

УДК 539.43

ЭФФЕКТ КАЙЗЕРА ПРИ МНОГООСНОМ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОМ СЖАТИИ ПЕСЧАНИКА

© 2020 г. И. А. Пантелеев^{1,*}, В. А. Мубассарова¹, А. В. Зайцев², В. И. Карев³,
Ю. Ф. Коваленко³, К. Б. Устинов³, Н. И. Шевцов³

Представлено академиком РАН Д.М. Климовым 20.08.2020 г.

Поступило 22.08.2020 г.

После доработки 10.09.2020 г.

Принято к публикации 11.09.2020 г.

На Испытательной системе трехосного независимого нагружения ИПМех РАН проведено экспериментальное исследование закономерностей деформирования и разрушения песчаника при непропорциональном двух- и трехосном циклическом сжатии с вариациями ориентации эллипсоида Ламе и непрерывной регистрацией акустической эмиссии. Обнаружено, что проявление эффекта Кайзера в текущем цикле многоосного непропорционального сжатия зависит от характера изменения размера, формы и ориентации эллипсоида Ламе относительно предыдущего цикла. Эффект Кайзера наблюдается в случае, если материал ранее уже был подвержен активному нагружению, соответствующему заданной ориентации эллипсоида напряжений. Степень проявления указанного эффекта определяется характером изменения формы этого эллипсоида.

Ключевые слова: эффект Кайзера, акустическая эмиссия, истинно трехосное непропорциональное нагружение, вращение эллипсоида Ламе

DOI: 10.31857/S2686740020060152

Эффект Кайзера (эффект “памяти”), заключающийся в отсутствии сигналов акустической эмиссии (АЭ) при циклическом деформировании материала до тех пор, пока не будет достигнут максимальный уровень напряжения предыдущего цикла, известен с середины прошлого века [1–3]. Исследования закономерностей проявления этого эффекта “памяти” для различных материалов и способов нагружения показали, что в случае многоосного циклического нагружения эффект Кайзера определяется уровнем дифференциального напряжения [4, 5], а не максимального главного. Необходимо отметить, что этот результат получен для случая многоосного нагружения при фиксированной и неизменной во время проведения эксперимента ориентации эллипсоида Ламе (эллипсоида напряжений). Изучение влияния вращения эллипсоида напряжений на реализацию эффекта Кайзера осуществлялось различными исследователями для случаев одноосного сжа-

тия и косвенного одноосного растяжения (Бразильский тест) и их чередования. Было установлено, что эффект Кайзера при одноосном нагружении имеет место в том случае, когда направление максимального сжимающего напряжения во втором цикле отличается от направления первого цикла не более чем на $\pm 10^\circ$ [6, 7]. Эти результаты свидетельствуют о том, что эффект Кайзера — эффект не только “памяти” достигнутого уровня максимальных напряжений, но и “памяти” состояния ансамбля дефектов различного типа, включая их ориентацию.

Прикладное значение эффекта Кайзера заключается в возможности его использования для оценки уровня и ориентации природных напряжений в районе горных выработок и нефтегазовых бассейнов [8–11]. При этом, априори, для массива горных пород необходимо знать либо величину и ориентацию главного сжимающего напряжения, либо тип его трехмерного напряженно-деформированного состояния, что в условиях естественного залегания, осложненного современными тектоническими процессами и антропогенным воздействием, является сложной решаемой задачей. Измерения, основанные на использовании эффекта Кайзера, производятся *in situ* следующим образом. Стенки скважины или выработки нагружаются с помощью оснащенных датчиками АЭ гидродомкрата. Природные на-

¹ Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

³ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: pia@icmm.ru

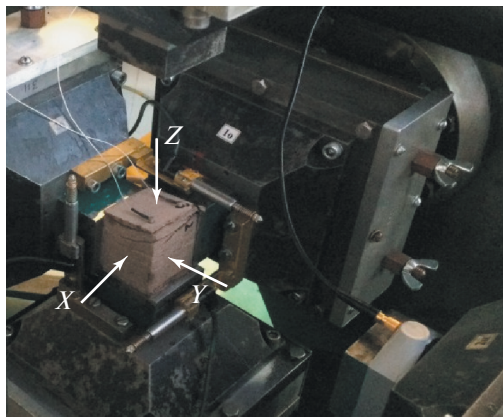


Рис. 1. Разрушенный образец песчаника после двухосного неравнокомпонентного сжатия в нагружающем узле ИСТНН. Стрелки показывают направления нагружения.

пряжения определяются по величине усилия, соответствующего началу проявления эффекта Кайзера [9]. Высокая информативность измерений, низкая трудоемкость работ, отсутствие пересчетов деформаций в напряжения являются основными важными достоинствами данных методов. В связи с этим, определение новых закономерностей проявления и природы эффекта Кайзера в материале при многоосном нагружении с последовательной перероентировкой эллипсоида Ламе является актуальной задачей, а ее решение послужит основой для развития современных методов оценки состояния массивов горных пород.

Целью настоящего исследования является изучение закономерностей проявления эффекта Кайзера при циклическом двух- и трехосном непропорциональном сжатии песчаника с последовательным изменением характерных размеров, формы и ориентации эллипсоида напряжений.

Экспериментальные исследования проведены на образцах песчаника Верхнекамского региона, который имеет равномерное распределение породообразующих минералов (обломков кремней, эпидотов, кварца, амфиболов) и карбонатного цемента, обладает параметрами Ламе $\lambda = 51$ ГПа и $\mu = 77$ ГПа, пористостью 9% (развита преимущественно вдоль границ зерен, связана с выщелачиванием кальцита грунтовыми водами). Образцы кубической формы с размером грани 40 мм изготавливались с высокой точностью – непараллельность граней образцов не превышала 20 мкм. Механические испытания проводились в лаборатории геомеханики Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН на уникальном испытательном стенде для физического моделирования деформационных процессов в горных породах в сложных геологических условиях – Испытательной системе трехосного независимого нагружения

(ИСТНН) [12, 13]. Данный стенд позволяет реализовывать нагружение независимо по трем ортогональным осям по всей площади граней образца с управлением по силе или по перемещению. Это возможно благодаря оригинальной кинематической схеме, позволяющей нажимным плитам сближаться в трех направлениях, не создавая препятствий друг другу (рис. 1). Для регистрации акустической эмиссии в процессе деформирования была использована многоканальная система Am-sy-6 Vallen (Германия) с широкополосными пьезопреобразователями М-31 (Fujitsu, Япония), имеющими рабочий диапазон 300–800 кГц, и пьезопреобразователями 2SMEG-P (Deci, США) с рабочим диапазоном 200–2000 кГц. Датчики М-31 крепились с помощью цианокрилатного клея на свободной поверхности образцов при двухосных испытаниях, тогда как при трехосном нагружении пьезопреобразователи 2SMEG-P устанавливались на нажимные плиты через вакуумную смазку. Ранее в работе [14] было показано, что интегральные и дифференциальные характеристики АЭ, зарегистрированной датчиками, установленными на нажимных плитах ИСТНН и непосредственно на свободной грани образца (рис. 1), подобны. Это позволило провести на ИСТНН экспериментальные исследования закономерностей деформирования и разрушения горных пород при трехосном непропорциональном нагружении по траекториям в виде многозвенных ломаных с непрерывной записью сигналов АЭ.

Для исследования закономерностей проявления эффекта Кайзера при циклическом трехосном непропорциональном сжатии песчаника были разработаны и реализованы две различных программы, представляющие собой пилообразные траектории в пространстве главных напряжений.

В рамках первой программы образцы песчаника подвергались последовательно четырем циклам активного двухосного сжатия и разгрузки. В первом цикле выполнялось активное пропорциональное сжатие в направлении осей X и Y до напряжений $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 14$ МПа с последующей разгрузкой до 7 МПа (рис. 2а) (X, Y, Z – оси нагружающего узла машины). Во втором цикле активное пропорциональное сжатие вдоль тех же осей осуществлялось до напряжений $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 24$ МПа с последующей разгрузкой до 7 МПа. В третьем и четвертом циклах было реализовано двухосное непропорциональное нагружение. Активное сжатие выполнялось только в одном из направлений с удержанием постоянного напряжения по второму: в направлении оси X до $\sigma_{xx} = 34.5$ МПа при $\sigma_{yy} = 7$ МПа (третий цикл) и в направлении оси Y до $\sigma_{yy} = 49$ МПа при $\sigma_{xx} = 7$ МПа (четвертый цикл). В течение всего эксперимента грань образца, перпендикулярная оси Z , оставалась свобод-

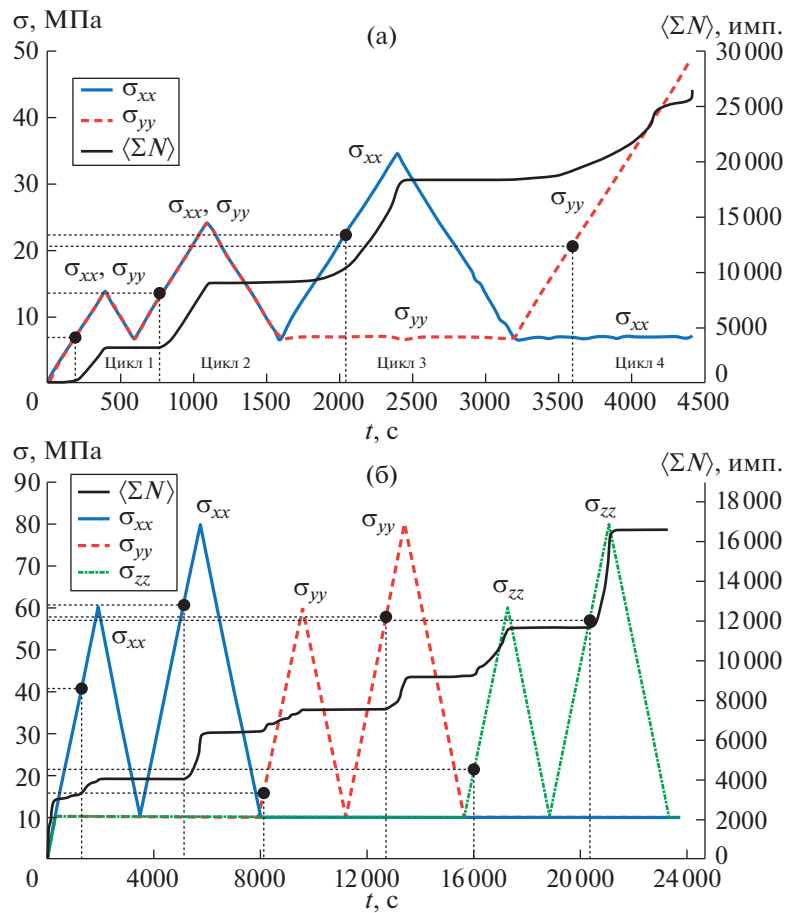


Рис. 2. Программы двух- (а) и трехосного (б) непропорционального сжатия песчаника и средний суммарный счет АЭ. Точки соответствуют моментам активации АЭ.

ной от напряжений. Скорость активного нагружения и разгрузки в каждом из четырех циклов была постоянна и равна 34.6 кПа/с. Разработанная программа нагружения позволила варьировать размеры, форму и ориентацию эллипсоида Ламе: в первых двух циклах эллипсоид напряжений вырожден в окружность, в третьем и четвертом – в эллипс. Кроме того, в четвертом цикле эллипсоид напряжений развернут относительно своего положения в третьем цикле на $\pi/2$.

Вторая программа циклического трехосного непропорционального нагружения песчаника предполагала всестороннее сжатие до напряжения 10 МПа и последующую реализацию трех пар циклов активного нагружения и разгрузки. В первой паре циклов выполнялось активное сжатие в направлении оси X до напряжения $\sigma_{xx} = 60$ МПа с последующей разгрузкой до $\sigma_{xx} = 10$ МПа при удерживании постоянными напряжений по двум другим осям $\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 10$ МПа (рис. 2б). Во втором цикле продолжалось активное сжатие в направлении оси X до $\sigma_{xx} = 80$ МПа с последующей

разгрузкой до 10 МПа при удерживании напряжений по двум другим осям на постоянном уровне $\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 10$ МПа. Вторая и третья пара циклов предполагала активное сжатие до 60 и 80 МПа и разгрузку до 10 МПа в направлении осей Y и Z с контролем постоянства напряжений в двух других направлениях (X и Z , X и Y соответственно) на уровне 10 МПа. Скорость активного нагружения и разгрузки в каждом из шести циклов была постоянна и равна 31 кПа/с. В результате реализации этой программы дважды изменялась ориентация главных напряжений. Первый разворот эллипсоида напряжений – с $\sigma_1 = \sigma_{xx} > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{yy} = \sigma_{zz}$ на $\sigma_1 = \sigma_{yy} > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{xx} = \sigma_{zz}$, второй – с $\sigma_1 = \sigma_{yy} > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{xx} = \sigma_{zz}$ на $\sigma_1 = \sigma_{zz} > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ (здесь $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения).

Для анализа АЭ при циклическом двух- и трехосном непропорциональном сжатии песчаника, в скользящем временном окне проводилось осреднение длительностью 1 с данных о количестве зарегистрированных импульсов АЭ каждым из трех датчиков. На рис. 2 представлены совмещенные

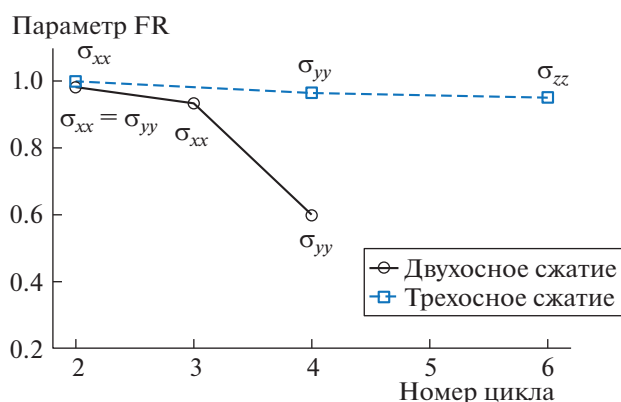


Рис. 3. Изменение параметра FR в экспериментах на двух- и трехосном неупругом сжатии песчаника. Для каждого цикла указаны напряжения, являющиеся максимальным главным.

программы нагружения и средний суммарный счет АЭ (ΣN).

В случае последовательного пропорционального двухосного сжатия во втором цикле наблюдается эффект Кайзера при напряжении, точно соответствующем максимальному напряжению первого цикла. При дальнейшем неупругом сжатии, которое сопровождается вращением эллипсоида Ламе, также наблюдается эффект Кайзера, но при меньшем уровне напряжений. Степень выраженности эффекта Кайзера характеризуется параметром FR (felicity ratio), который определяется отношением напряжения активизации АЭ к достигнутому максимальному по модулю значению главного напряжения в предыдущем цикле. Деградация параметра FR от цикла к циклу (рис. 3) вызвана развитием явно выраженной трещиноватости, ориентированной преимущественно перпендикулярно вертикальной оси Z — направлению минимального главного напряжения (рис. 1). Полученные результаты показывают, что дефектная подсистема, созданная в образце песчаника в результате первых двух циклов, остается “чувствительной” к последующему активному нагружению отдельно в каждом из двух направлений: оси X (третий цикл) и оси Y (четвертый цикл).

При трехосном неравнокомпонентном сжатии с последовательным вращением эллипсоида напряжений в каждой паре циклов наблюдается эффект Кайзера с параметром FR, близким к единице (рис. 3). Однако при смене направления действия максимального главного напряжения проявления эффекта Кайзера не были зарегистрированы. В третьем и пятом циклах (первые циклы нагружения в направлении осей Y и Z) активизация АЭ наступала при $\sigma_{yy} = 15.7$ МПа и $\sigma_{zz} = 21.5$ МПа соответственно.

Таким образом, реализация на ИСТНН разработанных программ двух- и трехосного неупругого циклического сжатия песчаника Верхнекамского региона позволила установить, что проявление эффекта Кайзера зависит от изменения размера, формы и ориентации эллипсоида Ламе относительно предыдущего цикла. Эффект Кайзера наблюдается в случае, если материал ранее уже был подвержен активному нагружению, соответствующему заданной ориентации эллипсоида напряжений. Степень проявления указанного эффекта определяется изменением формы этого эллипсоида. Появление эффекта Кайзера при напряжениях, соответствующих максимальным значениям главных напряжений в предыдущих циклах, вызвано постоянством формы эллипсоида Ламе. Изменение формы эллипсоида Ламе от цикла к циклу является одной из причин снижения абсолютной величины напряжения активизации АЭ.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Экспериментальные исследования двухосного неупругого сжатия песчаника выполнены в рамках государственного задания АААА-А19-119013090021-5, трехосного неупругого сжатия — в рамках государственного задания Минобрнауки России FSNM-2020-0027 на выполнение фундаментальных научных исследований на 2020 г. и плановый период 2021 и 2022 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kaiser J.* An investigation into the occurrence of noises in tensile tests or a study of acoustic phenomena in tensile tests. Ph.D. Thesis, Tech. Hochschule Munchen, Munich, Germany. 1950.
2. *Ржевский В.В., Ямищев В.С., Шкуратник В.Л., Лыков К.Г., Фарафонов В.М.* Эмиссионные эффекты “памяти” в горных породах // ДАН СССР. 1983. Т. 273. № 5. С. 1094–1097.
3. *Лавров А.В., Шкуратник В.Л.* Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акустический журнал. 2005. Т. 51. С. 6–18.
4. *Vervoort A., Govaerts A.* Kaiser effect in triaxial tests of limestone samples, In-situ rock stress. L.: Taylor and Francis Group, 2006. P. 143–149.
5. *Yu R., Tian Y., Wang X.* Relation between stresses obtained from Kaiser effect under uniaxial compression and hydraulic fracturing // J. Rock Mech. and Rock Eng. 2015. V. 48. Iss. 1. P. 397–401.
6. *Lavrov A., Vervoort A., Wevers M., Napier J.A.L.* Experimental and numerical study of the Kaiser effect in cyclic Brazilian tests with disk rotation // J. Rock Mech. and Min. Sci. 2002. V. 39. № 3. P. 287–302.
7. *Fu X., Xie Q., Liang L.* Comparison of the Kaiser effect in marble under tensile stresses between the Brazilian and bending tests // Bulletin of Eng. Geol. and the Env. 2014. V. 74. № 2. P. 535–543.

8. *Рассказов М.И., Терешкин А.А., Цой Д.И.* Оценка напряженного состояния массива месторождения “Пионер” на основе акустико-эмиссионного эффекта памяти горных пород // Проблемы природопользования. 2019. № 2 (21). С. 62–67.
9. *Белютюков Н.Л.* Особенности использования эффекта Кайзера для оценки напряженного состояния массива горных пород // Горн. эхо. 2019. Т. 76. № 3. С. 24–31.
10. *Николенко П.В., Шкуратник В.Л., Ченур М.Д., Кошелев А.Е.* Использование эффекта Кайзера в композиционных материалах для контроля напряженного массива горных пород // ФТПРПИ. 2018. № 1. Р. 25–31.
11. *Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V.* Spectral characteristics of acoustic emission in carbon fiber-reinforced composite materials subjected to cyclic loading // Adv. in Material Sci. and Eng. 2018. ID 1962679. P. 1–8.
12. *Карев В.И., Климов Д.М., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б.* О разрушении осадочных горных пород в условиях сложного трехосного напряженного состояния // Изв. РАН. МТТ. 2016. № 5. С. 15–21.
13. *Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б.* Modeling deformation and failure of anisotropic rocks nearby a horizontal well // J. Min. Sci. 2017. V. 53. № 3. P. 425–433.
14. *Пантелеев И.А., Коваленко Ю.Ф., Сидорин Ю.В., Зайцев А.В., Карев В.И., Устинов К.Б., Шевцов Н.И.* Эволюция поврежденности при сложном неравнокомпонентном сжатии песчаника по данным акустической эмиссии // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22. № 4. С. 56–63.

KAISER EFFECT AT MULTIAXIAL NON-PROPORTIONAL COMPRESSION OF SANDSTONE

**I. A. Panteleev^a, V. A. Mubassarova^a, A. V. Zaitsev^b, V. I. Karev^c,
Yu. F. Kovalenko^c, K. B. Ustinov^c, and N. I. Shevtsov^c**

^a *Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation*

^b *Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation*

^c *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS D.M. Klimov

Experimental study of the regularities of deformation and fracture of sandstone under non-proportional two- and triaxial cyclic compression accompanied by rotation of the Lamé ellipsoid and in situ continuous recording of acoustic emission was carried out on the ‘Triaxial Independent Loading Test System’ of the Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences. The presence of the Kaiser effect in the current cycle of multiaxial non-proportional compression predetermines by size and shape changes of the Lamé ellipsoid, and the character of its rotation in relative and previous cycles as well. If the material has already been subjected to active loading, corresponding to the given orientation of the stress ellipsoid, the Kaiser effect is observed. The character of the Kaiser effect development is determined by the nature in shape changes of Lamé ellipsoid.

Keywords: Kaiser effect, acoustic emission, true triaxial non-proportional loading, rotation of the Lamé ellipsoid