

СХОДИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ПЕСЧАНИКОВ

Н. М. Шихова*, А. В. Патонин

Геофизическая обсерватория «Борок» Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, пос. Борок, Ярославская обл., Россия

*E-mail: shinami@yandex.ru

В работе представлены результаты лабораторного моделирования триггерной активизации на пяти типах песчаников различного происхождения – Berea, Castlegate, Bentheim, Buffalo и BleursWiller. Эксперименты проводились на сервогидравлическом прессе Inova при циклическом нагружении с избыточным осевым напряжением 20–70 МПа при всестороннем давлении 10–30 МПа. Максимальное напряжение в цикле составляло 40–50% от предела прочности исследованных песчаников при заданном всестороннем давлении, что позволяет рассматривать циклическое воздействие как слабые триггерные возмущения, аналогичные приливным деформациям в природных условиях. Мониторинг процесса накопления повреждений осуществлялся с помощью 16-канальной системы акустической эмиссии, обеспечивающей трёхмерную локацию событий с точностью 2 мм и определение типа механизма разрушения по оригинальной методике AESAM + ISO [1].

В качестве индикаторов разрушения анализировались коэффициент Фелисити (FR), параметр *b-value*, доли типов событий акустической эмиссии (DC, CLVD, ISO) и фрактальная размерность пространственного распределения гипоцентров (D). Анализ полученных данных выявил устойчивую закономерность, наблюдаемую независимо от типа песчаника: непосредственно перед макроскопическим разрушением все образцы демонстрируют сходимость ключевых параметров к единым критическим значениям. FR снижается ниже 0.4, что свидетельствует о переходе к необратимому накоплению микроповреждений; энергетический параметр *b-value* падает до значения ~ 0.4 , указывая на доминирование крупных событий АЭ на финальной стадии [2]; фрактальная размерность пространственного распределения гипоцентров снижается до $D \approx 2.0$, что соответствует формированию практически плоской поверхности разлома. При этом литологические различия проявляются не в финальных величинах, а в скорости достижения критических значений. Наименьшее время до разрушения зафиксировано для песчаника Castlegate, наибольшее – для Berea. Промежуточные значения наблюдаются у Buffalo, BleursWiller и Bentheim.

Особый интерес представляет динамика типов механизмов разрушения. На ранних стадиях нагружения доминирующий тип события варьируется в зависимости от образца: в песчаниках Buffalo и Berea преобладают сдвиговые механизмы (DC, 60–80%), в Bentheim – смешанные механизмы (CLVD, 50–60%), в BleursWiller наблюдается более равномерное распределение типов. Однако на финальной стадии все образцы демонстрируют единый сценарий — рост доли смешанных и изотропных событий до 30–70%. У BleursWiller зафиксирована выраженная антикорреляция *b-value* с фазой цикла нагрузки, что указывает на активизацию локальных зон разупрочнения в фазе разгрузки; у Buffalo наблюдается платообразная динамика FR с последующим резким падением.

Полученные результаты позволяют сформулировать многопараметрический критерий оценки готовности разломной зоны к разрушению под действием слабых циклических напряжений. Критическое состояние соответствовало одновременному выполнению условий: $FR < 0.4$, $b\text{-value} < 0.4$, доля DC $< 65\%$, $D < 2.1$. Достижение этой комбинации зафиксировано за 3–10 с до макроскопического разрушения во всех экспериментах независимо от типа песчаника. Использование критерия для любого параметра по отдельности приводит к ложным срабатываниям.

Результаты работы в совокупности с анализом данных других исследователей позволяют заключить, что триггерная активизация разломных зон в песчаниках под действием слабых циклических напряжений следует универсальному сценарию, независимому от микроструктурных особенностей породы.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН в Центре коллективного пользования «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» ИФЗ РАН.

Авторы благодарны д.ф.-м.н. В. Б. Смирнову и д.ф.-м.н. А. В. Пономареву за ценные замечания по методологии анализа.

Литература

1. *Shikhova N., Patonin A.* Methods for determining focal mechanisms in laboratory experiments // EGU General Assembly 2021. EGU21-3305.
2. *Смирнов В.Б., Пономарёв А.В.* Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН. 2020. – 412 с.

CONVERGENCE OF DAMAGE PARAMETERS IN SANDSTONES UNDER CYCLIC LOADING

N. M. Shikhova, A. V. Patonin

Geophysical Observatory Borok – branch of the O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Borok, Russia

**E-mail: shinami@yandex.ru*

This study presents the results of laboratory modeling of triggered activation on five types of sandstones of various origins – Berea, Castlegate, Bentheim, Buffalo, and Bleurswiller. The experiments were conducted on an Inova servohydraulic press under cyclic loading with differential axial stress of 20–70 MPa and confining pressure of 10–30 MPa. The peak stress within the cycle amounted to 40–50% of the strength limit of the studied sandstones at the given confining pressure, allowing the cyclic loading to be considered as weak trigger perturbations analogous to tidal deformations under natural conditions. Monitoring of the damage accumulation process was performed using a 16-channel acoustic emission system, providing 3D location of events with an accuracy of 2 mm and determination of the failure mechanism type using the original AESAM + ISO technique.

The following failure indicators were analyzed: the Felicity Ratio (FR), the *b-value* parameter, the proportions of acoustic emission event types (DC, CLVD, ISO), and the fractal dimension of the spatial distribution of hypocenters (D). Analysis of the obtained data revealed a robust pattern observed regardless of the sandstone type: immediately prior to macroscopic failure, all samples demonstrated convergence of key parameters to unified critical values. The FR drops below 0.4, indicating a transition to irreversible accumulation of microdamage; the energy parameter *b-value* decreases to ~ 0.4 , indicating the dominance of large AE events at the final stage; the fractal dimension of the spatial distribution of hypocenters decreases to $D \approx 2.0$, corresponding to the formation of a nearly planar fault surface.

Of particular interest is the dynamics of the failure mechanism types. At early loading stages, the dominant event type varies depending on the sample: shear mechanisms (DC, 60–80%) prevail in Buffalo and Berea sandstones, mixed mechanisms (CLVD, 50–60%) in Bentheim, and a more uniform distribution of types is observed in Bleurswiller. However, at the final stage, all samples demonstrate a unified scenario – an increase in the proportion of mixed and isotropic events to 30–70%.

The obtained results allow for the formulation of a multiparametric criterion for assessing the readiness of a fault zone for failure under weak cyclic stresses. The critical state corresponded to the simultaneous fulfillment of the following conditions: $FR < 0.4$, $b\text{-value} < 0.4$, DC proportion $< 65\%$, $D < 2.1$. Achievement of this combination was recorded 3–10 seconds before macroscopic failure in all experiments regardless of the sandstone type. Using the criterion for any single parameter separately leads to false positives.

The results of this study, combined with the analysis of data from other researchers, allow us to conclude that the triggered activation of fault zones in sandstones under weak cyclic stresses follows a universal scenario, independent of the rock's microstructural features.