

*Розглянуто можливість використання забійного сигналізатора визначення моменту зустрічі покладу корисної копалини для підвищення відбору кондиційних проб керну при бурінні свердловин інструментом, оснащеним надтвердими матеріалами.*

**Ключові слова:** буріння, бурова коронка, породи, що перемежуються, вугілля, сигналізатор, якість.

*The article describes the downhole detector signaling the time of first contact with mineral deposits and its applicability to drilling by superhard bits to improve the core sampling.*

**Key words:** drilling, drill bit, alternating rocks, coal, signal device and quality.

### Литература

1. Пат. РФ № 2263197, Е21В 10/48. Р. К. Богданов, А. А. Шульженко, А. П. Загора, А. М. Исонкин. Буровая коронка. – Опубл. 27.10.2005; Бюл. № 30.
2. А. с. СССР № 1141188, кл. Е21В 47/12. Забойный датчик сигнализатора встречи угольных пластов; БИ № 7, 1985.
3. Сулакшин С. С. Современные способы и средства отбора проб полезных ископаемых. – М.: Недра, 1970. – 248 с.
4. Пат. України 26192, Е21В 47/12. Сигналізатор зустрічі м'яких продуктивних пластів / В. С. Щербачов, В. І. Сорокін. – Опубл. 10.09.2007; Бюл. № 14.

*Поступила 19.06.12*

УДК 622.27.7.3

**А. А. Кожевников**<sup>1</sup>, д-р техн. наук;

**Ю. Н. Вахалин**<sup>2</sup>, **А. Г. Александров**<sup>2</sup>, кандидаты технических наук

<sup>1</sup>Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»,  
г. Днепропетровск, Украина

<sup>2</sup>Государственное высшее учебное «Химико-технологический университет»,  
г. Днепропетровск, Украина

### ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И ТРЕЩИНОВАТОСТИ УГЛЕЙ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

*Рассмотрено влияние тепловой термоциклической обработки на прочность углей и изменение их макро- и микротрещиноватости.*

**Ключевые слова:** уголь, прочность угля, тепловое воздействие, трещиноватость угля.

Считается нерентабельной и поэтому не осуществляется разработка сложноструктурных и малых по запасам участков угольных месторождений, хотя на действующих шахтах некондиционные запасы составляют 3,9 млрд. т, из них 2,6 млрд т забалансовые по зольности и горнотехническим условиям. В этой связи перспективно создание нетрадиционных способов добычи угля, которые будут обеспечивать экономически выгодное его извлечение в любых условиях. Одним из возможных направлений решения этой проблемы является приведение угля в подвижное или ослабленное состояние на месте залегания геотехнологическими методами, основанными на физических, химико-физических, химических, биологических процессах и их комбинациях с последующей выдачей на поверхность. Поэтому, актуальными являются исследования по изучению поведения угля при различных методах воздействия на него.

Исследователи (ИГТМ АН Украины, МГИ, ИГД им. А. А. Скочинского и др.) проводили определенный объем работ по исследованию гидроимпульсного, вибрационного, химико-физического, микробиологического и газификационного способов геотехнологической добычи угля и получили положительные результаты [1].

Результаты исследований крепких горных пород показали, что их крепость можно эффективно перевести в более низкую категорию термоциклическим воздействием, основанным на последовательном нагревании и охлаждении участков поверхности горных пород. Последовательное чередование нескольких циклов термоциклического воздействия на поверхность крепкого гранита приводит к снижению крепости обрабатываемых участков в несколько раз. Вопрос возможности применения термоциклического разрушения в технологии добычи угля требует дополнительного изучения. Как показывают расчеты, при резком охлаждении угля, обладающего высокими упругими свойствами  $\beta E$  (где  $\beta$  – коэффициент теплового расширения,  $E$  – модуль Юнга), возникают большие растягивающие напряжения, достигающие предельных значений при температурной разности между углем и охлаждающей средой 10–20 К. В отличие от крепких горных пород, нагревание и охлаждение которых могут осуществляться преимущественно поверхностно, с учетом пористости и трещиноватости породы угля эффективность термоциклической обработки можно существенно повысить за счет обработки массива теплоносителями и хладоагентом в режиме фильтрации.

Цель настоящей работы – исследовать поведение угля в различных условиях термоциклического нагружения, в частности, изменение прочности на сжатие в зависимости от режимов тепловой обработки. Так как изменение прочности после термоциклического воздействия является следствием развития дополнительной трещиноватости угля, изучали также изменение его макро- и микротрещиноватости. Трещиноватость – очень важный показатель угля, который влияет на его газонасыщенность и фильтрационные характеристики, а также дегазацию угольных пластов и нагнетание в них жидкостей для различных технологических целей. В реальных технологических процессах выемки угля из тонких пластов термоциклическое разупрочнение можно использовать как самостоятельно, так и в сочетании с любым другим видом нагрузки. Массив подвергают термоциклической обработке через одну или систему скважин. Тепловое воздействие может осуществляться поверхностно последовательным заполнением скважин теплоносителем или хладоагентом и объемно за счет фильтрации по пласту. В качестве теплоносителя используют нагретые жидкости или газы, в качестве хладоагентов – жидкости, газы, сжиженные газы в широком температурном интервале.

Для изучения влияния агентов температуры, создаваемой в угле при термоциклическом воздействии, на разупрочнение в ИГТМ АН Украины были проведены соответствующие экспериментальные исследования. Образцы Донецкого угля марки Г произвольной формы и объемом не менее 1000 см<sup>3</sup> каждый, отобранные из одного участка с приблизительно одинаковой геометрией, подвергали поверхностной тепловой и термоциклической обработке при следующих режимах ( $T_n$  – температура нагревания образца,  $T_{ox}$  – температура охлаждения образца,  $\tau$  – продолжительность нагревания,  $\Delta T$  – разность температур между нагреванием и охлаждением).

1. Нагревали образец в кипящей воде при  $T_n = 373$  К,  $\tau = 1$  ч, затем в течение 10 мин охлаждали в воде при  $T_{ox} = 273$  К,  $\Delta T = 100$  К.

2. Нагревали в кипящей воде при  $T_n = 373$  К,  $\tau = 1$  ч и в течение 5 ч, затем охлаждали в той же воде до  $T_{ox} = 273$  К,  $\Delta T = 100$  К.

3. Нагревали в муфельной печи при  $\tau = 1$  ч до  $T_n = 373$  К, затем охлаждали в воде в течение 10 мин при  $T_{ox} = 273$  К,  $\Delta T = 100$  К.

4. Нагревали в муфельной печи в течение  $\tau = 1$  ч до  $T_n = 473$  К и охлаждали в воде в течение 10 мин при  $T_{ox} = 273$  К,  $\Delta T = 200$  К.

5. Охлаждали в течение  $\tau = 10$  мин сухой образец при  $T_n = 273$  К в жидком азоте при  $T_{ox} = 77$  К,  $\Delta T = 200$  К.

6. Охлаждали образец влажностью 6 % при  $T_n = 273$  К в жидком азоте в течение 10 мин при  $T_{ox} = 77$  К,  $\Delta T = 200$  К.

7. Нагревали в кипящей воде в течение  $\tau = 1$  ч до  $T_n = 373$  К и охлаждали в жидком азоте в течение 10 мин при  $T_{ox} = 77$  К,  $\Delta T = 200$  К.

8. Нагревали в муфельной печи при  $\tau = 1$  ч до  $T_n = 373$  К и охлаждение в жидком азоте 10 мин при  $T_{ox} = 77$ ,  $\Delta T = 300$  К.

9. Нагрев в муфельной печи в течение  $\tau = 1$  ч до  $T_n = 473$  К и охлаждали в жидком азоте в течение 10 мин при  $T_{ox} = 77$  К,  $\Delta T = 400$  К.

10. Нагревали в муфельной печи в течение  $\tau = 1$  ч до  $T_n = 473$  К и охлаждали в жидком азоте в течение 10 мин при  $T_{ox} = 77$  К,  $\Delta T = 400$  К (два цикла).

11. Нагревали в кипящей воде в течении  $\tau = 1$  ч до  $T_n = 373$  К и охлаждали в жидком азоте в течении 10 мин при  $T_{ox} = 77$  К,  $\Delta T = 300$  К.

12. Охлаждали сухой образец при  $T_n = 273$  К в жидком азоте в течение 10 мин при  $T_{ox} = 77$  К,  $\Delta T = 200$  К (пять циклов).

13. Нагревали в муфельной печи в течение  $\tau = 2$  ч до  $T_n = 678$  К и охлаждали в воде в течение 10 мин при  $T_{ox} = 273$  К,  $\Delta T = 400$  К.

14. Нагревали в муфельной печи в течение  $\tau = 2$  ч до  $T_n = 623$  К и охлаждали с печью в течение 5 ч до  $T_{ox} = 293$  К.  $\Delta T = 330$  К.

15. Нагревали в муфельной печи в течение  $\tau = 1$  ч до  $T_n = 673$  К и охлаждали в воде в течение 10 мин при  $T_{ox} = 273$  К,  $\Delta T = 300$  К.

16. Нагревали в муфельной печи в течение  $\tau = 1$  ч до  $T_n = 473$  К и охлаждали на воздухе в течение 5 ч до  $T_{ox} = 273$  К,  $\Delta T = 180$  К.

17. Нагревали в воде в течение  $\tau = 1$  ч до  $T_n = 323$  К и охлаждали в течение 10 мин в воде,  $T_{ox} = 273$  К,  $\Delta T = 50$  К.

18. Нагревали в кипящей воде в течение  $\tau = 1$  ч до  $T_n = 373$  К образец влажностью 6 % и охлаждали в жидком азоте в течение 10 мин при  $T_{ox} = 77$  К,  $\Delta T = 296$  К.

Исследовали слоистый уголь со средней прочностью на сжатие  $\sigma = 6190 \cdot 10^4$  Па.

Результаты наблюдений в процессе термоциклической обработки образцов угля показали, что большинство режимов обработки приводит к растрескиванию угля по слоям. В режимах с высоким перепадом температуры  $\Delta T \geq 300$  К образовывались трещины, перпендикулярные направлению слоев. При трех-, пятикратной обработке угля по схемам, обеспечивающим  $\Delta T \geq 300$  К, образцы делятся на фракции размером  $\approx 20$  мм. После одного цикла обработки все образцы, несмотря на очевидное изменение их прочности, сохраняли целостность.

Изменение прочности угля при термоциклической обработке оценивали прочность на одноосное сжатие  $\sigma$ . Для этого из каждого обработанного образца вырезали не менее 5 кубиков размером  $2 \times 2 \times 2$  см и раздавливали их с помощью разрывной машины Р-10 с фиксацией разрушающей нагрузки. Прочность угля при заданном режиме тепловой обработки определяли как среднее арифметическое. Результаты экспериментов приведены в таблице.

В процессе исследований изучали также влияние термоциклического воздействия на более мелкую структуру угля (микротрещины, поры). Под микротрещинами в угле подразумевают невидимые трещины – до 1 мм. Поры угля по размерам делят на три класса: сверхкапиллярные ( $> 0,1$  мм), капиллярные (0,002–0,1 мм) и субкапиллярные ( $< 0,0002$  мм). Существующие микроскопические методы изучения трещиноватости сводятся в основном к определению количественных показателей, характеризующих нарушенность исследуемого объекта: количества трещин или их длины, отнесенной к единице площади среза аншлифа. В каждом конкретном методе в зависимости от цели исследования определяют дополнительные показатели: среднее зияние трещин, равномерность их распределения на площади, заполнение минеральными примесями, отношение количества заполненных трещин к количеству незаполненных, количество систем трещин, их соотношение и др.

**Влияние термической обработки на прочность угля за один цикл**

№	Уголь				
	$T, K$	$\Delta T, K$	$T, \text{мин}$	Вид воздействия	$\sigma \cdot 10^{-4}, \text{Па}$
1	$\frac{373}{273}$	100	$\frac{60}{10}$	<u>Вода</u> Вода	4040
2	$\frac{373}{273}$	100	$\frac{60}{300}$	<u>Вода</u> Вода	4040
3	$\frac{373}{373}$	100	$\frac{60}{10}$	<u>Печь</u> Вода	4040
4	$\frac{473}{273}$	200	$\frac{60}{10}$	<u>Печь</u> Вода	4040
5	$\frac{273}{77}$	200	$\frac{300}{10}$	<u>Воздух</u> Жидкий азот	4040
6	$\frac{273}{77}$	200	$\frac{300}{10}$	<u>Вода</u> Жидкий азот	4040
7	$\frac{373}{77}$	300	$\frac{60}{10}$	<u>Вода</u> Жидкий азот	4040
8	$\frac{373}{77}$	300	$\frac{60}{10}$	<u>Печь</u> Жидкий азот	4040
9	$\frac{473}{77}$	400	$\frac{60}{10}$	<u>Печь</u> Жидкий азот	4040
10	$\frac{473}{77}$	400	$\frac{60}{10}$	<u>Печь</u> Жидкий азот	4040
11	$\frac{373}{77}$	300	$\frac{60}{10}$	<u>Печь</u> Жидкий азот	4040
12	$\frac{273}{77}$	200	$\frac{300}{10}$	<u>Воздух</u> Жидкий азот	4040
13	$\frac{673}{273}$	400	$\frac{120}{10}$	<u>Печь</u> Вода	952
14	$\frac{623}{293}$	330	$\frac{30}{600}$	<u>Печь</u> Печь	952
15	$\frac{573}{273}$	300	$\frac{60}{10}$	<u>Печь</u> Вода	3570
16	$\frac{473}{293}$	180	$\frac{60}{600}$	<u>Печь</u> Печь	3570
17	$\frac{323}{273}$	50	$\frac{60}{10}$	<u>Вода</u> Вода	3570
18	$\frac{373}{77}$	300	$\frac{60}{10}$	<u>Вода</u> Жидкий азот	3570
19	Без обработки				6190

*Примечание.* В числителе данные, полученные при нагревании, в знаменателе – при охлаждении.

Трещиноватость угля изучали на аншлифах в отраженном свете под микроскопом ПОЛАМ Р-313 и на шлифах в проходящем поляризованном свете при увеличении 25–60. Такое увеличение обусловлено необходимостью наблюдения больших полей зрения при исключении значительной ошибки количественных измерений.

На аншлифах и шлифах угля под микроскопом определяли основные показатели: удельную длину микротрещин, их среднее зияние и коэффициент вариации удельной длины трещин на площади шлифа.

Интенсивность микротрещин оценивали по их удельной длине (суммарной протяженности микротрещин, приходящейся на 1 мм<sup>2</sup> шлифа). Проведенные исследования показали, что термоциклическое воздействие на образцы угля приводит к развитию макротрещин, а также влияет на длину и раскрытие микротрещин и пор.

В результате термоциклической обработки угля в различных режимах происходит удлинение и раскрытие природных микротрещин и пор. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что в режимах с предварительным нагреванием в печи (схемы обработки 13–15) микротрещины резко увеличиваются – в 3–4 раза по сравнению с исходным углем. При других режимах термоциклической обработки микротрещины в большей степени удлиняются, нежели раскрываются.

В результате тепловой обработки резко увеличивается ширина, в основном, микротрещин заполненных в исходном состоянии кальцитом. Таких трещин в изучаемых углях до 70 %. По-видимому, это обусловлено тем, что кальцит, подверженный термообработке (особенно в печи), расширяется и распирает трещины и поры.

У незаполненных микротрещин после термоциклической обработки в большей степени наблюдается увеличение длины и в меньшей – ширины.

Таким образом, характер увеличения искусственных микротрещин в угле определяется не только перепадом температуры, но и в определенной мере наличием и свойствами минерального заполнителя природных микротрещин.

В результате микроскопических исследований установили, что вследствие термоциклической обработки угля удлиняются и раскрываются природные системы микротрещин, т. е. по природным развиваются искусственные микротрещины. Количественное определение удельной длины и среднего зияния микротрещин подтверждают результаты микроскопических наблюдений.

Характер и интенсивность развития искусственной микротрещиноватости в изученных образцах угля зависит в основном от режима термоциклической обработки. На эту зависимость накладываются колебания, связанные с неоднородностью вещественно-петрографического состава и интенсивности систем природных трещин.

#### **Выводы**

1. Термоциклическое воздействие на уголь приводит к снижению его прочности в 1,5–6,5 раз в зависимости от режима обработки.
2. Снижение прочности обусловлено удлинением и раскрытием в угле природных систем как крупных трещин (макротрещин), так и микротрещин и пор.
3. Все режимы термообработки приводят к видимому растрескиванию угля по слоям.
4. Режимы обработки при температуре  $\Delta T \geq 300$  К приводят также к развитию трещин, перпендикулярных к направлению слоев.
5. При трех-, пятикратной обработке угля по схемам, обеспечивающим  $\Delta T \geq 300$  К, образцы рассыпаются на фракции размером  $\approx 20$  мм.

*Розглянуто питання впливу теплової термоциклічної обробки на міцність вугілля та його макро- та мікротріщинність.*

**Ключові слова:** вугілля, міцність вугілля, тепловий вплив, тріщини у вугіллі.

*The influence thermal thermocycle of processing on durability coals and change them big and small crack is considered.*

**Key words:** coal, strong coal, thermal influence, crack in coal.

#### **Литература**

1. Нетрадиционные технологические процессы добычи угля. / В. Н. Потураев, С. А. Полуянский, А. Н. Зорин и др. – К.: Техніка, 1986. – 117 с.

*Поступила 11.06.12*