

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС»

Пецык Александр Александрович

ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР СИЛОВЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ
ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ АЛМАЗНО-КАНАТНЫХ
РАСПИЛОВОЧНЫХ СТАНКОВ

2.8.8 - «Геотехнология, горные машины»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:

Кандидат технических наук
Зотов Василий Владимирович

Москва, 2026

Введение

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью повышения эффективности и надёжности процессов распиливания природного камня в условиях устойчивого роста объёмов камнеобрабатывающего производства и ужесточения требований к качеству получаемых заготовок. В современных условиях природный камень широко применяется в строительстве, архитектуре и промышленности, что требует использования высокопроизводительного и технологически гибкого оборудования, способного обеспечивать заданные параметры процесса обработки при работе с крупногабаритными и разнородными по свойствам блоками.

Алмазно-канатные станки в настоящее время рассматриваются как наиболее перспективный тип оборудования для распиливания природного камня благодаря возможности обработки блоков значительных размеров, обладающие сниженными динамическими нагрузками и высокой универсальности. Вместе с тем эффективность их применения в значительной степени определяется корректным выбором оптимальной траектории движения алмазного каната, силовых и прочностных параметров, а также режимов работы. Существующие методы расчёта алмазно-канатных станков, как правило, основаны на упрощённых траекторных моделях с постоянным радиусом кривизны, что не в полной мере отражает реальные условия формирования контакта между алмазным канатом и распиливаемым материалом.

Недостаточный учёт формы траектории движения каната и связанных с ней силовых факторов приводит к повышенным нагрузкам на элементы оборудования, ускоренному износу алмазных элементов и снижению надёжности станков. Кроме того, большинство известных подходов к оценке прочности и надёжности алмазно-канатных систем носит детерминированный характер и не учитывает случайный разброс эксплуатационных нагрузок и прочностных характеристик, что ограничивает достоверность

прогнозирования ресурса оборудования.

В связи с разработкой теоретически обоснованных моделей траектории движения алмазного каната задача определения силовых параметров процесса распиливания природного камня и оценки надёжности алмазных элементов с использованием вероятностных методов является актуальной. Решение данной задачи позволяет повысить производительность алмазно-канатных станков, снизить вероятность отказов и создать основу для рационального выбора режимов распиливания природного камня, что также определяет актуальность выполненного исследования

Цель работы заключается в повышении эффективности и надёжности алмазно-канатных распиловочных станков путём обоснования параметров процесса распиливания и оптимизации формы алмазных элементов.

Идея диссертационной работы заключается в использовании спирально-параболической траектории движения каната, позволяющей адекватно описывать изменение геометрии контакта по мере развития процесса пропила камня в отличие от основанных на упрощённых моделях траекторий с постоянным радиусом кривизны, что позволяет установить взаимосвязь между формой траектории движения каната, распределением нагрузок, режимами работы станка и вероятностью безотказной работы оборудования и используется для обоснованного выбора рациональных параметров процесса алмазно-канатного распиливания.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены и следующие **задачи**:

1. выполнить анализ современного состояния и перспектив развития распиловочного оборудования для обработки природного камня и обосновать целесообразность применения алмазно-канатных станков;
2. разработать математическую модель движения алмазного каната в зоне контакта с распиливаемым блоком с учётом переменной кривизны спирально-параболической траектории его движения;
3. выполнить силовой анализ системы «алмазно-канатная пила –

распиливаемый блок» и определить зависимости усилия распиливания, натяжения каната и нагрузок на элементы привода от геометрии и кривизны траектории движения каната в зоне контакта, коэффициента трения, угла контакта, предварительного натяжения каната и кинематических параметров процесса распиливания;

4. предложить аналитическую зависимость для определения натяжения алмазного каната и силы распиливания при переменной кривизне траектории движения исполнительного органа;

5. разработать вероятностную модель оценки надёжности работы алмазных элементов алмазно-канатного станка с учётом случайного характера эксплуатационных нагрузок;

6. установить рациональные параметры режимов распиливания, обеспечивающие повышение производительности и надёжности алмазно-канатных станков.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Обосновано, что траектория движения алмазного каната в зоне контакта с распиливаемым каменным блоком имеет переменную кривизну и может быть адекватно описана спирально-параболической зависимостью, что позволяет более точно учитывать распределение статических и динамических нагрузок в рабочем органе по мере развития пропила по сравнению с моделями, в которых радиус кривизны траектории принимается постоянным;

2. Получена аналитическая зависимость для определения натяжения алмазного каната и силы распиливания при переменной кривизне траектории движения, учитывающая геометрию спирально-параболической траектории и реальные условия контакта с распиливаемым материалом;

3. Разработан вероятностный метод оценки надёжности работы алмазных элементов канатно-пильного станка, основанный на представлении нагрузок и прочностных характеристик как случайных величин, позволяющий количественно определять вероятность безотказной работы и обосновывать рациональные режимы распиливания с учётом натяжения каната.

Научная новизна работы заключается в:

- обосновании описания траектории движения алмазного каната в зоне контакта с распиливаемым каменным блоком спирально-параболической зависимостью, позволяющей учитывать переменную кривизну траектории и реальные условия формирования контакта при алмазно-канатном распиливании;
- получении аналитической зависимости для определения натяжения каната и силы распиливания с учётом переменной кривизны спирально-параболической траектории движения и распределения контактных нагрузок;
- установлении влияния формы траектории движения алмазного каната на распределение нормального давления и сил трения вдоль контактного участка распиливания, что позволяет учитывать распределение нагрузок по мере развития пропила и влияние динамических нагрузок при использовании спирально-параболической траектории по сравнению с моделями с постоянным радиусом кривизны траектории;
- разработке вероятностного метода оценки надёжности алмазных элементов алмазно-канатного станка, основанного на представлении эксплуатационных нагрузок и прочностных характеристик как случайных величин, учитывающих силовые параметры, полученные из траекторной и силовой моделей процесса распиливания.

Обоснованность и достоверность научных положений обеспечивается корректной постановкой задач исследования и грамотным использованием положений классической механики, теории канатных систем, сопротивления материалов и теории вероятностей; соответствием принятых в работе допущений реальным условиям эксплуатации алмазно-канатных станков; аналитическим выводом геометрических и силовых зависимостей, а также учётом того, что в предельных случаях разработанная модель переходит в классическое решение для траекторий с постоянным радиусом кривизны.

Методы исследований включают дифференциальное моделирование изменения натяжения каната по криволинейной траектории, параметрический анализ влияния геометрии элемента каната на распределение контактных напряжений, исследование износа алмазных элементов на истирание на пластиковых моделях, статистическую обработку экспериментальных данных и оценку вероятности безотказной работы. Для анализа напряжённого состояния применялось конечно-элементное моделирование, а обработка результатов выполнялась с использованием специализированных программных средств инженерных расчётов.

Научная значимость работы заключается в обосновании спирально-параболической траектории движения алмазного каната, которая позволяет уточнить действующие при алмазно-канатном распиливании силы и динамические нагрузки, с применением вероятностного подхода для оценки надёжности работы алмазных элементов.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных расчётных зависимостей при проектировании, модернизации и эксплуатации алмазно-канатных станков; обосновании рациональных режимов распиливания, параметров натяжения каната и скорости его движения с учётом силовых и надёжностных ограничений. Применение разработанных моделей способствует снижению износа алмазных элементов каната и повышению ресурса оборудования при обработке природного камня. Результаты работы в части разработки математической модели спирально-параболической траектории движения алмазного каната, а также аналитической зависимости для определения усилия распиливания с учётом переменной кривизны и прерывистости рабочей поверхности каната, приняты к использованию в ООО «Гипроуглемаш» и ООО «НПЦподземаш» при выполнении расчётов и проектировании канатно-пильного оборудования для добычи и переработки блочного камня.

Апробация работы.

Основные научные положения и результаты проделанной работы

регулярно докладывались на международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, 2023, 2024 г.), «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (Екатеринбург, 2021 г.), «Перспективы инновационного развития угольных регионов России» (Прокопьевск, 2024 г.) и на семинарах кафедры ГОТиМ НИТУ МИСИС.

Публикации.

Основные положения диссертационной работы отражены в 5 научных публикациях, 3 из которых входят в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка из 103 наименования и приложений. Работа изложена на 114 страницах текста, содержит 0 таблиц и 34 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ современного состояния камнеобрабатывающей промышленности и распиловочного оборудования для обработки природного камня. Рассмотрены конструктивные и технологические особенности алмазно-канатных станков, показаны их преимущества и ограничения. Установлено, что алмазно-канатные станки в наибольшей степени соответствуют требованиям к гибкости, энергоэффективности и качеству распиливания каменных блоков.

Научные основы исследований процессов разрушения и обработки горных пород режущим инструментом были заложены в трудах отечественных и зарубежных учёных, внёсших значительный вклад в развитие горного дела, механики разрушения и теории резания. Существенное влияние на формирование научных представлений в данной области оказали работы Ю.И. Агалакова, Ю.П. Балакина, Л.А. Барона, Б.И. Бокия, Н.Г. Домбровского, В.Н. Гетопанова, Л.И. Кантовича, Н.Г. Картавого, Е.А. Козырева, В.И.

Курлени, В.Н. Мосинца, М.М. Протоद्याконова, В.В. Ржевского, А.А. Скочинского, В.С. Федорова, Е.И. Шемякина, D. Liu, J. Roxborough. и других авторов, в которых рассмотрены фундаментальные закономерности взаимодействия режущего инструмента с горными породами и условия формирования разрушения.

Основы теории разрушения горных пород и процессов резания, применимые к задачам алмазно-канатного распиливания, получили развитие в работах В.Н. Баканова, В.С. Беляева, В.П. Будникова, Н.В. Мельникова, В.И. Осипова, И.М. Ромашова, М.В. Секретова, С.А. Фёдорова, В.В. Храмцова, A. Evans, B. Lawn. В указанных исследованиях рассмотрены механизмы зарождения и развития теории разрушения, напряжённо-деформированного состояния материала в зоне контакта с инструментом, а также влияние физико-механических свойств горных пород на процесс резания, что послужило теоретической базой для дальнейшего развития методов расчёта силовых и прочностных параметров.

Создание и развитие математических моделей процессов резания, а также методов численного и цифрового моделирования напряжённо-деформированного состояния элементов режущего инструмента и обрабатываемого материала отражены в работах В.В. Боброва, С.Г. Губанова, А.А. Гусева, М.Г. Рахутина, А.М. Сидорова, С.П. Тимофеева, Ю.А. Шевченко, K.J. Bathe, T. Belytschko, O.C. Zienkiewicz. В данных исследованиях сформированы подходы к применению аналитических методов, метода конечных элементов и вычислительных технологий, анализа сложных контактных задач, что послужило методической основой для выполнения численного и вероятностного анализа, представленного в диссертационной работе.

На основании выполненного обзора определено, что описание процесса разрушения каменного блока алмазно-канатным инструментом должно включать корректное описание траектории его движения в зоне контакта с распиливаемым каменным блоком, которая позволяет учитывать переменную

кривизну траектории и реальные условия формирования контакта при алмазно-канатном распиливании. Определено, что наиболее близкой к реальным условиям работы алмазно-канатного распиловочного станка является спирально-параболическая траектория. Также в главе определены перспективы развития алмазно-канатных технологий и обоснована актуальность дальнейших исследований, направленных на повышение эффективности и производительности распиловочного оборудования.

Во второй главе диссертационной работы разработана математическая модель траектории движения алмазного каната в зоне контакта с распиливаемым каменным блоком (рисунок 1), на котором указаны T - натяжение каната на входе в рассматриваемый элементарный участок контакта; $T + dT$ - натяжение каната на выходе из элементарного участка контакта; ds - элементарная длина участка контакта каната с поверхностью блока; α - угол между направлением натяжения каната и касательной к траектории в рассматриваемой точке; θ - элементарный центральный угол, соответствующий участку дуги ds .

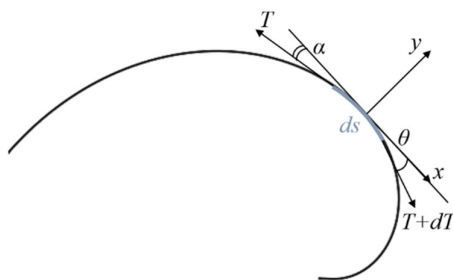


Рисунок 1 – Расчётная схема элементарного участка алмазного каната при спирально-параболической траектории движения

Показано, что в реальных условиях алмазно-канатного распиливания траектория движения каната имеет переменную кривизну, обусловленную геометрией блока, параметрами натяжения и силовым взаимодействием каната с распиливаемым материалом. В связи с этим для описания траектории движения каната предложено использовать спирально-параболическую зависимость, позволяющую учитывать изменение геометрии контакта по мере

развития пропила.

В качестве расчётной модели используется спирально-параболическая зависимость радиус-вектора точки каната от углового параметра, который может быть описан следующей формулой:

$$r(\varphi) = r_0(1 + a\varphi^n) \quad (1)$$

где $r(\varphi)$ - радиус-вектор траектории; r_0 - начальный радиус контакта каната с поверхностью распиливаемого блока, м; a - коэффициент, характеризующий интенсивность изменения радиуса траектории; φ - угловой параметр, отсчитываемый вдоль зоны контакта каната, рад; n - показатель степени, отражающий характер изменения радиуса кривизны по мере развития пропила.

Дифференцируя зависимость (1) по угловому параметру φ , получаем выражения для первой и второй производных радиус-вектора $r(\varphi)$. Подставляя полученные производные в общее выражение для кривизны плоской кривой, заданной в полярных координатах, получаем формулу для локальной кривизны траектории движения каната:

$$\kappa = \frac{r^2 + 2\left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 - r\frac{d^2r}{d\theta^2}}{\left(r^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2\right)^{3/2}}. \quad (2)$$

С учётом полученной геометрии траектории выполнен силовой анализ системы «алмазно-канатная пила – распиливаемый блок». Рассмотрено равновесие элементарного участка каната, находящегося в контакте с поверхностью пропила, с учётом нормального давления со стороны распиливаемого материала и сил трения, возникающих в зоне контакта.

На основании условий статического равновесия элементарного участка каната в зоне контакта с поверхностью пропила, записанных по касательной к траектории с учётом сил трения, получено дифференциальное уравнение

распределения натяжения каната вдоль контактного участка при переменной кривизне траектории:

$$\frac{dT}{T} = \mu k(\varphi) ds. \quad (3)$$

где T - текущее натяжение каната; μ — коэффициент трения; $k(\varphi)$ — локальная кривизна траектории; φ — угловой параметр вдоль зоны контакта.

Интегрирование уравнения (3) по длине контактного участка приводит к обобщённому выражению для натяжения каната:

$$T(\varphi) = T_0 \exp\left(\mu \int_0^\varphi k(\varphi) ds\right), \quad (4)$$

где T_0 - натяжение каната на входе в зону распиливания.

Выражение (4) представляет собой обобщение классической формулы Эйлера для канатных систем на случай траектории с переменной кривизной. В предельном случае постоянной кривизны полученная зависимость переходит в известную формулу для круговой траектории.

Сила распиливания F_p определяется как результирующая касательных сил трения, действующих на канат по длине контактного участка, и может быть представлена в виде:

$$F_p = \int_0^{s_k} \mu T(\varphi) k(\varphi) ds. \quad (5)$$

Следует учитывать, что реальная рабочая поверхность алмазного каната является прерывистой вследствие дискретного расположения алмазных режущих элементов. В контакт с поверхностью распиливаемого блока вступают лишь отдельные участки каната, тогда как промежутки между алмазными элементами не воспринимают нормальное давление и не участвуют в формировании сил трения. В связи с этим фактическая длина контактного взаимодействия каната с материалом меньше геометрической длины дуги зоны контакта.

Для учёта данного эффекта вводится коэффициент η контактной насыщенности каната:

$$\eta = \frac{l_3}{l_{шаг}}, \quad (6)$$

где $l_{конт}$ - длина алмазного элемента, $l_{шаг}$ - шаг расположения алмазных элементов вдоль каната.

С учётом прерывистости рабочей поверхности сила распиливания определяется выражением:

$$F_p = \eta F_p = \eta [T(\varphi_k) - T_0]. \quad (7)$$

На основе полученных зависимостей определена величина силы распиливания и выполнен силовой анализ процесса алмазно-канатного распиливания. Анализ показал, что реализуемые значения силы распиливания и мощности привода находятся в допустимых пределах для современных алмазно-канатных станков.

В третьей главе диссертационной работы выполнен вероятностный анализ прочности и надёжности алмазных элементов алмазно-канатного станка с учётом случайного характера эксплуатационных нагрузок и разброса прочностных характеристик. Необходимость применения вероятностного подхода обусловлена тем, что реальные нагрузки, действующие на алмазные элементы в процессе распиливания, изменяются во времени и зависят от неоднородности структуры распиливаемого материала, условий контактного взаимодействия и параметров траектории движения алмазного каната, полученных во второй главе.

В рамках принятого подхода допускаемая $F_{алм.доп.}$ и рабочая $F_{алм.раб.}$ нагрузка рассматриваются как случайные величины:

$$\zeta(F_{алм.раб.}) = \frac{1}{\sigma_{F_{алм.раб.}}} \cdot e^{-\frac{(F_{алм.раб.} - m_{F_{алм.раб.}})^2}{2\sigma_{F_{алм.раб.}}^2}} \quad (8)$$

$$\zeta(F_{алм.доп.}) = \frac{1}{\sigma_{F_{алм.доп.}}} \cdot e^{-\frac{(F_{алм.доп.} - m_{F_{алм.доп.}})^2}{2\sigma_{F_{алм.доп.}}^2}} \quad (9)$$

где $F_{алм.раб.}$ - рабочая нагрузка для алмазного элемента; $m_{F_{алм.раб.}}$ - математическое ожидание величины $F_{алм.раб.}$; $\sigma_{F_{алм.раб.}}^2$ - среднеквадратическое

отклонение величины $F_{\text{алм.раб.}}$; $F_{\text{алм.доп.}}$ - допускаемая нагрузка для алмазного элемента; $m_{F_{\text{алм.доп.}}}$ - математическое ожидание величины $F_{\text{алм.доп.}}$; $\sigma_{F_{\text{алм.доп.}}}^2$ - среднеквадратическое отклонение величины $F_{\text{алм.доп.}}$.

На основе свойств нормального закона распределения получены выражения для математического ожидания m_g и среднеквадратического отклонения σ^2 случайной величины, позволяющие оценить вероятностный запас прочности алмазных элементов.

$$m_g = m_{F_{\text{алм.доп.}}} - m_{F_{\text{алм.раб.}}} \text{ и } \sigma^2 = \sigma_{F_{\text{алм.доп.}}}^2 + \sigma_{F_{\text{алм.раб.}}}^2 \quad (10)$$

Вероятность безотказной работы алмазных элементов определяется как вероятность выполнения условия $\xi(g) > 0$, то есть превышения прочности над действующей нагрузкой.

$$\xi(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sqrt{\sigma_{F_{\text{алм.доп.}}}^2 + \sigma_{F_{\text{алм.раб.}}}^2}} \cdot e^{-\frac{[g - (m_{F_{\text{алм.доп.}}} - m_{F_{\text{алм.раб.}}})]^2}{2(\sigma_{F_{\text{алм.доп.}}}^2 + \sigma_{F_{\text{алм.раб.}}}^2)}} \quad (11)$$

Сила нормального давления N , необходимая для проведения прочностного расчёта, определяется исходя из формулы:

$$N = F_p / k \quad (12)$$

где коэффициент трения каната с алмазными элементами о поверхность пропила со спирально – параболическим контуром принимается в диапазоне $k = 0,2 \div 0,4$. Указанный диапазон соответствует данным эксплуатации современных алмазно-канатных станков и учитывает влияние условий охлаждения и шероховатости поверхности реза.

Суммарная составляющая сил F_p и N :

$$F_{\text{алм.доп.}} = \sqrt{F_p^2 + N^2} \quad (13)$$

Минимальное $F_{\text{алм.макс}} = 583H$ и максимальное $F_{\text{алм.мин}} = 179,864H$ значения нагрузок, полученные в результате расчёта, используются для формирования статистических характеристик случайной величины нагрузки. При этом, для наглядной оценки надёжности алмазных элементов построены графики (рисунок 2) плотностей распределения нагрузок, прочности и запаса

прочности, позволяющие визуально оценить вероятность безотказной работы алмазных элементов каната при заданных режимах распиливания.

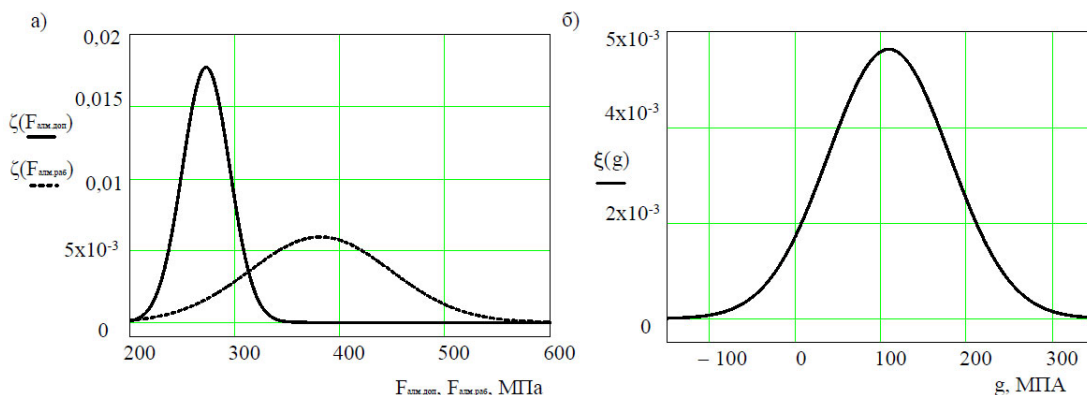


Рисунок 2 – Плотности распределения случайно величины $\xi(F_{алм.раб.})$ и $\xi(F_{алм.доп.})$ (а); плотность распределения случайной величины $\xi(g)$ (б) при расчёте алмазного элемента на контактную выносливость активных поверхностей

Таким образом разработаны математические модели, позволяющие определить траекторию движения каната, рассчитать нагрузки, возникающие при работе канатного станка.

В четвёртой главе для проведения сравнительного анализа использовалась схема распиливания блока (рисунок 3) в Autodesk Inventor Professional, в которую входит канатная пила 2 и распиливаемый блок 1. Созданная цифровая модель используется для инженерного анализа, в Autodesk Nastran. Нагрузки, прикладываемые к алмазному элементу при проведении инженерного анализа, были определены на основании силовых расчётов, произведённых во второй главе диссертационной работы.

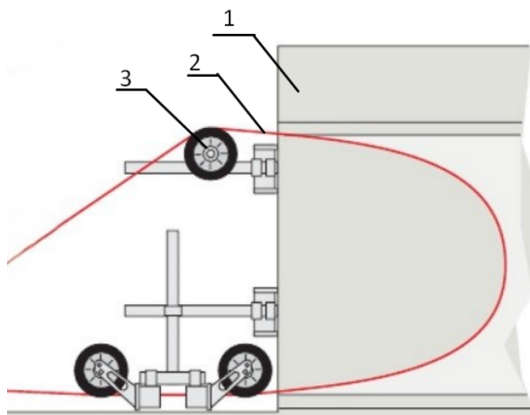


Рисунок 3 – Схема распиливания блока: 1 – распиливаемый блок; 2 – канатная пила; 3 – обводной шкив

Для выполнения расчётов были смоделированы базовая и модифицированная формы алмазных элементов, что позволило проанализировать возникающие напряжения и определить наиболее рациональную форму алмазных элементов.

При проведении инженерного анализа была выбрана расчётная схема (рисунок 4) с силами, симулирующие нагрузки, под действием которых алмазный элемент прижимается к поверхности реза (1 на рисунке 4) и силы, направленные вдоль алмазного элемента (2 на рисунке 4), показывающие усилие, с которым алмазный элемент внедряется в распиливаемый блок.

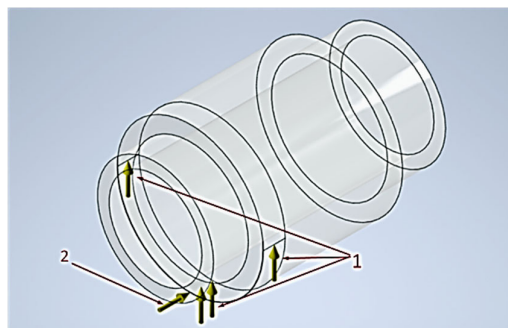


Рисунок 4 – Расчётная схема алмазного элемента для проведения прочностного анализа методом конечных элементов: 1 – силы прижима, 2 – силы внедрения

Для проведения расчётов были выбраны формы алмазных элементов, приведенные на рисунке 5.

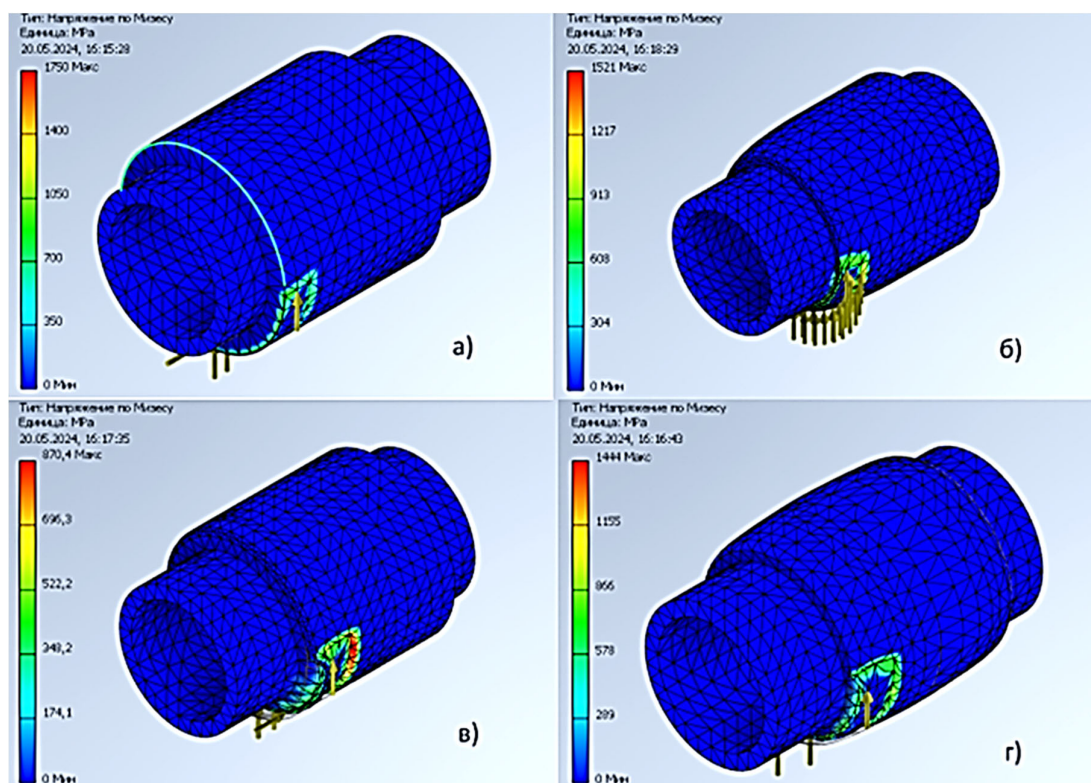


Рисунок 5 – Эпюры напряжений по Мизесу в алмазных элементах при инженерном анализе: а – базовая; б – конусная со скруглением, в – базовая со скруглением, г – с двойным эллипсоидным скруглением

На рисунке 5 представлена визуализация проведённого инженерного анализа, где представлены эпюры напряжений алмазных элементов при моделировании их работы в составе алмазно-канатного распиловочного станка.

Результаты инженерного анализа для рассматриваемых алмазных элементов представлены на рисунке 6. Наибольшие напряжения можно наблюдать в алмазных элементах при базовой конструкции, а также с двойным эллипсоидным скруглением. Минимальные напряжения наблюдаются в элементе конусной конструкции со скруглением.

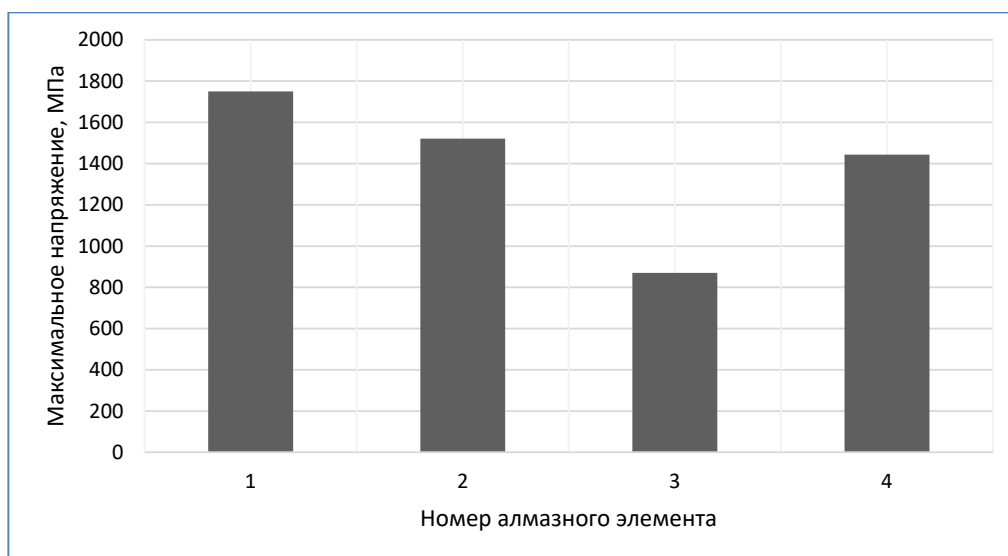


Рисунок 6 – Результаты инженерного анализа в конструкциях элементов:
1 – базовая; 2 – базовая со скруглением, 3 – конусная со скруглением, 4 – с двойным эллипсоидным скруглением

Таким образом, анализ проведённых прочностных характеристик алмазных элементов различных форм позволяет сделать вывод о том, что в алмазном элементе конусной формы со скруглениями действуют наименьшие максимальные напряжения, возникающие как при приложении нагрузки к поверхности, так и при приложении нагрузки к ребру.

Для подтверждения результатов прочностных расчётов проведены экспериментальные испытания предложенных форм. Целью эксперимента является подтверждение результатов прочностных расчётов путём проверки предложенных форм на истираемость, а также на пригодность к распиловке. При проведении прочностных расчётов невозможно было точно утверждать, что та или иная форма будет выдерживать достаточную силу резания, так как в каждой предложенной форме острая кромка отсутствовала, что могло значительно снизить эффективность распиловки. Кроме того, необходимо было проверить предложенные формы на устойчивость при движении по траектории реза, так как снижение устойчивости алмазных элементов приведёт к повышению вибрационной нагрузки на канатный станок.

Разработан и изготовлен экспериментальный стенд, обеспечивающий воспроизведение спирально-параболической траектории движения алмазного

каната в зоне контакта с распиливаемым материалом. Конструкция стенда позволяет регулировать параметры кривизны траектории, угол контакта и величину натяжения каната. Для создания новых форм алмазных элементов была применена технология печати FDM (fused deposition modeling) 3D печать, что позволило быстро изготавливать прототип и получать цельное тело без лишних слоёв. Все предложенные формы проходили одинаковые испытания на истираемость. После многократных пластиковых моделей по абразивной поверхности был проведён осмотр и замер истирания каждого образца микрометром.

Для построения графика выполнялись замеры в средней части и у передней кромки алмазного элемента (рисунок 7).

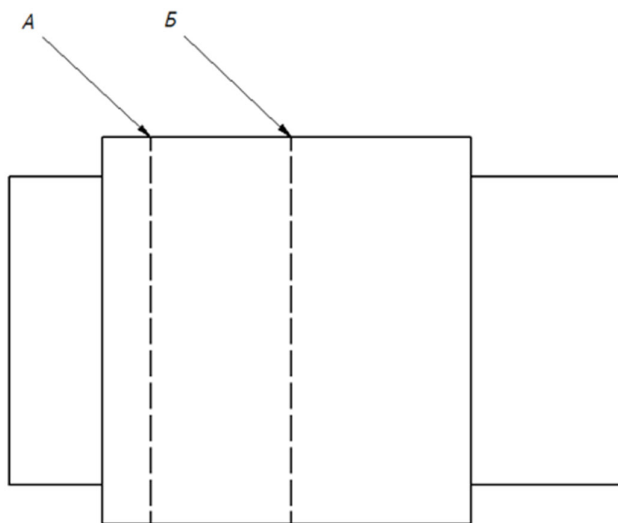


Рисунок 7 – Схема проведения измерений: линия А – у кромки; линия Б – в середине алмазного элемента

График, показывающий зависимость истирания материала от количества проходов, приведен на рисунке 8. Из него видно, что сначала истирание происходит по передней кромке алмазного элемента, а износ ближе к середине элемента происходит значительно позже.

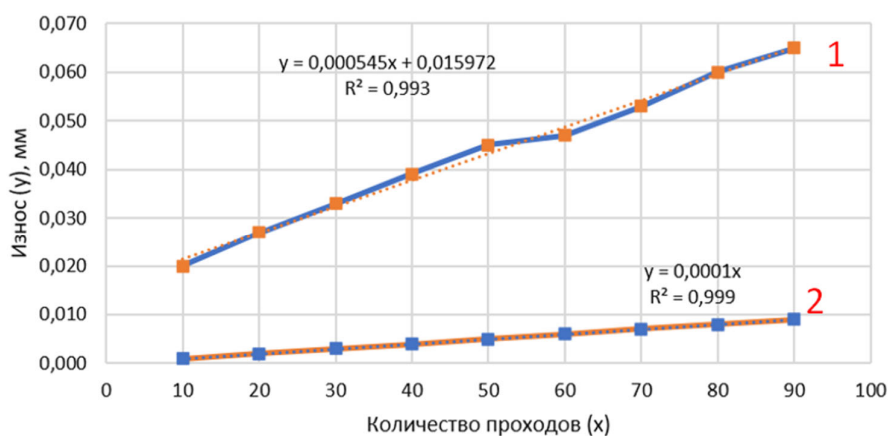


Рисунок 8 – График зависимости износа базового испытываемого элемента от количества проходов по абразивной поверхности: 1 – измерения по линии А; 2 – измерения по линии Б

Для скругления базовой кромки, необходимо определить рациональный радиус скругления. С этой целью в испытаниях использовались алмазные элементы со скруглением кромки от 0,02 до 2 мм. Результаты эксперимента представлены на рисунке 9.

Анализируя график (рисунок 9), можно сделать вывод что рациональный радиус скругления кромки более 0,5 мм.

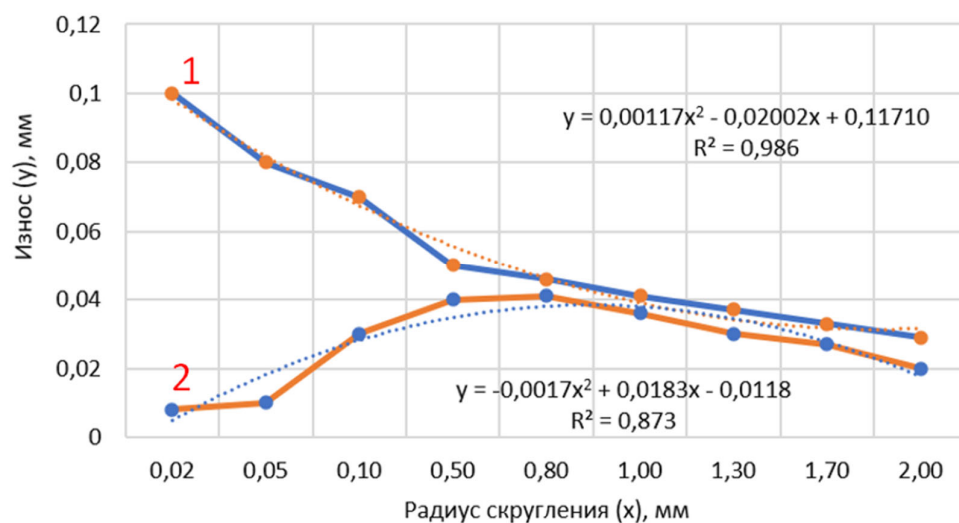


Рисунок 9 – График зависимости износа смоделированного элемента со скруглённой кромкой от радиуса скругления: 1 – измерения по линии А; 2 – измерения по линии Б

При анализе данных, полученных по результатам эксперимента с алмазными элементами конусной формы со скруглением, согласно графику (рисунок 10), можно сделать вывод, что оптимальный угол конусности составляет 4-5°, что подтверждается совпадением интенсивности износа в зоне передней кромки и в средней части элемента, что исключает локальное перегружение и обеспечивает устойчивость процесса резания.

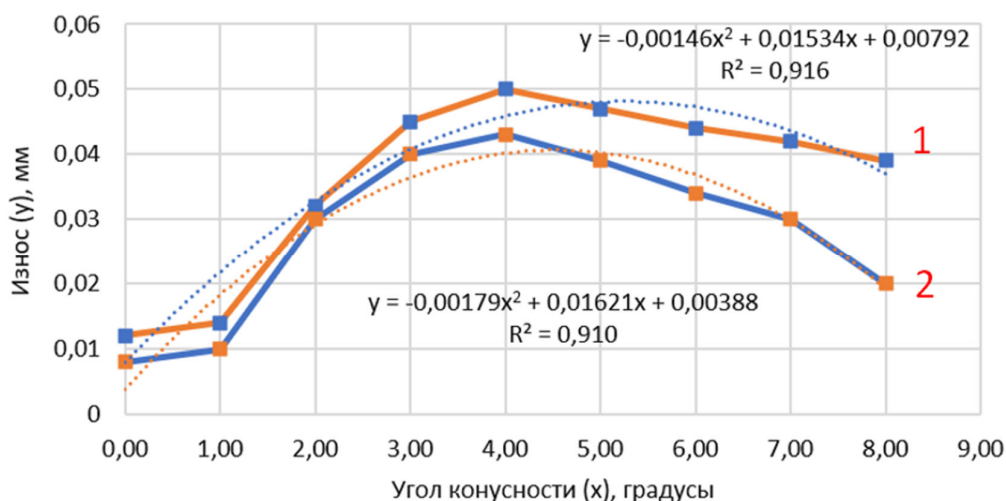


Рисунок 10 – Зависимость износа смоделированного элемента конической формы от угла конусности: 1 – измерения по линии А; 2 – измерения по линии Б

Анализируя результаты эксперимента с учётом обозначенных критериев, можно сделать вывод, что наиболее рациональным среди алмазных элементов базовой формы, является элемент конусной формы со скруглённой кромкой при угле конусности 4–5°.

На рисунке 11 представлены данные эксперимента на износ алмазного элемента эллипсоидной формы. Анализ полученных данных показывает, что при протяжённости большой оси эллипса 2,5 мм достигается наиболее равномерное распределение износа по рабочей поверхности элемента. Учитывая, что исходная длина алмазной части элемента составляет 6 мм, величина 2,5 мм обеспечивает оптимальное соотношение между скруглённой и основной частью элемента, при котором сохраняется достаточная длина

рабочей зоны для устойчивого взаимодействия с материалом и одновременно минимизируется концентрация напряжений у передней кромки.

Необходимо отметить, что при проведении эксперимента при движении алмазного элемента по абразивной поверхности возникают дополнительные колебания, влияющие на стабильность движения каната. Таким образом полученные результаты необходимо рассматривать по двум критериям:

- стабильность движения;
- равномерность истирания алмазных элементов.

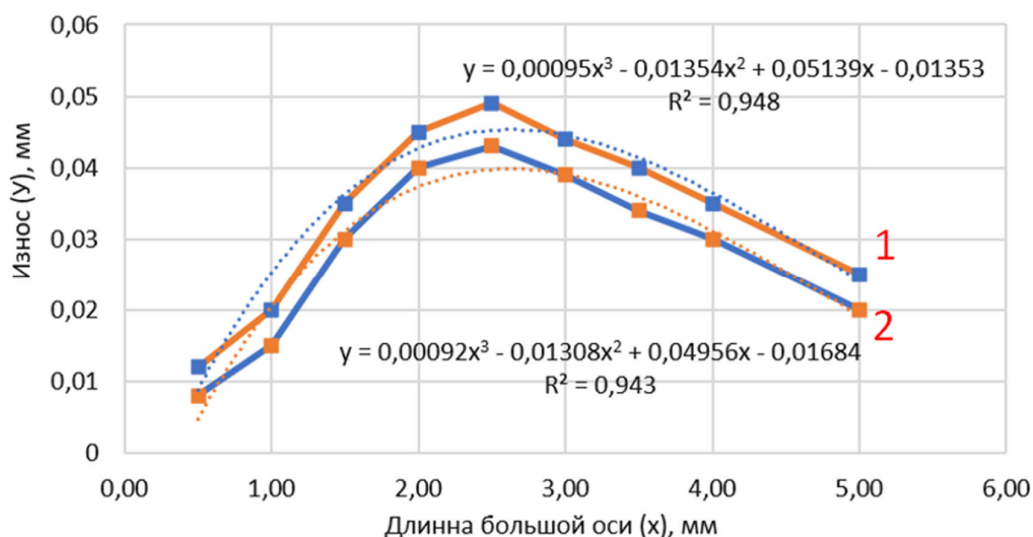


Рисунок 11 – График зависимости износа элемента эллипсоидной формы от длины большой оси эллипса: 1 – измерения по линии А; 2 – измерения по линии Б

После проведения модельного эксперимента была получена формула для определения коэффициента подобия между показателями истираемости пластиковых и алмазных элементов. Для сопоставления результатов экспериментальных испытаний модельных элементов с реальными условиями эксплуатации алмазного каната выполнен расчёт эксплуатационного износа элементов на основании силовых параметров, полученных во второй главе, и данных с производства. Данный расчёт необходим для верификации экспериментальных данных и подтверждения адекватности выбранной геометрии элементов в условиях реального нагружения.

При распиловке мрамора, гранита, габбро-диабаз обычно используется алмазный канат, ресурс которого на 1 м каната 6–15 м² распиленной поверхности.

В качестве исходных данных для расчёта коэффициента подобия изнашивания приняты следующие параметры процесса распиливания: $V_{под}=0,5$ м/ч – скорость подачи; $V_{кан}=30$ м/с – скорость движения каната; $L_{блока}=3$ м – длина блока; $L_{петли}=25$ м – длина петли.

По данным производителя удельный ресурс алмазного каната составляет $E_{износ_каната}=9$ м²/м, что соответствует площади распиливаемой поверхности, приходящейся на один погонный метр каната.

Полный износ каната:

$$T_{алм.эл.час} = T_{петли} / Q_{кан} = 225 / 1,5 = 150 \text{ час} \quad (1)$$

Износостойкость петли каната:

$$T_{петли} = L_{кан} \cdot E_{износ.каната} = 25 \cdot 9 = 225 \text{ м}^2 \quad (2)$$

Производительность одного алмазного каната распиловочного станка:

$$Q_{кан} = v_{под} \cdot L_{блока} = 0,5 \cdot 3 = 1,5 \text{ м}^2/\text{час} \quad (3)$$

При работе канатный элемент не всё время находится в контакте с распиливаемым блоком. В связи с этим необходимо произвести корректировку времени с учётом коэффициента. Чистое время в контакте, при длине петли $L_{петли}$ каната - 25 м. При этом длина блока $L_{блока}$ - 3 м, а коэффициент нахождения алмазного элемента в контакте с блоком составляет

$$K_{чист.времени} = L_{блока} / L_{петли} = 3 / 25 = 0,12 \quad (4)$$

где $L_{блока}$ – длина распиливаемого блока, м; $L_{петли}$ – длина петли алмазного каната, м.

С учётом коэффициента чистого времени полный износ каната произойдёт через:

$$T_{алм.эл.чист.} = T_{алм.эл.час} \cdot K_{чист.времени} = 150 \cdot 0,12 = 18 \text{ час} \quad (5)$$

Расчёт длины изнашивания алмазного элемента с учётом отработки полного цикла всего каната:

$$L_{изн} = v_{кан} \cdot T_{алм.эл.час} = 3600 \cdot 30 \cdot 150 = 16200 км \quad (6)$$

Исходя из величины износа и известного времени полного износа каната, скорость износа и величина износа алмазного элемента равны:

$$v_{изн.алм.} = \frac{U_{изн.алм.эл.}}{T_{алм.эл.чист.}} = \frac{2,1}{18} = 0,12 мм/час \quad (7)$$

$$U_{изн.алм.эл.} = v_{изн.алм.} \times T_{алм.эл.чист.} = 0,12 \times 18 = 2,16 мм \quad (8)$$

Этот результат подтверждается полученным на производстве значением максимальной величины износа алмазного элемента диаметром 8,3 мм $U_{изн.алм.эл.} = 2,16 мм$ (измерение в середине алмазного элемента).

Для получения коэффициента подобия алмазного и пластикового элемента необходимо использовать данные, полученные при проведении эксперимента.

Определяем величину износа пластикового элемента:

$$U_{изн.пл.эл.} = v_{изн.пл.} \times T_{пл.эл.чист.} \quad (9)$$

Согласно полученным данным при проведении эксперимента, при диаметре алмазного элемента 4,3 мм, максимальная величина износа составляет $U_{изн.алм.эл.} = 0,07 мм$ (измерение по диаметру).

Исходя из величины износа и известного времени полного износа каната, скорость износа будет равна:

$$v_{изн.пл.} = \frac{U_{изн.пл.эл.}}{T_{пл.эл.чист.}} = \frac{0,07}{0,8} = 0,0875 мм/час \quad (10)$$

По итогам проведённых расчётов получаем следующие коэффициенты:
коэффициент скорости износа элемента

$$K_{скор.изн.} = \frac{v_{изн.алм.эл.}}{v_{изн.пл.эл.}} = \frac{0,12}{0,0875} = 1,371 ; \quad (11)$$

коэффициент времени нахождения алмазного элемента в контакте с блоком

$$K_{вр.} = \frac{T_{изн.алм.эл.}}{T_{изн.пл.эл.}} = \frac{18}{0,8} = 22,5 . \quad (12)$$

Для проверки рассчитанных значений вышеприведённых коэффициентов (21,22) проведём расчёт величины износа алмазного

элемента.

$$U_{изн.алм.эл} = K_{скор.изн} \times v_{изн.пл.эл.} + K_{вр.} \times v_{изн.пл.эл.} = 1,371 \times 0,087 + 22,5 \times 0,087 = 2,07 \text{ мм} \quad (13)$$

Таким образом, установлено, что полученные коэффициенты подобия могут быть использованы для корректировки результатов эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи повышения эффективности и надёжности алмазно-канатных распиловочных станков, что имеет важное значение для производства строительных материалов.

Основные научные результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ современного состояния и перспектив развития распиловочного оборудования для обработки природного камня. Установлено, что алмазно-канатные распиловочные станки обладают наиболее высокой технологической гибкостью, обеспечивают снижение динамических нагрузок, уменьшение ширины пропила и повышение производительности по сравнению с традиционными дисковыми и штрипсовыми схемами, что подтверждает целесообразность их применения для обработки природного камня.

2. Разработана математическая модель траектории движения алмазного каната в зоне контакта с распиливаемым блоком на основе спирально-параболической зависимости с переменной кривизной. На её основе построена теоретическая модель силового взаимодействия каната с распиливаемым материалом, позволившая установить влияние изменения кривизны траектории на распределение нормального давления, касательных усилий и натяжения каната в зоне резания.

3. На основе разработанной математической модели получены

аналитические зависимости для определения силы распиливания, натяжения каната и контактного давления в зоне реза, учитывающие изменение кривизны траектории, длину блока, длину петли каната и кинематические параметры процесса. Введён коэффициент эффективного времени контакта алмазного режущего элемента с распиливаемым блоком.

4. Разработана пространственная конечно-элементная модель системы «алмазный элемент – распиливаемый блок», позволяющая определить распределение эквивалентных напряжений при различных геометрических конфигурациях алмазного режущего элемента.

5. На основе цифрового моделирования установлено, что алмазный режущий элемент с острой кромкой характеризуется максимальными значениями контактного давления и выраженной концентрацией напряжений в зоне его переднего ребра, что приводит к двухстадийной схеме его изнашивания и к ускоренному нарушению первоначальной геометрической формы элемента.

6. Определено влияние радиуса скругления кромки модели режущего элемента на характер его напряжённого состояния и износа. Экспериментально установлен рациональный диапазон радиуса скругления, равный 0,5–0,8 мм, обеспечивающий снижение пиковых нагрузок и выравнивание износа по длине элемента.

7. Разработана и исследована конусная форма модели режущего элемента со скруглённой кромкой. Установлено, что при угле конусности 4° обеспечивается равномерное распределение износа при движении элемента по траектории реза.

8. Выполнено сопоставительное исследование моделей режущего элемента конусной, эллипсоидной формы и формы со скруглением кромки. Установлено, что указанные конфигурации не обеспечивают совокупного преимущества по показателям напряжённого состояния и эксплуатационной устойчивости по сравнению с конусной формой.

9. Установлены рациональные параметры процесса алмазно-

канатного распиливания, обеспечивающие снижение динамических нагрузок, повышение устойчивости процесса резания и увеличение надёжности работы алмазно-канатных станков.

10. Проведена экспериментальная верификация результатов численного моделирования алмазных элементов различной геометрической формы. Установлено удовлетворительное соответствие расчётных и экспериментальных данных по характеру распределения износа, что подтверждает адекватность разработанных моделей и возможность их применения при проектировании алмазно-канатных распиловочных станков.

11. Разработан вероятностный метод оценки надёжности алмазных элементов алмазно-канатного станка, основанный на представлении эксплуатационных нагрузок и прочностных характеристик как случайных величин, учитывающих силовые параметры, полученные из траекторной и силовой моделей процесса распиливания.

12. Результаты работы в области разработки и экспериментальной верификации математической модели спирально-параболической траектории движения алмазного каната, определения зависимости силы распиливания от геометрических параметров зоны контакта и коэффициента трения приняты к использованию в ООО «Гипроуглемаш» и ООО «НПЦподземаш» при выполнении проектно-конструкторских работ и расчётах канатно-пильного оборудования для добычи и переработки блочного камня.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:
в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ

1. Пецык А. А., Секретов М. В. Вероятностное распределение нагрузки и прочности деталей дискового распиловочного станка // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2021. – № 1(9). – С. 48–55. – DOI 10.46573/2658–5030-2021-1-48-55. – EDN NGEIWF.

2. Пецык, А. А. Сравнительный прочностной анализ алмазных

элементов канатных камнерезных станков / А. А. Пецык, М. В. Секретов, С. Г. Губанов // Горная промышленность. – 2024. – № 3. – С. 45–47. – DOI 10.30686/1609–9192-2024-3-45-47. – EDN BPSIZS.

3. Пецык А. А., Зотов В. В., Яковенко В. В., Насимов М. Математическое моделирование траектории движения алмазного каната при распиливании каменных блоков с учётом переменной кривизны // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2026. - № 1 (специальный выпуск 2). - С. 3–17. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_2_3.

в прочих изданиях

1. Секретов М. В., Пецык А. А. Сравнительный анализ маятниковой и выпуклой траекторий качания пил штрипсовых станков // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XIX международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 20–21 мая 2021 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2021. – С. 102–105. – EDN TUSMJO. Пецык А. А., Секретов М. В., Кучеренко Е. Д., Селиванов Н. А. Перспективы применения синтетических алмазов для распиливания крепких горных пород алмазно-канатными станками // Перспективы инновационного развития угольных регионов России : Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции, Прокопьевск, 25–26 апреля 2024 года. – Прокопьевск: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2024. – С. 98–101. – EDN SGRRXB.