

УДК 622.831

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ МЕРЗЛЫХ И ЧАСТИЧНО ПРОТАЯВШИХ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ ЦЕЛИКОВ МЕРЗЛОГО УГЛЯ

Шайлиев Р.Ш.

Карачаево-Черкесский институт гражданского проектирования, Черкесск, Россия (369000, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36) kchgtanich@mail.ru

В работе описан механизм разрушения мерзлых пород на примере целиков мерзлого угля. Рассмотрено влияние контактных условий торцов целика с породами кровли и почвы на характер разрушения. Используя данные динамики границы фазового перехода, при таянии целика, по стадийно описан механизм его разрушения. Анализируя напряженное состояние частично протаявшего угольного целика, а также механизм его разрушения, выведена формула определения несущей способности частично протаявшего угольного целика через глубину его протаивания: предел прочности мерзлого угольного целика уменьшается при протаивании по линейному закону, определяющим коэффициентом которого является процент снижения напряжения, помноженный на отношение средней глубины протаивания к ширине целика. А так же получены формулы для определения оптимальных размеров межкамерных и барьерных целиков подверженных протаиванию. Практическим результатом исследований явился разработанный автором метод оценки несущей способности и выбора оптимальной формы целиков в мерзлом угольном массиве подверженном протаиванию.

Ключевые слова: разрушение, мерзлые и частично протаявшие породы, мерзлый уголь, межкамерные и барьерные целики.

THE MECHANISM OF DESTRUCTION OF FROZEN AND PARTLY MELTED ROCKS ON EXAMPLE OF THE CELICS OF FROSEN COAL

Shailiev R.S.

Karachaevo-Circassian institute of civil design, Cherkessk, Russia (369000, Cherkessk, Stavropoliskay str. 36) kchgtanich@mail.ru

In this work the mechanism of destruction of permafrost on the sample of frozen virgin coal is described. It is considered that the influence of contact conditions of end faces of the pillar with the roof rocks and soil on fracture pattern. Using data from the dynamics of the phase transition boundary, during the melting of the pillar, the mechanism of its destruction is described by stage. We obtained the formula for determining the bearing test of partially thawed coal pillar through the depth of thaw. Analyzing stress condition of partially thawed coal pillar as well as the mechanism of its destruction was developed a formula for determining the bearing capacity of partially thawed coal pillar by the depth of its thawing: the break-down point of frozen coal pillar is reducing due to thawing by linear law with the determining coefficient of which is the percentage of stress softening multiplied by ratio of the average depth of thawing to the width of the pillar. And also the formulas for the definition of optimum size of the interchamber and barrier pillar which are prone to thawing. The practical result of this research is the method developed by author method of evaluation of bearing capacity and choosing the optimum shape of the pillars in frozen virgin coal under thawing effect.

Keywords: destruction, frozen and partially thawed rocks, frozen coal interchamber and barrier pillars.

Сформулируем механизм разрушения криогенных горных пород, при одноосном сжатии. К мерзлой породе приложено монотонно возрастающее одноосное сжимающее напряжение. При достижении напряжением величины σ_3 , которое индуцирует внутри «благоприятно» ориентированных структурных составляющих породы и включений льда, растягивающее напряжение $-\sigma_1$ и $-\sigma_2$ равные пределу их прочности на растяжение, будут образовываться микротрещины.

Преимущественная ориентация последних, будет параллельна внешней сжимающей нагрузке σ_3 или перпендикулярна растягивающим напряжениям $-\sigma_1$ и $-\sigma_2$. Это согласуется с

результатами работ, проведенных: Ю.В. Шуваловым, В.Ю. Изаксоном, Е.А. Ельчаниновым, В.Н. Скубой и др.[1], [2], [6].

Под действием напряжений $-\sigma_1$ и $-\sigma_2$ будет происходить образование трещин в «благоприятно» ориентированных ледяных включениях, перпендикулярно $-\sigma_1$ и $-\sigma_2$ и развитие уже образованных трещин до границ раздела ледяных включений и угля (рис. 1.а).

На второй стадии, разрушение будет иметь место в результате дополнительного воздействия на трещины. Это происходит при увеличении σ_3' до σ_3'' . Предел прочности льда при $-7\text{ }^\circ\text{C}$ [4]: $\sigma_{сж}^\perp = 37 \cdot 10^5$ Па, $\sigma_{сж}'' = 48,1 \cdot 10^5$ Па, $\sigma_p^\perp = 18,5 \cdot 10^5$ Па, $\sigma_p'' = 10 \cdot 10^5$ Па, больше $1/5$, а при отрицательных температурах близких к $0\text{ }^\circ\text{C}$: $\sigma_{сж}^\perp = 15 \cdot 10^5$ Па, $\sigma_{сж}'' = 20 \cdot 10^5$ Па, $\sigma_p^\perp = 8 \cdot 10^5$ Па, $\sigma_p'' = 5,5 \cdot 10^5$ Па меньше $1/5$ предела прочности угля: $\sigma_{сж} = 180 \cdot 10^5$ Па, $\sigma_p = 23 \cdot 10^5$ Па. Поэтому поверхность раздела лед - уголь в первом случае никак не повлияет на распространение трещин, а во втором - воспрепятствует дальнейшему их росту [3]. Все образовавшиеся и ответвлённые трещины будут распространяться на небольшое расстояние под действием напряжений $-\sigma_1$ и $-\sigma_2$, в направлении приложенного напряжения σ_3'' до пересечения с другими трещинами (рис. 1.б). Микротрещины и ответвленные трещины, ориентированные в одном направлении, сольются в одну или несколько магистральных макротрещин, ориентация которых будет параллельна σ_3'' .

На заключительной стадии разрушения, при дальнейшем увеличении σ_3'' до $\sigma_{сж}$, образованные магистральные трещины будут распространяться вдоль действия внешней нагрузки $\sigma_{сж}$ до тех пор, пока они не достигнут границ мерзлой породы, что ведет к разделению на части, а значит к полному разрушению (рис. 1.с).

Рассмотрим виды разрушений мерзлых горных пород в зависимости от контактных условий по торцам на примере мерзлых угольных целиков. В угольных месторождениях крайнего севера в виде кровли и почвы чаще всего встречаются аркозовый песчаник и тонкослоистая глина. Поэтому, оставляемые в выработанных пространствах целики могут иметь следующие контактные условия: 1) оба конца целика имеют сцепление с массивной аркозово-песчанистой кровлей и почвой (рис. 2.а); 2) оба конца целика имеют сцепление с тонкослоистой глинистой кровлей и почвой (рис.2.б); 3) один из концов целика имеет сцепление с массивной аркозово-песчанистой кровлей (почвой), а другой - с тонкослоистой глинистой почвой (кровлей) (рис. 2.с).

Поскольку характер разрушения зависит от контактных условий, то, в первом случае, будет наблюдаться «коническое» или «косое» разрушение из-за прочных контактных

условий, а во втором случае - разрушение типа «раскалывания». Это связано с тем, что глинистые прослои играют роль смазки и значительно уменьшают трение на торцах целика. В третьем случае будет наблюдаться комбинационное разрушение: вблизи одного торца угольного целика, где имеется сцепление с кровлей (почвой), образованной аркозовым песчаником, ожидается «косое» или «коническое», а вблизи другого, где имеется сцепление с тонкослоистой глинистой почвой (кровлей) – разрушение типа «раскалывания». Обоснуем образование конических приторцевых областей, испытывающих исключительно сжимающие напряжения, способствующих тому или иному типу разрушения.

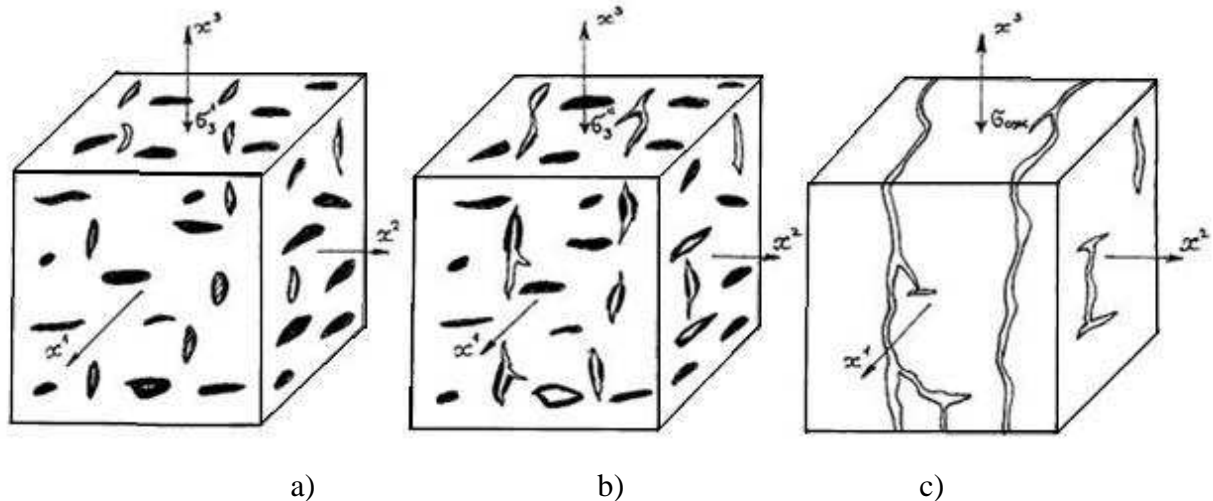


Рис. 1. Стадии разрушения мерзлой горной породы

- a) первая стадия: образование и рост микротрещин в ледяных включениях;*
b) вторая стадия: разрушение ледяных включений и ветвление трещин;
c) заключительная стадия: полное разрушение вследствие распространения магистральных трещин.

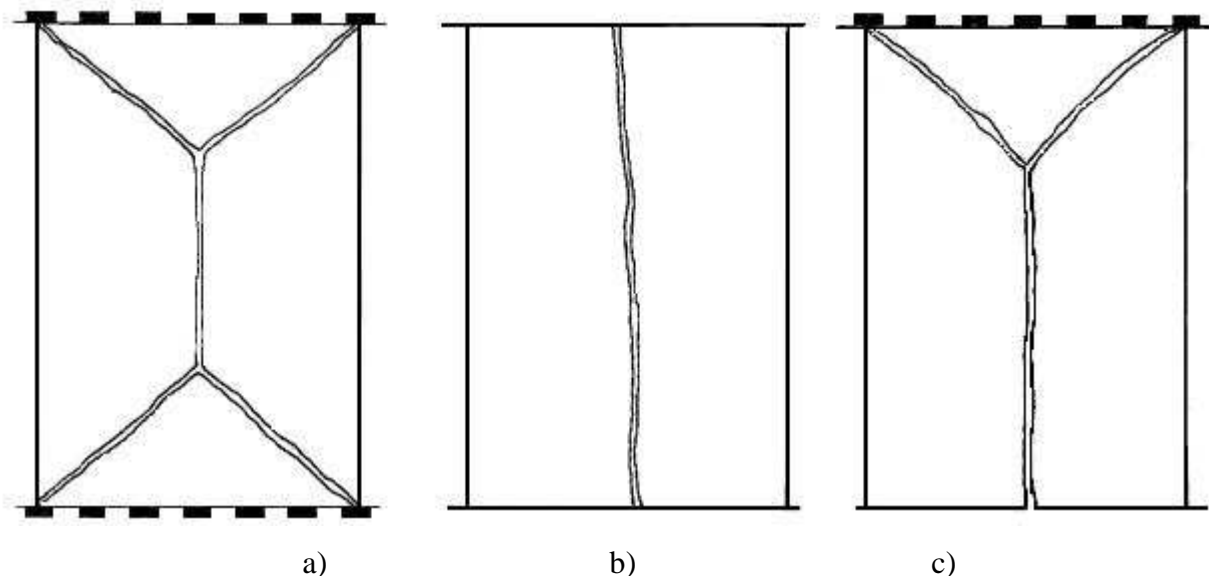


Рис. 2. Типы разрушений мерзлых угольных целиков:

- a) "коническое" разрушение;*
b) 1 - кровля и почва образованные аркозовым песчаником,
2 - приторцевая коническая область,

- b) "раскалывающее" разрушение;
- c) "комбинированное" разрушение.

При контакте с аркозово-песчанистой кровлей и почвой, трение на торцах развивает некоторые поперечные сжимающие напряжения σ'_1 и σ'_2 . Эти поперечные напряжения индуцируют внутри структурных составляющих угля, находящихся в этих областях, напряжения, все компоненты которых отличны от нуля. Направление действия последних противоположно направлению действия компонент напряжения структурных составляющих, обусловленных сжимающим напряжением σ_3 . Отсюда, поперечные напряжения σ'_1 и σ'_2 уменьшают, а то и полностью компенсируют растягивающие напряжения $-\sigma_1$ и $-\sigma_2$. На незначительную величину, уменьшаются в некоторых структурных составляющих угля, сжимающие напряжения σ_3 , ибо поперечные напряжения σ'_1 и σ'_2 индуцируют растягивающие напряжения в направлении, противоположном σ_3 . В результате, в приторцевых областях мерзлого угольного целика ледяные включения и структурные составляющие угля испытывают сжимающие напряжения.

Структурные составляющие угля, расположенные на границе боковой и торцевой поверхностей, испытывают поперечные стеснения только лишь за счет трения их поверхностей со структурными составляющими аркозового песчаника, и поэтому их влияние в смысле стеснения минимально на структурные составляющие угля, лежащие ниже (выше) поверхности верхнего (нижнего) торца. Следующие к середине структурные составляющие угля испытывают стеснение как за счет трения их поверхностей с зернами аркозового песчаника, так и под влиянием крайних структурных составляющих угля, и поэтому их влияние на структурные составляющие угля, лежащие под (над) ними у верхнего (нижнего) торца, больше. Итак, по мере продвижения к середине, влияние верхних (нижних) структурных составляющих угля на нижние (верхние), у верхнего (нижнего) торца увеличивается. Следовательно, и глубина (от торцов к центру) влияния увеличивается по мере продвижения к середине образца и достигает максимума в его середине. В связи с изложенным, можно считать, что приторцевые области имеют форму конусов.

Теперь рассмотрим механизм разрушения частично протаявшего угольного целика. Используя данные проведенного численного расчета, по определению границы фазового перехода в двумерной задаче Стефана, мы можем с достаточной точностью определить границы протаивания, в зависимости от времени теплового воздействия.

Граница протаивания мерзлого угольного целика, по нашим численным расчетам и экспериментальным данным, имеет форму вогнутой поверхности. Наибольший градиент температуры расположен в средней части целика, так как мерзлые породы кровли и почвы

препятствуют протаиванию приторцевых зон от стенки выработки вглубь целика. Внешние трещины в протаявшей зоне, содержащие ранее лед, открылись, так как вода из них вытекла. Там, где это возможно, вода просачивается на нижние уровни, заполняя нижерасположенные поры и трещины. Далее находится двухфазная зона, где, наряду с талой водой, в трещинах еще имеются кристаллы льда. Некоторые ледяные включения в этой зоне успели протаять частично или полностью, а некоторые еще нет, а сердцевина целика, находится в мерзлом состоянии (рис. 3).

Приторцевые области сжимающих напряжений претерпевают в связи с протаиванием существенные изменения. В приторцевой области протаявшей зоны, конические области, испытывающие только сжимающие напряжения, фактически не наблюдаются. Это связано с тем, что при протаивании происходит смачивание торцевых контактов целика с кровлей и почвой, что дает нам право считать эти зоны контактов смазанными. В срединной же, мерзлой зоне целика приторцевая область сжимающих напряжений сохраняется. Таким образом, коническая область сжимающих напряжений, после частичного протаивания целика, уменьшается до размеров мерзлой зоны. А касательные напряжения на протаявших участках торцов целика, будут пренебрежимо малы, по сравнению с пределом прочности на растяжение.

Применяя для талой зоны механизм разрушения, предложенный выше, получаем, что под действием растягивающих напряжений $-\sigma_1$ и $-\sigma_2$ индуцированных внешним одноосным сжимающим напряжением σ_3 «благоприятно» ориентированные трещины будут расти с преимущественной ориентацией параллельной направлению действия внешней нагрузки σ_3 , а «неблагоприятно» ориентированные трещины дадут ответвления, направления которых также будут параллельны σ_3 , и которые в конце концов объединятся, образуя магистральные макротрещины, выстроенные вдоль оси целика. Распространение последних приведет к разрушению типа «раскалывания» в талой зоне. Таким образом, произойдет откалывание части талой зоны от целика. Это согласуется с экспериментальными данными и натурными наблюдениями.

После откалывания с обеих сторон, одной или двух частей протаявших зон, происходит увеличение напряжения испытываемого целиком, за счет уменьшения его поперечного сечения.

Таким образом, процесс полного разрушения частично протаявшего угольного целика можно разбить на 3 стадии. На первой стадии происходит «раскалывающее» разрушение в протаявших областях и разрушения в ледяных включениях с образованием в них трещин (рис. 3.a). На втором этапе разрушения, трещины ветвятся и растут, образуя одну или несколько магистральных трещин (рис. 3.b). На заключительной стадии магистральная

трещина, упираясь в коническую область сжимающих напряжений, вызывает «коническое» или «косое» разрушение (рис. 3.с). Практическим результатом указанных исследований явился разработанный автором метод оценки несущей способности и выбора оптимальной формы целиков в мерзлом угольном массиве подверженном протаиванию.

Анализируя напряженное состояние частично протаявшего угольного целика, а также механизм его разрушения, приходим к формуле определения несущей способности частично протаявшего угольного целика через глубину его протаивания. Таким образом, предел прочности мерзлого угольного целика уменьшается при протавивании по линейному закону, определяющим коэффициентом которого является процент снижения напряжения, помноженный на отношение средней глубины протаивания к ширине целика:

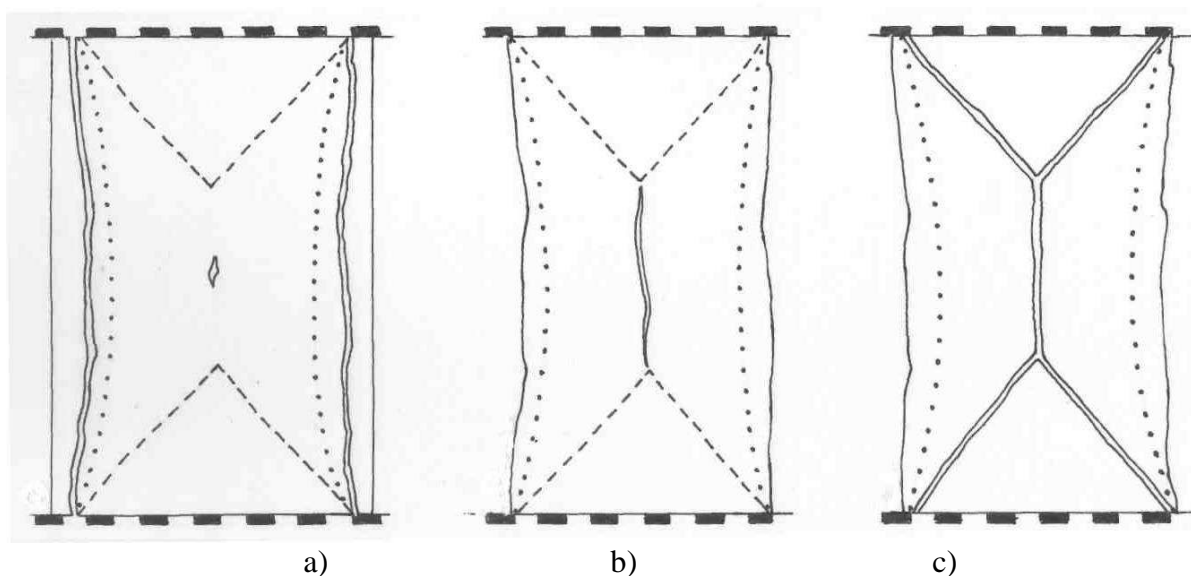


Рис. 3. Стадии разрушения частично протаявшего угольного целика.

- a) "раскалывающее" разрушение по протаявшим зонам и зарождение трещин в ледяном включении;
 b) разрушение поверхности ледяного включения и формирование магистральной трещины тормозящейся коническими областями сжимающих напряжений;
 c) развитие трещины по поверхностям конических областей.

$$\sigma_{сж}^T = \sigma_{сж}^M \left(1 - 0,2 \frac{\ell}{b}\right), \quad (1)$$

где $\sigma_{сж}^T$ - предел прочности на сжатие частично протаявшего угольного целика;

$\sigma_{сж}^M$ - предел прочности на сжатие мерзлого угольного целика;

ℓ - глубина протаивания; b - ширина целика;

Тогда ширина межкамерных целиков будет определяться следующим образом:

$$b = \frac{a + 0,2 \frac{k \cdot \ell}{n \cdot H \cdot \gamma_{cp}} \cdot \sigma_{сж.дл.}^M}{\frac{k}{n \cdot H \cdot \gamma_{cp}} \cdot \sigma_{сж.дл.}^M - \frac{h_0 \cdot \gamma}{H \cdot \gamma_{cp}} - 1}, \quad (2)$$

где $\sigma_{сж.дл.}^M = \sigma_{\infty} + \frac{\sigma_{сж} - \sigma_{\infty}}{\sqrt[3]{\tau}}$ - длительная прочность на сжатие мерзлого угля;

σ_{∞} - предел длительной прочности мерзлого угля на сжатие;

$\sigma_{сж}$ - прочность мерзлого угля; τ - время; a - ширина камеры ;

H - глубина разработки ; h_0 - высота целика ;

γ - объемный вес пород в целике ;

γ_{cp} - средний объемный вес пород над целиком;

n - коэффициент запаса прочности ; k - коэффициент сцепления на торцах.

Аналогично определяется ширина барьерных целиков:

$$B = \frac{0,2 \cdot n \cdot l \cdot \sigma_{сждл.}^M + 0,5 \gamma_{cp} \cdot H \cdot (a - c)}{n \cdot \sigma_{сждл.}^M - \gamma_{cp} \cdot H}, \quad (3)$$

где c – предельный пролет незакрепленной кровли.

Данные выкладки согласуются с ранее проведенными исследованиями [4,5].

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, по ГК № П 1105, ГК № П 1122 от 02.06.2010 г.

Список литературы

1. Ельчанинов Е.А. Проблемы управления термодинамическими процессами в зоне влияния горных работ. – Москва, 1989.
2. Изаксон В.Ю. Изменение напряжённого состояния многолетнемёрзлых горных пород при протаивании вокруг выработки // Бюл. НТИ: Проблемы горного Севера.– Якутск, 1982. – С. 3-5.
3. Разрушение. Т.7. / Под ред. Г. Либовица.– М.: Мир, 1975.
4. Шайлиев Р.Ш. Упругое поле напряжений в криогенных горных породах подверженных тепловому воздействию // Известия КБНЦ РАН. – Нальчик, №2(7), 2001- С. 69-72.
5. Шайлиев Р.Ш. Математическая модель расчета эффективных свойств композиционных материалов на примере полиминеральных горных пород // Современные проблемы науки и

образования. – 2011. – № 5; URL: www.science-education.ru/99-4925 (дата обращения: 27.09.2014).

6. Шувалов Ю.В. Исследование несущей способности потолочин и целиков при камерных системах разработки пологих угольных пластов в условиях многолетней мерзлоты. – Ленинград, 1969.

Рецензенты:

Боташев А.Ю., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ТОПИ, ФГБОУ ВПО Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия, Министерство образования и науки РФ, г. Черкесск;

Борлаков Х.Ш., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики, ФГБОУ ВПО Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия, Министерство образования и науки РФ, г. Черкесск.