

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

На правах рукописи

Ахмеров Эрик Викторович



СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОЦЕССА ВЫЕМКИ ВЗОРВАННОЙ
ГОРНОЙ МАССЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САМОЗАТАЧИВАЮЩИХСЯ ЗУБЬЕВ
КОВША ЭКСКАВАТОРА

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, с.н.с.
Болобов В.И.

Санкт-Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СРОК СЛУЖБЫ ЗУБЬЕВ КОВШЕЙ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ	12
1.1 Открытые горные работы, как наиболее распространенный вид добычи полезных ископаемых.....	12
1.2 Свойства горных пород, влияющие на основные технологические процессы открытого способа разработки месторождений	14
1.3 Выемочно-погрузочные горные машины и их основные элементы, подвергающиеся изнашиванию	18
1.4 Способы повышения технических характеристик зубьев	28
1.5 Выводы по главе.....	31
ГЛАВА 2 ПОТЕРЯ ИСХОДНОЙ ФОРМЫ ЗУБЬЕВ КОВША ЭКСКАВАТОРА, КАК ПРИЧИНА СУЩЕСТВЕННОГО ВОЗРАСТАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРОДЫ ЭКСКАВАЦИИ	33
2.1 Закономерности изнашивания зубьев ковшей экскаваторов в зависимости от природы экскавируемой породы	33
2.2. Разработка имитационной модели процесса силового взаимодействия взорванной скальной породы с зубом.....	41
2.2.1 Особенности выбора средств создания имитационной модели.....	41
2.2.2 Алгоритм создания и анализа имитационной модели	42
2.3 Результаты имитационного моделирования и их анализ.....	47
2.5 Влияние формы зуба на энергоемкость процесса экскавации	51
2.6 Выводы по главе 2.....	56

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ КОВША ЭКСКАВАТОРА НА ИХ АБРАЗИВНУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПРИ РАБОТЕ ПО ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЕ	59
3.1 Выбор методики экспериментального исследования абразивного изнашивания	59
3.2 Разработка методики и экспериментальной установки по изучению влияния термомеханической обработки на абразивную износостойкость материала зубьев	62
3.3 Результаты экспериментов и их анализ	70
3.3.1 Обоснование выбора материалов для дальнейших исследований	70
3.3.2 Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на износостойкость материала зубьев ковшей экскаваторов	74
3.3.3 Экспериментально-расчетное обоснование возможности переноса результатов эксперимента на условия эксплуатации зубьев.....	75
3.4 Выводы по главе 3.....	81
ГЛАВА 4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЬЕВ КОВША ЭКСКАВАТОРА С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТА САМОЗАТАЧИВАНИЯ ЗУБА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЕ	83
4.1 Разработка необходимой конфигурации заготовки при штамповке коронки зуба в процессе ВТМО.....	84
4.2 Основные этапы термомеханической обработки и используемое оборудование	89
4.2 Оценка энергоемкости процесса экскавации при использовании модифицированного зуба ковша экскаватора.....	91
4.3 Выводы по главе 4.....	94

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	98
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов диссертационной работы.....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на изобретение «Способ изготовления зуба ковша экскаватора».....	113

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В связи с ежегодным ростом мирового уровня потребления твердых полезных ископаемых, добыча которых, преимущественно, осуществляется открытым способом, возникает необходимость в разработке современных научных решений, направленных на повышение производительности горных машин, а также снижение энергоемкости процессов, связанных с основными этапами разработки месторождения.

Перед извлечением полезных ископаемых из массива полускальной и скальной горной породы, существует необходимость в проведении буровзрывных работ, цель которых заключается в формировании разрушенной горной массы с определенными характеристиками для последующей эффективной экскавации. При этом продукты взрыва горной породы отличаются высокой степенью прочности и абразивности.

В настоящее время основной объем выемки и погрузки взорванной горной массы осуществляется одноковшовыми карьерными экскаваторами. В процессе эксплуатации контактирующие с породой зубья ковшей подвергаются интенсивному изнашиванию с укорочением и потерей симметричности их формы, сопровождающихся увеличением угла заострения и формированием площадки притупления, что приводит к существенному возрастанию энергоемкости процесса экскавации.

Одним из путей снижения негативного воздействия изнашивания зубьев является разработка научно-обоснованного технологического решения по совершенствованию их изготовления, обеспечивающего сохранение зубьями симметричности их формы на протяжении всего периода эксплуатации, т.е. эффект «самозатачивания».

Степень разработанности темы исследования

В работах Абезгауза В.Д., Балашова В.Ф., Ветрова Ю.А., Гальперина М.И., Домбровского Н.Г., Дэлэга Д., Зеленина А.Н., Картвелишвили Ю.Л., Макушенко А.В., Соколов Г.А., Сычева К.К., Shivali Singla, Juuso Terva, Zhong

Minghui, Wang Jintao и др. определены характерные особенности процесса изнашивания элементов рабочего оборудования выемочно-погрузочных горных машин и разработаны способы повышения их износостойкости; предложены конструкции и способы изготовления зубьев, обеспечивающие эффект их «самозатачивания» и увеличение срока службы. В то же время не выявлены в должной мере причины нарушения симметричности формы зубьев ковшей экскаваторов при выемке взорванной горной массы, в недостаточной степени решены вопросы повышения их износостойкости технологическими методами в процессе изготовления зубьев, для чего необходимо проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Объект исследования – процесс изнашивания зубьев ковша экскаватора при абразивном и ударно-абразивном воздействии на них взорванной горной массы.

Предмет исследования – геометрический профиль зуба ковша экскаватора в процессе изнашивания.

Цель исследования: снижение энергоемкости процесса выемки взорванной горной массы экскаваторами типа ЭКГ разработкой научно обоснованного решения по совершенствованию технологического процесса изготовления зубьев.

Идея исследования: снижение энергоемкости при выемке взорванной горной массы экскаватором типа ЭКГ достигается включением в технологический процесс изготовления зубьев его ковша операции высокотемпературной термомеханической обработки (далее ВТМО), обеспечивающей повышенную износостойкость нижней части зуба и, как следствие, эффект его самозатачивания в процессе работы.

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. На основе анализа и обобщения теоретических и экспериментальных исследований определить факторы, оказывающие влияние на энергоемкость процесса экскавации взорванной горной массы.

2. Провести имитационное моделирование процесса силового взаимодействия зуба ковша экскаватора со взорванной горной массой для оценки возникающих контактных напряжений и энергоемкости процесса экскавации в зависимости от степени изнашивания зубьев.

3. В условиях, моделирующих процесс абразивного изнашивания зубьев при выемке взорванной горной массы, провести экспериментальные исследования влияния ВТМО на твердость поверхностного слоя зубьев и его износостойкость.

4. Разработать рекомендации по совершенствованию технологического процесса изготовления зубьев с целью обеспечения эффекта их «самозатачивания» и, как следствие, снижения энергоемкости процесса экскавации.

Научная новизна:

1. Исходя из результатов компьютерного моделирования, подтвержденных замерами твердости и анализом вида различных участков поверхности изношенного зуба, выявлено, что в процессе перемещения зуба в массиве взорванной горной массы нижняя и верхняя его поверхности, испытывая воздействие близких по величине сил сопротивления породы, подвергаются различным преобладающим видам изнашивания: верхняя – ударно-абразивному, а нижняя – абразивному, что вызывает более интенсивное изнашивание нижней части зуба с потерей симметричности его формы.

2. Аналитически-расчетным путем показано, что применение зубьев с повышенной износостойкостью их нижней части, обеспечивающей эффект «самозатачивания», снижает до 40% величину сопротивления взорванной горной породы экскавации за срок эксплуатации зубьев.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Экспериментально подтверждена прямо пропорциональная зависимость между интенсивностью абразивного изнашивания металлического материала и прилагаемой к нему удельной нагрузки,

позволяющая переносить результаты экспериментов по абразивному изнашиванию образцов материала зуба на натурные зубья ковшей экскаваторов и рассчитывать убыль фиксированного размера зуба за заданный путь трения при его эксплуатации, исходя из интенсивности изнашивания материала зубьев в условиях экспериментов и разницы в удельных нагрузках изнашиваемого объекта, имеющих место в натуральных условиях и эксперименте.

2. Результатами компьютерного моделирования показано, что применение заготовки разработанной конфигурации обеспечивает течение металла при штамповке по траектории, обуславливающей получение металлом нижней части зуба повышенной заданной интенсивности пластической деформации (Патент РФ №2779978 (Приложение Б)) и, как подтверждено экспериментами, твердости и износостойкости.

3. Предложено научно-обоснованное изменение технологического процесса изготовления зубьев ковша экскаватора, обеспечивающее эффект «самозатачивания» зуба при выемке взорванной горной массы, что способствует снижению до 1,4 раз нагрузок на рабочие механизмы и до 1,3 раз удельного энергопотребления экскаватора по сравнению с использованием им штатных зубьев.

4. Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс на предприятии ООО «ИЗ-КАРТЭКС ИМЕНИ П.Г. Коробкова» (Акт внедрения от 17.04.2023 (Приложение А)) для повышения качества проектирования путем предварительной оценки внедряемых технологических решений при помощи методов математического моделирования, позволяющих воссоздавать процесс взаимодействия рабочего инструмента карьерного экскаватора с взорванной горной массой.

Методология и методы исследования.

Проведение научного исследования осуществлялось на основании комплексного подхода, связанного с детальным анализом теоретических сведений о процессе изнашивания зубьев ковша экскаватора и способами

повышения их износостойкости, эмпирическим подтверждением эффективности предлагаемых технологических решений на базе разработанной экспериментальной установки, математическим моделированием процессов взаимодействия зуба с кусковой породой.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности 2.8.8 Геотехнология, горные машины** по пункту 15 «Методы и средства повышения эксплуатационных характеристик и надежности горных машин и оборудования, в том числе за счет обоснования рациональных режимов их функционирования на открытых и подземных горных работах».

Положения, выносимые на защиту:

1. Причиной потери симметричности зубьев ковша экскаватора типа ЭКГ при выемке взорванной горной массы, приводящей к повышению до 3 раз сопротивления породы перемещению в ней зуба, является различие в преобладающем направлении силового воздействия кусков породы на зуб – по нормали к верхней и касательно относительно нижней поверхности, что определяет более интенсивное изнашивание нижней поверхности.

2. Внедрение операции высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) в технологический процесс изготовления зуба ковша экскаватора с использованием конфигурации заготовки, позволяющей при штамповке сконцентрировать повышенную интенсивность деформации металла в нижней части зуба, обеспечивает эффект его «самозатачивания» в процессе эксплуатации, что способствует снижению до 1,3 раз энергоемкости процесса выемки взорванной горной массы по сравнению с зубьями, изготовленными по существующей технологии.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов математического и имитационного моделирования в области контактного взаимодействия кусковой породы и зуба ковша экскаватора.

Апробация результатов.

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- международный симпозиум «Нанofизика и Наноматериалы» (НиН-2019);

- VII Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020»;

- международный симпозиум «Нанofизика и Наноматериалы» (НиН-2020);

- международная научно-практическая конференция «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» 2022;

- научная конференция студентов и молодых ученых Горного университета «Полезные ископаемые России и их освоение» 2023 г.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач научного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы, посвященной установлению закономерностей процесса изнашивания зубьев ковшей экскаваторов; проведении экспериментальных и теоретических исследований, необходимых для подтверждения эффективности предлагаемых технологических решений, разработке рекомендаций по совершенствованию технологического процесса изготовления зубьев ковша экскаватора для обеспечения эффекта их «самозатачивания» в процессе эксплуатации; участие в написании научных статей по теме диссертации.

Публикации.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 печатных работах (пункты в списке литературы № 5; 7; 111; 112; 124), в том числе в 1 статье - 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 3 статьях - в изданиях, входящих в

международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент (Приложение Б).

Структура диссертации.

Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 127 наименований и 2 приложения. Диссертация изложена на 113 страницах машинописного текста, содержит 55 рисунков, 7 таблиц и 26 формул.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СРОК СЛУЖБЫ ЗУБЬЕВ КОВШЕЙ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

1.1 Открытые горные работы, как наиболее распространенный вид добычи полезных ископаемых

На протяжении последних десятилетий в мире наблюдается отчетливый рост уровня потребления полезных ископаемых, добыча которых, преимущественно производится открытым способом, что обуславливает актуальность разработки научно-технических решений, направленных на снижение энергоемкости работ, выполняемых при разработке месторождений таким способом.

Открытый способ разработки месторождений, где добыча полезных ископаемых производится с поверхности земли, характеризуется предварительным выполнением большого объема работ, связанного с обеспечением прямого и безопасного доступа к залежам полезного ископаемого, покрытых в земной коре пустыми горными породами, путем их выемки и переноса в отвал. По сравнению с подземными, открытые горные работы обладают более высоким уровнем безопасности, более высокой производительностью и низкой себестоимостью добычи [88].

Полезные ископаемые, добываемые открытым способом, в зависимости от физико-химических свойств и области применения делятся на [55]:

- металлические, представляющие собой руды черных металлов, из которых впоследствии переработки получают железо, марганец, хром, титан, ванадий; руды цветных металлов, результатом переработки которых являются никель, кобальт, магний, вольфрам, молибден, медь, свинец, алюминий и др.; а также руды благородных (платина, золото), редких (литий, цезий, кадмий) и радиоактивных (уран, торий, радий) металлов;

- неметаллические, к которым относятся такие полезные ископаемые, как драгоценные камни (алмаз, рубин, сапфир, гранат, топаз и др.), а также материалы для строительной (известняк, гранит, базальт, мрамор и др.),

химической (фосфор, соли, сера, апатиты) и индустриальной (асбест, графит, корунд, кварц и др.) промышленности;

- горючие, являющиеся источником угля, горючих сланцев и битума.

В России более половины от количества добываемого объема железной руды, добыча которой преимущественно производится открытым способом, сосредоточена на территории Курской магнитной аномалии (КМА), где располагаются такие крупные горно-обогатительные комбинаты (ГОК) как Михайловский, Лебединский и Стойленский (рисунок 1.1) [28].

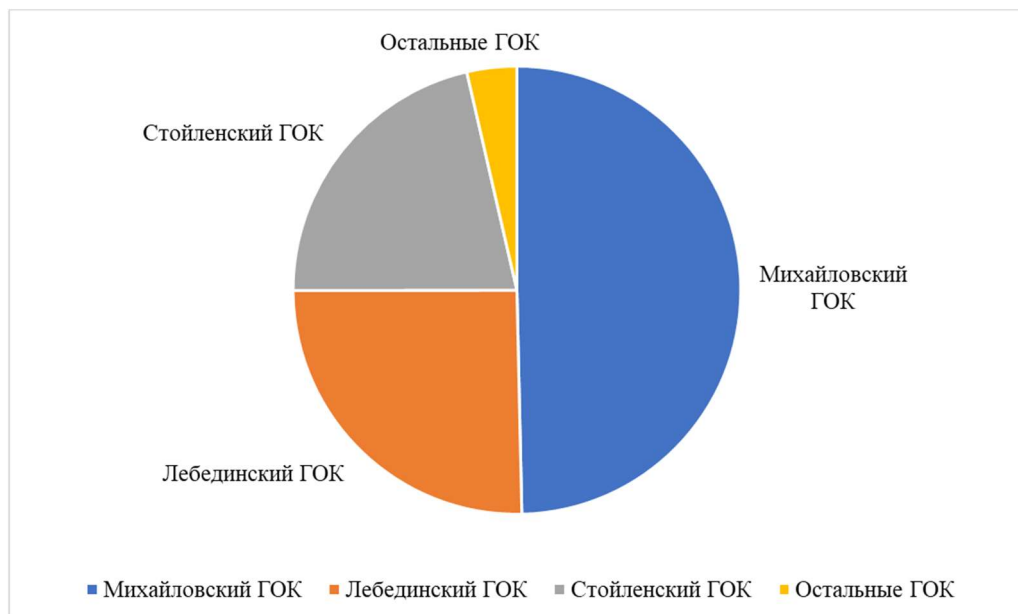


Рисунок 1.1 – Добыча сырой железной руды в пределах КМА

Крупнейшей горно-металлургической компанией в России по добыче и последующей переработке цветных металлов, является ПАО «ГМК Норильский никель» [52], осуществляющий свою деятельность на Талнахском и Октябрьском месторождениях.

В России большая часть залежей алмазной руды сосредоточена в Якутии, добыча которой выполняется в основном на коренных месторождениях, где более половины горных работы ведется открытым способом, мощностями отечественной компании АК «Алроса» [38; 84].

Несмотря на активное развитие приоритета использования вторичных энергетических ресурсов, за 2021 общемировое количество добытого угля в 2 раза превысило аналогичный показатель 1981 года [123] (рисунок 1.2). При

этом на территории России около 75% от общей добычи угля сосредоточено на месторождениях, разрабатываемых преимущественно открытым способом (Кедровский, Моховский, Бачатский, «Междуреченский» и др. угольные разрезы).

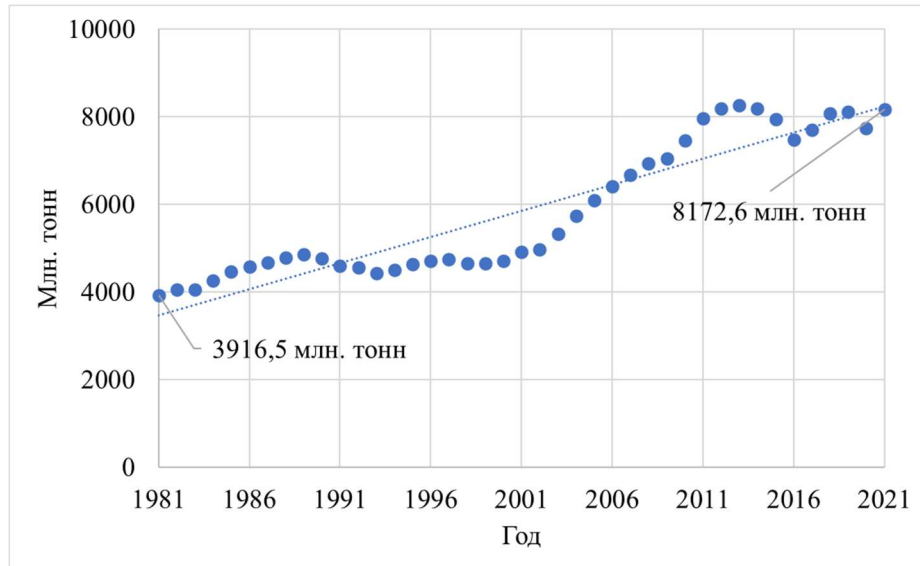


Рисунок 1.2 – График мировой добычи угля в период с 1980-2021 г

1.2 Свойства горных пород, влияющие на основные технологические процессы открытого способа разработки месторождений

Горные породы – субъект, с которым осуществляется взаимодействие при разработке месторождений для изменения их агрегатного состояния, представляют собой минералы, слагающих земную кору в виде обособленных тел. Они обладают рядом физико-технологических свойств, такими как плотность, пористость, крепость, твердость, абразивность, трещиноватость, которые играют существенную роль при обосновании выбора параметров горных машин и особенностей проведения технологических процессов на всех этапах горных работ [56].

Комплекс открытых горных работ, основной целью которого является добыча полезных ископаемых, состоит из последовательных и связанных между собой основных производственных процессов:

- подготовительного;
- выемочно-погрузочного;

- транспортировочного;
- отвалообразующего вскрышные породы;
- складирования или транспортировки полезных ископаемых.

Наибольшее внимание физико-технологическим характеристикам горной породы уделяется при выборе оптимальных параметров проведения подготовительных и выемочно-погрузочных работ. Академиком Ржевским В.В. предложен численный показатель относительной оценки затрат, на базе сопротивления горной породы изменению их агрегатного состояния и расположения при бурении, взрыве и экскавации [74].

На этапе подготовки горных пород к выемке происходит разрушение целостности разрабатываемого массива. В зависимости от прочности и крепости (f) горных пород, определяемой по шкале Протоdjяконова М.М., разрушение массива происходит:

- без проведения работ по предварительному рыхлению, путем механического воздействия рабочего инструмента горных машин – для мягких и сыпучих горных пород ($f < 2$);

- с проведением буровзрывных работ, для разрушения массива крепких, полускальных и скальных горных пород ($f > 2$), в результате которых получается взорванная (разрушенная, разрыхленная) горная масса.

Основная цель проведения буровзрывных работ состоит в формировании горной массы, обладающей необходимыми характеристиками для бесперебойного и эффективного взаимодействия с горными машинами на последующих этапах разработки месторождения с учетом технико-экономических затрат. На особенности проведения этого процесса большое влияние оказывает степень трещиноватости и прочность горных пород. Качество взорванной горной массы характеризуется составом по размерности куска горной породы (d_k , мм) и коэффициентом разрыхления (k_p), определяемого по формуле 1.1:

$$k_p = \frac{\rho_{\text{раз}}}{\rho_{\text{цел}}}, \quad (1.1)$$

где $\rho_{\text{раз}}$ – плотность породы в разрыхленном состоянии, кг/м³;

$\rho_{\text{цел}}$ – плотность породы в массиве, кг/м³.

Требуемый размер крупности кусков горной массы определяется на основании предельно допустимых значений относительно технических ограничений, влияющих на производительность и эффективность использования горных машин. Например, максимально допустимый размер куска породы (1.2) для экскаваторов определяется на основании величины емкости его ковша [20].

$$d_{\text{м}} \leq 0,8 \cdot \sqrt[3]{E}, \quad (1.2)$$

где $d_{\text{м}}$ – максимально допустимый размер куска породы, м;

E – емкость ковша экскаватора, м³.

Процентное содержание величины кусков одинакового размера (фракции) относительно общего объема взорванной массы определяет её гранулометрический состав. Для проведения анализа результата буровзрывных работ фракционный состав классифицируется на классы в зависимости от размера куска. Общей характеристикой размера кусков горной массы является ее среднее значение линейного размера (диаметра).

Из-за неоднородности строения горных пород, в ходе взрыва могут образоваться негабариты, оказывающие отрицательное влияние на производительность карьерного оборудования [1; 11] и требующие проведения дополнительных работ по вторичному дроблению пород [71].

Коэффициент разрыхления горной массы ($k_{\text{р}}$) зависит от трещиноватости и плотности горных пород, а также от способа взрывного разрушения массива. Сопротивление внедрению рабочего инструмента, оказываемое горной породой при экскавации, обратно пропорционально значению коэффициента разрыхления в развале, что отражается на необходимости учета технических характеристик используемых в работе экскаваторов в соответствии с мощностью взрывных веществ [55].

Величина ширины и высоты развала горной породы после взрыва влияет на безопасность и эффективность выемочно-погрузочных работ. При высоком

значении ширины развала оператору экскаватора требуется больше времени для выполнения действий по перемещению и заполнению ковша, что негативно отражается на производительности выемочно-погрузочных работ; высота развала регламентируется максимальной высотой черпания экскаватора, исходя из правил безопасности.

Все вышеназванные параметры оказывают влияние на величину технической производительности экскаватора (Q_T , м³/ч) [55; 94], которая рассчитывается формуле (1.3):

$$Q_T = \frac{3600 \cdot V_{\text{ковш}} \cdot k_H}{t_{\text{р.ц.}} \cdot k_p}, \quad (1.3)$$

где $V_{\text{ковш}}$ – объем ковша экскаватора, м³;

k_H – коэффициент определяющий степень полезного использования ковша;

$t_{\text{р.ц.}}$ – время рабочего цикла, с;

k_p – коэффициент разрыхления горной массы.

Показатель производительности, в свою очередь, с экономической точки зрения, влияет на энергоемкость процесса экскавации (a , кВт·ч/м³) [41; 42; 54], определяющей расход энергетических ресурсов на единицу объема экскавируемой породы, рассчитываемую по формуле (1.4):

$$a = \frac{N}{Q}, \quad (1.4)$$

где N – средневзвешенная мощность рабочего механизма экскаватора, кВт;

Q – производительность экскаватора, м³/ч.

На мощность, требующуюся для создания необходимого усилия в механизме подъема и напора экскаватора оборудованного прямой лопатой в процессе экскавации, значительное влияние оказывает удельное сопротивление горной породы ($k_{\text{уд}}$, МПа). При этом максимальные усилия, возникающие в рабочих механизмах экскаватора, фиксируются во время заполнения ковша горной породой.

1.3 Выемочно-погрузочные горные машины и их основные элементы, подвергающиеся изнашиванию

Основная роль экскаваторной техники при разработке открытого месторождения состоит в выемке рабочим инструментом объема горной массы и последующего перемещения её в отвал или в кузов транспортного средства [25].

Выемочно-погрузочная техника в зависимости от характера выполнения рабочих операций при экскавации подразделяется на две основных группы:

- одноковшовая (экскаваторы, бульдозеры, погрузчики) характеризующаяся циклическим выполнением последовательных рабочих операций;

- многоковшовая (роторные, цепные экскаваторы), осуществляющая рабочие операции параллельно, тем самым обеспечивая непрерывность рабочего процесса.

Одноковшовые экскаваторы, осуществляющие цикл из четырех последовательных операций по черпанию, перемещению, опорожнению ковша и повторному перемещению ковша к забою, за счет существования различных вариантов исполнения рабочего оборудования и особенностей технического исполнения, считаются весьма универсальными горными машинами, способными работать практически на любом горнодобывающем предприятии со всеми существующими видами горных пород без проведения предварительной подготовки, за исключением разработки скальных и вечномерзлых грунтов, для экскавации которых требуется предварительное проведение буровзрывных мероприятий.

Многоковшовые экскаваторы, за счет непрерывности рабочего процесса экскавации, отличаются более высоким уровнем производительности, по сравнению с одноковшовыми, однако имеют больше ограничений, которые необходимо учитывать при использовании данного вида техники. В основном данный тип горных машин применяют для работы в однородных грунтах, обладающих относительно невысокой степенью крепости (песок, глины,

каменный уголь, сланцы). Сложное техническое устройство многоковшовых экскаваторов приводит к значительным трудностям при транспортировке на большие расстояния, зачастую сопряженные с полным разбором горной машины на составляющие детали, в связи с чем рентабельность использования данной группы горных машин обусловлена наличием существенного объема однотипной работы в пределах относительно малых расстояний [49].

В отечественной литературе классификация одноковшовых экскаваторов достаточно обширная, их можно разделять на основании используемых силовых установок (электрические, дизельные), устройства ходовой (гусеничные, колесные, шагающие), однако основной классификационный признак одноковшовых экскаваторов, определяющий его тип и основные факторы эксплуатации горной машины на горнодобывающем предприятии, базируется на конструктивных особенностях используемого рабочего оборудования [72; 87; 94]

Рабочее оборудование экскаваторов представляет собой конструкцию из составных элементов, где основным элементом является исполнительный (рабочий) орган (ковш), а также устройства, служащие для его фиксации (стрела и рукоять) и перемещения (система канатов или гидравлики). Исходя из особенностей связи исполнительного органа и стрелы экскаватора, их можно разделить на две основные группы: с жестким контактом, к которым относятся прямая и обратная лопата, и с гибким контактом – драглайн, грейфер (рисунок 1.3) [10].

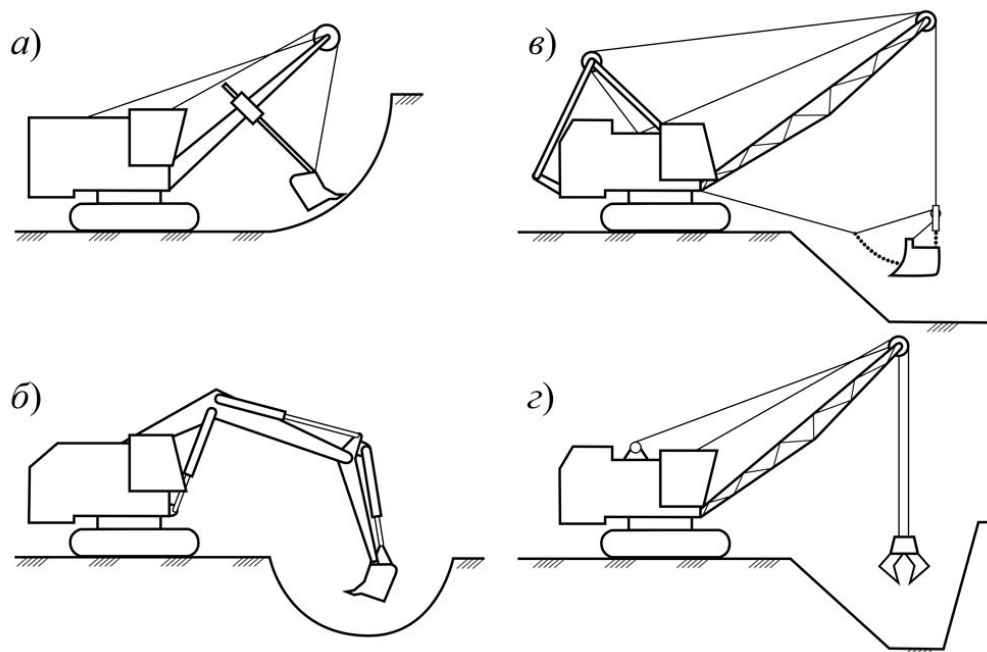


Рисунок 1.3 – Схематическое изображение особенностей строения рабочего оборудования одноковшовых экскаваторов

а – прямая лопата; *б* – обратная лопата; *в* – драглайн; *г* – грейфер

На открытых разработках месторождений в России широкое распространение получили электромеханические экскаваторы, оборудованные прямым механическим рабочим органом, представленные модельным рядом экскаваторов типа ЭКГ, производимых на мощностях отечественных компаний ООО «ИЗ КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» и ОАО «Уралмашзавод», а также гидравлические экскаваторы, оборудованные как прямыми, так и обратными исполнительными органами, представленные зарубежными производителями, такие как Komatsu Limited, Hitachi Ltd., Caterpillar Inc. и LIEBHERR [93].

Распространенность электромеханических экскаваторов с прямой лопатой, конструктивная схема которого представлена на рисунке 1.4, объясняется высоким уровнем надежности и универсальностью использования. Данный вид экскаваторов применяется для работы по разработке забоя, расположенного выше уровня расположения экскаватора [4].

При экскавации внедрение ковша в массив горной массы на определенную глубину происходит за счет воздействия напорного усилия через напорный механизм и перемещение его вверх за счет подъемных канатов усилием, создаваемым подъемным механизмом.

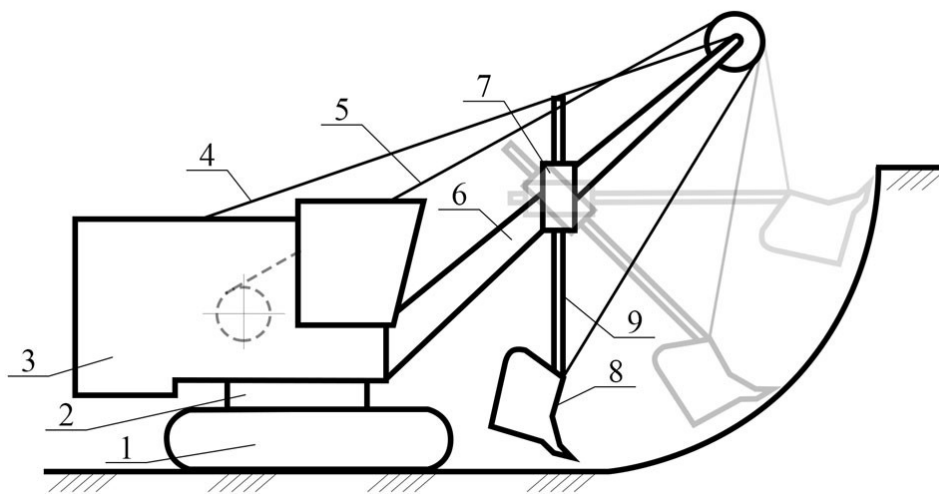


Рисунок 1.4 – Схематическое изображение конструктивной схемы электромеханического экскаватора, оборудованного прямой лопатой
 1 – ходовое оборудование; 2 – поворотная платформа; 3 – кузов экскаватора;
 4 – стреловой канат; 5 – подъемный канат; 6 – стрела; 7 – напорный механизм; 8 – ковш; 9 – рукоять

Физико-механические свойства горных пород при экскавации в значительной мере влияют на факторы, которые необходимо учитывать при разработке конструкции и выборе соответствующих материалов элементов исполнительных органов. В процессе экскавации разрушение целостности массива разрабатываемого грунта происходит за счет механического воздействия рабочего органа, за исключением тех случаев, когда требуется предварительное проведение взрывных работ (для I-V категории грунтов по шкале Протодяконова М.М.). При этом энергоемкость механического процесса при выемке мягких грунтов составляет порядка $0,05 \text{ (кВт}\cdot\text{ч)/м}^3$, тогда как для более крепких грунтов этот показатель существенно возрастает [23].

Основными элементами рабочего оборудования экскаваторов, осуществляющими непосредственный контакт с горной породой под воздействием высоких знакопеременных статических и динамических нагрузок, являются ковш и, установленные на нем, зубья. Объем переносимой породы в ковше определяет основной технико-экономический параметр экскаватора – его производительность (1.3). Особенности строения конструкции ковша зависят от поставленной задачи и физико-механических свойств разрабатываемой породы. Например, выбор геометрии профиля режущей части выбирается с учетом обеспечения низкой энергоемкости процесса экскавации [22].

Как правило, ковш изготавливается в виде сварно-литой конструкции (рисунок 1.5), где наиболее подверженные изнашиванию части, а именно передняя стенка ковша и его днище, изготавливаются из более износоустойчивых материалов [10; 72]. В случае, если речь идет о конструктивной схеме экскаватора, оборудованного прямой лопатой, то обязательной составляющей конструкции ковша для его опорожнения является механизм раскрытия его нижней части.

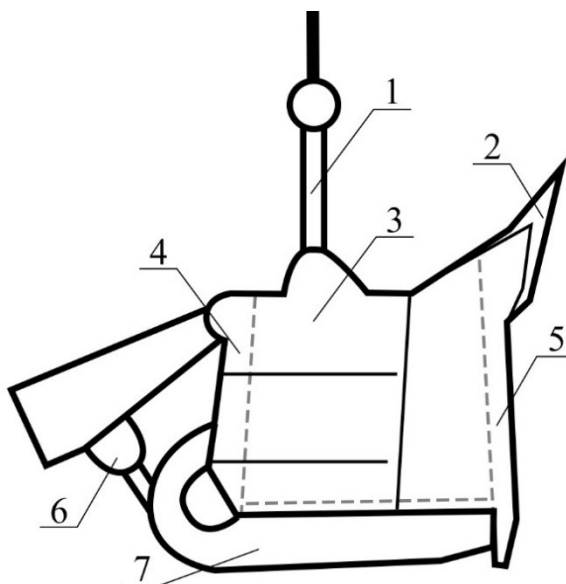


Рисунок 1.5 – Конструктивная схема ковша экскаватора ЭКГ-5А

1 – траверса; 2 – зубья; 3 – корпус ковша; 4 – задняя стенка ковша; 5 – передняя стенка ковша; 6 – механизм управления раскрытия днища; 7 – днище ковша

На передней стенке полукруглой формы, в зависимости от типа, размера и предназначения ковша, устанавливается комплект из сменных зубьев или коронок. На уровне оси симметрии ковша зубья выступают на заметно большее расстояние относительно тех, что установлены по бокам, при таком расположении достигается снижение уровня энергозатрат при экскавации.

Зуб ковша экскаватора (рисунок 1.6) наиболее подверженный элемент рабочего оборудования экскаватора, подвергающийся значительному агрессивному воздействию во время экскавации. Геометрически любой зуб можно представить в виде прямоугольной призмы, на задней части которого обязательно присутствует посадочное крепление ковшу (или адаптеру), а на передней – режущая кромка соответствующей конфигурации.

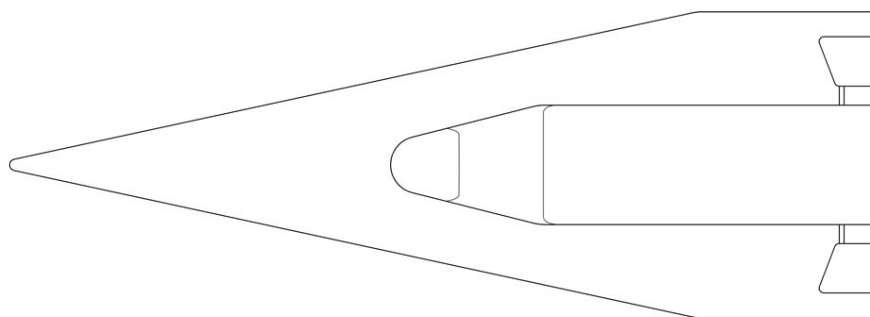


Рисунок 1.6 – Зуб ковша экскаватора ЭКГ-5А

Конструктивно зуб ковша экскаватора может быть представлен в двух вариантах исполнения – цельнолитой полноценный зуб, который напрямую соединяется с ковшом при помощи резьбового соединения, либо двухсекционный зуб, состоящий из адаптера, жестко присоединенного к ковшу, и, присоединяемой к нему при помощи специального соединения, литой или штампованной быстросъемной коронки, выполненной из износостойчивого материала.

Система коронка-адаптер, нашедшая популярность у наиболее распространенных универсальных экскаваторов с малым объемом ковша, обладает рядом преимуществ, таких как низкий расход дорогостоящего материала, необходимого для изготовления коронки, возможность использования различного вида коронок для работы по разной горной породе

с одним адаптером, а также меньшее время, которое затрачивается на смену изношенного резца [22; 94].

В связи с тем, что усилие, создаваемое напорным механизмом экскаватора, концентрируется на режущей кромке зубьев (рисунок 1.7), различным геологическим условиям отвечают особенности строения этой части рабочего элемента.

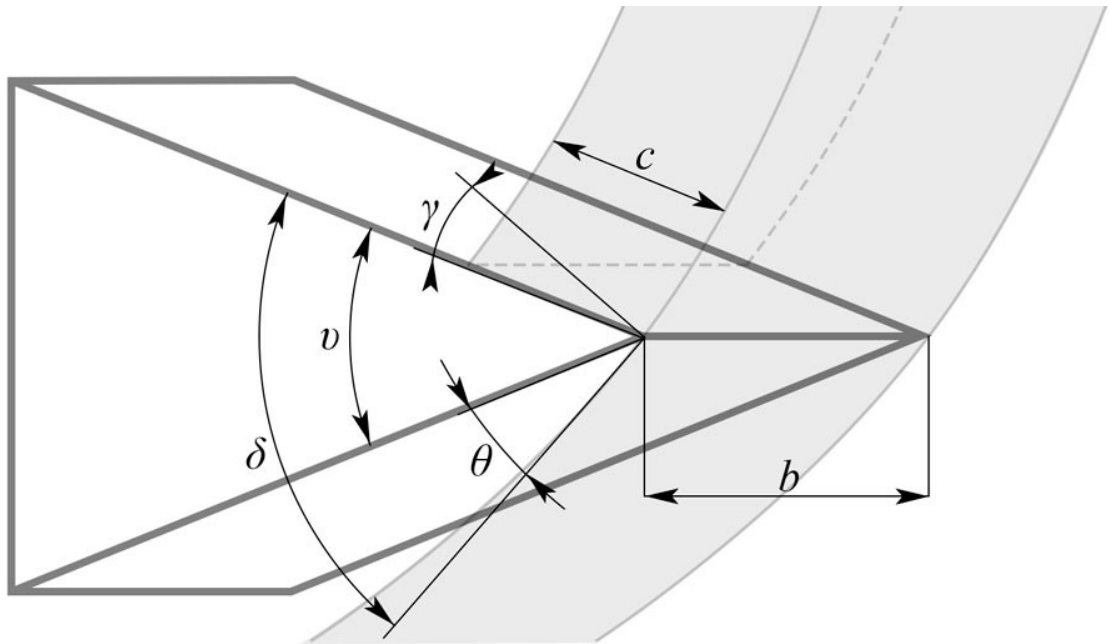


Рисунок 1.7 – Схематическое изображение основных геометрических параметров зуба

c – ширина условно срезаемой стружки, b – длина режущей кромки, v – угол заострения, θ – задний угол, γ – передний угол, δ – угол резания.

Конфигурация режущей части напрямую зависит от физико-механических характеристик разрабатываемой горной массы. Так для пород, где основным видом воздействия при разрушении массива является резание, как правило, применяют зубья с классической заостренной режущей кромкой (рисунок 1.8, а). Для разработки хорошо подготовленной взорванной горной массы [44; 77], боковой профиль режущей кромки имеет форму прямоугольной или правильной трапеции (рисунок 1.8, б), где верхнее основание смещено в сторону нижней части зуба. Для выемки V категории горных пород по трудности экскавации [56], а также для работы в забое с

неудовлетворительным качеством проведенных подготовительных работ, режущая часть выполняется в форме вытянутого конуса (рисунок 1.8, в).

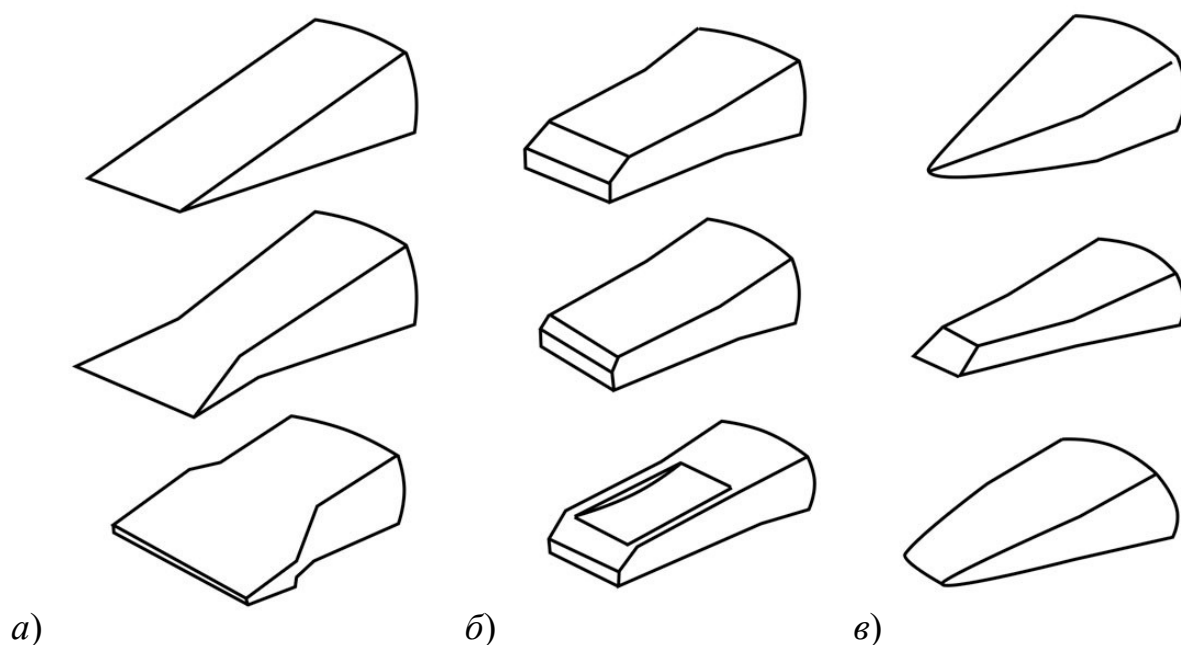


Рисунок 1.8 – Строение режущей части зубьев (коронки) ковша экскаватора [72]

На параметры профиля режущей кромки также влияет характеристика рабочей среды – при разработке грунтов III-IV категории угол резания принимается равным $\sim 35^\circ$, а при работе в предварительно взорванных скальных грунтах $\sim 45^\circ$. В связи с высоким уровнем возникающих контактных напряжений состояние режущей кромки начинает терять заводской внешний вид после 3-4 часов работы [22; 23].

Срок службы зубьев при экскавации взорванной горной массы зависит от её абразивности, механической прочности и гранулометрического состава. Замена изношенных зубьев у экскаватора, оборудованного прямой лопатой, происходит после разработки 45 тыс. м³ горной массы с максимальной величиной куска 0,08 м и 35 тыс. м³ при величине куска до 0,6 м. При этом длина и масса изношенного зуба уменьшаются до 70% по сравнению с исходными величинами. При контакте с сыпучей горной породы в зависимости от фракционного состава, её экскавируемый объем варьируется от 250 тыс. м³ до 400 тыс. м³ [12].

Преобладающий вид изнашивания в данном случае – абразивный, происходящий за счет внедряющего в поверхность зуба воздействия частиц горной породы, вызывающих микроскопическое отделение объема материала. Принято считать, что величина линейного износа лежит в прямой зависимости от объема разработанного грунта.

В процессе выемочных работ, помимо уменьшения проектной длины зуба, первоначальная геометрическая форма вследствие постоянного контакта с горной массой зубьев изменяется, что, в свою очередь, негативно отражается на производительности и энергоемкости разработки за счет повышения сопротивления породы экскавации и роста необходимых усилий для заполнения ковша.

После рассмотрения обнаруженных литературных данных о влиянии природы экскавируемой породы на закономерности изнашивания зубьев ковшей экскаваторов отмечено, что информация по этому вопросу практически ограничивается только влиянием породы на форму изношенных зубьев. Так сообщается [12], что экскавация сыпучих грунтов сопровождается уменьшением длины зуба с сохранением им симметричной формы (рисунок 1.9).

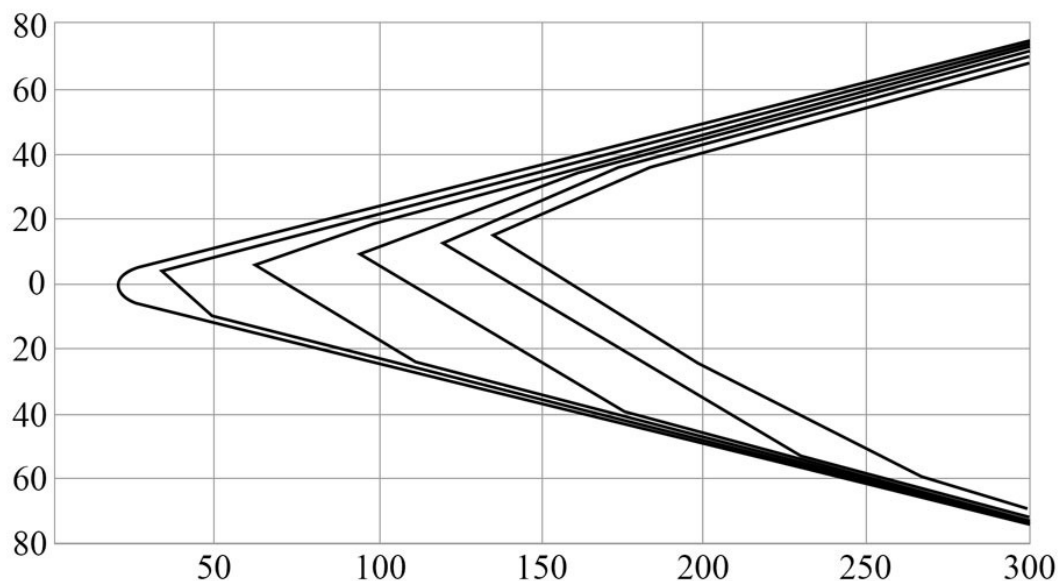


Рисунок 1.9 – Характер изменения осевого профиля зуба ковша прямой лопаты в мелкозернистом песке [12]

В тоже время при работе с предварительно взорванной крупнокусковой скальной и полускальной горной породой зуб претерпевает значительное увеличение степени притупления режущей кромки зубьев с поднятием вершины зуба к верхней поверхности (рисунок 1.10).

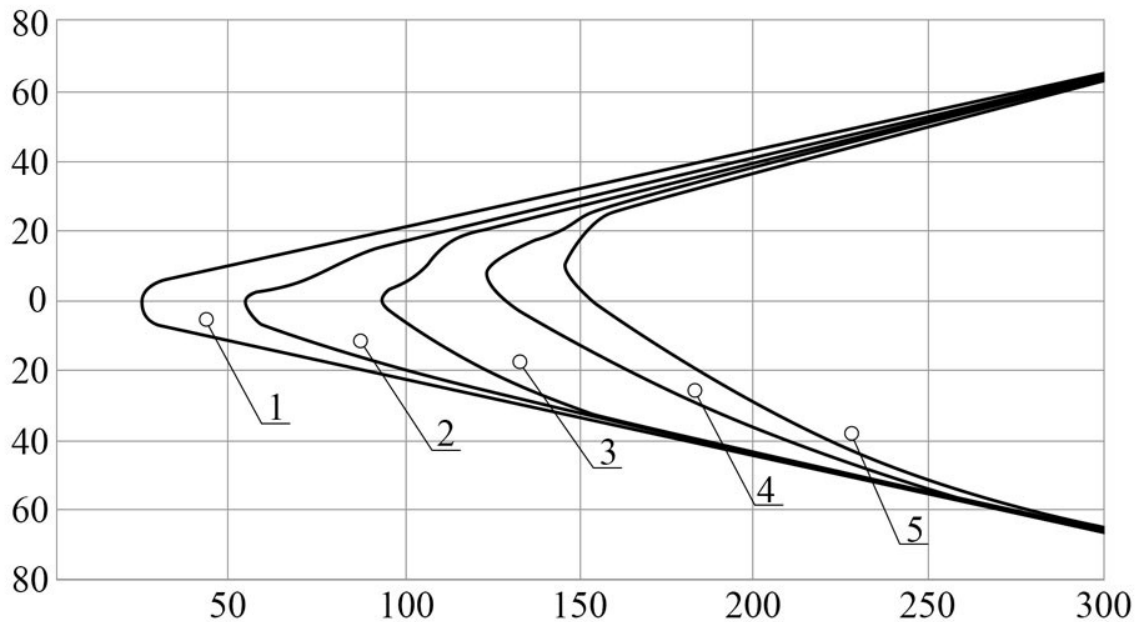


Рисунок 1.10 – Характер изменения осевого профиля зуба ковша прямой лопаты в разрушенной массе полускальной горной породы в зависимости от объема экскавации:

1 – 115 м³; 2 – 204 м³; 3 – 318 м³; 4 – 1000 м³; 5 – 1818 м³ [23]

Вне зависимости от разрабатываемой горной породы, в процессе эксплуатации на нижней поверхности зуба формируется площадка притупления, расположенная под большим углом к оси зуба по сравнению с нижней поверхностью, что большей частью негативно отражается на напорной составляющей усилия при экскавации [23]. Такой характер формирования площадки обосновывается [12; 22; 72] кинематикой проведения экскавации, отличающейся стабильностью расположения зуба относительно его пути в процессе работы. При этом формирование площадки происходит не только у экскаваторов, оборудованных прямой лопатой, но также у драглайнов и гидравлических экскаваторов с обратной лопатой.

1.4 Способы повышения технических характеристик зубьев

В связи с тем, что производительность экскаватора зависит от состояния элементов рабочего оборудования, а именно зубьев его ковша, особое внимание приобретают методы, направленные на повышение их износостойкости и, как следствие, на срок службы, а также ориентированные на снижение энергоемкости процесса экскавации, за счет нивелирования негативных последствий, возникающих в ходе эксплуатации (образование площадки притупления на нижней части зуба, увеличение угла режущей кромки и смещение оси симметрии зуба к верхней его части).

Закалка, как наиболее встречаемый вид обработки, являющийся, зачастую, обязательным этапом технологического процесса изготовления зубьев, направленная на повышение механических свойств и износостойкости их материала зубьев, основана на его нагреве выше критической температуры с последующим резким охлаждением. Данный способ применяется для изменения свойств как всего объема материала (объемная закалка), так и его поверхностного слоя (поверхностная закалка). В зависимости от способа нагрева на практике встречается электротермическая, газопламенная и лазерная ее виды [19].

Термохимическая обработка (цементация, борирование [89], азотирование, сульфидирование) характеризуется сочетанием химического и высокотемпературного воздействия. За счет легирования дополнительными компонентами (хром, азот, углерод, бор), происходит изменение химического состава поверхностного слоя материала, положительно отражаясь на его механических свойствах [40; 47; 75].

Повышение твердости поверхностного слоя также можно достигнуть в ходе механической обработки, в результате которой за счет наклепа, вызываемого пластической деформацией структуры под действием высокого давления, поверхностный слой детали будет упрочняться. Такой вид обработки достигается за счет применения дробеструйного наклепа [9],

наклепа за счет взрывного воздействия [24], вибрационной или роликовой прокатки [26].

Также существует способ, заключающийся в нанесении на поверхность детали износоустойчивых покрытий [79] в процессе лазерного [76], электро-, газопламенного [100; 118], детонационного, термитного и др. видов наплавления.

Комбинированный способ сочетает в себе особенности применения химического, термического и механического воздействия, определенная последовательность и взаимосвязанность которых в результате приводит к повышению механических свойств материалов. Так, например, сочетание пластического деформирования материала под воздействием высоких температур, а затем закалка, представляет собой термомеханический способ обработки [40], который в результате воздействия на структуру приводит к повышению плотности дислокаций, положительно отражаясь на твердости и износоустойчивости. Таким образом, изменение традиционного способа изготовления – литья, в основном применяемого в отечественной промышленности для изготовления зубьев ковша экскаватора, на штамповку [39; 101–105; 108], набирающую популярность за рубежом, и последующую закалку, позволит добиться увеличения твердости и износостойкости тела зуба, что положительно скажется на его сроке службы.

Существуют патентные решения [57–59; 63; 64; 66–69; 106; 107] направленные на сохранение исходной геометрии зубьев и предотвращение образования площадки притупления путем поддержания равномерной скорости изнашивания нижней и верхней части зуба, то есть на придание зубу свойства, получившего в литературе название «самозатачивания».

Одни из этих решений, например, [58; 68] связаны с упрочнением нижней поверхности зуба путем установки на ней накладок из износоустойчивых материалов или изготовлением зуба в виде сварной конструкции [67; 106], в которой материал нижней его части отличается повышенной износостойкостью (рисунок 1.11). Чаще всего встречаются

решения [57; 59–62; 64–66; 69; 99; 107], где эффект самозатачивания достигается за счет планируемого изменения первоначальной геометрии зуба в процессе эксплуатации (рисунок 1.12).

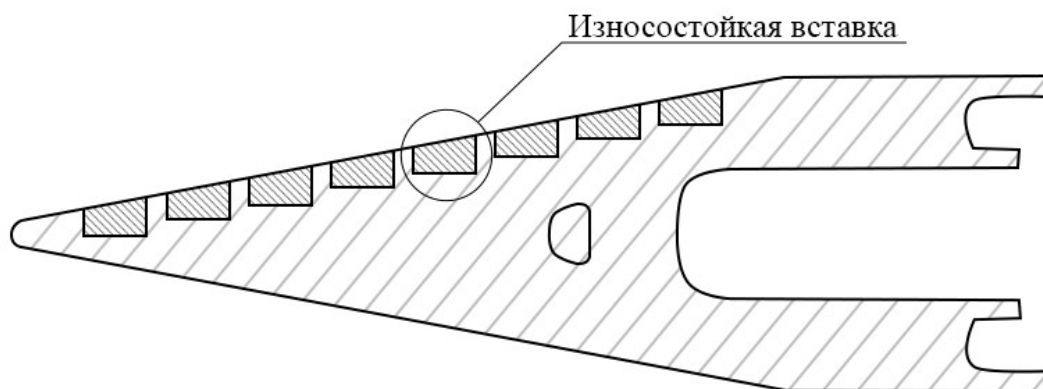


Рисунок 1.11 – Продольный профиль самозатачивающегося зуба ковша экскаватора с использованием в конструкции износостойких вставок [58]

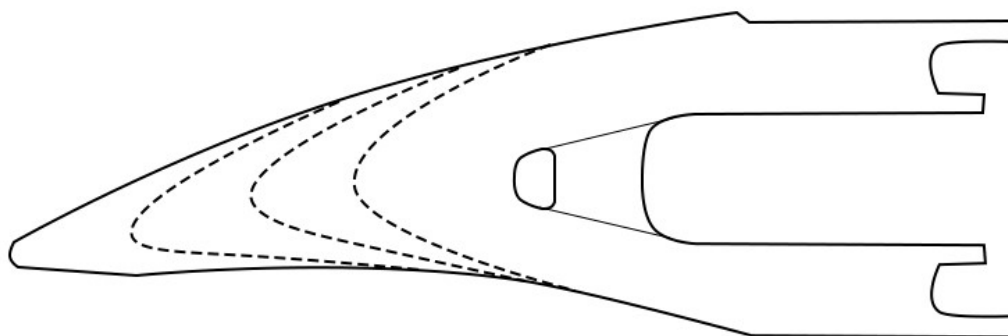


Рисунок 1.12 – Продольный профиль самозатачивающегося зуба ковша экскаватора, где пунктирной линией обозначен предполагаемый характер изнашивания [59]

Другие, например, [63] основываются на использовании термической обработки с соблюдением разной скорости охлаждения частей зуба, в результате которой область с более высоким градиентом падения температуры, будет обладать повышенной износостойкостью.

Все эти предложения отличаются сложностью исполнения или сравнительно низкой твердостью и износостойкостью применяемых материалов, что не позволило найти им широкого применения. В этой связи, разработка новых сравнительно простых в использовании технических решений, позволяющих повысить износостойкость зубьев с сохранением ими симметричной формы, т.е. обеспечением ими эффекта самозатачивания при эксплуатации, что будет способствовать снижению энергоемкости процесса экскавации, является актуальной.

1.5 Выводы по главе

1. Выемочно-погрузочные горных машины являются неотъемлемой частью горных работ при разработке месторождения открытым способом. При этом общая производительность горнодобывающего производства во многом связана с эффективностью выполнения и энергоемкостью выемочных работ, выполняемых экскаваторным парком.

2. Физико-механические свойства разрабатываемых горных пород оказывают значительное влияние на характер изнашивания элементов рабочего оборудования. Так срок службы зубьев ковша, при экскавации продуктов взрыва скальных горных пород может составлять от 3 до 5 дней, при этом аналогичный показатель для несвязных мягких грунтов может превышать его в 5-6 раз.

3. Характер изнашивания зубьев у одноковшовых экскаваторов вне зависимости от оборудования примерно схожий, помимо укорочения длины зуба и увеличения режущей кромки, на нижней поверхности зуба образуется площадка притупления, приводящая к повышению усилий при экскавации, что в свою очередь отрицательно сказывается на энергоемкости процесса и производительности.

4. Помимо существующих способов повышения износостойкости зубьев, малое внимание в отечественной литературе уделяется применению объемной горячей штамповки и последующей закалки для изготовления

зубьев ковша экскаватора. При этом, данный способ изготовления быстроизнашивающихся элементов рабочего оборудования отличается достижением высоких прочностных и износостойких свойств готового изделия.

5. Задача по разработке нового технического решения, позволяющего повысить износостойкость зубьев с сохранением ими симметричной формы, т.е. обеспечением эффекта самозатачивания при эксплуатации, что будет положительно сказываться на энергоемкости процесса экскавации, является актуальной.

ГЛАВА 2 ПОТЕРЯ ИСХОДНОЙ ФОРМЫ ЗУБЬЕВ КОВША ЭКСКАВАТОРА, КАК ПРИЧИНА СУЩЕСТВЕННОГО ВОЗРАСТАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРОДЫ ЭСКАВАЦИИ

2.1 Закономерности изнашивания зубьев ковшей экскаваторов в зависимости от природы экскавируемой породы

В первую очередь представлялось необходимым изучить, как размер фрагментов экскавируемой горной породы влияет на закономерности изнашивания зубьев ковшей экскаваторов и, как следствие, на вид изношенного зуба. Ниже представлены результаты автора диссертации, изложенные в [111], по анализу вида и свойств материала зубьев ковшей экскаваторов после их работы по сыпучим породам, у которых размер фрагментов составляет несколько миллиметров, и продуктам взрыва скальных пород с размером кусков в несколько дециметров.

В связи со значительным размером и массой зубьев цельнолитой конструкции, затрудняющих проведение анализа, объектом исследований являлись головные части двухсекционных зубьев в виде их изношенных коронок.

Первая (рисунок 2.1, *а*), отработавшая по взорванной гранитной массе в составе зуба ковша модели Super V69 Chisel (TE-V69SD), изготовленной компанией ESCO с исходным весом 37 кг, высотой 419 и шириной 210 мм.

Вторая (рисунок 2.1, *б*) и третья (рисунок 2.1, *в*) представляли собой коронки модели CATJ400 Standard от компании Caterpillar с исходным весом 9,5 кг, высотой 267 мм и шириной 117 мм. На третьей коронке сохранились следы металла, ранее наплавленного для повышения износостойкости конструкции.

С использованием компьютерного моделирования восстанавливался боковой профиль исходных коронок (заштрихованная часть рисунка 2.1), который накладывался на соответствующий профиль изношенных изделий с анализом его изменения в результате изнашивания.

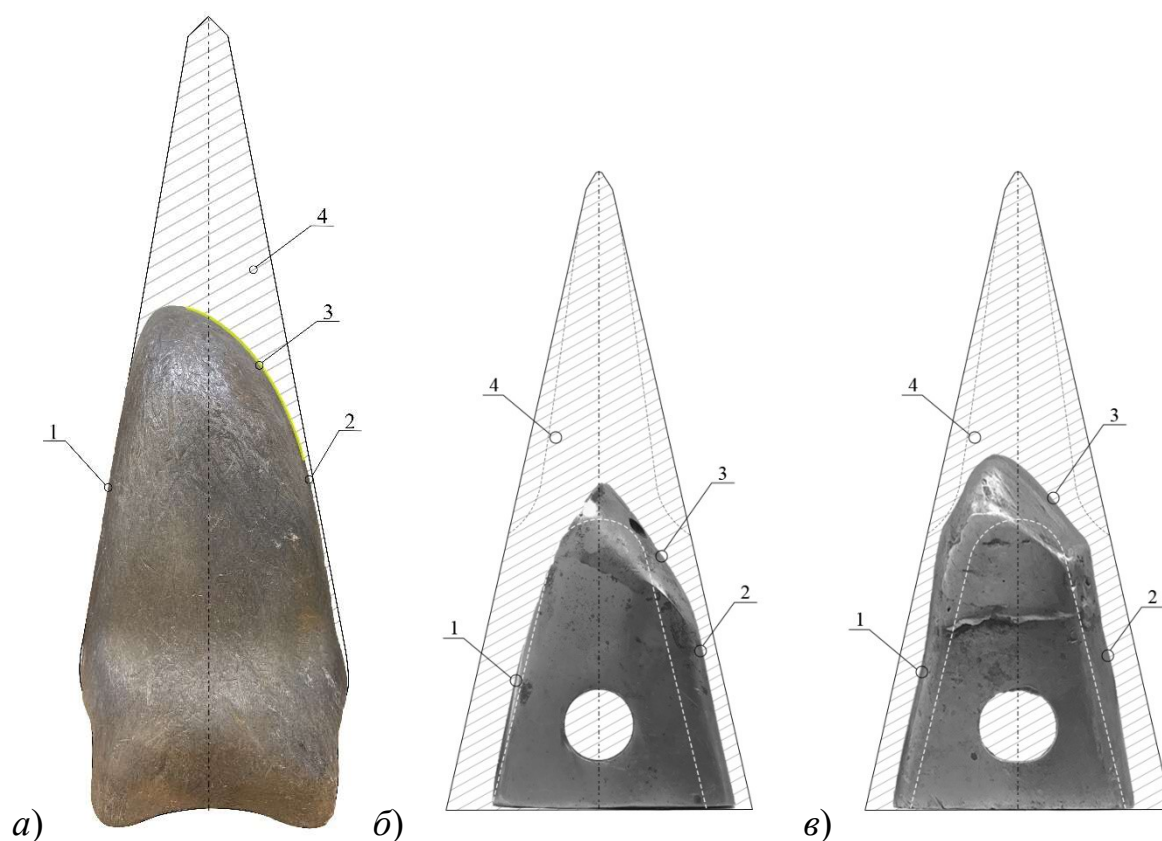


Рисунок 2.1 – Вид бокового профиля коронок после работы по граниту (*а*) и песку (*б*), (*в*) в сопоставлении с их установленным исходным профилем: 1 – верхняя поверхность, 2 – нижняя поверхность, 3 - площадка изнашивания на нижней поверхности, 4 – смоделированный исходный профиль коронки

Для оценки степени пластической деформации, получаемой металлом поверхностного слоя коронок при работе по той или иной породе, с использованием ультразвукового твердомера ТКМ-359С определялась твердость металла по Роквеллу для различных участков поверхности коронок. Для каждого участка проводилось по 5 замеров HRC с определением их среднего арифметического значения, которое сравнивалось с исходной твердостью металла, за которую принималась твердость, замеренная на неизношенной поверхности коронок.

Как показал визуальный осмотр коронки №1 после ее работы по взорванной гранитной массе (рисунок 2.1, *а*), боковой профиль коронки потерял симметричность со смещением вершины к верхней поверхности. На окончании коронки на нижней ее поверхности появилась полусферическая площадка изнашивания без четкого очертания. Она, как и вся нижняя

поверхность коронки, равномерно покрыта параллельными друг другу мелкими царапинами (рисунок 2.2, *а*), направление которых совпадает с направлением движения коронки в процессе перемещения в породе ковша экскаватора. Присутствующие на нижней поверхности относительно глубокие (до 0,7-0,8 мм) царапины длиной до 30 мм (рисунок 2.2, *б*) имеют хаотичную направленность. В отдельных местах поверхности обнаруживаются следы от точечных ударов в виде вмятин (рисунок 2.2, *в*).



Рисунок 2.2 – Характерные виды следов воздействия породы на нижней поверхности коронки после работы по граниту

На верхней поверхности коронки совокупность мелких одинаково направленных царапин, обнаруженная на нижней, отсутствует, вследствие чего эта поверхность гладкая и блестящая (рисунок 2.3, *а*). Имеющиеся на этой поверхности отдельные царапины имеют хаотичную направленность (рисунок 2.3, *б*); количество беспорядочно разбросанных вмятин здесь существенно выше (рисунок 2.3, *в*).

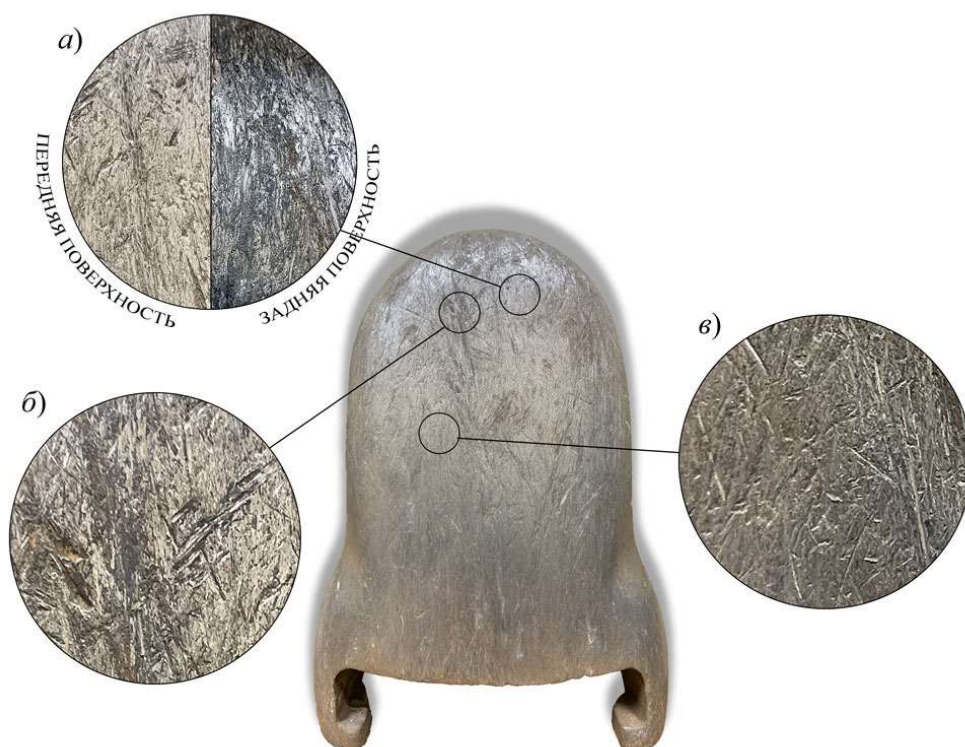


Рисунок 2.3 – Характерные виды следов воздействия породы на верхней поверхности коронки после работы по граниту

Рисунок 2.4, выполненный в редакторе, позволяющем обеспечивать возрастание интенсивности цвета с увеличением от минимального до максимального значения анализируемого параметра (в данном случае HRC), иллюстрирует распределение твердости по нижней и верхней поверхностям коронки. Как следует из вида рисунка, для обеих из указанных поверхностей характерно относительно равномерное распределение твердости, при ее средних значениях ($\sim 61,6$ HRC для верхней поверхности и $\sim 59,8$ HRC для нижней), превышающих на 20% и 17%, соответственно, исходную твердость металла (~ 51 HRC).

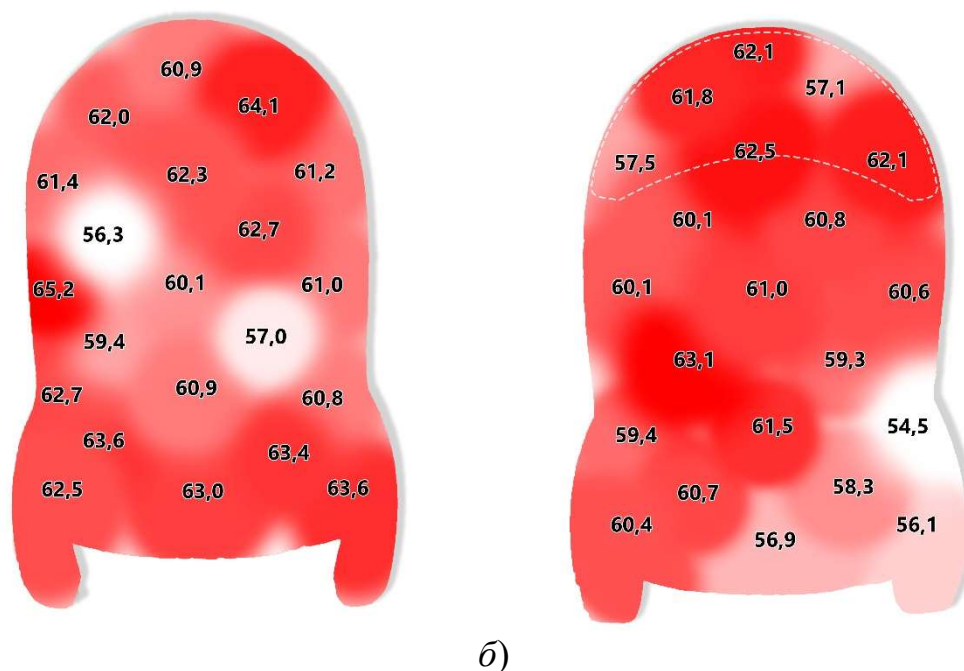


Рисунок 2.4 – Распределение твердости по верхней (а) и нижней (б) поверхностям коронки после работы по граниту

Анализ вида коронки №2 после ее работы по среднезернистому песку (средний размер фракции ~ 3 мм) показал, что он характеризуется заостренным боковым профилем (рисунок 2.1, б). Как нижняя, так и верхняя поверхности коронки (рисунок 2.5, а, б) гладкие, блестящие без заметных царапин. На нижней поверхности под углом $\sim 25^\circ$ к основной ее плоскости располагается четко очерченная площадка изнашивания (рисунок 2.1, а). Верхняя поверхность этой же коронки (рисунок 2.5, б) характеризуется наличием сквозного отверстия с толщиной стенки окружающего металла не превышающей 2 мм.



Рисунок 2.5 – Вид в анфас коронки №2: *а* – на нижнюю поверхность, *б* – на верхнюю

Коронка №3, предварительно защищенная наплавкой, после работы по песку обладает менее заостренным профилем (рисунок 2.1, *в*). Вид нижней и верхней поверхностей (рисунок 2.6, *а*, *б*) практически идентичен, рассмотренному на предыдущей коронке, за исключением того, что по краям площадки изнашивания присутствуют остатки наплавленного металла, толщиной 2-3 мм. На обеих рассмотренных поверхностях отсутствуют вмятины и глубокие порезы.

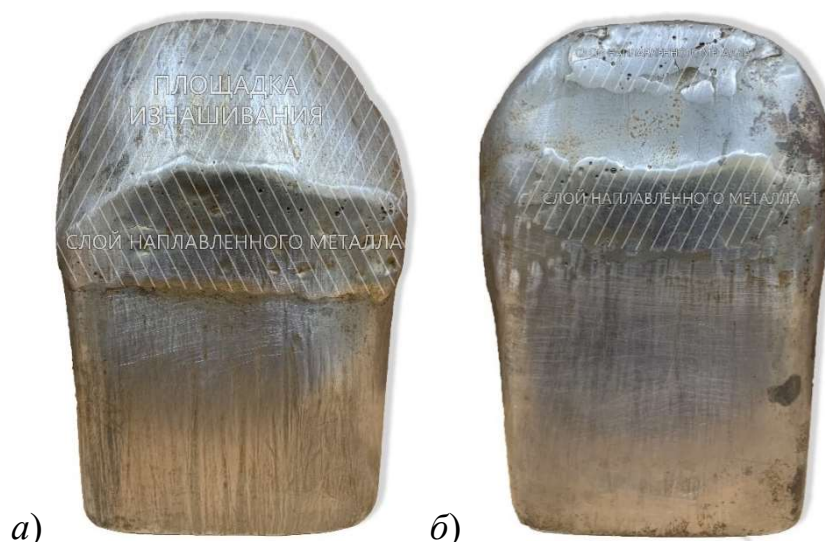


Рисунок 2.6 – Вид в анфас коронки №3: *а* – на нижнюю поверхность, *б* – на верхнюю

Оказалось, что твердость обеих коронок по всем наружным поверхностям распределена практически равномерно (рисунок 2.7) при

среднем своем значении для коронки №2 59,5 HRC (твердость металла обратной, недеформируемой стороны коронки, принимаемая за исходную, ~ 44,9 HRC) и 52,7 HRC для коронки №3 (при исходном значении 41 HRC). Таким образом, твердость поверхности коронки №2 возросла на 33%, коронки №3 – на 28%. (Среднее значение твердости наплавки составило 70,3 HRC).

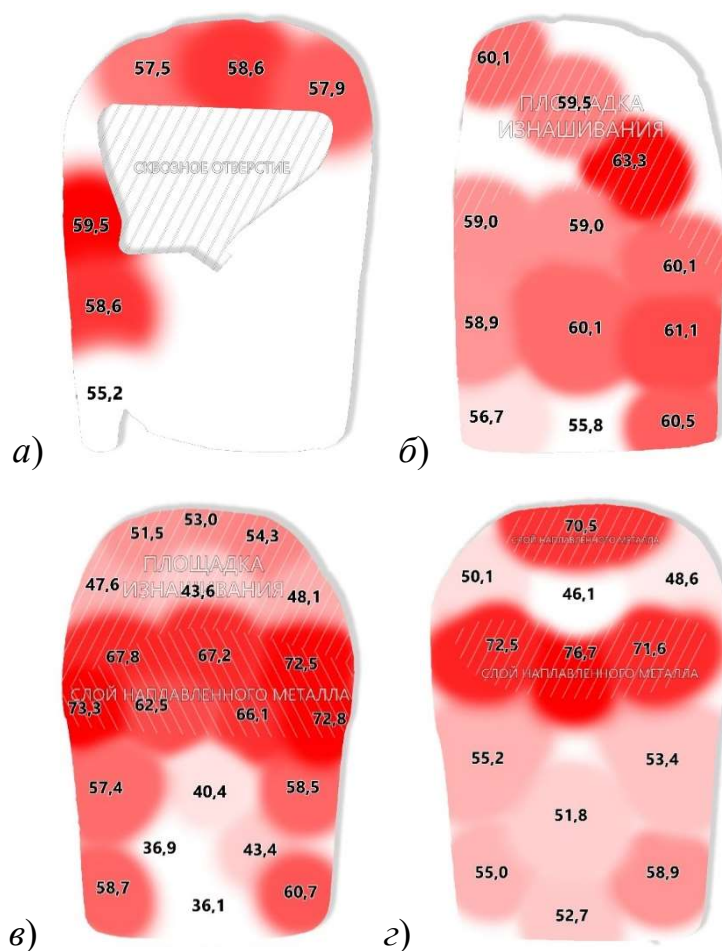


Рисунок 2.7 – Распределение твердости по нижней (а) и верхней (б) поверхностям коронки №2 и по нижней (в) и верхней (г) поверхностям коронки №3

Наличие на нижней поверхности коронки №1 совокупности параллельно расположенных царапин позволило заключить, что в случае работы по граниту нижняя поверхность коронки подвергается преимущественно абразивному виду изнашивания. В то же время, блестящий цвет и наличие беспорядочно разбросанных вмятин на ее верхней поверхности свидетельствует о том, что доминирующим видом изнашивания этой поверхности является ударно-абразивный. Несмотря на различие в

преобладающих видах изнашивания обе поверхности упрочнились до достаточно высокого уровня твердости. В случае верхней поверхности причиной наклепа ее металла является ударное воздействие перекатывающихся кусков гранита, в случае нижней – царапание поверхности острыми гранями кусков при движении по ним коронки, с наклепыванием дна царапин до максимально достижимого для данного материала уровня твердости [6; 14]. Поскольку наклеп замедляет интенсивность ударно-абразивного изнашивания металлов, не оказывая какого-либо заметного влияния на скорость абразивного изнашивания [33; 90], верхняя поверхность изнашивается с существенно меньшей скоростью, чем нижняя, что приводит к нарушению симметрии зуба.

В случае песка коронка осуществляет контакт с массивом мелких абразивных частиц, неспособных нанести повреждения ударного характера, поэтому на обеих поверхностях преобладает только абразивный вид изнашивания, при котором наличие наклепа поверхности не приводит к снижению скорости процесса. В этих условиях обе стороны коронки изнашиваются с близкой скоростью с сохранением симметричности формы коронки.

Результаты исследования позволяют сделать вывод, что преобладающее изнашивание той или другой стороны зуба определяется видом воздействия разрабатываемой горной породы: при работе по крупнокусовым скальным породам, где на верхней поверхности доминирует ударно-абразивное изнашивание, а на нижней – абразивное, преобладающему изнашиванию подвергается нижняя поверхность зуба, а в случае мелкодисперсной породы, где обе поверхности подвергаются только абразивному виду изнашивания, – как нижняя, так и верхняя его поверхности.

Причина различия в видах воздействия крупно кусковой породы на стороны зуба устанавливалась на основании представленных ниже результатов имитационного моделирования процесса силового взаимодействия взорванной скальной породы с головной частью зуба.

2.2. Разработка имитационной модели процесса силового взаимодействия взорванной скальной породы с зубом

2.2.1 Особенности выбора средств создания имитационной модели

Наиболее часто встречаемое на практике математическое моделирование базируется на методе конечных элементов (FEA), позволяющем представлять исследуемое тело или среду в виде соединенных между собой отдельных элементов (частей) (рисунок 2.8) в узловых точках, где происходит вычисление дифференциальных уравнений в частных производных [29]. Данный метод нашел широкое применение для решения как отдельных, так и совместных задач по термодинамике, гидрогазодинамике, электромагнетизму, а также задач по анализу напряженно-деформированного состояния конструкций [3; 32].

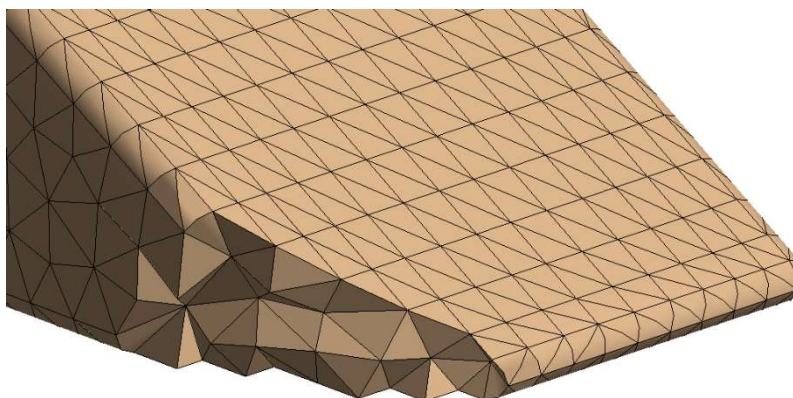


Рисунок 2.8 - Пример дискретизации модели головной части зуба с заданной величиной объемных трехмерных конечных элементов

На сегодняшний день существует ряд программных комплексов (CAE – Computer-Aided Design), позволяющих создавать математические модели на базе метода конечных элементов, такие как ANSYS, Abaqus, COMSOL, Nastran, Siemens NX, Fidesys, APM Multiphysics и др. Также в последнее время элементы CAE встречаются в некоторых программных комплексах автоматизированного проектирования (САПР, на англ.: CAD – Computer-Aided Design), что позволяет производить экспресс оценку напряженно деформированного состояния конструкции в пределах одной программы – SolidWorks, Inventor, Компас 3D.

Экскавируемый грунт в математическом моделировании чаще всего представляется в виде однородного массива конечных элементов, обладающего соответствующими физико-механическими характеристиками. Однако, в связи с тем, что процесс экскавации взорванной горной массы отличается от процесса резания массива мягкого грунта, воссоздание реалистичного поведения среды, состоящей из обособленных частиц, путем представления её однородным массивом не является в достаточной мере достоверным с точки зрения оценки характера механического воздействия на поверхности рабочего инструмента экскаватора.

Для более реалистичного представления взорванной горной массы в модели, автором предлагается использовать специализированный программный пакет Rocky DEM, базирующийся на математическом моделировании процесса методом дискретных элементов, главной особенностью которого является описание поведения каждой моделируемой частицы собственным уравнением движения и его численное интегрирование во времени с учетом его физических особенностей и контактного взаимодействия [113]. Сфера применения данного программного обеспечения достаточно обширная – в горно-добывающей [46; 109; 115–117; 122], сельскохозяйственной [114; 125; 126], нефтегазовой, машиностроительной [120], фармацевтической [127] и других видах промышленности.

Таким образом, за счет реалистичной имитации поведения потока частиц, по результатам моделирования их характера взаимодействия между собой и элементами рабочего оборудования на базе разложения сил контактного взаимодействия на тангенциальные и нормальные составляющие, характеризующие абразивное и ударное воздействие, представляется возможность определения различия в видах воздействия кусков горной породы в процессе экскавации.

2.2.2 Алгоритм создания и анализа имитационной модели

Процесс создания математической модели в программном комплексе состоял из трех составных частей [121]:

- предпроцессинга – этапа, состоящий из основных подготовительных операций, таких как создание геометрической 3D модели (в виде балочного, оболочечного или твердотельного представления), удаления лишних элементов, не влияющих на конечную цель, дискретизации геометрии, для создания необходимой сетки конечных элементов, установки связей между объектами, задания граничных условий и дополнительных параметров необходимых для процесса моделирования реального процесса;

- процессинга – процесса непосредственного выполнения операций по расчету матрицы из алгебраических уравнений;

- постпроцессинга – визуализации полученных результатов, для отображения искомых величин (перемещение узловых точек, напряженно деформированное состояние, величина относительной деформации и др.).

Начальный этап (предпроцессинг) перед непосредственной настройкой поведения любой математической модели состоял в создании трехмерной геометрии исследуемого объекта и вспомогательных элементов с использованием САПР.

Созданная модель исследуемого объекта импортировалась в рабочую среду математического программного комплекса Rocky (рисунок 2.9), где производилась настройка граничных, временных и итерационных параметров моделирования, корректировка дискретизации геометрических моделей, а также конфигурация свойств моделируемых фрагментов среды.

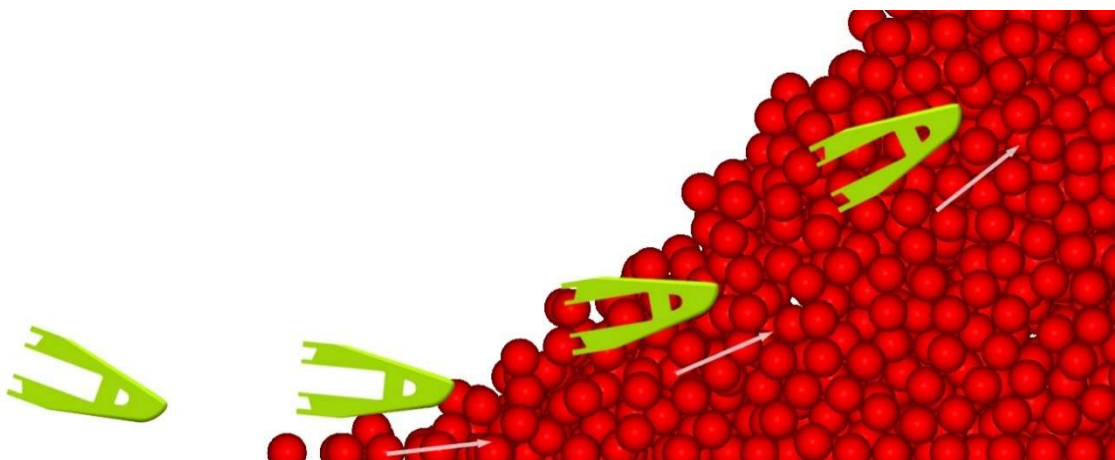


Рисунок 2.9 – Схема моделирования движения изношенного зуба при экскавации взорванной горной массы

Подобие поведения единичных элементов моделируемой среды поведению кусков взорванной горной массы достигалось путем присвоения элементам соответствующих значений геометрических и физических величин (размера, плотности, модуля Юнга, коэффициента Пуассона и др.).

С целью более детальной оценки контактного взаимодействия и величины воздействующих усилий, а также распределения эквивалентных напряжений по поверхности зуба, анализ полученных результатов дискретного моделирования (этап постпроцессинга) выполнялся в программном комплексе ANSYS Mechanical.

Твердотельная модель исходного зуба ковша (рисунок 2.10, *а*) была создана на основе геометрических параметров зуба ковша экскаватора ЭКГ-5 в программном обеспечении SolidWorks. Для оптимизации использования компьютерных ресурсов и повышения скорости математических операций, участие в численном моделировании принимала лишь головная часть зуба (рисунок 2.10, *б*), как подвергающаяся наибольшему воздействию кусков горной породы в процессе экскавации.

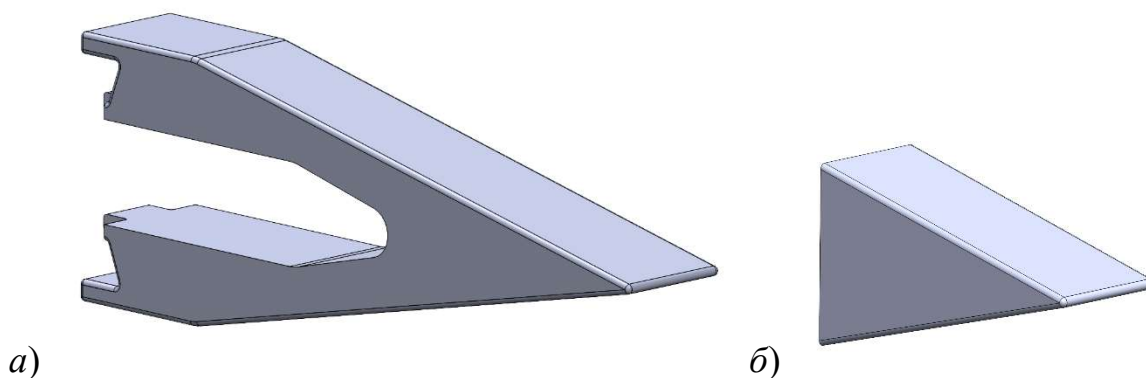


Рисунок 2.10 – Полноценная CAD модель зуба ковша экскаватора ЭКГ-5 (*а*) и головная часть зуба (*б*), импортируемая в математическую модель

Для оценки влияния изменения формы зуба на сопротивление породы в процессе экскавации дополнительно разрабатывались твердотельные модели изношенных зубьев, геометрические размеры каждого из которых воссоздавались на основе вида продольного профиля головной части зуба ковша экскаватора ЭКГ-4,6 (рисунок 2.11), после добычи им определенного

количества взорванной горной массы (железистых кварцитов на открытом месторождении, входящего в состав Михайловского горно-обогатительного комбината) [48].

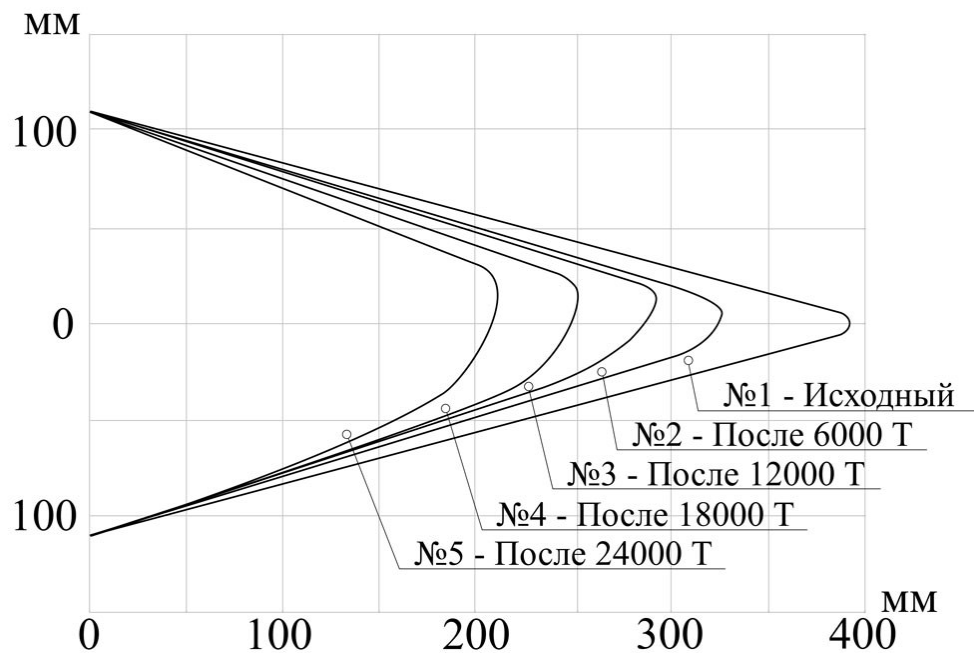


Рисунок 2.11 – Изменение профиля головной части зуба ковша экскаватора ЭКГ-4,6 и его обозначение (от 1 до 5) в зависимости от экскавируемой взорванной горной массы [48]

Помимо моделей зуба, создавалась модель емкости (рисунок 2.12), заполненной единичными элементами, моделирующими куски породы, в основу продольной геометрии которой была заложена траектория движения зуба ковша канатного экскаватора ЭКГ-5, установленная, исходя из радиуса (14,5 м) и высоты черпания (10,3 м) выбранного экскаватора [4; 83; 86].

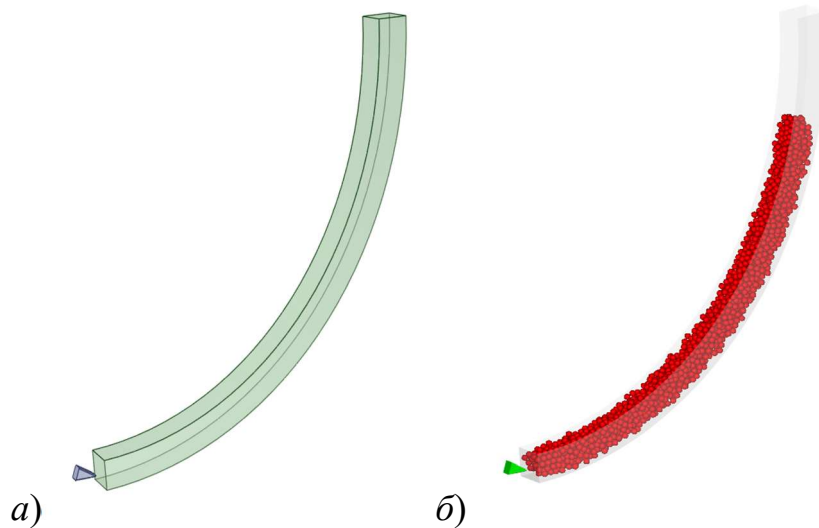


Рисунок 2.12 – Геометрия модели емкости исходной (а) и заполненной фрагментами горной массы (б), используемая в процессе математического моделирования

Расчет по имитационной модели производился на примере зуба ковша экскаватора типа ЭКГ-5, как отечественного экскаватора, нашедшего широкое применение на открытых горных работах. При этом, исходя из факта, что экскаватор ЭКГ-5 является усовершенствованной модификацией модели ЭКГ-4.6 и у него используются те же элементы рабочего оборудования [27; 85], считали, что характер изменения формы зуба экскаватора ЭКГ-5 в процессе экскавации идентичен, представленному на рисунке 2.11

Значения параметров и принятые допущения при расчетах по имитационной модели:

- скорость перемещения модельного зуба в модельной емкости принималась постоянной при значении (0,9 м/с), рассчитанном на основе паспортных данных о скоростях подъема (0,87 м/с) и напора (0,95 м/с) ковша экскаватора;

- время расчета в модели (10 секунд с шагом равным 0,05 с) устанавливалось исходя времени контакта зуба с фрагментами породы (8,5-9 сек), которое задавалось как $\sim 0,4 \cdot t_{p.ц.}$ при работе выбранного экскаватора в забое хорошо взорванной скальной массы, где $t_{p.ц.} = 23$ сек.;

- единичный элемент модельной горной массы представлялся в виде сферической частицы размером 100 мм, как средним размером кусков, получающихся в результате буровзрывных работ по разрушению массива скальных пород;

- плотность единичных элементов в модельной емкости принималась равной $\sim 3500 \text{ кг/м}^3$, как среднему значению, характерному для плотности полускальной и скальной горной породы IV-V категории крепости в массиве;

- движение зуба происходило по идеальной траектории с одинаковой скоростью с пренебрежением особенностей проведения работ в забое взорванной горной массы, как например заполнением ковша за счет силы тяжести горной массы;

- дискретизация математической модели зуба характеризовалась $6,5 \cdot 10^3$ элементами со средним значением размером каждого из них 15 мм и $11,2 \cdot 10^3$ узловыми точками, в которых осуществлялся расчет на протяжении 200 временных итераций.

2.3 Результаты имитационного моделирования и их анализ

Как показали результаты моделирования, эквивалентные напряжения (рисунок 2.13), возникающие при экскавации в поверхностном слое металла верхней поверхности исходного зуба ($\sigma_{в.ср} \sim 1,32 \text{ МПа}$), примерно на 25 % превышают их величину для нижней ($\sigma_{н.ср} \sim 1,07 \text{ МПа}$) (рисунок 2.14), что находит свое отражение в несколько большей степени наклёпа металла верхней поверхности зуба: 61,6 HRC по сравнению с 59,8 HRC (рисунок 2.4).

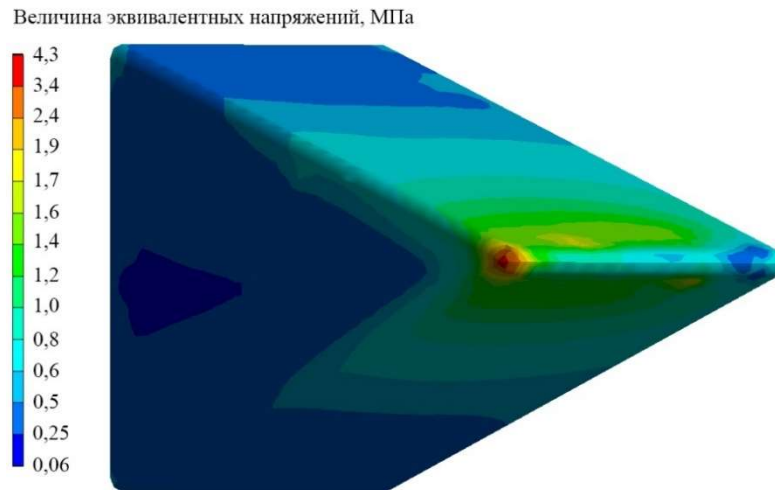


Рисунок 2.13 – Распределение усредненных (за время цикла экскавации) значений эквивалентных напряжений по поверхности неизношенного зуба

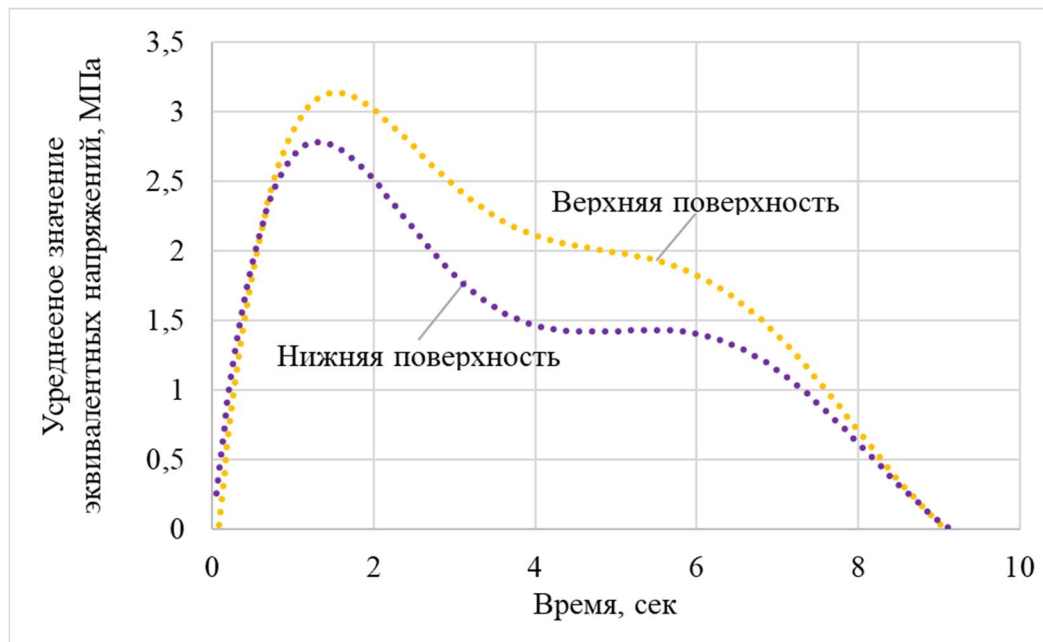


Рисунок 2.14 – Усредненная величина эквивалентных напряжений ($\sigma_{ср}$, МПа) определяемая на нижней и верхней поверхностях зуба в процессе экскавации

Момент контакта элемента дискретной модели с зубом характеризуется локальным повышением эквивалентных напряжений (рисунок 2.15). Так как за основу расчета контактного напряжения в ANSYS используется матрица распределения векторов силового воздействия в узловых точках в зависимости от времени, импортированные из дискретной модели, то существует возможность разложения равнодействующего вектора на составляющие относительно трехмерной системы координат.

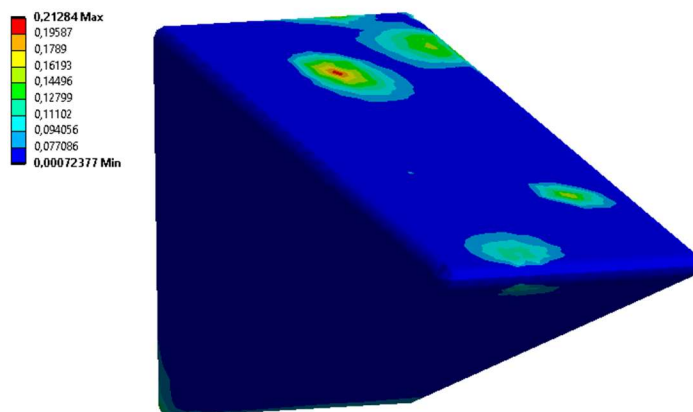
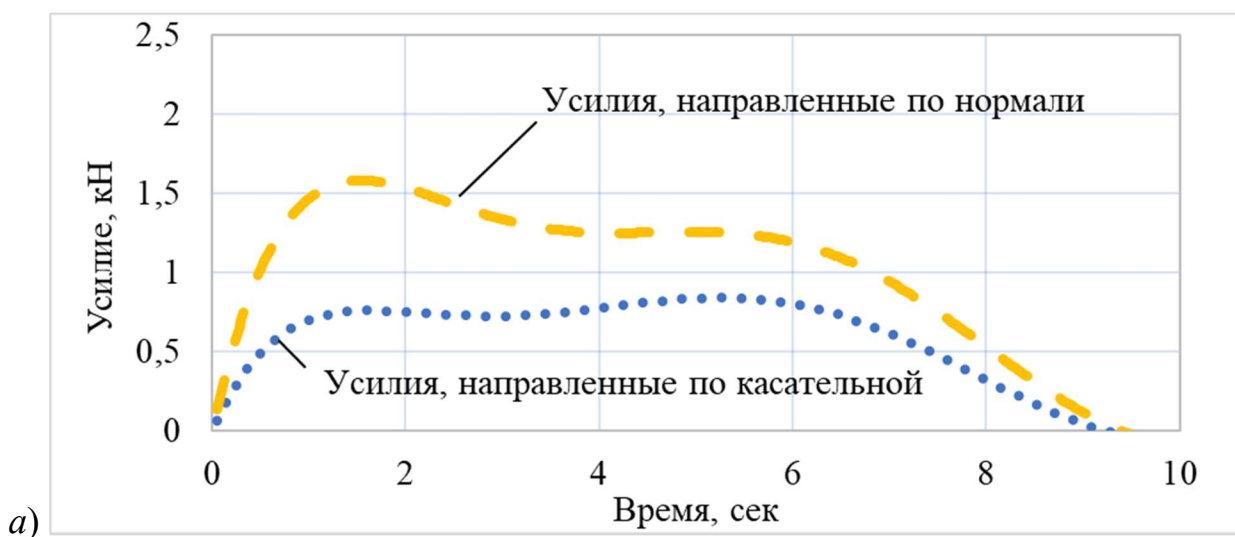


Рисунок 2.15 – Локальные повышения уровня напряженно деформированного состояния в результате точечного контакта куска горной породы

После раскладывания результирующую силу взаимодействия кусков породы с телом зуба на касательную (F_x , Н) и нормальную (F_y , Н) составляющие, было обнаружено существенное различие в преобладающем их воздействии в зависимости от нижней или верхней поверхности зуба. Оказалось, что средняя величина усилий, направленных по нормали к верхней поверхности, значительно (на $\sim 70\%$) превышает величину усилий, направленных по касательной (рисунок 2.16, а), тогда как на нижней поверхности преобладающим видом являются воздействия, приложенные по касательной (рисунок 2.16, б). При этом, средние значения F_x , направленные по касательной для нижней поверхности, в 1,4 раза превышают средние значения F_x для верхней.



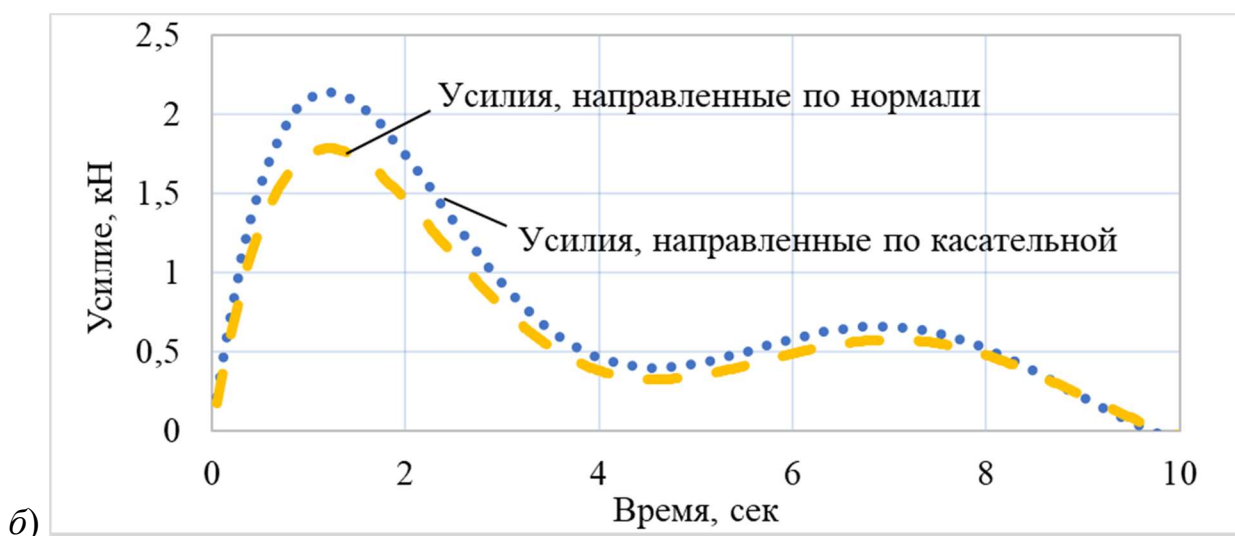


Рисунок 2.16 – Распределение в направлении усилий, действующих на верхнюю (а) и нижнюю (б) сторону зуба, в течение цикла экскавации

Это обстоятельство, с учетом представленных в п. 2.1 результатов визуальных наблюдений (блестящий цвет верхней поверхности с беспорядочно разбросанными вмятинами, по сравнению с матовым цветом нижней поверхности зуба с параллельно расположенными царапинами), позволило заключить, что доминирующим видом изнашивания верхней поверхности является ударно-абразивный ее вид, а нижней – абразивный. Для верхней поверхности основным видом воздействия породы являются удары от перекатывающихся кусков породы, для нижней – царапание поверхности их острыми гранями. Поскольку ударное воздействие породы вызывает усталостный вид изнашивания, протекающий со значительно более низкой скоростью по сравнению с абразивным видом, суммарная скорость изнашивания каждой стороны зуба будет определяться скоростью ее абразивной составляющей, и, как следствие, величиной усилий, направленных по касательной, как вызывающих такой вид изнашивания. А поскольку, как показали результаты моделирования, величина усилий F_x , направленных по касательной, для нижней поверхности, превышает F_x для верхней, нижняя поверхность изнашивается с большей интенсивностью, что приводит к указанному изменению формы зуба.

Интересно отметить, что, хотя обе поверхности подвергаются существенному наклепу – верхняя в большей степени (повышение HRC на 20%), нижняя в меньшей (на 17%), он не оказывает какого-либо заметного тормозящего воздействия на интенсивность абразивного изнашивания материала этих поверхностей. Такое заключение находится в соответствии с общепринятой точкой зрения [8; 53], в соответствии с которой, упрочнение (наклеп), *вызываемое холодной пластической деформацией металлов, не повышает их абразивной износостойкости*. По этой причине все предпринятые попытки повышения износостойкости зубьев ковшей экскаваторов наклепом их поверхности, например, взрывом, не привели к положительному результату и для его осуществления требуется другой вид воздействия. Как показал анализ литературных данных, таким видом может служить термомеханическая обработка, эффективность которой, с точки зрения повышения абразивной износостойкости металлов, была подтверждена в данной работе.

В случае песка зуб осуществляет контакт с массивом мелких абразивных частиц, неспособных нанести повреждения ударного характера, поэтому на обеих его поверхностях преобладает только абразивный вид изнашивания. В этих условиях обе стороны зуба изнашиваются с близкой скоростью с сохранением симметричности формы конструкции.

2.5 Влияние формы зуба на энергоемкость процесса экскавации

За основу определения относительного влияния степени изнашивания зубьев на энергоэффективность процесса экскавации применялась методика расчета средневзвешенных мощностей напорного и подъемного механизмов экскаватора в зависимости от условий эксплуатации [72; 86], которая с небольшими корректировками применялась в работах автора [5; 7].

Показатель средневзвешенной мощности механизмов экскаватора (2.1) определяется на основании среднего значения мощности, которая необходима механизмам для выполнения составных действий при экскавации горной

породы (заполнение, опорожнение и возвращение ковша) с учетом времени их выполнения.

$$N_{\text{с.в.}} = \frac{N_{\text{э}} \cdot t_{\text{э}} + N_0 \cdot t_0 + N_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}}}{t_{\text{э}} + t_0 + t_{\text{в}}} = \frac{(N_{\text{э}} + N_0 + N_{\text{в}}) \cdot t_{\text{р.ц.}}}{3 \cdot t_{\text{р.ц.}}} = \quad (2.1)$$

$$= 0,33 \cdot (N_{\text{э}} + N_0 + N_{\text{в}}),$$

где $N_{\text{э}}$ – мощность двигателя механизма (напора/подъема) при экскавации, кВт;

$t_{\text{э}}$ – время экскавации, с;

N_0 – мощность двигателя механизма при повороте ковша для последующего опорожнения, кВт;

t_0 – время поворота ковша для опорожнения, с;

$N_{\text{в}}$ – мощность двигателя механизма при обратном повороте ковша для последующего наполнения, кВт;

$t_{\text{в}}$ – время обратного поворота ковша для заполнения, с;

$t_{\text{р.ц.}}$ – время рабочего цикла, с.

Так как, на энергоемкость процесса экскавации влияние геометрического профиля зуба осуществляется только в момент непосредственного его контакта с горной массой, то определение мощности ($N_{\text{э}}$, кВт) осуществлялось по формуле (2.2):

$$N_{\text{э}} = \frac{S_{\text{м}} \cdot V_{\text{м}}}{\eta \cdot 1000} \quad (2.2)$$

где $S_{\text{м}}$ – усилие, которое действует на элементы рабочего оборудования в процессе экскавации, Н;

$V_{\text{м}}$ – паспортная величина скорости подъема/напора ковша, м/с;

η – коэффициент полезного действия рассматриваемой системы.

При этом на величину усилия ($S_{\text{м}}$) оказывает существенное влияние сопротивление горной породы экскавации (P_0 , Н) (рисунок 2.17), которое складывается из двух составляющих:

- усилие, направленное по касательной к траектории движения зуба – P_{01} , Н;

- усилие, направленное по нормали к траектории движения зуба – P_{02} , Н.

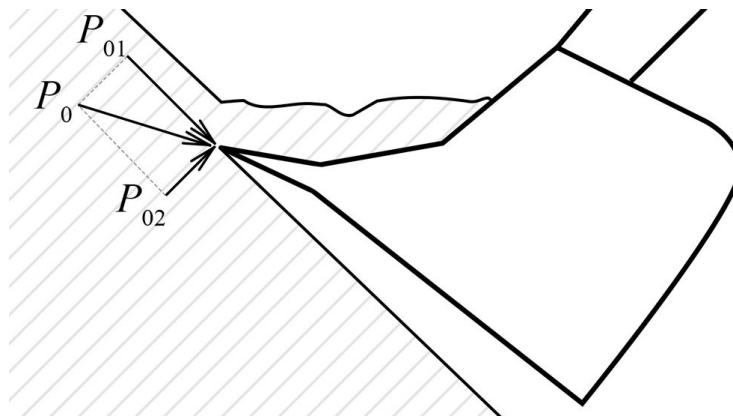


Рисунок 2.17 – Распределение составляющих величины P_0 при экскавации [73]

Величина P_{01} учитывает сопротивления возникающие при трении, внедрении и заполнении ковша горной породой и рассчитывается на основании формулы 2.3, выведенной профессором Домбровским Н.Г. [21; 22] с учетом использования, полученного экспериментальным путем, коэффициента удельного сопротивления породы экскавации ($k_{уд}$, МПа):

$$P_{01} = k_{уд} \cdot C \cdot B_{к}, \quad (2.3)$$

где C – ширина вынимаемого объема горной породы из разрыхленной массы, зависящая от коэффициента наполнения ковша и коэффициента разрыхления горной массы, м;

B – ширина используемого ковша экскаватора, м;

$k_{уд}$ – эмпирический коэффициент удельного сопротивления породы экскавации, МПа.

Величина P_{02} (2.4) учитывает категорию экскавируемой породы, а также степень изношенности зубьев в зависимости от размера площадки притупления и угла режущей кромки за счет использования эмпирического коэффициента:

$$P_{02} = k_{из} \cdot P_{01}, \quad (2.4)$$

где $k_{из}$ – коэффициент, учитывающий особенности эксплуатации зубьев, принимаемый равным от 0,1 до 2,0 в зависимости от степени изношенности зубьев и вида горной породы.

На основании данных, полученных из математической модели, и направленности векторов действий основных усилий, влияющих на энергоёмкость процесса экскавации, суммарная сила, с которой элементы горной массы действуют на зуб, раскладывалась на касательные и нормальные составляющие. С учетом возрастания этих сил, пропорционально увеличивались значения усилий, действующие на элементы рабочего оборудования экскаватора.

Так как, величина энергоёмкости (1.3) в расчетах определялась только для момента времени контакта зуба с горной породой, то производительность экскаватора определялась исходя из времени $t_{р.ц.} = t_{экс.}$

В таблице 2.1 представлены данные, характеризующие принятые для расчёта горно-геологические условия экскавации. Объем разработанной породы и соответствующий ему профиль зуба определялся на основании ранее представленных данных (рисунок 2.11) [48].

Таблица 2.1 – Параметры, при которых выполнялось определение энергоёмкости процесса экскавации

Удельное сопротивление экскавации, $k_{уд}$, МПа	0,3
Плотность горной породы в массиве, $t/м^3$	3,5
Коэффициент разрыхления горной массы, k_p	1,8
Коэффициент заполнения ковша горной породой, k_n	0,9

Рисунок 2.18 иллюстрирует определенное по результатам имитационного моделирования сопротивление породы экскавации при эксплуатации зубьев с различной степенью изношенности.

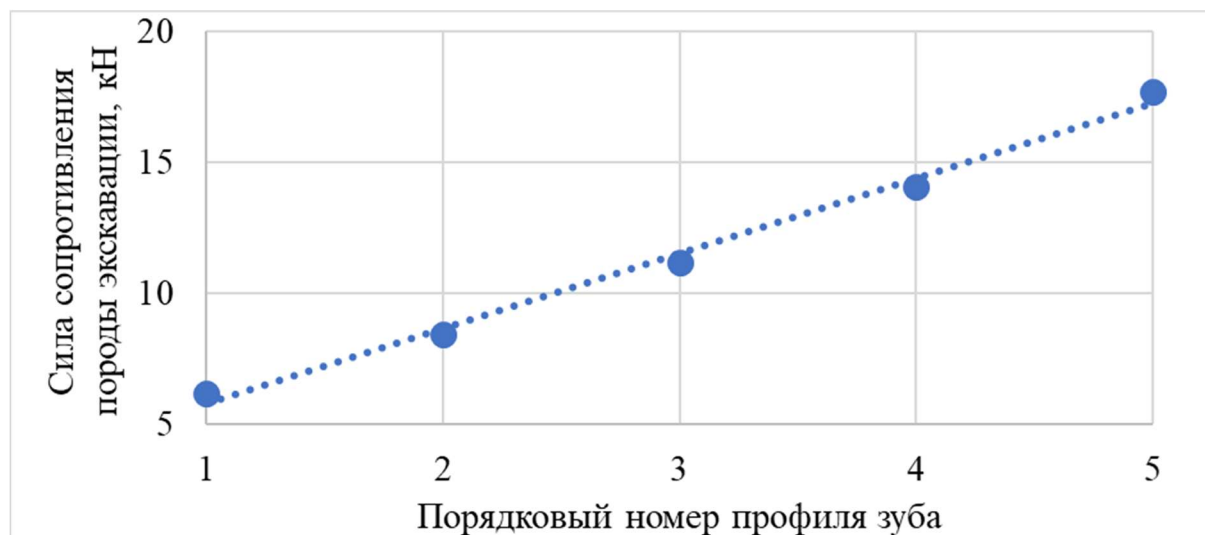


Рисунок 2.18 – Сопротивление породы экскавации в зависимости от степени изношенности зуба

В таблице 2.2 представлены основные переменные, используемые для расчета энергоемкости процесса экскавации, характер изменения которой представлен на рисунке 2.19.

Таблица 2.2 – Основные показатели энергоемкости процесса экскавации, полученные по результатам расчета

№ профиля	$V_n, \text{ м}^3$	Время копания, час	$F_{\text{ср.х}}, \text{ Н}$	$F_{\text{ср.у}}, \text{ Н}$	$P_{01}, \text{ Н}$	$P_{02}, \text{ Н}$	$a, \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$
1	0	0	4997	2782	137115	75413	0,083
2	3086	2	5302	5375	145458	145692	0,087
3	6171	3	7566	6497	207579	176114	0,100
4	9257	5	10054	8023	275854	217463	0,114
5	12343	6	12744	10193	349649	276308	0,130

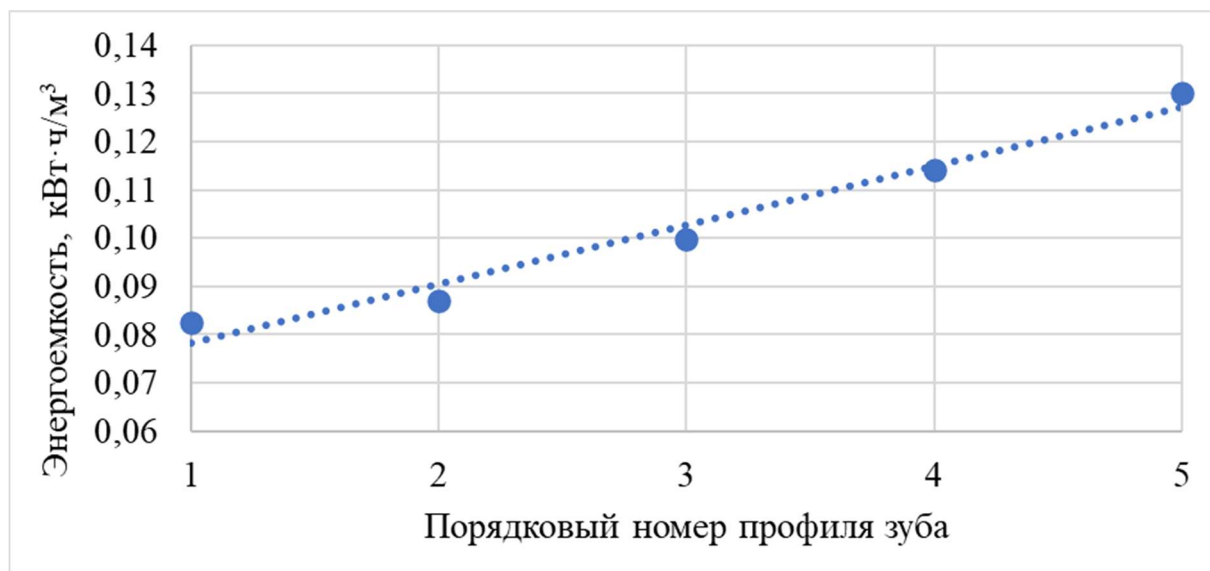


Рисунок 2.19 – Характер изменения энергоёмкости процесса экскавации в зависимости от степени изношенности зуба

Как видно из результатов расчета (рисунок 2.18, рисунок 2.19), при переходе от исходного зуба (профиль №1) к максимально изношенному (профиль №5), усилия, необходимые для выемки скальной горной массы, возрастают практически в 3 раза, что влечет за собой повышение энергоёмкости процесса выемки горной массы примерно в 1,6 раза.

Стоит отметить, что для более глубокого изучения особенностей влияния характера изнашивания зубьев на конструктивные элементы экскаватора требуется проведение более детального моделирование процесса наполнения и движения ковша экскаватора в процессе внедрения в разрушенный массив горной породы. Развитие данной трибологической системы посредством создания «цифрового двойника» с последующей корреляцией с учетом реальных условий, позволит предварительно оценивать внедряемые научные технические решения, направленные на повышение производительности экскаватора без проведения дорогостоящих лабораторных и полевых испытаний.

2.6 Выводы по главе 2

1. В результате анализа изношенных головных частей зуба (коронки) канатного экскаватора с прямой лопатой установлено, что в зависимости от

размера фрагментов абразивной породы вид головной части зуба различен: после работы по мелкодисперсным породам (песку) при общем укорочении зуба он сохраняет симметричность, в то время как в случае крупнокусковых пород симметричность его формы нарушается со смещением вершины к верхней поверхности и сопровождается увеличением радиуса притупления режущей кромки и образованием на нижней поверхности площадки притупления.

2. Обнаружено, что при работе по мелкодисперсным породам как верхняя, так и нижняя поверхности зуба имеют блестящий цвет при отсутствии заметного количества царапин; для крупнокусковых пород – верхняя поверхность блестящая без заметного количества царапин, нижняя – матовая, вся покрытая параллельными друг другу мелкими царапинами, направление которых совпадает с направлением движения коронки в процессе перемещения в породе ковша экскаватора.

3. При работе по мелкодисперсным породам поверхностная твердость обеих поверхностей возрастает примерно на одинаковую величину (~28%); в случае крупнокусковых пород приращение твердости на верхней поверхности зуба (~ 20%) несколько превышает аналогичное приращение для нижней (~17%).

4. В соответствии с результатами разработанной имитационной модели силового взаимодействия зуба ковша экскаватора с массивом взорванной скальной породы установлено, что наблюдается существенное различие в преобладающем направлении воздействия кусков породы на зуб – по нормали F_y к верхней поверхности и касательно F_x , относительно нижней, с превышением в 1,4 раз значений F_x для нижней поверхности по сравнению с верхней.

5. Представленные выше обнаруженные закономерности объясняются различием в преобладающем виде изнашивания поверхностей при работе зуба по той или иной породе – абразивное изнашивание обеих поверхностей в

случае мелкодисперсной породы и ударно-абразивный его вид для верхней поверхности и абразивный для нижней в случае крупнокусковых пород.

6. Исходя из результатов компьютерного моделирования и визуальных наблюдений поверхности зубьев ковша экскаватора после работы по взорванным скальным породам, сделан вывод, что причиной более интенсивного изнашивания нижней поверхности зубьев по сравнению с верхней является большая величина касательных усилий, действующих на нижнюю поверхность, что определяет большую скорость ее абразивного изнашивания.

7. Результатами компьютерного моделирования показано, что в случае работы зубьев ковша экскаватора типа ЭКГ по взорванным скальным породам при переходе от исходного зуба к максимально изношенному усилию, необходимые для выемки горной массы, возрастают практически в 3 раза, что влечет за собой повышение энергоемкости процесса выемки горной массы примерно в 1,6 раза.

8. для снижения негативного воздействия процесса изнашивания зубьев на энергоемкость выемки взорванной горной массы экскаватором требуется обеспечение эффекта самозатачивания зубьев при работе, что может быть достигнуто повышением износостойкости нижней части зуба.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ КОВША ЭКСКАВАТОРА НА ИХ АБРАЗИВНУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПРИ РАБОТЕ ПО ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЕ

3.1 Выбор методики экспериментального исследования абразивного изнашиванию

Потерю симметрии зуба, возникающую из-за более интенсивного изнашивания его нижней части, и как следствие, возрастание усилий сопротивления породы экскавации, предлагается предотвратить повышением износостойкости металла нижней части зуба путем его интенсивной пластической деформации при повышенных температурах и последующей закалки, т.е. применением высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО).

В связи с тем, что, как установлено (глава 2), изнашивание нижней поверхности зубьев происходит в результате абразивного воздействия кусков взорванной горной массы, эффективность предлагаемого технического решения представлялось необходимым подтвердить проведением экспериментальных исследований по изучению влияния ВТМО на скорость абразивного изнашивания материала зубьев.

Абразивное изнашивание по своей физической природе относится к механическому воздействию и характеризуется отделением микроскопических объемов изнашиваемого материала в результате его контактного взаимодействия с абразивной средой, за счет за счет фрикционного сочетания тангенциальных и нормальных усилий [43]. При этом, преобладающее воздействие касательных усилий при контакте с абразивом, приводящее к царапинам, характеризуется более высоким уровнем интенсивности по сравнению с ударным воздействием, где преобладают усилия, направленные по нормали к поверхности [90].

Характер протекания процесса абразивного изнашивания, описывающий взаимодействие исследуемого объекта и абразива, определяет

выбор методики проведения лабораторных испытаний [14; 50; 119] по устойчивости материала объекта противостоять изнашиванию. Процесс контакта зубьев ковша с кусками взорванной горной массой при экскавации можно представить в виде трибологической системы, в которой изнашивание происходит в результате скольжения зуба по монолитному абразиву, что моделируется в лабораторных условиях прижатием исследуемого образца к абразиву под действием заданной статической нагрузки и перемещением образца или абразива (рисунок 3.1).

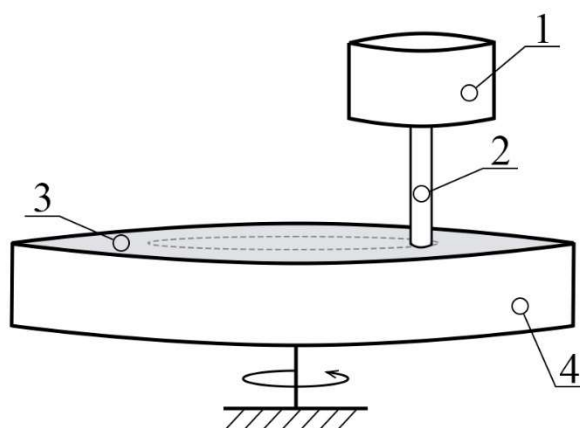


Рисунок 3.1 – Схема испытания образца на абразивное изнашивание с учетом всех необходимых составляющих

1 – статическая нагрузка; 2 – исследуемый образец; 3 – абразивная поверхность; 4 – поворотная платформа

Вышепредставленный вид испытаний в лабораторных условиях обладает такими преимуществами, как статичное положение абразива, известная величина времени контакта, а также возможность изучения влияния на процесс изнашивания дополнительных факторов, таких как, например, удельное давление (контактное напряжение) [90].

Обязательным условием протекания процесса абразивного изнашивания является превышение твердости абразива над твердостью изнашиваемого объекта [80]. При этом необходимым требованием к проведению

экспериментов по изнашиванию является соблюдение неизменности условий контактного взаимодействия во время испытания [91].

Наиболее широко используемые методики по определению износостойкости материалов, например, [18; 110] основываются на изнашивании исследуемого образца материала, прижимаемого с постоянной нагрузкой к перемещающейся по различной траектории абразивной поверхности, представленной в виде шлифовальной шкурки (рисунок 3.2).

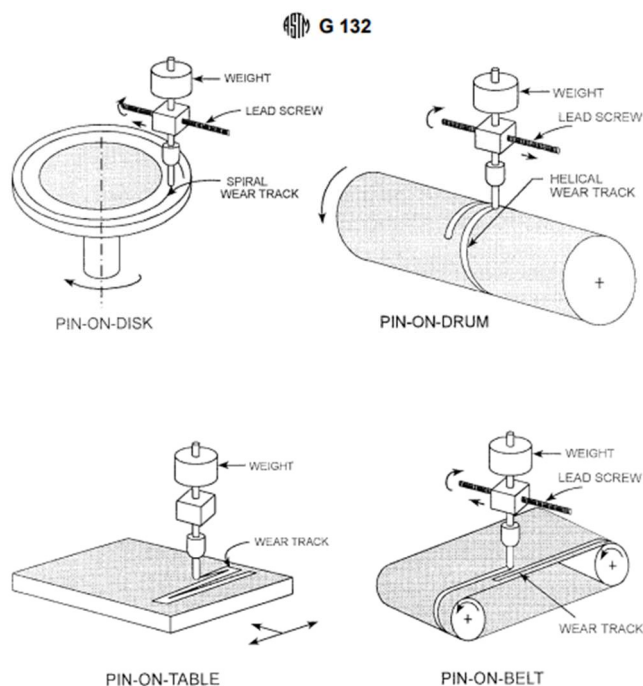


Рисунок 3.2 – Схематические изображения установок для проведения испытаний по абразивному изнашиванию [110]

Однако применение данных методик сопряжено с ограничениями на уровень нагрузки прикладываемой к образцу и скорость перемещения поверхности вследствие недостаточных прочностных характеристик выпускаемых абразивных шкурок.

Методика и установка (рисунок 3.3), описываемые в работе [8], нивелировали недостаток прочности абразивной шкурки путем замены ткани на монолитный абразив, что позволило достичь более высоких контактных напряжений, но не избавили от таких недостатков, как высокий расход абразивного материала, повышенные требования к мощности

электродвигателя, сложность в создании редукторной системы, которая, в свою очередь, ограничивает диапазон скорости взаимодействия.

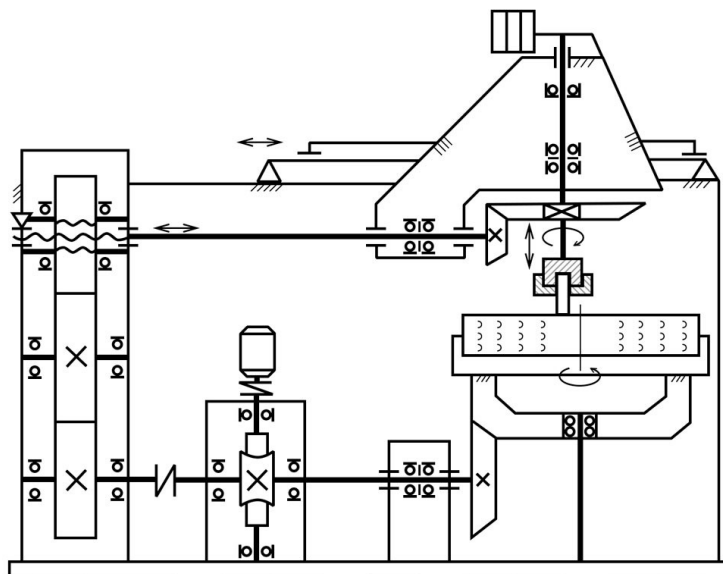


Рисунок 3.3 – Кинематическая схема машины АИ-2-С [13]

3.2 Разработка методики и экспериментальной установки по изучению влияния термомеханической обработки на абразивную износостойкость материала зубьев

На рисунке 3.4 представлена 3D модель разработанной экспериментальной установки, позволяющей проводить эксперименты по изучению процесса абразивного изнашивания конструкционных материалов в широком спектре временных интервалов, нагрузок и контактных напряжений.

В качестве абразива по данной методике выступает твердая монолитная структура в виде шлифовального круга, выполненного из электрокорунда 25А с размером зерна 250-300 мкм, как материала, обладающего твердостью ($HV \sim 2200$ МПа) и абразивностью ($a \sim 90$ мг) [2], соизмеримой с величиной этих показателей у полускальных и скальных горных пород, а также, что крайне важно, однородной структурой, обеспечивающей высокую сходимость результатов в экспериментах. При этом твердость указанного выбранного абразива существенно превышает твердость всех изнашиваемых металлических материалов, что обеспечивает выполнение требований [80] по условиям протекания процесса абразивного изнашивания.

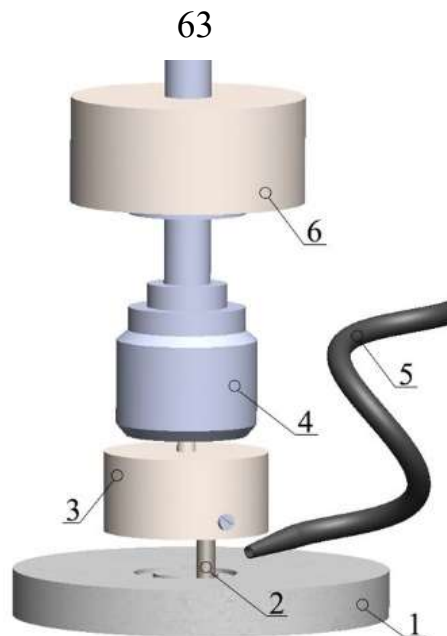


Рисунок 3.4 – Виртуальное представление разработанной экспериментальной установки: 1 – круг абразивного материала; 2 – испытуемый образец; 3 – удерживающее устройство; 4 – шпиндель; 5 – устройство подачи воды; 6 – груз

Предварительно взвешенный (± 1 мг) цилиндрический образец 2 с величиной исходного диаметра $D_0 = 6; 8; 10$ и 12 мм и длиной $L = 35$ мм анализируемого материала (рисунок 3.4) жестко фиксируется в удерживающем устройстве 3 установки и прижимается своей торцевой поверхностью к поверхности абразива 1 с постоянным усилием ($F_1 = 66$ Н или $F_2 = 132$ Н). От электродвигателя через шпиндель 4 и удерживающее устройство образцу передается крутящий момент, обеспечивающий ему передвижение по абразиву по круговой траектории с постоянной линейной скоростью ($v_1 = 0,423$ м/с и $v_2 = 0,846$ м/с). При помощи устройства 5 в зону контакта абразива и исследуемого образца непрерывно подается охлаждающая жидкость (вода) с целью устранения возможных структурных изменений исследуемого материала вследствие перегрева.

После изнашивания в течение заданного промежутка времени ($t_i = 30$ секунд) образец повторно взвешивается с определением убыли массы Δm_i , мг. Испытания повторялись 5-10 циклов ($\Sigma t_i = 150-300$ с). После каждого цикла абразивный круг сдвигается, что обеспечивает в каждом цикле контакт образца со свежей поверхностью абразива. На основе полученных результатов

строится зависимость суммарной убыли массы образца ($\sum \Delta m$, мг) от времени контакта с абразивом (t_i , с) с последующей линейной аппроксимацией данных. Величина тангенса угла наклона линии принималась за *массовую скорость* изнашивания материала (V_m , мг/мин), а величина обратная – за *массовую износостойкость* (I_m , мин/мг) (3.1):

$$I_m = \frac{1}{V_m} \quad (3.1)$$

Отношение износостойкости I_i материала к износостойкости I_0 материала сравнения, например, стали 25Л или стали 110Г13Л до ВТМО, принимается за *сравнительную износостойкость* (α) данного материала (3.2):

$$\alpha = \frac{I_i}{I_0} \quad (3.2)$$

При необходимости значение убыли массы Δm_i пересчитывается на убыль высоты образца (Δh_i , мм) по формуле (3.3):

$$\Delta h_i = \frac{\Delta m_i}{\rho \cdot S} \quad (3.3)$$

где ρ – плотность материала образца, кг/м³;

S – площадь контакта образца с абразивом (принималась равной площади сечения образца), м².

Аналогично массовой скорости, *линейная скорость* абразивного изнашивания (V_l , мм/с) исследуемого материала определяется путем построения зависимости суммарной убыли высоты образца ($\sum \Delta h_i$, мм) от продолжительности испытания (t_i , с) и линейной аппроксимации, с последующим определением тангенса угла наклона. Величина *линейной износостойкости* (I_l , с/мм) определяется по формуле (3.4):

$$I_l = \frac{1}{V_l} \quad (3.4)$$

Величина V_l делится на линейную скорость перемещения образца по абразиву (v , м/с) с получением *интенсивности абразивного изнашивания* (V_v , мм/м) – убыли линейного размера образца, приходящейся на единицу пути трения (3.5):

$$V_v = \frac{V_l}{v} \quad (3.5)$$

Дополнительным параметром, характеризующим процесс изнашивания является удельная нагрузка (контактное напряжение) ($P_{уд}$, МПа), создаваемая в зоне контакта образца с абразивом площадью S , м² за счет постоянно приложенного усилия (F , Н), рассчитываемая по формуле (3.6):

$$P_{уд} = \frac{F}{S} \quad (3.6)$$

Оценка твердости поверхностного слоя образцов производилась с использованием универсального твердомера Zwick Roell.

В первой серии экспериментов [112], посвященных выбору материалов для дальнейших исследований, объектом испытаний являлись цилиндрические образцы широкого спектра металлических конструкционных материалов, а именно:

- сталь 110Г13Л, как материал, наиболее часто используемый для изготовления зубьев ковшей экскаваторов;
- зарубежные стали Hardox (H400, H500) фирмы SSAB Oxelosund AB и Miilux (M450, M500) фирмы Miilux Oy, позиционируемые создателями, как материалы, наиболее устойчивые к абразивному изнашиванию;
- отечественные углеродистые стали 45, У8, 65Г и чугуны СЧ21 и ВЧ35, как материалы, использующиеся для изготовления быстроизнашивающихся элементов горного оборудования;
- литейная сталь 25Л, широко применяемая в горном машиностроении, выбранная в качестве материала сравнения.

Химический состав изнашиваемых материалов представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Химический состав исследуемых марок сталей и чугунов

[78]

Марка сталей или чугуна	Содержание элементов, %, масс.								
	C	Cr	Ni	Mn	Si	Cu	P	S	Другие эл-ты
25Л	0,22- 0,3	≤0,3	≤0,3	0,35- 0,9	0,2- 0,52	≤0,3	0,04	0,045	-
45	0,42- 0,5	≤0,25	≤0,25	0,5-0,8	0,17- 0,37	≤0,25	≤0,035	≤0,04	0,08
У8	0,76- 0,83	≤0,2	≤0,25	0,17- 0,33	0,17- 0,33	≤0,25	≤0,03	≤0,028	-
65Г	0,62- 0,7	≤0,25	≤0,25	0,9-1,2	0,17- 0,37	≤0,2	≤0,035	≤0,035	-
110Г13Л	0,9-1,4	≤1	≤1	11,5-15	0,8-1	≤0,3	≤0,12	≤0,05	-
СЧ 21*	3-3,3	≤0,3	≤0,5	0,8-1,2	1,3-1,7	-	≤0,3	≤0,15	-
ВЧ 35*	2,7-3,8	≤0,05	-	0,2-0,6	0,8-2,9	-	≤0,1	≤0,02	-
Н450**	≤0,26	≤1,4	≤1,0	≤1,6	≤0,7	-	≤0,025	≤0,01	≤0,604
Н500**	≤0,3	≤1,5	≤1,5	≤1,6	≤0,7	-	≤0,025	≤0,01	≤0,604
М400**	≤0,24	≤1,5	≤0,7	≤1,7	≤0,7	-	≤0,03	≤0,015	≤0,504
М500**	≤0,3	≤1,5	≤0,8	≤1,7	≤0,7	-	≤0,03	≤0,015	≤0,504
* – химический состав по данным взятым из государственных стандартов [16; 17]									
** – химический состав по данным взятым из интернет источников [30; 31; 96–98]									

Во второй серии опытов, посвященных изучению влияния ВТМО на скорость и интенсивность абразивного изнашивания материала зубьев, сравнивалась износостойкость образцов стали 110Г13Л в состоянии поставки, изготовленных из прутка $D_0 = 8$ мм, и подвергнутых высокотемпературной термомеханической обработке (пластической деформации при повышенной температуре с последующей закалкой) с различной интенсивностью пластической деформации (ϵ , мм/мм) в процессе ВТМО. Для этой цели прутки стали диаметра $D_i = 10$ и 12 мм выдерживались в течение 15 минут в печи при температуре 1150°C. Затем производилась ковка их рабочей части на

пневмомолоте (рисунок 3.5) до достижения того же диаметра $D_0 = 8$ мм (рисунок 3.6) и закалка в воде [124]. Подверженная ВТМО часть прутка разделялась на части с получением цилиндрических образцов длиной $L = 50$ мм.

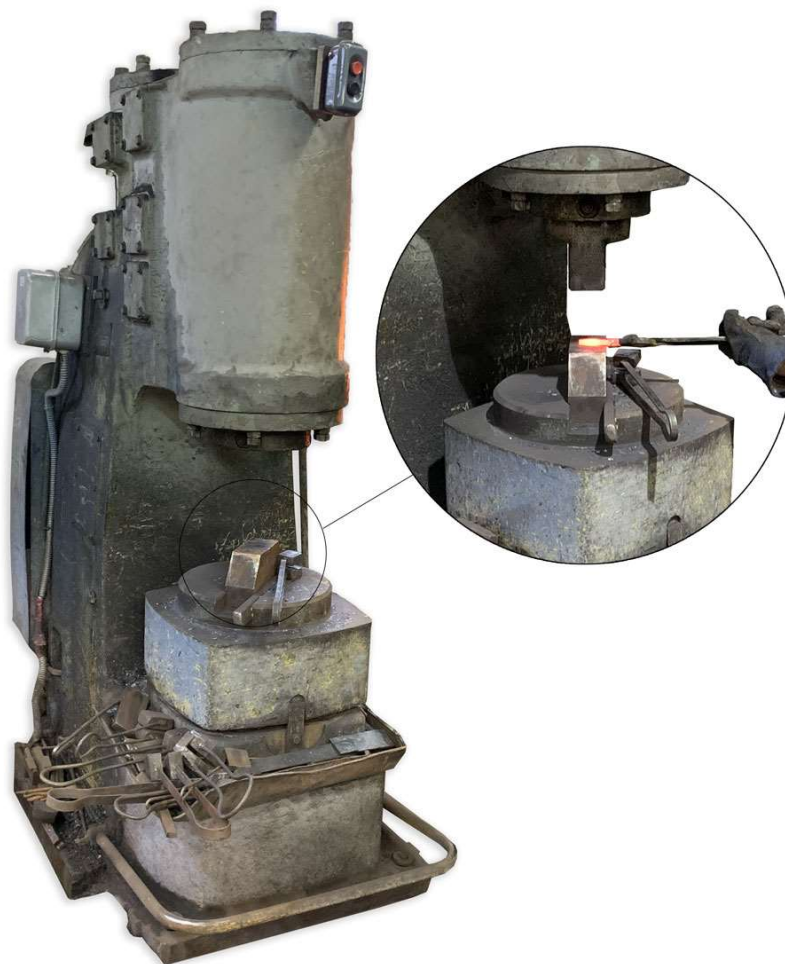


Рисунок 3.5 – Кузнечный молот марки МА-4129А, использованный для пластической деформации (вытяжки) прутков исследуемой стали



Рисунок 3.6 – Вид частей прутков стали неподверженных (слева) и подверженных (справа) ВТМО

Полученная каждым образцом в результате ВТМО интенсивность деформации ε металла рассчитывалась [45] по формуле (3.7):

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{D_i}{D_0} \right)^2, \quad (3.7)$$

Где D_i – первоначальный диаметр образца, мм;

D_0 – диаметр образца, полученный в результате ВТМО, мм.

Величина ε для образцов с первоначальным диаметром 10 и 12 мм составляла 0,44 и 0,81 соответственно.

Проводя эксперименты по изнашиванию на образцах, подвергнутых и не подвергнутых ВТМО ($v = 0,846$ м/с, $N = 132$ Н, $S = 50$ мм², $P_{уд} = 2,64$ МПа), с определением для каждого из них скорости абразивного изнашивания и износостойкости, определялась относительная износостойкость α (по формуле 3.2) образцов, деформированных при ВТМО с той или иной интенсивностью ε , как отношение I_i образца, подвергнутого ВТМО, к значению I_0 исходного материала. Полученная интенсивность изнашивания V_v исходных образцов стали использовалась в расчетах убыли линейных размеров натурального зуба.

В третьей серии опытов, посвященных обоснованию возможности переноса результатов экспериментов на условия эксплуатации зубьев, объектом изнашивания являлись цилиндрические образцы различного диаметра D_i из стали У8 после закалки (с 780°С в масле) и низкого отпуска (при 200°С), как материала, близкого по абразивной износостойкости к материалу зубьев ковша экскаватора стали 110Г13Л, и перспективного в качестве материала зубьев.

Целью этих экспериментов являлось подтверждение данных [14; 80; 90], свидетельствующих о том, что при сохранении постоянными остальных условий эксперимента линейная скорость V_l и интенсивность V_v абразивного изнашивания металлических материалов находятся в прямо пропорциональной зависимости (формула 3.8-3.10) от удельной нагрузки $P_{уд}$:

$$\frac{V_l}{V_l^*} = \frac{P_{уд}}{P_{уд}^*}, \quad (3.8)$$

$$V_l^* = V_l \cdot \left(\frac{P_{уд}^*}{P_{уд}} \right) \quad (3.9)$$

С учетом линейной скорости v перемещения образца относительно абразива, это соотношение для интенсивности абразивного изнашивания материала выглядит, как (3.10):

$$V_v^* = V_v \cdot \left(\frac{P_{уд}^*}{P_{уд}} \right) \quad (3.10)$$

В предположении, что процессы абразивного изнашивания материала в лабораторных и натуральных условиях подобны, выполнение такой зависимости позволяет по значению интенсивности изнашивания V_v материала, установленной в лабораторных условиях при конкретно заданной удельной нагрузке $P_{уд}$, рассчитать интенсивность V_v^* при удельной нагрузке $P_{уд}^*$, имеющей место при работе этого материала в составе натурального изделия, в данном случае, зуба ковша экскаватора. А с учетом пути трения L_i^* , пройденного изношенным зубом, можно рассчитать и убыль его линейного размера в результате изнашивания, как (3.11):

$$h = V_v^* \cdot L_i^* = V_v \cdot L_i \cdot \left(\frac{P_{уд}^*}{P_{уд}} \right) \quad (3.11)$$

С целью подтверждения справедливости зависимостей (3.9), (3.10) для образца каждого диаметра $D_i = 6, 8, 10$ и 12 мм (площади сечения $S_i = 28,3; 50,3; 78,5$ и $113,1$ мм²) при нагрузке $F_l = 66$ Н строилась зависимость суммарной убыли массы $\Sigma \Delta m$ от времени t , тангенс угла наклона линейной аппроксимации которой принимался за массовую скорость изнашивания образца данной площади сечения при данной нагрузке (V_m , мг/с). Полученные величины V_m пересчитывались (3.3) на значения линейной скорости изнашивания (V_l , мм/с).

Аналогичные зависимости с определением V_m, V_l строились для другой нагрузки $F_2 = 132$ Н. Для каждого установленного значения V_{li} рассчитывалась (3.6), соответствующая ему удельная нагрузка, с построением зависимости $V_{li} = f(P_{уд,i})$. Возможность аппроксимации с высокой степенью достоверности

ее прямой линией позволяла бы заключить, что зависимости (3.9 - 3.10) действительно выполняются.

3.3 Результаты экспериментов и их анализ

3.3.1 Обоснование выбора материалов для дальнейших исследований

Как показал визуальный осмотр абразивного диска после его контакта с изнашиваемыми образцами, после каждого испытания на его поверхности появляется отпечаток, вид которого существенно различается в зависимости от использованного материала образца. Если для стали 25Л и чугунов это налет продуктов изнашивания металла, то для закаленных сталей – это выемки глубиной в несколько миллиметров (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Вид круга абразива после испытаний образцов материалов на изнашивание

В качестве примера на рисунке 3.8 представлена полученная зависимость $\sum \Delta t - t$ для материала с наибольшей (сталь У8 после закалки) и наименьшей стойкостью к абразивному изнашиванию (сталь 25Л).

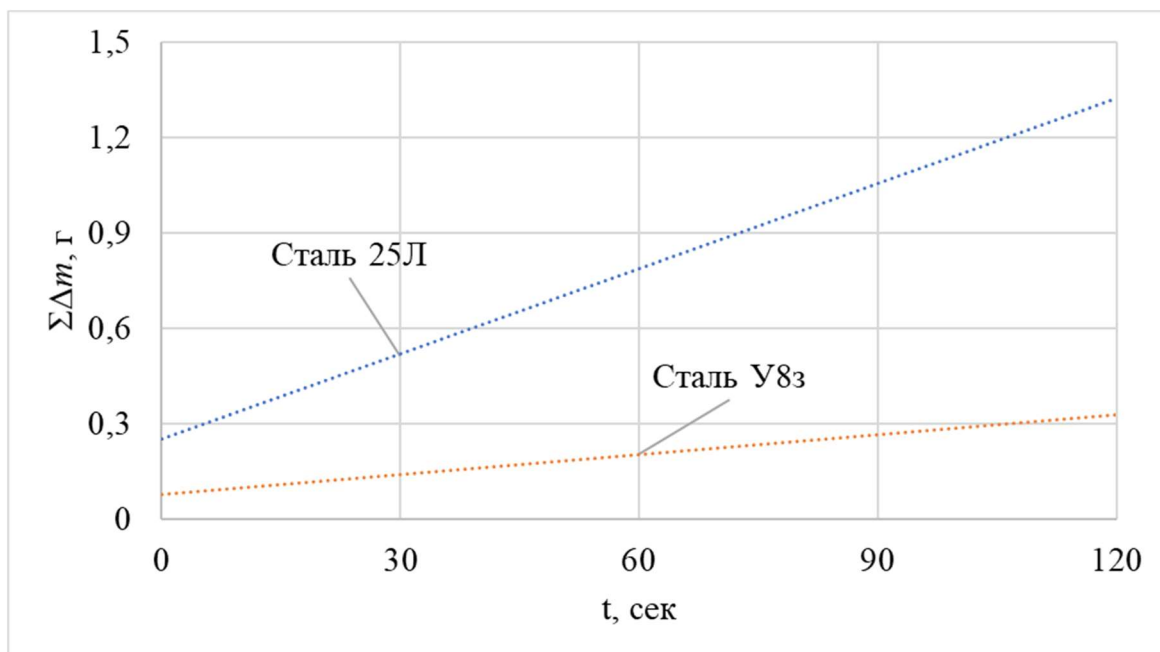


Рисунок 3.8 – Зависимость суммарной убыли массы образцов от продолжительности абразивного изнашивания для сталей 25Л в состоянии поставки и У8 после закалки и низкого отпуска

В таблице 3.2 приведены массовой скорости V_m , массовой износостойкости I , относительной износостойкости α и твердости по шкале Бринелля (НВ) для материалов исследуемых образцов.

Таблица 3.2 – Полученные значения параметров, характеризующих процесс абразивного изнашивания анализируемых материалов

Сталь (чугун)	V_m , г/мин	I , мин/г	α	НВ
25Л	0,53	1,90	1	187
ВЧ 35	0,48	2,08	1,10	159
45	0,46	2,19	1,15	216
СЧ 21	0,40	2,49	1,31	219
65Г	0,36	2,76	1,46	232
45 ₃	0,31	3,26	1,72	441
М400	0,31	3,27	1,73	397
У8	0,30	3,28	1,73	234
Н450	0,27	3,76	1,98	455

Продолжение таблицы 3.2

H500	0,25	3,94	2,08	487
M500	0,23	4,39	2,32	506
110Г13Л	0,16	6,43	3,39	233
65Г ₃	0,15	6,83	3,60	592
У8 ₃	0,13	7,58	4,00	187

На диаграмме рисунка 3.9 приведена сравнительная износостойкость α анализируемых материалов относительно стали 25Л и значения их твердости.

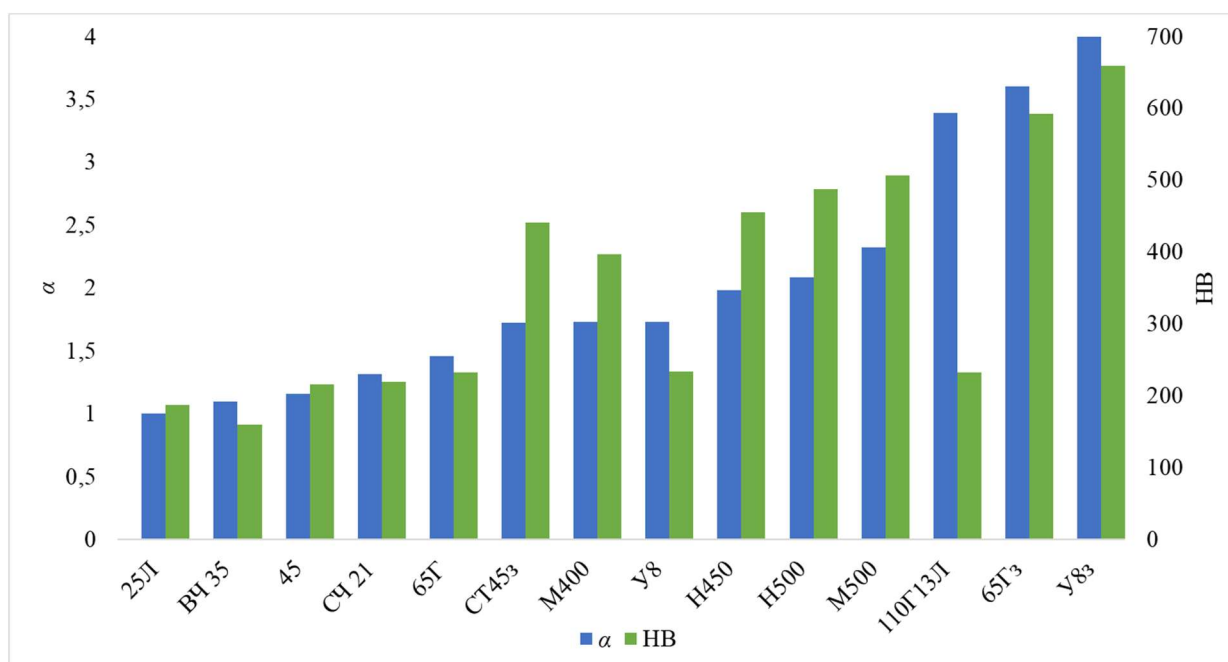


Рисунок 3.9 – Сравнительная износостойкость (синие линии) и твердость (зеленые линии) анализируемых материалов

Как следует из результатов экспериментов (таблица 3.2, рисунок 3.9), испытанные материалы весьма существенно различаются по стойкости к воздействию высоко абразивной твердой среды: износостойкость I_i наиболее стойкого материала (стали У8 после закалки) примерно в 4 раза выше этого показателя для низкоуглеродистой стали 25Л, практически не разрушающей поверхности абразива при изнашивании (рисунок 3.7). Близкую к стали 25Л износостойкость демонстрируют среднеуглеродистая сталь 45, а также серый и высокопрочный чугуны СЧ21, ВЧ35. Низкая износостойкость указанных

низкоуглеродистой и среднеуглеродистой стали объясняется наличием в их структуре значительного количества мягкого феррита, в случае чугунов – мягкого углерода. При переходе к высокоуглеродистым сталям 65Г, У8 (в состоянии поставки), как материалам со структурой перлита, величина их износостойкости I_i , как и ожидалось [8], возрастает. Износостойкость среднеуглеродистых экономно легированных сталей М400, Н450, Н500, М500 близка к износостойкости У8 и возрастает с повышением содержания в них легирующих элементов. Сталь 110Г13Л демонстрирует еще более высокую износостойкость, превышающую этот параметр для стали М500 в 1,5 раза, для стали М400 – в 2 раза. Завершают таблицу самые износостойкие материалы – стали 65Г, У8 в закаленном состоянии, более чем в 2 раза повысившие свою износостойкость в результате закалки, как имеющие структуру отпускаемого мартенсита. Можно отметить, что закалка существенно (в 1,5 раза) повышает износостойкость и среднеуглеродистой стали 45.

В целом, как можно заключить из вида диаграммы рисунка 3.9, порядок расстановки испытанных материалов по возрастанию износостойкости совпадает с их расстановкой по увеличению твердости, что находится в соответствии с общепринятой точкой зрения. Из общего порядка выпадает сталь 110Г13Л, которая при сравнительно невысокой твердости (233 *НВ*) показывает одну из наиболее высоких износостойкостей, существенно превышающей (от 2 до 3,5 раз) величину I_i всех испытанных углеродистых сталей (в состоянии поставки). Нужно отметить, что полученный результат не подтверждает точку зрения [19], в соответствии с которой сталь 110Г13Л по стойкости к чисто абразивному изнашиванию не отличается от обычной углеродистой стали такой же твердости: при одинаковой твердости со сталями 65Г и У8 (без закалки) сталь 110Г13Л показывает существенно более высокую (примерно в 2 раза) износостойкость.

Можно отметить, что, как показали результаты экспериментов, специально разработанные за рубежом для быстро изнашиваемых элементов стали Hardox 400, Hardox 500, Miluks 450, Miluks 500 не демонстрируют

какого-либо заметного преимущества, с точки зрения стойкости к воздействию высокоабразивной твердой породы, по сравнению с традиционно используемой сталью Гадфильда.

На основании сказанного выше в качестве объекта для дальнейших исследований была оставлена сталь 110Г13Л, как уже использующийся материал зубьев, а также У8 после закалки, как перспективный высокоизносостойкий материал для изготовления зубьев ковшей экскаваторов.

3.3.2 Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на износостойкость материала зубьев ковшей экскаваторов

Результаты испытаний исходных и подвергнутых ВТМО с максимальной интенсивностью деформации ($\varepsilon = 0,81$) образцов материала зубьев – стали 110Г13Л представлены на рисунке 3.10. Из графика рисунка видно, что все экспериментально установленные точки убыли высоты образцов, подвергнутых ВТМО, лежат ниже, чем исходного материала, что свидетельствует о благоприятном влиянии этого вида обработки на износостойкость материала зубьев: линейная скорость изнашивания V_l исходного образца составляет 0,0146 мм/с (соответственно интенсивность изнашивания $V_v = 0,017$ мм/м), в то время как подвергнутого обработке только 0,0104 мм/с, т. е. в 1,4 раза меньше.

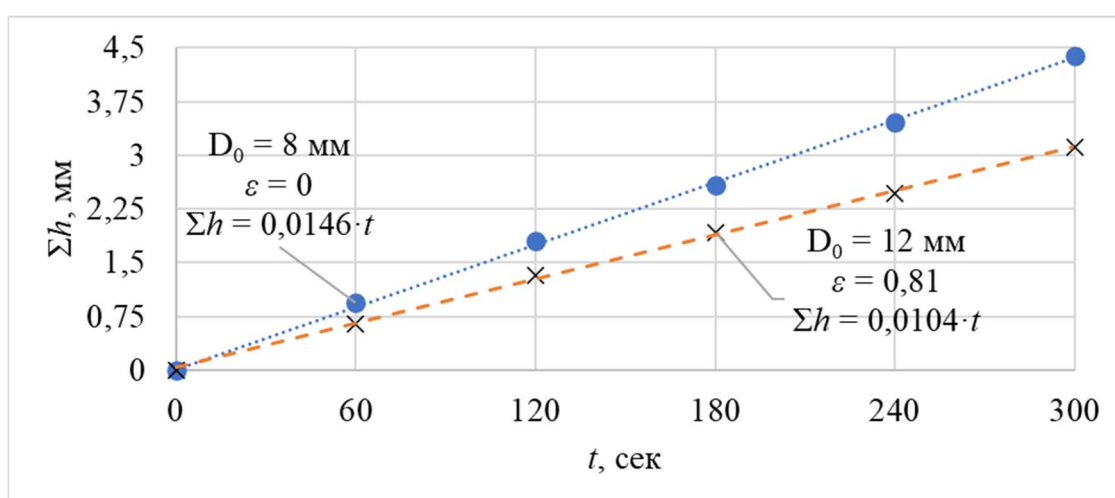


Рисунок 3.10 – Зависимость суммарной убыли высоты образцов, подвергнутых (крестики) и не подвергнутых ВТМО (точки), от времени изнашивания

Как показали результаты замера твердости (таблица 3.3), этот параметр у образцов, подвергнутых ВТМО при ε до 0,81, возрастает с 206 до 299 *НВ*, т.е. на 45%.

Таблица 3.3 – Полученные значения параметров, характеризующих процесс абразивного изнашивания образцов до и после воздействия ВТМО

D_0 , мм	ε	V_l , мм/с	V_v , мм/м	Твердость, <i>НВ</i>
8	0	0,0146	0,0172	206
10	0,44	0,0123	0,0144	277
12	0,81	0,0104	0,0122	298

Таким образом полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что применение высокотемпературной пластической деформации образцов материала зубьев с интенсивностью деформации $\varepsilon = 0,81$ с их последующей закалкой в воде, т.е. применение ВТМО, способствует повышению до 1,4 раза износостойкости и 1,45 раза твердости материала зубьев.

3.3.3 Экспериментально-расчетное обоснование возможности переноса результатов эксперимента на условия эксплуатации зубьев

Как показала обработка экспериментальных данных, полученных на образцах стали У8 различного диаметра и испытанных при различных нагрузках, временные зависимости суммарной убыли массы $\Sigma \Delta m - t$ для всех образцов, вне зависимости от их диаметра (площади сечения S , мм²) и приложенной нагрузки F , удовлетворительно экстраполируются прямыми линиями (рисунок 3.11) с тангенсами углов наклона, принимаемыми за массовые скорости изнашивания V_m материала.

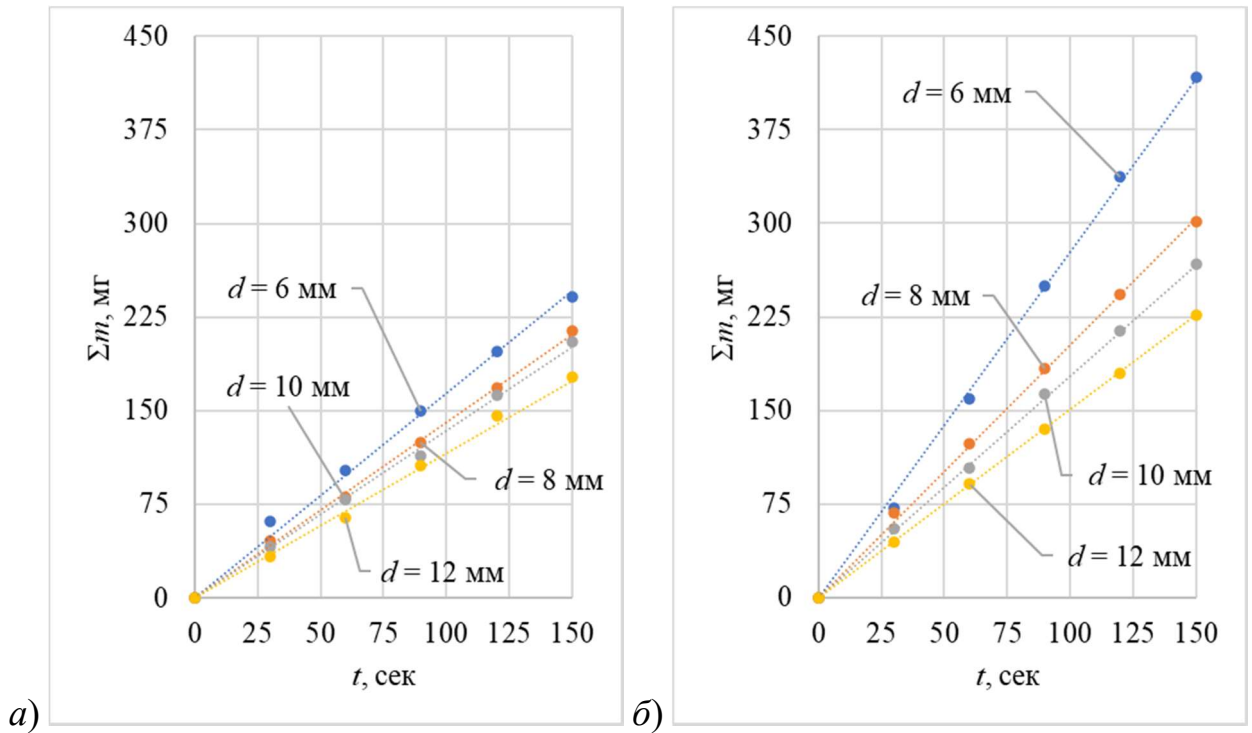


Рисунок 3.11 – Зависимость убыли суммарной массы образцов стали У8 от времени воздействия абразива при нагрузке 66 Н (а) и 132 Н (б)

Полученные величины V_m и рассчитанные (3.3) по ним значения линейной скорости изнашивания V_l представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.4 – Массовая и линейная скорости изнашивания образцов стали У8 в зависимости от диаметра образца и величины прилагаемой нагрузки

Нагрузка, Н	Скорость изнашивания	Диаметр образца D_i , мм			
		6	8	10	12
66	Массовая – V_m , мг/с	1,61	1,43	1,37	1,18
	Линейная – V_l , мм/с	0,0073	0,0036	0,0022	0,0013
132	Массовая – V_m , мг/с	2,78	2,01	1,78	1,51
	Линейная – V_l , мм/с	0,0126	0,0051	0,0029	0,0017

Полученная зависимость величины V_l от $P_{уд}$ представлена на рисунке 3.12.

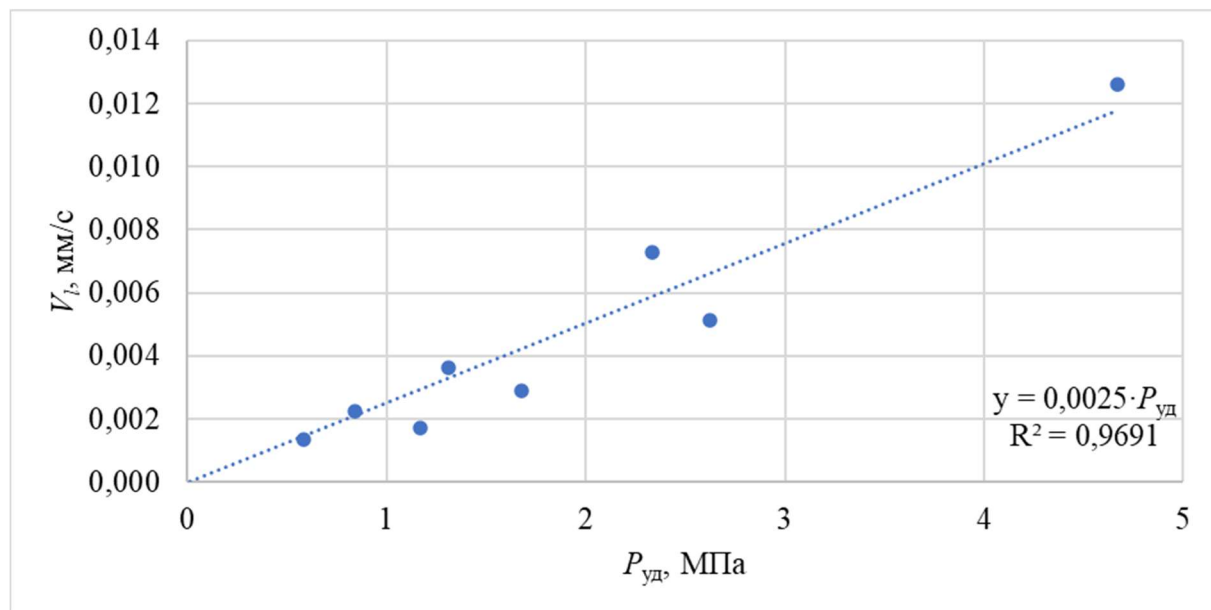


Рисунок 3.12 – Зависимость линейной скорости изнашивания образцов стали У8 от удельной нагрузки

Как видно из представленных данных рисунка 3.12, полученные экспериментальные точки зависимости $V_l = f(P_{уд})$ удовлетворительно аппроксимируются линейной функцией с коэффициентом пропорциональности $K = 0,0025$ мм/(с·МПа) при высоком значении коэффициента достоверности аппроксимации ($R^2 = 0,9157$), что подтверждает вывод [38] о существовании такой линейной зависимости.

В предположении о том, что процессы абразивного изнашивания лабораторного образца и зуба ковша экскаватора идентичны, полученное значение интенсивности абразивного изнашивания образца стали 110Г13Л в состоянии поставки ($V_v = 0,017$ мм/м) использовалось для расчета изменения геометрии реального зуба ковша экскаватора в процессе его работы, со сравнением полученных результатов с результатами натуральных наблюдений.

В качестве объекта сравнения был выбран зуб ковша экскаватора ЭКГ-5А при его работе по забою неокисленных железистых кварцитов на Михайловском месторождении Курской магнитной аномалии, информация, по изменению геометрии которого в процессе добычи различной массы

экскавируемой горной породы, приведена в работе [48] (рисунок 3.13). Результаты расчета сравнивались с убылью длины каждого изношенного зуба, обозначенной на рисунке, как h_1^* - h_4^* .

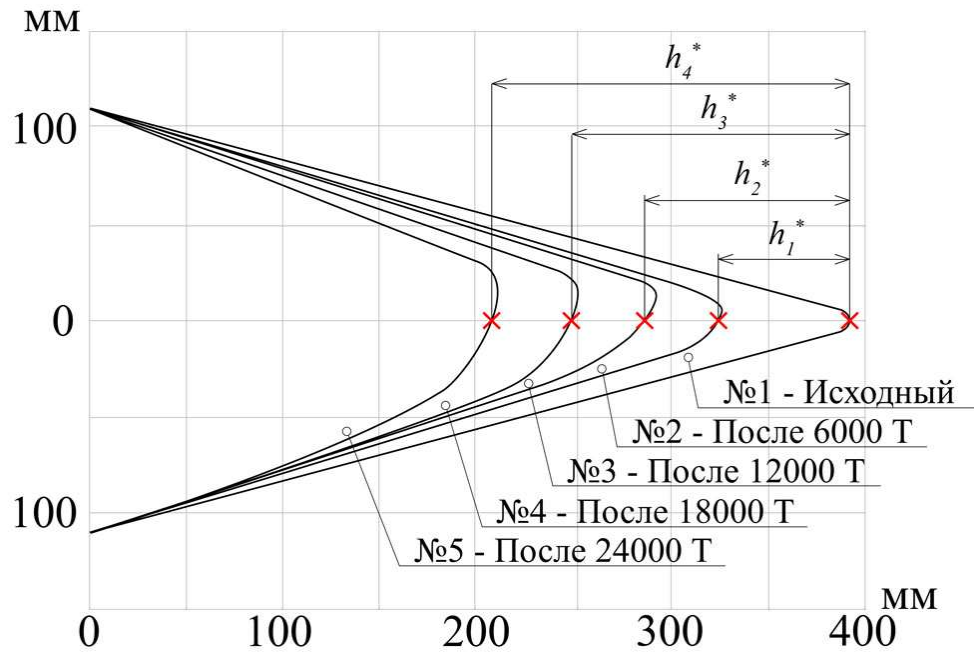


Рисунок 3.13 – Геометрия острия зуба ковша экскаватора после работы по экскавации различной массы скальной породы [48]

Путь трения L_i^* каждого изношенного зуба с породой (таблица 3.4) рассчитывался по формуле 3.12, исходя из массы экскавируемой породы, соответствующей этому профилю зуба из рисунка 3.13 ($M = 8 \cdot 10^3$; $12 \cdot 10^3$; $18 \cdot 10^3$ и $24 \cdot 10^3$ т), ее насыпной плотности ($\rho_{\text{п}} \sim 1,9$ т/м³), объема ковша экскаватора ($V_{\text{ковш}} = 5$ м³), уровня его заполняемости процессе работы ($k_{\text{н}} = 0,9$), скорости перемещения зуба ($v^* \sim 0,90$ м/с) и продолжительности контакта зуба с горной массой в течении одного цикла экскавации ($t_{\text{кон}} = 8,5$ с) и:

$$L_i^* = \frac{M \cdot t_{\text{кон}} \cdot v^*}{\rho_{\text{п}} \cdot V_{\text{ковш}} \cdot k_{\text{н}}}; \quad (3.12)$$

Таблица 3.4 – Путь трения, пройденный каждым изношенным зубом в процессе экскавации представленной массы взорванной горной породы

Масса породы М, т	Объем, м ³	Количество циклов экскавации	Время контакта в процессе экскавации $t_{\text{кон}}$, ч	Путь трения L_i^* , м
6000	3086	686	2	5246
12000	6171	1371	3	10491
18000	9257	2057	5	15737
24000	12343	2743	6	20983

Сравнивалась убыль h^* из рисунка 3.13 фиксированного линейного размера зуба за заданные пройденные пути трения L_i^* , с убылью h , рассчитанной по формуле (3.13), исходя из интенсивности изнашивания материала зубьев в условиях экспериментов ($V_v = 0,017$ мм/м), пути трения зуба L_i^* (таблице 3.4) и соотношения удельных нагрузок, имеющих место в натуральных условиях ($P_{\text{уд}}^*$) и экспериментах ($P_{\text{уд}} = 2,6$ МПа):

$$h = L^* \cdot V_v \cdot \left(\frac{P_{\text{уд}}^*}{P_{\text{уд}}} \right) \quad (3.13)$$

За величину удельной нагрузки $P_{\text{уд}}^*$, прилагаемой к зубу, принималось среднее контактное напряжение в металле головной части изношенного зуба того или иного профиля, рассчитанное по результатам компьютерного моделирования (рисунок 3.14), которое, в среднем составляло, $\sim 1,6$ МПа.

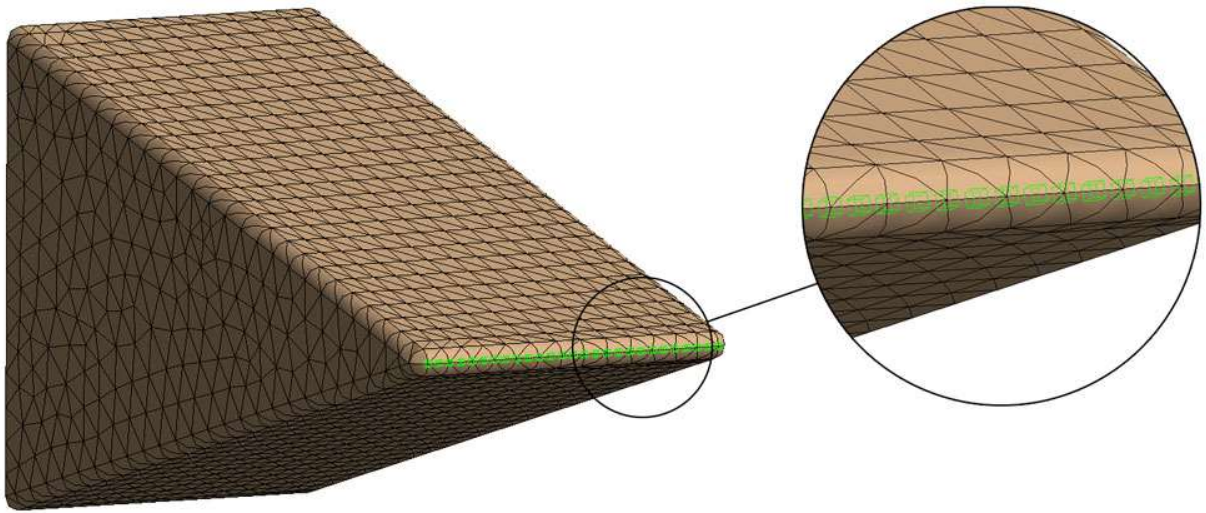


Рисунок 3.14 – Узловые элементы математической модели, откуда экспортировались данные о средней величине удельной нагрузки за цикл экскавации

Результаты сравнения величины h и h^* иллюстрирует рисунок 3.15.

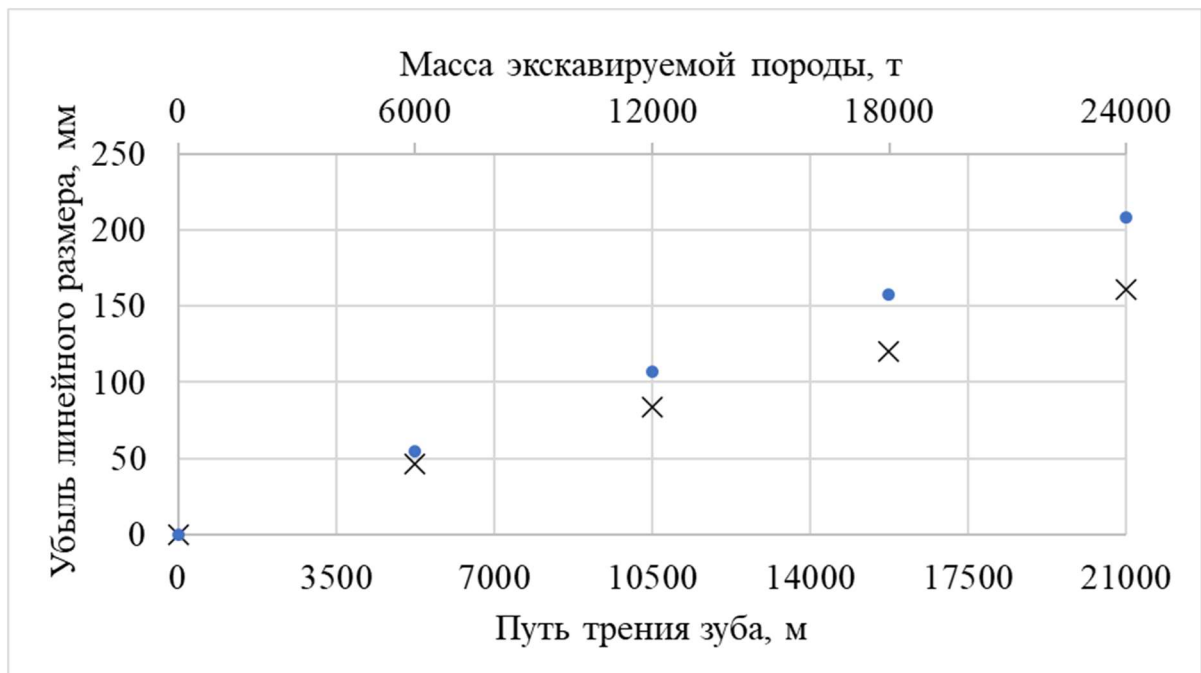


Рисунок 3.15 – Сравнение убыли фиксированного линейного размера зуба в результате изнашивания за различные пути трения, установленной по результатам натуральных наблюдений (крестики) и расчетным путем, исходя из результатов лабораторных экспериментов по изнашиванию материала зубьев и математического моделирования (точки)

Как видно из сравнения данных рисунка, наблюдается удовлетворительная сходимость между результатами натуральных наблюдений

за перемещением выбранной точки на поверхности зуба в процессе его изнашивания и соответствующими результатами, полученными расчетно-экспериментальным путем, что подтверждает возможность переноса полученных экспериментальных данных по скоростям изнашивания образцов материала зуба на натурные условия.

3.4 Выводы по главе 3

1. Проанализированы основные методики проведения экспериментальных исследований по абразивному изнашиванию образцов металлических материалов; рассмотрены конструкции и принципы действия соответствующих лабораторных установок.

2. Разработаны методика и лабораторная установка, позволяющие исследовать закономерности процесса абразивного изнашивания конструкционных материалов в широком спектре временных интервалов, нагрузок и контактных напряжений при использовании в качестве абразива электрокорунда, как однородного материала, обладающего твердостью и абразивностью, соизмеримой с величиной этих показателей у полускальных и скальных горных пород.

3. Представлены результаты сравнительных испытаний на абразивную износостойкость широкого спектра сталей и чугунов, используемых в качестве конструкционных материалов в горном машиностроении, в том числе, зарубежные стали фирмы SSAB Oxelosund AB и Miilux Oy, позиционируемые разработчиками, как наиболее стойкие к абразивному изнашиванию, а также сталь 110Г13Л, как материал, наиболее часто используемый для изготовления зубьев ковшей экскаваторов. Показано, что специально разработанные за рубежом для быстро изнашиваемых элементов стали Hardox 400, Hardox 500, Miluks 450, Miluks 500 не демонстрируют какого-либо заметного преимущества, с точки зрения стойкости к воздействию высокоабразивной твердой породы, по сравнению с традиционно используемой сталью Гадфильда (110Г13Л). По этой причине в качестве объекта для дальнейших исследований была выбрана сталь 110Г13Л, а также У8 после закалки, как

перспективный высоко износостойкий материал для изготовления зубьев ковшей экскаваторов.

4. Как показали эксперименты по сравнительным испытаниям материала зубьев стали 110Г13Л в состоянии поставки и подвергнутой по специально разработанной методике высокотемпературной термомеханической обработке, применение ВТМО с интенсивностью деформации металла $\varepsilon = 0,81$ способствует повышению до 1,4 раза износостойкости и 1,45 раза твердости материала зубьев.

5. В серии опытов, посвященных обоснованию возможности переноса результатов эксперимента на условия эксплуатации зубьев, подтверждено, что при сохранении постоянными остальных условий эксперимента, линейная скорость V_l и интенсивность V_v абразивного изнашивания металлических материалов находятся в прямо пропорциональной зависимости от удельной нагрузки (контактного напряжения) $P_{уд}$.

6. Исходя из предположения, что процессы абразивного изнашивания лабораторного образца и зуба ковша экскаватора подобны, полученные данные по интенсивности абразивного изнашивания образца стали 110Г13Л в состоянии поставки использовались для расчета изменения геометрии реального зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А при его работе по забою неокисленных железистых кварцитов на Михайловском месторождении Курской магнитной аномалии. Как показало сравнение полученных данных, наблюдается удовлетворительная сходимость между результатами натуральных наблюдений за перемещением выбранной точки на поверхности зуба в процессе его изнашивания и соответствующими результатами, полученными расчетно-экспериментальным путем, что подтверждает возможность переноса полученных экспериментальных данных по скоростям и интенсивностям изнашивания образцов материала зуба на натурные условия.

ГЛАВА 4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЬЕВ КОВША ЭКСКАВАТОРА С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТА САМОЗАТАЧИВАНИЯ ЗУБА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЕ

Потерю симметрии зуба, возникающую из-за более интенсивного изнашивания его нижней части, и как следствие, возрастание усилий сопротивления породы экскавации, предлагается предотвратить повышением износостойкости металла нижней части зуба путем его интенсивной пластической деформации при повышенных температурах и последующей закалки, т.е. применением высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО). Благоприятное влияние ВТМО на абразивную износостойкость материала зубьев подтвердили результаты опытов, результаты которых приведены в п. 3.3.2.

Как показали результаты компьютерного моделирования (рисунок 2.16), при работе зубьев ковша экскаватора по взорванным скальным породам касательные напряжения, возникающие в поверхностном слое металла нижней части зуба, примерно в 1,4 раза превышают их значения для верхней части. А поскольку, как показано в п. 3.3.3, интенсивность абразивного изнашивания металлических материалов пропорциональна напряжениям, возникающим в месте контакта изнашиваемого объекта с абразивом, нижняя поверхность зуба примерно в такое же количество раз изнашивается быстрее, чем верхняя. Таким образом, для того что бы обе поверхности зуба изнашивались с одинаковой скоростью и зуб сохранял симметричность в процессе работы, т.е. обеспечивался эффект самозатачивания, необходимо повысить износостойкость металла нижней части зуба примерно в 1,4 раза. Такой результат, как показывают результаты эксперимента (п.3.3.2), обеспечивается приданием в процессе ВТМО металлу нижней части зуба интенсивности пластической деформации $\epsilon \sim 0,8$, что и было реализовано в

предлагаемом техническом решении по совершенствованию технологического процесса изготовления зубьев ковша экскаватора.

4.1 Разработка необходимой конфигурации заготовки при штамповке коронки зуба в процессе ВТМО

На сегодняшний день основной способ изготовления зубьев ковшей экскаваторов заключается в заливке расплавленного материала в форму, геометрия которой представляет окончательный вариант зуба [15], т.е. в получении зуба литьем. Однако, в последнее время появились сведения о способе изготовления зуба, в основе которого лежит принцип пластической деформации металла его заготовки в штампе при повышенных температурах, т. е. горячей объемной штамповкой. Данный способ отличается повышенной скоростью изготовления изделий, точностью их размеров и пониженной металлоемкостью, при этом для его осуществления не требуется применения узкоспециализированного оборудования [81]. Штампованные зубья обладают более высокими значениями ударной вязкости и твердости, что положительно сказывается на их сроке службы [92].

Для снижения усилий, требующихся для реализации данного способа, штамповкой предлагается получать не цельный зуб, а лишь наиболее подверженную изнашиванию его головную часть – коронку (рисунок 4.1), которая присоединяется к ковшу экскаватора с использованием специального адаптера. Преимуществом такой составной конструкции зубьев является возможность замены в процессе эксплуатации только изношенной коронки, что сокращает затраты на приобретение зубьев и сроки ремонтных работ.

Такая составная конструкция, уже нашедшая широкое распространение за рубежом, на отечественных карьерных экскаваторах типа ЭКГ пока широко не используется, хотя и встречается – в виде адаптированных зарубежных систем [35; 36], а также в виде опытных образцов отечественных производителей [34].

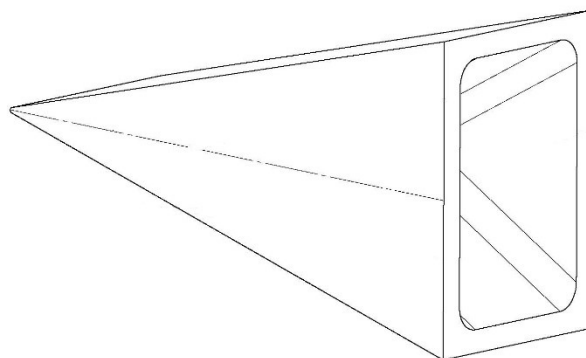


Рисунок 4.1 – Схематическое изображение поковки коронки зуба ковша экскаватора

Получение поковки коронки с разной степенью интенсивности деформации ε металла ее нижней и верхней частей, для ее последующей закалки в процессе ВТМО, достигается использованием заготовки необходимой конфигурации, при которой течение металла при штамповке происходит по траектории, обеспечивающей получение металлом нижней части коронки заданный повышенный уровень интенсивности пластической деформации ε и, как подтверждено экспериментами (п. 3.3.2), твердости и износостойкости.

Необходимая конфигурация заготовки устанавливалась по результатам компьютерного моделирования процесса течения металла в штампе при штамповке в программе *DEFORM-3D*. Расчет производился для случая использования в качестве материала заготовки стали 110Г13Л, механические свойства которой при повышенных температурах представлены зависимостью, описанной в работе [95], и нашедшей успешное применение при разработке высоко износостойких дробящих плит щековой дробилки [51].

Объектом анализа являлось распределение интенсивности пластической деформации ε металла по сечению поковки, получаемой при использовании при штамповке заготовки той или иной возможной конфигурации. При этом оказалось, что необходимое распределение ε – повышенная интенсивность деформации металла нижней части зуба при практически недеформированном металле его верхней части – достигается для защищенной патентом [70]

конфигурации заготовки, отличающейся трапецевидным видом своей нижней стороны (рисунок 4.2).

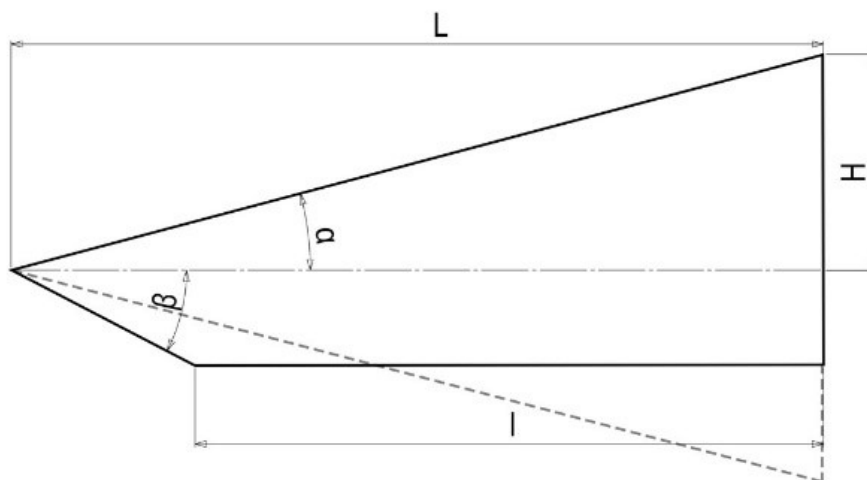
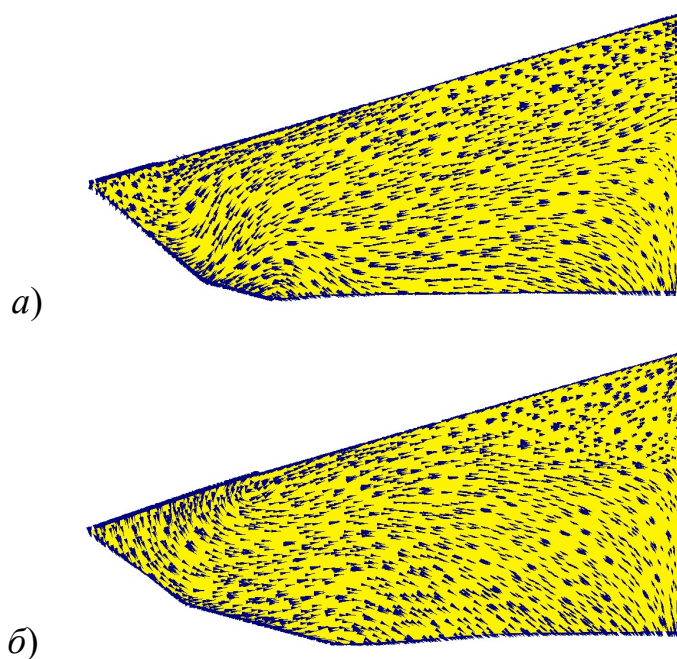


Рисунок 4.2 – Геометрия заготовки, обеспечивающая при штамповке повышенный уровень пластической деформации металла нижней части зуба:

L – длина зуба, H – $\frac{1}{2}$ от его высоты, α – $\frac{1}{2}$ от угла заострения зуба, β – острый угол прямоугольной трапеции, l – длина малого её основания

Течение металла в процессе штамповки заготовки такой конфигурации иллюстрирует рисунок 4.3.



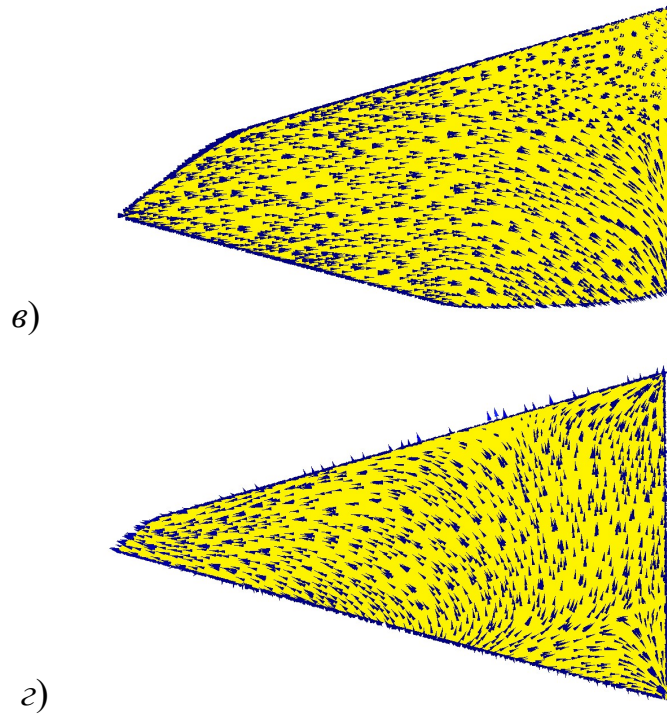


Рисунок 4.2 – Течение металла в предполагаемой заготовке в процессе её штамповки на различных временных этапах: (а) 0,2 с, (б) 0,4 с, (в) 0,6 с, (г) 0,9 с.

Как показали результаты компьютерного моделирования, основным регламентирующим параметром, определяющим величину интенсивности пластической деформации металла нижней части поковки коронки при использовании указанной трапециевидной заготовки, является острый угол прямоугольной трапеции β (рисунок 4.2), который для достижения необходимой величины ε должен соотноситься с углом заострения зуба α , как:

$$\beta = (2,0 - 2,7) \cdot \alpha, \quad (4.1)$$

где α – половина величины угла заострения зуба, град.

При этом, точное значение угла β рассчитывается при подстановке в модель геометрических размеров зуба.

Помимо угла β сохранение равной величины объема металла нижней и верхней поверхности регламентируются величиной длины l , определяемой по формуле (4.2):

$$l = \sqrt{L^2 - \frac{H \cdot L}{\tan \beta} \cdot k_{\text{обл}}}, \quad (4.2)$$

где $k_{обл}$ – коэффициент, учитывающий компенсацию металла от потерь при штамповке:

$$k_{обл} = 0,005 \cdot \beta + 0,75 \quad (4.3)$$

Рисунки 4.4 - 4.5 иллюстрируют распределение интенсивности пластической деформации металла по сечению поковки коронки зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А ($L = 525$ мм, $H = 292$ мм, $\alpha = 30^\circ$) при использовании заготовок с углом $\beta = 35^\circ$ и $\beta = 40^\circ$, как находящимися в нужном интервале.

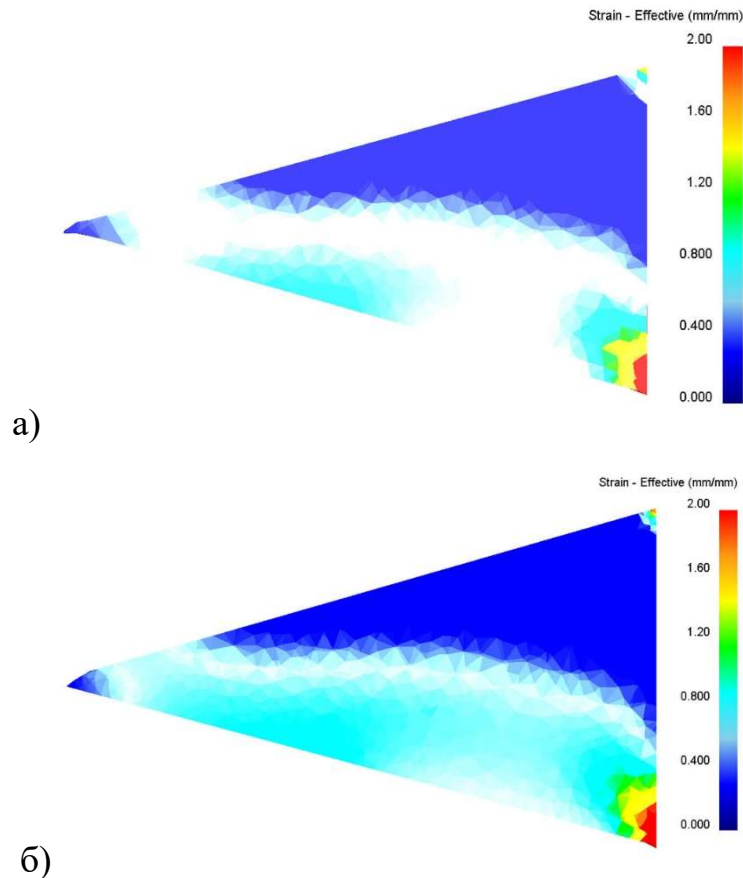


Рисунок 4.4 – Распределение интенсивности пластической деформации металла в сечении поковки зуба при использовании заготовок с с величиной угла $\beta = 35^\circ$ (а) и $\beta = 40^\circ$ (б)

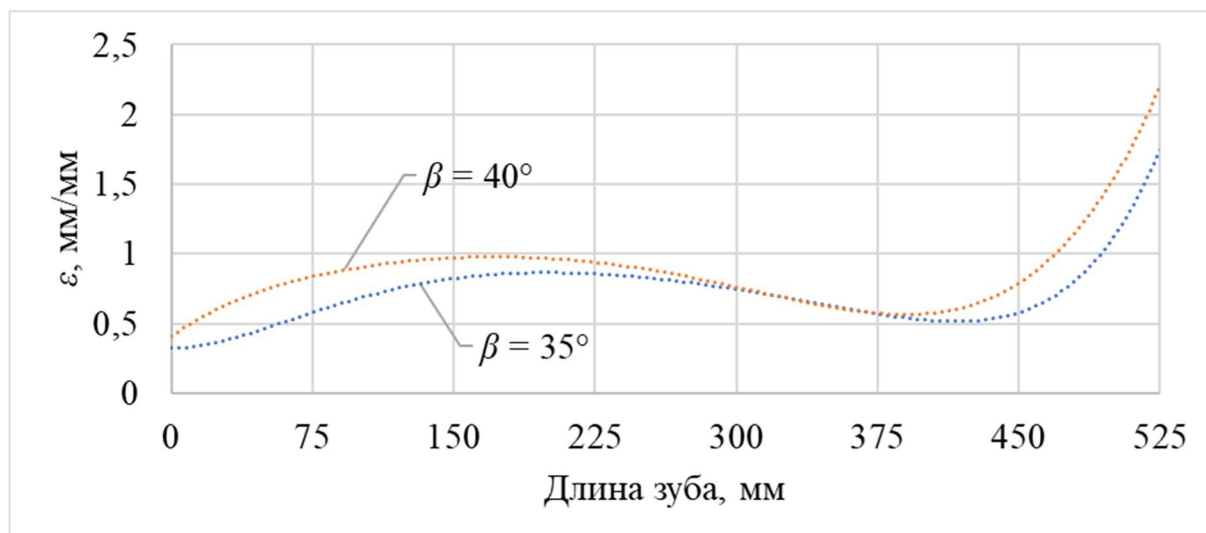


Рисунок 4.5 – Распределение интенсивности пластической деформации металла по длине нижней поверхности зуба в зависимости от угла β использованных заготовок

Как видно из рисунков, среднее значение ε металла поверхностного слоя нижней части поковки зуба, полученной из заготовки с углом $\beta = 35^\circ$, имеет порядок $\sim 0,7$, в то время как, при $\beta = 40^\circ$, около $0,82$, что удовлетворяет поставленной задаче.

4.2 Основные этапы термомеханической обработки и используемое оборудование

Исходя из установленной по результатам компьютерного моделирования конфигурации заготовки, изготавливается ее модель, по которой из выбранного материала зуба отливается необходимая отливка заготовки.

Полученная заготовка помещается в печь на время ($t_{\text{наг}}$, ч), рассчитываемое, исходя геометрических размеров заготовки и использованного материала, по формуле Доброхотова [82]:

$$t_{\text{наг}} = k_{\text{ст}} \cdot D^{1.5}, \quad (4.4)$$

где D – высота заготовки, м;

$k_{\text{ст}}$ – коэффициент, зависящий от используемой в заготовке стали ($k_{\text{ст}} = 10$ для углеродистых и $k_{\text{ст}} = 20$ – легированных сталей).

После нагрева до необходимой температуры (T_n), соответствующей температурековки выбранной стали и выдержке в печи, заготовка переносится на ковочный пресс или в штамповочную машину, где после штамповки приобретает очертания готового изделия – коронки. Полученная поковка коронки сразу же подвергается закалке в охлаждающей жидкости (воде), а затем, для снятия остаточных напряжений, низкому отпуску при температуре 150-200°С на протяжении времени ($t_{но}$), рассчитываемого по формуле:

$$t_{но} = 10 + d, \quad (4.5)$$

где d – время выдержки равное высоте поковки, выраженной в мм, мин.

Далее коронка подвергается визуальному осмотру и ультразвуковой дефектоскопии на наличие дефектов, при отсутствии которых считается готовой к работе.

Мощность штамповочного оборудования выбирается относительно усилия, необходимого для штамповки, которое устанавливается на основании результатов компьютерного моделирования или, исходя из табличных эмпирических данных о соотношении необходимого усилия при штамповке с площадью сечения деформируемой заготовки и прочностными свойствами ее материала.

На рисунке 4.6, в качестве примера, приведена установленная в результате компьютерного моделирования временная зависимость усилия, развиваемого при штамповке коронки зуба коронки ковш экскаватора ЭКГ-5А ($L = 525$ мм, $H = 292$ мм, $\alpha = 30^\circ$). Откуда видно, что максимальное значение усилий при выполнении штамповочной операции составляет ~ 8,5 МН. Для создания такого усилия предлагается использовать горячештамповочный кривошипный пресс модели КД8040 или КБ8040, способный создавать усилие до 10 МН [37].

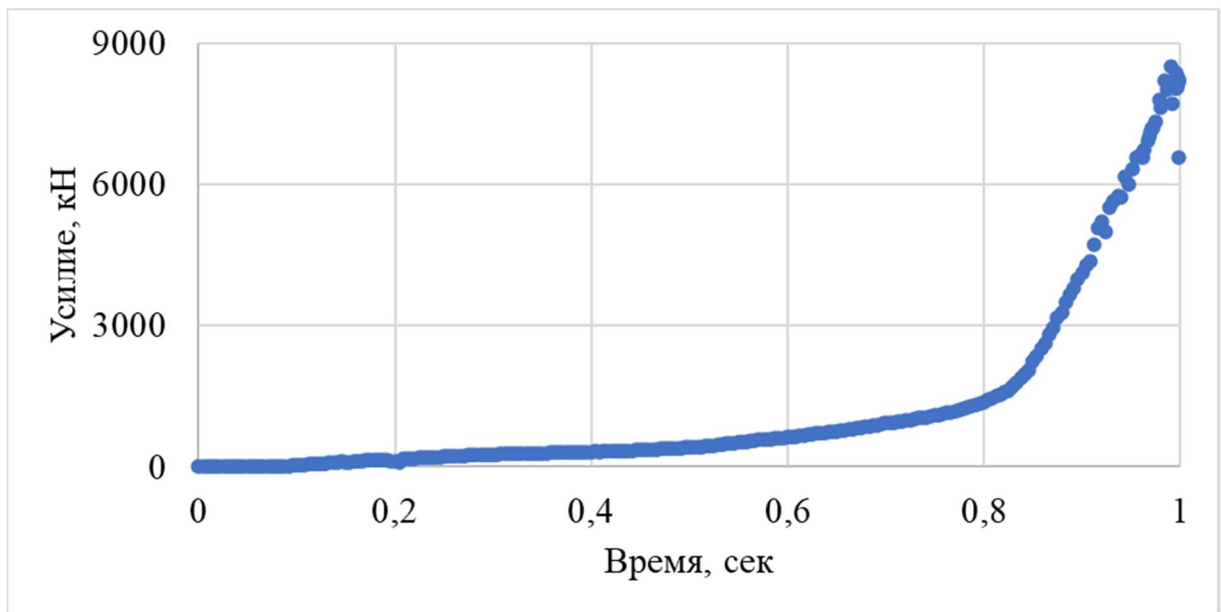


Рисунок 4.6 – Установленная компьютерным моделированием зависимость усилий от времени при штамповке коронки зуба коронки зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А

4.2 Оценка энергоемкости процесса экскавации при использовании модифицированного зуба ковша экскаватора

Для оценки изменения энергоемкости процесса экскавации при переходе от штатных к модифицированным зубьям – коронкам, полученным с использованием ВТМО – создавались их трехмерные модели с профилем (рисунок 4.7), установленным в предположении, что изменение длины модифицированного зуба в зависимости от объема экскавируемой взорванной скальной массы такое же, как и штатного зуба (рисунок 3.13), но в процессе экскавации зуб сохраняет симметричность своей формы, т.е. «самозатачивается».

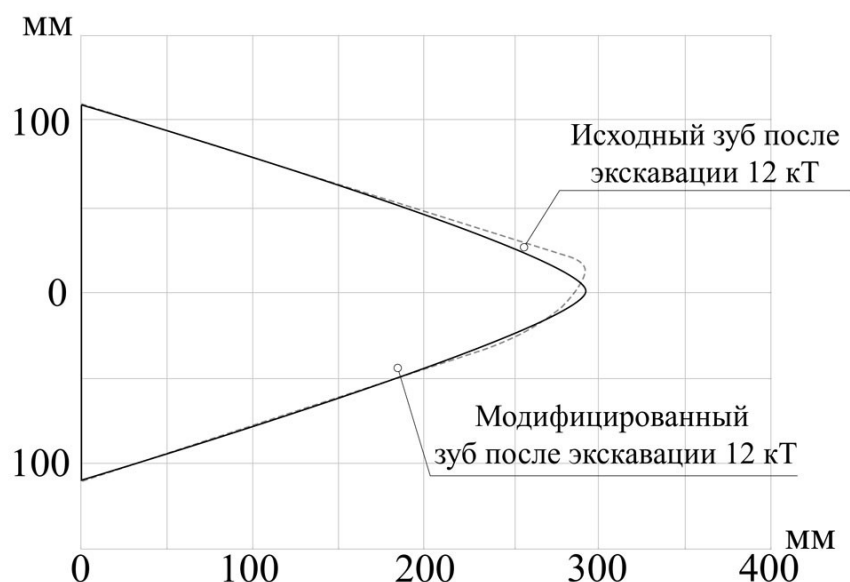


Рисунок 4.7 – Изменение профиля головной части исходного и модифицированного зубьев ковша экскаватора ЭКГ-5А после экскавации 12000 тонн горной массы

Полученные модели импортировались в математическую модель с параметрами внешней среды и граничными условиями, идентичными использованным при расчете силового взаимодействия с породой штатных зубьев (п. 2.5), с использованием которой рассчитывались усилия, развиваемые при экскавации взорванной горной массы при использовании зуба каждой анализируемой конфигурации.

Согласно полученным результатам (рисунок 4.8) при использовании зубьев, изготовленных по усовершенствованному технологическому процессу, как сохраняющих симметричность своей формы в процессе эксплуатации (подвергающихся «самозатачиванию»), сила сопротивления породы экскавации снижается в 1,4 раза по сравнению с применением зубьев, изготовленных по принятой технологии.

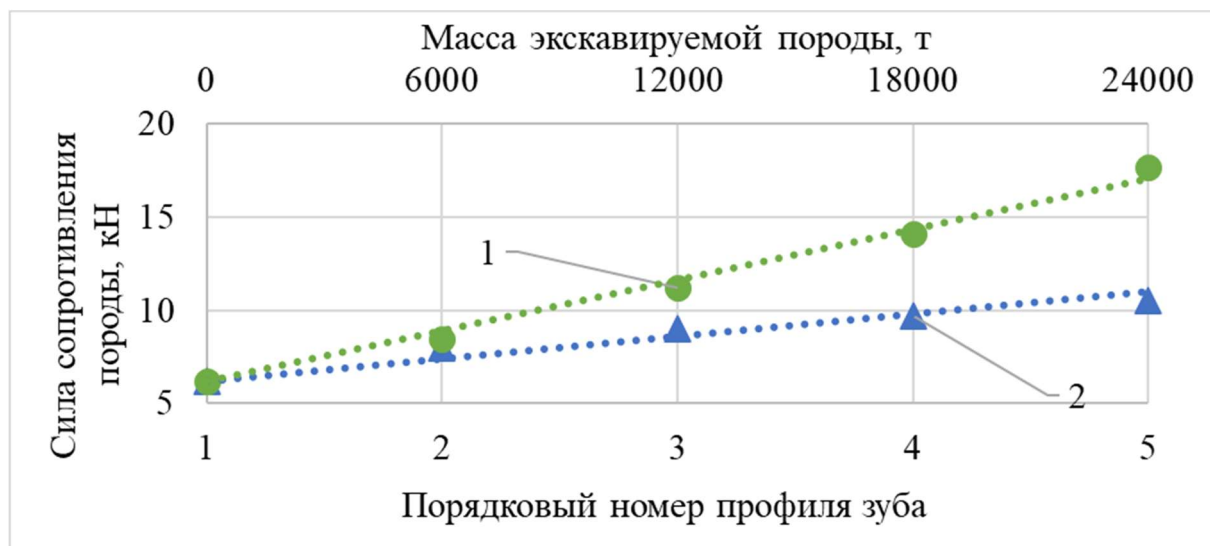


Рисунок 4.8 – Зависимость сопротивления породы при выемке взорванной горной массы экскаватором ЭКГ-5А при использовании зубьев, изготовленных по принятому (1) и усовершенствованному (2) технологическому процессам

При этом, как показали расчеты, проведенные по формулам (2.2-2.4) на основании полученных значений силы сопротивления породы экскавации, применение использования модифицированных зубьев в 1,3 раза снижает энергоемкость процесса выемки взорванной горной массы: с 0,13 (кВт·ч)/м³ до 0,097 (кВт·ч)/м³ для полностью изношенного зуба (рисунок 4.9).

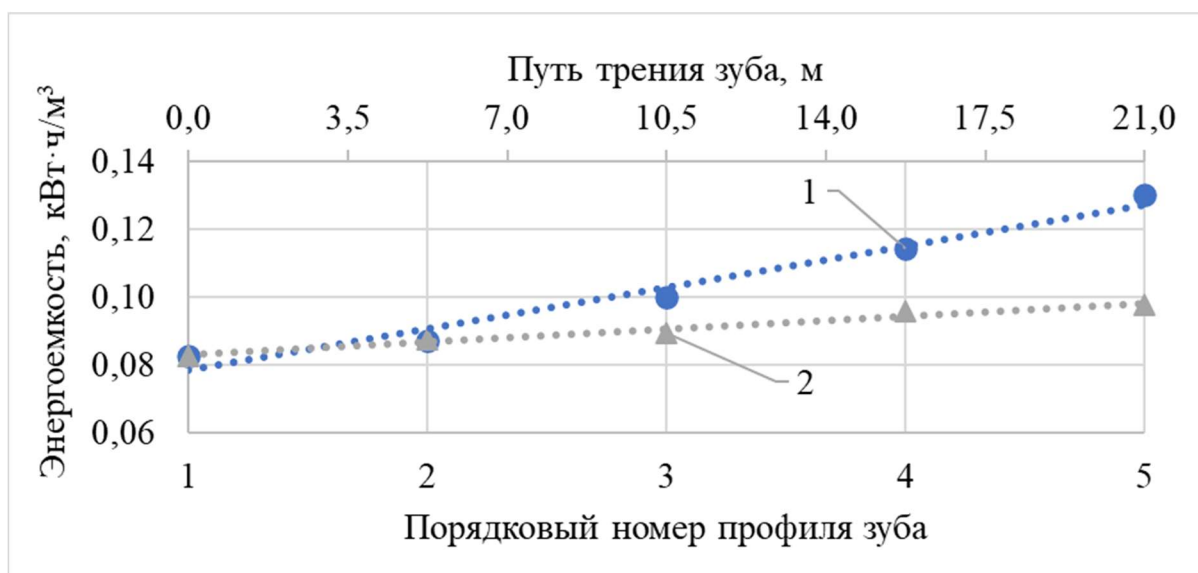


Рисунок 4.9 – Энергоемкость процесса экскавации при использовании зубьев, изготовленных по принятому (1) и усовершенствованному (2) технологическим процессам

Таким образом, доказано, что потерю симметрии зуба ковша экскаватора типа ЭКГ, возникающую из-за более интенсивного изнашивания его нижней части, и как следствие, возрастание усилий сопротивления породы экскавации, можно предотвратить заданным повышением износостойкости металла нижней части зуба. Благодаря этому, как нижняя, так и верхняя поверхности зуба будут изнашиваться с одинаковой интенсивностью, что будет обеспечивать сохранение симметричной формы зуба в процессе эксплуатации, т.е. эффект его «самозатачивания». Повышение износостойкости металла нижней части зуба достигается усовершенствованием технологического процесса изготовления зуба, при котором зуб изготавливается в виде составной конструкции. При таком использовании, головная, наиболее быстро изнашиваемая съемная часть зуба – коронка, изготавливается методом высокотемпературной пластической деформации металла (горячей штамповкой) с последующей закалкой, т. е. с применением высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО). Получение коронки с разной степенью износостойкости металла ее нижней и верхней частей, для ее последующей закалки в процессе ВТМО, достигается использованием при её штамповке заготовки необходимой конфигурации, при которой течение металла происходит по траектории, обеспечивающей получение металлом нижней части коронки заданный повышенный уровень интенсивности пластической деформации и, как следствие, твердости и износостойкости.

Сохранение зубьями в процессе эксплуатации симметричности формы, т. е. обеспечение эффекта их «самозатачивания», будет способствовать снижению до 1,4 раз силы сопротивления породы экскавации и до 1,3 раз энергоемкости процесса выемки взорванной горной массы по сравнению с зубьями, изготовленными по принятой технологии.

4.3 Выводы по главе 4

1. Предложено усовершенствование технологического процесса изготовления зубьев ковша экскаватора, заключающееся в изготовлении зуба

в виде составной конструкции, у которой головная, наиболее быстро изнашиваемая съемная часть – коронка, изготавливается методом высокотемпературной пластической деформации металла (горячей штамповкой) с последующей закалкой, т. е. высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО), что, при использовании при штамповке заготовки необходимой конфигурации, обеспечивает повышение износостойкости, преимущественно, металла нижней части коронки и, как следствие, эффект ее «самозатачивания».

2. По результатам математического моделирования процесса течения материала зуба стали 110Г13Л в штампе, проведенного в программе *DEFORM-3D*, установлена необходимая конфигурация заготовки, защищенная патентом, при которой течение металла при штамповке коронки происходит по траектории, обеспечивающей получение металлом нижней ее части заданный повышенный уровень интенсивности пластической деформации и, как следствие, твердости и износостойкости.

3. В соответствии с результатами имитационного компьютерного моделирования процесса силового взаимодействия зуба ковша экскаватора с кусками взорванной скальной породы установлено, что сохранение зубьями в процессе эксплуатации симметричности формы, т. е. обеспечение эффекта их «самозатачивания», будет способствовать снижению до 1,4 раз силы сопротивления породы экскавации и до 1,3 раз энергоемкости процесса выемки взорванной горной массы по сравнению с зубьями, изготовленными по принятой технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи совершенствования технологического процесса изготовления зубьев ковша экскаватора типа ЭКГ с целью снижения энергоемкости процесса выемки взорванной горной массы, что имеет существенное значение для развития горнодобывающей промышленности.

Основные научные результаты и практические рекомендации отражены в следующих выводах:

1. На основе проведенного анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований определено, что на энергоемкость процесса экскавации взорванной горной массы существенное влияние оказывает изменение первоначального геометрического профиля зуба, заключающееся в потере симметричности его формы и образовании площадки притупления на нижней поверхности.

2. Имитационным моделированием процесса силового взаимодействия зуба ковша экскаватора с взорванной горной массой показано, что причиной потери симметричности его формы, способствующей повышению до 3 раз сопротивлению породы экскавации, является различие в преобладающем направлении воздействия кусков породы на зуб – по нормали к верхней и касательно, относительно нижней поверхности, что определяет существенно более интенсивное изнашивание нижней поверхности зуба.

3. При проведении лабораторных исследований на разработанном экспериментальном стенде в условиях, моделирующих процесс абразивного изнашивания зубьев при выемке взорванной горной массы, установлено, что высокотемпературная термомеханическая обработка материала зубьев до 1,4 раз повышает их износостойкость.

4. Разработаны рекомендации по совершенствованию технологического процесса изготовления зубьев ковша экскаватора типа ЭКГ, заключающиеся во внедрении в процесс операции высокотемпературной термомеханической обработки с использованием устанавливаемой по результатам компьютерного

моделирования конфигурации заготовки, обеспечивающей при штамповке заданную интенсивность деформации металла нижней части зуба, что обуславливает при выемке взорванной горной массы эффект «самозатачивания» зуба, способствующий уменьшению до 1,3 раз энергоемкости процесса экскавации.

Дальнейшее развитие темы диссертационного исследования может быть связано с внедрением метода высокотемпературной обработки давлением в производство других быстроизнашиваемых элементов горнодобывающего оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрюшенков, Д. Н. Обоснование и выбор основных параметров карьерной погрузочно-транспортной машины : дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Д. Н. Андрюшенков. – Екатеринбург, 2015. – 127 с.
2. Барон, Л.И. Коэффициенты крепости горных пород / Л.И. Барон. – М. : Изд-во «Наука», 1972. – 176 с.
3. Басов, К.А. ANSYS для конструкторов / К.А. Басов. – М. : МДК Пресс, 2009. – 248 с.
4. Боголюбов, Б.П. Горные машины / Б.П. Боголюбов, Б.П. Юматов. – Москва : Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1958. – 486 с.
5. Болобов, В.И. Влияние формы зубьев ковша на энергию затрачиваемую экскаватором при работе по крупнокусковым горным породам / В.И. Болобов, **Э.В. Ахмеров**, И.В. Ракитин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 17-1. – С. 179-185.
6. Болобов, В.И. О влиянии упрочняющей обработки материала футеровки шаровых мельниц на его износостойкость / В.И. Болобов, В.С. Бочков // Горный журнал. – 2017. – № 1. – С. 57-60.
7. Болобов, В.И. Влияние изменения формы зубьев ковша экскаватора в процессе экскавации разрушенных гранитных пород на потребляемую им мощность / В.И. Болобов, И.В. Ракитин, **Э.В. Ахмеров** // Нанозифика и наноматериалы: Сборник научных трудов международного семинара. – 2020. – С. 307-314.
8. Болобов, В.И. Влияние вида упрочняющей обработки на износостойкость материалов горного оборудования / В.И. Болобов, С.А. Чупин // Записки Горного института. – Т. 216. – С. 44-49.
9. Болховитинов, Н.Ф. Металловедение и термическая обработка / Н.Ф. Болховитинов. – изд. 6-е доп. и перераб. – М. : Машиностроение, 1965. – 504 с.

10. Бритарев, В.А. Горные машины и комплексы. Учебное пособие для техникумов. / В.А. Бритарев, В.Ф. Замышляев. – М. : Недра, 1984. – 288 с.
11. Бусарев, А.С. Проблема выхода негабарита и пути его снижения на примере Исетского щебёночного завода / А.С. Бусарев, Р.В. Кокунин // Материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов, Екатеринбург. – 2009. – С. 96-98.
12. Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю.А. Ветров. – М. : Машиностроение, 1971. – 357 с.
13. Виноградов, В.Н. Абразивное изнашивание бурильного инструмента / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин. – М. : Недра, 1980. – 206 с.
14. Виноградов, В.Н. Абразивное изнашивание / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, М.Г. Колокольников. – М. : Машиностроение, 1990. – 351 с.
15. ГОСТ 3.1109-82 - Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий – М. : Стандартинформ, 2012. – 15 с.
16. ГОСТ 1412-85 - Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки – М. : ИПК Издательство стандартов, 2004. – 5 с.
17. ГОСТ 7293-85 - Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки – 3 с.
18. ГОСТ 17367-71 - Металлы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы – М.: ИПК Издательство стандартов, 1974. – 7 с.
19. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М. : Metallurgy, 1986. – 544 с.
20. Демин, А.М. Разработка рудных месторождений открытым способом / А.М. Демин, К.Н. Трубецкой, В.И. Зуев. – М. : Изд-во «Недра», 1970. – 216 с.
21. Домбровский, Н.Г. Землеройно-транспортные машины / Н.Г. Домбровский, М.И. Гальперин. – М. : Издательство «Машиностроение», 1965. – 276 с.

22. Домбровский, Н.Г. Строительные машины : Учебник для вузов. В 2-ух ч. Ч. 2-я / Н.Г. Домбровский, М.И. Гальперин. – М. : Высш. шк., 1985. – 224 с.
23. Домбровский, Н.Г. Строительные машины : Учебник для вузов. В 2-ух ч. Ч. 1-я / Н.Г. Домбровский, Ю.Л. Картвелишвили, М.И. Гальперин. – М. : Машиностроение, 1976. – 391 с.
24. Драгобецкий, В.В. Упрочнение зубьев ковшей экскаваторов с использованием пластической деформации взрывом / В.В. Драгобецкий, А.А. Шаповал, Д.В. Мосьпан // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – № 2. – С. 38-42.
25. Дроздова, Л.Г. Одноковшовые экскаваторы: конструкция, монтаж и ремонт : Учебное пособие / Л.Г. Дроздова, О.А. Курбатова. – Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2007. – 235 с.
26. Ельцов, В.В. Восстановление и упрочнение деталей машин : Электронное учеб. пособие / В.В. Ельцов. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. – 335 с.
27. Ефимов, В.Н. Карьерные экскаваторы : Справочник рабочего / В.Н. Ефимов, В.Н. Цветков, Е.М. Садовников. – М. : Недра, 1994. – 381 с.
28. Железные руды России. – URL: <https://clck.ru/iK7TE> (дата обращения: 22.05.2023). – Текст : электронный.
29. Зенкевич, О.Ц. Метод конечных элементов в технике / О.Ц. Зенкевич. – М. : Изд-во «Мир», 1975. – 541 с.
30. Износостойкая и защитная сталь MIILUX. – URL: https://emk24.ru/wiki/spetsialnye_stali/iznosostoykie-stali-miilux_8710245/ (дата обращения: 05.03.2023). – Текст : электронный.
31. Износостойкая сталь MIILUX. – URL: <http://wearparts.ru/miilux/> (дата обращения: 05.03.2023). – Текст : электронный.
32. Инженерный анализ в ANSYS Workbench : Учеб. пособ. / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, [и др.]. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т., 2010. – 271 с.

33. Исследование механизмов абразивного и ударно-абразивного изнашивания высокомарганцевой стали / В.М. Колокольцев, К.Н. Вдовин, В.П. Чернов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2017. – Т. 15. – № 2. – С. 54-62.
34. Кадошников, В.И. Разработка и внедрение защитных элементов навесного оборудования карьерной техники / В.И. Кадошников, В.И. Новиков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2016. – Т. 1. – С. 16-19.
35. Карьерные экскаваторы типа ЭКГ-5А - Ковш и зубья производства корпорации ESCO. – URL: <https://www.uzgm.ru/optsii/predlozheniya-esco/kovsh-esco/> (дата обращения: 04.05.2023). – Текст : электронный.
36. Карьерные экскаваторы типа ЭКГ-5А - Система зубьев SV2. – URL: <https://www.uzgm.ru/optsii/predlozheniya-esco/sistema-zubev/> (дата обращения: 04.05.2023). – Текст : электронный.
37. Ковка и штамповка. Справочник : Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка : в 4 т. Т. 1 / ред. Е.И. Семенов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2010. – 717 с.
38. Колганов, В.Ф. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии / В.Ф. Колганов, А.Н. Акишев, А.В. Дроздов. – Мирный : Мирнинская типография, 2013. – 568 с.
39. Комаров, О.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебник / О.С. Комаров, В.Н. Ковалевский, Л.Ф. Керженцева. – 3-е изд., испр. и доп. – Минск : Новое знание, 2009. – 671 с.
40. Комаров, О.С. Технология конструкционных материалов : учебник / О.С. Комаров, В.Н. Ковалевский, Л.Ф. Керженцева. – 2-е изд., испр. – Минск : Новое знание, 2007. – 567 с.
41. Комиссаров, А.П. Сравнительная оценка энергетических характеристик карьерных экскаваторов / А.П. Комиссаров, Ю.А. Лагунова, В.С. Шестаков // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – № 2. – С. 14-16.

42. Комиссаров, А.П. Методика экспресс анализа энергопотребления при экскавации горных пород / А.П. Комиссаров, П.А. Побегайло, В.С. Шестаков // Горный Информационно-Аналитический Бюллетень (научно-Технический Журнал). – 2014. – № 12. – С. 138-141.
43. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
44. Красникова, Т.И. Обоснование и выбор рациональных параметров эксплуатации экскаваторов цикличного действия : дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Т.И. Красникова. – Екатеринбург, 2012. – 129 с.
45. Кроха, В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации / В.А. Кроха. – М. : Машиностроение, 1968. – 131 с.
46. Лаптев, В.В. Численное моделирование потока раздробленной горной массы в процессе выпуска руды с использованием программы ROCKY DEM / В.В. Лаптев // Вестник МГТУ. – 2019. – Т. 22. – № 1. – С. 149-157.
47. Лахтин, Ю.М. Материаловедение : Учебник для высших технических учебных заведений / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.
48. Макушенко, А.В. Разработка наплавочного сплава и технологии упрочнения зубьев ковшей карьерных экскаваторов : дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / А.В. Макушенко. – Курск, 2008. – 132 с.
49. Машиностроение. Энциклопедический справочник. Конструирование машин : в 19 т. Т. 9 / ред. М.А. Саверин. – Москва : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1949.
50. Методы испытания на трение и износ : Справ. изд. / Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева, А.Г. Колмаков, Л.М. Рыбакова. – М. : Интермет Инжиниринг, 2001. – 152 с.
51. Мишин, И.И. Совершенствование технологического процесса изготовления дробящих плит щековой дробилки для повышения их

износостойкости при дроблении гранита : дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / И.И. Мишин. – Санкт-Петербург, 2019. – 162 с.

52. Норильский дивизион. – URL: <https://www.nornickel.ru> (дата обращения: 23.04.2023). – Текст : электронный.

53. О влиянии поверхностного упрочнения на ударно-абразивную износостойкость стали Гадфильда / В.И. Болобов, В.С. Бочков, Э.В. Ахмеров [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – № 6. – С. 252-255.

54. Определение энергоемкости процесса экскавации рабочим оборудованием типа прямая лопата карьерного экскаватора / А.П. Комиссаров, Н.С. Плотников, О.А. Лукашук, К.Ю. Летнев // Известия вузов. Горный журнал. – № 1. – С. 112-118.

55. Открытые горные работы - XXI век. Т. 1 / ред. К.Ю. Анистратов. – Москва : Система максимум, 2019. – 640 с.

56. Открытые горные работы: справочник. Открытые горные работы / ред. К.Н. Трубецкой. – М. : Горное бюро, 1994. – 621 с.

57. Патент № 192081 СССР, Е 02 F 9/28 Зуб ковша экскаватора: № 824415/29-14 : заявлено : 11.03.1963 : опубликовано : 26.01.1967 / Чукмасов С.Ф., Бабченко С.Л. – 3 с.

58. Патент № 200311 Российская Федерация, E02F 9/28 (2020.08), E02F 9/2808 (2020.08) Зуб ковша экскаватора: № 2020113147 : заявлено : 26.03.2020 : опубликовано : 16.10.2020 / Овсянников В.Е., Васильев В.И. – 4 с.

59. Патент № 209115 Российская Федерация, E02F9/28 Зуб ковша усиленный: № 2021124870 : заявлено : 20.08.2021 : опубликовано : 02.02.2022 заявитель АО «Гортехмаш-Заводы». – 14 с.

60. Патент № 608894 СССР, Е 02 F9/28 Зуб ковша экскаватора: № 1862755/29-03 : заявлено : 27.12.1972 : опубликовано : 30.05.1978 / Ципурский В.Л. ; заявитель Московский ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный институт им. В. В. Куйбышева. – 2 с.

61. Патент № 1033773 СССР, E02F9/28 Зуб ковша экскаватора: № 3423512 : заявлено : 15.04.1982 : опубликовано : 07.08.1983 / Лиханский В.С.

[и др.]; заявитель Днепропетровский ордена Трудового Красного Знамени металлургический институт – 3 с.

62. Патент № 1435719 СССР, E02F9/28 (EP), E02F9/2858 (EP); Зуб ковша экскаватора: № 4236059: заявлено: 04.03.1987: опубликовано: 07.11.1987 / Берман А.В. [и др.]; заявитель Институт горного дела им. А.А. Скочинского. – 4 с.

63. Патент № 2048255 Российская Федерация МПК В 22 D 27/04, В 22 D 27/04 Способ отливки зубьев экскаватора: № 5066434/02: заявлено: 10.08.1992: опубликовано: 20.11.1995 / Аптекарь Н.М. [и др.] – 5 с.

64. Патент № 2107779 Российская Федерация, E02F 9/28 (1995.01) Зуб ковша экскаватора: № 96111671/03: заявлено: 14.06.1996: опубликовано: 27.03.1998 / Сычев К.К., Ершов Г.У., Ивочкин В.А. – 3 с.

65. Патент № 2116406 Российская Федерация, E02F9/28 Режущая кромка ковша экскаватора: № 97103100/03: заявлено: 25.02.1997: опубликовано: 27.07.1998 / Соболев В.Ф., Кудинов С.Я.; заявитель ЗАО «Ферро Балт Плюс». – 6 с.

66. Патент № 2184814 Российская Федерация, E02F9/28 Зуб ковша экскаватора: № 2001103883/03: заявлено: 13.02.2001: опубликовано: 10.07.2002 / Соколов Г.А, Чернышев С.В. – 5 с.

67. Патент № 2228409 Российская Федерация, E02F 9/28 Способ изготовления зуба землеройной машины: № 2002128952/03: заявлено: 29.10.2002: опубликовано: 10.05.2004 / Сладкова Л.А. [и др.]; заявитель Военно-технический университет при Федеральной службе специального строительства Российской Федерации. – 4 с.

68. Патент № 2269628 Российская Федерация, E02F 9/28 (2006.01) Зуб ковша экскаватора и способ его изготовления: № 2003134867/03: заявлено: 01.12.2003: опубликовано: 10.02.2006 / Балашов В.Ф., Каджая Г.В., Каджая О.Г. – 7 с.

69. Патент № 2679152 Российская Федерация, E02F9/28 (2006.01) Зуб ковша карьерного экскаватора: № 2018103466: заявлено: 30.01.2018:

опубликовано : 06.02.2019 / Соколов Г.А, Липатов А.А., Рубина О.Ф. ;
заявитель ООО «ГМК». – 8 с.

70. Патент № 2779978 Российская Федерация, МПК E02F 9/28, B21J 5/02 Способ изготовления зуба ковша экскаватора: № 2022108356 : заявлено : 30.03.2022 : опубликовано : 16.09.2022 / Болобов В. И., **Ахмеров Э. В.**, Ракитин И. В. ; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 1-16 с.

71. Плащинский, В.А. Обоснование и выбор схемных и конструктивных решений устройства дробления негабаритов с увеличенной энергией удара : дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / В.А. Плащинский. – Санкт-Петербург, 2022. – 140 с.

72. Подэрни, Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ : Учебное пособие : в 2 т. Т. 1 / Р.Ю. Подэрни. – 4-е изд., стер. – М. : Издательство Московского государственного горного университета, 2001. – 422 с.

73. Подэрни, Р.Ю. Механическое оборудование карьеров : Учебник для вузов / Р.Ю. Подэрни. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательство Московского государственного горного университета, 2007. – 680 с.

74. Ракишев, Б.Р. Технологические комплексы открытых горных работ: Учебник / Б.Р. Ракишев. – Алматы, 2015. – 313 с.

75. Ржевская, С.В. Материаловедение : Учеб. для вузов / С.В. Ржевская. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Логос, 2004. – 424 с.

76. Рошин, М.Н. Лазерная наплавка износостойких покрытий / М.Н. Рошин // Машиностроение: инновационные аспекты развития : материалы II международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15 марта 2019 года. – 2019. – С. 13-16.

77. Саитов, В.И. Влияние грансостава забоя на количество отказов механизма напора экскаватора циклического действия / В.И. Саитов, Л.И. Андреева, Т.И. Красникова // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. – С. 1-9.

78. Сорокин, В.Г. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.
79. Справочник по машиностроительным материалам. Цветные металлы и их сплавы : в 4 т. Т. 2 / М.Ю. Бальшин, С.В. Виноградов, С.Г. Глазунов, [и др.]. – Москва : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1959. – 562 с.
80. Тененбаум, М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М.М. Тененбаум. – М. : Машиностроение, 1976. – 271 с.
81. Технический справочник железнодорожника : Обработка металлов на предприятиях железнодорожного транспорта : в 13 т. Т. 12 / В.А. Бравичев, Н.В. Бродович, В.И. Власов, [и др.]. – М. : Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1954. – 673 с.
82. Технология производства машин : Машиностроение. Энциклопедический справочник : в 13 т. Т. 7 / ред. Е.А. Чудаков. – М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1948. – 728 с.
83. УЗТМ-КАРТЭКС - Канатные экскаваторы - ЭКГ-5А. – URL: https://uralmash-kartex.ru/assets/gallery/Ekskavatoryi/Kariernue/%D0%AD%D0%9A%D0%93_5%D0%90.pdf (дата обращения: 27.05.2023). – Текст : электронный.
84. Управление запасами и качеством алмазородного сырья / А.Н. Акишев, И.Ф. Бондаренко, П.В. Васильев, С.С. Мининг; ред. В.П. Серов, А.Н. Черепнов. – Новосибирск : Издательство СО РАН, 2012. – 382 с.
85. Характеристики ЭКГ-5А . Обзор экскаватора карьерного гусеничного ЭКГ-5А. – URL: https://exkavator.ru/excapedia/technic/ekg-5a_omz (дата обращения: 27.05.2023). – Текст : электронный.
86. Хмызников, К.П. Механическое оборудование карьеров. Одноковшовые экскаваторы : Учебное пособие / К.П. Хмызников, Ю.В. Лыков. – СПб : Санкт-Петербургский горный институт (технический университет), 2007. – 41 с.

87. Хорошавин, С.А. Повышение эффективности карьерных одноковшовых экскаваторов за счет совершенствования рабочего оборудования : дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / С.А. Хорошавин. – Екатеринбург, 2015. – 155 с.

88. Хохряков, В.С. Открытая разработка месторождений полезных ископаемых / В.С. Хохряков. – 3-е, перераб. и доп. – М. : Недра, 1974. – 264 с.

89. Хромой, М.Р. Изнашивание вооружения ковша карьерного одноковшового экскаватора / М.Р. Хромой, В.П. Свиначук, П.В. Свиначук // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2010. – № 8. – С. 106-113.

90. Хрущов, М.М. Исследования изнашивания металлов / М.М. Хрущов, Бабичев М.А. – М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1960. – 351 с.

91. Хрущов, М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы (к 120-летию со дня рождения) / М.М. Хрущов; ред. И.Г. Горячева. – М. : КРАСАНД, 2012. – 512 с.

92. Чумаков, Н.Г. Материалы и технология машиностроения : Учебник для профессионально-технических училищ. / Н.Г. Чумаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1979. – 158 с.

93. Шибанов, Д.А. Комплексная оценка факторов, определяющих наработку экскаваторов ЭКГ-18Р/20К, для планирования технического обслуживания и ремонтов : дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Д.А. Шибанов. – Санкт-Петербург, 2015.

94. Экскаваторы на карьерах. Конструкции, эксплуатация, расчет / В.С. Квагинидзе, Г.И. Козовой, Ф.А. Чакветадзе, [и др.]. – М. : Издательство «Горная книга», 2011. – 409 с.

95. Bayraktar, E. Strain rate and temperature effect on the deformation behavior of the original hadfield steel / E. Bayraktar, C. Levailant, S. Altintas // Le Journal de Physique IV. – 1993. – Т. 03. – № С7. – С. С7-61-С7-66.

96. HARDOX 450. Спецификация. – URL: <https://hardwest.ru/steel/hardox-ssab/hardox-450/harakteristiki-stali-hardox-450/> (дата обращения: 05.03.2023). – Текст : электронный.
97. HARDOX 500. Спецификация. – URL: <https://hardwest.ru/steel/hardox-ssab/hardox-500/harakteristiki-stali-hardox-500/> (дата обращения: 05.03.2023). – Текст : электронный.
98. MIILUX® износостойкие стали карта продукта. – URL: https://miilux.pl/wp-content/uploads/2021/06/karta_trudnoscieralne_A4_RU_190521.pdf (дата обращения: 05.03.2023). – Текст : электронный.
99. Патент № 1091740 Великобритания, E 02 F 9/28 Excavator bucket digging tooth: № 5339465 : заявлено : 16.12.1965 : опубликовано : 22.11.1967 / Chukmasov S.F., Babchenko S.L. ; заявитель DN METALL INST. – 3 с.
100. Патент № 6156391A США, C23C30/00; C23C4/04; (IPC1-7): C23C4/06; Process for hard facing a metallic substrate to improve wear resistance: № 33239899 : заявлено : 14.06.1999 : опубликовано : 05.12.2000 / Shum William Y, Bailey Lynn C ; заявитель Rankin IND INC – 4 с.
101. Патент № 100667190 Южная Корея, E02F3/36, E02F3/40, B60R16/06, H05F1/00 Method of producing tooth point for tooth of excavator bucket: № 20050056105 : заявлено : 28.06.2005 : опубликовано : 12.01.2007 / Kwon Wyoung Ho – 6 с.
102. Патент № 104002099 Китай, B23P15/00 Manufacturing process for excavator bucket teeth: № 201410181692 : заявлено : 30.04.2014 : опубликовано : 27.08.2014 / Xu Yangshun ; заявитель Anhui Tuoshan Heavy Machinery CO LTD – 4 с.
103. Патент № 106270328 Китай, B21J13/02, B21J5/02 Multi-directional controllable distribution forging forming method for excavator bucket teeth: № 201610706317 : заявлено : 23.08.2016 : опубликовано : 04.01.2017 / Liu Hua [et al.] ; заявитель Zhengzhou Res Inst Mech Eng – 10 с.

104. Патент № 106311945 Китай, B21J13/02, B21J5/02, B21K5/12, Forging machining technology of excavator bucket tooth: № 201510392993 : заявлено : 07.07.2015 : опубликовано : 11.01.2017 / Zhong Minghui ; заявитель Hubei Leihan Forges CO LTD – 7 с.

105. Патент № 107570649 Китай, B21J13/02 Bucket tooth forging die for excavator: № 201610520930 : заявлено : 05.07.2015 : опубликовано : 12.01.2018 / Lyu Rongchang ; заявитель Tianjin Custer Machinery CO LTD – 5 с.

106. Патент № 107663614 Китай, Preparation method of bucket tooth of excavator: № 201710720554 : заявлено : 21.08.2017 : опубликовано : 06.02.2018 / Wu Hailing [et al.] ; заявитель Liuzhou Keerte Forging Machinery CO LTD – 4 с.

107. Патент № 111576531 Китай, E02F9/00, E02F9/28 Bucket mechanism with wear-resistant bucket tooth structure and excavator: № 202010133737 : заявлено : 02.03.2020 : опубликовано : 25.08.2020 / Wang Jintao [et al.] ; заявитель XCMG Excavator Machinery CO – 5 с.

108. Патент № 20100065887 Южная Корея, B21J5/02, B21K5/00, E02F9/28 A tooth for bucket of excavator and a manufacturing method therefor: № 20080124469 : заявлено : 09.12.2008 : опубликовано : 17.06.2010 / Lee Geum Sang – 7 с.

109. Akhil Prasad, S. Stress Analysis and Design Validation of Chute using DEM Software / S. Akhil Prasad // International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology. – 2020. – № 7 (4). – P. 68-72.

110. ASTM G132-96(2018) - Standard test method for pin abrasion testing.

111. Bolobov, V.I. Influence of rock type on regularities of excavator bucket tooth crown wear / V.I. Bolobov, **E.V. Akhmerov**, I.V. Rakitin // MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2022. – № 6-2. – P. 189-204.

112. Comparative wear resistance of existing and prospective materials of fast-wearing elements of mining equipment / V.I. Bolobov, S.A. Chupin, **E.V. Akhmerov**, V.A. Plaschinskiy // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1040. – P. 117-123.

113. DEM Technical Manual : ESSS Rocky. – S.R.L., 2021. – 115 p.

114. El-Emam, M.A. CFD-DEM simulation and optimization of gas-cyclone performance with realistic macroscopic particulate matter / M.A. El-Emam, W. Shi, L. Zhou // *Advanced Powder Technology*. – 2019. – Vol. 30. – № 11. – P. 2686-2702.
115. Ilic, D. Development of design criteria for reducing wear in iron ore transfer chutes / D. Ilic // *Wear*. – 2019. – Vols. 434-435. – P. 202986.
116. Ilic, D. Transverse bulk solid behaviour during discharge from troughed belt conveyors / D. Ilic, C.A. Wheeler // *Advanced Powder Technology*. – 2017. – Vol. 28. – № 9. – P. 2410-2430.
117. Ilic, D. Measurement and simulation of the bulk solid load on a conveyor belt during transportation / D. Ilic, C.A. Wheeler // *Powder Technology*. – 2017. – Vol. 307. – P. 190-202.
118. Impact-abrasive wear of martensitic steels and complex iron-based hardfacing alloys / H. Rojacz, C. Katsich, M. Kirchgaßner [et al.] // *Wear*. – 2022. – Vols. 492-493. – P. 204183.
119. Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation / J.A. Hawk, R.D. Wilson, J.H. Tylczak, Ö.N. Doğan // *Wear*. – 1999. – Vols. 225-229. – Laboratory abrasive wear tests. – P. 1031-1042.
120. Modeling of the wet immersed tumbling process with the Discrete Element Method (DEM) / E. Uhlmann, J.-P. Fürstenau, Y. Kuche [et al.] // *Procedia CIRP*. – 2021. – Vol. 102. – P. 1-6.
121. Pre- and post-processing for the finite element method / S.E. Benzley, K. Merkley, T.D. Blacker, L. Schoof // *Finite Elements in Analysis and Design*. – 1995. – Vol. 19. – № 4. – P. 243-260.
122. Simulation of single particle breakage using non-round particles in rocky DEM / F. André, A. Potapov, C. Maliska, L. Tavares // *26th International Mining Congress and Mining Exhibition of Turkey*. – 2019. – P. 1-11.
123. Statistical Review of World Energy | Energy economics | Home. – URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (date accessed: 22.05.2023). – Text : electronic.

124. The effect of finely divided martensite of austenitic high manganese steel on the wear resistance of the excavator buckets teeth / V.I. Bolobov, S.A. Chupin, V.S. Bochkov, **E.V. Akhmerov** [et al.] // Key Engineering Materials. – 2020. – Vol. 854. – P. 3-9.

125. Theoretical study of pneumatic separation of sugarcane bagasse particles / E. De Almeida, N. Spogis, O. P. Taranto, M. A. Silva // Biomass and Bioenergy. – 2019. – Vol. 127. – P. 105256.

126. Wear modelling of soil ripper tine in sand and sandy clay by discrete element method / E. Katinas, R. Chotěborský, M. Linda, V. Jankauskas // Biosystems Engineering. – 2019. – Vol. 188. – P. 305-319.

127. What is the “typical” particle shape of active pharmaceutical ingredients? / W. Yu, L. Liao, R. Bharadwaj, B.C. Hancock // Powder Technology. – 2017. – Vol. 313. – P. 1-8.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов диссертационной работы



УТВЕРЖДАЮ

Главный конструктор

ООО «ИЗ-КАРТЭКС ИМЕНИ П.Г. Коробкова»

А.А. Емельянов

Дата «17» апреля 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации
АХМЕРОВА Эрика Викторовича
 по научной специальности 2.8.8 Геотехнология, горные машины

Комиссия (специальная) в составе:

Председатель: главный конструктор А.А. Емельянов;Члены комиссии: начальник конструкторского отдела С.А. Тихомиров, начальник отдела маркетинга, к.т.н. Т.В. Донченко

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Снижение энергоемкости процесса выемки взорванной горной массы использованием самозатачивающихся зубьев ковша экскаватора», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в производственной деятельности ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» при выполнении работ по оценке напряженно-деформированного состояния конструкции рабочего инструмента канатного экскаватора при работе по взорванной горной массе в виде:

– моделирование методом дискретных элементов процесса экскавации взорванной горной массы канатным экскаватором, позволяющим воссоздать реалистичное поведение кусков породы;

– изменение энергоемкости процесса работы экскаватора в зависимости от степени увеличения сопротивления породы экскавации.

Использование результатов диссертационной работы позволяет:

– повысить качество проектирования путем предварительной оценки внедряемых технологических решений при помощи методов математического моделирования, позволяющих воссоздавать процесс взаимодействия массива взорванной горной породы с рабочим инструментом карьерного экскаватора.

Председатель комиссии

Главный конструктор


 Подпись

Емельянов А.А.
 ФИО

Члены комиссии:

Начальник конструкторского отдела


 Подпись

Тихомиров С.А.
 ФИО

Начальник отдела маркетинга, к.т.н.


 Подпись

Донченко Т.В.
 ФИО

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент на изобретение «Способ изготовления зуба ковша экскаватора»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2779978

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБА КОВША
ЭКСКАВАТОРА

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Болобов Виктор Иванович (RU), Ахмеров Эрик Викторович (RU), Ракитин Илья Витальевич (RU)*

Заявка № 2022108356

Приоритет изобретения 30 марта 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 16 сентября 2022 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 30 марта 2042 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

