

УДК 550.34

ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ ВИБРАЦИЙ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКЕ

© 2000 г. Ю. А. Трапезников, Б. Ц. Манжиков, Л. М. Богомолов

Научная станция Института высоких температур РАН, Бишкек, 720049, Кыргызстан

Поступила в редакцию 12.05.97 г.

В длительном реологическом эксперименте исследовано влияние слабых механических вибраций на деформацию и акустическую эмиссию (АЭ) образцов гранита при одноосном сжатии. Ранее проведенные испытания [4] выявили связь вибраций с пластичностью. В проведенном эксперименте зарегистрировано изменение уровня акустической активности под воздействием вибраций, что свидетельствует о влиянии слабых вибраций не только на пластичность, но на такие эффекты, предопределяющие разрушение образца, как концентрация и релаксация напряжений на неоднородностях. Особенность влияния слабых вибраций – задержка изменения скорости АЭ после включения и выключения источника вибраций. Исследована зависимость времени задержки реакции образца от средней нагрузки и истории нагружения.

Скачкообразность пластической деформации различных материалов в поле слабых механических вибраций выявлена в лабораторных экспериментах [5]. В процессе пластического деформирования напряженных материалов вибрации, включая микросейсмы Земли и воздушные колебания, играют роль спускового механизма.

В работах [3, 4] показано влияние вибраций, вызванных водосбросом, на сейсмичность в регионе Нурекской ГЭС в Таджикистане. Установлено, что в период водосброса микросейсмы в окрестности плотины существенно возрастают, а число землетрясений и их энергия уменьшаются. Отмечено, что степень корреляции суточного числа толчков $N_{сут}$ и уровня микросейсм гораздо сильнее корреляций $N_{сут}$ с другими параметрами. Практическое приложение этих работ направлено на активное воздействие на ход сейсмического процесса [1, 6].

Инициирование неустойчивой подвижки на контакте блоков горных пород исследовано в работах [7, 8]. В качестве триггера использовали синусоидальные вибрации, вызывающие колебания напряжения с амплитудой, соизмеримой со стационарной нагрузкой, а также и упругие ударные импульсы. В указанных работах исследованы кинетика развития подвижек и динамические характеристики возникающего акустического излучения. Выявлено длительное время задержки между моментом инициирования и вызванной им неустойчивой подвижкой, зависящее от силы иницирующего сигнала. Влияние вибраций объяснялось в работах [7, 8] с позиций кинетической теории прочности возрастанием напряжений в соответствующей фазе нагрузки, что должно уве-

личивать вероятность термически активируемых процессов.

Другой возможный механизм – перераспределение неоднородности напряжения на различных дефектах. Для выяснения роли этого механизма в настоящей работе исследовано влияние весьма слабых вибраций на сжатие гранита при постоянной средней нагрузке, превышающей предел упругости. Влияние вибраций на физические свойства горных пород при атмосферном давлении исследовано подробно в экспериментах [9]. В настоящей работе внимание обращено на временной аспект проблемы, а именно на наличие задержки ответной реакции нагруженной горной породы на начало вибраций, и реакция последствия при выключении источника вибраций. При слабых вибрациях задержка не может быть объяснена ни акустическим давлением, ни пиковыми напряжениями, принципиальной оказывается релаксация напряжений на различных неоднородностях. Обнаруженные эффекты задержки акустической активности и насыщения неупругой деформации могут быть существенными для проблемы преобразования энергии в объемном сейсмическом очаге.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В экспериментах применяли одноосное нагружение гранитных образцов месторождения Каинда в Кыргызстане. Образцы имели форму правильного цилиндра высотой 60 и диаметром 30 мм. Для нагружения использовали серийный гидравлический пресс, оснащенный специально разработанной пружинной приставкой, позволяющей

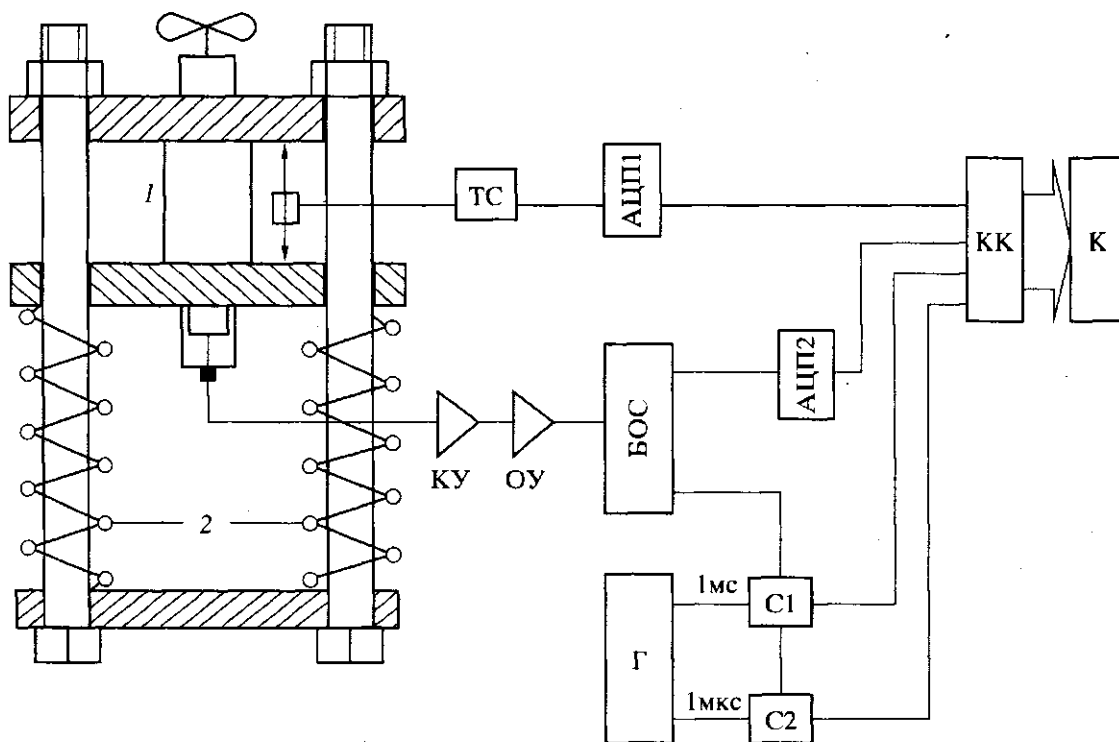


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – образец; 2 – пружины; ТС – тензостанция; КУ – кабельный усилитель; ОУ – основной усилитель; БОС – блок обработки сигналов АЭ; Г – кварцевый генератор; С1 – счетчик длительности АЭ-сигналов; С2 – счетчик времени ожидания АЭ-сигнала; КК – контроллер крейта КАМАК; К – компьютер SM1420.

поддерживать на образце постоянную нагрузку до 12 т в течение длительного времени. Рабочая нагрузка, действующая на образец через пружинные приставки, первоначально создавалась с помощью пресса, затем, после ее фиксации, пресс отключали и дальнейшее нагружение обеспечивалось за счет упруго сжатых пружин приставки.

Источником вибраций в экспериментах служил маломощный вентилятор с частотой вращения 50 Гц, располагаемый на верхнем траверсе пружинной приставки. Из-за неидеальности балансировки вращающиеся детали вентилятора создавали низкочастотные вибрации, которые через конструктивные элементы нагружающего устройства воздействовали на образец. Уровень вибраций был ниже порога дискриминации регистрирующей аппаратуры АЭ, что исключало ложное срабатывание аппаратуры от вибратора.

Процесс деформирования образца контролировали по величине продольной деформации и характеристикам акустической эмиссии (АЭ), возникающей в нагруженной горной породе. Для регистрации АЭ использовали измерительно-вычислительный комплекс, имеющий в своем составе аппаратуру КАМАК и компьютер. Блок-схема измерительно-регистрирующего тракта показана на рис. 1. В течение опыта аппаратура работала в ждущем режиме. Регистрировались АЭ-со-

бытия, амплитуда которых превышала порог дискриминации. С приходом события, удовлетворяющего условиям отбора, регистрировались его АЭ-характеристики, время от начала эксперимента и величина абсолютной продольной деформации. Таким образом характеристики текущего события АЭ синхронизировались с измерениями продольной деформации образца.

В ходе эксперимента источник вибраций периодически включали на время, необходимое для регистрации статистически представительной выборки данных, включающей сведения не менее чем о 128 акустоэмиссионных сигналах (АС). Время сеанса определялось активностью АЭ, т.е. количеством АС, регистрируемых в единицу времени. Величину активности рассчитывали как отношение объема выборки ко времени, за которое она была зарегистрирована.

Общая продолжительность эксперимента ~1 мес. Применяли ступенчатое нагружение образца без промежуточной разгрузки. Первоначально образец был нагружен в течение нескольких часов до 80 МПа. По мере нагружения контролировали активность АЭ. После заметного «оживления» АЭ при заданной нагрузке выдерживали паузу, необходимую для регистрации данных. В последующие 12 сут нагрузка на образец была доведена до 140 МПа, при которой он находился 15 сут. При

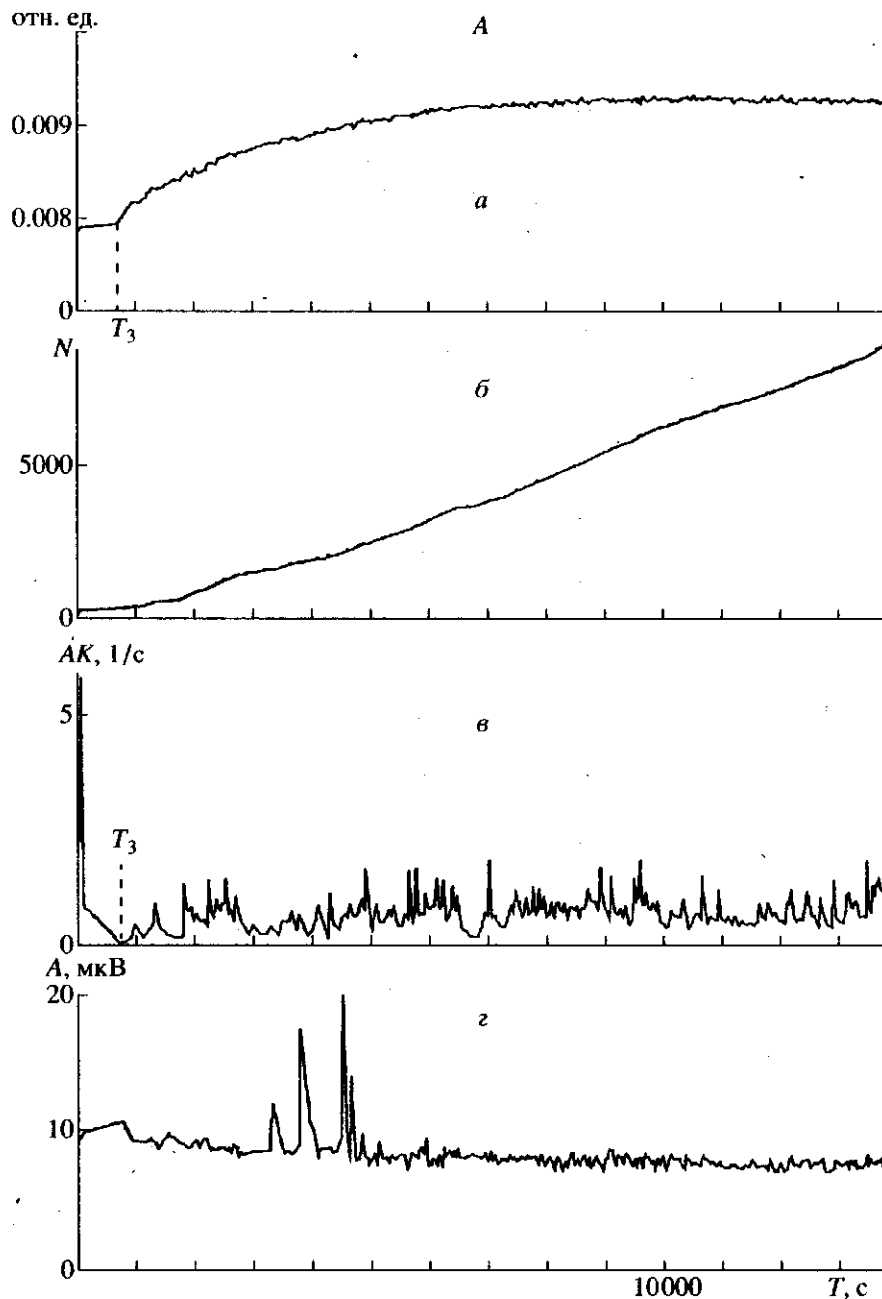


Рис. 2. Временные зависимости сигналов в сеансах с вибрацией (А) и без вибраций (Б) при нагрузке 140 МПа: а – относительная деформация образца; б – накопление АС; в – активность АЭ; г – средняя амплитуда АС; T_3 – задержка реакции в начале сеанса; T_n – последствие вибраций.

очередной попытке увеличить нагрузку образец разрушился.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вибрации вызвали увеличение активности и снижение амплитуды АЭ по сравнению с обычным режимом нагружения без вибраций. При этом наблюдалось изменение знака деформации. Будем считать положительной деформацию об-

разца, совпадающую с направлением действия нагрузки. Без вибрации образец в ряде случаев испытывал отрицательную деформацию, т.е. удлинение, вибрации же приводили к его укорочению в условиях сжимающей нагрузки, т.е. в этом случае деформация была положительной. Такое поведение образцов является, по-видимому, новым проявлением эффекта виброупругости (т.е. обратимого изменения скорости деформации под действием слабых вибраций), обнаруженным ранее

[2]. В настоящих экспериментах сжимающие напряжения были существенно выше, чем в экспериментах работы [2] (нагрузка в 3–4 раза больше, поперечная площадь в 7 раз меньше). При этом эффект виброупругости мог осложняться дефектообразованием и другими факторами. Отметим, что удлинение образца не запрещено энергетически при выполнении одного из следующих необходимых условий: 1) оно компенсируется за счет пластичности конструктивных элементов реологической приставки, так что деформация пружин не возрастает; 2) удлинение соответствует увеличению модуля упругости образца и/или уменьшению жесткости пружины.

На рис. 2 показаны типичные изменения деформации образца и параметров АЭ в опытах с вибрацией и без вибрации при нагрузке 140 МПа. Вначале был проведен сеанс с вибрацией, а затем, без перерыва, – сеанс без вибрации.

Видно, что при наличии вибрации образец испытывает положительную деформацию, которая с течением времени претерпевает насыщение, причем активный рост деформации наблюдается не сразу, а с некоторой задержкой (~800 с после начала вибраций). В это время наблюдается почти полное отсутствие акустических сигналов, которое характерно для сеансов без вибраций. После задержки следует довольно быстрый рост деформации и усиление активности АЭ, которая претерпевает резкие изменения в течение вибро-сеанса, значительно превышающие аналогичные колебания в сеансах без вибраций. Затем рост деформаций замедляется и через ~7000 с работы вентилятора деформация выходит на насыщение. Уровень насыщения на ~10% больше, чем деформация при той же нагрузке, но без вибраций. Амплитуда акустического давления в волнах от вентилятора не превышала 1 Па, т.е. всего на $10^{-5}\%$ от среднего напряжения сжатия. Несмотря на это соотношение, слабые вибрации переводят образец из одного напряженного состояния в другое, отличающееся большей запасенной энергией и более высокой акустической активностью. Наличие вибраций приводит также к некоторому снижению средних амплитуд АС.

Задержка ответной реакции нагруженной горной породы на действие вибраций наблюдалась не только с их началом, но и в конце сеанса после выключения вибратора. Об этом свидетельствуют результаты, приведенные на рис. 2, Б, поз. а, поскольку эти данные получены в сеансе без вибраций, который следовал сразу же после сеанса с вибрацией. Наличие временной задержки после выключения вибратора можно охарактеризовать как последствие. В данном случае, судя по излому на графике деформаций, оно имело продолжительность 8000 с.

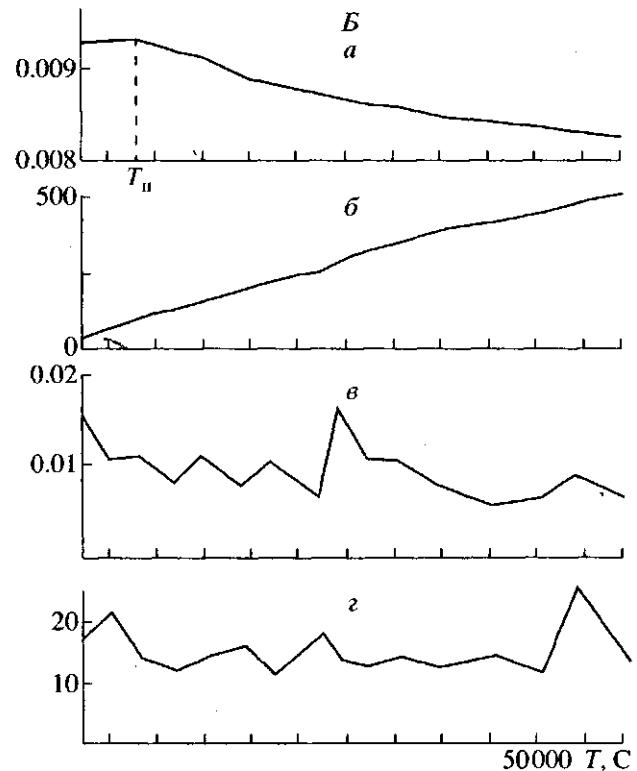


Рис. 2. Окончание.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выявленные эффекты позволяют утвердительно ответить на вопрос о влиянии вибраций на процесс деформирования горных пород при постоянной нагрузке. Попытаемся дать хотя бы кратчайшее объяснение наблюдаемым явлениям. Начнем с рассмотрения деформаций. При отсутствии вибраций (рис. 2, Б) образец, в условиях сжимающих напряжений, испытывает удлинение или не деформируется вовсе (здесь имеется в виду изменение длины образца, поддающееся регистрации). Наложение на постоянную нагрузку малоамплитудных низкочастотных вибраций приводит к положительному приращению деформации после некоторой временной задержки. Из этого следует, что вибрации облегчают процесс деформирования нагруженного материала.

В такой неоднородной среде, как горные породы, внутреннее распределение напряжений по объему образца также неоднородно. Здесь имеется в виду распределение напряжений на структурных элементах, различающихся по своим механическим свойствам, например, жесткости. Однако, несмотря на блочное строение и наличие разветвленной трещиноватости, порода обладает прочностью не только на сжатие, но и на растяжение, так как подвижность структурных элементов ограничена взаимным сцеплением и силами внутреннего трения. Распределение напряже-

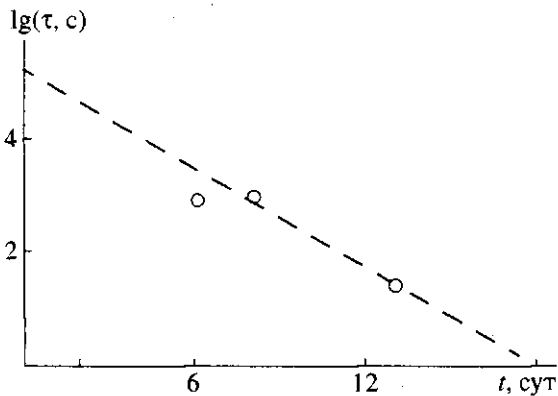


Рис. 3. Изменение длительности задержки в течение эксперимента.

ний на структурных элементах при постоянной нагрузке может быть нарушено, если каким-либо образом изменить силу трения между ними, т.е. повлиять на степень их подвижности. Этого можно добиться, например, с помощью вибраций. Вибрации приводят к увеличению подвижности прежде всего мелких частиц, при этом на более крупных и жестких – будет происходить увеличение концентрации напряжений.

Если на образец, достаточно долго находившийся при постоянной нагрузке без вибраций, накладываются вибрации, то благодаря трению покоя структурные элементы становятся подвижными не сразу, а через некоторое время, необходимое для того, чтобы напряжение на них возросло и превысило трение покоя. Ползучесть этих структурных элементов в свою очередь снижает силы трения покоя, действующие на еще более крупные блоки, и т.д. В нагруженном материале при этом устанавливается новое напряженное состояние, соответствующее данной подвижности структурных элементов. Релаксационные процессы после прекращения действия вибраций затухают также в течение некоторого времени (последствие).

По-видимому, с уменьшением подвижности структурных элементов материал при нагружении способен накапливать в неоднородностях большую упругую энергию и диссипировать ее большими порциями, чем при их высокой подвижности. Об этом свидетельствуют более высокие средние значения амплитуд АС, регистрируемых в сеансах без вибраций.

Наличие задержки при смене состояний подтвердилось и при проведении последовательных сеансов с вибрацией, между которыми был часовой перерыв. Несмотря на сравнительно короткий перерыв наблюдалась задержка реакции на начало вибраций ~160 с. Временные зависимости деформации образца и характеристик АЭ при повторных вибресеансах подобны показанным на рис. 2,А. Такие изменения регистрируемых пара-

метров наблюдались всякий раз, когда источник вибрации включался после перерыва. Различались только времена задержки.

Результаты эксперимента показали, что длительность задержки при постоянстве статистической составляющей нагрузки со временем сокращается. Если в начале эксперимента она составляла $\sim 10^4$ с, то в конце она сократилась до $\sim 10^2$ с. Временная зависимость длительности задержки в течение эксперимента показана на рис. 3. В полулогарифмических координатах она аппроксимируется линейной зависимостью вида

$$\lg t_3 = \lg t_0 - at,$$

где t_3 – длительность задержки; t_0 – начальная длительность задержки при данной нагрузке; a – коэффициент, зависящий от величины нагрузки, свойств материала и параметров вибрации.

Полученные результаты позволяют высказать предположение о возможности подобной временной задержки в изменениях сейсмического процесса в случае воздействия на земную кору мощным источником вибраций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольхин А.М., Брагин В.Д., Зубович А.В. и др. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях. М.: Наука, 1993. 158 с.
2. Мирзоев К.М., Виноградов С.Д., Рузибаев З. Влияние микросейм и вибраций на акустическую эмиссию // Изв. АН СССР. Физика. Земли. 1991. № 12. С. 69–72.
3. Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х. Влияние механических вибраций на сейсмичность // Докл. АН СССР. 1969. Т. 313. № 1. С. 78–83.
4. Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Дастури Т.Ю. Влияние механических вибраций на характер высвобождения сейсмической энергии в районе водохранилища Нурекской ГЭС // Сейсмологические исследования в районах строительства крупных водохранилищ Таджикистана / Под ред. Садовского М.А. Душанбе: Дониш, 1987. С. 101–119.
5. Садовский М.А., Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Саломов Н.Г. Влияние механических микроколебаний на характер пластических деформаций материалов // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1981. № 6. С. 32–42.
6. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.
7. Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В. Возбуждение колебаний в модели сейсмического источника // Физика Земли. 1995. № 12. С. 72–78.
8. Соболев Г.А., Шпетцлер Х., Кольцов А.В., Челидзе Т.Л. Иницирование неустойчивой подвижки в лабораторных экспериментах // Построение модели развития сейсмического процесса и предвестника землетрясений. Вып. 1. М., 1993. С. 38–47.
9. Шамина О.Г., Паленов А.М., Стопинский З. и др. Влияние ультразвуковых вибраций на физико-механические свойства горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 8. С. 93–101.

The Effects of Low-amplitude Vibrations on Rock Deformation at Constant Loads

Yu. A. Trapeznikov, B. Ts. Manzhikov, L. M. Bogomolov

Research Station. Institute of High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Bishkek, 720049, Kirgizstan

A long-continued rheological experiment was carried out to investigate the effects of low-amplitude mechanical vibrations on deformation and acoustic emission (AE) in granite specimens under uniaxial compression. Previous experiments revealed a relation between vibrations and plasticity. The present experiment recorded changes in the level of acoustic activity due to vibrations. This shows that low-amplitude vibrations can affect, not only plasticity, but also effects that control failure, such as concentration and relaxation of stresses at heterogeneities. One feature of low-amplitude vibrations is that these retard the change in the rate of AE after switching on and switching off the source of vibration. The delay in the response of the specimen is investigated in relation to mean load and loading history.