

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потураев В.Н., Минеев С.П. Использование вибрационных и волновых эффектов при обработке выбросоопасных пластов.- Киев: Наукова думка, 1993.- 143 с.
2. Потураев В.Н., Минеев С.П. Пульсационные и волновые эффекты в горном массиве. – К.: Наук. думка, 1993.- 143 с.
3. СОУ 10.1.00174088.011-2005 Правила ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям. – Киев: Минуглепром Украины, 2005. – 225 с.
4. Докукин А.В. Основные проблемы горной науки.- М.: Недра, 1979.- 383 с.
5. Белоненко В.Н. Пути повышения рентабельности разработки малых месторождений нефти / Н. Белоненко, М.В.Павлов // Нефтепромысловое дело, 2002, №11.- С. 45-48.
6. Снижение выбросоопасности при динамическом воздействии на угольный массив/ Н.Ф.Кусов и др.- М.: Наука, 1985. – 184 с.
7. Минеев С.П. Свойства газонасыщенного угля. – Д.: НГУ, 2009- 220 с.
8. Минеев С.П., Прусова А.А., Корнилов М.Г. Активация десорбции метана в угольных пластах.- Днепропетровск, Вебер, 2007.- 252 с.
9. Алексеев А.Д. Физика угля и горных процессов / А.Д. Алексеев. – К.: Наук. Думка, 2010. -424 с.
10. Корнилов М.Г. Обоснование параметров вибрационного воздействия на микросорбционное пространство угля для эффективной десорбции газа.- Д.: ИГТМ НАН Украины, 2008. – 22 с.
11. Большинский М.И. Теория внезапных выбросов угля, породы и газа. Донецк: ДонТУ, 1993.- 139 с.
12. Роечко И.А., Шарипова С.П. Анализ энергоемкости разрушения угольного пласта физико-механическим способом // Геомеханика управления состоянием напряженного газонасыщенного массива.- К.: Наукова думка, 1985.- С. 26-29.
13. Зорин А.Н., Халимендик Ю.М., Колесников В.Г. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых.- М.: Недра, 2001.- 413 с.
14. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / Под редакцией В.А. Кузьменко.- Киев: Наукова думка, 1979.- 336 с.
15. Нетрадиционные технологические процессы добычи угля / В.Н. Потураев, С.А. Полуянский, А.Н. Зорин и др. – Киев: Техника, 1986. -117 с.
16. Бобин В.А. Сорбционные процессы в природном угле и его структура, 1987.- 136 с.
17. Курленя М.В. Геомеханика и техносфера / М.В. Курленя. –Новосибирск: Наука, 2004.- 131 с.

УДК 539.4

Канд. физ. мат. наук Ю.А. Костандов,
инж. В.С. Медведев,
(ТНУ им. В.И. Вернадского)

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ НАЧАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ И КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ НА РАЗРУШЕНИЕ ХРУПКИХ ТЕЛ

Проведено експериментальне дослідження особливостей руйнування зразків з початковою тріщиною при їх одноосному стискуванні. Встановлена залежність міцності таких зразків, утворення і розвитку магістральних тріщин від орієнтації початкової тріщини відносно навантажуваних граней зразка і величини контактної тертя на них. Запропоновано пояснення цієї залежності.

INFLUENCE OF ORIENTATION OF INITIAL CRACK AND CONTACT FRICTION ON FRACTURE OF BRITTLE SOLIDS

The experimental research of fracture features of specimens with an initial crack at their axial compression is carried out. Dependences of strength such specimens, formation and development of main cracks from orientation of an initial crack relatively specimen bounds, which loaded by the uniaxial compression, and value of contact friction on them is set. The explanation of these dependences is offered.

Из многих научных работ следует, что после образования большого числа малых трещин происходит преимущественное развитие лишь некоторых наиболее опасных трещин, которые легко инициируемы при данных условиях. Та-

кой характер разрушения является характерным для горных пород, обладающих естественной трещиноватостью и блочной структурой. В связи с этим возникают задачи определения параметров предельного состояния горных пород, ослабленных трещинами, и выявления в них наиболее опасных трещин в зависимости от их конкретного напряженно-деформированного состояния, на формирование которого существенно влияет контактное трение. Однако до сих пор нет ясного представления о его влиянии на разрушение хрупких или квазихрупких трещиноватых сред, которыми являются и многие горные породы. Получение адекватных представлений о роли контактного трения в деформировании и разрушении квазихрупких тел, содержащих начальную трещину, и влиянии ее ориентации на образование и развитие магистральных трещин является важным для решения ряда проблем, связанных с технологией подземных работ, устойчивостью как подземных, так и иных сооружений или их элементов, и потому является актуальной задачей.

Исследование влияния ориентации начальной трещины на характер разрушения и прочность содержащих ее образцов проводилось при одноосном сжатии образцов, изготовленных из песчано-цементной смеси по методике [1]. Образцы представляли собой прямоугольные параллелепипеды размером $\{x \cdot y \cdot z\} = \{a \cdot h \cdot b\} = \{55 \cdot 55 \cdot 20\}$ мм с центральным сквозным разрезом длиной $2l = 18$ мм и шириной 0,2 мм, имитирующем начальную трещину. Разрезы ориентировались под углами α , равными $\pi/6$, $\pi/4$, $\pi/3$, $\pi/2$ к направлению действующей нагрузки.

Песчано-цементная смесь для изготовления образцов затворялась при значениях водно-цементного отношения 0,35, а отношение весовых частей цемента и песка при этом составляло 1:2. Полученные образцы были разделены на две серии $S1$ и $S3$, испытания которых проводили через 3 и 9 месяцев после их изготовления, соответственно. Нагружение образцов одноосным сжатием вдоль оси OY проводилось на испытательной машине УМЭ-10М со скоростью 0,5...1,5 кН/с в двух вариантах. В первом - при непосредственном контакте нагружаемых торцов образцов со стальными плитами пресса, что обеспечивало коэффициент контактного трения $f_s = 0,24$ [2]. Во втором варианте - между нагружаемыми торцами образцов и плитами пресса размещались фторопластовые пластины. При этом коэффициент контактного трения снижался до значения $f_F = 0,035$.

Регистрация нагрузки и продольной деформации проводилась с помощью аппаратно-программного комплекса [1], который предусматривает использование тензодатчиков и аналогово-цифрового преобразователя АДА1292В.

Зависимости прочности σ_v образцов серий $S1$ и $S3$, рассчитанной на их действующее сечение S_d ($S_d = (a - 2l \sin \alpha) \cdot b$, a - ширина образца, b - его толщина), от угла наклона трещины α при $f_F = 0,035$ и $f_s = 0,24$ приведены на рис.1а и рис.1б соответственно.

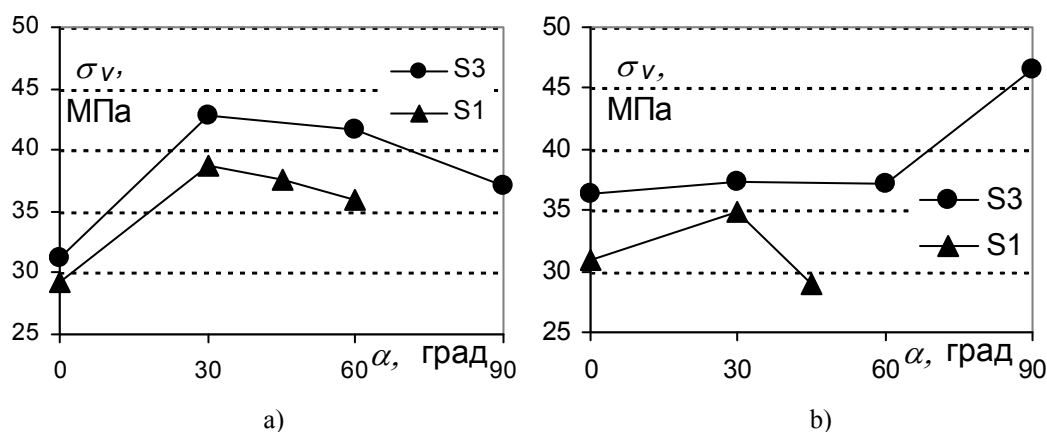


Рис. 1 - Зависимости прочности σ_v образцов серий S1 и S3, рассчитанной на их действующее сечение S_d , от угла наклона трещины α при $f_F = 0,035$ (a) и $f_S = 0,24$ (b)

Для установления последовательности стадий процесса разрушения проводилась его видеорегистрация со скоростью 30 кадров в секунду. Пример последовательных стадий разрушения в моменты времени $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ образца из серии S1 с разрезом, ориентированным под углом $\alpha = \pi/6$, при $f_F = 0,035$ представлены на рис.2. При этом в момент времени t_1 показан нагруженный образец до начала трещинообразования.

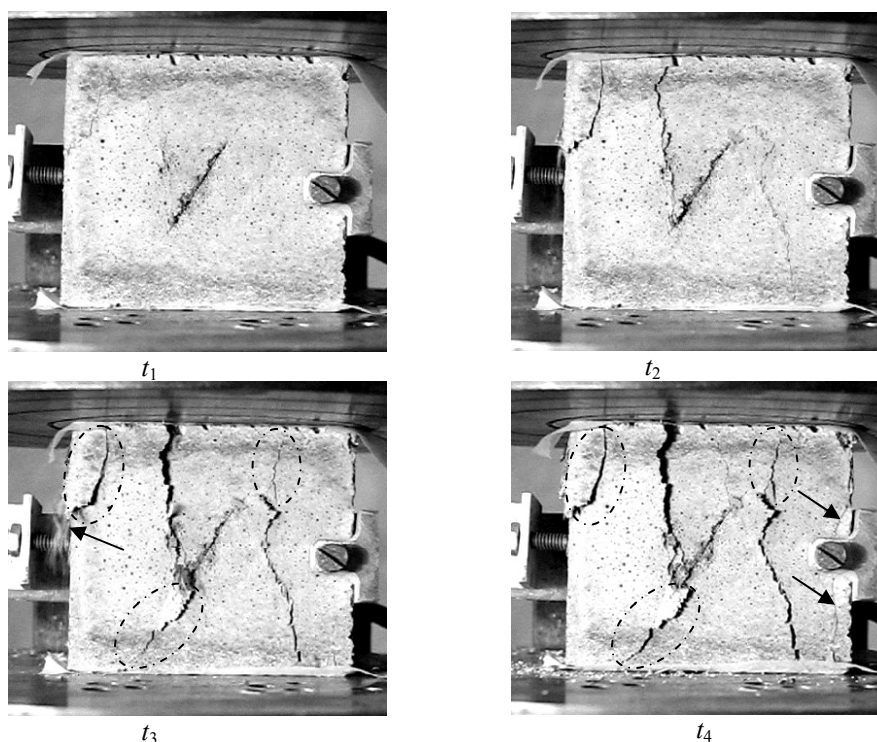


Рис. 2 – Пример последовательных стадий разрушения в моменты времени $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ образца из серии S1 с разрезом, ориентированным под углом $\alpha = \pi/6$, при $f_F = 0,035$

Следует отметить, что результаты видеорегистрации позволяют судить только о проявлении процесса разрушения на поверхности образца, а потому не являются достаточно информативными для полного представления о процессе

разрушения, протекающего во всем объеме образца. Поэтому после проведения экспериментов проводился анализ образовавшихся в разрушенных образцах трещин и отдельностей. Это, в частности, позволило выявлять поверхностные трещины (отслоения материала), которые для моментов времени t_3 и t_4 на рис.2 обведены штрих-пунктиром.

Из рис.2 следует, что при сжатии образца в первую очередь ($t = t_2$) образуются магистральные трещины не в продолжении разреза, то есть между вершинами разреза и ближайшими гранями, а между вершинами разреза и наиболее удаленными от них нагружаемыми гранями образца, которые будем называть противоположными. Затем при $t = t_3$ образуются поверхностные трещины и отслоения материала, происходит смыкание берегов разреза и выброс разрушенного в пыль материала (показан стрелкой). При дальнейшем нагружении образца ($t = t_4$) образуется магистральная трещина вдоль его свободной правой грани (показана стрелками).

На рис.3 и рис.4 приведены фотографии некоторых разрушенных одноосным сжатием образцов серий S1 и S3, соответственно, при различных углах α ориентации разреза и условиях на контактирующих поверхностях ($f_F = 0,035$ и $f_S = 0,24$).

Анализ картин разрушения, образовавшихся в разрушенных образцах трещин и отдельностей позволяет сделать вывод о преобладании продольного характера разрушения, когда образование и развитие трещин происходит преимущественно в направлении действия нагрузки.

При нагружении сплошных образцов серии S1 (рис.3) при $f_F = 0,035$ в них образуются трещины, исходящие из углов образца, с откалыванием материала вдоль боковых (свободных) граней, что соответствует выводам работ [2]. В средней части образцов разрушение происходит по диагоналям вертикальных сечений YOZ, параллельных свободным боковым граням образца (диагональное разрушение).

При нагружении сплошных образцов серии S1 (рис.3) при $f_S = 0,24$ преобладает диагональное разрушение, а откалывания материала вдоль боковых граней практически не происходит.

В случае $\alpha = \pi/6$ и $f_F = 0,035$ (рис.3) трещины в образцах серии S1 образуются между вершинами разреза и точками противоположных граней образцов вблизи их углов. Также происходит откалывание материала вдоль боковой грани. В образцах серии S3 (рис.4) при этих же условиях трещины образуются сначала между вершинами разреза и углами противоположных граней образцов, а затем и их ближними гранями.

В случае $\alpha = \pi/6$ и $f_S = 0,24$ в образцах обеих серий образуются трещины между вершинами разреза и углами противоположных граней образцов, а также диагональные трещины.

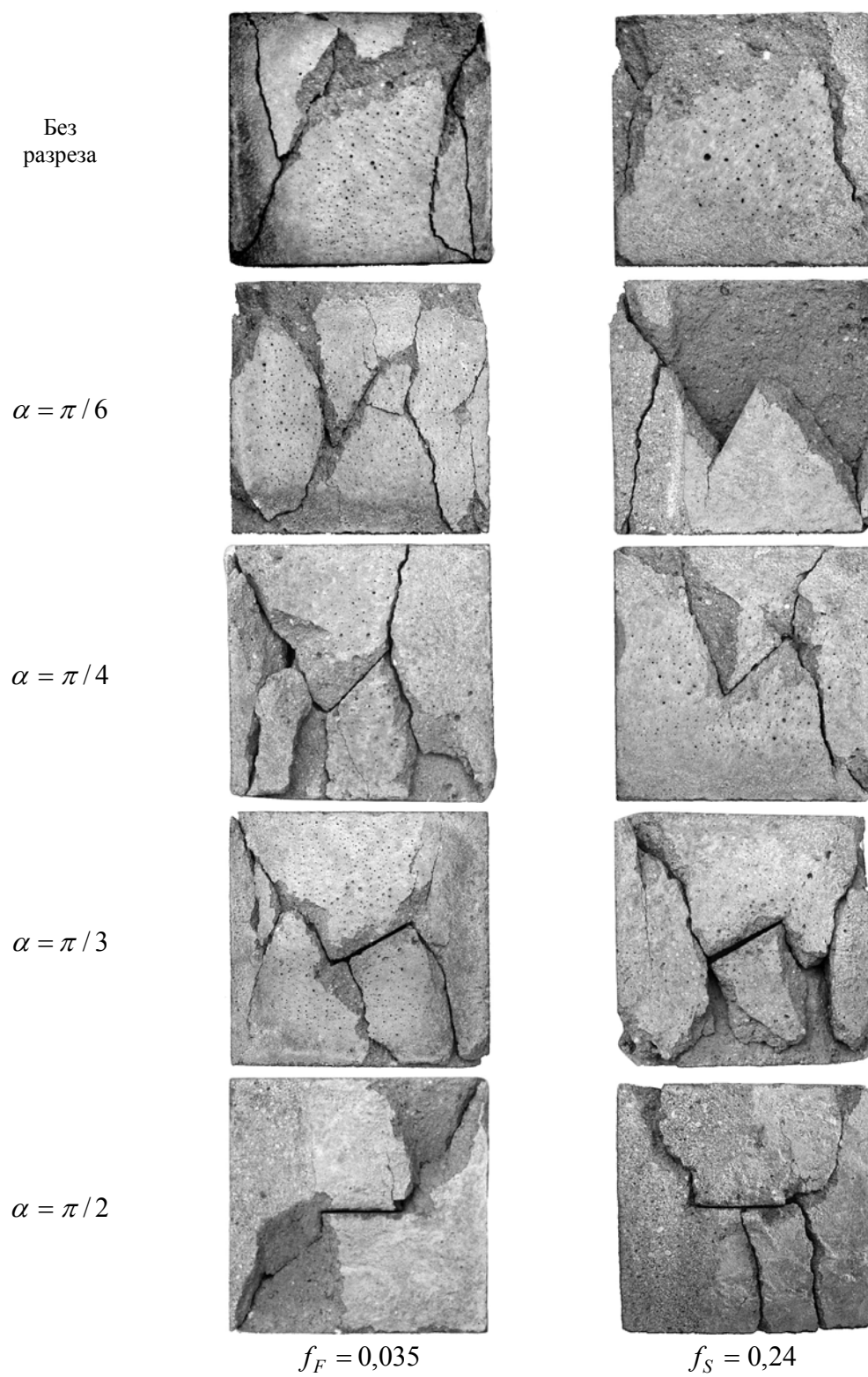


Рис. 3 - Картины разрушения образцов серии S1

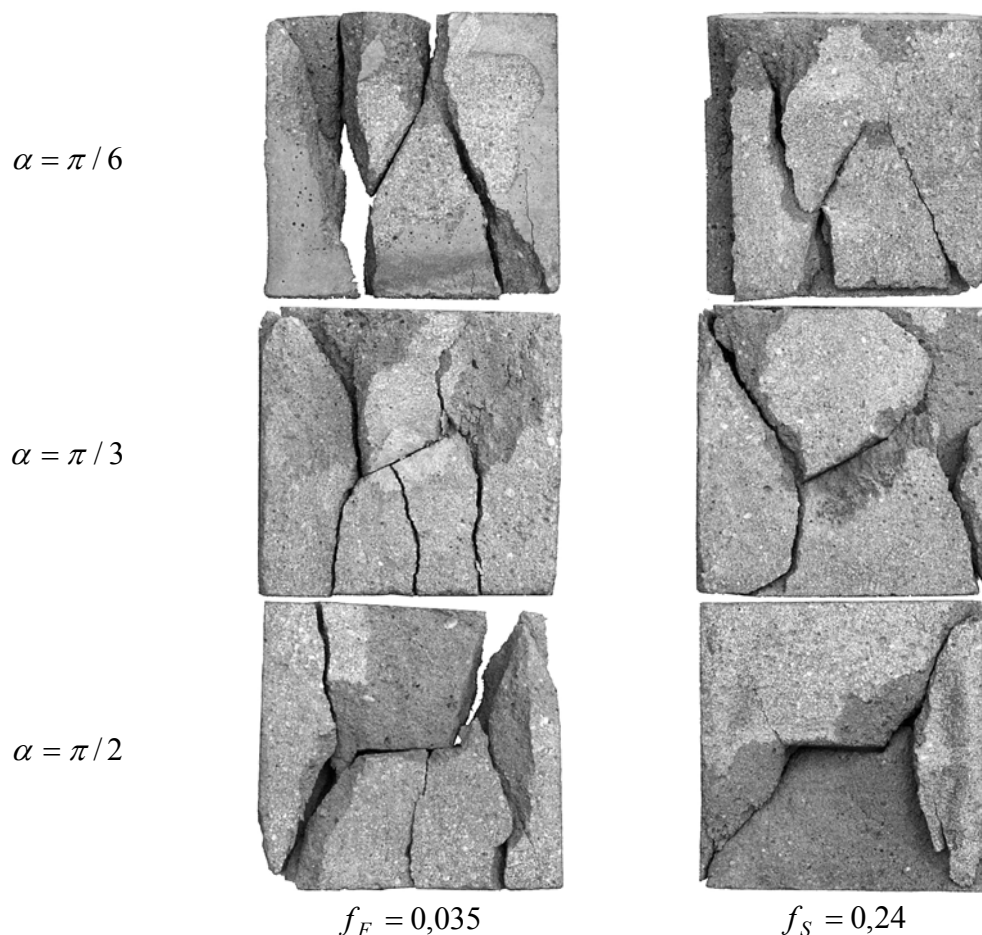


Рис. 4 - Картины разрушения образцов серии S3

В случае $\alpha = \pi/4$ при $f_F = 0,035$ и $f_S = 0,24$ в образцах серии S1 (рис.3) сначала образуются трещины между вершинами разреза и углами противоположных граней образцов, а затем между вершинами разреза и ближайшими гранями.

В случае $\alpha = \pi/3$ при $f_F = 0,035$ и $f_S = 0,24$ в образцах серии S1 (рис. 3) также сначала образуются трещины между вершинами разреза и углами противоположных граней образцов, а затем между вершинами разреза и одной из ближайших граней. Однако, при $f_S = 0,24$ этому сопутствует и диагональное разрушение.

Для образцов серии S3 в этих же случаях картины разрушения отличаются тем, что после образования трещин между вершинами разреза и углами противоположных граней образцов затем образуются трещины между вершинами разреза и обеими ближайшими гранями.

В случае $\alpha = \pi/2$ и $f_F = 0,035$ трещины в образцах серии S1 (рис.3) образуются между вершинами разреза и углами противоположных граней образцов. В образцах этой же серии при $f_S = 0,24$ трещины образуются между вершинами разреза и точками противоположных граней образцов, несколько удаленными от их углов.

В случае $\alpha = \pi/2$ и $f_F = 0,035$ в образцах серии S3 (рис.4) сначала образу-

ются трещины между вершинами разреза и углами противоположных граней образцов, а затем между вершинами разреза и точками ближайших граней образцов, несколько удаленными от их углов, что приводит к откалыванию материала вдоль боковых граней. В образцах этой же серии при $f_s = 0,24$ первоначально образуются трещины между вершинами разреза и противоположными углами образцов, а после смыкания берегов разреза происходит диагональное разрушение образовавшихся отдельностей.

Из описания картин разрушения можно сделать два основных вывода относительно разрушения образцов с начальным разрезом, имитирующем трещину: 1) увеличение трения между контактирующими поверхностями образцов и плитами пресса приводит к развитию диагонального разрушения образцов в сечении YOZ; 2) разрушение начинается с образования трещин между вершинами разреза и противоположными гранями образцов или их углов.

Первый вывод можно объяснить тем, что при наличии трения между контактирующими поверхностями затрудняется поперечная деформация образца в плоскости XOZ вблизи нагруженных граней. Вместе с этим проявляется известная зависимость призмной прочности от соотношения h/a [3], состоящая в том, что прочность высокого образца ниже прочности широкого. Это приводит к тому, что разрушить образец по диагональным или близким к ним плоскостям в сечении YOZ легче, чем в сечении XOY.

Для объяснения второго вывода рассмотрим нижнюю часть образца с разрезом, ориентированным под некоторым углом α , как показано на рис.5а. В этой части образца ABCDEFA имеется участок поверхности CD, свободный от нагрузки, что позволяет условно выделить две части образца, подверженных сжатию нагрузкой $\sigma(x)$: ABCНА высотой h_1 и GDEFG высотой h_2 , ($h_1 < h_2$), у которых кроме угловых точек А и F, граничащих со свободными поверхностями, имеются еще такие же точки С и D. Однако, поскольку эти точки являются вершинами разреза CD, образованного свободными поверхностями, концентрация напряжений в них выше, чем в точках А и F. Кроме того, часть образца GDEFG выше части ABCНА ($h_1 < h_2$), то есть прочность части GDEFG ниже прочности части ABCНА [4]. Поэтому, полагая, что трещина развивается из угловой точки образца по траектории максимальных эффективных касательных напряжений (ТМЭКН) [3, 5], в рассматриваемом случае трещина будет развиваться из точки D по траектории DF'.

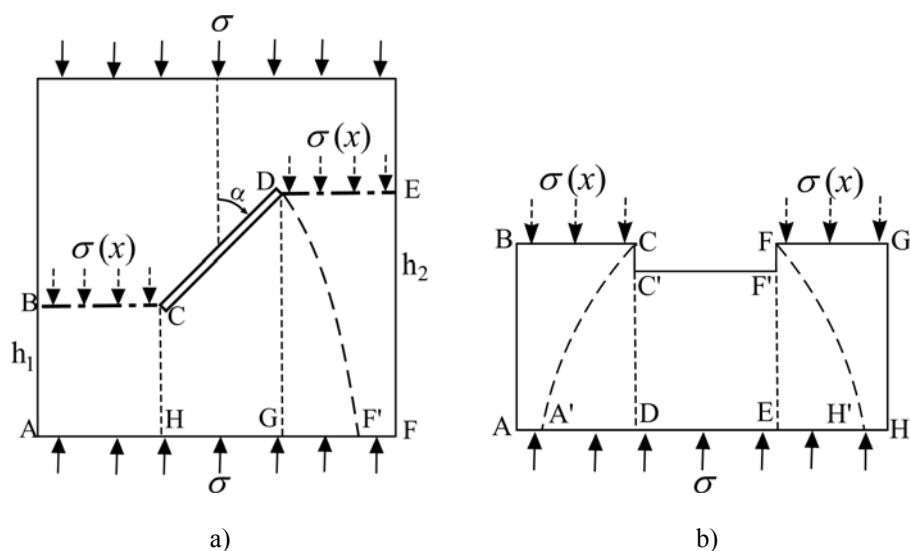


Рис. 5 – Схема образования трещин в образцах с начальной трещиной

Рассмотрим нижнюю часть образца с разрезом, ориентированным под углом $\alpha = \pi/2$, как показано на рис.5b. В этой части образца $ABCC'F'FGHA$ также имеется участок поверхности $C'F'$, свободный от нагрузки, что позволяет условно выделить две одинаковых части образца, подверженных сжатию нагрузкой $\sigma(x)$: $ABCD$ и $FGHEF$, у которых кроме угловых точек A и H , граничащих со свободными поверхностями, имеются еще такие же точки C и F . Однако, поскольку эти точки являются вершинами разреза $CC'F'F$, концентрация напряжений в них выше, чем в точках A и H . Поэтому, по прежнему считая, что трещина развивается из угловой точки образца по $TMЭKH$, в рассматриваемом случае развитие трещин равновероятно из точек C и F по траекториям CA' и FH' , соответственно.

Предложенное объяснение того, что при одноосном сжатии разрушение образцов с начальным разрезом начинается с образования трещин между вершинами разреза и противоположными гранями образцов или их углов, находится в полном соответствии с экспериментальными данными. Их отличие от результатов, полученных в работе [6] численным моделированием для углов ориентации трещины $\alpha = \pi/4$ и $\alpha = \pi/3$, обусловлено, по-видимому, в первую очередь отсутствием в используемой численной модели зависимости призматической прочности от соотношения h/a .

Основываясь на приведенных выше рассуждениях, можно дать качественное объяснение зависимостей прочности σ_v образцов серий $S1$ и $S3$, рассчитанной на их действующее сечение, от угла наклона трещины α и коэффициента трения f , приведенных на рис.1. Сразу отметим, что прочность образцов серии $S3$ выше, чем прочность образцов серии $S1$, по причине большей временной выдержки их до проведения испытаний (хорошо известна временная зависимость прочности материалов на основе цементных растворов).

Рассмотрим зависимости прочности σ_v образцов серий $S1$ и $S3$ от угла наклона трещины α при коэффициенте трения $f_F = 0,035$ (рис.1а). При введении в образцы разреза под углом $\alpha = \pi/6$ становится затруднительным разрушение

по диагоналям вертикальных сечений YOZ, параллельных свободным боковым граням образца (диагональное разрушение). Разрушение таких образцов происходит, прежде всего, по схеме, представленной на рис.5а. При введении в образцы разреза, во-первых, уменьшается высота воспринимающей нагрузку части образца ($h_2 < h$), что приводит к росту разрушающей нагрузки, и, во-вторых, уменьшается действующее сечение S_d образца. В результате прочность образцов при введении в них разреза под углом $\alpha = \pi/6$ увеличивается от 29,3 МПа до 38,8 МПа для серии P1 и от 31,2 МПа до 42,8 МПа для серии P3.

При дальнейшем увеличении угла наклона трещины α неизменной длины происходит уменьшение величин h_2 и S_d , однако, при $\alpha < \pi/4$ действующее сечение S_d уменьшается медленнее, чем высота воспринимающей нагрузку части образца h_2 . Вместе с тем, с уменьшением S_d растет концентрация напряжений в вершине разреза, что в итоге приводит к снижению прочности образца, рассчитанной на их действующее сечение S_d , с увеличением угла α .

Теперь рассмотрим зависимости прочности σ_v образцов серий S1 и S3 от угла наклона разреза α при коэффициенте трения $f_s = 0,24$ (рис.1b).

Для сплошных образцов серий S1 и S3 увеличение коэффициента контактного трения повышает прочность образцов, причем тем больше, чем выше прочность образцов.

Для образцов серии S1 зависимость σ_v от угла наклона разреза α качественно повторяет аналогичные зависимости для образцов серий S1 и S3 при коэффициенте трения $f_F = 0,035$. Для ее объяснения также можно применить рассуждения, приведенные выше, относительно зависимости σ_v от α при коэффициенте трения $f_F = 0,035$, добавив, что снижение значений σ_v при $f_s = 0,24$ относительно значений σ_v при $f_F = 0,035$ происходит за счет реализации диагонального разрушения вследствие, как было сказано выше, сдерживания контактным трением поперечной деформации образца в плоскости XOZ вблизи нагруженных граней и проявлением зависимости призматической прочности от соотношения h/a .

Для образцов серии S3 их прочность σ_v при коэффициенте трения $f_s = 0,24$ с увеличением угла наклона трещины α до $\pi/3$ практически остается постоянной (рис.1b). Причина этого состоит в том, что прочность образцов серии P3 выше, чем прочность образцов серии P1, и реализация диагонального разрушения в этом случае оказывается менее чувствительной к ориентации начального разреза при углах $\alpha < \pi/3$. При $\alpha = \pi/2$ первоначально образуются трещины между вершинами разреза и противоположными углами образцов, и только после смыкания берегов разреза происходит диагональное разрушение образовавшихся отдельностей, что и является причиной значительного возрастания прочности образцов серии S3 при $\alpha = \pi/2$.

В заключение следует отметить, что зависимость прочности и характера разрушения образцов с начальной трещиной от ее ориентации при одноосном сжатии в значительной степени зависят от величины контактного трения, проч-

ности материала образцов, соотношения их размеров с длиной трещины и зависимости призмной прочности от соотношения размеров образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костандов Ю.А. Исследование предельного состояния хрупких тел с трещинами при одноосном сжатии / Ю.А. Костандов, В.С. Медведев // Заводская лаборатория. – 2011. - №3. - С. 54-57.
2. Пат. 45121 Україна, Спосіб визначення коефіцієнта тертя / Ю.А. Костандов; заявник і патентовласник Таврійський національний університет - №200905365; заявлене 28.05.2009; опубл. 26.10.2009, Бюл. №20.
3. Васильев Л.М. Дифференциальное уравнение предельного состояния деформируемого твердого материала с учетом внутреннего и внешнего трения / Л.М. Васильев, Д.Л. Васильев // Геотехническая механика. – 2003. - Вып.41. - С. 145-152.
4. Баженов Ю.М. Технология бетона: Учеб. пособие для технол. спец. строит. вузов. 2-е изд. / Ю.М. Баженов. - М. : Высшая школа, 1987. - 415 с.
5. Костандов Ю.А. Влияние контактного трения на предельное напряжение в образце горной породы и вид траектории разрушения при сжатии / Ю.А. Костандов, Л.Я. Локшина // Физико-технические проблемы горного производства. – 2010. - №13. – С. 42-47.
6. Костандов Ю.А. Компьютерное моделирование разрушения хрупких образцов при сжатии / Ю.А. Костандов, И.Е. Шиповский // Материалы XXII Межд. науч. школы им. С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». – Симферополь: ТНУ, 2012. - С. 165-170.

УДК 622. 742:621. 926:621.3. 06

Канд. техн. наук А.И. Шевченко
(ИГТМ НАН Украины)

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРОХОЧЕНИЯ И ОБЕЗВОЖИВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ НА ВИБРАЦИОННЫХ ГРОХОТАХ

Експериментальним методом досліджено шляхи збільшення ефективності грохочення та зневоднювання мінеральної сировини на вібраційних грохотах. Наведено результати процесів грохочення та зневоднювання матеріалів різної крупності за допомогою дезінтегруючих елементів при різних питомих навантаженнях і режимах. Встановлено вплив на показники розділення і вологості амплітуди і частоти віброзбудження при імпульсному впливі на просівальну поверхню.

WAYS OF INCREASE OF EFFICIENCY OF SCREENING AND DEHYDRATION OF MINERAL RAW MATERIALS ON VIBRATING SCREENS

The experimental method investigated ways of increase of efficiency a screening and dehydration of mineral raw materials on vibrating screens. Results of processes of a screening and dehydration of materials of a various size by means of disintegrate elements are given at various specific loadings and modes. Influence on indicators of division and humidity of amplitude and frequency of a vibroexcitation is established at pulse impact on a sifting surface.

При тонком и сверхтонком грохочении мокрого минерального сырья разделение материалов по крупности и удаление жидкости требует существенных энергозатрат, поскольку этому процессу препятствуют силы поверхностного натяжения, которые значительно превосходят силу тяжести [1-3].

Традиционные способы грохочения позволяют в зависимости от крупности материала снижать его влажность только до 18-25 % [1, 2].

Эффективное разделение по крупности обеспечивается при размере частиц более 1 мм. Грохочение материалов крупностью менее 1 мм традиционными методами не дает высоких результатов, а при размере частиц менее 0,2 мм