

П.В. Николенко, А.А. Кормнов

КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В АНИЗОТРОПНЫХ КОМПОЗИТАХ*

Показана возможность использования акустико-эмиссионного эффекта памяти в анизотропных композиционных материалах для оценки напряженно-деформированного состояния породного массива. Проведен анализ результатов лабораторных исследований как широко распространенных материалов, так и специально синтезированных. Установлено, что угол между направлением приложения одноосного сжатия и направлением слоистости (плоскостью упругого включения для синтезированного материала) в композитах оказывает существенное влияние как на поведение акустической эмиссии при первом цикле нагружения, так и на проявление акустико-эмиссионного эффекта памяти. При этом наименьшие значения активности акустической эмиссии принимают в случае, когда подобный угол равен 90° при первом цикле нагружения. При исследовании эффекта памяти наиболее отчетливо он проявляется при угле 0° для синтезированных материалов с протяженным упругим включением и 45° для слоистых композитов. Предложен метод, позволяющий в режиме непрерывного мониторинга определять изменение ориентации максимального главного напряжения, действующего в окрестностях горной выработки. Также предложен метод определения направления и величины приращения максимального главного напряжения, основанный на использовании эффектов памяти в некоторых анизотропных композиционных материалах.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, геокон-троль, акустическая эмиссия, композиционные материалы, анизотропия, эффекты памяти, дефектность.

Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива в окрестностях подземных горных выработок ведутся в нашей стране и за рубежом уже более полувека. Несмотря на накопленный за это время богатый практический опыт интерес к этой тематике сохраняет свою актуальность. Причина подобного интереса объясняется отсутствием универсальных, эффективных и нетрудоемких решений, позволяющих оценивать поля напряжений в массиве горных пород. Получившие в последнее время распространение расчетные методы, основанные на использовании метода

конечных элементов, зачастую дают весьма общее представление о НДС, не учитывающее всю сложность строения массива в зоне ведения горных работ. Ряд геомеханических методов [1–3], способен дать сравнительно точную информацию о величинах главных напряжений и их ориентации в пространстве. Однако распространению таких методов препятствуют высокая стоимость и трудоемкость проведения натуральных измерений и необходимость определения упругих характеристик пород в зоне контроля.

Для изучения напряжений в породном массиве перспективны методы, основанные на применении так на-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (соглашение № 14-05-31201\15).

зываемого акустико-эмиссионного эффекта памяти (АЭЭП) [4] в композиционных материалах, размещаемых в измерительных скважинах. Первоначально при анализе НДС массива производился анализ проявления АЭЭП в образцах, извлеченных колонковым бурением [5], однако высокая степень неоднородности горных пород приводит к низкой повторяемости результатов натуральных измерений. Таким образом, основные достоинства метода АЭЭП (отсутствие необходимости определения упругих модулей окружающих пород и возможность определения абсолютных значений и направления действующих напряжений) оказываются практически полностью нивелированными большим разбросом измеренных величин. В тоже время применение однородных композитов с постоянными физико-механическими свойствами позволяет значительно повысить сходимость результатов лабораторных и натуральных экспериментов.

В работе [6] приведены результаты изучения проявлений АЭЭП в синтезированных анизотропных композиционных материалах. Установлено, что угол γ между направлением приложения нагрузки и плоскостью упругих включений существенно влияет на поведение акустической эмиссии в первом цикле нагружения. При этом показано, что при угле $\gamma = 90^\circ$ активность \dot{N}_s акустической эмиссии (АЭ) на порядок ниже, чем в случаях, когда $\gamma = 45^\circ$ или $\gamma = 0^\circ$.

При исследовании композиционных материалов с естественной анизотропией [7] также получена взаимосвязь характера \dot{N}_s от угла между направлением приложения давления и направлением армирующих слоев материала. В этом случае изменение параметра \dot{N}_s также оказывается наименьшим при угле $\gamma = 90^\circ$. В дополнение к этому указанный параметр имеет тенденцию к снижению после достижения отно-

сительными продольными деформациями в образце значения $\epsilon = 0,02\%$.

Полученные зависимости позволяют сформулировать метод определения направления действия максимального главного напряжения в массиве. Суть метода сводится к следующему.

На выбранном участке массива бурится измерительная скважина так, чтобы ее ось была перпендикулярна оси горной выработки. На заданной глубине в ней с помощью клеевого соединения жестко закрепляются диски, снабженные пьезопреобразователями и изготовленные из стеклотекстолита марки СТЭФ или из синтезированного материала с искусственно Диски ориентируют так, чтобы плоскость армирующих слоев или упругого включения каждого последующего диска составляла с предыдущим определенный фиксированный угол α (например 15°). В последующем этот угол будет определять разрешающую способность метода. Электрические выводы пьезопреобразователей подключаются к многоканальному комплексу регистрации АЭ.

Под действием напряжений в массиве, размещенные в измерительной скважине диски начнут деформироваться, что приведет к возникновению АЭ сигналов, регистрируемых измерительным комплексом. Из всех дисков выбирают тот, которому соответствует наименьшее значение \dot{N}_s (характеризующееся спадом в случае использования стеклотекстолита в качестве материала для дисков). О направлении действия максимального напряжения, действующего в плоскости ортогональной оси скважины, судят по углу α между наклоном слоев (упругого включения) в этом диске и вертикалью. В случае, если измерительная скважина пробурена вдоль одного из главных напряжений в массиве, результатом будет определение направления максимального главного напряжения.

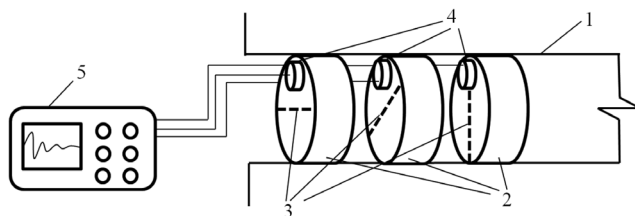


Рис. 1. Схема реализации метода определения направления максимального напряжения: 1 – измерительная скважина; 2 – диски из композиционных материалов; 3 – направление слоев композита (направление упругого включения); 4 – пьезоэлектрические преобразователи; 5 – комплекс регистрации акустической эмиссии

Схема реализации описанного метода представлена на рис. 1.

Описанный метод обладает рядом преимуществ, основным из которых является неограниченное время проведения измерений, позволяющее использовать его в режиме непрерывного мониторинга. Другое важное преимущество – возможность замены сложного и дорогостоящего комплекса регистрации АЭ событий на значительно более простое устройство, регистрирующее превышение выходным сигналом с преобразователей заданного порогового уровня.

Другая реализация метода связана с использованием АЭЭП в анизотропных композиционных материалах. Использование эффекта позволяет в одном измерении совместить опреде-

ление направления максимального напряжения, а также факт превышения его приращением заранее заданного порогового уровня. Подобный подход является развитием метода, предложенного в [8, 9].

Ранее в [6] было установлено, что в синтезированном материале с протяженным упругим включением АЭЭП отчетливо проявляется только в случае, когда угол $\gamma = 0^\circ$. При угле $\gamma = 45^\circ$ эффект менее заметен, а при $\gamma = 90^\circ$ он не проявляется. При исследовании слоистых композиционных материалов [7] было установлено, что АЭЭП наиболее отчетливо проявляется при $\gamma = 45^\circ$. Это связано с тем, что при вертикальном расположении слоев момент проявления эффекта памяти оказывается «зашумленным» акустической эмиссией, вызванной разрушением межслоевых связей в композите.

Полученные закономерности позволяют сформулировать метод контроля НДС массива, заключающийся в следующем. Из анизотропного композиционного материала изготавливается серия цилиндрических образцов. В лабораторных условиях все образцы последовательно подвергаются установочному нагружению $\sigma_{уст}$ при $\gamma = 45^\circ$ в случае использования слоистого ком-

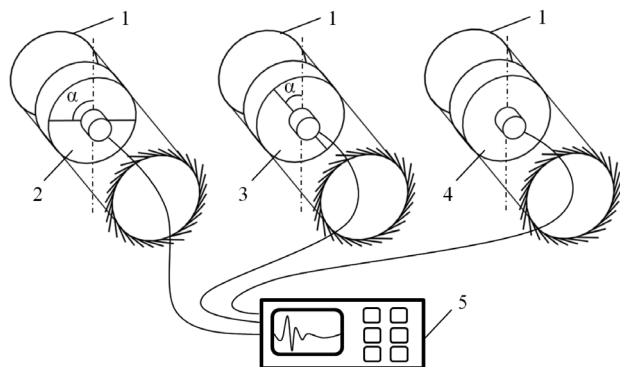


Рис. 2. Схема реализации метода контроля напряжений: 1 – измерительные шпурсы; 2, 3 и 4 – диски, установленные под углом $\alpha = 90^\circ, 45^\circ, 0^\circ$ соответственно; 5 – комплекс регистрации АЭ

позита и $\gamma = 0^\circ$ в случае использования синтезированного материала с протяженным упругим включением. В натуральных условиях на выбранном участке бурится ряд параллельных шпуров, в которых на одинаковой глубине размещают снабженные пьезоэлектрическими преобразователями образцы. При размещении дисков каждый последующий поворачивают вокруг оси относительно вертикали на угол $\alpha = \varphi \cdot n$, где φ – фиксированный угол, n – порядковый номер диска (начиная с «0»). Электрические выводы преобразователей подключаются к многоканальному комплексу регистрации акустической эмиссии. Пример схемы реализации метода с использованием трех дисков представлена на рис. 2.

Под действующими в зоне контроля напряжениями происходит одновременная деформация всех дисков. Однако характер регистрируемой при этом АЭ для разных дисков будет различен. Из всех дисков выбирают тот,

в котором наиболее четко проявляется АЭЭП. Направление действия максимального напряжения, действующего в плоскости ортогональной оси шпуров, будет определяться углом α (в случае синтезированного материала с протяженным упругим включением) или $\alpha = 45^\circ$ (в случае использования слоистого композита). При этом сам факт проявления АЭЭП будет свидетельствовать о том, что приращения напряжений в зоне контроля превысили значение $\sigma_{уст}$.

Применение АЭЭП в композиционных материалах позволяет одновременно решить задачу повышения точности и надежности получаемой информации о НДС массива и значительно снизить стоимость и трудоемкость проведения натуральных измерений. Дальнейшее развитие метода, очевидно, должно быть направлено на разработку способов определения полного тензора напряжений в породных массивах различного геологического строения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по применению метода разгрузки керна с центральной скважиной для определения напряжений в массиве осадочных горных пород. – Новосибирск: изд. ИГД СО РАН СССР, 1969. – 62 с.

2. Аксенов В.К., Курленя М.В., Петров А.И. Разгрузка массива шелью как средство для определения абсолютных напряжений в горных породах // ФТПРПИ. – 1972. – № 2. – С. 122–124.

3. Гришко Г.И., Кулаков Г.И. Измерение напряжений в горных породах фотоупругими датчиками. – Новосибирск: Наука, 1976. – 142 с.

4. Шкуратник В.Л., Лавров А.В. Эффекты памяти в горных породах. Физические закономерности, теоретические модели. – М.: Изд. Академии горных наук, 1997. – 159 с.

5. Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2003. – Т. 40. – № 2. – P. 151–171.

6. Николенко П.В., Буянова Д.С., Царицков А.Ю., Кормнов А.А. Контроль напря-

жений в массиве с использованием акустико-эмиссионных эффектов в анизотропных композиционных материалах с искусственно наведенной дефектностью // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 8. – С. 198–203

7. Николенко П.В., Шкуратник В.Л. Особенности акустико-эмиссионных эффектов в анизотропных композиционных материалах и их использование для контроля напряжений в массиве горных пород // ФТПРПИ. – 2014. – № 6. – С. 217–223.

8. Шкуратник В.Л., Николенко П.В. Об использовании акустико-эмиссионного эффекта памяти в композиционном материале для контроля критических напряжений в массиве горных пород // ФТПРПИ. – 2013. – № 4. – С. 32–39

9. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Корчак А.В. Патент 2485314 РФ. Способ определения изменения напряженного состояния горного массива. № 2011147713/03; заявл. 24.11.11; опубл. 20.06.13, Бюл. № 17. **ПАТ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Николенко Петр Владимирович – кандидат технических наук, доцент,
Кормнов Алексей Алексеевич – аспирант,
МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: ftkp@mail.ru.

UDC 622.02:539.2

STRESS STATE MONITORING OF ROCK MASS USING ACOUSTIC EMISSION EFFECTS IN ANISOTROPIC COMPOSITE MATERIALS

Nikolenko P.V.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Kormnov A.A.¹, Graduate Student,
¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: ftkp@mail.ru.

Possibility of using acoustic emission memory effect in anisotropic composite materials for evaluation of stress-strain state of rock mass is shown. The analysis of laboratory research results of common and specially synthesized materials is performed. It was found that the angle between direction of uniaxial compression application and direction of lamination (elastic inclusion plane for synthesized material) in composites has a significant impact on the behavior of acoustic emission during the first loading cycle, and manifestation of acoustic emission memory effect. Thus the lowest values of the acoustic emission activity are when such angle is 90° in the first loading cycle. When studying memory effect it is manifested most clearly at an angle of 0° for synthetic materials with elastic inclusion and 45° for layered composites. A method that allows continuous monitoring of maximum principal stress orientation acting in the area of excavation is offered. Also a method for determining direction and magnitude of increments of the maximum principal stress, based on memory effects in some anisotropic composite materials is provided

Key words: stress-strain state, geocontrol, acoustic emission, composite materials, anisotropy, memory effects, defects.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Agreement No. 14-05-31201\15.

REFERENCES

1. *Rukovodstvo po primeneniyu metoda razgruzki kerna s tsentral'noy skvazhinoy dlya opredeleniya napryazheniy v massive osadochnykh gornykh porod* (Guidelines on core destressing by central hole drilling for stress estimation in sedimentary rocks), Novosibirsk, izd. IGD SO RAN SSSR, 1969, 62 p.
2. Aksenov V.K., Kurlenya M.V., Petrov A.I. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 1972, no 2, pp. 122–124.
3. Gritsko G.I., Kulakov G.I. *Izmerenie napryazheniy v gornykh porodakh fotouprugimi datchikami* (Stress measurement in rocks using photo-elastic sensors), Novosibirsk, Nauka, 1976, 142 p.
4. Shkuratnik V.L., Lavrov A.V. *Effekty pamyati v gornykh porodakh. Fizicheskie zakonomernosti, teoreticheskie modeli* (Memory effects in rocks. Physical laws, theoretical models), Moscow, Izd. Akademii gornykh nauk, 1997, 159 p.
5. Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003. T. 40, no 2. P. 151–171.
6. Nikolenko P.V., Buyanova D.S., Tsarikov A.Yu., Kormnov A.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 8, pp. 198–203.
7. Nikolenko P.V., Shkuratnik V.L. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2014, no 6, pp. 217–223.
8. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2013, no 4, pp. 32–39.
9. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., Korchak A.V. *Patent RU 2485314*, 20.06.13.

