

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИКИ ФРАГМЕНТАЦИИ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ*

И.А. Банникова, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Н.В. Савельева, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Для цитирования:

Банникова И.А., Савельева Н.В. Исследование статистики фрагментации природных материалов в лабораторных условиях // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 4. – С. 18–38. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.2>

Представлены результаты исследования поведения природных материалов (кварцит, песчаник, андезит) при квазистатическом, динамическом нагружении и низкоскоростном индентировании ($10^{-3} \div 10^3$ 1/с). Условия эксперимента позволили сохранить фрагментированные образцы и провести анализ статистики сохраненных фрагментов по размерам (массам). В ходе исследований использовалась система лабораторных сит и электронные весы HR-202i с погрешностью измерения 0.0001 г. Метод обработки фотографий с фрагментами позволил установить количество и массу фрагментов на ситах с размерами ячейки до 0.063-0.05 мм, не менее 99% от массы образца и минимизировать погрешность измерений. На полученных кумулятивных распределениях фрагментов по массе $N(m_i)$ наблюдается изменение формы перегиба и смещение точки перегиба в сторону меньших масштабов с увеличением скорости деформации. В ходе анализа данных отражается сходство статистики фрагментации по степенному закону и асимптотических режимов разрушения с множественными разрывами, полученными по сценарию хрупкого разрушения. Показано, что разрушение образцов происходит по разным сценариям в зависимости от условий нагружения и связано с изменением скорости перехода от одной стадии появления трещин (или накопление напряженных состояний, дефектной структуры) к другой (образование трещин и полная фрагментация). Установлено, что формирование фрагментов носит «автомодельный» характер.

Ключевые слова: статистический анализ фрагментации, кварцит, песчаник, андезит.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края, проект № 20-41-596013 и в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. номер НИОКТР № 124020200116-1).

Введение

Статистические закономерности процесса фрагментации являются предметом устойчивого интереса в связи с изучением фундаментальных аспектов разрушения материалов в широком диапазоне интенсивностей нагружения [1–6]. На сегодняшний день существует большое количество исследований фрагментации в различном типе экспериментов и образцов: разрушение оболочек (или колец) [3, 4, 7–11], длинных стержней [12, 13], цилиндров [14], пластин [15, 16]. Существует множество примеров динамической фрагментации, охватывающей огромный диапазон масштабов по размеру (массе): от расщепления атомных ядер [17] до фрагментации комет [18]. Все перечисленные события произошли в результате дробления тела на некоторое число фрагментов. Вид распределения фрагментов по размеру (массе) зависит от ряда факторов: от величины энергии, затраченной на разрушение [1–6, 11], свойств материала (хрупкий или пластичный) [1, 12], формы и размерности объекта (3-х мерные – кубы, сферы, 2-х мерные – пластина, стержень).

В развитие работ по изучению пространственно-временной статистики фрагментации при нагружении цилиндрических образцов из стекла и керамик [2–4, 6, 11, 15, 16, 21, 22] в настоящей работе проведен анализ статистических распределений фрагментов образцов из природных материалов (кварцит, песок, андезит), полученных при разных типах нагружения в условиях сохранения фрагментов. Постановка задач фрагментации материалов соответствует двум различным аспектам анализа поведения материала в зависимости от величины энергетического воздействия:

1) исследование вблизи критической точки (critical point [3, 15] или transition point [23]), соответствующей переходу от

дефектного материала к фрагментированному;

2) исследование процесса фрагментации вдали от «критической точки» в условиях значительных энергетических воздействий на материал.

Оба аспекта исследований важны для полного понимания процесса разрушения материалов и разработки новых материалов с улучшенными свойствами, которые смогли бы выдержать условия нагружения, когда поглощение энергии сопровождается выраженными процессами фрагментации с различными статистическими законами [1, 6, 9, 11, 12, 16, 18, 22].

Существенным является определение параметров модели на основе лабораторных экспериментов по фрагментации конкретных образцов породы в необходимом диапазоне интенсивностей и скоростей нагружения с регистрацией статистических и кинетических закономерностей фрагментации независимыми методами (распределения фрагментов по размерам, кинетика сигналов флуоресценции, акустической эмиссии). Принципиально важными являются методы обработки статистических распределений фрагментов по размерам и кинетике разрушения, цель которых заключается в установлении закономерностей «критичности». Практическая значимость работы заключается в возможности применения её результатов в горнодобывающей отрасли, где одной из ключевых задач является определение параметров эффективного дробления (фрагментации) материалов с минимальными энергетическими затратами различными методами. Полученные данные могут способствовать оптимизации технологических процессов и улучшению производительности оборудования, что в конечном итоге приводит к снижению эксплуатационных расходов и повышению экологической безопасности.

Образцы из природных материалов и эксперимент

В работе исследовались образцы из природных материалов: кварцит (г. Уганда, Африка), песчаник (ООО «Нефтеком», Чаяндинское НГКМ скважины №1062, ствол 2, Ботубинский горизонт, Россия и НТЦ «Газпромнефть», Ботубинский горизонт, глубина забора 2920...2950 м, за пределами месторождения разведывательной скважины, Россия) и андезит (собран в зоне установки опор кресельной канатной дороги, на горе Эльбрус на высоте 2350 м над уровнем моря, пос. Чегет, Кабардино-Балкарская Республика, Россия). В таблице 1 приведены параметры, свойства образцов и условия нагружения.

Образцы из кварцита, песчаника и андезита разрушались в условиях сохранения фрагментов под действием квазистатического, динамического нагружения и низкоскоростного индентирования (песчаник в условиях всестороннего обжатия). Квазистатическое сжатие (quasistatic loading, QSL) и индентирование (quasistatic indention, QSInd) реализовывалось на универсальной нагружающей машине Shimadzu AGX Plus, а динамическое нагружение (dynamic loading, DL) – на установке с разрезными стержнями Гопкинсона «РСГ-25». Подробное описание методики экспериментов приведено в работах [24,25,32].

Динамическое нагружение цилиндрических образцов из песчаника проводилось в интервале скоростей нагружения от 863 1/с до 1447 1/с, в котором были получены максимальные значения напряжений от 603.8 до 44.8 МПа, оценена энергия нагружения, как площадь под деформационной кривой: для образцов San1 – 2.3 Дж, для San2 – 1.75 Дж, для San3 – 8.3 Дж и для образца San4 – 6.38 Дж. Динамическое нагружение образцов из андезита Mou3 и Mou4 проводилось

при скоростях ударника 9.8 м/с и 20.8 м/с. При достижении максимальных значений приложенных осевых сжимающих напряжений для Mou3, $\sigma_{max} = 143$ МПа, деформация $\varepsilon = 7.5 \times 10^{-3}$, скорость деформации равнялась 430 1/с (9.8 Дж), для Mou4, $\sigma_{max} = 428$ МПа, $\varepsilon = 15.3 \times 10^{-3}$, скорость деформации равнялась 1353 1/с (5.2 Дж). Разрушение кварцита при динамическом сжатии осуществлялось при достижении $\sigma_{max} = 28$ МПа, а скорости деформации 10^3 1/с.

Квазистатическое индентирование образцов из песчаника осуществлялось с помощью индентора из высокопрочной закалённой стали с сечением в виде прямоугольной пирамиды со скоростью 3 мм/с [25], значения максимальной нагружающей силы до возникновения признаков разрушения находились в интервале от 8 до 28 кН.

Квазистатическое нагружение образцов из песчаника и андезита осуществлялось при скорости движения траверсы 0.5 мм/мин, (8.3×10^{-6} м/с). Максимальные значения величины приложенного усилия перед разрушением F_{max} андезита составили 9 и 13 кН. А для образцов из песчаника – 2.8 кН с выходом на плато в критической стадии со значением 0.8...1.2 кН, что может быть связано с проявлением остаточной несущей способности материала при сжатии и компактировании трещин. Квазистатическое сжатие кварцита реализовывалось при скоростях 0.2 и 1 мм/мин, а полное разрушение кварцита происходило при достижении $F_{max} \sim 90$ и ~ 270 кН, соответственно.

На рисунках ниже приведены фотографии образцов из песчаника, андезита и кварцита после QSL (рис. 1) и QSInd (рис. 2). В ходе эксперимента установлено, что для квазистатического сжатия природных материалов характерно образование множественных магистральных трещин по высоте и в объеме образца.

ИССЛЕДОВАНИЯ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Квазистатическое индентирование песчаника сопровождалось образованием в трехстороннем ветвлении трещины от места соприкосновения с индентором и отколом одного-трех крупных фрагментов от основания образца с небольшим

количеством мелких фрагментов. После динамического нагружения образцы разрушались полностью, примеры фрагментов образцов представлены ниже, в разделе «анализ статистики фрагментации».

Таблица 1.

Образцы, параметры и условия нагружения

Образец	Метод нагружения, название образца	Диаметр <d>, мм	Высота <h>, мм	Плотность ρ, кг/м ³	Масса образца <m>, г	
Кварцит, цилиндры	QSL, 0.047÷0.390 1/с, №1, №2, №4	26.70±0.01	21.60±0.01	2700	(30.28...31.80)±0.0001	
Кварцит, цилиндры	DL, 10 ³ 1/с, №3				31.3636±0.0001	
Песчаник, цилиндры	DL, 0.9×10 ³ ÷1.4×10 ³ 1/с: San1, San2, San3, San4	10.80±0.01	10.20±0.01	2057...2600	(1.82...2.58)±0.0001	
Песчаник, цилиндры	QSL, 8.3×10 ⁻⁶ м/с, 10 ⁻³ 1/с, San5, San6				1.9777±0.0001 2.0448±0.0001	
Песчаник, цилиндры	QSInd, №San5021 и №San4821	30.10±0.01	60.10±0.01	2057...2600	(90.52...102.56)±0.0001	
Андезит, цилиндры	QSL, 8.3×10 ⁻⁶ м/с, 10 ⁻³ 1/с	Mou1	11.06±0.01	11.79±0.01	2534	2.8712±0.0001
		Mou2	11.04±0.01	10.23±0.01	2528	2.4763±0.0001
Андезит, цилиндры	DL, 0.4×10 ³ ÷1.3×10 ³ 1/с	Mou3	11.05±0.01	11.24±0.01	2553	2.7522±0.0001
		Mou4	11.06±0.01	11.48±0.01	2563	2.8278±0.0001

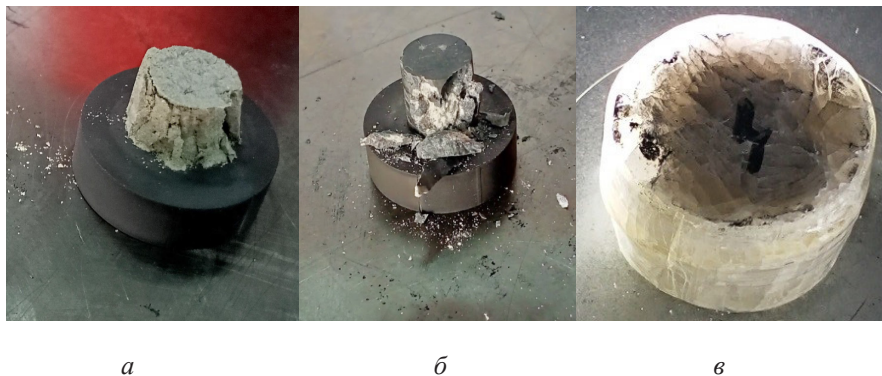


Рис. 1. Внешний вид образцов из песчаника (а), андезита (б) и кварцита (в) [24] после QSL



Рис. 2. Вид сверху «Сборки» с песчаником после испытаний – низкоскоростного индентирования [25]

Анализ статистики фрагментации

В работе проводился анализ статистики фрагментации образцов из природных материалов. В ходе исследований использовалась система лабораторных сит и электронные весы HR-202i с погрешностью измерения 0.0001 г. Фрагменты массой менее 0.01 г. анализировались с помощью «Метода фотографии» [30]. Часть фрагментов данного сита взвешивалась на весах, затем распределялась равномерно на подложке контрастного цвета и снималась цифровой камерой CANON 7D, 16.1 Мрiх. Используя разработанную для ЭВМ программу, определяли количество фрагментов известной массы. Массу фрагмента в этом случае определяли как среднюю массу. А количество всех фрагментов данного сита вычисляли пропорцией. Таким образом, были посчитаны фрагменты, включая фрагменты сита с размером ячейки 0.063 мм (в некоторых случаях до 0.05 мм). Для построения кумулятивного распределения фрагментов по массе $N(m_p)$ находилось количество фрагментов больше некоторого заданного. Затем анализировали кумулятивные распределения, находя подходящую аппроксимирующую функцию на соответствующих участках кривых распределения $N(m_p)$.

На рис. 3 приведена фотография с изображением формы фрагментов песчаника (Ботубинский горизонт), характерной для режима динамического нагружения (методом разрезного стержня Гопкинсона-Кольского, «РСГ-25»). Большая по массе часть фрагментов при просеивании через систему сит находилась на первом уровне с размером грани ячейки 2.5 мм. Фрагменты отличались по форме и размеру. Начиная с 5 сита (0.4 мм) форма фрагментов песчаника напоминала октаэдры. Кумулятивные распределения фрагментов по размерам (массе) представлены на рис. 4. На распределениях присутствует небольшой перегиб. Установлено, что с увеличением энергии нагружения точка перегиба смещается в сторону меньших масштабов (показано стрелкой). Степенная функция описывает полученные распределения с наилучшей достоверностью. Показатель степени в аппроксимирующих кривых увеличивается от (-0.88) до (-0.72) с увеличением приложенного напряжения до разрушения (с 46 МПа до 604 МПа), со значениями достоверности аппроксимации $R^2 \sim 0.95 \dots 0.99$.

На рис. 5, приведен пример разбора кумулятивного распределения $N(m_p)$ образца №San4. На нем отмечены линии

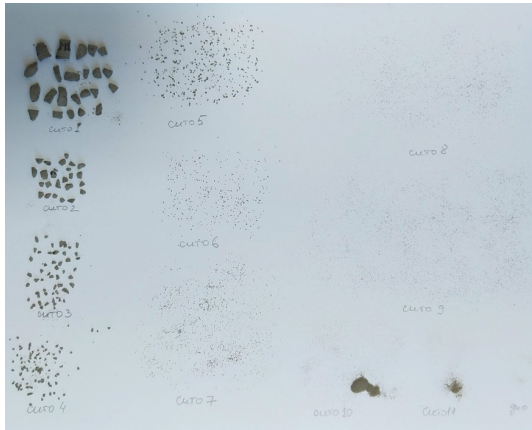


Рис. 3. Вид фрагментов образца San4, полученного в результате DL

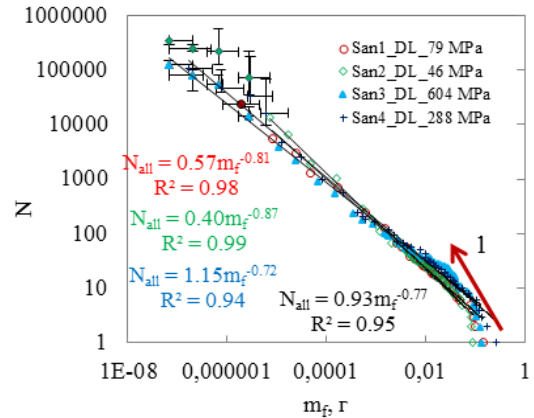


Рис. 4. Кумулятивные распределения фрагментов по массе для цилиндрических образцов из песчаника, полученные в условиях динамического нагружения методом «РСТ-25»

тренда, соответствующие каждому интересующему нас участку распределения с высокой достоверностью аппроксимации R^2 . Если анализировать распределения фрагментов по размеру только мелких фрагментов с массой $m_f < 0.03$ г, то они будут описываться с $R^2 \sim 0.96$ степенной функцией с показателем степени (-0.75) , рис. 5 а. Тогда как кумулятивное распределение крупных фрагментов по массе, соизмеримых по размеру с самим образцом – $m_f > 0.03$ г, описывается как логарифмической, так и экспоненциальной функцией $\sim \exp(-11.95m)$ с $R^2 \sim 0.96$. Рассмотрим ситуацию, когда мелкие фрагменты с массой $m_f < 0.01$ г, а крупные фрагменты массой большей 0.01 г., рис. 5 б. Здесь кумулятивные распределения фрагментов для тех и других с массой будут описываться с хорошей аппроксимацией степенными функциями с соответствующими показателями степени (-0.77) с $R^2 \sim 0.95$ для мелких и (-0.97) с $R^2 \sim 0.98$ для крупных.

Ниже, на рис. 6, приведены диаграммы значений процентного соотношения массы фрагментов по каждому сити от массы образца (рис. 6, а) и от всей массы

фрагментов образца (рис. 6, б). При больших значениях приложенной нагрузки наблюдаются более равномерные распределения по массе фрагментов на верхних ситах. Диаграммы кумулятивного распределения описываются степенными законами с коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 \sim 0.90 \dots 0.99$, показатель степени уменьшается $(-1.5, -1.6, -1.7, -2.2)$ с увеличением энергии нагружения (1.75; 2.3; 6.38; 8.3 Дж). Определено, что количество фрагментов образцов из песчаника в результате DL уменьшалось с увеличением энергии нагружения, что связано с возможной агрегацией составляющих образца (глины, кварцевых песчинок и т.д.).

Было предложено показать (см. на рис. 7), как изменился бы показатель A в степенных функциях $N(m_f) \sim (m_f)^A$, описывающих кумулятивное распределение всех фрагментов образцов песчаника, от напряжения σ с небольшим прогнозированием по аппроксимации от 0 до 1 ГПа. Несмотря на то, что полиномиальная функция описывает с достоверностью аппроксимации $R^2=1$, экспериментальных данных недостаточно для соответствующих выводов.

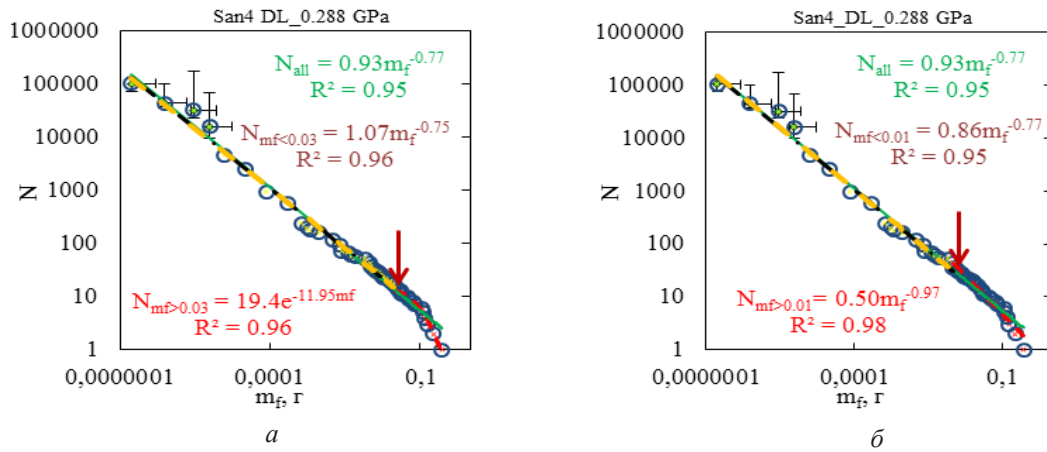


Рис. 5. Кумулятивное распределения фрагментов по массе для песчаника (San4), полученное в условиях динамического нагружения (DL). Анализ распределений для фрагментов массой больших и меньших 0.03 г (а) и 0.01 г (б)

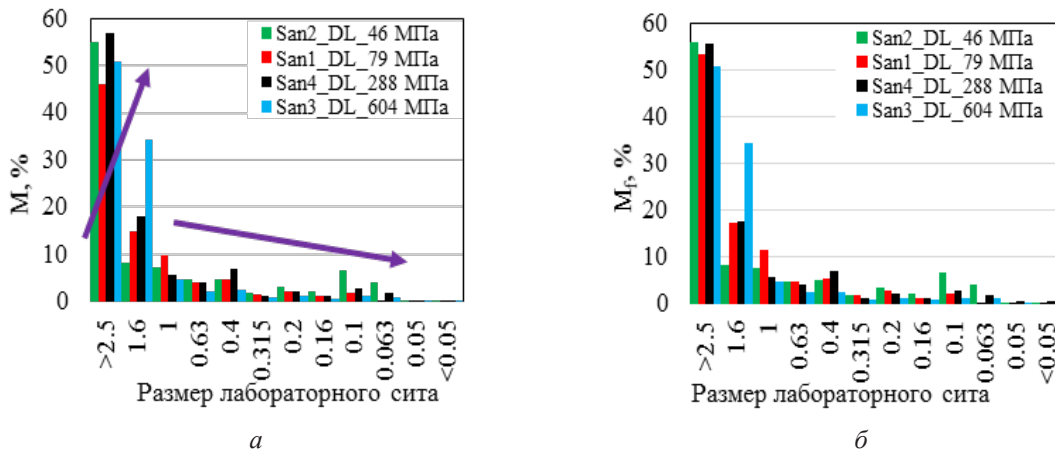


Рис. 6. Диаграмма изменения массы фрагментов песчаника в процентном соотношении от массы образца (а) и от массы всех фрагментов образца (б) по каждому сити. Динамическое нагружение

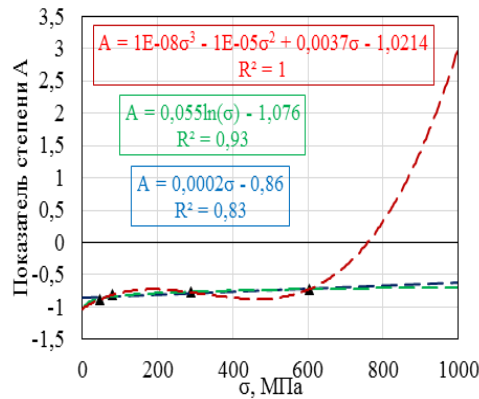


Рис. 7. Изменение значения показателя A в степенной функции от напряжения σ с прогнозированием по аппроксимации от 0 до 1 ГПа

Проанализируем статистику фрагментации цилиндрических образцов из песчаника (Ботубинский горизонт) и андезита (подножие г. Эльбрус, пос. Чегет) после квазистатического сжатия. Масса фрагментов составила не менее 98% от массы образца. Ниже приведены кумулятивные распределения фрагментов по массе $N(m_f)$ для песчаника после QSL (рис. 8). Перегиб распределений смещается в сторону меньших масштабов. Все распределение можно аппроксимировать одной степенной функцией с высокой достоверностью R^2 . Рассмотрев по отдельности фрагменты с массой большей и меньшей 0.01 г, убеждаемся, что кумулятивные распределения $N(m_f)$ хорошо опи-

сываются степенной функцией. Ситуация меняется, если рассматривать фрагменты с массой большей-меньшей 0.03 г, когда размер фрагментов соизмерим с размером образца (сито с размером 2.5 мм). Фрагменты песчаника с $m_f < 0.03$ г можно описать степенной функцией с $R^2 \sim 0.99$, а с $m_f > 0.03$ г – логарифмической с $R^2 \sim 0.95$ (или степенной, но с $R^2 \sim 0.88$). То есть достоверность аппроксимации снижается при описании степенными функциями при увеличении границы по массе (большой-маленький). На фотографиях ниже (рис. 9) показана характерная форма фрагментов образцов из песчаника (рис. 9, а), андезита (рис. 9, б), полученных в результате квазистатического нагружения.

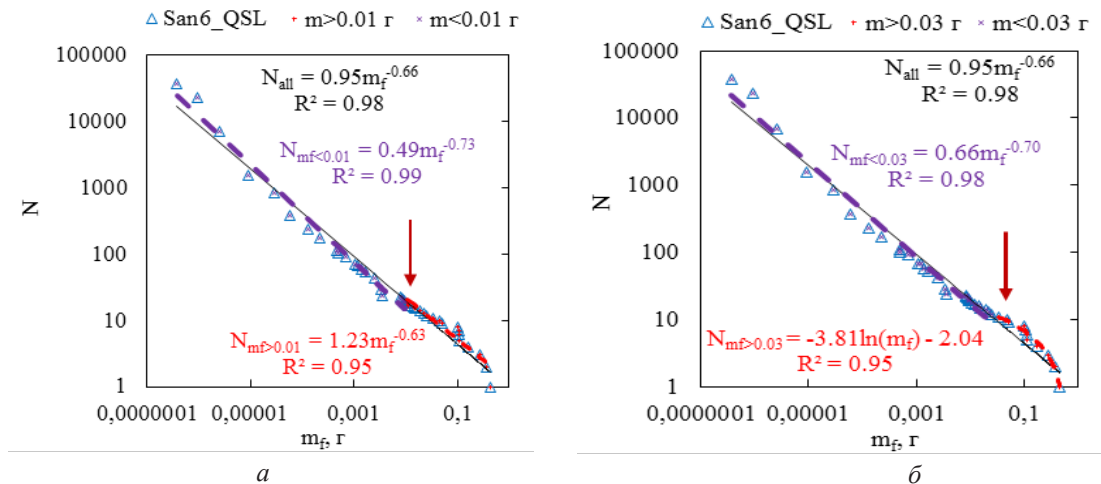


Рис. 8. Кумулятивные распределения фрагментов по массе для образцов из песчаника (San6), полученные в условиях квазистатического нагружения QSL

На рис. 10, приведены кумулятивные распределения фрагментов по массе для андезита, полученные в условиях квазистатического сжатия. Анализировали фрагменты с массой большей-меньшей 0.01 г (рис. 10, а) и большей-меньшей 0.03 г (рис. 10, б). Последние, с $m_f > 0.03$ г, были по размеру соизмеримы с высотой цилиндрического образца (см. рис. 9, сито с размером ячейки 2.5 мм). На

примере образца №Mou1, показано, что в обоих случаях распределения мелких и крупных фрагментов по массе описываются степенными функциями. Кроме того, кумулятивное распределение по массе для всех фрагментов образцов из андезита $N(m_f)$, можно описать одной степенной функцией с большой достоверностью аппроксимации $R^2 = 0.99$. (см. ниже, рис. 10).



Рис. 9. Фотографии крупных (на верхних ситах) фрагментов образца песчаника №San6 (а) и андезита №Mou1 (б) после квазистатического нагружения

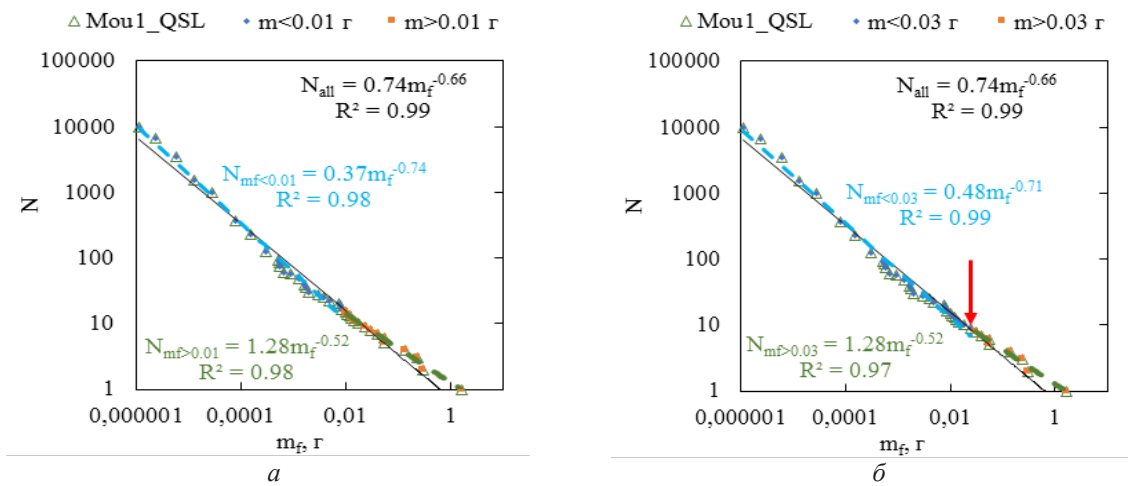


Рис. 10. Кумулятивное распределение фрагментов по массе для образцов из андезита (Mou1). Квазистатическое нагружение

Фрагменты цилиндрических на фотографиях, см. рис. 11. Масса всех образцов из андезита после фрагментов от массы образца составляла динамического нагружения приведены до 99%.

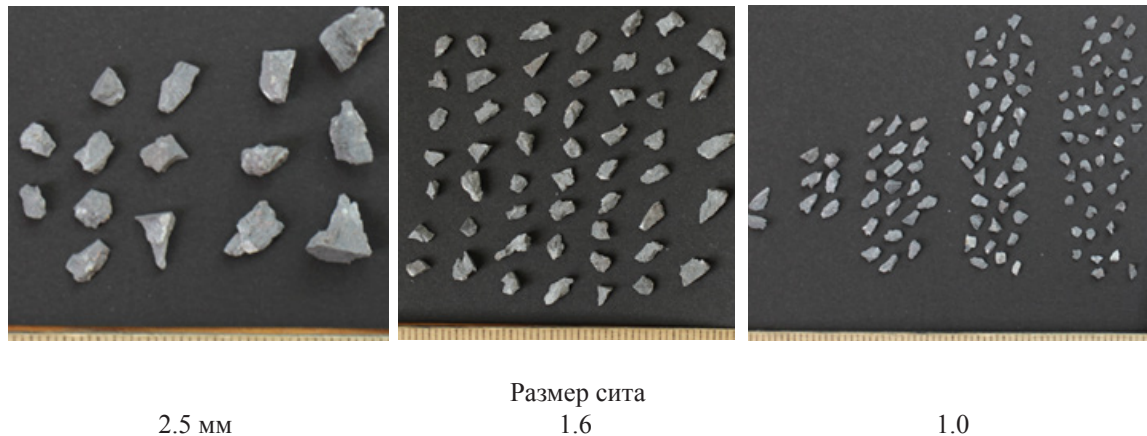


Рис. 11. Фотографии крупных (на верхних ситах) фрагментов образца №МоU4 после динамического нагружения, скорость ударника (Steel) $c_{yo} \sim 20.8$ м/с. На каждом рисунке шкала, где между рисками 1 мм

Кумулятивные распределения фрагментов по массе представлены на рис. 12. Наблюдаем область незначительного перегиба в распределении $N(m_f)$, что говорит о наличии одного механизма формирования фрагментов в условии динамического нагружения. Приведен разбор распределения $N(m_f)$ на примере образца №МоU4, когда масса крупных фрагментов была больше 0.01 г (верхняя точка области перегиба, рис. 12, а) и больше 0.03 г (соизмеримы с размером образца, рис. 12, б). В первом случае, когда распределения больших фрагментов (>0.01 г) описываются степенной функцией с показателем степени (-1.17) и с $R^2 \sim 0.99$, и распределения фрагментов с массой $m_f < 0.01$ г – степенной функцией с показателем степени (-0.72) и с $R^2 \sim 0.95$. Во втором случае, когда крупные фрагменты (>0.03 г) – степенной функцией с показателем степени (-1.15) с $R^2 \sim 0.93$ (аппроксимация экспоненциальными или логарифмическими функциями с низким R^2), мелкие фрагменты с $m_f < 0.03$ г описываются степенной функцией с показателем степени (-0.75). Также все распределение можно аппроксимировать одной подходящей степенной функцией, но с небольшим $R^2 \sim 0.93$. После квазистатического индентирования образцов из песчаника

(ООО «Нефтеком», Чайядинского НГКМ скважины №1062 ствол 2) был проведен анализ образовавшихся фрагментов (рис. 13), являющихся небольшим остатком от массы всего образца, основная часть которого осталась зацементированной в металлическом каркасе (см. рис. 2).

Статистический анализ фрагментов проведен на примере двух образцов из песчаника 33450-20 (№San5020) и №33448-21 (№San4821). Кумулятивные распределения содержат фрагменты без основной массы образца (рис. 14). На кумулятивных распределениях $N(m_f)$ наблюдается сильный перегиб в виде вытянутой горизонтальной полочки с загибом вверх и вниз (рис. 14). В нашем случае (см. рис. 14), все распределение также плохо описывается одной степенной функцией (достоверность аппроксимации составляла $R^2 \sim 0.86 \dots 0.89$). Линейный участок (в основном, маленькие фрагменты) на распределениях описывается степенной функцией с показателем степени (-1.64...-1.76) с R^2 не выше 0.98. Крупные фрагменты ($m_f > 0.01$ г) описываются экспоненциальным ($\sim \exp(-5.37m_f)$) либо логарифмическим законами с $R^2 \sim 0.94$. На рис. 15. представлены кумулятивные распределения для квазистатических и динамических испытаний

песчаника и андезита. Одинаковые типы нагружения для различных материалов демонстрируют подобный вид кумуля-

тивных распределений фрагментов по массе, и положение точки перегиба зависит только от энергии нагружения.

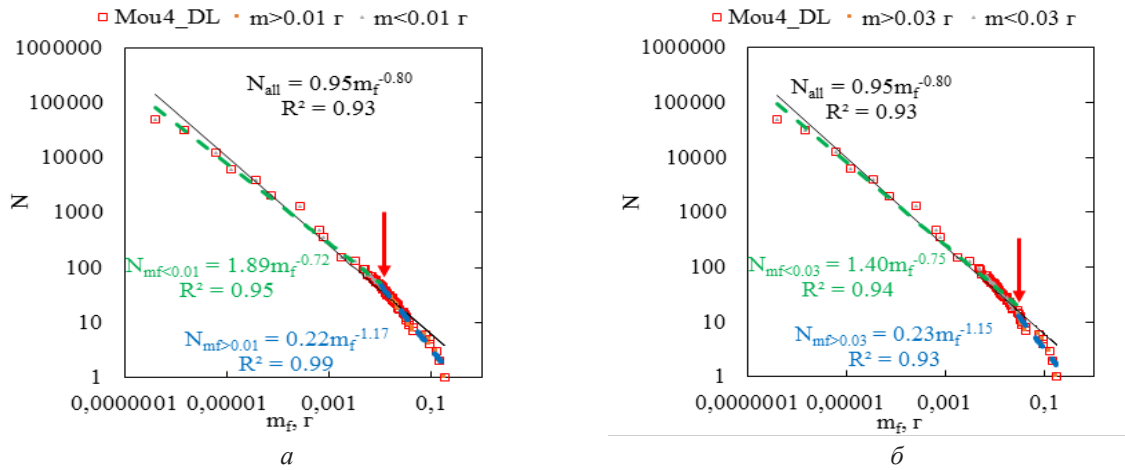


Рис. 12. Кумулятивное распределение фрагментов по массе для образцов из андезита (Mou4).
Динамическое нагружение

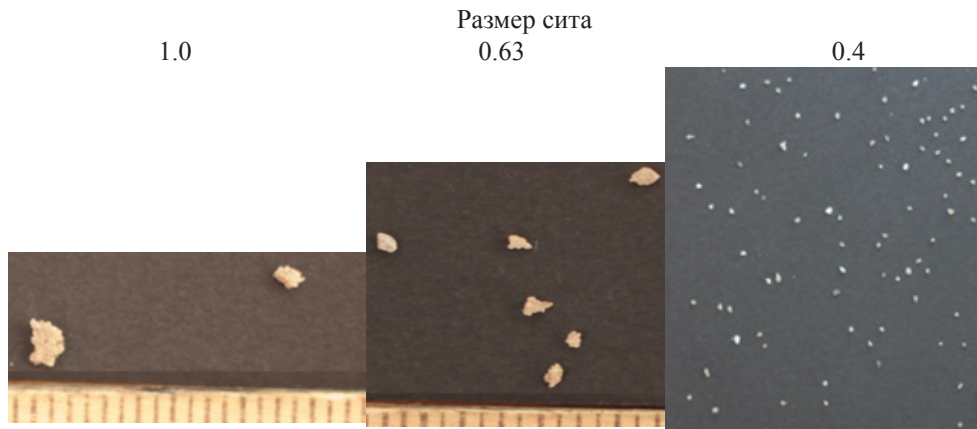


Рис. 13. Фотографии крупных (на верхних ситах) фрагментов образца из песчаника №San4821 после индентирования. На каждом рисунке шкала между рисками 1 мм

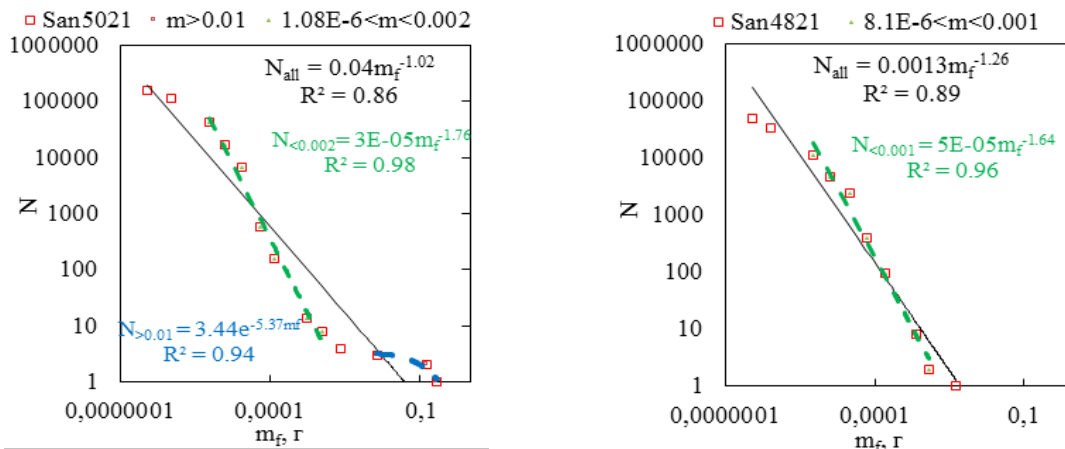


Рис. 14. Кумулятивное распределение фрагментов образца №San5021 и №San4821.
Отсутствует самый крупный фрагмент

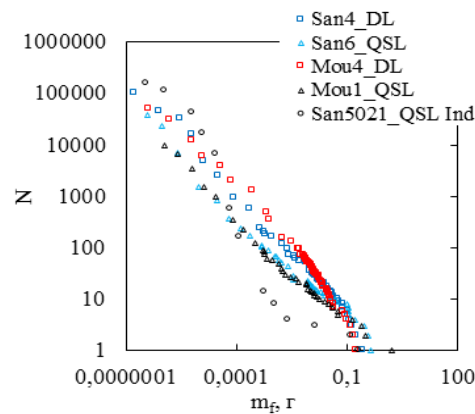


Рис. 15. Кумулятивные распределения горной породы (песчаника и каменистой горной породы), полученные в условиях квазистатического (Δ) и динамического нагружения (\square) и квазистатического индентирования (\circ). Обобщение результатов

Ниже приведены результаты анализа статистики фрагментации еще одной горной породы – кварцита (месторождение Уганда, Африка) в условиях квазистати-

ческого и динамического нагружения. На рис. 16 приведены изображения формы фрагментов образцов из кварцита, полученных в квазистатических условиях.



Рис. 16. Вид фрагментов, полученных в результате QSL кварцита (№2)

Кумулятивные распределения по массе фрагментов кварцитовых образцов, полученные в условиях квазистатического нагружения, имели два наклона (рис. 17). Их можно описать двумя степенными законами (рис. 17, а) либо одной степенной функцией (рис. 17, б) с достоверностью

аппроксимации $\sim 0.95 \dots 0.99$. Кумулятивные распределения фрагментов с массой, большей 0.01 г, в степенном показателе степени отличался (-1.33...-1.42). Изменение в значениях показателя степени (s - 0.69 до - 0.88...-0.91) аппроксимирующего закона кумулятивных распреде-

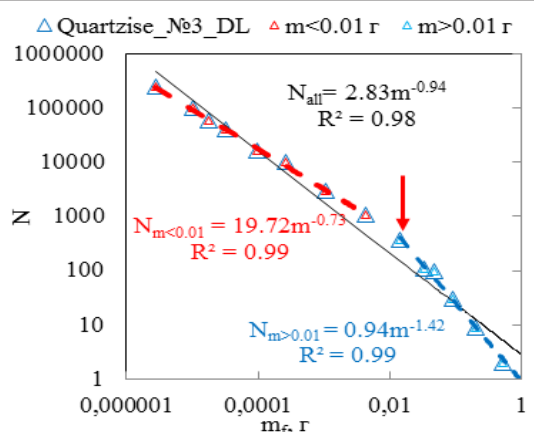


Рис. 19. Кумулятивное распределение фрагментов по массе в условиях динамического нагружения кварцита (№3). Разбор распределений по массе большей-меньшей 0.01 г

На кумулятивном распределении фрагментов кварцитового образца по массе (рис. 19) наблюдается перегиб.

$N(m_f)$ хорошо описывалось как одной степенной функцией с $R^2 \sim 0.98$ с показателем степени равной (-0.94), так и двумя степенными законами с показателем степени (-1.42) для фрагментов массой $m_f > 0.01$ и с показателем степени (-0.73) для $m_f < 0.01$ г.

Обсуждение результатов

Обобщая результаты полученных данных по песчанику, андезиту и кварциту, можно сделать следующие выводы. С увеличением энергии нагружения перегиб в кумулятивных распределениях $N(m_f)$ смещается в сторону меньших масштабов. Наблюдается видоизменение перегиба к незначительному наклону при переходе от анализа данных, полученных при низких (QSL), к анализу данных, полученных при более высоких скоростях нагружения (DL). При рассмотрении кумулятивных распределений фрагментов по массе больших-меньших 0.01 г (0.03 г) с высокой достоверностью аппроксимации (0.96...0.99) можно описать двумя степенными функциями (степенной и экспоненциальной/логарифмической) в условиях QSL и DL. Показано, что с увеличением энергии нагружения (QSL) в

степенных функциях, описывающих распределения $N(m_f)$ больших фрагментов ($m_f > 0.01$ г) образцов из кварцита, наблюдается изменение показателя степени в интервале (-1.33...-1.42), а в степенных функциях, которые описывают распределения мелких фрагментов ($m_f < 0.01$ г), показатель степени \sim (-0.69...-0.91). Для песчаника после QSL $N(m_f)$ для фрагментов с массой $m_f > 0.01$ г показатель степени (-0.63) и с массой (< 0.01 г) показатель степени – (-0.73). Для песчаника после DL для фрагментов с $m_f < 0.01$ г значение показателя степени увеличивается с ростом скорости деформации $0.8 \times 10^3 \dots 1.4 \times 10^3$ 1/с – с (-0.93) до (-0.74), а распределения больших фрагментов по массе (> 0.01 г) одинаково хорошо описываются экспоненциальной, логарифмической или степенной функциями и при рассмотрении $N(m_f)$ по массе большей 0.03 г аппроксимируются экспоненциальной или логарифмической функциями. Для кварцита после DL кумулятивные распределения $N(m_f)$ небольших и крупных фрагментов по массе хорошо описываются степенными функциями с разными показателями. То есть, анализ статистики фрагментации кварцита показал схожее описание кумулятивных распределений при любых условиях нагружения. Анализ статистики фрагментации

андезита как после QSL, так и после DL показал, что крупные и мелкие фрагменты также хорошо описываются степенными функциями. Кумулятивные распределения фрагментов по массе для образцов из песчаника после квазистатического индентирования (в условиях всестороннего сжатия) описываются степенными законами (с показателем степени $\sim (-1.76... - 1.64)$) для малых фрагментов, и экспоненциальными законами ($\sim \exp(-5.37m_r)$) описывается куммулятивное распределение больших фрагментов. На

таких кумулятивных распределениях наблюдается вытянутая область перегиба при переходе от одной статистики к другой, возможно, связанная с переходом материала к состоянию самоорганизованной критичности. Похожий вид распределений (рис. 14) наблюдался на кумулятивных распределениях, полученных на цилиндрических образцах из керамик (композитов) на основе оксида алюминия плазменного напыления [33] и на основе силицированного графита [34] в условиях динамического индентирования,

Таблица 2.

Соотношение аппроксимаций кумулятивных распределений $N(m_r)$ и массы фрагментов в условиях динамического, квазистатического нагружений и квазистатического индентирования

Условие/ Образец	$m_r > 0.01$	$m_r < 0.01$	$m_r > 0.03$	$m_r < 0.03$	Все фрагменты
QSL, песчаник	Степенной закон, степень (- 0.63)	Степенной закон, степень (- 0.73)	Логарифмический закон (3.81Ln(m)-2.04)	Степенной закон, степень (- 0.70)	Степенной закон, степень (- 0.66)
QSL, андезит	Степенной закон, степень (- 0.52)	Степенной закон, степень (- 0.74)	Степенной закон, степень (- 0.55)	Степенной закон, степень (- 0.71)	Степенной закон, степень (- 0.66)
QSL, кварцит	Степенной закон, степень (- 1.42...-1.33)	Степенной закон, степень (- 0.91...-0.69)			Степенной закон, степень (- 1.02)
DL, песчаник	Степенной закон с показателем степени (- 0.97), или «exp» закон, или «log»	Степенной закон, степень (-0.74...-0.93)	Экспоненциальный закон $\exp(-11.95m)$	Степенной закон, степень (- 0.75)	Степенной закон, степень (-0.87...- 0.72) при σ (46...604 МПа)
DL, андезит	Степенной закон, степень (- 1.17)	Степенной закон, степень (- 0.72)	Степенной закон, степень (- 1.15)	Степенной закон, степень (- 0.75)	Степенной закон, степень (- 0.80)
DL, кварцит	Степенной закон, степень (- 1.42)	Степенной закон, степень (- 0.73)			Степенной закон, степень (- 0.94)
QSL_Ind, песчаник	Экспоненциальный закон $\exp(-5.37m)$	Степенной закон, (- 1.76...-1.64)			Степенной закон, степень (- 1.02)

реализованного на «РСГ-25». Все данные проанализированных кумулятивных распределений по массе отражены в таблице 2.

По результатам анализа данных фрагментации природных материалов можно сделать вывод, что на формирование количества фрагментов N_m данной массы m_f оказывают влияние следующие определяющие условия. Во-первых, в каждой серии экспериментов условия нагружения (напряжение – σ , Па.). Вторым аспектом выступают свойства материала (пористость, плотность ρ , кг/м³). Третьим являются геометрические параметры образца, в нашем случае – это площадь поверхности, которая подвергалась нагружению (площадь основания цилиндрических и кубических образцов, площадь внутренней поверхности трубок – S , м²). Предполагая, что закон формирования фрагментов может являться автомодельным, распределения фрагментов массой можно записать в нормированных или безразмерных координатах

в виде одной функции, как это сделали в своих работах авторы [4, 15].

При нормировании количества фрагментов N_m массой m_f использовали общее количество фрагментов образца после разрушения. Так как минимальная погрешность определения массы достигалась на ситах с размером сетки 0.063Н, то за общее количество фрагментов брали сумму фрагментов до этого сита, обозначив их за $N_{>0.063}$. С учетом вышеизложенного, кумулятивные распределения по массе $N(m_f)$ можно представить в нормированных координатах $N^*(m^*)$:

$$N^* = \left(\frac{N_m}{N_{>0.063}} \right) \left(\frac{p_0}{\sigma_{max}} \right),$$

$$m^* = \frac{m_f S^{1.5}}{\rho},$$

где σ_{max} – максимальное напряжение до разрушения, p_0 – атмосферное давление при нормальных условиях, 100300 Па. Ниже приведена диаграмма в безразмерных координатах $N^*(m^*)$ (рис. 20) для образцов песчаника и кварцита в разных условиях нагружения. Данные легли под

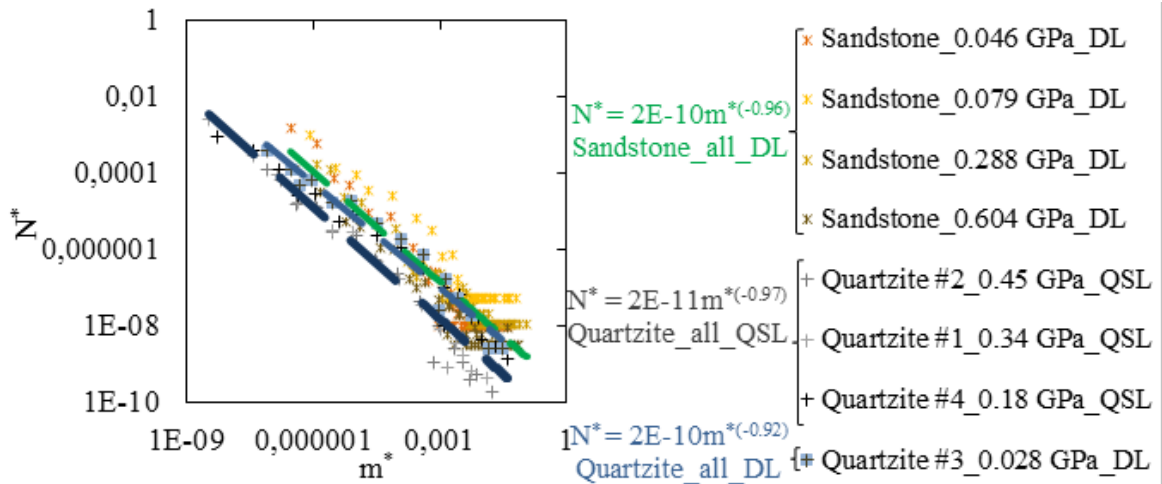


Рис. 20. Распределение количества фрагментов по массе в нормированных (безразмерных) координатах. Log-Log оси

определенным углом к оси абсцисс, сместив все значения в одну область.

На рис. 21 приведены результаты работы в сопоставлении с другими материалами (полые цилиндры из оксида

алюминия, цилиндры из кварца), полученными ранее при разных условиях нагружения в Лаборатории физических основ прочности, ИМСС УрО РАН, Пермь.

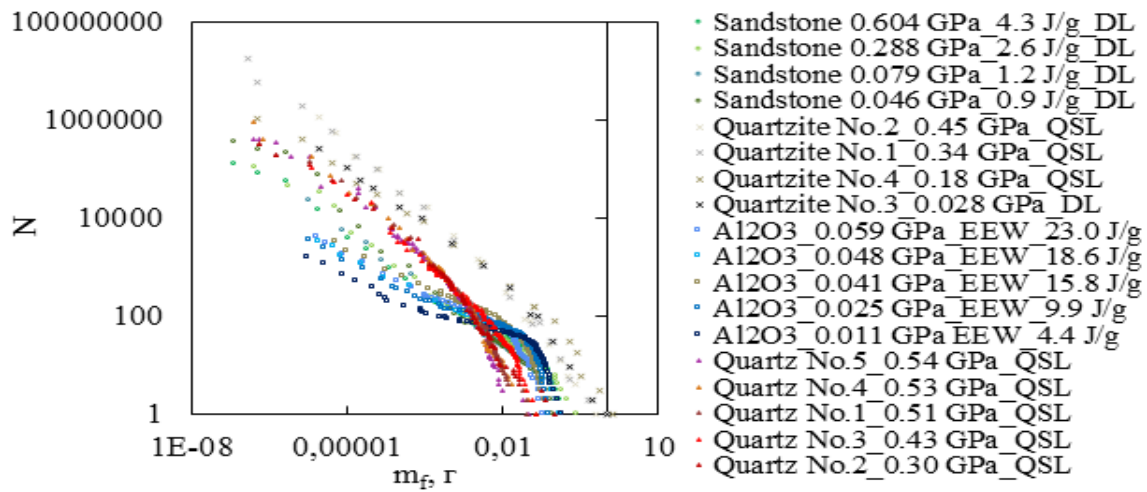


Рис. 21. Кумулятивные распределения фрагментов по массе для керамики [11] и природных материалов [24, 31], полученные при различных условиях нагружения. Log-Log оси

На рис. 22 данные кумулятивных функций представлены в нормированных координатах $N^*(m^*)$. Как видим, все данные сместились в одну область, что гово-

рит о наличии предполагаемой «автомодельности» в формировании фрагментов любой формы, типа материалов и условий нагружения.

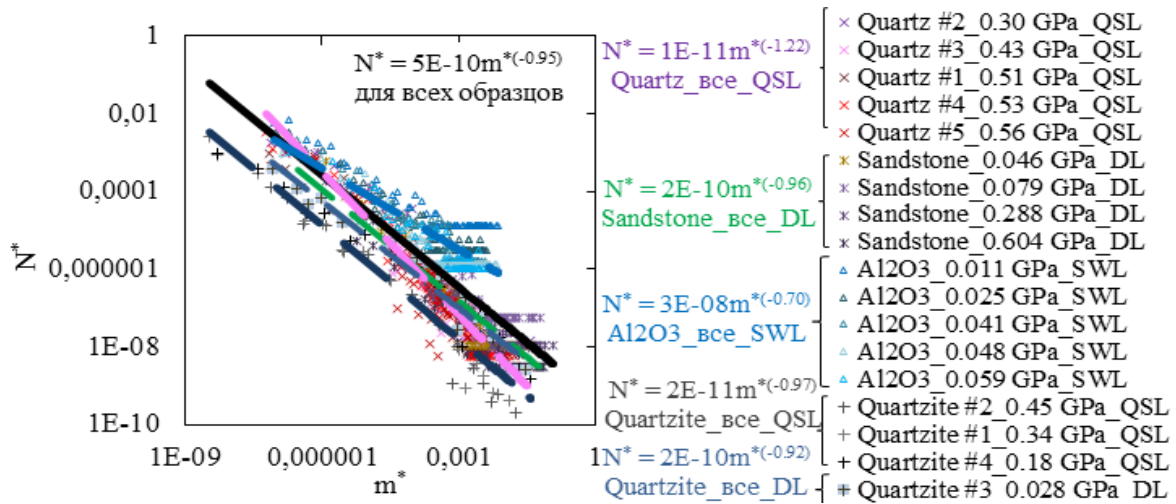


Рис. 22. Распределение количества фрагментов по массе в нормированных (безразмерных координатах). Логарифмические оси

Выводы

Проведены испытания образцов из природных материалов (кварцит, песчаник и андезит) под действием динамического (DL) и квазистатического (QSL) сжатия и квазистатического индентирования (QSInd) (песчаник при всестороннем сжатии) в условиях сохранения фрагментов. Проведен анализ статистики фрагментации образцов с использовани-

ем метода «взвешивания» и «фотографии», что позволило построить кумулятивные распределения фрагментов по массе с высокой достоверностью аппроксимации и с минимальной погрешностью измерения.

Для всех образцов полученные кумулятивные распределения фрагментов по массе в условиях QSL и DL имеют два наклона. С большой достоверно-

стью аппроксимации ($R^2 \sim 0.97 \dots 0.99$) их можно описать одной степенной функцией. В условиях QSL наблюдается более выраженный перегиб в распределениях $N(m_f)$, чем перегиб, полученный в условиях DL, как для андезита, так и для песчаника, и для кварцита. Распределения $N(m_f)$, полученные в условиях DL лежат выше тех, что получены при QSL. Точка перегиба смещается в сторону меньших масштабов с увеличением энергии нагружения. В случае квазистатического индентирования песчаника кумулятивные распределения имеют вытянутые «ступеньки», связанные с затяжным переходом от одиночных трещин к неполной фрагментации (основная часть образца осталась внутри обоймы). Перегиб в полученных кумулятивных распределениях связывается с влиянием механизма разрушения при иницировании одного очага разрушения (по типу «горного удара»). Разрушение образцов при квазистатическом нагружении происходило в основном в две стадии: накопление повреждений, появление множества магистральных трещин и последующее полное разрушение [22]. В случае динамического нагружения, при достаточном значении энер-

гии деформации, происходило полное разрушение образца, причем разрушение сопровождалось отрывом образовавшихся фрагментов. Статистические распределения фрагментов в диапазоне меньших масштабов (масс фрагментов), близкие к степенным распределениям, отражают «самоподдерживающийся» тип разрушения при достижении предельной плотности энергии в объеме образца и отражают автомодельный характер развития разрушения в широком диапазоне масштабов.

Экспериментальное исследование фрагментации позволило выявить качественные изменения статистики фрагментации для ряда горных пород в зависимости от интенсивности нагрузки ($10^{-3} \div 10^3$ 1/с). Наблюдается сходство статистики фрагментации по степенному закону и асимптотических режимов разрушения с множественными разрывами, по сценарию хрупкого разрушения.

Авторы благодарят С.В. Уварова, В.В. Чудинова и М.В. Банникова за помощь в проведении эксперимента и О.Б. Наймарка, М.В. Банникова за обсуждение результатов.

Библиографический список

1. *Meibom A., Balslev I.* Composite power laws in shock fragmentation // *Physical Review Letters*. – 1996. – V. 76. – No.14. – P. 2492–2494. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.2492>
2. *Chen W., Ravichandran G.* Dynamic compressive failure of glass ceramic under lateral confinement // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 1997. – V. 45. – No.8. – P. 1303–1328. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(97\)00006-9](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(97)00006-9)
3. *Katsuragi H., Sugino D. and Honjo H.* Scaling of impact fragmentation near the critical point // *Physical Review E*. – 2003. – V. 68. – No.4. – P. 046105(1–6). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.68.046105>
4. *Katsuragi H., Ihara S., Honjo H.* Explosive fragmentation of a thin ceramic tube using pulsed power // *Physical Review Letters*. – 2005. – V. 95. – No.9. – P. 095503(1–4). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.095503>
5. *Grady D.* Fragmentation of rings and shells – Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2006. Printed in Germany. – 374 pp.
6. *Davydova M.M., Uvarov S.V., Naimark O.B.* Space-time scale invariance in dynamically fragmented quasi-brittle materials // *Physical Mesomechanics*. – 2016. – V.19. – No.1. – P. 86-92. <https://doi.org/10.1134/S1029959916010094>
7. *Mott N.F.* A theory of the fragmentation of shells and Bombs // *Ministry of Supply*. Part 3. – 1943. – No. A.C.4035. – P. 1–51. https://doi.org/10.1007/978-3-540-27145-1_11

8. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И. Экспериментальное изучение дробления металлических колец // Проблемы Прочности. – 1984. – №8. – С. 108–110.
9. Wittel F.K., Kun F., Herrmann H.J., Kröplin B.H. Fragmentation of shells // Physical Review Letters. – 2004. – V. 93. – No.3. – P. 035504(1–4). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.035504>
10. Bannikova I.A., Uvarov S.V., Naimark O.B. Experimental research of self-regularities of ceramics fracture under shock wave loading. PNRPU Mechanics Bulletin. – 2015. – No. 3. – P. 25-37. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.3.03>
11. Банникова И.А. Автомодельные закономерности деформирования и разрушения сплошных сред при интенсивных воздействиях / Дисс. канд. физ.-мат. наук: 01.02.04. – Томск, ТГУ, 2017. – 168 с.
12. Ching Emily S.C., Lui S.L., Ke-Qing Xia. Energy dependence of impact fragmentation of long. Glass rods // Physical A. – 2000. – V. 287 – P. 83–90. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(00\)00446-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(00)00446-5)
13. Gladden J.R., Handzy N.Z., Belmonte A., Villermaux E. Dynamic buckling and fragmentation in brittle rods // Physical Review Letters. – 2005. – V. 94. – P. 035503(1–4). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.035503>
14. Bannikova I.A., Uvarov S.V. Experimental study of fragmentation of fused quartz cylinders under quasi-static loading with the fractoluminescence recording // Proc. Struct. Int.. – 2021. – V. 32. – P. 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.003>
15. Katsuragi H., Sugino D., Honjo H. Crossover of weighted mean fragment mass scaling in two-dimensional brittle fragmentation // Physical Review E. – 2004. – V. 70. – No.62. – P. 065103(1–4). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.065103>
16. Grady D.E. Impact breach and fragmentation of glass plate // International Journal of Impact Engineering. – 2011. – V. 38. – Is.6. – P. 446–450. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.10.015>
17. Greiner W., Stöcker H. Hot nuclear matter // Scientific American. – 1985. – V. 252. – No.1. – P. 76–87.
18. Grady D.E. Length scales and size distributions in dynamic fragmentation // International Journal of Fracture. – 2010. – V. 163. – P. 85–99. <https://doi.org/10.1007/s10704-009-9418-4>
19. Naimark O.B. Defect induced transitions as mechanisms of plasticity and failure in multifield continua // In: Advances in Multifield Theories of Continua with Substructure / Ed. G. Capriz and P. Mariano, Birkhäuser, Boston. – 2004. – P. 75–114.
20. Kurdyumov S.P. Evolution and self-organization laws of complex systems // International Journal of Modern Physics. – 1990. – V. 1(4). – P. 299–327. <https://doi.org/10.1142/S0129183190000177>
21. Lyapunova E.A., Davydova M.M., Zaitzev D.V., Panfilov P.E. Statistical regularities of alumina fragmentation under uniaxial compression at room and liquid nitrogen temperatures // AIP Conference Proceedings – 2016. – No.1785. – P. 040033. <https://doi.org/10.1063/1.4967090>
22. Naimark O.B., Uvarov S.V., Davydova M.M., Bannikova I.A. Multiscale statistical laws of dynamic fragmentation // Physical Mesomechanics. – 2017. – Vol. 20, No.1. – P. 90-101. <https://doi.org/10.1134/S1029959917010088>
23. Astrom J.A., Linna R.P., Timonen J. Exponential and power-law mass distributions in brittle fragmentation // Physical Review E. – 2004. – Vol. 70. – P. 026104(1–7). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.026104>
24. Bannikova I.A., Uvarov S.V. Scaling laws in fragmentation dynamics of rock materials // Proc. Struct. Int. – 2021. – V. 33. – P. 357–364. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.043>
25. Наймарк О.Б., Аглетдинов Э.А., Банников М.В., Баяндин Ю.В., Бурмистров Е.В., Лукин С.В., Никитюк А.С., Овчаренко Ю.В., Уваров С.В., Чудинов В.В. Механизмы разрушения горных пород в условиях множественных метастабильных состояний, индуцированных дефектами // Физика металлов и металловедение. – 2022. – Т. 123. – №12. – С. 1362-1370. <https://doi.org/10.31857/S0015323022600988>
26. Zaiser M. Scale invariance in plastic flow of crystalline solids // Advances in Physics. – 2006. – V. 55. – P. 185–245. <https://doi.org/10.1080/00018730600583514>
27. Bouchaud E. Scaling properties of cracks // J. Phys. Condens. Matter. – 1997. – V. 9. – No.21. – P. 4319– 4344. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/9/21/002>
 Oborin V.A., Bayandin Y.V., Bilalov D.A., Sokovikov M.A., Chudinov V.V., Naimark O.B. Self-Similar Patterns of Damage Development and Reliability Assessment of AMg6 and D16T Aluminum Alloys under Consecutive Dynamic and Gigacycle Loading // Physical Mesomechanics. – 2019. – V. 22. – No. 2. – P. 141-151. <https://doi.org/10.1134/S1029959919020048>

28. Оборин В.А., Банников М.В., Баяндин Ю.В., Соколов М.А., Бидалов Д.А., Наймарк О.Б. Фрактальный анализ поверхности разрушения сплава АМг6 при усталостном и динамическом нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – №2. – С. 116–126. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.2.07>
29. Банникова И.А. «Метод фотографии» как инструмент исследования фрагментации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83. – №5. – С. 42–44.
30. Bannikova, I., Uvarov, S. Experimental study of fragmentation of fused quartz cylinders under quasi-static loading with the fractoluminescence recording // Procedia Structural Integrity. – 2021. – V. 32. – P. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.003>
31. Банникова И.А., Савельева Н.В., Банников М.В., Чудинов В.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Статистические закономерности разрушения и фрагментации горных пород при квазистатическом и динамическом воздействии // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2023: материалы XII Всероссийской научной конференции с международным участием. – Томск: ТГУ, 2023. – С. 19–22.
32. Bannikova I.A., Saveleva N.V., Uvarov S.V., Bannikov M.V., Panfilov P.E., Naimark O.B. Investigation of plasma spray ceramic fragmentation statistics in a wide range of strain rates // Russian Physics Journal. – 2023. – V.66. – No.9. – P. 990–997. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-03034-8>
33. Uvarov S.V., Bannikova I.A., Naimark O.B., Gareev A.R. Dynamic indentation and low velocity impact of siliconized graphite // XXXIX Fortov International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2024) (<http://www.ihed.ras.ru/elbrus24/program/restore.php?id=200>).

INVESTIGATION OF FRAGMENTATION STATISTICS OF NATURAL MATERIALS IN LABORATORY CONDITIONS

Bannikova I.A., Saveleva N.V.

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

For citation:

Bannikova I.A., Saveleva N.V. Investigation of fragmentation statistics of natural materials in laboratory conditions // Perm Federal Research Center Journal. – 2024. – No 4. – P. 18–38. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.4.2>

The results of study of the behavior of natural materials (quartzite, sandstone, andesite) under quasi-static, dynamic loading and low-speed indentation (10^{-3} – 10^3 1/s) are presented. The experimental conditions made it possible to preserve fragmented samples and to analyze the statistics of the preserved fragments by size (mass). During the research, a system of laboratory sieve and an HR-202i electronic scales with a measurement error of 0.0001 g were used. The method of processing fragment photographs allowed us to establish the number and mass of fragments on sieves with cell sizes up to 0.063–0.05 mm, not less than 99% of the sample weight and minimize measurement error. The obtained cumulative distributions of fragments by mass $N(m_i)$ show a change in the shape of the inflection and a shift of the inflection point toward smaller scales with increasing strain rate. The data analysis reflects the similarity of the statistics of fragmentation according to the power law and asymptotic fracture modes with multiple ruptures obtained according to the brittle fracture scenario. It is shown that specimens fracture occurs according to different scenarios depending on loading conditions and is associated with a change in the rate of transition from one stage of crack appearance (or accumulation of stress states, defective structure) to another (crack formation and complete fragmentation). It has been found that the formation of fragments is of an “automodel” nature.

Keywords: fragmentation statistical analysis, quartzite, sandstone, andesite.

Сведения об авторах

Банникова Ирина Анатольевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614018 г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: malgacheva@icmm.ru

Савельева Наталья Владимировна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: saveleva@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 30.10.2024 г.