

Влияние напряжения на эмиссию ионов, инициированных ударной волной из гетерогенного материала (гранита)

© И.П. Щербаков, В.И. Веттегрень[¶], Р.И. Мамалимов, Х.Ф. Махмудов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

[¶] E-mail: Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 12 июля 2016 г.)

Электрический пробой воздуха около поверхности сжатой пластины из гранита вызывает появление в нем ударной волны. Добежав до обратной стороны пластинки, ударная волна обуславливает последовательное (с интервалом ~ 50 ns) выделение струй плазмы, состоящей из положительно заряженных ионов. Распределение струй по интенсивности экспоненциальное. Пока сжимающее напряжение P не превысит $\sim 0.9-0.95$ от разрушающего — P_f , его величина не влияет на число и эффективность источников излучения. При $P \approx (0.9-0.95)P_f$ ударная волна вызывает появление трещины, разрушающей образец. Одновременно число и эффективность источников ионов возрастают в 3–4 раза. Это явление объясняется увеличением концентрации скоплений дислокаций при ползучести образца.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 160500138).

DOI: 10.21883/FTT.2017.03.44169.292

1. Введение

До последнего времени о механизме разрушения судили по результатам исследования изменения скоростной зависимости профиля поверхности при образовании трещин [1–4]. Прямые исследования разрушения хрупких тел непосредственно во время действия ударной волны были начаты в [5–9]. В этих работах с использованием метода регистрации флуоресценции (FL) с временным разрешением 10 ns было изучено разрушение образцов из кварца и гранита под влиянием электрического разряда около их поверхности. Было обнаружено, что ударная волна вызывает выделение струй плазмы, состоящих из положительно заряженных ионов и атомов, входящих в состав структурной формулы кварца и гранита. Этот результат показал, что механизмы разрушения под действием ударной волны и механического нагружения различны. Если при механическом разрушении тело разрушается путем образования и роста трещин, то в поле ударной волны — за счет разложения на ионы. Скорость роста трещин в граните составляет ~ 1 km/s, а скорость ударной волны в наших условиях нагружения ~ 5 km/s [7]. Эта пятикратная разница в скоростях роста трещин и ударной волны является основной причиной различия механизмов разрушения [5–13].

Настоящая работа продолжает цикл этих исследований. В ней предполагалось выяснить, как влияет величина сжимающего напряжения на процесс выделения ионов под действием ударной волны.

2. Объект и метод исследования

Блок-схема установки описана в [7–9]. Для исследований был выбран образец гранита с содержанием

кварца ~ 30 vol.% и полевого шпата ~ 70 vol.%. Он представлял собой параллелепипед с размерами ребер $L = 20 \times 20 \times 40$ mm, внутри которого располагалось отверстие для медных электродов, присоединенных к конденсатору. При разряде конденсатора между электродами возникала дуга. Она вызывала появление ударной волны в воздухе и вслед за ней ударной волны в образце. Энергия разряда составляла ~ 0.2 J, а мощность — $2 \cdot 10^5$ W. Важно, что такая энергия разряда не вызывала разрушение образца.

Разряд приводил к колебаниям образца гранита, которые регистрировались с использованием датчика из пьезокерамики CTS-19 (размер датчика $4 \times 4 \times 1$ mm). Для исследования временной зависимости FL перед образцом устанавливался один из концов кварцевого световода, второй конец которого располагался перед поверхностью фотокатода фотоэлектронного умножителя PMT-136. Напряжения на пьезокерамике и выходе PMT подавались на вход аналого-цифрового преобразователя ADS-3112 и через каждые 2 ns записывались в память компьютера для дальнейшего анализа и обработки.

Для сжатия образцов использовался пресс PGPR. Разрушающее напряжение исследованного образца гранита $P_f \approx 28$ МПа.

3. Механизм разрушения гранита под действием ударной волны

При электрическом разряде в промежутке между двумя медными проводниками образуется плазма, состоящая из микрочастиц, атомов и ионов Cu [10]. Она вызывает появление в граните ударной волны сжатия, которая добегает до поверхности образца и приводит к появлению FL. Ее спектр состоит из нескольких

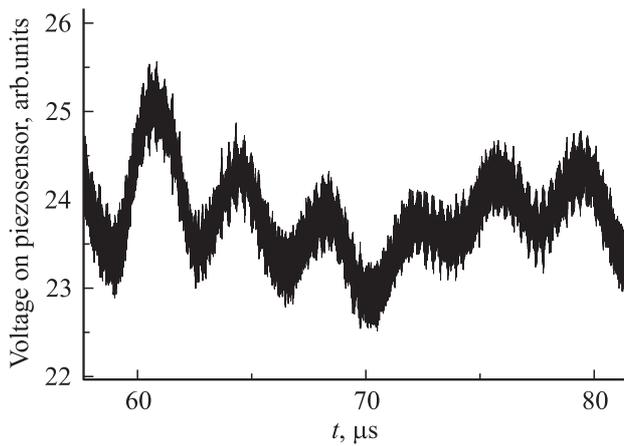


Рис. 1. Собственные колебания образца гранита.

десятков наложенных друг на друга линий, которые соответствуют излучению возбужденных ионов Si, O, Ca, Al, Fe, N и Cu [8,9]. Таким образом, под влиянием ударной волны часть гранита разлагается на заряженные ионы.

В работах [11–14] был предложен механизм разрушения, не связанный со скоростью роста трещин. Авторы показали, что при сильных искажениях кристаллической решетки в скоплениях и пересечениях дислокаций возможно пересечение уровней основного и возбужденного электронных состояний. Это может приводить к неадиабатическим переходам между электронными уровнями и распаду межатомных связей с образованием положительно заряженных ионов. Этот механизм не включает в себя явление зарождения микротрещин путем последовательного разрыва связей Si–O под влиянием термических флуктуаций. Разрушение происходит атермическим путем и не зависит от температуры и скорости нагружения.

В [15] был предложен механизм, согласно которому струи ионов могут вылетать из-за кумуляции ионов в порах, расположенных в поверхностном слое гранита. Этот механизм не противоречит описанному выше, так как около пор всегда наблюдается повышенная плотность дислокаций.

Остановимся на деформации образца в поле ударной волны. Как уже отмечалось, разряд вызывал появление ударной волны сжатия, которая многократно отражалась от границ образца, что приводило к собственным колебаниям образца (рис. 1) с полупериодом $\tau \approx L/S$, где L — размер образца (20 mm), S — скорость ударной волны в граните. Поскольку $L = 20$ mm, а S для гранита ~ 5 km/s [8], $\tau \approx 0.4 \mu\text{s}$, что совпадает с измеренным значением полупериода ударной волны ($3.9 \mu\text{s}$).

4. Распределение струй ионов по интенсивности

Добежав до границы образца, ударная волна сжатия вызывала серию отдельных струй ионов (рис. 2). Число

таких струй за время наблюдения достигало 10^5 – 10^6 , а время их выделения достигало $\sim 300 \mu\text{s}$.

На рис. 3, а в полулогарифмических координатах приведены распределения числа N струй ионов по интенсивности I в отсутствие давления. Они описываются выражением $\ln I = \ln I_m - bN$ или $I = I_m \exp(-N/N_e)$.

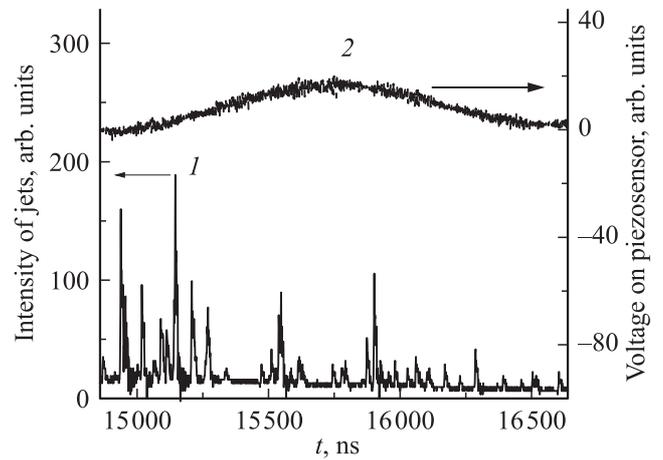


Рис. 2. Струи ионов (1), возникающие при отражении ударной волны (2) от поверхности образца.

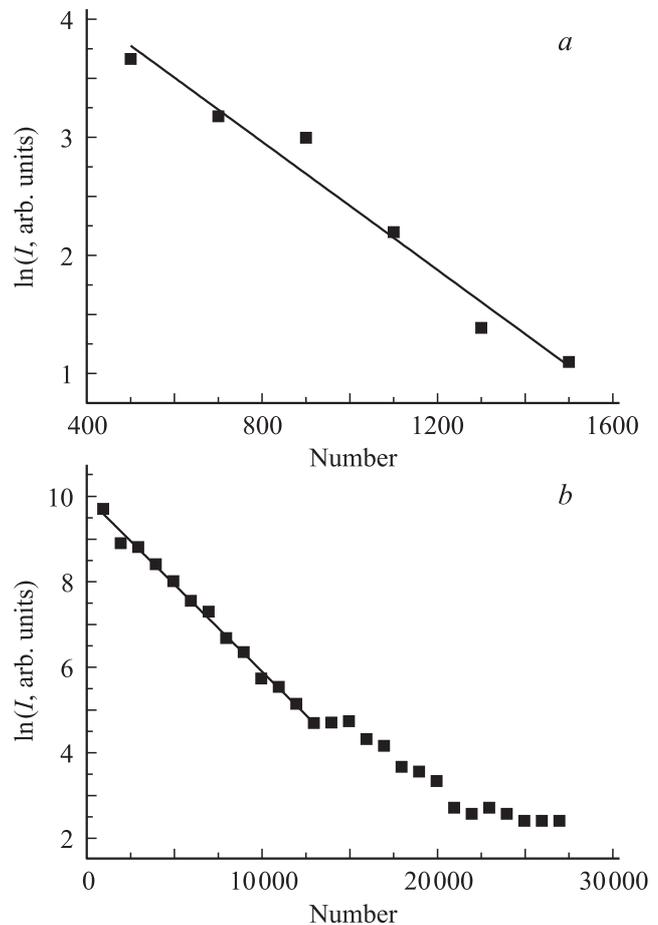


Рис. 3. Распределение интенсивности струй ионов при различных давлениях. $P/P_f = 0$ (а), 0,95 (б).

Здесь I_m — максимальная интенсивность струи, а N_e — эффективность источника (dI/dN). Оказалось, что таким выражением описывается распределение струй, если сжимающее давление не превышает $(0.9-0.95)P_f$. По-видимому, такие давления не приводят к появлению новых скоплений дислокаций на границах зерен полевого шпата и кварца.

При давлении $(0.9-0.95)P_f$ число струй увеличивается на порядок из-за ползучести образца. По-видимому, при ползучести образуются новые скопления дислокаций. В этих условиях экспоненциальное распределение по интенсивности выполняется только для самых мощных струй (рис. 3, *b*). Оказалось, что для таких струй величина $\ln I_m$ растет на 10% (т.е. число струй, вылетевших из наиболее эффективного источника, растет в 3 раза), а эффективность источников N_e — в 4 раза. Это показывает, что чем мощнее источник, тем сильнее влияет на него давление.

5. Заключение

Ударная волна вызывает появление нескольких сотен струй плазмы, состоящей из положительно заряженных ионов. Если сжимающее давление не превышает $\sim 0.9-0.95$ от разрушающего напряжения, его величина не оказывает заметного влияния на распределение интенсивности излучающих источников. При давлении, близком к разрушающему, интенсивность наиболее мощных источников плазмы резко возрастает.

Список литературы

- [1] В.В. Адушкин, А.А. Спивак. Геомеханика крупномасштабных взрывов. Недра, М. (1993). 319 с.
- [2] В.Е. Фортов. УФН **177**, 348 (2007).
- [3] Г.И. Канель, В.Е. Фортов, С.В. Разоренов. УФН **177**, 809 (2007).
- [4] H.I.P. Galvez. Miner. Eng. **24**, 1638 (2011).
- [5] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. ЖТФ **81**, 4, 148 (2011).
- [6] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. ФТТ **54**, 1342 (2012).
- [7] В.И. Веттегрень, А.В. Воронин, В.С. Куксенко, Р.И. Мамалимов, И.П. Щербаков. ФТТ **56**, 315 (2014).
- [8] В.И. Веттегрень, И.П. Щербаков, В.С. Куксенко, Р.И. Мамалимов. ФТТ **56**. 1767 (2014).
- [9] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. Физика Земли **4**, 1 (2016).
- [10] К.Б. Абрамова, И.П. Щербаков, А.И. Русаков. ЖТФ **69**, 2, 137 (1999).
- [11] В.А. Закревский, В.А. Пахотин. ФТТ **52**, 1083 (2010).
- [12] V.A. Zakrevskii, A.V. Shuldiner. Phil. Mag. B **71**, 2, 127 (1995).
- [13] В.А. Закревский, А.В. Шульдинер. ФТТ **41**, 900 (1999).
- [14] A.V. Shuldiner, V.A. Zakrevskii. Rad. Protection Dosimetry **65**, 1-4, 113 (1996).
- [15] Е.Л. Зильбербранд, Г.С. Пугачев, А.Б. Синани. Письма в ЖТФ **20**, 6, 45 (1994).