

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

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

Санкт-Петербург – 2023

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, старший научный сотрудник

Болобов Виктор Иванович

Официальные оппоненты:

Шишлянников Дмитрий Игоревич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Горная электромеханика», профессор;

Кузиев Дильшад Алишерович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра горного оборудования, транспорта и машиностроения, доцент.

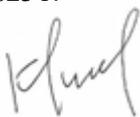
Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится **29 сентября 2023 г. в 10:30** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, **аудитория № 1163**.

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

Автореферат разослан 28 июля 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время основной объем выемки и погрузки взорванной горной массы осуществляется карьерными экскаваторами. В процессе эксплуатации контактирующие с породой зубья их ковшей подвергаются интенсивному изнашиванию с укорочением и потерей симметричности формы, сопровождающихся увеличением угла заострения и образованием 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 симметричности формы зубьев на протяжении всего периода эксплуатации (эффект «самозатачивания»).

Степень проработанности 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 работы – снижение энергоемкости процесса выемки взорванной горной массы экскаваторами типа ЭКГ разработкой научно обоснованного решения по совершенствованию технологического процесса изготовления зубьев.

Идея работы: 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 работы:

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 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 производственную деятельность на предприятии ООО «ИЗ-КАРТЭКС ИМЕНИ П.Г. Коробкова» с получением акта внедрения от 17.04.23 г.

Методология и методы исследования. Проведение научного исследования осуществлялось на основании комплексного подхода, связан-

ного с детальным анализом теоретических сведений о процессе изнашивания зубьев ковша экскаватора и способам 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».

На защиту выносятся следующие положения:

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 «Нанозифика и Наноматериалы» (НН-2019); VII

Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020»; международный симпозиум «Нанозифика и Наноматериалы» (НН-2020); международная научно-практическая конференция «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» 2022 г.; 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 опубликованных работах, в том числе в 1 статье - в издании 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 (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен патент.

Структура работы. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются свойства горных пород, оказывающие влияние на процесс экскавации, виды карьерных экскаваторов, конструкции зубьев их ковшей, анализируются известные способы повышения износостойкости и технических характеристик материала зубьев, оказывающих влияние на энергоёмкость процесса экскавации.

Во второй главе, с использованием разработанной имитационной модели процесса силового взаимодействия при перемещении зуба ковша экскаватора в кусковой скальной породе, анализируются величины и направления усилий, действующих на нижнюю и верхнюю поверхности зуба, оцениваются сопротивление породы и энергоёмкость процесса экскавации в зависимости от различной степени изнашивания зуба.

В третьей главе анализируются экспериментальные методы исследования процесса абразивного изнашивания. Представлены разработанные методика и экспериментальная установка, а также результаты экспериментального исследования влияния ВТМО на износостойкость материала зубьев. Приводится экспериментально-расчетное обоснование возможности переноса результатов эксперимента на натурные условия эксплуатации зубьев.

В четвертой главе по результатам компьютерного моделирования процесса течения металла при штамповке коронки зуба устанавливается геометрия заготовки, обеспечивающая необходимую интенсивность пластической деформации металла нижней части зуба. Разрабатываются научно обоснованные рекомендации по совершенствованию технологического процесса изготовления зубьев ковша экскаватора с целью обеспечения эффекта их «самозатачивания» и, как следствие, снижения удельных энергозатрат при выемке взорванной горной массы.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Причиной потери симметричности зубьев ковша экскаватора типа ЭЖГ 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.

Процесс работы карьерного экскаватора при выемке взорванной горной массы характеризуется высокой скоростью изнашивания зубьев его ковша, как элементов рабочего инструмента, непосредственно контактирующих со скальной породой, срок службы которых, в ряде случаев, не превышает 3-4 суток.

Как показал осмотр зубьев ковшей экскаваторов типа ЭКГ после их работы по скальным породам, геометрия зубьев претерпевает значительные изменения (рисунок 1): помимо укорочения зуба, происходит потеря симметричности его формы, сопровождаемая увеличением радиуса притупления режущей кромки и образованием на нижней поверхности площадки притупления. Это способствует существенному увеличению усилий сопротивления породы и энергозатрат при экскавации.

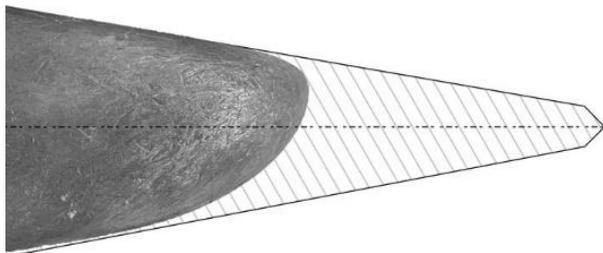


Рисунок 1 – Вид головной части зуба после работы по взорванному граниту в сравнении с исходным состоянием (штриховка)

Причины изменения формы зуба устанавливались по результатам имитационного моделирования процесса силового взаимодействия при перемещении в взорванной горной массе изношенного зуба с формой, соответствующей экскавации различного объема породы.

При моделировании использовался метод дискретных элементов при 200 временных итерациях, осуществляемый в программной среде Rocky DEM, с обработкой полученных результатов при помощи программного обеспечения ANSYS (модуль Transient Structural). Специфика экскавируемой породы учитывалась принятием в расчетах диаметра (0,1 м) и насыпной плотности (1940 кг/м^3) элементов среды близким к имеющим место у продуктов взрыва скальных пород. Настройка параметров движения зуба в программе (рисунок 2) осуществлялась по времени и траектории перемещения ковша экскаватора ЭКГ-5А при экскавации скальной породы, а также скоростям его подъема (0,87 м/с) и напора (0,95 м/с).

Устанавливались силы, с которыми куски породы воздействуют на различные точки поверхности зуба в различные моменты цикла экскавации, их направление и напряжения, возникающие в поверхностном слое металла зуба. Полученные результаты сопоставлялись с результатами визуальных наблюдений за поверхностью изношенных зубьев и замера твердости (динамический твердомер ТКМ-359С).

Было установлено, что напряжения, возникающие при экскавации в поверхностном слое верхней поверхности зуба ($\sigma_{в.ср} \sim 1,32$ МПа) примерно на 25% превышают их величину для нижней поверхности ($\sigma_{н.ср} \sim 1,07$ МПа) (рисунок 3), что находит свое отражение в несколько большей степени наклёпа металла верхней поверхности зуба (61,6 HRC) по сравнению с нижней (59,8 HRC) (рисунок 4).

При этом наблюдается существенное различие в преобладающем направлении воздействия кусковой породы на зуб – по нормали F_y к верхней поверхности (рисунок 5, а) и касательно F_x относительно нижней поверхности (рисунок 5, б). Причем средние значения касательных усилий F_x на нижней поверхности примерно в 1,4 раз превышают их величину на верхней.

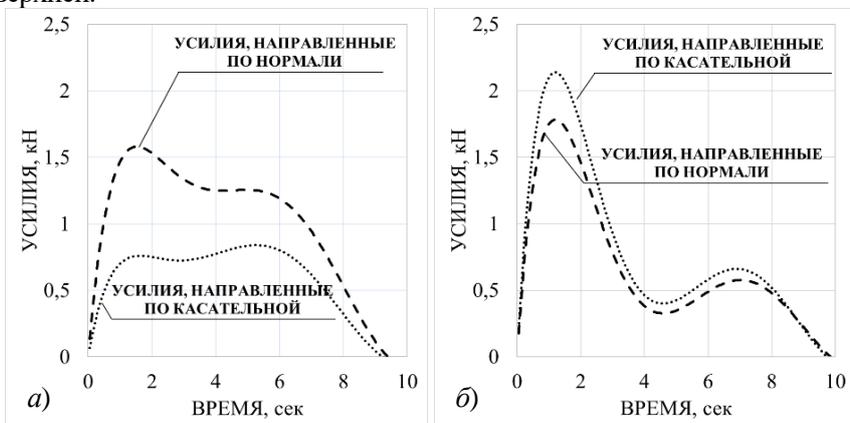


Рисунок 5 – Распределение нормального и касательного усилий, действующих на верхнюю (а) и нижнюю (б) сторону зуба, в течение цикла экскавации

Это обстоятельство, с учетом результатов визуальных наблюдений (блестящий цвет верхней поверхности с беспорядочно расположенными вмятинами по сравнению с матовым цветом нижней поверхности зуба с

параллельно расположенными царапинами), позволило заключить, что доминирующим видом изнашивания на верхней поверхности зуба является ударно-абразивный ее вид, а на нижней – абразивный. Поскольку ударно-абразивное изнашивание протекает со значительно меньшей скоростью, чем абразивное, 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 касательных усилий F_x для нижней поверхности, превышает F_x для верхней, нижняя поверхность изнашивается с большей интенсивностью, что приводит к потере симметричности формы зуба.

Рисунок 6 иллюстрирует профили зуба после экскавации различной массы взорванной скальной породы (по данным А.В. Макушенко) и соответствующее каждому профилю сопротивление породы экскавации, рассчитанное по результатам имитационного моделирования.

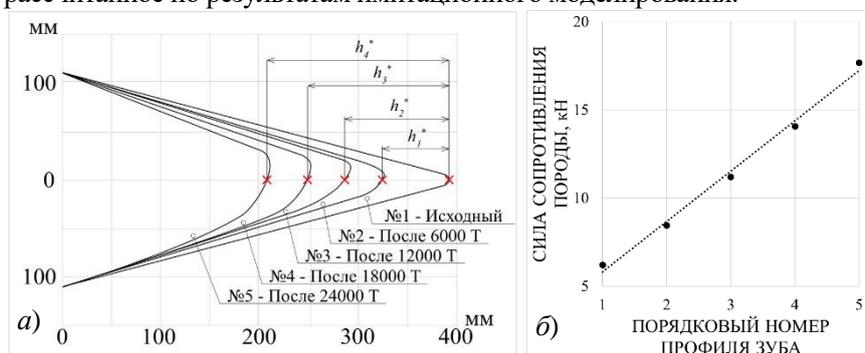


Рисунок 6 – Изменение профиля головной части зуба ковша экскаватора ЭЖГ-5А, с его обозначением профиля (от 1 до 5), в зависимости от массы экскавируемой взорванной горной породы (а) и соответствующее каждому профилю сопротивление породы экскавации (б) (х – точки, для которых проводилось сравнение изменения линейного размера h_i^* зуба)

Как видно из результатов расчета (рисунок 6, б), при переходе от исходного зуба (профиль 1) к максимально изношенному (профиль 5), усилия, необходимые для выемки взорванной горной массы, возрастают практически в 3 раза.

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

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.

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

Благоприятное влияние ВТМО на абразивную износостойкость материала зубьев подтверждалось результатами опытов, проведенных на экспериментальной установке (рисунок 7) по разработанной методике.

Объектом испытаний являлись цилиндрические образцы 2 диаметром $D_0 = 8$ мм, а длиной $L = 50$ мм из стали 110Г13Л, как материала, наиболее часто используемого для изготовления зубьев ковшей экскаваторов, подвергнутые пластической деформации различной интенсивности ε в процессе ВТМО (выдержка прутков различного диаметра (D_i) в печи при температуре 1150°C, ковка их рабочей части на пневмомолоте до достижения диаметра D_0 (рисунок 8), закалка в воде, разделение деформированной части прутка на образцы). Интенсивность деформации ε рассчитывалась, как $\varepsilon = \ln(D_i/D_0)^2$ и для $D_i = 10$ и 12 мм составляла 0,44 и 0,81. С использованием универсального твердомера Zwick Roell оценивалась твердость поверхности образцов до и после ВТМО.

Предварительно взвешенный (± 1 мг) анализируемый образец 2, прижимаемый с постоянной нагрузкой ($F = 132$ Н) к поверхности абразива 1 – электрокорунду, как однородному материалу по твердости

($HV \sim 2200$ МПа) и абразивности ($a \sim 90$ мг), приближающемуся к скальным породам, в течение $t_i = 30$ с перемещался с постоянной скоростью ($v = 0,8$ м/с) по круговой траектории, после чего повторно взвешивался, с определением убыли массы Δm_i , которая через плотность металла и площадь контакта с абразивом пересчитывалась на убыль высоты образца Δh , и так 10 циклов ($\Sigma t_i = 300$ с). Строилась зависимость суммарной убыли высоты образца $\Sigma \Delta h$ от продолжительности испытаний t , которая аппроксимировалась прямой линией, тангенс угла наклона которой принимался за скорость абразивного изнашивания V данного образца, а величина $I = 1/V$ – за его износостойкость. Устанавливались относительная износостойкость α образцов, как отношение износостойкости образца I , подвергнутого ВТМО, к значению износостойкости исходного материала I_0 , и интенсивность изнашивания $V_v = V_i/v$, составляющая, как оказалось, для материала зуба в состоянии поставки $0,017$ мм/м.

Результаты испытаний исходных и подвергнутых ВТМО с максимальной интенсивностью образцов представлены на рисунке 9, из которых видно, что применение ВТМО способствует повышению относительной износостойкости α материала зубьев в 1,4 раза.

Как показали результаты замера твердости образцов, этот показатель в результате ВТМО возрастает с 206 до 298 HB , т.е. на 45%.

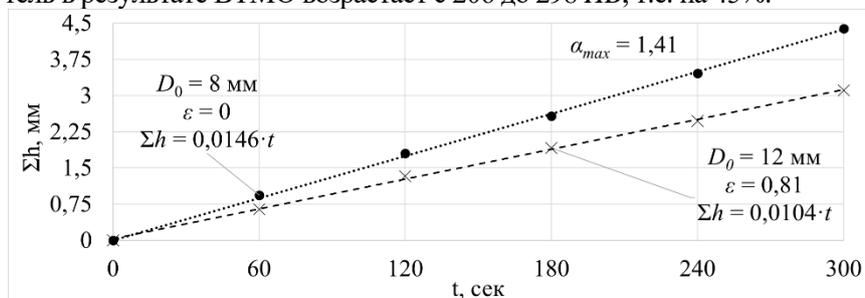


Рисунок 9 – Зависимость суммарной убыли высоты образцов до и после ВТМО от времени изнашивания

Правомерность переноса полученных результатов эксперимента на натурные зубья подтверждалась сравнением убыли h фиксированного линейного размера зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А после экскавации различной массы взорванной горной породы, установленной по результатам наблюдений (величина h_i^* из рисунка 6, а) и расчетов (h_i) (1), проведенных, исходя из интенсивности изнашивания материала зубьев, установленной

в условиях экспериментов ($V_v = 0,017$ мм/м), пути трения зуба, L_i^* и соотношения удельных нагрузок, имеющих место в натуральных условиях ($P_{уд}^*$) и экспериментах ($P_{уд} = 2,6$ МПа):

$$h_i = V_v \cdot L_i^* \cdot (P_{уд}^*/P_{уд}) \quad (1)$$

где $L_i^* = (M \cdot t_{кон} \cdot v^*) / (\rho_{п} \cdot V_{ковш} \cdot k_n)$ – путь трения зуба, рассчитанный, исходя из массы экскавируемой породы M из рисунка 6, a ($8 \cdot 10^3$; $12 \cdot 10^3$; $18 \cdot 10^3$ и $24 \cdot 10^3$ т), ее насыпной плотности ($\rho_{п} = 1940$ кг/м³), объема ковша экскаватора ($V_{ковш} = 5$ м³), уровня его заполняемости в процессе работы ($k_n = 0,9$), скорости перемещения зуба ($v^* \sim 0,9$ м/с), времени контакта зуба с горной массой в течении одного цикла экскавации ($t_{кон} = 8,5$ с), $P_{уд}^*$ – удельные нагрузки, прилагаемые к поверхности изношенных зубьев (в точке x – на рисунке 6, a), установленные по результатам компьютерного моделирования ($\sim 1,6$ МПа).

Возможность использования соотношения $P_{уд}^*/P_{уд}$ для расчета (1) h подтверждалась результатами экспериментов по абразивному изнашиванию стальных образцов различной площади сечения ($S = 28,3$; $50,3$; $78,5$ и $113,1$ мм²) при различных нагрузках ($P = 66$ и 132 Н), которые показали (рисунок 10), что линейная скорость изнашивания металлического материала, при неизменности других факторов, находится в прямо пропорциональной зависимости от удельной нагрузки $P_{уд} = P/S$.

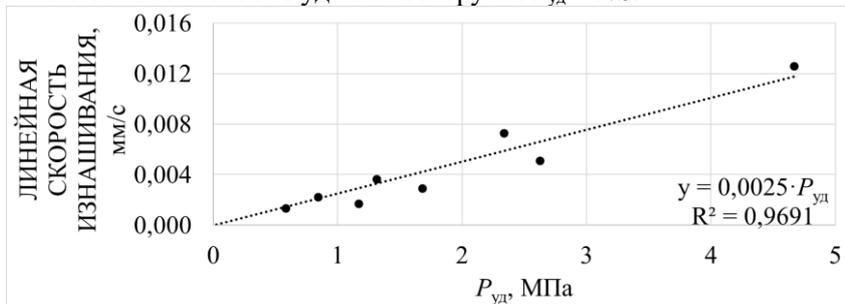


Рисунок 10 – Зависимость линейной скорости изнашивания стали от прилагаемой удельной нагрузки

Результаты сравнения величины h и h^* для анализируемого размера зуба (расстояния до точки «х» на рисунке 6, a) иллюстрирует рисунок 11.

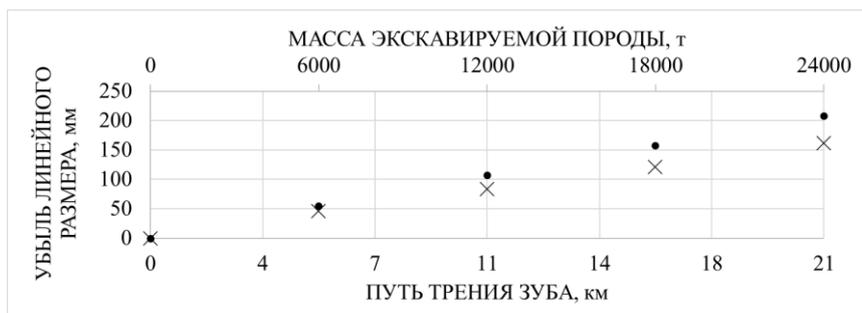


Рисунок 11 – Сравнение убыли фиксированного линейного размера зуба в результате изнашивания за различные промежутки времени, установленной по результатам наблюдений (крестики) и расчетным путем (точки), исходя из результатов экспериментов и математического моделирования

Снижение интенсивности изнашивания нижней части зубьев предлагается осуществлять формированием в их поверхностном слое зоны повышенной твердости и износостойкости, что достигается использованием в процессе изготовления зубьев операций высокотемпературной обработки давлением (штамповки) и охлаждения в воде, т.е. метода ВТМО. Для снижения требуемых усилий, штамповкой предлагается получать только головную, наиболее изнашиваемую часть зуба (коронку), что обуславливает использование уже нашедшей широкое распространение на практике составной конструкции зуба, состоящей из коронки и адаптера. Ее преимуществом является возможность замены в процессе эксплуатации только наиболее изношенной части зуба – коронки, что сокращает затраты на приобретение зубьев и сроки ремонтных работ.

Появление указанной зоны достигается использованием заготовок специально рассчитанной конфигурации, способствующей получению металлом нижней части поковки заданной интенсивности пластической деформации ε (рисунок 12), обеспечивающей этой зоне, после закалки, как подтверждено экспериментами, повышенную твердость и износостойкость. При выборе необходимой величины ε ($\varepsilon_{cp} \sim 0,8$) руководствовались тем, чтобы износостойкости металла нижней и верхней частей зуба относились друг к другу ($\alpha \sim 1,41$) приблизительно также, как касательные усилия на этих поверхностях ($\sim 1,4$), что обеспечит близость в скоростях их изнашивания. Необходимая конфигурация заготовки (рисунок 13)

устанавливалась по результатам компьютерного моделирования в программе *DEFORM-3D*.

Как показали расчеты, использование модифицированных зубьев, стороны которых будут изнашиваться с одинаковой интенсивностью с обеспечением эффекта «самозатачивая», до 1,4 раз снизит необходимые усилия и до 1,3 раз энергоемкость процесса выемки взорванной горной массы: с 0,13 (кВт·ч)/м³ до 0,097 (кВт·ч)/м³ для полностью изношенного зуба (рисунок 14).

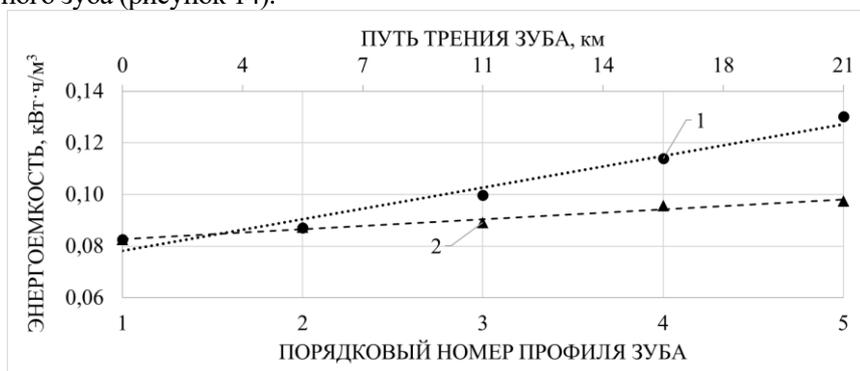


Рисунок 14 – Временная зависимость сопротивления породы при выемке взорванной горной массы экскаватором ЭКГ-5А при использовании зубьев, изготовленных по принятому (1) и усовершенствованному (2) технологическому процессу

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи совершенствования технологического процесса изготовления зубьев ковша экскаватора типа ЭКГ с целью снижения удельных энергозатрат при выемке 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 про-

цесса 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 при его перемещении показано, что причиной потери симметричности его формы, способствующей повышению до 3 раз сопротивлению породы экскавации, является различие в преобладающем направлении силового воздействия кусков породы на зуб – по нормали к верхней и касательно, относительно нижней поверхности, что определяет её более интенсивное изнашивание.

3. При проведении лабораторных исследований на разработанной экспериментальной установке 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 твердость и износостойкость.

4. Разработаны рекомендации по совершенствованию технологического процесса изготовления зубьев ковша экскаватора типа ЭКГ, заключающиеся во внедрении в процесс операции ВТМО 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 ВТМО в производство других быстроизнашиваемых элементов горнодобывающего оборудования.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Болобов, В.И. Влияние формы зубьев ковша на энергию затрачиваемую экскаватором при работе по крупнокусковым горным породам [Текст] / В.И. Болобов, Э.В. Ахмеров, И.В. Ракитин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. - 2022. - №17-1. - С. 179-185.

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

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

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

4. Bolobov, V.I. Influence of rock type on regularities of excavator bucket tooth crown wear [Текст] / V.I. Bolobov, **E.V. Akhmerov**, I.V. Rakitin // Mining Informational and Analytical Bulletin - 2022. - Vol. 6-2. - PP. 189-204.

Публикации в прочих изданиях:

5. Болобов, В.И. Влияние изменения формы зубьев ковша экскаватора в процессе экскавации разрушенных гранитных пород на потребляемую им мощность [Текст] / В.И. Болобов, И.В. Ракитин, **Э.В. Ахмеров** // Нанозифика и наноматериалы: Сборник научных трудов - 2020, (Международный семинар. 25-26 ноября 2020 г.) с. 307-314.

Патент:

6. Патент РФ № 2779978, 30.03.2022 Болобов В.И., **Ахмеров Э.В.**, Ракитин И.В. Способ изготовления зуба ковша экскаватора // заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – № 2022108356; заявл. 30.03.2022; опубл. 16.09.2022, Бюл. № 26.

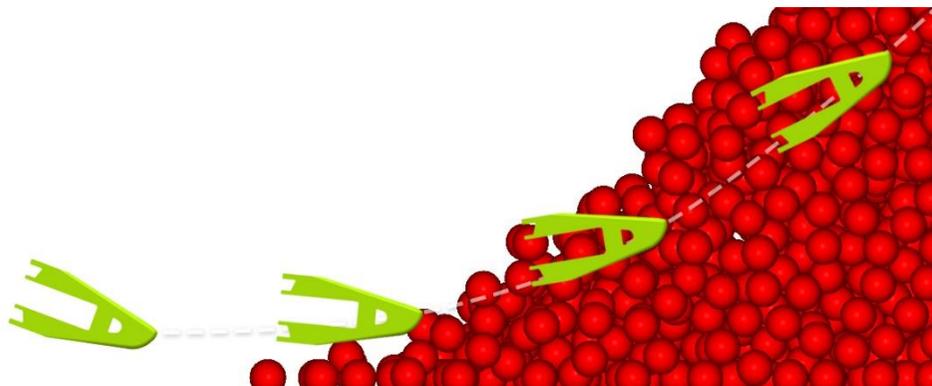


Рисунок 2 – Схема моделирования движения зуба при экскавации взорванной горной массы

Величина эквивалентных напряжений, МПа

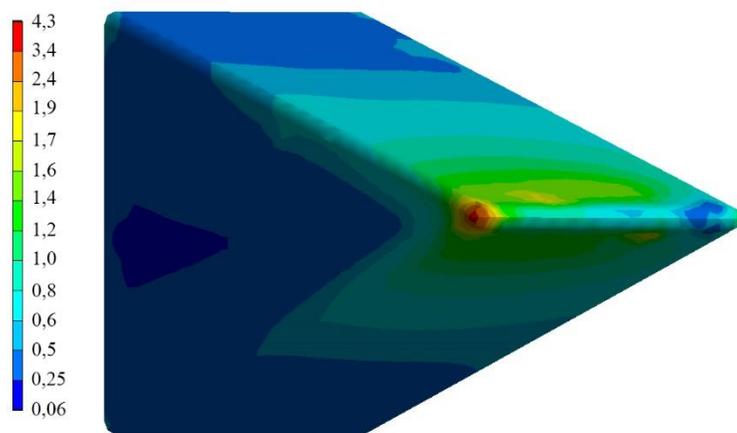


Рисунок 3 – Распределение усредненных значений эквивалентных напряжений в поверхностном слое неизношенного зуба

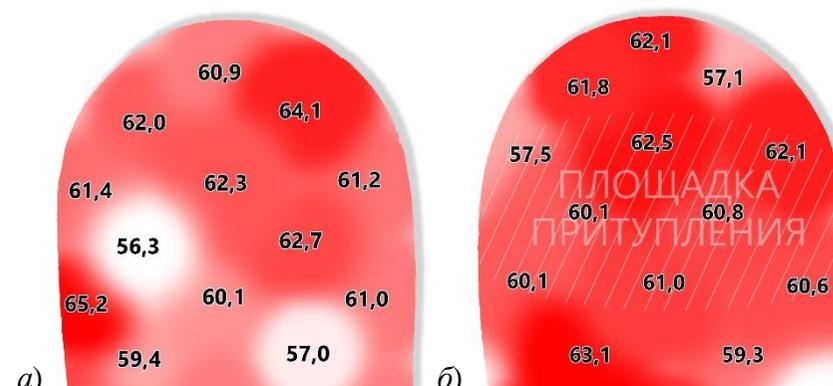


Рисунок 4 – Распределение твердости по верхней (а) и нижней (б) поверхностям изношенного зуба после работы по взорванному граниту

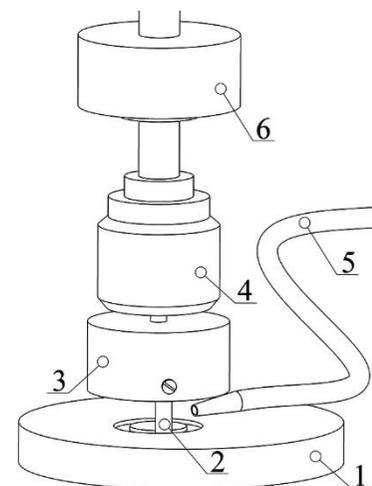


Рисунок 7 – Виртуальное представление экспериментальной установки: 1 – круг абразивного материала; 2 – испытуемый образец; 3 – удерживающее устройство; 4 – шпиндель; 5 – устройство подачи воды; 6 – груз



Рисунок 8 – Вид прутков после операции ВТМО

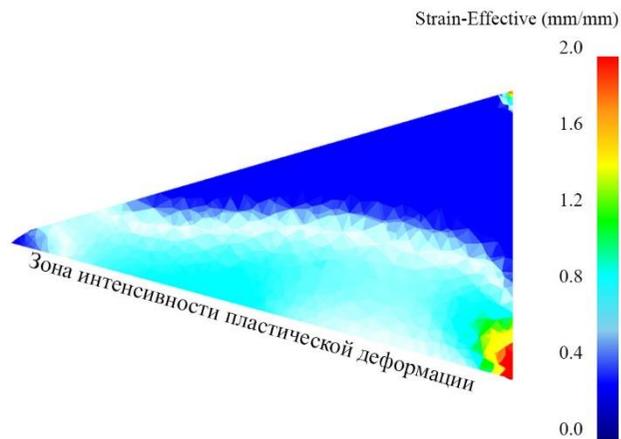


Рисунок 12 – Распределение интенсивности пластической деформации ϵ по сечению поковки, полученной с использованием заготовки, необходимой конфигурации

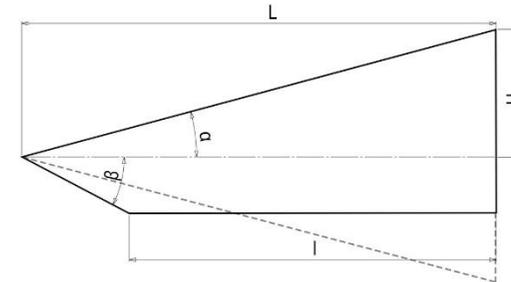


Рисунок 13 – Установленный профиль заготовки (Патент РФ № 2779978, 30.03.2022 Болобов В.И., Ахмеров Э.В., Ракитин И.В.), обуславливающий достижение при штамповке заданной величины $\epsilon_{ср} \sim 0,8$ металла нижней стороны коронки (штриховая линия – профиль конечной поковки)