

Разработка математической модели поля напряжений в целиках слоистой текстуры на угольных месторождениях

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-8-84-86>

ХАЛКЕЧЕВ Р.К.

Доктор техн. наук, доцент,
профессор кафедры
инфокоммуникационных технологий
НИТУ «МИСИС»,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: syrus@list.ru

ЛЕВКИН Ю.М.

Доктор техн. наук,
член Союза маркшейдеров России,
профессор Московского
политехнического университета,
105064, г. Москва, Россия,
e-mail: lev5353@bk.ru

ХАЛКЕЧЕВ К.В.

Доктор физ.-мат. наук,
доктор техн. наук,
профессор кафедры геологии
и маркшейдерского дела
НИТУ «МИСИС»,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: h_ketal@mail.ru

Разработана математическая модель, позволяющая определить поле напряжений в целиках слоистой текстуры на угольных месторождениях. Предполагается, что слои целика имеют поликристаллическую структуру. Деформационные свойства слоев характеризуются тензором эффективных упругих модулей. Для расчета этих упругих характеристик получены конечные выражения. Расчеты по ним дают различные значения эффективных упругих модулей для слоев. При попадании таких слоев в целике вплотную друг к другу в них возникают напряжения сдвига, ведущие к образованию трещины. Трещина образует дополнительное поле напряжений, для расчета которых получены конечные выражения. Под действием горного давления индуцируется в слои неоднородное поле напряжений на структурном уровне. В результате напряженное состояние в целиках образуется суперпозицией напряжений, индуцированных внешним полем и полем, наведенным магистральной трещиной между слоями.

Ключевые слова: математическая модель, устойчивость целика, касательные напряжения, магистральная трещина, неоднородная среда, поликристаллическая горная порода, эффективный модуль упругости, суперпозиция полей напряжений.

Для цитирования: Халкечев Р.К., Левкин Ю.М., Халкечев К.В. Разработка математической модели поля напряжений в целиках слоистой текстуры на угольных месторождениях // Уголь. 2023. № 8. С. 84-86. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-84-86.

ВВЕДЕНИЕ

При подземной добыче угля камерно-столбовой системой разработки целики в большинстве случаев представлены вмещающими горными породами слоистой текстуры. Большое значение для обеспечения устойчивости шахт имеет точное определение напряженно-деформированного состояния в подерживающих целиках. При приближенном определении завышенные параметры напряженно-деформированного состояния приводят к неоправданно большим характерным размерам целиков, в то время как заниженные параметры – могут спровоцировать разрушения целиков, ведущих к аварийной ситуации.

Существующие работы по определению напряженно-деформированного состояния в целиках обладают следующими недостатками: не учитываются структурно-текстурные особенности и наличие магистральной трещины [1, 2, 3, 4]. С особой трудностью сталкиваются исследователи при определении напряженно-деформированного состояния с образованием магистральной трещины в целиках слоистой текстуры. Поэтому целесообразно разра-

ботать математическую модель, позволяющую определить поле напряжений при образовании магистральной трещины в целиках слоистой текстуры на угольных месторождениях.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Для разработки математической модели поля напряжений в целиках слоистой текстуры на угольных месторождениях построим содержательную модель.

Предположим, что целик представлен поперечными параллельными слоями горных пород поликристаллической структуры, на торец которого действует горное давление. Поле напряжений в таких целиках как целого формируется из полей напряжений слоев и их взаимодействий. Каждый слой имеет поликристаллическую структуру. Внешнее поле напряжений для каждого слоя может быть определено по максимальной длине вертикальной трещины в них соответственно [5].

Построим математическую модель на основе разработанной содержательной модели. Поставим в соответствие целику слоистой текстуры слоистую среду, каждый слой которой обладает упругими свойствами, определяемыми эффективными тензорами модулей упругости. Данные эффективные упругие модули могут быть определены в рамках математических моделей, представленных в работе [5, 6], которые сводятся к следующему виду:

$$C_{\text{эф}} = \langle (I + A \cdot C_1)^{-1} \rangle < (I + A \cdot C_1)^{-1} \rangle^{-1}, \quad (1)$$

где $\langle \rangle$ – усреднение по ансамблю полей неоднородностей; I – единичный четырехвалентный тензор; A – преобразование Фурье ядра интегрального оператора; $C_1 = C - \langle C \rangle$; C – модуль упругости зерна горной породы.

Расчеты по формуле (1) дают различные значения эффективных упругих модулей для слоев. Это означает, что они деформируются по-разному – одни больше, другие меньше. Если теперь слои с различными значениями эффективных упругих модулей в целике находятся в соприкосновении, то из-за разной деформации между слоями возникают напряжения сдвига, ведущие к образованию трещины. Рост этой трещины сдвига со временем делает ее магистральной. Используя метод аналогий с работой [7, 8], получим для продольного сдвига (скольжения в направлении, параллельном краю трещины) компоненты напряжения у вершины трещины, которые имеют вид:

$$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}, \quad (2)$$

$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}, \quad (3)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0, \quad (4)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{xy}$ – компоненты тензора напряжений; K_{III} – коэффициент интенсивности напряжений; r, θ – полярные координаты в точке определения напряжения.

Построим математическую модель поля напряжений в каждом слое на основе разработанной содержательной модели. Поставим в соответствие каждому слою поликристаллической структуры упругую среду с неоднородностями,

соответствующими зернам горной породы. Отсюда, используя метод аналогии с работами [9, 10, 11, 12], для поля напряжений σ в неоднородной среде получим:

$$\sigma = C(I + AC_1)^{-1} < C(I + AC_1)^{-1} \rangle^{-1} \sigma_0, \quad (5)$$

где σ_0 – внешнее поле напряжений, действующее в точке определения напряжения.

Суперпозиции напряжений (1-4) и (5) определяют внутреннее напряжение в углевлещающих целиках слоистой текстуры со слоями поликристаллической структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученное решение (1-5) определяет поле напряжений в целиках слоистой текстуры и поликристаллической структуры с учетом образования магистральной трещины из-за различных упругих характеристик соприкасающихся слоев. На основе полученных решений можно сделать следующие выводы.

1. Магистральная горизонтально направленная трещина сдвига образуется в целике слоистой текстуры в результате возникновения дополнительного напряжения между соприкасающимися разномодульными слоями (1) и индуцирует дополнительное собственное внутреннее поле напряжений.

2. Внутреннее поле напряжений, обусловленное внешним горным давлением и структурными особенностями поликристаллических горных пород в слоях, является неоднородным на уровне структуры.

3. Суперпозиция напряжений (2-5), индуцированная магистральной трещиной, а также обусловленная внешним горным давлением и структурными особенностями поликристаллических горных пород в слоях, способствует формированию неоднородного поля напряжений в целике слоистой текстуры.

Список литературы

1. Pillar safety in shallow salt caverns by using numerical simulations / H. Yu, Y. Liu, H. Ma et al. // Journal of Energy Storage. 2022. Vol. 55. Article 105881. DOI: 10.1016/j.est.2022.105881.
2. Han P., Zhang C., Wang W. Failure analysis of coal pillars and gateroads in longwall faces under the mining-water invasion coupling effect // Engineering Failure Analys. 2022. Vol. 131. Article 105912. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105912.
3. Pseudo-discontinuum model to simulate hard-rock mine pillars / E. Rógenes, A.D.S. Gomes, M.M.D. Farias et al. // Underground Space. 2023. Vol. 11. P. 81-95. DOI: 10.1016/j.undsp.2022.12.002.
4. Cooperative mining technology and strata control of close coal seams and overlying coal pillars / S. Qiang, G. Jialiang, Y. Feng et al. // Alexandria Engineering Journal. 2023. Vol. 73. P. 473-485. DOI: 10.1016/j.aej.2023.04.071.
5. Халкечев Р.К. Теория мультифрактального моделирования процессов деформирования и разрушения породных массивов как основа автоматизации технологии буровзрывных работ на угольных разрезах // Уголь. 2019. № 11. С. 32-34. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-32-34.
6. Халкечева Л.К., Халкечев Р.К. Автоматизированная система мониторинга состояния транспортных берм на предмет оползневой опасности в виде проседания // Уголь. 2022. № 4. С. 50-52. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-4-50-52.

7. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
8. Левкин Ю.М. Использование технологии дистанционного зондирования и математического моделирования для анализа аварийных горных выработок // Уголь. 2022. № 6. С. 32-34. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-32-34.
9. Chunuev I.K., Levkin Y.M., Bolotbekov Z. Determination of bench, dump and road sliding wedge technological parameters // Mining Science and Technology (Russian Federation). 2021. Vol. 6. P. 31-41. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-1-31-41.
10. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Математическое моделирование неоднородного упругого поля напряжений породного массива кристаллической блочной структуры // Горный журнал. 2016. № 3. С. 200-205. DOI: 10.17580/gzh.2016.03.05.
11. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Управление селективностью разрушения при дроблении и измельчении геоматериалов на основе методов подобия и размерности в динамике трещин // Горный журнал. 2016. № 6. С. 64-66. DOI: 10.17580/GZH.2016.06.04.
12. Халкечев Р.К. Нечеткая математическая модель изменения концентрации трещин в минерале под действием внешней нагрузки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 6. С. 97-105. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-97-105.

Original Paper

UDC 622.272:658.012.122:51.001.57 © R.K. Khalkechev, Yu.M. Levkin, K.V. Khalkechev, 2023
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 8, pp. 84-86
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-8-84-86>

Title
MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT OF THE STRESS FIELD IN THE PILLARS STRATIFIED TEXTURE IN COAL DEPOSITS

Authors

Khalkechev R.K.¹, Levkin Yu.M.², Khalkechev K.V.¹,

¹ National University of Science and Technology "MISIS" (NUST "MISIS"), Moscow, 119049, Russian Federation

² Moscow Polytechnic University, Moscow, 105064, Russian Federation

Authors Information

Khalkechev R.K., Doctor of Engineering Sciences, Professor at subdepartment: "Infocommunication technologies", e-mail: syrus@list.ru

Levkin Yu.M., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Member of the Russian Union of Surveyors, e-mail: lev5353@bk.ru

Khalkechev K.V., Doctor of Physico-Mathematical Science, Doctor of Engineering Sciences, Professor at subdepartment: "Geology and mine surveying", e-mail: h_kemal@mail.ru

Abstract

A mathematical model has been developed that makes it possible to determine the stress field in the pillars of a stratified texture in coal deposits. It is assumed that stratum in pillars have a polycrystalline structure. Effective tensors of elastic modulus are used to determine the deformation properties of stratum in pillars. To calculate these elastic characteristics, final expressions are obtained. Calculations based on these expressions give different values of the effective tensors of elastic modulus for stratum in pillars. When such stratum are too close to each other in the pillar, shear stresses arise in them, leading to the formation of a crack. This crack forms an additional stress field, which are determined with appropriate mathematical expressions. Under the action of rock pressure, an inhomogeneous stress field is induced into the stratum at the structural level. As a result, the stress state in the pillars is formed by a superposition of stresses induced by the external field and the field induced by the main crack between stratum.

Keywords

Mathematical model, Pillar stability, Shearing stress, Main crack, Inhomogeneous medium, Full-crystalline rock, Effective elastic modulus, Superposition of stress fields.

References

1. Yu H., Liu Y., Ma H., Zhao K. & Liu J. Pillar safety in shallow salt caverns by using numerical simulations. *Journal of Energy Storage*, 2022, (55), Article 105881. DOI: 10.1016/j.est.2022.105881.
2. Han P., Zhang C. & Wang W. Failure analysis of coal pillars and gate-roads in longwall faces under the mining-water invasion coupling effect. *Engineering Failure Analysis*, 2022, (131), Article 105912. DOI: 10.1016/j.eng-failanal.2021.105912.
3. Rógenes E., Gomes A.D.S., Farias M.M.D. & Rasmussen L.L. Pseudo-discontinuum model to simulate hard-rock mine pillars. *Underground Space*. 2023, (11), pp. 81-95. DOI: 10.1016/j.undsp.2022.12.002.

4. Qiang S., Jialiang G., Feng Y. & Ruhong B. Cooperative mining technology and strata control of close coal seams and overlying coal pillars. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, (73), pp. 473-485. DOI: 10.1016/j.aej.2023.04.071.

5. Khalkechev R.K. Multifractal modeling theory of rock mass deformation and destruction as the basis for automation of drilling and blasting technologies in coal open-pit mines. *Ugol'*, 2019, (11), pp. 32-34. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-32-34.

6. Khalkecheva L.K. & Khalkechev R.K. Automated monitoring system of transport berms condition for landslide danger in the form of subsidence. *Ugol'*, 2022, (4), pp. 50-52. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-4-50-52.

7. Cherepanov G.P. Mechanics of brittle fracture. Moscow, Nauka Publ., 1974, 640 p. (In Russ.).

8. Levkin Y.M. The usage of remote sensing technology and mathematical modeling for the analysis of emergency mine workings. *Ugol'*, 2022, (6), pp. 32-34. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-32-34.

9. Chunuev I.K., Levkin Y.M. & Bolotbekov Z. Determination of bench, dump and road sliding wedge technological parameters. *Mining Science and Technology (Russian Federation)*, 2021, (6), pp. 31-41. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-1-31-41.

10. Khalkechev R.K. & Khalkechev K.V. Mathematical modeling of non-uniform elastic stress field of a rock mass with crystalline block structure. *Gornyj zhurnal*, 2016, (3), pp. 200-205. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2016.03.05.

11. Khalkechev R.K. & Khalkechev K.V. Management of fracture selectivity in crushing and milling of geomaterials based on similarity and dimensional methods in fracture dynamics. *Gornyj zhurnal*, 2016, (6), pp. 64-66. (In Russ.). DOI: 10.17580/GZH.2016.06.04.

12. Khalkechev R.K. Fuzzy mathematical model of fracture concentration changes in a mineral under external load. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, 2019, (6), pp. 97-105. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-97-105.

For citation

Khalkechev R.K., Levkin Yu.M. & Khalkechev K.V. Mathematical model development of the stress field in the pillars stratified texture in coal deposits. *Ugol'*, 2023, (8), pp. 84-86. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-84-86.

Paper info

Received June 6, 2023

Reviewed July 14, 2023

Accepted July 26, 2023

UNDERGROUND MINING