



АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭФФЕКТА КАЙЗЕРА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Н. Л. Бельтюков, В. Н. Токсаров

*Горный институт УрО РАН, E-mail: bnl@mi-perm.ru,
ул. Сибирская 78-а, г. Пермь 614007, Россия*

Рассмотрен перспективный метод определения напряжений в горных породах на основе эффекта Кайзера. Выполнен анализ различных моделей трещинообразования, обуславливающих проявление этого эффекта. Показано, что одной из причин его возникновения в случае первоначального нагружения керна может стать активизация трещин, образующихся при разгрузке породы от действующих в массиве напряжений.

Массив горных пород, естественное напряженное состояние, акустическая эмиссия, эффект Кайзера, модели трещинообразования

ANALYSIS OF KAISER EFFECT MODELS IN ROCKS

N. L. Beltyukov and V. N. Toksarov

*Institute of Mining, Ural Branch of Russian Academy of Sciences
E-mail: bnl@mi-perm.ru, ul. Sibirskaya 78a, Perm, 614007, Russia*

The paper considers a promising method for determining stresses in rocks based on the Kaiser effect. The analysis of various models of crack formation causing the manifestation of this effect was made. It is shown that one of the reasons for the occurrence of this phenomenon in the case of initial core loading can be the activation of cracks, which formed during unloading of the rock from effective stresses in the rock mass.

Rock mass, in-situ stress state, acoustic emission, Kaiser effect, cracking models

В экспериментальной геомеханике при измерении напряжений в породных массивах все чаще используются методы, основанные на эффекте Кайзера [1]. Суть эффекта заключается в том, что при циклическом нагружении геоматериалов акустическая эмиссия в них не регистрируется до тех пор, пока не достигнут максимальный уровень нагрузки предыдущего цикла (рис. 1) [2]. Превышение нагрузкой этого значения приводит к возобновлению акустической эмиссии (АЭ), что выражается в скачкообразном увеличении параметра активности (количества импульсов в единицу времени). К достоинствам данных методов определения напряжений можно отнести высокую информативность измерений, низкую трудоемкость работ, а также отсутствие пересчетов деформаций в напряжения.

Ранние исследования, посвященные определению напряжений с помощью эффекта Кайзера, основывались на предположении, что породы в массиве испытывают первоначальный цикл нагружения за счет действия гравитационных и тектонических сил. Проводя в лабораторных условиях повторное нагружение образцов пород, извлеченных из массива, можно оценить нормальную компоненту первоначального поля напряжений, действующую в направлении нагружения. Позднее была показана несостоятельность данного подхода в связи с тем, что породы в массиве находятся в условиях сложного напряженного состояния, тогда как в лаборатории

предполагается выполнять нагружение керна в режиме одноосного сжатия. Вместо этого на основе разработанных теорий формирования эффекта Кайзера были предложены другие режимы тестового нагружения пород, извлеченных из массива.

Несмотря на обширные лабораторные эксперименты по изучению проявления эффекта Кайзера в породах, на наш взгляд, имеются некоторые противоречия между результатами теоретических исследований и практическими примерами использования данного явления. Это позволяет говорить о недостаточной изученности причин возникновения эффекта в горных породах, что накладывает существенные ограничения на его применение для определения напряжений, действующих в массиве. Рассмотрим особенности наиболее значимых теоретических представлений о механизме проявления эффекта Кайзера в породах и важные следствия этих теорий.

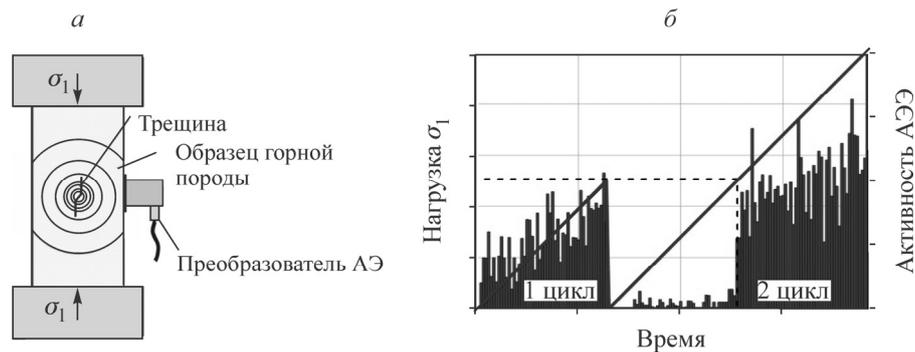


Рис. 1. Проявление эффекта Кайзера в горных породах: *a* — схема нагружения образца в режиме одноосного сжатия; *б* — идеализированный график зависимости активности акустической эмиссии при циклическом нагружении породы

Считается, что основным источником акустической эмиссии при деформировании горных пород являются образование и рост трещин, а также скольжение по поверхностям существующих трещин или нарушений и границам зерен [3]. Обычно проявление эффекта Кайзера в породах связывают с особенностями механизма трещинообразования. Большинство моделей трещинообразования созданы на предположении, что при нагружении породы формируются трещины растяжения, ориентированные вдоль наибольшего главного напряжения σ_1 (рис. 1*a*). При этом рост трещин сопровождается акустической эмиссией, а их размер пропорционален величине приложенной нагрузки. Разгрузка породы инициирует закрытие трещин. В случае повторного нагружения трещины раскрываются, но не увеличиваются в размере до тех пор, пока нагрузка не достигнет максимального значения предыдущего цикла. Если в модели не учитывается трение между берегами трещин, то акустическая эмиссия при этом будет отсутствовать. Когда величина действующего напряжения превысит максимальное значение предыдущего цикла, рост трещин возобновляется, что сопровождается резким увеличением активности АЭ, т. е. возникает эффект Кайзера. Математическое описание механизма проявления эффекта сводится к получению условий возобновления роста трещин и акустической эмиссии соответственно.

В одном из ранних математических описаний механизма трещинообразования в породах [4] форма трещин растяжения представлена в виде диска диаметром a , положение и ориентация которого в пространстве характеризуются вектором нормали \vec{n} к плоскости диска. В данной работе получено соотношение между размером трещины растяжения и локальными напряжениями, действующими в ее области, с помощью которого можно определить величины напряжений, приводящих к возобновлению роста трещин, образовавшихся в первоначальном цикле нагружения. Если в координатах главных напряжений изобразить совокупность точек, соответствующих множеству напряженных состояний, при которых данное условие выполняется хотя бы для одной трещины, то образуется некоторая поверхность (рис. 2*a*), получившая название поверхности поврежденности. Она оконтуривает область, внутри которой напряженные состояния породы не приводят к росту трещин и, соответственно, акустической эмиссии.

Описание механизма проявления эффекта Кайзера в породах с помощью поверхности поврежденности использовано в работе [5], где введено предположение, что извлеченные из массива породы имеют некоторую нарушенность, за счет которой формируется первоначальная поверхность поврежденности. Одноосное нагружение породы вдоль одной из главных компонент первоначального поля напряжений будет выглядеть как перемещение по данной оси точки, характеризующей текущее напряженное состояние породы (рис. 2б). При этом рост трещин и акустическая эмиссия отсутствуют. Когда напряженное состояние породы достигнет первоначальной поверхности, рост трещин и эмиссия акустических импульсов возобновятся, т. е. будет наблюдаться эффект Кайзера. Дальнейшее увеличение нагрузки приведет к растягиванию поверхности вдоль оси нагружения. В случае разгрузки породы и ее повторном нагружении вдоль той же оси размер трещин не увеличивается и акустическая эмиссия отсутствует до тех пор, пока вновь не будет достигнута поверхность поврежденности, сформированная в предыдущем цикле.

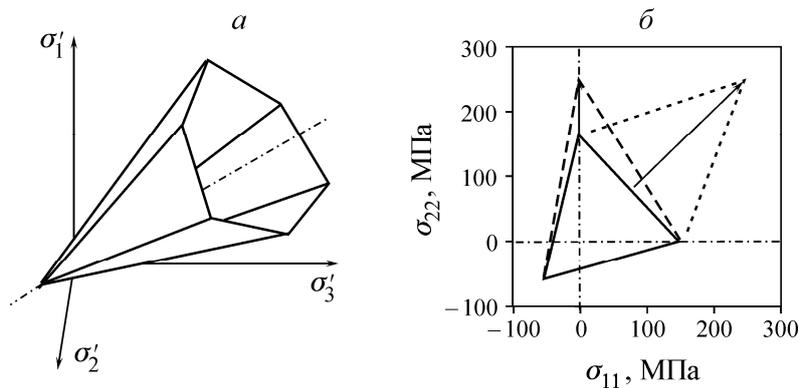


Рис. 2. Идеализированный вид поверхности поврежденности в пространстве главных напряжений (а) и ее проекция в случае изотропного распределения трещин в первоначальном цикле [5] (б)

В [6] рассмотрена модель “крылатой” трещины (Z-образной), состоящей из наклонной сдвиговой трещины и двух трещин растяжения (рис. 3а). Согласно данной модели в породе в первоначальном состоянии присутствует некоторое количество наклонных дефектов: микротрещины, границы между зернами, плоскости напластования и т. д. При нагружении породы на наклонных дефектах возникают касательные напряжения, которые приводят к взаимному сдвигу их берегов. В результате в краевых частях из-за концентрации растягивающих напряжений образуются трещины растяжения в виде “крыльев”. С увеличением нагрузки “крылья” трещины растут в направлении максимального главного напряжения σ_1 , генерируя при этом импульсы АЭ. Особенность модели заключается в существовании перелома поверхности поврежденности в точке, характеризующей первоначальное напряженное состояние породы (рис. 3б).

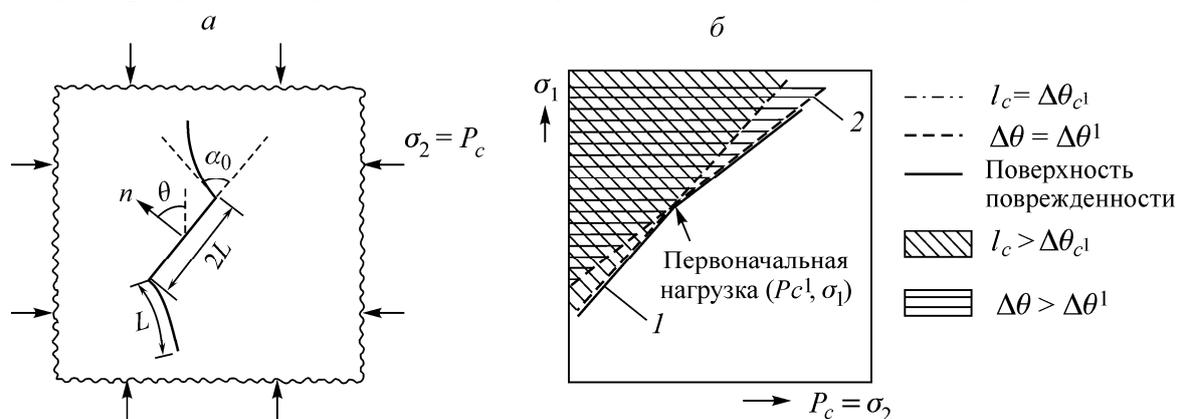


Рис. 3. Схематичное изображение двумерной модели “крылатой” трещины (а) и проекция поверхности поврежденности, сформированная с использованием данной модели [6] (б)

В [7] предложена методика сканирования поверхности поврежденности путем циклического нагружения образцов по специальной схеме, где индикатором достижения поверхности служит эффект Кайзера. По результатам испытаний образцов получена полная поверхность поврежденности в трехмерном пространстве главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$, сформированная в условиях трехосного неравнокомпонентного сжатия установочного цикла ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). При этом установлено, что максимальную кривизну полная поверхность поврежденности испытывает в области первоначального напряженного состояния породы.

В работе [8] разработана трехмерная модель “крылатой” трещины, состоящей из наклонного дискообразного дефекта и двух трещин растяжения. Механизм трещинообразования в данном случае аналогичен двумерному варианту. Особенность модели заключается в том, что с ее помощью получены условия возобновления роста трещин в трехмерном пространстве. Это позволило провести важный численный эксперимент по моделированию проявления эффекта Кайзера для трехосного неравнокомпонентного напряженного состояния породы в установочном цикле ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). Необходимо отметить, что в модели учитывается трение при сдвиге берегов наклонной трещины.

В рассмотренных теоретических моделях в качестве причины возникновения эффекта Кайзера при повторном нагружении породы предполагается процесс возобновления роста ориентированных трещин, обуславливающий увеличение активности АЭ. Из этого следует, что добиться активизации трещин в тестовом цикле можно осуществляя одноосное нагружение только в направлениях близких к оси действия напряжения σ_1 установочного цикла. При этом порода запоминает линейную комбинацию главных напряжений. В случаях нагружения в направлениях σ_2 и σ_3 , т.е. перпендикулярно ориентации индуцированных в установочном цикле трещин, эффект Кайзера будет отсутствовать. Несмотря на то, что данное положение доказано лабораторными экспериментами на образцах горных пород [5, 8], в литературе существуют примеры наблюдений эффекта Кайзера при одноосном нагружении в различных направлениях зерна, извлеченного из массива [9–12]. Это позволило некоторым исследователям сделать вывод о возможном наличии другого механизма проявления эффекта в случае первичного нагружения зерна горных пород [5].

Известно, что после разгрузки от действующих в массиве напряжений породы испытывают всестороннее расширение, вследствие чего в них возникает анизотропная трещиноватость, отражающая природное поле напряжений (рис. 4).

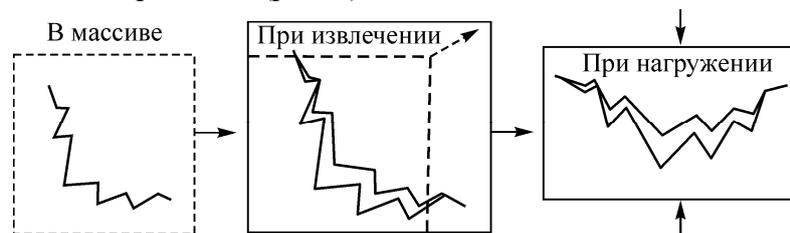


Рис. 4. Схематичное изображение состояний трещин при извлечении породы из массива и последующем ее нагружении [14]

В [5] выдвинута идея, что в тестовом цикле нагружения зерна в режиме одноосного сжатия скачкообразное увеличение акустической эмиссии может происходить за счет разрушения шероховатостей берегов трещин в процессе их закрытия. При этом предполагается, что данное явление имеет место, когда нагрузка достигает величины напряжения, действовавшего в массиве в направлении оси нагружения. В связи с этим предложено различать два вида эффекта Кайзера в горных породах. Первый вид возникает в результате циклического нагружения образцов горных пород в лабораторных условиях, когда известно напряженное состояние предыдущего цикла. Такой искусственно наведенный эффект Кайзера называется лабораторным. Основным

механизмом формирования данного вида выступает возобновление роста ориентированных трещин. Второй вид можно наблюдать в первоначальном цикле нагружения извлеченного из массива керна, когда история об испытываемых породой напряжениях неизвестна, так называемый природный эффект Кайзера. Однако данная гипотеза осталась только на стадии предположения и на сегодняшний день информации о характере поведения активности АЭ при уплотнении пород, т. е. при закрытии трещин, практически нет, кроме некоторых частных случаев в [13].

Обобщая изложенное можно сказать, что при лабораторных исследованиях эффекта Кайзера в тестовом цикле нагружения происходит активизация ориентированных трещин, индуцированных в первоначальном цикле нагружения. Причем для возобновления роста трещин требуется режим нагружения, соответствующий первоначальному напряженному состоянию породы, иначе эффект будет отсутствовать. Таким образом, теоретические представления возможности применения эффекта Кайзера для определения напряжений базируются на предположении, что в условиях нетронутого массива в породе существует ориентированная трещиноватость, наведенная в результате воздействия естественного поля напряжений. Однако процессы формирования пород в условиях высоких давлений и температур не тождественны нагружению уже сформированной породы естественным полем напряжений. Поэтому, по мнению некоторых исследователей, в условиях нетронутого массива ориентированная трещиноватость в породе может отсутствовать. В этом случае память о напряженном состоянии породы в массиве скорее всего появляется в момент извлечения ее из недр за счет образования трещин при всестороннем расширении керна после снятия естественного поля напряжений [14–16]. Учитывая, что деформации керна в различных направлениях неравномерны и обусловлены компонентами естественного поля напряжений, в породе индуцируется система трещин со сложной ориентацией, отражающей исходное поле. Если предположить, что гипотеза в [5] справедлива, то выполняя тестовое нагружение керна в лабораторных условиях, с помощью эффекта Кайзера можно оценить компоненты естественного поля напряжений.

ВЫВОДЫ

Несмотря на кажущуюся простоту и привлекательность концепции использования эффекта Кайзера для оценки напряжений в массиве горных пород, метод находится все еще в стадии разработки и пока далек от самостоятельного применения. В целях создания новых подходов и корректной интерпретации получаемых результатов необходимо иметь ясное понимание природы данного явления. Несмотря на обширные теоретические исследования эффекта в породах вопрос о механизмах его проявления в тестовом цикле нагружения керна нельзя считать до конца решенным. В этой связи перспективной представляется гипотеза формирования памяти о первоначальном напряженном состоянии пород за счет трещиноватости, приобретаемой ими при извлечении из массива. Однако для ее доказательства необходимо выполнение сложных численных и физических экспериментов, моделирующих напряженно-деформированные состояния породы в таких условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Kaiser J.** Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen, Archiv für das Eisenhüttenwesen, 1953, vol. 24, pp. 43–45.
2. **Goodman R. E.** Subaudible noise during compression of rocks, Geol. Soc. Am. Bull., 1963, vol. 74, pp. 487–490.
3. **Lavrov A. V. and Shkuratnik V. L.** Acoustic emission in rock deforming and fracture (review), Acoustic Journal, 2005, vol. 51, Appendix, pp. 6–18. (in Russian) [Лавров А. В., Шкурятник В. Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акустический журнал. — 2005. — Т. 51. — С. 6–18.]

4. **Costin L. S.** A microcrack model for the deformation and failure of brittle rock, *J. Geoph. Res.*, 1983, vol. 88, no. B11, pp. 9485–9492.
5. **Holcomb D. J.** General theory of the Kaiser effect, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1993, vol. 30, no. 7, pp. 929–935.
6. **Pestman B. J. and van Munster J. G.** An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects in sandstone, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.*, 1996, vol. 33, no. 6, pp. 585–593.
7. **Pestman B. J., Kenter C. J., and van Munster J. G.** Estimation of In-situ Stress Magnitudes from Measurements on Cores, Society of Petroleum Engineers Inc. SPE/ISRM 47239. EUROCK '98 Symposium held in Trondheim Norway, Trondheim, 1998, pp. 171–177.
8. **Lavrov A. V., Shkuratnik V. L., and Filimonov Yu. L.** Acoustic-emission memory effect in rocks, Moscow, MGGU, 2004, 456 pp. (in Russian) [**Лавров А. В., Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л.** Акустозэмиссионный эффект памяти в горных породах. — М.: МГГУ, 2004. — 456 с.]
9. **Seto M., Nag D. K., and Vutukuri V. S.** In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission and deformation rate analysis, *Geotech. Geol. Eng.*, 1999, vol. 17, no. 3, 4, pp. 1–26.
10. **Villaescusa E., Seto M., and Baird G.** Stress measurements from oriented core, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 2002, vol. 39, pp. 603–615.
11. **Lehtonen A. V., Särkkä P., Lu M., Li C. C., Kjørholt H., Dahle H. et al.** Evaluation of rock stress estimation by the Kaiser effect, *In-situ rock stress*, London, Taylor & Francis Group, 2006, pp. 135–142.
12. **Momayez M. and Hassani F. P.** Application of the Kaiser effect to measure in situ stresses in underground mines, *Proceedings of the 33rd US symposium on rock mechanics*, Santa Fe, New Mexico, Rotterdam: A. A. Balkema, 1992, pp. 979–987.
13. **Beltyukov N. L.** The development of in-situ stress measuring method in boreholes using Kaiser effect, *Synopsis of Cand. Tech. Sci. Thesis*, Perm, 2018, 20 pp. (in Russian) [**Бельтюков Н. Л.** Разработка скважинного метода измерения напряжений в массиве горных пород на основе эффекта Кайзера: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Пермь, 2018. — 20 с.]
14. **Hsieh A. and Dight P.** The desirable and undesirable effects on stress reconstruction using the deformation rate analysis (DRA), *ISRM 7th International Symposium on In-Situ Rock Stress*, Finland, Tampere, 2016, pp. 213–223.
15. **Siegfried R. W. and Simmons G.** Characterization of oriented cracks with differential strain analysis, *J. Geophys. Res.*, 1978, vol. 83, pp. 1269–1278.
16. **Yamamoto K.** A theory of rock core-based methods for in-situ stress measurement, *Earth Planets Space*, 2009, vol. 61, pp. 1143–1161.