

УДК 622.23.05

**ЖАРУУЧУ ТҮЗМӨКТҮН КЕРИЛҮҮЧҮ
ЖААКТАРЫНЫН ЖУМУШЧУ БЕТИНИН
КАЛЫБЫНЫН ЖАРЫЛУУ ТЕГИЗДИГИНДЕГИ
ЧЫҢАЛУУЛАРГА ТААСИРИ (Бөлүк2)**

**ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
РАЗДВИЖНЫХ ЩЕК РАСКАЛЫВАЮЩЕГО
УСТРОЙСТВА НА НАПРЯЖЕНИЯ В ПЛОСКОСТИ
РАСКОЛА КАМНЯ (Часть 2)**

**INFLUENCE OF THE SHAPE OF THE WORKING
SURFACE OF THE SLIDING JAWS OF THE CLIVING
DEVICE ON THE STRESS IN THE PLANE OF THE
STONE SPILL (Part2)**

Ж. Усубалиев, К. Т. Эликбаев, Т. О. Райымбабаев
J. Usubaliev, K. T. Elikbaev, T. O. Raiymbambaev

Ушул макланын экинчи бөлүгүндө гидрошынаалык түзүлүштүн жаруучу баичасындагы кошумча керилме жаактарынын жумушчу бетинин калыбы учу кичи радиусу менен мииз түрүндө жасалган учурунда табигый таштын жарылуу тегиздигинде пайда болгон чыңалууга тийгизген таасири каралат. Чектелген контакт аянтына ээ болгон кошумча керилме жаактардын жумушчу бетинин калыбына байланыштуу, бул учурда эсептөө эки цилиндрлик нерсенин сызыгындагы тийимдик чыңалууларды аныктоого айланат. Назарияттык изилдөөлөрдүн натыйжалары жаруучу түзүлүштөрдүн ажыратуучу бөлүгүнүн конструкциялык эсептөөлөрү үчүн колдонулат.

В работе представлен раскалывающий орган гидроклинового устройства, отличающийся от существующих наличием двух дополнительных раздвижных щек. Определяется величина возникающих эквивалентных напряжений раскола. Во второй части статьи рассматривается третий вариант формы рабочей поверхности дополнительных раздвижных щек раскалывающего устройства, выполненной в виде клина с малым радиусом закругления вершины. Из-за того что форма рабочей поверхности дополнительных раздвижных щек имеет ограниченную площадку соприкосновения с материалом, то в данном случае расчет сводится к определению контактного напряжения на линии двух цилиндрических тел. Результаты теоретических исследований применимы для проекторочных расчетов раскалывающих устройств.

In the second part of this article, the case of the influence of the shape of the working surface of the additional sliding cheeks of the splitting device of the hydro-wedge device on the resulting stress in the plane of the splitting of natural stone, made in the form of a wedge with a small radius of the top, is considered. Due to the shape of the working surface of the additional sliding cheeks, which have a limited contact area, in this case, the calculation is reduced to determining the contact stress on the line of two cylindrical bodies. The results of theoretical studies are applicable for design calculations of the embedded part of splitting devices.

Түйүнсөздөр: жаруучу түзүлүш, сүрүлүү коэффициенти, камтылган бөлүк, керилме жаак, тешик, элемент, кысуу чыңалуусу, чоюу (жаруу) чыңалуусу, тийимдик чыңалуу, бөлүштүрүлгөн жүк, бөлүү (жаруу) күчү.

Ключевые слова: раскалывающее устройство, коэффициент трения, закладная часть, раздвижная щека, шпур, элемент, напряжение сжатия, напряжение растяжения (раскола), контактное напряжение, распределенная нагрузка, усилие раскола.

Keywords: splitting device, coefficient of friction, embedded part, sliding jaw, hole, element, compression stress, tensile (split) stress, contact stress, distributed load, split force.

В представленной статье, в продолжение первой части работы, где рассмотрены два варианта формы рабочей поверхности дополнительных раздвижных щек раскалывающего устройства в виде сектора окружности и в виде призмы с острой кромкой, исследуется влияние формы рабочей поверхности раздвижных щек, выполненных с заострением с достаточно малым углом и радиусом закругления вершины на напряжение в плоскости раскола камня при отделении блока камня от массива. В этом случае расчет сводится к определению контактного напряжения на ограниченной площадке контакта.

Третий случай. Поперечные силы F_x на линии соприкосновения ребра граней дополнительной щеки с породой создают контактное напряжение σ_H .

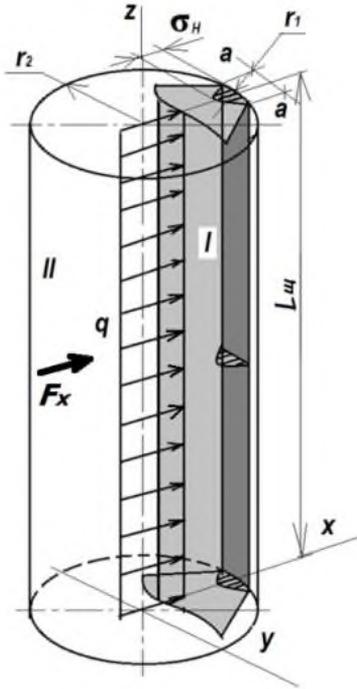


Рисунок 1 – Картина контактного напряжения на линии соприкосновения ребра дополнительной щеки с поверхностью шпура

На рисунке 1 изображена картина соприкосновения ребра дополнительной щеки с поверхностью шпура перед образованием начала трещины, которую можно представить как взаимодействие двух цилиндров с параллельными осями. Здесь поперечная сила F_x представлена как распределенная по всей длине контакта $l_{щ}$ равномерная нагрузка q , создающая контактное напряжение сжатия на площадке

$S=2a \cdot l_{щ}$. При этом точки максимальных нормальных напряжений σ_H располагаются на продольной оси симметрии контактной площадки.

Значение максимального контактного напряжения для двух цилиндрических тел с линейным контактом по формуле Герца будет равно [2, 7]:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{q}{\pi \cdot \rho_{np} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}} \quad \text{или} \quad (1)$$

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{q}{\rho_{np} \pi \left[E_1 (1-\mu_2^2) + E_2 (1-\mu_1^2) \right]} \frac{E_1 E_2}}},$$

где q – распределенная нагрузка, Н/м; $q = \frac{F_x}{l_{щ}}$; E_1 – модуль упругости материала раздвижной щеки [2]; E_2 – модуль упругости породы (таблица 1) [4, 7]; ρ_{np} – приведенный радиус кривизны, мм; μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона для металлов и породы.

Таблица 1 – Модуль упругости горных пород [4, 7]

Группа	Тип грунта	Модуль упругости, МПа
Магматические	Граниты	39 – 78
	Граниты порфировидные	47 – 74
	Гранодиориты	55 – 73
	Сиениты	60 - 65
	Габбро	88 - 105
	Габбро-нориты	88 – 96
	Диабазы	21 – 120
	Бронзититы	140 - 146
	Оливиниты	150 - 159
	Перидотиты	152 – 160
	Пироксениты оливиновые	160 – 166
Метаморфические	Гнейсы	39 – 105
	Скарны	67 – 130
	Кварциты	75 – 95
	Мраморы	75 – 82
	Катаклизированные туфы	42 – 53
	Сланцы кристаллические	49 – 60
	Сланцы песчаноглинистые	5 – 75

Коэффициент Пуассона для конструкционных металлов располагается в пределах $\mu = 0,25...0,35$. Без существенной погрешности можно принимать $\mu_1 = 0,3$; μ_2 – коэффициент Пуассона для грунта необходимо принимать по ГОСТ 12248- 2010 (таблица 2) [5, 8].

Таблица 2 – Коэффициент Пуассона [1]

Порода	Коэффициент Пуассона, μ
Для скальных грунтов	0,2
Для крупнообломочных грунтов	0,27
Для песков и супесей	0,3
Для суглинков	0,35
Для глин	0,12

Приведенный радиус кривизны

$$\frac{1}{\rho_{np}} = \frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2}, \quad (2)$$

где ρ_1 – радиус кривизны 1-го цилиндра, равный радиусу кривизны в точке контакта, $\rho_1 = r_1$; ρ_2 – радиус кривизны 2-го цилиндра, $\rho_2 = r_2$.

Формула (1) справедлива для любых цилиндров.

При контакте цилиндра с плоскостью $r_2 = \infty$ берется знак «+». Знак «-» минус относится к случаю внутреннего контакта (когда поверхность одного из цилиндров вогнутая), т.е. рассматриваемый случай.

Тогда приведенный радиус кривизны будет иметь вид:

$$\frac{1}{\rho_{np}} = \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \quad (3)$$

При подстановке в (1) вместо распределенной нагрузки q значение силы F_x данная зависимость примет следующий вид:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_o}{4tg \frac{\alpha}{2}} \left(1 - \frac{f}{4 \left(tg \frac{\alpha}{2} + f \right)} \right) \cdot \frac{E_1 E_2}{\rho_{np} \pi \left[E_1 (1 - \mu_2^2) + E_2 (1 - \mu_1^2) \right]}} \quad (4)$$

Если также пренебречь трением, то зависимость (4) можно записать как:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_o}{4tg \frac{\alpha}{2} \cdot \rho_{np}} \cdot \frac{E_1 E_2}{\pi \left[E_1 (1 - \mu_2^2) + E_2 (1 - \mu_1^2) \right]}} \quad (5)$$

Для количественной оценки возникающих напряжений в плоскости раскола камня выберем породу камня средней крепости, например – гранит 2-го класса прочности с пределом прочности на растяжение $[\sigma_{рас}] = 4 - 8$ МПа [11, табл. 1] и с пределом прочности на сжатие в сухом состоянии $[\sigma_{сж}] = 48 - 280$ МПа [11, табл. 2], площадь раскола материала между шпурами $S_p = l \cdot h = 250 \cdot 500 = 125000$ мм² = 1250 см² = 0,125 м² [11, рис. 5]. Для примера принято гидроклиновое раскалывающее устройство КМ-26 с раскалывающим усилием 2300 кН, углом клина $\alpha = 4^\circ$ [9].

Как известно, напряжение раскола (разрыва), возникающее в сечении материала, определяется по формуле $\sigma_p = \frac{F_p}{S_p}$, где F_p – раскалывающая сила, S_p – площадь раскола.

Если принять, что $\sigma_3 = \sigma_{рас}$, тогда требуемое усилие раскола будет:

$$F_{рас} = \sigma_3 \cdot S_p. \quad (6)$$

Эквивалентное напряжение в плоскости раскола от действия раскалывающих усилий для **первого случая**, когда форма рабочих поверхностей раздвижных щек выполнена в виде сектора окружности по зависимости (10) (см. 1 часть), равна 5,68 МПа.

Требуемое усилие раскола, определяемое по формуле (6), $F_{рас} = \sigma_3 \cdot S_p = 710$ кН.

Для **второго случая**, когда рабочие поверхности дополнительных раздвижных щек имеют **призматическую форму** с острой кромкой.

Зная, что $F_y = 2300$ кН из условия (1) (см. 1 часть), $F_y = F_x = \frac{F_o}{4 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$,

без учета сил трения осевое усилие будет $F_o = 4 F_y \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = 322$ кН.

Тогда по зависимости (12) (см. 1 часть) раскалывающее усилие F'_y от усилия можно найти как:

$$F'_x = \frac{F_o}{8 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma'}{2} \cdot \sin \frac{\gamma'}{2}} = 7252 \text{ кН},$$

где $\gamma' = \frac{180 - \gamma}{2}$ – угол между направлением действия усилия F'_x и осью x , здесь $\gamma = 90^\circ$ – угол заострения призмы (принят конструктивно).

$$\gamma' = \frac{180 - \gamma}{2} = 45^\circ$$

Отсюда раскалывающее усилие будет равно $F_{рас} = F_y + F_x^y = 9552 \text{ кН}$. Тогда на раскалываемой площади $S_p = 1250 \text{ см}^2$ возникает раскалывающее напряжение [11, формула (15)]:

$$\sigma_{рас} = \frac{F_{рас}}{S_p} = 76,41 \text{ МПа}$$

Приняв $\sigma_{сж}^x$ равным $[\sigma_{сж}]$, найдем $\Psi = [\sigma_{рас}]/[\sigma_{сж}] = 0,271$ и определим эквивалентное напряжение в плоскости раскола:

$$\sigma_3 = \frac{(\psi - 1) \cdot (\sigma_{сж}^x + \sigma_{рас}) + \sqrt{(1 - \psi)^2 \cdot (\sigma_{сж}^x + \sigma_{рас})^2 + 4\psi(1 - \psi) \cdot (\sigma_{сж}^x + \sigma_{рас})}}{2\psi} = 1,85 \text{ МПа}$$

Требуемое усилие раскола $F_{рас} = \sigma_3 \cdot S_p = 231,25 \text{ кН}$.

При *третьем случае*, когда рабочая часть дополнительной раздвижной щеки выполнена с заострением с достаточно малым углом и радиусом закругления вершины, расчет проводится на определение контактного напряжения по формуле (5):

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_o}{4tg \frac{\alpha}{2} \cdot \rho_{np}} \frac{E_1 E_2}{\pi [E_1 (1 - \mu_2^2) + E_2 (1 - \mu_1^2)]}},$$

здесь $E_1 = 0,2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ – модуль упругости для легированной стали [10], $E_2 = 39 - 78 \text{ МПа}$ – модуль упругости горных пород (табл. 1), $\mu_1 = 0,3$ – коэффициент Пуассона для конструкционных металлов [10]; $\mu_2 = 0,2$ – коэффициент Пуассона для грунта необходимо принимать по ГОСТ 12248- 2010 (таблица 2) [5, 8].

Приведенный радиус кривизны ρ_{np} для рассматриваемого случая имеет вид:

$$\frac{1}{\rho_{np}} = \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} = \frac{1}{0,1} - \frac{1}{2,1} = 9,52, \text{ тогда } \rho_{np} = 0,105 \text{ см},$$

где ρ_1 – радиус кривизны 1-го цилиндра, равный радиусу кривизны в точке контакта,

$$\rho_1 = r_1 = 10^{-1} \text{ см};$$

ρ_2 – радиус кривизны 2-го цилиндра,

$$\rho_2 = r_2 = 2,1 \cdot 10^{-1} \text{ см.}$$

Контактное напряжение $\sigma_H = 235 \text{ МПа}$.

В третьем случае взаимодействие происходит линейно, на ограниченной площадке контакта, то для определения эквивалентного напряжения в плоскости раскола возможно применение зависимости (24) [11], т.е.

$$\sigma_3 = \frac{(\psi - 1) \cdot (\sigma_{сж}^x + \sigma_{рас}) + \sqrt{(1 - \psi)^2 \cdot (\sigma_{сж}^x + \sigma_{рас})^2 + 4\psi(\sigma_{сж}^x - \sigma_{рас})^2} - (1 - \psi) \cdot (\sigma_{сж}^x + \sigma_{рас})}{2\psi}$$

Тогда раскалывающее напряжение, как и во втором случае, будет $\sigma_{рас} = 76,46 \text{ МПа}$.

Приняв $\sigma_{сж}^x$ равным $\sigma_H = 235 \text{ МПа}$, найдем $\Psi = [\sigma_{рас}]/[\sigma_H] = 76,46/235 = 0,325$ и определим эквивалентное напряжение в плоскости раскола как:

$$\sigma_3 = \frac{(\psi - 1) \cdot (\sigma_H + \sigma_{рас}) + \sqrt{(1 - \psi)^2 \cdot (\sigma_H + \sigma_{рас})^2 + 4\psi(\sigma_H - \sigma_{рас})^2} - (1 - \psi) \cdot (\sigma_H + \sigma_{рас})}{2\psi} = 2,745 \text{ МПа}$$

Требуемое усилие раскола: $F_{рас} = \sigma_3 \cdot S_p = 343,125 \text{ кН}$.

Таким образом имеем:

для первого случая $\sigma_3 = 5,68 \text{ МПа}$; $F_{рас} = 710 \text{ кН}$.

для второго случая $\sigma_3 = 1,85 \text{ МПа}$; $F_{рас} = 231,25 \text{ кН}$.

для третьего случая $\sigma_3 = 2,745 \text{ МПа}$; $F_{рас} = 343,125 \text{ кН}$.

Как видно из результатов вычислений, во втором случае величина эквивалентного напряжения в плоскости раскола материала является наименьшей, а следовательно, и требуемое усилие раскола наименьшее, т. е. когда рабочая поверхность дополнительных рабочих щек выполнена в виде призмы, при равенности всех прочих условий, в этом случае для создания достаточного раскалывающего напряжения потребуется меньшее осевое усилие раскалывающего клина.

Выводы

Из рассмотренных форм рабочей поверхности дополнительных раздвижных щек при расколе камня раскалывающими устройствами можно сделать следующие выводы:

- при расколе твердого материала раскалывающим устройством с дополнительными раздвижными щеками, расположенными взаимно перпендикулярно основным, плоскость раскола испытывает одновременно напряжение растяжения и напряжение сжатия;
- к раскалывающей силе от основных щек добавляется сонаправленная составляющая от усилия сжатия дополнительных щек;
- при округлой форме рабочей поверхности дополнительных щек определение составляющей от усилия сжатия довольно затруднительно из-за непостоянства угла δ ;
- при призматической форме рабочей поверхности дополнительных рабочих щек с углом заострения требуется меньшее раскалывающее усилие, а следовательно, и меньшее осевое усилие на клин;
- при рабочей части дополнительной щеки, выполненной с достаточно малым углом заострения и радиусом закругления вершины, создает контактное напряжение на ограниченной площадке контакта, что усиливает напряжение на этом участке и способствует скорому образованию начала трещины в материале.

Литература

1. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. - М: Наука, 1976. - С. 608.
2. Основы технологии машиностроения. https://osntm.ru/kt_tren.html. Дата обращения: 10.08.22.
3. Теории прочности скальных и полускальных пород. <http://tnaant.ru/inzhernaya-geologiya/784-teorii-prochnosti-skalnyh-i-poluskalnyh-porod.html>. Дата обращения: 1.09.22.
4. https://ru.wikipedia.org/wiki/Модуль_упругости. Дата обращения: 8.09.22.

5. Допускаемые напряжения и характеристики, <https://sopromatt.ru/spravka/48-dopuskaemye-naprjazhenija-i-kharakteristiki.html>.
Дата обращения 17.06.2022.
6. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. Дата обращения: 12.09.22.
7. Нескоромных В. В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ / Учеб. пособие. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. – 298с. <https://studfile.net/preview/9521490/page:4/>
Дата обращения 17.06.2022.
8. Пшеничная Е. Г. Обоснование рациональных параметров технологии добычи гранитных блоков с применением невзрывчатых разрушающих средств. [Текст]: / Пшеничная Е. Г. / Диссертация... к.т.н. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – С 131.
9. Разработка импортозамещающей техники и технологий для приоритетных отраслей промышленности Кыргызстана. Отчет НИР ИМАШ НАН КР, Бишкек. 2018. – С. 81.
10. Справочник металлиста. В 5 томах. Том 2. / Под ред. Рахштадта А. Г. – М.: Машиностроение, 1976. – С. 718.
11. Усубалиев Ж., Эликбаев К. Т., Райымбабаев Т. О. Влияние формы рабочей поверхности раздвижных щек раскалывающего устройства на напряжение в плоскости раскола камня (часть 1) - Машиноведение. – Вып. 17. – Бишкек: ИМА НАН КР, 2023. – С. 116–130.