

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ НА АЛМАЗНО-КАНАТНУЮ ПИЛУ  
КАМНЕРАСПИЛОВОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**М. В. Секретов, М. Г. Рахутин**

*Университет науки и технологии МИСИС*

E-mail: mv.sekretov@misis.ru, Ленинский проспект, 4, 119991, г. Москва, Россия

Представлен геометрический и силовой анализ системы “алмазно-канатная пила — распиляемый блок”. Определены силы трения алмазно-канатной пилы о блок при параболической корректировке траектории канатного распиливания. Построены графики зависимостей силы распиливания от горизонтальных координат блока при разных значениях фокального коэффициента параболы. Дано описание фактической траектории распиливания монолитов и блоков. Получен коэффициент повышения нагрузки для начальной стадии рабочей операции. С использованием разработанной методики для фактической траектории распиливания выполнен прочностной анализ алмазных сегментов алмазно-канатного распиловочного оборудования, построены эпюры напряжений в алмазном сегменте с острой и скругленной кромкой. Рассчитана зависимость максимальных напряжений в алмазных сегментах со скругленной кромкой от радиуса скругления.

*Добыча блоков из камня, распиливание блоков, крепкая горная порода, алмазно-канатный распиловочный станок, параболическая траектория распиливания, коэффициент трения, сила распиливания, алмазный сегмент, кромка алмазного сегмента*

DOI: 10.15372/FTPRPI20240114

EDN: WGBMRQ

Мировой рынок природного камня в последнее десятилетие имеет тенденцию роста.Странами — мировыми лидерами по объему добычи и обработки природного камня являются: Италия, Испания, Иран, Бразилия, Индия, Китай [1]. Доля Российской Федерации от мирового объема производства в этих отраслях составляет 0.5 %. Такой невысокий показатель указывает, что камнедобывающая и камнеобрабатывающая отрасль в России нуждается в развитии.

В промышленности используются блоки различных размеров. К изделиям из камня относятся: облицовочные плиты зданий различного назначения; элементы облицовки площадей, улиц, мостов, набережных; монументы, памятники, декоративные элементы и т. п. Самые распространенные материалы, подвергающиеся обработке, — гранит и мрамор.

Распиловочная операция — одна из основных на камнедобывающих и камнеобрабатывающих предприятиях [2–4]. Она выполняется канатными, дисковыми, штрапсовыми и баровыми станками. Для отделения монолитов от массива и блоков от монолита на карьерах применяют алмазно-канатные машины [3, 5, 6], для распиливания блоков природного камня используют алмазно-канатные распиловочные станки [7]. Распространение алмазно-канатного распиловочного оборудования стало возможным благодаря снижению стоимости технических синтетиче-

ских алмазов за последние несколько десятилетий [8, 9]. В производство широко внедряются многоканатные распиловочные станки [10]. Они работают при высоких нагрузках на рабочие элементы станка, в сложных условиях высокоабразивной и влажной среды. Вследствие этого возникают частые отказы элементов в системе “канатные барабаны – канатная пила”: обрыв канатов [11], преждевременный и неравномерный износ алмазных режущих элементов (перлин) [12], быстрый износ канатных барабанов, натяжного гидроцилиндра. Чтобы повысить надежность станка, необходимо провести прочностной анализ его элементов с использованием компьютерных методов [11, 13] на основе силового анализа алмазно-канатной пилы [14 – 16].

Разработка метода определения нагрузки на алмазно-канатную пилу камнераспиловочного оборудования — актуальная задача. В использующихся методиках для расчета сил распиливания при взаимодействии алмазно-канатной пилы с блоком крепкой горной породы принимается круговая траектория. Вместе с тем при распиливании горных пород в установившемся режиме фактически формируется параболическая траектория. В настоящей работе представлена методика определения нагрузки на алмазно-канатную пилу с учетом параболической формы траектории, что позволит повысить точность расчетов на 5 – 30 %.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ силы распиливания, возникающей при работе алмазно-канатного станка, проводился на основе расчета сил трения нити о цилиндрическую поверхность.

Для определения геометрических и силовых параметров алмазно-канатного распиливания блоков крепких горных пород составлена расчетная схема (рис. 1). К канату, взаимодействующему с распиливаемым блоком, приложена сила  $\bar{P}$ . Необходимо найти наименьшую силу  $\bar{Q}$ , которую надо будет приложить к другому концу каната, чтобы сохранить равновесие на распиливаемом параболическом участке реза с углом огибания относительно фокуса  $F$  [17].

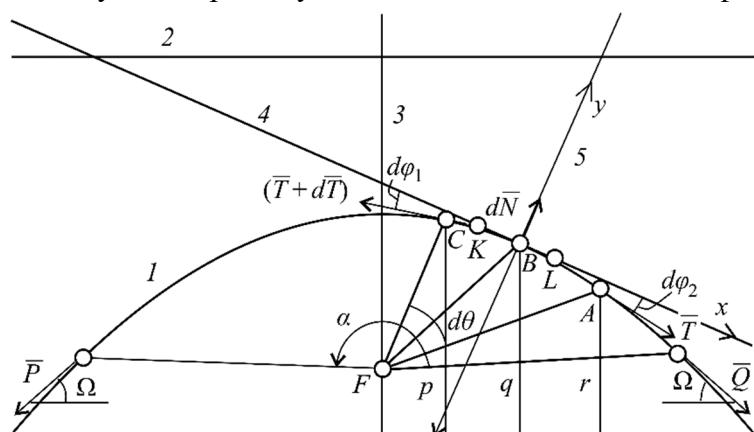


Рис. 1. Схема распиливания блоков крепких горных пород для определения геометрических и силовых параметров системы “алмазно-канатная пила — распиливаемый блок”: 1 — параболическая траектория распиливания; 2, 3 — директриса и ось параболы соответственно; 4, 5 — касательная и нормаль, проведенные к линии параболы в точке  $B$ ;  $F$  — фокус параболы;  $\alpha$  — угол охвата блока канатной пилой, град или рад

Рассматривается равновесие элемента каната  $CA$ . Разность натяжений каната в точках  $C$  и  $A$  равна  $dT$ . Эта сила уравновешивается силой трения  $dF_{\text{тр}} = f_0 dN$  ( $f_0$  — коэффициент трения каната о поверхность пропила;  $dN$  — сила нормального давления). Соответственно,

$$dT = f_0 dN. \quad (1)$$

Проекция сил на ось  $y$  для участка  $CA$ :

$$dN = T \sin(d\varphi_2) + (T + dT) \sin(d\varphi_1) \quad (2)$$

характеризует силу распиливания при взаимодействии алмазно-канатной пилы с блоком. Сила  $F_{\text{расп}}$ , возникающая при распиливании (далее сила распиливания), вычисляется как разность

$$F_{\text{расп}} = P - Q. \quad (3)$$

В существующих методиках расчета параболическая траектория распиливания заменяется на круговую. Формула для расчета силы распиливания при круговой траектории выглядит следующим образом [17, 18]:

$$F_{\text{расп}} = P(1 - e^{-K_{\text{пр}} f_0 \alpha}), \quad (4)$$

где  $K_{\text{пр}} = 0.20 - 0.28$  — коэффициент, характеризующий прерывистость рабочей поверхности инструмента;  $f_0$  — коэффициент трения каната с алмазными элементами о поверхность пропила. Для параболического контура распиливания  $f_0 = 0.3 - 0.4$ , для прямолинейного  $f_0 = 0.2 - 0.3$  [18].

Параболический контур распиливания описывается уравнением

$$y(x) = -\frac{qx^2}{2}, \quad (5)$$

здесь  $q$  — фокальный коэффициент параболы [19–21]. Фокальный коэффициент связан с фокальным параметром  $p$  соотношением

$$q = -\frac{1}{p}.$$

На рис. 1 ось  $y$  образована пересечением плоскости распиливания и перпендикулярной ей вертикальной плоскости симметрии блока. Ось  $x$  проходит через вершину параболы распиливания. Текущее значение начала координат по оси  $y$  смещается с изменением положения вершины параболы.

Компьютерное моделирование выполнено с использованием программы SolidWorks, прочностной анализ — с помощью программы Simulation методом конечных элементов (МКЭ).

Диаметр алмазного сегмента в расчете  $d_{\text{сегм}} = 6.3$  мм, длина  $L_{\text{сегм}} = 6.0$  мм. Сила распиливания  $F_{\text{расп}} = 102$  Н, сила нормального давления  $N = 291.4$  Н. В расчетах применялась стандартная тетраэдральная сетка конечных элементов. Глобальный размер стандартной сетки при исследованиях моделей с различными радиусами кромки варьировался от 0.14 до 0.16 мм с целью создания стабильной сетки конечных элементов в исследуемой зоне. Эквивалентные напряжения в модели определялись по критерию Мизеса.

В исследуемой модели сделано допущение, что сегмент с острой кромкой имеет минимальный радиус 0.01 мм. Данные получены при изучении алмазного элемента с кромкой  $R_{\text{скр}} = 0.01$  мм: размер конечного элемента 0.154 мм, допуск 0.0077 мм, количество узлов равно 345704, количество элементов 237625, число степеней свободы 974112. Максимальные напряжения найдены для алмазного элемента с радиусами кромок: 0.01–0.09 мм (с шагом 0.01); 0.1–0.4 мм (с шагом 0.1).

Обработка полученных данных максимальных значений напряжений при различных радиусах скруглений кромки алмазного сегмента выполнялась в программе Mathcad.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Найдем в формуле (2) соотношения  $d\varphi_1/d\theta$  и  $d\varphi_2/d\theta$ . С этой целью рассмотрим внутренние углы четырехугольников  $FBKC$  и  $FALB$ , показанные на рис. 1 [19, 20]. Для параболической траектории распиливания характерны соотношения:

$$\frac{d\theta}{4} = d\varphi_1, \quad \frac{d\theta}{4} = d\varphi_2. \quad (6)$$

Таким образом,  $d\varphi_1 = d\varphi_2$ , далее эти углы можно обозначать как  $d\varphi$ .

С учетом (6) формулу (2) запишем следующим образом:

$$dN = T \sin\left(\frac{d\theta}{4}\right) + (T + dT) \sin\left(\frac{d\theta}{4}\right).$$

Так как синус малого угла равен значению самого угла, то

$$dN = 2T \frac{d\theta}{4} = T \frac{d\theta}{2}.$$

Подставим полученное значение в формулу (1)  $dT = 0.5f_0Td\theta$ . Разделим обе части выражения на  $T$  и возьмем интегралы справа в пределах от 0 до  $\alpha$ , а слева от  $Q$  до  $P$  (так как натяжение каната в точке, где  $\theta=0$ , равно  $Q$ , а в точке, где  $\theta=\alpha$ , равно  $P$ ). Запишем:

$$\int_Q^P \frac{dT}{T} = 0.5f_0 \int_0^\alpha d\theta.$$

После вычисления интегралов имеем

$$\ln \frac{P}{Q} = 0.5f_0\alpha.$$

Это выражение можно записать как

$$\frac{P}{Q} = e^{0.5f_0\alpha}, \quad (7)$$

или

$$Q = Pe^{-0.5f_0\alpha}.$$

Подставив данное выражение в (3), получим формулу Эйлера для гибкой нити [17] с корректировкой для параболической траектории канатного распиливания:

$$F_{\text{расп}} = P - Pe^{-0.5f_0\alpha} = P(1 - e^{-0.5f_0\alpha}). \quad (8)$$

При проведении расчета силы распиливания канатной пилы по (8) в степенное выражение согласно формуле (4) добавляется коэффициент  $K_{\text{пр}}$  [18]:

$$F_{\text{расп}} = P(1 - e^{-0.5K_{\text{пр}}f_0\alpha}). \quad (9)$$

Отсюда находим зависимость силы распиливания  $F_{\text{расп}}$  от координат  $x$  (рис. 2). Нулевые значения по оси  $x$  соответствуют центру линии реза, совпадающему с центром блока; начальные и конечные значения — входу и выходу каната из пропила.

Из рис. 2 видно, что максимальные силы распиливания  $F_{\text{расп}}$  возникают на алмазных элементах канатной пилы при ее выходе из пропила, т. е. со стороны приводного барабана, а минимальные — при входе в пропил.

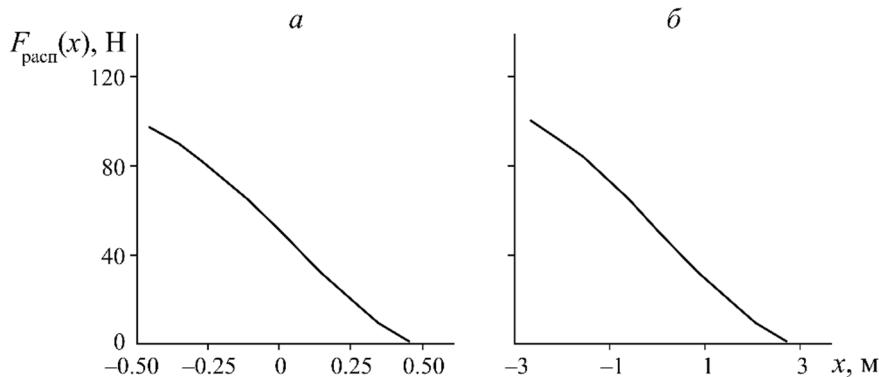


Рис. 2. Зависимость силы распиливания  $F_{\text{расп}}$  от координат  $x$  при значениях фокального коэффициента параболы  $q = 2.0$  (а);  $0.3$  (б)

Коэффициент в степенном выражении (9) для параболической траектории по отношению к круговой (4) изменится с 1.0 на 0.5. Однако из-за того, что фокус параболы расположен ближе к верхней части распиливаемой поверхности, чем центр заменяемой окружности в решаемой задаче, угол охвата в случае параболической траектории, как показали расчеты, увеличится в 2 раза. В связи с этим использование круговой траектории может быть достаточно корректным для некоторых расчетов, не требующих высокой точности. При определении таких параметров, как угол охвата блока канатной пилой  $\alpha$  и угол наклона действия силы  $P$  и  $Q$  относительно горизонтального положения  $\Omega$ , может произойти существенная ошибка, поэтому целесообразно использовать параболическую траекторию. Горизонтальное положение для случая горизонтального распиливания определяется поверхностью станочной тележки, на которую устанавливается распиливаемый блок.

Приведенный расчет силы распиливания достаточно точный при относительно небольших силах предварительного натяжения канатной пилы  $F_{\text{раст}} < 100 - 200$  Н [22]. Такой расчет дает наиболее точные результаты при исследовании работы карьерных алмазно-канатных машин. При больших значениях сил предварительного натяжения канатной пилы максимальные силы распиливания будут иметь тенденцию смещения к центру пропила, т. е. к нулевой отметке на графиках рис. 2. При канатном распиливании вершина параболической траектории реза смещается от приводной ветви каната к холостой.

Произвести моделирование смещения вершины параболы можно двумя способами: горизонтальным смещением (по оси  $x$ ) и поворотом-перемещением. На наш взгляд, более точным является способ, использующий уравнение повернутого-перемещенной параболы. Поворот параболы осуществляется путем подстановки значений (6) в (5) и решения полученного уравнения. Исходная  $y_1(x)$  и повернутая парабола  $y_2(x)$  представлены на рис. 3.

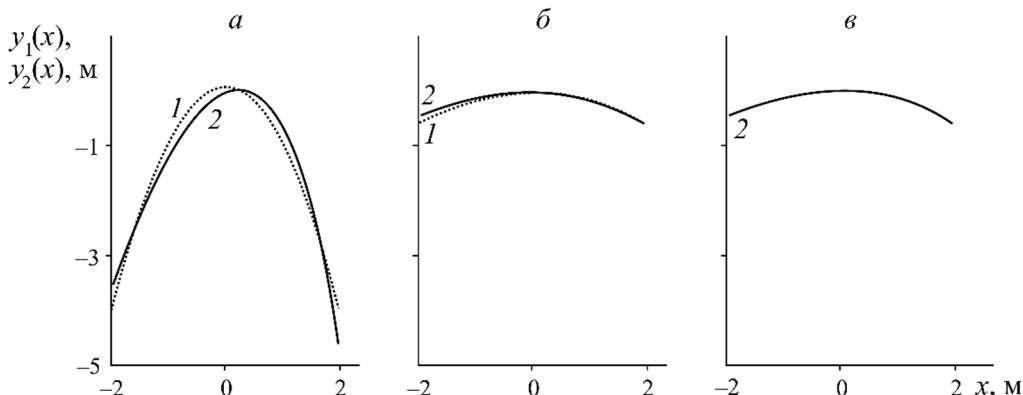


Рис. 3. Исходная (1) и повернутую-перемещенная (2) параболы, характеризующие траекторию реза при значениях  $q = 2.0$  (а),  $0.3$  (б, в)

Смещение вершины параболы при горизонтальном канатном распиливании в большинстве случаев вызовет незначительное изменение угла наклона каната относительно горизонтального положения  $\Omega$  и угла охвата блока канатной пилой  $\alpha$ . Для точного силового расчета необходимо проводить замеры геометрических параметров блока и реза по траектории запилов после распиливания блока, к которым относятся углы  $\Omega$ ,  $\alpha$  и смещения вершины параболы  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ .

В процессе алмазно-канатного распиливания траектория резания претерпевает большие изменения [3, 23, 24]. На начальной стадии, как правило, она повторяет в некотором приближении контуры монолита или блока (стадия 1). При распиливании траектория реза начинает принимать характер нескольких переходящих одна в другую парабол (стадия 2), постепенно приобретая форму одной повернутой-смещенной параболы (стадия 3).

Для алмазно-канатной карьерной машины рабочий процесс распиливания имеет следующие показатели: стадия 1 составляет 20–30 % от суммарного времени всей операции, стадия 2 — 30–40 %, стадия 3 — 40–50 %. Для канатного распиловочного станка стадии 1 и 2 занимают 10–30 %, стадия 3 — 70–90 %.

На рис. 4 отображена стадия 3 распиливания монолита алмазно-канатной карьерной машины (а) и блока одноканатным распиловочным станком (б).

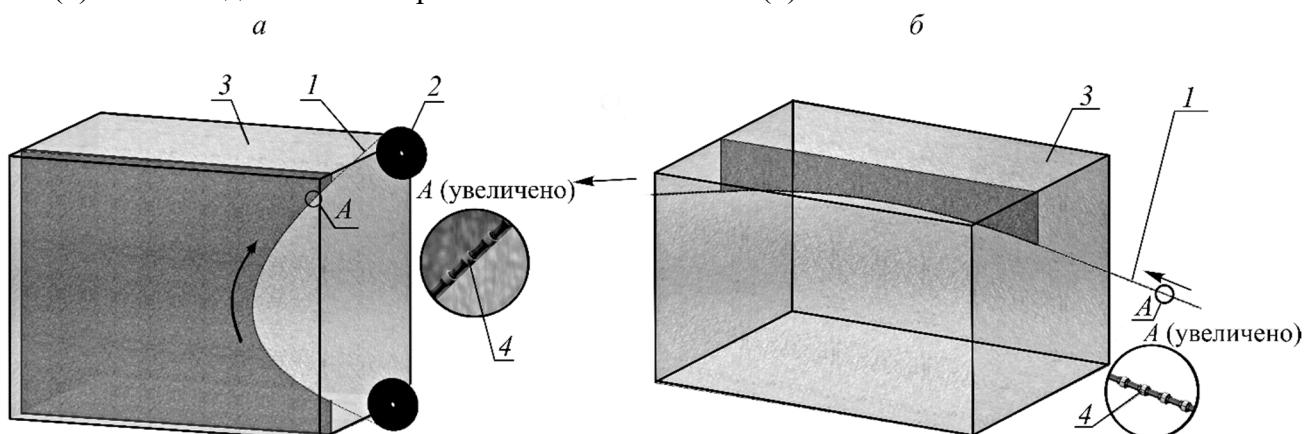


Рис. 4. Полупрозрачная модель систем: “алмазная канатная пила карьерной распиловочной машины – распиливаемый монолит” (а); “алмазная канатная пила распиловочного станка – распиливаемый блок” (б): 1 — пила; 2 — направляющий шкив; 3 — распиливаемый блок (или монолит); 4 — алмазные сегменты

При проведении расчетов силовых параметров алмазно-канатной пилы предлагается брать за основу расчетную схему с параболической траекторией распиливания и вводить коэффициенты повышения нагрузки для первой и второй стадии рабочей операции. Основой для прочностного анализа является представленный силовой анализ системы “алмазно-канатная пила – распиливаемый блок”.

На алмазно-канатной пиле могут использоваться режущие алмазные сегменты различных форм. Чаще всего применяются цилиндрические алмазные сегменты с острой кромкой [5]. Проведенный прочностной анализ таких сегментов показал, что зона острых кромок — концентратор высоких напряжений [13]. Материал режущего слоя представляет собой связку, в которой равномерно распределены синтетические алмазы. Алмазы во время рабочей операции под воздействием сил распиливания отделяют в режиме резания слой камня со дна пропила. Напряжение на кромке может возникать в алмазном сегменте в случае действия момента сил  $M_{тр}$  — тягового усилия и силы трения, появляющихся во время движения. В этом случае может приподниматься задняя рабочая грань сегмента (рис. 5).

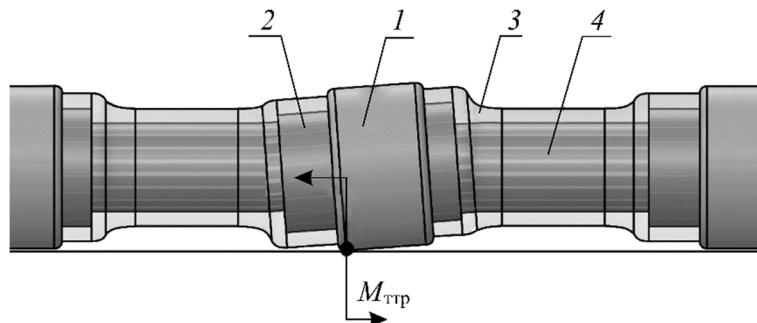


Рис. 5. Модель алмазной канатной пилы: 1 — алмазный слой; 2 — втулка; 3 — промежуточная вставка; 4 — трос

Эпюра полученных напряжений с использованием компьютерного моделирования в алмазном сегменте представлена на рис. 6. Сегменты с острой кромкой чаще всего применяются на алмазно-канатных пилах. На эпюре точками отмечены фиксирующие элементы внутри втулки — жесткое крепление алмазного сегмента и тягового каната. Стрелками, расположеными на передней режущей кромке алмазного сегмента, обозначены действующие на элемент силы. Силы, оказывающие воздействие вдоль вектора перемещения алмазного сегмента, в сумме составляют реакцию силы распиливания  $F_{расп}$ . Силы, действующие перпендикулярно вектору перемещения снизу вверх на алмазный сегмент, суммарно составляют реакцию силы нормального давления  $N$ .

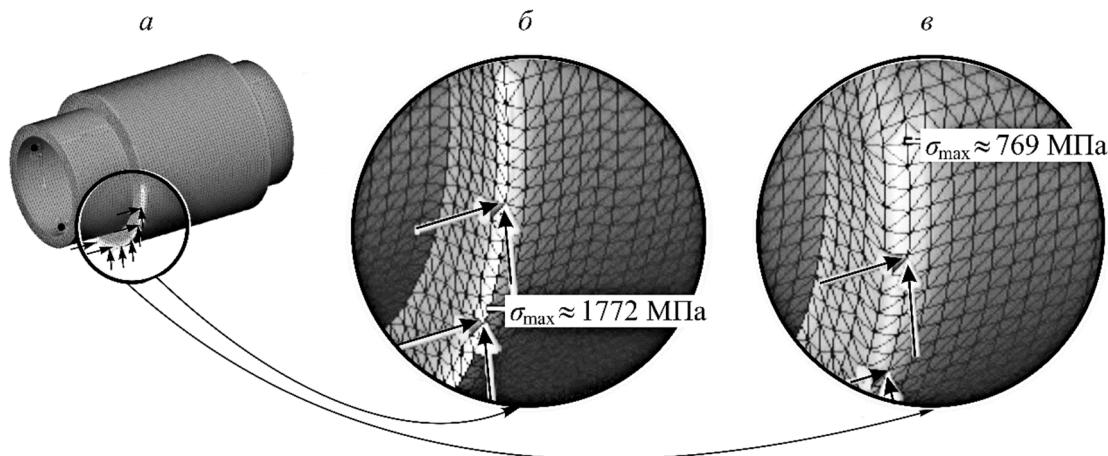


Рис. 6. Эквивалентные напряжения в цилиндрическом алмазном сегменте (a): с острой кромкой (б), со скругленной кромкой (в)

Исследовалась схема наложения нагрузок для самого неблагоприятного случая работы: нагрузка действует на переднюю нижнюю подковообразную режущую кромку. Полученные максимальные напряжения на кромке  $\sigma_{\max, kp} \approx 1772$  МПа (рис. 6б).

Эпюра напряжений в алмазном сегменте со скругленной кромкой показана на рис. 6в. Полученное максимальное напряжение на кромке составило  $\sigma_{\max, kp} \approx 769$  МПа. Напряжение снизилось в 2.3 раза по отношению к алмазному сегменту с острой кромкой, что свидетельствует об эффективности предлагаемого способа изготовления. В этой связи предлагается выпускать алмазные сегменты с предварительным скруглением, что значительно снижает напряжения на передней кромке при выполнении рабочей операции.

При распиливании прочных абразивных пород типа “гранит” часто применяется связка на кобальтовой основе М6-05 твердостью HRC = 38.8. Предел ее прочности при растяжении  $\sigma_b \approx 950 - 1000$  МПа. Исходя из данных параметров при применении скругленной кромки получено максимальное напряжение 769 МПа меньше предела прочности связки при растяжении. Это позволяет утверждать, что ее ресурс будет существенно выше.

С помощью МКЭ вычислена зависимость максимальных напряжений  $\sigma_{\max, скр}$  на кромке в алмазных сегментах диаметром  $d_{сегм} = 6.3$  мм от ее радиуса скругления  $R_{скр}$  путем определения максимальных напряжений для моделей с различными радиусами кромок (рис. 7).

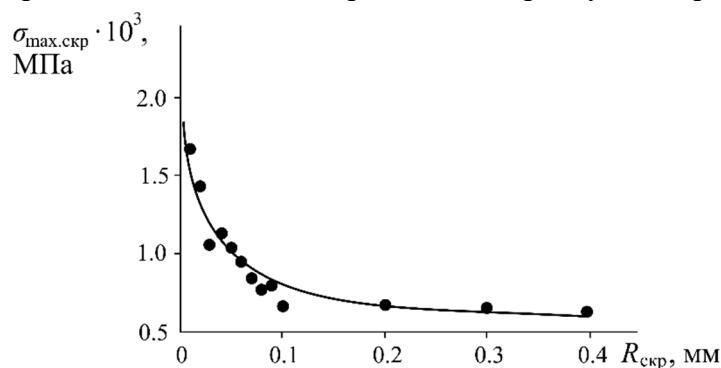


Рис. 7. Зависимость максимальных напряжений  $\sigma_{\max, скр}$  в алмазных сегментах со скругленной кромкой от радиуса скругления  $R_{скр}$

Результаты обрабатывались с использованием программы Mathcad [25]. Аппроксимация полученных точек проводилась с помощью подобранной гиперболической функции:

$$\sigma_{\max, скр} = \frac{k}{R_{скр} + \Delta R} + \sigma_{ac}, \quad (10)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $\Delta R$  — коррекция параметра  $R_{скр}$  по оси абсцисс;  $\sigma_{ac}$  — минимальное напряжение, соответствующее горизонтальной асимптоте гиперболы. В представленном исследовании получены следующие значения:  $k = 33$  Н/мм;  $\Delta R = 0.02$  мм;  $\sigma_{ac} = 520$  МПа.

Таким образом:

$$\sigma_{\max, скр} = \frac{33}{R_{скр} + 0.02} + 520.$$

Согласно рис. 7, для исследуемого алмазного сегмента минимальный радиус скругления должен составлять 0.2–0.3 мм (зона выполнивания кривой). С учетом процесса приработывания рабочей поверхности во время распиливания, радиус необходимо увеличивать до 0.3–0.4 мм. Установить рациональное значение радиуса скругления для различных диаметров алмазных сегментов по критерию прочности можно с помощью предложенного показателя относительного радиуса скругления  $r_{скр,d} = R_{скр} / d_{сегм}$ .

## ВЫВОДЫ

Для более точных расчетов силовых параметров системы “алмазно-канатная пила – блок горной породы” предложено вместо круговой использовать параболическую траекторию распиливания. Повышение точности расчета для разных схем распиливания может составлять  $\approx 5 - 30\%$ .

Рассчитан коэффициент увеличения нагрузки для начальной стадии рабочей операции, учитывающий наличие участков с малыми радиусами скруглений.

Получена зависимость максимальных напряжений в алмазных сегментах со скругленной кромкой от радиуса скругления, с помощью которой определяется рациональный радиус скругления рабочих кромок. Показатель относительного радиуса скругления позволяет устанавливать по критерию прочности рациональные размеры алмазных сегментов.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1. Павлов Ю. А., Светляков А. В., Моторный Н. И.** Индустрия декоративного камня: мировой уровень и перспективы развития в России // ГИАБ. — 2022. — № 1. — С. 162–178.
- 2. Lucisano G.** Studio e sperimentazione di leghe ad elevata deformazione per applicazioni nel settore Della prima lavorazione di materiali lapidei, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, 2012. — 68 p.
- 3. Dassanayake A., Samarakoon A. U., Chaminda S. P., Jayawardena C. L., Kondage Y. S., and Kannangara T. T.** A review on dimension stone extraction methods, Preprints, 2023. — 16 p.
- 4. Pershin G. D., Karaulov N. G., and Ulyakov M. S.** Selection of high-strength dimension stone cutting method, considering natural jointing, J. Min. Sci., 2015, Vol. 51, No. 1. — P. 129–137.
- 5. Першин Г. Д., Карапулов Г. А., Карапулов Г. А.** Добыча блоков мрамора алмазно-канатными пилами. — Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2003. — 103 с.
- 6. Rasti A., Adarmanabadi H. R., and Sahlabadi M. R.** Effects of controllable and uncontrollable parameters on diamond wire cutting performance using statistical analysis: a case study, Rudarsko-geološko naftni zbornik, 2021, Vol. 36, No. 4. — P. 21–32.
- 7. Konstanty J.** The mechanics of sawing granite with diamond wire, Int. J. Advanced Manufacturing Technol., 2021, Vol. 116. — P. 2591–2597.
- 8. Pershin G. D. and Ulyakov M. S.** Analysis of the effect of wire saw operation mode on stone cutting cost, J. Min. Sci., 2014, Vol. 50, No. 2. — P. 310–318.
- 9. Першин Г. Д., Уляков М. С., Пшеничная Е. Г., Габбасов Б. М.** Энергетический метод расчета производительности алмазно-канатных машин при добыче облицовочного камня // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. — 2016. — Т. 14. — № 2. — С. 18–24.
- 10. Wu H.** Wire sawing technology: a state-of-the-art review, Precision Eng., 2015. — P. 1–9.
- 11. Gomes D., Araujo A., Marques R., Patricio J., Lopez V., and Santos R. M.** Damage and failure evaluation of diamond wire for multi-wire sawing of hard stone blocks through modelling and numerical simulation, MATEC Web Conf., 2021, Vol. 349. — 04001.
- 12. Denkena B., Bergmann B., and Rahner B.-H.** A novel tool monitoring approach for diamond wire sawing, Prod. Eng., 2021, Vol. 16, No. 4. — P. 561–568.
- 13. Zhang L., Ru C., Wang L., Zhu Z., and Zhao C.** Analysis of impact characteristics of diamond-beaded rope and its influence on cutting efficiency and life, J. Physics: Conf. Series, 2019. — P. 1–7.
- 14. Fu M., Zhang P., and Wang F.** Modal analysis and experimental investigation into vibration of the diamond-beaded rope based on lumped mass, J. Low Frequency Noise Vibration and Active Control, 2022, Vol. 41, No. 1. — P. 12–26.
- 15. Wang L.-L., Pei Y.-C., Zhang H., Wang B., Liu Q.-J., Wang D.-X., Wang B.-H., and Sui W.-C.** An improved normal sawing force model with spherical abrasive particles for ultrasonic assisted inner diameter sawing, Preprint, 2022, Vol. 24. — P. 1–24.
- 16. Liu T., Ge P., Bi W., and Gao Y.** A new method of determining the slicing parameters for fixed diamond wire saw, Materials Sci. in Semiconductor Proc., 2020, Vol. 120, No. 12 — 105252.
- 17. Тарг С. М.** Курс теоретической механики. — М.: Высш. шк., 1986. — 416 с.

18. Картавый Н. Г., Сычев Ю. И., Волуев И. В. Оборудование для производства облицовочных материалов из природного камня. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.
19. Канатников А. Н., Крищенко А. П. Аналитическая геометрия. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. — 388 с.
20. Геворкян П. С. Высшая математика. Линейная алгебра и аналитическая геометрия. — М.: Физматлит, 2011. — 208 с.
21. Белоцерковский Д. Л. Кривые второго порядка на плоскости: методическое пособие. — М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2009. — 42 с.
22. Liang H., Feng J., Liu J., Zhang S., and Mao G. Analysis of adaptive adjustment mechanism for diamond beaded rope of wire saw, Sci. Advanced Materials, 2022, Vol. 14, No. 11. — P. 1756–1769.
23. Liu B. C., Zhang Z. P., and Sun Y. H. Sawing trajectory and mechanism of diamond wire saw, Key Eng. Materials, 2004, Vol. 259–260. — P. 395–400.
24. Ahn S. K. Framework for investigating wire saw rock cutting, Int. J. Mach. Tools and Manufacture, Vol. 155. — 103581.
25. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. Mathcad 8 PRO в математике, физике и Internet. — М.: Нолидж, 2000. — 512 с.

*Поступила в редакцию 12/IX 2023*

*После доработки 25/XI 2023*

*Принята к публикации 24/I 2024*