

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

А. А. АБРАМЯН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКАЛЫВАНИЯ
ЕСТЕСТВЕННЫХ КАМНЕЙ

Многочисленные методы механической добычи и обработки естественных камней в настоящее время осуществляются преимущественно процессом резания. Однако, наряду с целым рядом экономически целесообразных факторов использования принципа резания в обработке и добыче камней, выступает характерная для всех разновидностей процесса их отрицательная особенность — повышенная энергоемкость, обусловленная необходимостью мельчайшего разрушения значительного объема обрабатываемого материала и влекущая за собой чрезмерный износ режущего инструмента, а следовательно и дополнительно прогрессирующий рост энергоемкости процесса.

К проблеме уменьшения энергоемкости процесса резания можно подойти двояко, либо изменением геометрии режущего инструмента и режимного поля процесса, либо же изысканием новых методов воздействия на обрабатываемый материал.

Известное из многовекового опыта ручной добычи свойство камня давать плоские отколы является достаточной предпосылкой возможности создания скалывающего механизма для разделки крупных каменных блоков на грубооколотый штучный камень.

Вполне понятно, что любые изыскания в этой области должны иметь своим началом всестороннее изучение самого процесса скалывания с установлением оптимальных условий процесса. В настоящей статье приводятся результаты экспериментального исследования процесса скалывания.

В качестве экспериментальной установки использован десятитонный рычажный пресс. На нижнем зажиме пресса установлена плита с оправкой для сменных ножей; подобная же оправка закреплена в верхнем зажиме пресса. В оправках крепятся ножи, воздействующие на камень. Ниже на рис. 1 приводится общий вид установки.

При принятой схеме воздействия ножей на камень некоторое влияние на скалывающее усилие оказывает изгибающий момент от собственного веса камня. Однако подсчеты показывают, что растягивающие напряжения от изгиба по сравнению с напряжениями откола пренебрежимо малы.

Ножи для экспериментов были изготовлены из углеродистой стали У-12 с последующей термообработкой и имеют форму двусторон-

него клина с углами заострения: 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 60° , 90° .

Испытываемый материал—арктический и джрвежский туфы. Образцы были изготовлены в виде прямоугольных параллелепипедов. При этом

в I—группу вошли образцы с поперечными размерами $b=15$ см; $h=15$ см;

во II—группу с размерами $b=15$ см и $h=3 \div 25$ см;

в III—группу с размерами $h=10$ см и $b=3 \div 15$ см.

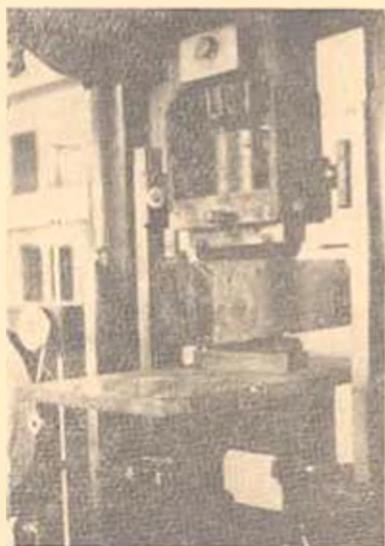


Рис. 1

Первоочередной задачей проведенного исследования являлось определение влияния угла заострения ножа на скалывающее усилие с тем, чтобы, определяя его оптимальную величину, все остальные исследования проводить при этом угле заострения. Методика проведения опытов заключалась в том, что влияние угла β изучилось при постоянстве всех прочих факторов, при этом длина контакта ножа с камнем была равна ширине камня. Суммарная скорость внедрения ножей $v=10$ мм/мин. Руководствуясь приведенным, образцы для экспериментов были отобраны из I группы, т. е. $b \times h = 15 \times 15$ см² = const.

Некоторое затруднение в экспериментировании обусловлено, во-первых, значительным различием прочности отдельных образцов камня, во-вторых, отсутствием образцов с длиной достаточною для производства на одном образце хотя бы по одному отколу ножом, имеющим различные углы заострения.

В связи со сказанным применена следующая методика:

Образцы I группы были разделены на 4 подгруппы по 6 образцов в каждой;

Основной задачей экспериментов явилось определение следующей зависимости для проектирования камнераскалывающей машины:

$$P = f(b, h, \beta, v, b_k),$$

где

P —усилие скалывания в кг;

b —ширина скалываемого камня в см;

h —высота скалываемого камня в см;

β —угол заострения ножа в градусах;

v —скорость внедрения ножа в мм/мин;

b_k —длина линии контакта ножа с камнем в см.

Формула эта предполагает фиксированные упругие характеристики и прочность.

2. Ножи были разделены на 4 группы.

В ножах 1-ой группы — $\beta = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$;

2-й группы — $\beta = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$;

3-ей группы — $\beta = 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$;

4-ой группы — $\beta = 15^\circ, 30^\circ, 90^\circ$.

Каждой группой ножей произведено по одному отколу на каждом образце из соответствующей подгруппы образцов. За усилие, необходимое для откола образца ножом с данным углом заострения, принималось среднее арифметическое усилий шести различных отколов, произведенных тем же ножом в соответствующих подгруппах образцов. Увязка показаний трех первых групп осуществлена четвертой группой ножей на соответствующей подгруппе образцов. Графическое изображение экспериментальных данных приведено на рис. 2.

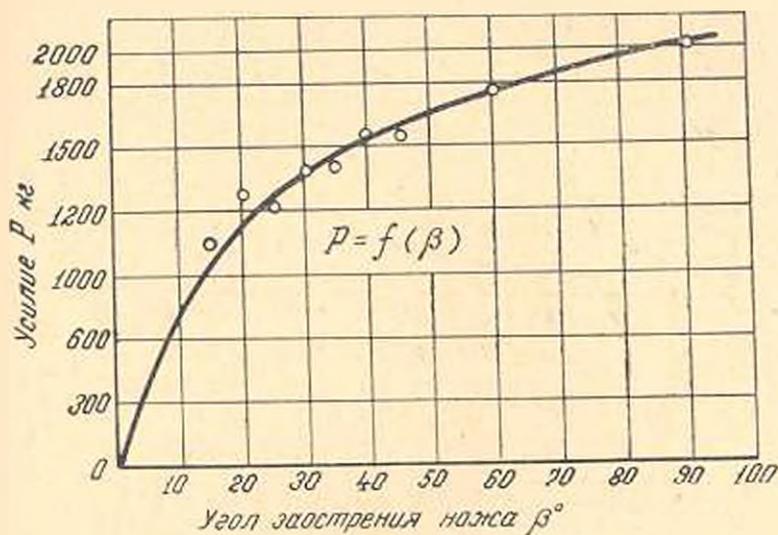


Рис. 2.

Зависимость $p = f(\beta)$ в логарифмической сетке изображается прямой, т. е. зависимость $p = f(\beta)$ является степенной функцией и следовательно имеет вид: $p = c(\beta)^x$.

В частности, в произведенных нами опытах с арктическим туфом показатель степени $x = 0,44$.

Непосредственным определением работы, затрачиваемой на откол при различных углах заострения ножа, установлено, что работа скалывания растет с увеличением угла заострения ножа, но рост работы скалывания менее интенсивен нежели рост усилия скалывания при увеличении угла заострения. Последнее обстоятельство свидетельствует об убывающем характере зависимости глубины внедрения ножей с увеличением угла заострения, что подтверждается экспериментами.

Под действием внедряемых в камень ножей в большинстве случаев получаются отколы, по виду близкие к плоскости. Но не всегда плоскость откола совпадает с плоскостью, проходящей через лезвия ножей. Экспериментально установлено, что чем больше угол заострения ножей, тем больше и вероятность правильного откола, т. е. совпадения плоскости откола с плоскостью ножей. Ниже на рис. 3 приводится график изменения отношения числа правильных отколов к числу неправильных с изменением угла заострения ножей.

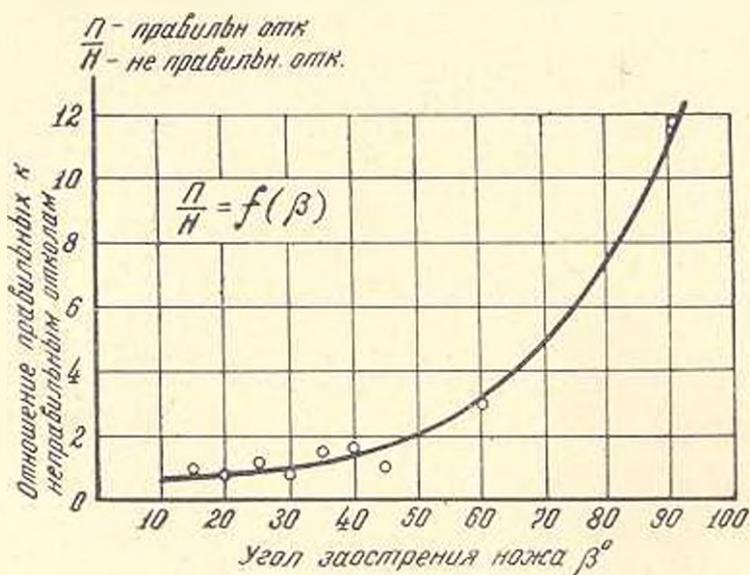


Рис. 3.

Исходя из определенных зависимостей усилия и работы скалывания от угла заострения ножей, следовало бы за оптимальное значение угла заострения принять наименьшую величину угла, лимитируемую лишь достаточной механической прочностью ножа. Но поскольку нашей основной задачей является определение такого оптимального угла заострения ножа, при котором скалывающий механизм сможет осуществлять разделку больших блоков на штучный камень, то оптимальным значением угла заострения фактически является $\beta = 90^\circ$, так как наибольшая вероятность правильного откола обеспечивается именно ножом с этим углом заострения.

Ввиду большого расхождения в прочности отдельных образцов III группы, предназначенных для определения влияния ширины образца на усилие скалывания, пришлось применить следующую методику: на образце с высотой h_1 производились несколько отколов при различной ширине отколов, то же повторялось с образцами высотой h_2 , h_3 и т. д. Таким образом получилось семейство кривых зависимости скалывающего усилия от ширины камня, для различных высот и различных прочностей, что исключает и влияние высоты и материала камня на определяемую зависимость $p = f(b)$.

Ниже на рис. 4. приведена зависимость $p=f(b)$.

Как видно из графика, имеем линейную зависимость $p=kb$, где k —коэффициент пропорциональности, зависящий от прочих параметров процесса.

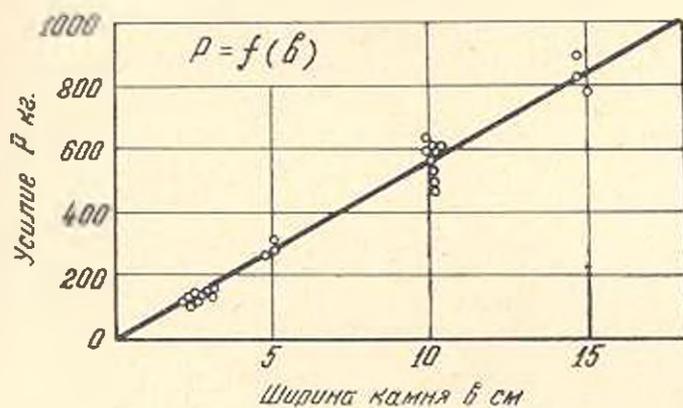


Рис. 4.

Подобным образом было определено влияние высоты камня на скалывающее усилие, а для более четкого выявления характера зависимости $p=f(h)$ дополнительно были использованы контрольные образцы шириною в 15 см и высотами в 50 см и 65 см.

Зависимость $p=f(h)$ приведена на рис. 5.

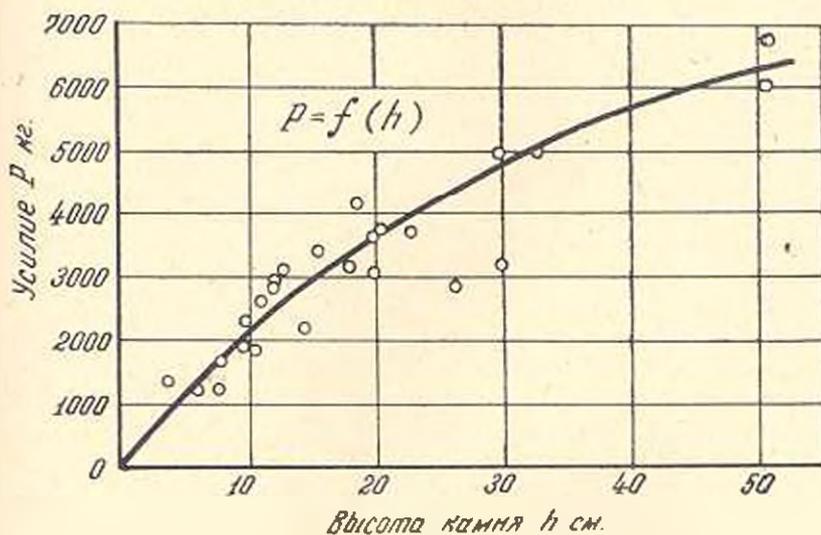


Рис. 5.

Из графика следует, что увеличение высоты h вызывает менее интенсивный рост усилия скалывания, нежели увеличение ширины b . Математическое выражение зависимости $p=f(h)$, найденное методом наименьших квадратов, представляется формулой $p=Bh^{0,62}$, где B — постоянная, зависящая от прочих параметров процесса.

В предыдущих экспериментах откол производился при контакте ножа по всей ширине камня и имела место зависимость $p=kb$.

Если же ножи устанавливаются на некоторой части b_k ширины камня b , оставив остальную часть $b-b_k$ свободной от воздействия внешних сил, то, как показали эксперименты, усилие скалывания будет меняться по другому закону.

Ниже на рис. 6 приводится график изменения усилия скалывания с изменением отношения длины контакта b_k ко всей ширине камня b при постоянных ширине и высоте камня.

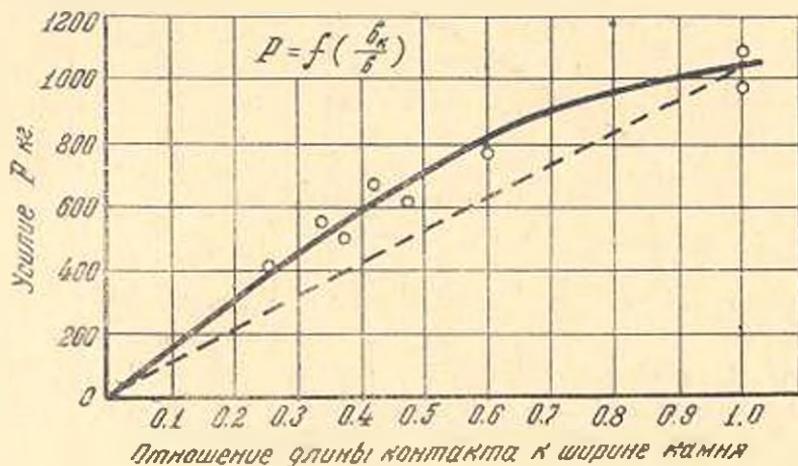


Рис. 6.

Пунктирной прямой показано изменение усилия скалывания в том случае, когда ширина камня равна b_k , а нож находится в контакте по всей ширине. Из графика вытекает, что уменьшение контакта влечет за собой значительное падение скалывающего усилия;

однако экспериментально установлено, что при $\frac{b_k}{b} < 0,5$ уменьшается

вероятность правильного откола, а при $\frac{b_k}{b} < 0,1$ ставится под сомнение и возможность последнего.

Возьмем два образца из одного камня, одинаковой высоты и различной ширины. Производя откол узкого при контакте ножа, равном ширине камня, а широкого при контакте, равном ширине узкого, будем иметь во втором случае повышенное усилие скалывания. Графически определяемый, как разность ординат кривой и пунктирной прямой (рис. 6), избыток усилия во втором случае необходим для преодоления сил сцепления камня в части сечения, свободного от воздействия ножей.

Представленный для определения аналитического выражения зависимости $P=f(\frac{b_k}{b})$ в логарифмической сетке график кривой выравнивается, что свидетельствует о степенном характере зависимости.

Определив из графика показатель степени y , можем представить усилие скалывания следующей обобщенной формулой $P = K_3^x b h^x \left(\frac{h_x}{b}\right)^y$ или $P = K_3^x b_k^y b^{1-y} h^x$.

При проектировании скалывающего механизма необходимо использовать возможность применения прерывистого ножа, дающего около 30% понижения усилия скалывания, в чем убеждаемся примерным расчетом, приняв на основе изложенных данных $y=0,5$ и $b_k=0,5 b$, имеем: $P = K_3^x (0,5 b)^{0,5} b^{0,5} h^x = 0,71 K_3^x b h^x$.

При изучении влияния скорости внедрения ножей в пределах от 1 до 150 мм/мин существенного влияния скорости на усилие скалывания арктического туфа не было установлено.

Иная картина наблюдалась при экспериментах с джрвежским туфом. С увеличением скорости от 1 до 50 мм/мин растет до некоторого максимума и усилие скалывания, а при скорости 150 мм/мин оно убывает более чем в 2 раза по сравнению с максимальной. Отсутствие возможности экспериментирования на данном прессе в диапазонах скоростей от 50 мм/мин до 150 мм/мин из-за конструктивных особенностей пресса не дало возможности установить точную зависимость влияния скорости на усилие скалывания.

Вопрос о влиянии физико-механических свойств камня на скалывающее усилие не изучался со всей полнотой. Рассмотрению подверглось лишь влияние слоистости и прочности камня.

Как известно, камень является неоднородным и анизотропным телом и на ряде образцов можно отчетливо наблюдать направление слоистости или напластования. Хотя с целью выявления влияния последних на усилие скалывания специальных экспериментов не ставилось, тем не менее можно утверждать, что слоистость камня почти не влияет на скалывающее усилие арктического туфа. Это утверждение опирается на наблюдения более тысячи отколов при всех предыдущих экспериментах.

В процессе экспериментирования некоторое внимание было уделено вопросу влияния расстояния a от края образца до ножа на величину скалывающего усилия. При этом установлено, что в случаях полного откола (т. е. по всей высоте камня) расстояние ножа от края образца на усилие скалывания не влияет. Однако это расстояние влияет на вероятность правильного откола и в случаях $a < 0,5 h$ может иметь место лишь частичный откол (рис. 7). Понятно, что в этом случае усилие скалывания может оказаться несколько меньше, чем при полном отколе. При больших h , ножи можно устанавливать на расстояниях и несколько меньших, чем $0,5 h$ от края образца.

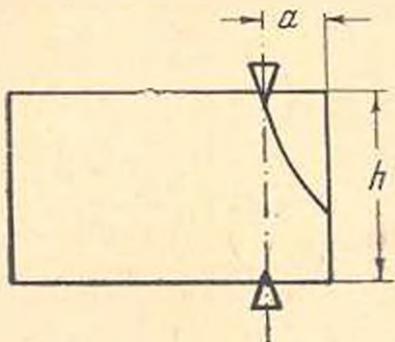


Рис. 7.

Процесс скалывания можно рассматривать, как слагающийся из этапов местного разрушения и хрупкого откола.

Под действием сжимающих камень клиновых ножей, в зонах, близко расположенных к их лезвиям, возникают превосходящие предел прочности нормальные и касательные напряжения, приводящие к местному разрушению камня, способствующему дальнейшему внедрению ножей. Быстрый рост указанных напряжений обусловлен концентрацией напряжений под лезвиями ножей и состоянием всестороннего сжатия, в котором находятся частицы камня, лежащие в зонах, близких к лезвиям ножей.

Помимо разрушения камня под лезвиями ножей, в камне возникают и раскалывающие усилия, непрерывно возрастающие по мере внедрения ножей в камень.

Пока раскалывающие усилия по своей величине остаются меньшими предела прочности на разрыв, ножи продолжают внедряться в

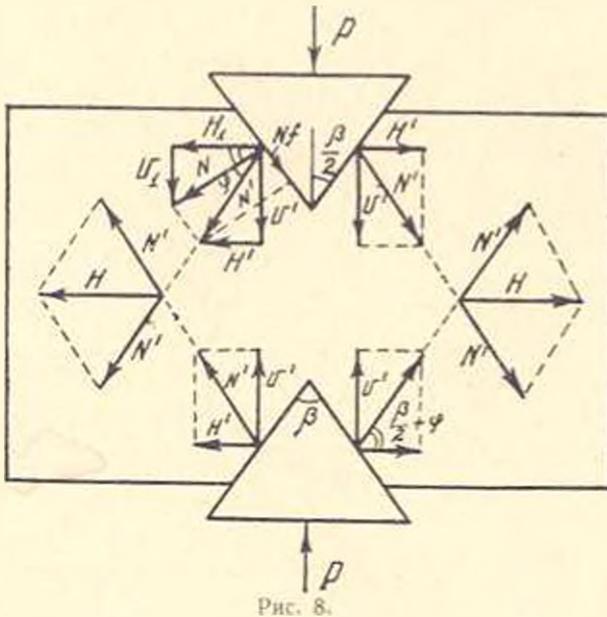


Рис. 8.

камень. Однако по мере продвижения ножей увеличивается сопротивление камня внедрению, вследствие как увеличения площади контакта ножей с камнем, так и уплотнения раздробленных под лезвием ножей частиц камня. Когда же сопротивление внедрению становится равным сопротивлению раскалывания, тогда прекращается внедрение ножей и происходит откол.

Опустив из анализа период местного разрушения, рассмотрим равновесие камня в момент откола.

Действующие на камень активные силы показаны на рис. 8.

В представленной схеме сила N' , результирующая нормальной силы N и силы трения N' , отклонена от нормали к боковой поверхности клина на угол трения φ .

Из разложения сил N и N' на горизонтальные и вертикальные составляющие, видно, что в связи с наличием трения увеличиваются вертикальные составляющие и, наоборот, уменьшаются горизонтальные, т. е. трение, способствуя сжатию, препятствует отколу.

Из условия равновесия камня имеем для горизонтального усилия скалывания следующее выражение:

$$H = \frac{P}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2} + \varphi\right)} \quad (a)$$

Из формулы (a) вытекает увеличение усилия p с ростом угла β при постоянном H , что по характеру соответствует экспериментально определенной зависимости $p = C\beta^2$.

Сравнивая усилие скалывания, определенное по формуле (a) с экспериментальным, т. е.

$$p = H \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2} + \varphi\right) \text{ и } p = C\beta^2, \text{ где } 0 < z < 1.$$

легко обнаруживаем, что при постоянных H и C , с увеличением угла β , первое, изменяясь по тангенсоиде, растет более интенсивно, чем второе, изменяющееся по параболическому закону с показателем, меньшим единицы.

Расхождение между усилиями скалывания, определенными по формуле (a), с экспериментальными следует приписать не полному учету всех действующих в процессе факторов.

Перейдем к рассмотрению увеличения вероятности правильного откола с увеличением угла заострения ножа β .

Поскольку с увеличением β растут как вертикально сжимающее образец усилие V , так и вероятность правильного откола, то предположение о их взаимосвязи становится вполне естественным.

В результате взаимодействия сжимающего образец вертикального усилия V с элементарными частицами камня появляются дополнительные горизонтальные усилия H_v , природу которых следует искать в касательных напряжениях, возникающих в наклонных площадках и в плоскостях скольжения кристаллов камня.

Обозначим для конкретного образца постоянный предел прочности на разрыв через $H_{\max} = H_N + H_v$, где H_N — горизонтальная составляющая от усилия скалывания p .

Рассмотрим изменение слагаемых H_N и H_v , имеющих постоянную сумму H_{\max} . Как видно из формулы

$$H_N = \frac{P}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2} + \varphi\right)}$$

при увеличении угла β значения H_N уменьшаются. Но так как сумма $H_N + H_v$ остается постоянной, то с увеличением угла β увеличивается и значение H_v .

Таким образом мы установили, что с увеличением угла β растет горизонтальная составляющая H_v от вертикально сжимающего образец усилия V , а горизонтальная составляющая H_N от некоторой ре-

зультирующей N , отклоненной от нормали к боковой поверхности клина на угол трения, уменьшается.

Следовательно, из двух факторов, принимающих участие в процессе скалывания — горизонтального усилия откола и горизонтального усилия от сжатия, последнему принадлежит преобладающая роль в процессе скалывания при больших углах заострения ножа. Поскольку наибольшее сжатие образец испытывает именно в плоскости ножей, локализирующей максимальное значение H_x , то откол происходит преимущественно по плоскости ножей. В случае же малых углов β , горизонтальное усилие H_x имеет большее значение, вызывает откол вдоль направления, появляющейся вблизи лезвия ножа и довольно произвольно ориентированной элементарной трещины, опережая достижения предела прочности горизонтального усиления от сжатия и тем самым уменьшая вероятность правильного откола.

Подтверждением предположения, что рост сжимающих усилий обуславливает большую вероятность правильного откола, может служить также общезвестная, большая стабильность показаний при испытании образцов хрупких материалов на сжатие, по сравнению с показаниями при растяжении.

Не лишено смысла и предположение, что рост сжимающих усилий, ослабляя сечение, в проходящей через лезвия ножей плоскости, за счет возникающих в сечении касательных напряжений, делает вероятным откол именно по наиболее ослабленному сечению, т. е. по плоскости ножей.

Приведенный здесь ряд предположений о механике процесса скалывания, несколько не претендуя на точность и законченность, вместе с тем может быть использован при первом приближении к практической оценке качественной стороны процесса и учтен при проектировании скалывающего механизма.

Изложенные выше экспериментальные данные легли в основу составления проектного задания туфораскалывающей машины по идее инженера О. Н. Диндишяна. В настоящее время машина изготовлена, успешно прошла заводские испытания и в ближайшем будущем будет испытана на карьерах Арктикуфа.

Институт стройматериалов и сооружений
АН Армянской ССР

Ա. Ա. ԱՅՐԱՄՅԱՆԻ

ԲՆԱԿԱՆ ՔԱՐԵՐԻ ԶԵՂՔՄԱՆ ՓՈՐՁՆԱԿԱՆ ՀՅԱՄԱՆՈՒՄԷ

Ա Վ Փ Ն Փ Ո Ւ Մ

Հարգածում բերված են տվյալներ՝ Արթիկի և Ջրվեժի տուֆերի սեպանի գանտկներով ձեղքման պրոցեսի փորձնական ուսումնասիրության վերաբերյալ: Էմպիրիկ կապ է սահմանված ձեղքման ճիգի և քարի չափերի ու գանտկների սրման անկյան միջև:

Ստացված տվյալները հիմք են հանդիսացել ներկայումս քարհանքում փորձարկվող քար ձեղքող մեքենայի նախագծման համար: