

УДК 622.236: 539.375

Сергиенко Л.В., магистр,
Гладкая Е.В., канд. техн. наук, ст.науч.сотр.,
Молодецкий А.В., канд. техн. наук, ст.науч.сотр.
(ИФГП НАН Украины)

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ УГЛЯ В УСЛОВИЯХ,
МОДЕЛИРУЮЩИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ
СОСТОЯНИЕ ПЛАСТА-СПУТНИКА ПРИ ВЕДЕНИИ ОЧИСТНЫХ
РАБОТ**

Сергієнко Л.В., магістр,
Гладка О.В., канд. техн. наук, ст.наук. співр.,
Молодецький А.В., канд. техн. наук, ст.наук. співр.
(ІФГП НАН України)

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ РУЙНУВАННЯ ВУГІЛЛЯ В УМОВАХ,
МОДЕЛЮЮЧИХ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПЛАСТА-
СПУТНИКА ПРИ ВЕДЕННІ ОЧИСНИХ РОБІТ**

Sergiyenko L.V., M.S. (Tech.),
Gladkaya E.V., Ph.D.(Tech), Senior Researcher,
Molodetskiy A.V., Ph.D.(Tech), Senior Researcher
(IPMP NAS of Ukraine)

**ANALYSIS OF COAL BREAKING MECHANISM UNDER
THE CONDITIONS MODELLING STRESS-AND-STRAIN STATE OF AN
ACCOMPANYING-BED WHILE IN OF MINING WORK**

Аннотация. На основе экспериментальных данных был проведен анализ характера и механизма разрушения угля в условиях моделирующих напряженно-деформированное состояние нарушенного пласта-спутника при ведении очистных работ. С помощью установки неравнокомпонентного трехосного сжатия (УНТС), позволяющей в трех взаимно перпендикулярных направлениях создавать независимые напряжения, аналогичные по величине и направлению в горном массиве, выполнены механические испытания углей различной степени нарушенности. Установлено, что в объемном поле сжимающих напряжений, не зависимо от уровня и вида напряженного состояния, степени нарушенности угля, при разгрузке углепородного массива в пласте – спутнике образуются деформации, соотношение которых, приводит к формированию вида деформационного состояния близкого к обобщенному сдвигу.

Ключевые слова: уголь, механические характеристики, вид напряженного состояния.

На сегодняшний день, дегазация подрабатываемых пластов и выработанного пространства является неотъемлемой частью технологического процесса при разработке метаноносных угольных пластов Донбасса. Известно, что в нетронутым массиве метан находится в трещиновато-поровой среде. При этом проницаемость угольных пластов низкая и до разгрузки от горного давления особого метановыделения в дегазационные скважины не происходит [1].

При ведении очистных работ происходит разгрузка подрабатываемых пластов-спутников, нарушается равновесие системы газ-уголь и создаются условия, способствующие десорбции газа углем и выделение его в выработанное пространство и дегазационные скважины. В местах, непосредственно примыкающих к выработанному пространству, подрабатываемый угленосный массив, вмещающий пласты-спутники и угольный пласт, находится в предельно-напряженном состоянии [2]. При этом установлено, что метановыделение происходит из той части пласта-спутника, которая находится в разгруженной зоне, а максимальное газовыделение наблюдается из пластов-спутников, которые попадают в зону обрушения.

Однако, в сложных горно-геологических условиях, как показывает опыт ведения горных работ [3], газовыделение из подрабатываемого массива и периодичность его обрушений носят крайне неравномерный характер, особенно в зонах различной степени нарушенности. При этом влияние трещиноватости различного генезиса на процесс разрушения подрабатываемых пластов-спутников при ведении очистных работ не изучено. Поэтому, для установления закономерностей формирования локальных областей разрушения в нарушенном угленосном массиве с целью прогнозирования зон скопления свободного метана в нем, целесообразно изучение влияния естественной (тектонической) трещиноватости на вторичное трещинообразование при разгрузке подрабатываемых угленосных слоёв.

В данной работе, при изучении характера и механизма разрушения угля в условиях моделирующих напряженно-деформированное состояние нарушенного пласта-спутника при ведении очистных работ использовалась установка неравнокомпонентного трехосного сжатия (УНТС), позволяющая в трех взаимно перпендикулярных направлениях создавать независимые напряжения, аналогичные по величине и направлению в горном массиве [4 – 6].

Для проведения лабораторных исследований на УНТС по моделированию разгрузки подрабатываемого пласта-спутника, были изготовлены угольные образцы кубической формы с размером ребра 55 мм (рис. 1) из угля марки К, пласта d₄ ШУ «Покровское». Глубина залегания пласта-спутника d₄¹ – 550 м. Образцы угля испытывались с естественной влажностью.

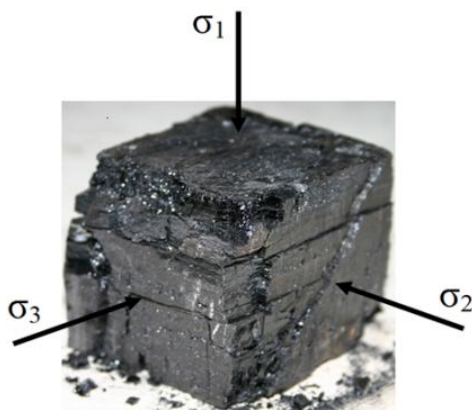


Рисунок 1 – Образец угля марки К пласта d₄ ШУ «Покровское»

В качестве параметров изменения механического состояния подрабатываемых пластов-спутников принимались три главных напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, из которых σ_1 – максимальное сжимающее напряжение, действующее по направлению нормали к пласту, σ_2 – промежуточное главное напряжение, действующее вдоль линии забоя, σ_3 – минимальное сжимающее напряжение, действующее по нормали к плоскости пласта, и три главных деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, действующие по тем же направлениям. Кроме того, определялись упругие константы (K, E, G), параметры Надаи—Лоде $\mu_\sigma, \mu_\varepsilon$, характеризующие вид напряженного и деформационного состояния, а также энергетические показатели – работа сил изменения объема (A_o) и формоизменения (A_f) [4 – 6].

Моделирование зоны предельного состояния с разгрузкой осуществлялось при разных уровнях нагружения, различной ориентации естественной (тектонической) трещиноватости в угольных образцах по разработанной программе нагружения, исходя из имеющихся исследований [4 – 6] в зоне предельного состояния угольного пласта, где выделяют три характерных участка разного объемного нагружения и механического состояния.

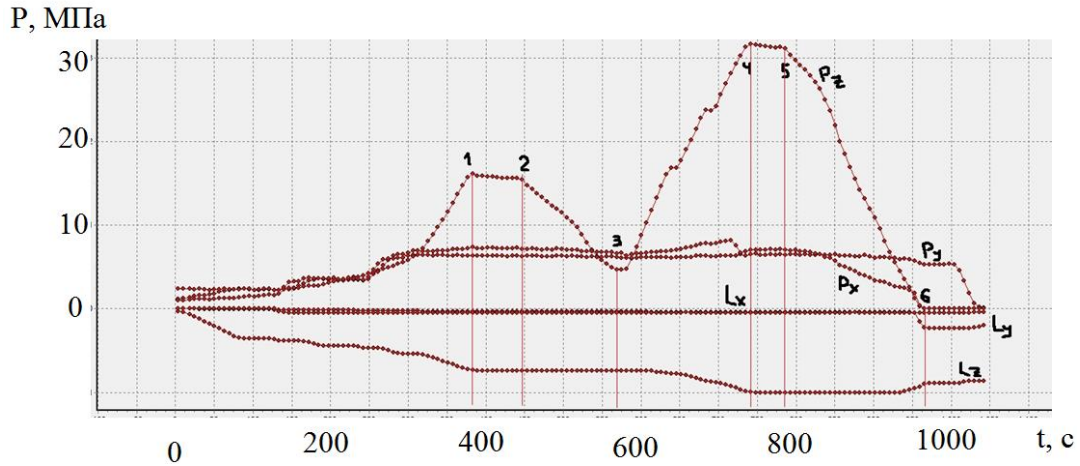
Первый участок объемного нагружения угольного пласта-спутника d_4^1 в глубине массива вне зоны влияния выработки характеризуется тем, что главные напряжения связаны соотношениями: $\sigma_1 = \gamma H$, $\sigma_2 = \sigma_3 = \lambda \gamma H$ (λ – коэффициент бокового распора). Вначале сжатие образца производилось по трем осям одновременно (шаровой тензор напряжений и деформаций) до уровня заданного наименьшего напряжения σ_3 , то есть по схеме $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Затем значение давления σ_1 повышалось по оси OZ, σ_3 – поддерживалось на заданном уровне. Значение промежуточного главного напряжения σ_2 (ось OY) при этом формировалось самопроизвольно за счет деформирования образца.

Для моделирования зоны опорного давления в подрабатываемом пласте-спутнике d_4^1 образец нагружался до значений $\sigma_1 = k \gamma H$, $\sigma_2 = \sigma_3 = \lambda \sigma_1$, где k – коэффициент концентрации напряжений.

Моделирование разгрузки подрабатываемого пласта-спутника d_4^1 осуществлялось двумя способами:

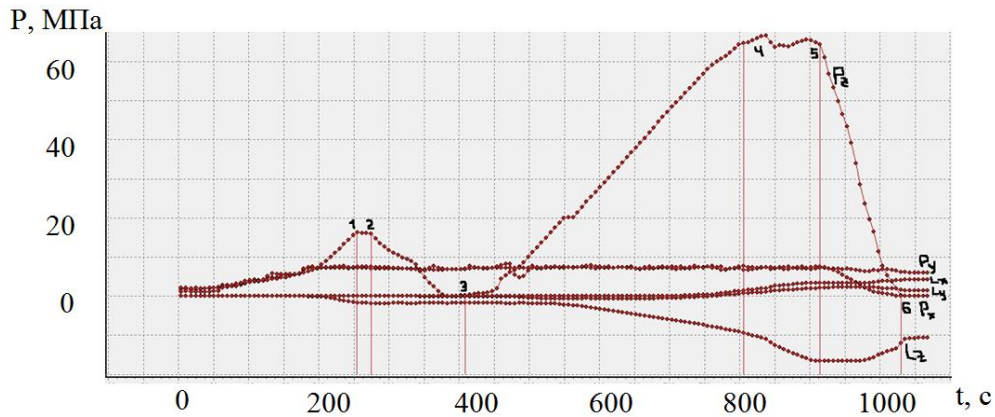
- 1) σ_1 – уменьшалось до нуля, $\sigma_1 > \sigma_3$, σ_2 – формировалось самопроизвольно (рис. 2 – 4);
- 2) σ_3 – уменьшалось до нуля, $\sigma_1 > \sigma_3$, σ_2 – формировалось самопроизвольно (рис. 5, 6).

На графиках проведенных испытаний угольных образцов угля марки «К» ШУ «Покровское» при моделировании зоны предельного состояния пласта – спутника с разгрузкой σ_1 (рис. 2 – 4), участок (0–1) отражает рост напряжений от нуля до значений, характерных заданной глубине (550 м). На участке (2–3) моделирование разгрузки перед зоной опорного давления осуществлялось путем снижения σ_1 до нуля (рис. 2, участок 4). На участке (3–4) σ_1 увеличивается до предельных значений, при этом $\sigma_2 = \sigma_3$ – поддерживается на прежнем уровне. Участок (5–6) формируется при снижении σ_1 до точки, где происходит разрушение угольного образца.



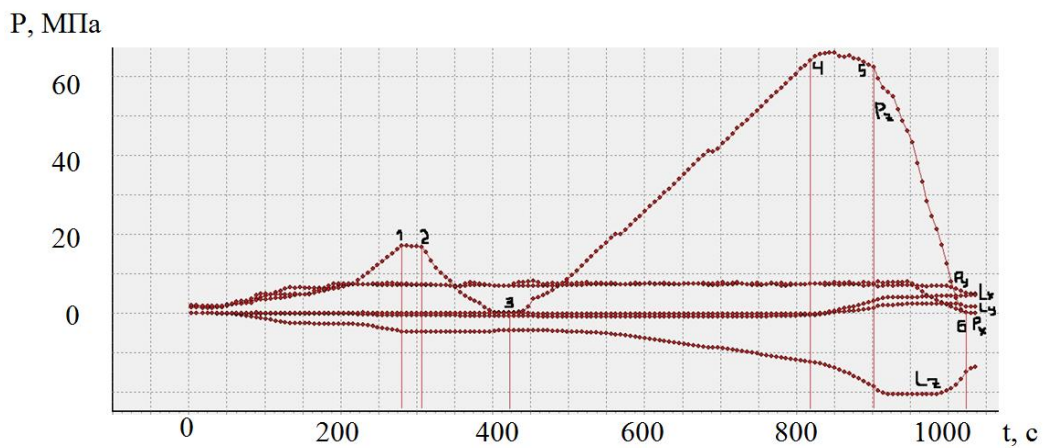
P – давление в цилиндрах УНТС; t – время проведения эксперимента

Рисунок 2 – Моделирование зоны предельного состояния по программе $\sigma_1 = 2\gamma H$ с разгрузкой, $\mu_\sigma = -1$



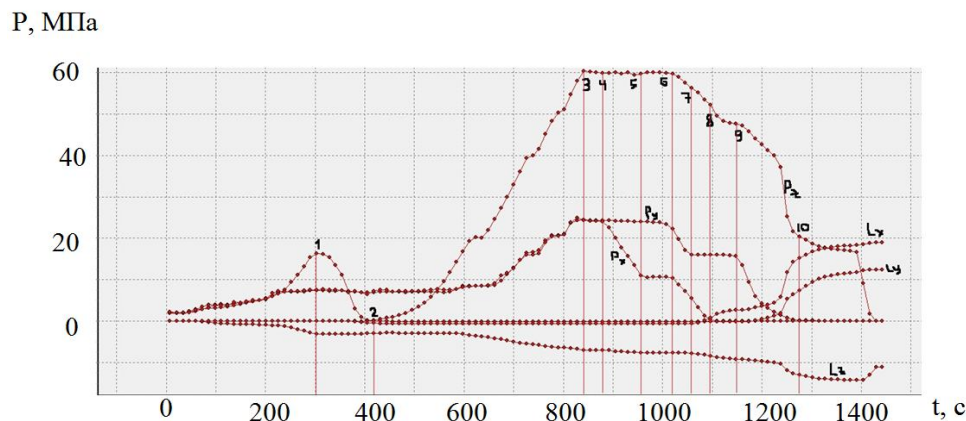
P – давление в цилиндрах УНТС; t – время проведения эксперимента

Рисунок 3 – Моделирование зоны предельного состояния по программе $\sigma_1 = 3\gamma H$ с разгрузкой, $\mu_\sigma = -1$



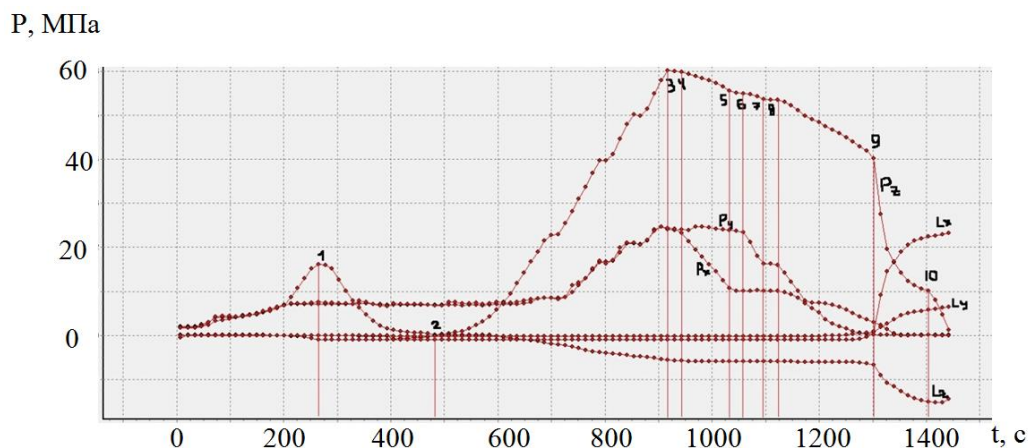
P – давление в цилиндрах УНТС; t – время проведения эксперимента

Рисунок 4 – Моделирование зоны предельного состояния по программе $\sigma_1 = 3\gamma H$ с разгрузкой, $\mu_\sigma = -1$



P – давление в цилиндрах УНТС; t – время проведения эксперимента

Рисунок 5 – Моделирование зоны предельного состояния по программе $\sigma_1 = 3\gamma H$ с разгрузкой, $\mu_\sigma = 0$



P – давление в цилиндрах УНТС; t – время проведения эксперимента

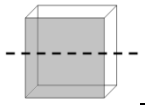
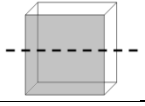
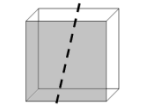
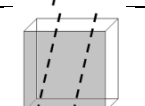
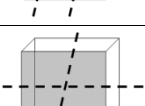
Рисунок 6 – Моделирование зоны предельного состояния по программе $\sigma_1 = 3\gamma H$ с разгрузкой, $\mu_\sigma = 0$

При моделировании зоны предельного состояния пласта – спутника с разгрузкой σ_3 (рис. 5, 6), на участке (0–1) также моделировались напряжения характерные для заданной глубины. На участке (1–2) моделировалась незначительная разгрузка перед зоной опорного давления за счет снижения σ_1 до нуля, при этом $\sigma_2 = \sigma_3$ – поддерживались на прежнем уровне. Участок (4–9) формировался при снижении σ_3 до точки, где происходит разрушение угольного образца.

Экспериментальные результаты по данным механических испытаний углей в объемном неравнокомпонентном напряженном состоянии были обработаны с помощью специально разработанной программы расчета прочностных и деформационных характеристик [4 – 6].

Результаты расчета механических свойств угля представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства исследуемого угля

| № п/п | Направление естественной трещиноватости в угольном образце | Уровень нагружения угольного образца по σ_1 | Физико-механические свойства угля, отражающие его состояние в областях предразрушения (верхняя строка) и разрушения (нижняя строка) | | | | | | | μ_σ | μ_ε | Механизм разрушения |
|-------|--|--|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | | σ_1 , МПа | E, МПа | ν | G, МПа | K, МПа | A_0 , МДж/м ³ | A_f , МДж/м ³ | | | |
| 1. |  | $2\gamma H$ | $\frac{29,3}{10,0}$ | $\frac{3664}{2178}$ | $\frac{0,16}{0,12}$ | $\frac{2126}{1230}$ | $\frac{2423}{1248}$ | $\frac{0,040}{0,006}$ | $\frac{0,040}{0,009}$ | $\frac{-1,1}{-1,0}$ | $\frac{-1,0}{-0,5}$ | сдвиг |
| 2. |  | $3\gamma H$ | $\frac{27,7}{64,3}$ | $\frac{8075}{3500}$ | $\frac{0,20}{0,33}$ | $\frac{4848}{2331}$ | $\frac{6481}{6157}$ | $\frac{0,016}{0,060}$ | $\frac{0,015}{0,245}$ | $\frac{-1,0}{-1,0}$ | $\frac{-0,6}{-0,8}$ | сдвиг |
| 3. |  | $3\gamma H$ | $\frac{62,9}{51,6}$ | $\frac{8459}{1139}$ | $\frac{0,18}{0,36}$ | $\frac{4236}{1043}$ | $\frac{3503}{2597}$ | $\frac{0,116}{0,105}$ | $\frac{0,060}{0,453}$ | $\frac{-1,0}{-1,0}$ | $\frac{-1,0}{-0,8}$ | сдвиг |
| 4. |  | $3\gamma H$ | $\frac{58,8}{47,6}$ | $\frac{8367}{2553}$ | $\frac{0,17}{0,36}$ | $\frac{4914}{1605}$ | $\frac{5914}{5388}$ | $\frac{0,074}{0,04}$ | $\frac{0,072}{0,18}$ | $\frac{-0,6}{-0,3}$ | $\frac{-1,1}{-0,5}$ | сдвиг |
| 5. |  | $3\gamma H$ | $\frac{60}{40}$ | $\frac{3847}{1365}$ | $\frac{0,20}{0,40}$ | $\frac{4571}{961}$ | $\frac{3847}{4936}$ | $\frac{0,062}{0,021}$ | $\frac{0,060}{0,264}$ | $\frac{-0,5}{-0,9}$ | $\frac{-1,3}{-0,8}$ | сдвиг |

В результате лабораторного эксперимента установлено, что в объемном поле сжимающих напряжений (μ_σ – обобщенное сжатие), увеличение пригрузки пласта-спутника от $2\gamma H$ до $3\gamma H$ (рис. 2–4) обуславливает двукратное увеличение упругих свойств угля с изменением значения модуля Юнга от 3600 МПа до 8000 МПа и значений модуля сдвига от 2100 МПа до 4000 МПа. При этом модуль объемного сжатия и коэффициент Пуассона изменяются незначительно в пределах от 2400 МПа до 3500 МПа и от 0,16 до 0,18 соответственно. Начало разрушения угля происходит при равенстве энергий изменения объема и формоизменения ($A_0 = A_f$) и соответствующих видах деформационного и напряженного состояний $\mu_\sigma = -1$, $\mu_\varepsilon = -0,5$, что в дальнейшем приводит к увеличению значений A_f и к смене вида деформационного состояния $\mu_\varepsilon = 0$. Энергия изменения формы и энергия изменения объема становятся равными между собой в момент разрушения образца и составляют $0,04$ МДж/м³ для первой программы нагружения при $\sigma_1 = 2\gamma H$. При $\sigma_1 = 3\gamma H$ значение A_0 и A_f увеличивается и становится $0,06$ МДж/м³. При этом фактическое разрушение образца происходит только за счет сдвига.

Таким образом, установлено, что в объемном поле сжимающих напряжений наблюдается несоответствие между параметрами вида деформационного и напряженного состояний при значениях $\mu_\sigma = -1$ и $\mu_\varepsilon = -0,9 \div -0,7$. Также установлено, что смена вида напряженного состояния от обобщенного сжатия к обобщенному сдвигу при моделировании зоны предельного состояния пласта –

спутника с разгрузкой σ_3 приводит к увеличению коэффициента поперечной деформации в среднем в два раза. При этом модуль объемного сжатия, который характеризуется отношением среднего напряжения и средней деформацией и модуль Юнга практически не изменяются.

Дальнейший анализ полученных результатов моделирования напряженно-деформированного состояния пласта-спутника в условии обобщенного сжатия с переходом в обобщенный сдвиг при его разгрузке показал, что независимо от ориентации естественных трещин в угольном образце (рис. 7, 8), в условиях изменения параметра вида напряженного состояния μ_σ от обобщенного сжатия до обобщенного сдвига (от -1 до 0), разрушение угля происходит за счет роста сдвиговых трещин, расположенных под углом α ($18 - 22$ град.) к линии действия максимального главного напряжения, что соответствует [7, 8], где α – угол разрушения горных пород в объемном поле сжимающих напряжений, который определяется по формуле Черепанова Г.П. $\alpha = \frac{1}{2} \text{arcctg}(\rho)$, ρ – угол внутреннего трения.

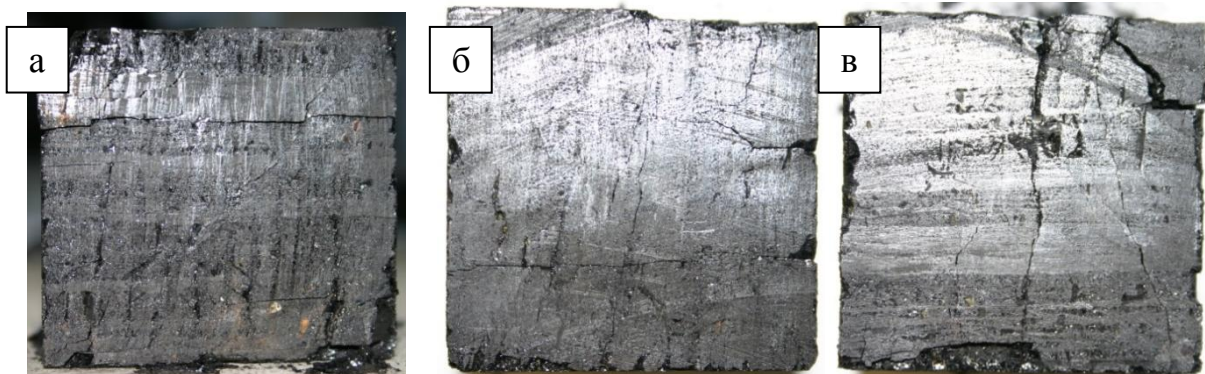


Рисунок 7 – Механизм разрушения образца угля, деформированного по программе $\sigma_1 = (2 \div 3) \cdot \gamma_H$ с разгрузкой, $\mu_\sigma = -1$

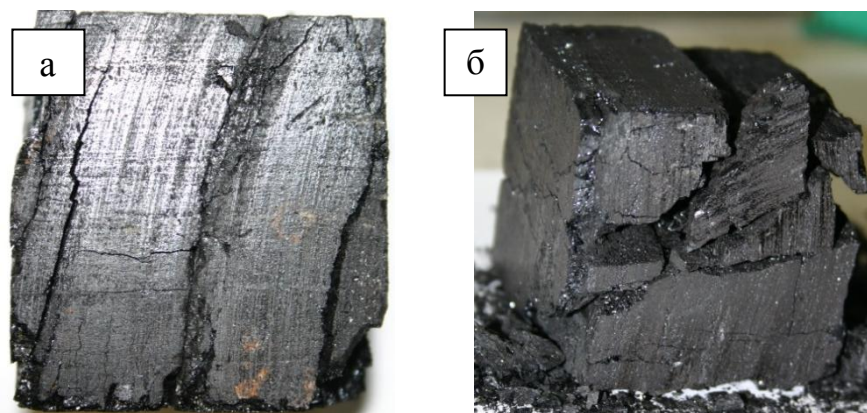


Рисунок 8 – Механизм разрушения образца угля, деформированного по программе $\sigma_1 = 3\gamma_H$ с разгрузкой, $\mu_\sigma = 0$

Таким образом, полученные результаты показывают, что в объемном поле

сжимающих напряжений, не зависимо от уровня и вида напряженного состояния, степени нарушенности угля, при разгрузке углепородного массива в пласте – спутнике образуются деформации, соотношение которых, приводит к формированию вида деформационного состояния близкого к обобщенному сдвигу ($\mu_\varepsilon = -0,5 \div 0$). Использование результатов исследований по влиянию различной ориентации трещин в угле на вторичное трещинообразование при его разрушении, позволит существенно повысить точность прогноза локальных зон скопления свободного метана в тектонически нарушенных пластах – спутниках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бокий, Б.В. Перспектива извлечения метана из техногенных скоплений / Б.В.Бокий, О.И. Касимов // Уголь Украины. – 2005. – № 5. – С. 17 – 21.
2. Аэрогазодинамика выемочного участка / Ф. А. Абрамов, Б. Е. Грецингер, В. В. Соболевский [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1972. – 236 с.
3. Влияние сдвижений пород кровли на газовыделение из выработанного пространства / И.И. Ключко, Н. И. Лобков, А. И.Сергиенко, Л. В. Сергиенко // Сб. науч. труд. Физико-технические проблемы горного производства. – Донецк. – 2010. – №13. – С.103 – 108.
4. Норель, Б. К. Изменение механической прочности угольного пласта в массиве / Б. К. Норель. – М.: Наука, 1982. – 128 с.
5. Алексеев, А.Д. Физика угля и горных процессов / А.Д. Алексеев. – Киев: Наукова думка, 2010. – 424 с.
6. Алексеев, А.Д. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений / А.Д. Алексеев, В. Н. Ревва, Н. А. Рязанцев. – Киев: Наукова думка, 1989. – 168 с.
7. Алексеев, А.Д. Предельное состояние горных пород / А.Д. Алексеев, Н.В. Недодаев. – Киев: Наукова думка, 1982. – 198 с.
8. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – М.: Недра, 1974. – 640 с.

REFERENCES

1. Bokiiy, B.V. and Kasimov, O.I. (2005), “Prospect of extraction of methane from technogenic congestions”, *Coal of Ukraine*, № 5, pp. 17 – 21.
2. Abramov, F.A., Gretsinger, B.E., Sobolevsky, V.V. [and others] (1972), *Aerogazodinamika vyemochnoy uchastka* [Aerogas dynamics of working site], Naukova Dumka, Kiev, SU.
3. Klochko, I.I., Lobkov, N.I., Sergienko, I.A. and Sergienko, L.V. (2010), “The influence of motions of breeds of a roof on gas emission from goaf”, *Physical and technical problems of mining*, no. 13, pp. 103 – 108.
4. Norel, B. K. (1982), *Izmenenie mekhanicheskoy prochnosti ugolnogo plasta v massive* [The change in the mechanical strength of the coal seam in the array], Nauka, Moscow, SU.
5. Alekseev, A.D. (2010), *Fizika uglya i gornykh protsessov* [Physics of coal and mining processes], Naukova Dumka, Kiev, UA.
6. Alekseev, A.D., Revva, V.N. and Ryazantsev, N.A. (1989), *Razrusheniye gornykh porod v obyemnom pole szhimayushchikh napryazheniy* [Destruction of rocks in the volume field of compressive stresses], Naukova Dumka, Kiev, SU.
7. Alekseev, A.D. and Nedodaev, N.V. (1982), *Predelnoye sostoyaniye gornykh porod* [Limit state of rocks, Naukova Dumka, Kiev, SU.
8. Cherepanov, G. P. (1974), *Mekhanika khrupkogo razrusheniya* [Mechanics of brittle fracture], Nedra, Moscow, SU.

Об авторах

Сергиенко Лиана Валерьевна, магистр, младший научный сотрудник отдела управления состоянием горного массива, Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАН Украины), Днепропетровск, Украина, sergienko@mail.ru.

Гладкая Елена Викторовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего отдела управления состоянием горного массива, Институт физики

горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАН Украины), Днепропетровск, Украина, gladkaya_ev@mail.ru.

Молодецкий Андрей Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела управления состоянием горного массива, Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАН Украины), Днепропетровск, Украина, molodoy27@yandex.ru.

About the authors

Sergienko Liana V., Master of Sciences, junior Researcher in the department of control the state massif, Institute of Physics of Mining Processes the National Academy of Sciences of Ukraine (NASU IPhMP), Dnepropetrovsk, Ukraine, sergienko@mail.ru.

Gladkaya Elena V., Ph.D., Candidate of technical Science (Ph.D.), Senior Researcher, Performing duties of Head of Department of control the state massif, Institute of Physics of Mining Processes the National Academy of Sciences of Ukraine (NASU IPhMP), Dnepropetrovsk, Ukraine, gladkaya_ev@mail.ru.

Molodetskyi Andrey V., Ph.D., Candidate of technical Science (Ph.D.), Researcher in the department of control the state massif, Institute of Physics of Mining Processes the National Academy of Sciences of Ukraine (NASU IPhMP), Dnepropetrovsk, Ukraine, molodoy27@yandex.ru.

Анотація. На основі експериментальних даних було проведено аналіз характеру й механізму руйнування вугілля в умовах, що моделюють напружено-деформований стан порушеного пласта-супутника при веденні очисних робіт. За допомогою установки нерівнокомпонентного тривісного стиску (УНТС), яка дозволяє у трьох взаємно перпендикулярних напрямках створювати незалежні напруження, аналогічні по величині й напрямку в гірському масиві, виконані механічні випробування вугілля різного ступеня порушеності. Встановлено, що в об'ємному полі стискуючих напружень, не залежно від рівня та виду напруженого стану, ступеня порушеності вугілля, при розвантаженні вуглепородного масиву в пласті - супутнику утворюються деформації, співвідношення яких призводить до формування виду деформаційного стану, що близький до узагальненого зсуву.

Ключові слова: вугілля, механічні характеристики, вид напруженого стану.

Abstract. Experimental data have been to analyze both nature and mechanism of coal breaking in the context of modeling stress-and-strain state of a disturbed accompanying bed while mining. A plant of inequicomponent three-axis compression (PITAC) allows development of independent voltages (being similar in their value and direction within rock mass) in three mutually perpendicular directions has been used for mechanical tests of coal with various disturbance degrees. It has been determined that within a three-dimensional field of compressing stresses irrespectively of level and type of stress state as well as a degree of coal disturbance deformations are shaped within an accompanying bed in the process of coal-bearing mass unloading. Ratio of the deformations results in the development of the type of deformation state being close to generalized shift.

Key-words: coal, mechanical characteristics, type of stress state.

Статья поступила в редакцию 11.11.2015

Рекомендовано к печати д-ром технических наук Курносовым С.А.