для того, чтобы определить необходимое время нагрева, следует использовать формулу Н.Н. Доброхотова [34] (4.2).

$$T_{\text{нагр}} = K_{\text{л}} \alpha_{\text{укл}} D_{\text{заг}}, \quad (4.2)$$

где $K_{\text{л}}$ – коэффициент, учитывающий вид стали (равен 20 для легированной стали и 10 – для углеродистой); $\alpha_{\text{укл}}$ – коэффициент, зависящий от способа укладки отливок в печи: для штучных заготовок круглого сечения, нагреваемых со всех сторон 1, а для плотноуложенных 2; $D_{\text{заг}}$ – диаметр заготовки (толщина заготовки, 0,11 м), м.

Таким образом, расчетное время нагрева составило 2,2 часа. После нагрева заготовки в печи необходимо выдержать ее какое-то время при заданной температуре, для того чтобы убедиться в том, что заготовка прогрета равномерно

и имеет одинаковую температуру во всех точках сечений. Время выдержки поковки в печи по методике [34] можно принять равным 2,8 часа из расчета 1,5 минут на 1 мм условного сечения.

В процессе штамповки в закрытом штампе температура поковки значительно уменьшается в результате интенсивного теплообмена со штампом. На операцию штамповки закладывается не более получаса.

После завершения операции штамповки полученная секция дробящей плиты охлаждается на воздухе.

С учетом указанных результатов расчета временных параметров термограмма процесса изготовления плит штамповкой имеет вид графика (рисунок 4.10).

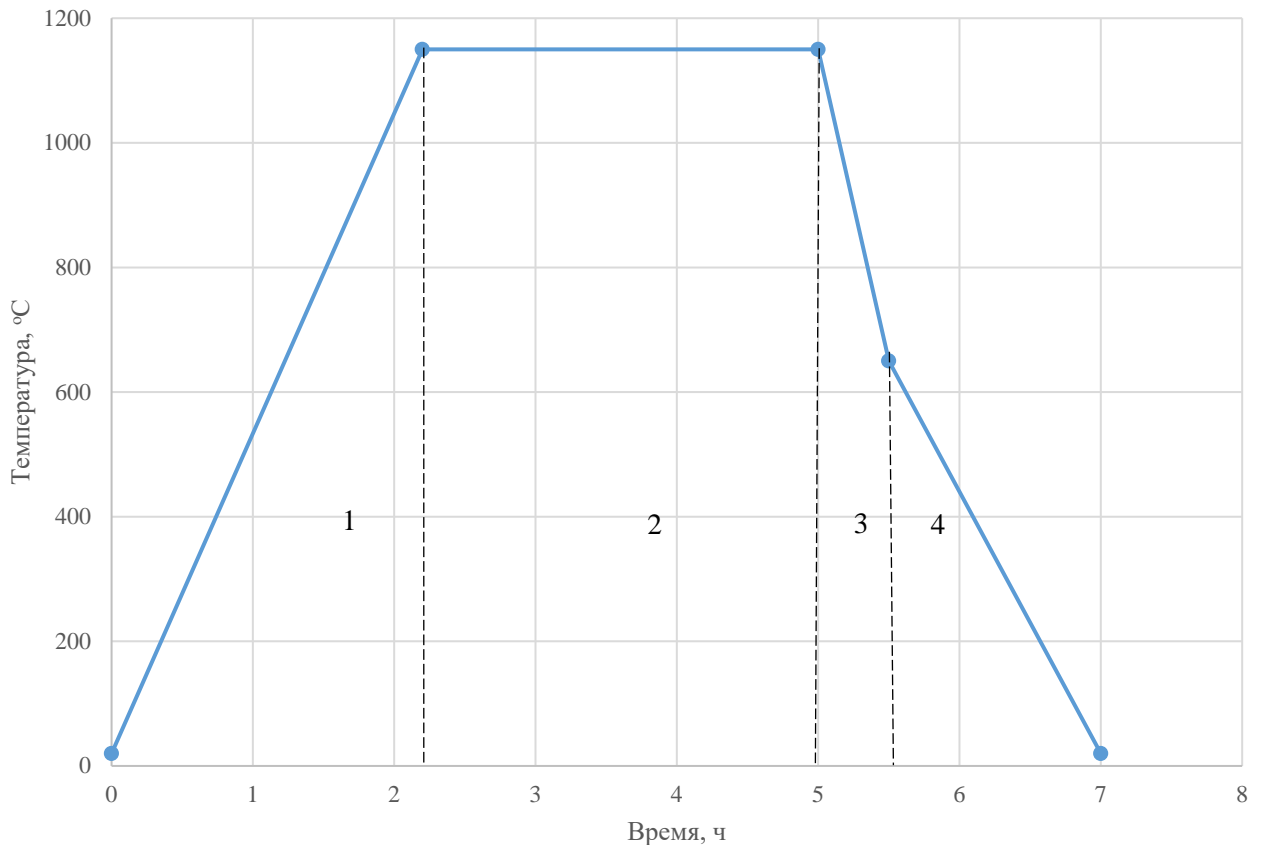


Рисунок 4.10 – Термограмма процесса изготовления дробящих плит: 1 – нагрев (2,2 ч.); 2 – выдержка в печи (2,8 ч.); 3 – штамповка на прессе (~0,5 ч.); 4 – охлаждение на воздухе (~1,5 ч.)

Исходя из результатов компьютерного моделирования по распределению интенсивности деформации в сегменте плиты, полученной в результате высокотемпературной обработки давлением (рисунок 4.6), уравнение для

определения ресурса $Q_{\text{рес}}'$ дробящих плит, состоящих из сегментов, полученных высокотемпературной обработкой давлением, имеет вид (4.3):

$$Q_{\text{рес}}' = \frac{\int_{R_{\text{в0}}}^{R_{\text{вmax}}} \frac{(m_{\text{п}} + m_{\text{н}}) J_i'}{\gamma q_{\text{р}}} k_1 k_2 k_3 dR_{\text{в}}}{(R_{\text{вmax}} - R_{\text{в0}})}, \quad (4.3)$$

где $m_{\text{п}}$ – масса подвижной плиты, для СМД-118 1900 кг; $m_{\text{н}}$ – масса неподвижной плиты, для СМД-118 1340 кг; γ – насыпная масса породы, т/м³; $q_{\text{р}}$ – удельный расход металла плит, г/т, по таблице 2.8 для дробилки СМД-118 и гранита принимается равным 15 г/т; k_1 – коэффициент, зависящий от конструкции плиты и дробилки, для дробилок с простым движением щеки равен 1,0; k_2 – коэффициент, зависящий от типа плит, для используемых плит по [68] принимается равным 1,0; k_3 – коэффициент, зависящий от материала плит, для плит из стали 110Г13Л равен 1,0; J_i' – износостойкость дробящей плиты, подвергнутой ВОД; J_0' – износостойкость литой дробящей плиты; $R_{\text{вmax}}$ – радиус выступа изношенной дробящей плиты, м; $R_{\text{в0}}$ – радиус выступа новой дробящей плиты, м.

Интеграл в выражении (4.3) позволяет учесть характер распределения интенсивности деформации по высоте выступа. Тогда, с учетом зависимости 2.30 уравнение 4.3 преобразуется к виду (4.4):

$$Q'_{\text{рес}} = \frac{\int_{R_{\text{в0}}}^{R_{\text{вmax}}} \frac{(m_{\text{п}} + m_{\text{н}})(0,2 \cdot \varepsilon_i + 1)}{\gamma q_{\text{р}}} k_1 k_2 k_3 dR_{\text{в}}}{(R_{\text{вmax}} - R_{\text{в0}})}. \quad (4.4)$$

Учитывая зависимость (4.1) для интенсивности деформации ε_i , выражение (4.4) приобретает вид (4.5):

$$Q'_{\text{рес}} = \frac{\int_{R_{\text{в0}}}^{R_{\text{вmax}}} \frac{(m_{\text{п}} + m_{\text{н}})(0,2 \cdot (-0,003 \cdot R_{\text{в}} + 0,879) + 1)}{\gamma q_{\text{р}}} k_1 k_2 k_3 dR_{\text{в}}}{(R_{\text{вmax}} - R_{\text{в0}})}. \quad (4.5)$$

Подстановка известных параметров в уравнение (4.5) позволяет определить значение ресурса $Q_{\text{рес}}'$ дробящих плит, состоящих из сегментов, полученных высокотемпературной обработкой давлением. Это значение равно 197700 м³.

С учетом того, что срок службы дробящих плит можно оценить, как $T = Q_{\text{рес}}' / V_q$, где V_q – объемная производительность дробилки СМД-118, 311,04 м³/ч,

значение T составит 636 часов, что в 1,14 раза превышает срок службы стандартных плит (559 часов).

4.3 Выводы по Главе 4

1. Предложена усовершенствованная технология производства дробящих плит, отличающаяся наличием высокотемпературной обработки давлением, обеспечивающая повышенные показатели износостойкости материала плит.

2. В результате теоретического расчета, установлено, что повышение износостойкости дробящих плит, достигаемое усовершенствованием технологического процесса их изготовления, приведет к повышению их срока службы на 14 %.

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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- A – площадь контакта с абразивной поверхностью, м²;
- $A_{др}$ – работа дробления, Дж;
- B – ширина приемного отверстия дробилки, м;
- $B_{исх}$ – крупность исходного материала, м;
- $B_{п}$ – крупность продукта, м;
- b – средняя ширина разгрузочного отверстия, м;
- b_1 – минимальная ширина разгрузочного отверстия, м;
- b_2 – максимальная ширина разгрузочного отверстия, м;
- c – коэффициент, принимаемый в зависимости от размеров загрузочного отверстия;
- c' – безразмерная эмпирическая постоянная;
- D – средний или максимальный размер куска в питании, м;
- $D_{заг}$ – диаметр заготовки (размер стороны), м;
- d – средний или максимальный размер куска в дробленом продукте, м;
- $d_{исх}$ – диаметр исходного цилиндра, м;
- d_o – диаметр образца, м;
- E – модуль упругости дробимой породы, Па;
- E_i – энергия, затрачиваемая на дробление тонны породы при уменьшении крупности от максимальной до 1 мм, кВт·ч/т;
- e – расстояние, на котором приложена усилие дробления, м;
- f_0 – коэффициент заполненности дробилки;
- H – высота подвижной щеки, м;
- HR – твердость материала, подверженного износу, Па;
- h_w – линейный износ, м;
- i – степень дробления;
- J_i – износостойкость, мин/мг;
- $J_{1..3}$ – коэффициент, определяемый зоной изнашивания по высоте дробилки;
- J_i' – износостойкость плиты, подвергнутой ВОД, с/кг;

- J_0' – износостойкость литой плиты, с/кг;
 $K, K_{1..3}$ – коэффициент зависимости затрат энергии от вида породы;
 K' – безразмерный масштабный коэффициент;
 K_i – скорость изнашивания, мг/мин;
 $K_{л}$ – коэффициент, учитывающий степень легирования стали;
 $K_{м}$ – коэффициент масштабного фактора, характеризующий изменение E_i с изменением крупности материала;
 k – коэффициент, характеризующий зависимость напряжение разрушения в дробилке от отношения радиусов выступов дробящей плиты и куска породы;
 k_1 – коэффициент, зависящий от конструкции плиты и дробилки;
 k_2 – коэффициент, зависящий от типа плит;
 k_3 – коэффициент, зависящий от материала плит;
 L – длина камеры дробления, м;
 m – конструктивный коэффициент, равный 0,56-0,60;
 $m_{н}$ – масса неподвижной плиты, кг;
 $m_{п}$ – масса подвижной плиты, кг;
 N – потребляемая мощность дробления, кВт;
 n – частота вращения эксцентрикового вала, с⁻¹;
 n' – показатель степени зависимости расхода энергии для дробления от начального до конечного размера дробимой породы;
 P – суммарное усилие дробления, Н;
 P_0 – разрушающая сила, кН;
 P_i – усилие разрушения куска породы, Н;
 P_m – средняя величина усилия дробления, т;
 $P_{уд}$ – удельная работа дробления, кВт·ч/м³;
 Q – производительность дробления, м³/ч;
 Q' – производительность дробилки по питанию, т/ч;
 $Q_{рес}$ – количество материала, переработанного плитой, м³;
 $Q_{рес}'$ – количество материала, переработанного плитой, подвергнутой ВОД, м³;

- q_i – удельное давление разрушения куска породы, Па;
 q_p – удельный расход металла плит, г/т;
 R_B – радиус притупления выступа, м;
 R_{B0} – исходный радиус выступа плиты, м;
 R_{Bmax} – радиус выступа изношенной плиты, м;
 $R_{и}$ – радиус притупления индентора, м;
 R_K – радиус куска, м;
 $R_{фр}$ – радиус фрагмента гранита, м;
 r – эксцентриситет вала, м;
 S – площадь вновь образованной поверхности, м²;
 $S_{исх}$ – площадь сечения исходного цилиндра, м²;
 S_0 – площадь поперечного сечения образца, см²;
 s – ход щеки в нижней зоне, м;
 s_{t1} – расстояние скольжения при испытании, м;
 s_t – расстояние скольжения по поверхности, м;
 T – срок службы плиты, ч;
 $T_{вод}$ – срок службы плиты, подвергнутой ВОД, ч;
 T' – температура стали, К;
 $T_{нагр}$ – общее время нагрева заготовки, ч;
 t – время работы дробилки, ч;
 t_1 – продолжительность испытания, с;
 $U_{1...3}$ – линейные коэффициенты;
 V_q – объемная производительность дробилки, м³/ч;
 v – объем призмы выпадения продукта из дробилки, м³;
 W – энергия для дробления тонны породы, кВт/кор.т
 W_i – индекс «чистой» работы, (кВт·ч/кор.т)мкм^{-0,5};
 α – степень укова;
 $\alpha_{укл}$ – коэффициент, зависящий от способа укладки заготовок в печи;

β – коэффициент, характеризующий отношение эффективного усилия дробилки к максимальному усилию;

γ – насыпная масса породы, т/м³;

γ' – коэффициент, учитывающий энергию, передаваемую маховиком в течение одного оборота;

Δm – потеря массы образца при испытании, мг;

$\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, с⁻¹;

ϵ_i – интенсивность деформации;

ξ – угол захвата щековой дробилки, градус;

η – механический КПД дробилки;

ρ – плотность изнашиваемого материала, кг/м³;

σ – предел текучести, МПа;

σ_p – предел прочности породы на растяжение, Па;

$\sigma_{сж}$ – предел прочности породы на сжатие, Па;

CAD (CAE) – система автоматизированного проектирования;

ВТМО – высокотемпературная термомеханическая обработка;

ВОД – высокотемпературная обработка давлением;

МКЭ – метод конечных элементов;

МУВП – муфта упругая втулочно-пальцевая;

ОМД – обработка металлов давлением;

ППР – планово-предупредительный ремонт;

ТВЧ – токи высокой частоты;

ТО – техническое обслуживание;

ТУ – технический уход.

Список литературы

1. Айбашев, Д. М. Обоснование параметров рифлений дробящих плит щековых дробилок: дис. ... кандидата технических наук: 05.05.06 / Айбашев Дилмурод Маматхалилович. –: Магнитогорск, 2015. – 150 с.
2. Алехин, А. Г. Влияние кинематики щековой дробилки на срок службы и характер износа дробящих плит / А.Г. Алехин, И.Л. Водопьянов, Б.В. Клушанцев // Строительные и дорожные машины. – 1971. – № 10. – С. 19-20.
3. Андреев, Е. Е. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению: Учебник / Е.Е. Андреев, О.Н. Тихонов. СПГГИ (ТУ). СПб, 2007. – 439 с.
4. Андреев, С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич. –М.: Недра, 1980. – 415 с.
5. Арзомасов, Б. Н. Материаловедение / Б.Н. Арзомасов. –М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
6. Бабук, В. В. Бабук, В.В. Вестник машиностроения: научно-технический и производственный журнал / Орган Госкомитета Совета Министров СССР по науке и технике. / В.В. Бабук. – М.: Машиностроение, 1966. – № 7. – 67 с.
7. Багмутов, В. П. Испытания на сжатие: метод. Указания / В.П. Багмутов, В.И. Водопьянов, О.В. Кондратьев, А.В. Коробов. – Волгоград: ИУНЛ ВолГТУ, 2011. – 16 с.
8. Балдаев, Л. Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. / Л.Х. Балдаев. – М.: КХТ, 2004. – 134 с.
9. Басов, А. И. Механическое оборудование обогатительных фабрик и заводов тяжелых цветных металлов. 2-е изд. / А.И. Басов. – М., «Металлургия», 1974. – 528 с.
10. Беренов, Д. И. Дробильное оборудование обогатительных фабрик / Д.И. Беренов. – М.: Metallurgizdat. – 1968. – 296 с.

11. Бернштейн, М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. / М.Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1968. – Т. 1-2. – 1172 с.
12. Блюхер, В. В. Свойства пластически деформированной высокомарганцевистой стали / В.В. Блюхер, Л.И. Парфенов, И.П. Волчок // Металловедение и термическая обработка металлов.– 1970.– №12.– С. 32-33.
13. Богацкий, А. И. Дробящие плиты отечественных и зарубежных щековых дробилок. Обзор / А.И. Богацкий, А.А. Дудко, Б.В. Клушанцев, Л.И. Логак // М. – 1970. –56 с.
14. Богацкий, А. И. Исследование факторов влияющих на износ дробящих плит щековых дробилок / А.И. Богацкий // Труды ВНИИСтройдормаша. Исследование дробильно-обогачительного оборудования. Т. 49: – М.: ВНИИСтройдормаш, 1970. – С. 77-91.
15. Богданович, П. Н. Трение и износ в машинах / П.Н. Богданович, В.Я. Прущак. – Минск: выш. Шк. – 1988. – 374 с.
16. Богданов, О. С. Справочник по обогащению руд: Подготовительные процессы. Т. 2 / О.С. Богданов, В.А. Олевский. –М.: Недра. – 1982. – 366 с.
17. Болобов, В. И. Увеличение срока службы породоразрушающих резцов путем повышения износостойкости их державок термомеханической обработкой / В.И. Болобов, С.А. Чупин, В.С. Бочков, И.И. Мишин // Горный журнал. – 2019. – № 5. – С. 67-71.
18. Болобов, В. И. Износостойкость стали Гадфильда при больших удельных нагрузках / В. И. Болобов, В. С. Бочков, Сюй Цинянь // Горное оборудование и электромеханика.– 2012.– №10.– С. 12-14.
19. Болобов, В. И. Повышение износостойкости материалов быстроизнашиваемых элементов горно-обогачительного оборудования методом высокотемпературной термомеханической обработки / В.И. Болобов, И.И. Мишин, В.С. Бочков, С.А. Чупин // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 3. – С. 20-23.

20. Болобов, В. И. Влияние термомеханической обработки на износостойкость материалов футеровок горно-обогатительного оборудования / 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.
21. Болобов, В. И. О влиянии режимов термомеханической обработки на износостойкость материалов быстроизнашиваемых элементов горно-обогатительного оборудования / В.И. Болобов, И.И. Мишин, В.С. Бочков, А.А. Неструев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 1. – С. 52–59.
22. Болобов, В. И. Влияние размеров зерна в структуре материалов быстроизнашиваемых элементов горного оборудования на их износостойкость / 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.
23. Гербер, М. Е. Основы подбора состава и структуры износостойких отливок из белого чугуна / М.Е. Гербер, И.И. Цыпин // Литейное производство. – 1970. – №6. – С.2-6.
24. Гольдштейн, М. И. Металлофизика высокопрочных сплавов: Учеб. Пособие для вузов. / М. И. Гольдштейн, В. С. Литвинов, Б.М. Бронфин. – М.: «Металлургия», 1986. – 310 с.
25. ГОСТ 21153.0-75 Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний (с Изменением № 1). – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. – 18 с.
26. ГОСТ 24941-81. Породы горные. Методы определения механических свойств нагружением сферическими инденторами (с Изменением № 1). – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. – 16 с.
27. Гуляев, А. П. Металловедение: учеб. для вузов. / А. П. Гуляев. – 6-е изд.,

перераб. и доп. – М. : Metallurgy, 1986. – 541 с.

28. Дамдинова, Д. Р. Машины и оборудования для измельчения и сортировки строительных материалов / Д.Р. Дамдинова, В.Г. Дондуков. – Улан-Удэ: ВСГТУ. – 2004. – 54 с.

29. Добаткин, С. В. Наноматериалы. Объемные металлические нано- и субмикроструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией: Учеб. Пособие. / С.В. Добаткин. – М.: МИСиС, 2007. – 36 с.

30. Донченко, А. С. Эксплуатация и ремонт дробильного оборудования / А.С. Донченко, В.А. Донченко. – М., 1972. – 320 с.

31. Дудко, А. А. Щековые дробилки грануляторы. Обзор зарубежного опыта / А.А. Дудко, Б.В. Клушанцев // Оборудование для производства строительных материалов. – 1966. – №2. – С. 40-46.

32. Жарков, В. Я. Абразивная износостойкость конструкционных сталей в зависимости от термомеханической обработки (ВТМО и НТМО) / В.Я. Жарков, М.М. Кантор // Износ и антифрикционные свойства материалов (Трение и износ в машинах): Сб. науч. тр. – М.: Наука, 1968. – Вып. 20. – С. 65-71.

33. Зверевич, В. В. Основы обогащения полезных ископаемых / В.В. Зверевич, В.А. Перов. – М., изд-во «Недра», 1971. – 216 с.

34. Звягин, В. Б. Оборудование и автоматизация процессов тепловой обработки материалов и изделий (часть II): учебное пособие / сост. В.Б. Звягин, В.Н. Мишин, В.В. Цуканов, А.В. Сивенков. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. – 283 с.

35. Зимин, А. И. Расчет абразивного износа дробящих плит щековой дробилки / А.И. Зимин, Л.Н. Борохович, Б.В. Фадеев // Строительные и дорожные машины. – 1981. – № 12. – С. 10-12.

36. Зимин, А. И. Повышение долговечности и прогнозирование сроков службы деталей машин. /А.И. Зимин. Свердловск, ПО «Полиграфист». – 1982. – 62 с.

37. Зимин, А. И. Повышение износостойкости молотковых мельниц и дробилок.

/А.И. Зимин, В.П. Шабанов, Б.В. Фадеев. Свердловск, ПО «Полиграфист». – 1982. – 55 с.

38. Иванов, В. Н. Моделирование процесса выдавливания методом конечных элементов. / В.Н. Иванов, К.М. Иванов, Е.А. Пригоровский, Д.В. Усманов // Инструмент и технологии. – М., 2006. – № 2. – Вып-1. – С. 94-102.

39. Каменичный, И. С. Краткий справочник технолога-термиста / И.С. Каменичный – К.: Машгиз, 1963. – 287 с.

40. Каталог вертикальных прессов // УЗТМ Уралмашзавод: [сайт]. – 2019. – URL: https://uralmash-kartex.ru/files/promotional-materials/Vpres_ru.pdf (дата обращения: 30.06.2019).

41. Кириченко, А. И. О теориях дробления и применении их при конструировании дробильных машин / А. И. Кириченко // Записки Горного института. – №60 ч.1. – Л.:ЛГИ. –1970. –С. 176-190.

42. Клушанцев, Б. В. Конструктивные решения узлов щековых дробилок, повышающие их надежность / Б.В. Клушанцев, Л.И. Логак, В.И. Волчек – М.: ЦНИИТЭстроймаш. – 1968. – 47 с.

43. Клушанцев, Б. В. Дробилки. Конструкция. Расчет. Особенности эксплуатации / Б.В. Клушанцев, Ю.А. Косарев, Ю.А. Музеймек. – М.:Машиностроение. –1990. – 319 с.

44. Клушанцев, Б. В. Щековые дробилки. Методы расчета и особенности эксплуатации / Б.В. Клушанцев, А.И. Косарев, Л.Н. Логак, А.И. Богацкий. – М.: ВНИИстройдормаш, 1972. – 83 с.

45. Комиссаров, А. П. Энергетическая характеристика щековых дробилок с простым и сложным качанием щеки / А.П. Комиссаров, И.А. Лозгачев, М.Ю. Корепанов // Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья: материалы научно-технической конференции, проводимой в рамках VI Уральского горнопромышленного форума. Под общей редакцией

- Е.Ф. Цыпина; Ответственный редактор Т.Ю. Овчинникова. – 2015. – С. 26-28.
46. Кравченко, И. П. Основы надежности машин. – Ч. II. / И.П. Кравченко, В.А. Зорин, Е.А. Пучин – М.: Изд-во ВТУ при Федеральном агентстве специального строительства, 2007. – 260 с.
47. Кривцов, А. М. Деформация и разрушение твердых тел с микроструктурой / А.М. Кривцов – М.: Физматлит, 2007. – 304 с.
48. Кроха, В. А. Кривые упрочнения при холодной деформации / В.А. Кроха – М.: Машиностроение, 1968. – 131 с.
49. Кузбаков, Ж. И. Обоснование параметров, разработка и внедрение дробящих плит щековых дробилок для дробления сырья ферросплавного производства: автореф. дис. ... кандидата технических наук: 05.04.04 / Кузбаков Жанабергем Иманкулович. –: Днепропетровск, 1988. – 14 с.
50. Лагунова, Ю. А. Новые направления в проектировании и эксплуатации горно-обогатительного оборудования. / Ю.А. Лагунова, Е.А. Лазарев, П.А. Жиганов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – № 6. – С. 301-305.
51. Лагунова, Ю. А. Экспериментальное определение энергетической характеристики свойства дробимости // Известия УГГУ. – 2003. – №16.– С.53-57.
52. Лагунова, Ю. А. Энергопотребление при дроблении горных пород конусными дробилками // Известия УГГУ. – 2000. – №9.– С.158-161.
53. Лагунова, Ю. А. Энергетическая модель процесса дробления горных пород сжатием // Известия УГГУ. – 1997. – №6.– С.100-104.
54. Лахтин, Ю. М. Материаловедение. / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
55. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин. – М.: Металлургия, 1976. – 407 с.

56. Левенсон, Л. Б. Дробильно-сортировочные машины и установки для переработки каменных материалов / Л.Б. Левенсон. – М.: Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1952. – 428 с.
57. Левенсон, Л. Б. Угол захвата в щековой дробилке и его определение / Л.Б. Левенсон // Механизация строительства. – 1948. – №8. – С. 15-16.
58. Лещинский, А. В. Выбор основных параметров щековых дробилок для внутрикарьерного дробления / А.В. Лещинский, Е.Б. Шевкун // ГИАБ. – 2006. – №2 – С.327-333.
59. Линч, А. Д. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление: Пер. с англ. / А. Дж. Линч. – М.: Недра. – 1981. – 343 с.
60. Липов, П. П. Щековые дробилки. / П.П. Липов. – М.: Металлургиздат, 1958. – 113 с.
61. Логак, Л. И. Определение расхода дробящих плит щековых дробилок / Л.И. Логак, В.И. Волчек // Горный журнал. – 1968. – № 8. – С. 41-43.
62. Малич, Н. Г. Анализ и перспективы развития отечественных машин для дробления твердых материалов / Н.Г. Малич, В.С. Блохин, А.О. Дегтярев // ГИАБ. – 2008. – №1 – С.365-380.
63. Методы испытания на изнашивание: Труды совещания, состоявшегося 7-10 дек. 1960 г. / Акад. наук СССР. Гос. ком. Совета Министров СССР по автоматизации и машиностроению. Ин-т машиноведения; [Отв. ред. д-р техн. наук проф. М.М. Хрущов]. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. – 238 с.
64. Мишин, И. И. Определение зависимости потребной мощности щековой дробилки от степени износа дробящих плит / Мишин И.И., Болобов В.И. // Транспортное, горное и строительное машино-строение: наука и производство. Санкт-Петербург. – 2019 – № 3. – С. 18–25.
65. Мишин, И. И. Оценка влияния упрочняющей обработки на износостойкость

быстроознашиваемых деталей горного оборудования / 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.

66. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – М.: Metallurgy, 1978. – 392 с.

67. Олевский, В. А. Конструкции, расчеты и эксплуатация дробилок / В.А. Олевский. – М.: ГНТИЛ по черной и цветной металлургии, 1958. – 459 с.

68. ОСТ 22-1679-87. Плиты дробящие щековых дробилок. Технические условия. Введ. 01.01.1988. – М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1987. – 15 с.

69. Парфенов, П. И. Структура и износостойкость стали Г13Л / П.И. Парфенов, Г.А. Сорокин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1969.– №1. – С. 67-68.

70. Паршин, В. С. Практическое руководство по программному комплексу Deform-3D: учебное пособие / В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.И. Пугин, А.А. Федулов. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.

71. Патент РФ № 2626481, 19.04.2016 Болобов В.И., Бочков В.С., Мишин И.И., Чупин С.А. Способ изготовления износостойких поворотных резцов // заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – № 2016115253; заявл. 19.04.2016; опубл. 28.07.2017, Бюл. № 22.

72. Петрова, С. Н. Упрочнение сталей // С.Н. Петрова, В.Д. Садовский, Е.И. Соколов. – М.: Металургиздат, 1960. – 111 с.

73. Подэрни, Р. Ю. Механическое оборудование карьеров: Учеб. для вузов / Р.Ю. Подэрни // 5-е изд. – М.: Издательство Московского государственного горного университета. –2003. –606 с.

74. Расчет щековых дробилок: Методические указания /Сост. Ю.А. Федотенко, П.В. Коротких. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2012. – 20 с.

75. Рудской, А. И. Нанотехнологии в металлургии. / А.И. Рудской. – СПб.: Наука, 2007. – 186 с.
76. Рундквист, А. К. Общая форма законов дробления / А.К. Рундквист // Механообр. Научно-технический информационный бюллетень. – 1956. – № 2. – С. 12-13.
77. Свирин, В. Г. Механизация замены футеровок на крупных щековых дробилках / В.Г. Свирин // Горный журнал. – №10. – СПб. – 1994. – С.58.
78. Семенов, Е. И. Ковка и горячая штамповка: учебник / Е.И. Семенов – М.: МГИУ, 2011. – 414 с.
79. Серго, Е. С. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / Е.С. Серго – Киев.: «Бища школа». – 1975. – 169 с.
80. Собенин, Л. А. Устройство и ремонт тепловозов: Учебник для нач. проф. Образования. / Л.А. Собенин, В.И. Бахолдин, О.В. Зинченко, А.А. Воробьев. – М.: Академия, 2004. – 416 с.
81. Сорокин, Г. М. Трибология сталей и сплавов / Г.М. Сорокин – М.: Недра, 2000. – 316 с.
82. Справочник по обогащению руд. Том 1. Подготовительные процессы. / И.К. Акиншин, Н.Т. Бащенко, О.С. Богданов, В.В. Зверевич, И.М. Костин, В.А. Олевский, В.А. Перов. – М.: Недра, 1982. – 367 с.
83. Таггарт, А. Ф. Справочник по обогащению полезных ископаемых: Пер. с англ. / А. Ф. Таггарт; Под общ. ред. С. И. Полькина. – Москва: Изд. и тип. Metallurgizdata, 1949-1952. – 4 т.
84. Тененбаум М. М. Износостойкость деталей и долговечность горных машин. / М. М. Тененбаум. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 238 с.
85. Техническое описание и инструкция по эксплуатации дробилки СМД-118 // ООО «ДРОБсервис», г. Челябинск [сайт]. – 2017. – URL: <https://www.drobservis.ru/about/techdocs/tekhnicheskoe-opisanie-SDM-118/> (дата обращения: 13.01.2017).

86. Ткачев В. Н. Методы повышения долговечности деталей машин / В.Н. Ткачев. – М.: Машиностроение, 1971. – 272 с.
87. Ткачев, В. М. Ресурсосберегающая технология литья плит из высокомарганцовистой стали: дис. ... кандидата технических наук: 05.16.04 / Ткачев Владимир Михайлович. –: Челябинск, 2011. – 166 с.
88. Третьяков, А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. / А.В. Третьяков, В. И. Зюзин. - Справочник 2-е изд. М.: Metallurgy, 1973. – 224 с.
89. Труды европейского совещания по измельчению / Коллектив авторов. – М., 1966. – 604 с.
90. Хрущов, М. М. Исследования изнашивания металлов / М.М. Хрущов, М.А. Бабищев. – Акад. наук СССР. Ин-т машиноведения. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1960. – 351 с.
91. Чулок, В.Р. Дробильщик / В.Р. Чулок, В.Г. Гуревич. – Л.: Стройиздат, 1980. – 71 с.
92. Чупин, С. А. Износостойкость стали 110Г13Л в различных абразивных средах / С.А. Чупин, В.И. Болобов, В.С. Бочков, А.П. Баталов // Записки Горного института. – 2014. – Т.209. – С. 17-23.
93. Чупин, С. А. Повышение износостойкости поворотных резцов проходческих комбайнов для проведения выработок по породам средней крепости: дис. ... кандидата технических наук: 05.05.06 / Чупин Станислав Александрович. –: СПб, 2015. – 141 с.
94. Adler, P. H. Strain Hardening of Hadfield Manganese Steel / P.H. Adler, G.B. Olson, W.S. Owen // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1986.– Volume 17.– pp. 1725–1737.
95. Archard, J. F. Wear theory and mechanisms / J. F. Archard // Wear control handbook. American Society of Mechanical Engineers. – 1980. – Т. 58.– pp. 35-80.

96. Arlazarov, A. Characterization and Modeling of Manganese Effect on Strength and Strain Hardening of Martensitic Carbon Steels / A. Arlazarov, O. Bouaziz, A. Hazotte, M. Goune, S. Allain // *ISIJ International*. – 2013.– Volume 53. – №6.– pp. 1076–1080.
97. Bayraktar, E. Strain rate and temperature effect on the deformation behavior of the original hadfield steel / E. Bayraktar, C. Levailant, S. Altintas // *Journal de Physique IV Colloque*. – 1993.– Volume 03(C7).– pp. 61–66.
98. Chupin, S. A. By applying the method equal channel angular extrusion for products submicron structure at the bulk of metal / *Smart Nanocomposites, Proceedings from the seminar «Nanophysics and Nanomaterials»*. – Volume 4. – №1. – pp.55-59.
99. DEFORM-3D Version 6.1 (sp1) /User's manual, 2007. – 368 p. [Электронный ресурс]. – URL: <http://home.zcu.cz/~sbenesov/PDF/DEFORM-3D-V61.pdf> (дата обращения: 08.03.2017).
100. Enginsoy, H. A. Comprehensive Study on the Deformation Behavior of Hadfield Steel Sheets Subjected to the Drop Weight Test: Experimental Study and Finite Element Modeling / H. Enginsoy, E. Bayraktar, A. Kursun // *Metals*. – 2018.– Volume 8. – №734. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/8/9/734/pdf> (дата обращения: 09.04.2019).
101. Gupta, A. *Mineral Processing Design and Operation* / A. Gupta, D.S. Yan. - Elsevier Science, 2006. – 718 p.
102. Jablonska, M. A study of mechanical properties of high manganese steels after different rolling conditions / M. Jablonska, A. Smiglewicz // *Metallurgija*. – 2015.– Volume 54. – №4.– pp. 619-622.
103. Lee, W.-S. Plastic deformation and fracture characteristics of Hadfield steel subjected to high-velocity impact loading / W-S Lee, T-H Chen // *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part C-journal of Mechanical Engineering Science*. – 2002. – Volume 216. – №10. – pp. 971-982.
104. Mishin, I. I. Effect of thermomechanical treatment on wear resistance of Hadfield's

steel / I.I. Mishin, V.I. Bolobov, T.I. Titova, D.V. Ratushev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Volume 194. – pp. 042015. [Электронный ресурс]. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/194/4/042015/pdf> (дата обращения: 25.05.2019)

Приложение А
Патент на изобретение.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2626481

**СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ
ПОВОРОТНЫХ РЕЗЦОВ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный минерально-сырьевой университет "Горный" (RU)*

Авторы: *Болобов Виктор Иванович (RU), Бочков Владимир Сергеевич (RU), Мишин Илья Игоревич (RU), Чупин Станислав Александрович (RU)*

Заявка № 2016115253

Приоритет изобретения 19 апреля 2016 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 28 июля 2017 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 19 апреля 2036 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Маличев

Приложение Б

Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по подготовке научных
кадров и программ

Горного университета

проф. И.Б. Сергеев

« 10 »

2019 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Мишина И.И. «Совершенствование технологического процесса изготовления дробящих плит щековой дробилки для повышения их износостойкости при дроблении гранита» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

В частности, при проведении практических занятий со студентами направления 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» образовательной программы «Металлургические машины и оборудование» дисциплина «Новые конструкционные материалы» по технологии изготовления быстроизнашиваемых элементов горного оборудования методом высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО).

Изучение влияния ВТМО на эксплуатационные характеристики материалов быстроизнашиваемых элементов горного оборудования происходит на примере образцов стали 110Г13Л, предварительно откованных с диаметров 10, 12 и 14 мм до диаметра 8 мм и подверженных закалке с температуры ковки. Это позволяет использовать для испытаний образцы, деформированные при проведении ВТМО с различной интенсивностью. Образцы изнашиваются на специально разработанном стенде при использовании в качестве абразивной среды таких материалов как электрокорунд, гранит и песчаник. Через

одинаковые промежутки времени с использованием лабораторных весов осуществляется замер убыли массы образцов.

По результатам измерений устанавливаются зависимости убыли массы образцов от времени, исходя из которых определяются скорости изнашивания образцов, подвергнутых ВТМО с различной интенсивностью деформации. Анализ скоростей изнашивания образцов, откованных с указанных диаметров, показывает рост их износостойкости (до 40%) по сравнению с литыми образцами.

Заведующий кафедрой Машиностроения,
д.т.н., профессор



В.В. Максаров

