

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХРУПКИХ ТЕЛ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА СЖАТИЕ¹

© 2006 А.В. Ключанов²

Настоящая статья посвящена исследованию механических характеристик хрупких тел (образцов из аммиачной селитры) при испытании на сжатие. В работе экспериментально определены критические значения величин, характеризующие разрушение образцов (предельные сжимающие напряжения и деформации), а также модуль Юнга. Установлен характер разрушения образцов и проведена статистическая обработка полученных экспериментальных данных.

Введение

Во многих отраслях промышленности переработка материалов является неотъемлемой составляющей технологического процесса, так как позволяет значительно интенсифицировать такие процессы как растворение, эстрагирование, обжиг, химическое взаимодействие и др. Известно, что переработка материалов — одна из наиболее дорогостоящих и энергоемких операций. При этом расход энергии на переработку в значительной степени зависит от механических характеристик обрабатываемых тел [1, 2]. Поэтому установление действительных механических свойств материалов при разработке технических средств для их разрушения является первоочередной задачей. В зависимости от принципа действия и назначения применяются следующие способы разрушающего воздействия: взрывные, термические, гидравлические, электромагнитные, ультразвуковые, струйные и др. Однако на ближайшее десятилетие главными, по-видимому, останутся механические, вибрационные и пневматические способы. Возрастающая потребность в устройствах для дробления хрупких тел обуславливается тем, что рост производства гранулированных материалов значительно опережает имеющиеся технические возможности в области хранения и переработке таких материалов [3].

При построении математической модели разрушения, учитывающей также и экспериментальные данные, могут быть получены действительно достоверные результаты (напряжения, деформации, характеристики разрушения), поскольку именно в эксперименте исследователь осуществляет непосредственный контакт с объектом исследования. При этом адекватность математической модели разрушения определяется точностью проводимых исследований, что зависит от чувстви-

¹Представлена доктором физико-математических наук профессором Ю.Н. Радаевым

²Ключанов Алексей Васильевич, кафедра управление грузовой и коммерческой работы Самарской государственной академии путей сообщения, 443022, Россия, г. Самара, ул. Заводское шоссе, 18.

тельности экспериментальной установки, от количества испытаний в эксперименте, от способа подготовки и степени идентичности исследуемых образцов в параллельных испытаниях и др. Даже небольшое расхождение в значениях экспериментально найденных величин может привести к неправильной оценке силовых и энергетических характеристик. Наиболее точные результаты механических характеристик хрупких тел могут быть установлены с помощью испытательных машин с мягким нагружением [4]. К ним, в частности, относятся, и гидравлические установки.

1. Методика экспериментального исследования

В качестве объекта исследований берется аммиачная селитра производства ЗАО "Куйбышевазот". Указанные гранулированные тела до проведения эксперимента в течение трех лет хранились на складе в упаковке ГОСТа 17811–78. Монолитные включения от общей массы составляют 65–70% при влажности 0,60–65%. По гранулометрическому составу исследуемые хрупкие тела, в целом, соответствовали требованиям ГОСТ. Испытание материалов проводят в три основных этапа: подготовка исследуемых образцов, последовательное нагружение до разрушения образца и оценка характера разрушения. Сначала, согласно ГОСТу 4651–78, вырезаются образцы в форме параллелепипедов с квадратным основанием и высотой (рис. 1). Подготовленные образцы доставлялись в ОАО СНТК им. Кузнецова³, где проводились испытания на сжатие на универсальной машине типа Р–2 (рис. 2). Представленная схема испытательной машины включает следующие элементы: (1) – штурвал, (2) – электромотор, (3) – динамометр, (4) – штанги, (5) – цилиндр с поршнем, (6) – платформу (с образцом после разрушения), (7) – индикаторную головку, (8) – исходный образец до разрушения, (9) – траверсу (нижняя подвижная площадка).

Далее образец устанавливается на платформу (6) и назначается скорость движения траверсы (9). Затем включается (2) электромотор и открывается штурвал для подачи масла (1). Для создания давления в цилиндре (5) применяется регулируемый насос, работающий от электромотора.

С помощью соответствующей настройки этого насоса регулируется его производительность, и отсюда – скорость поршня, который через штанги (4) связан с движущейся (9) траверсой. В процессе испытаний контролируется скорость деформации, скорость нагружения и перемещения деформирующей плиты. Так как соотношения между напряжением и деформацией зависят от скорости, то для гарантии воспроизводимости получаемых характеристик испытание на сжатие проводят с постоянной скоростью сближения площадок, которая по рекомендации специалистов составила 2 мм/мин [5]. Деформацию образца измеряют с помощью индикаторной головки (7) с погрешностью 0,005 мм путем последовательного (ступенчатого) нагружения образца с приращением нагрузки, равным пяти. Разрушение образца фиксируется по максимальному показанию динамометра (3) с погрешностью $\pm 0,5\%$ и завершается когда исследуемый образец полностью разрушается (распадается на несвязные части). Однако экспериментальный цикл считается законченным только после визуального исследования характера разрушения образца (рис. 3).

³Совместная лаборатория механики конструкционных материалов на базе ОАО СНТК им. Кузнецова (443026, Россия, г. Самара, ул. С. Лазо, 2А) и кафедры механики сплошных сред Самарского государственного университета (443011, Россия, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1).

2. Определение механических свойств исследуемых образцов и критических значений, характеризующих разрушение

В процессе исследований определяют следующие параметры: разрушающее напряжение при сжатии, максимальную сжимающую деформацию образца, модуль Юнга.

Разрушающее напряжение при сжатии устанавливают из выражения:

$$\sigma = \frac{P}{F_0}, \quad (2.1)$$

где σ — разрушающее напряжение при сжатии (кгс/см²);

P — критическая сжимающая нагрузка по показанию динамометра (кгс);

F_0 — площадь поперечного сечения исследуемого образца (см²).

Деформацию определяют как относительное удлинение (сжатие) из классической зависимости:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (2.2)$$

где Δl — абсолютное укорочение образца при нагружении (мм);

l_0 — высота исходного образца (мм).

По результатам семи повторений строятся зависимости $P = f(\Delta l)$ между нагрузкой и деформацией (рис. 4) и на основании ГОСТа 25.503-80 для прямого участка кривой после замены Δl на Δl^* согласно (рис. 5) на котором показан пример графического определения Δl^* для пятой кривой, находятся модуль Юнга по формуле:

$$E = \frac{\Delta P \cdot l_0}{\Delta l^* \cdot F_0}, \quad (2.3)$$

где E — модуль Юнга (кгс/см²);

ΔP — элементарное приращение нагрузки (5 кгс).

На основании зависимостей и картины разрушения (рис. 3) можно с достаточным приближением утверждать, что исследованные тела разрушаются (распадаются на несвязные части) по хрупкому типу, т.е. полное разделение происходит при небольших обратимых деформациях, а тело сохраняет свойство линейной упругости вплоть до разрушения [6, 7]. Полученные данные экспериментов показывают, что измеряемые механические характеристики хрупких тел изменяются в достаточно широких пределах. Прежде всего, это объясняется структурой исследуемых образцов с наличием микротрещин, пор и других микродефектов. Таким образом, можно считать, что нарушение сплошности тела также происходит и по квазихрупкому типу, т.е. когда линейный размер области контура трещины, мал по сравнению с длиной и другим характерным размером тела (как и в нашем рассматриваемом случае). Результаты испытаний партии образцов представляют в сводный протокол испытаний (табл. 1).



Рис. 1. Исследуемые образцы аммиачной селитры

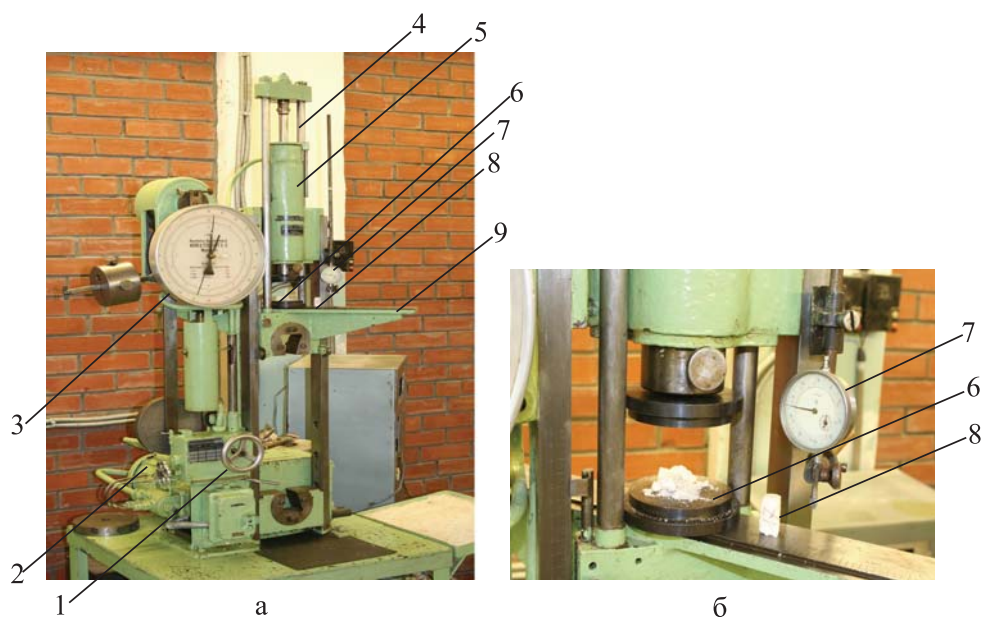


Рис. 2. Разрушающая машина: а — общий вид; б — вид на образец до и после разрушения



Рис. 3. Типичный характер разрушения образца аммиачной селитры

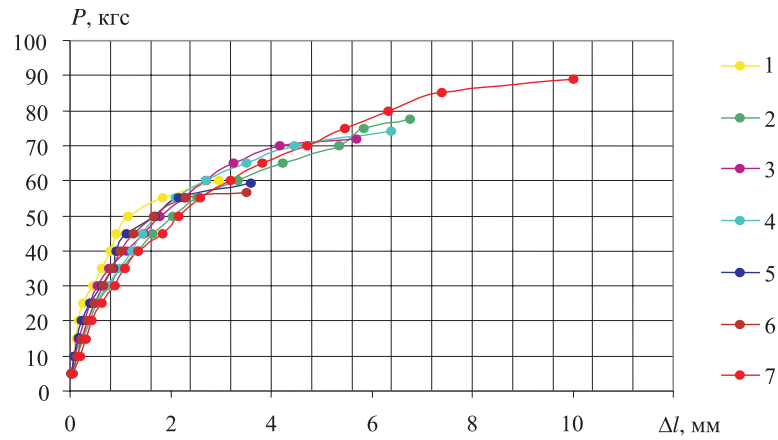


Рис. 4. Зависимости между нагрузкой и деформацией при осевом сжатии образцов из аммиачной селитры

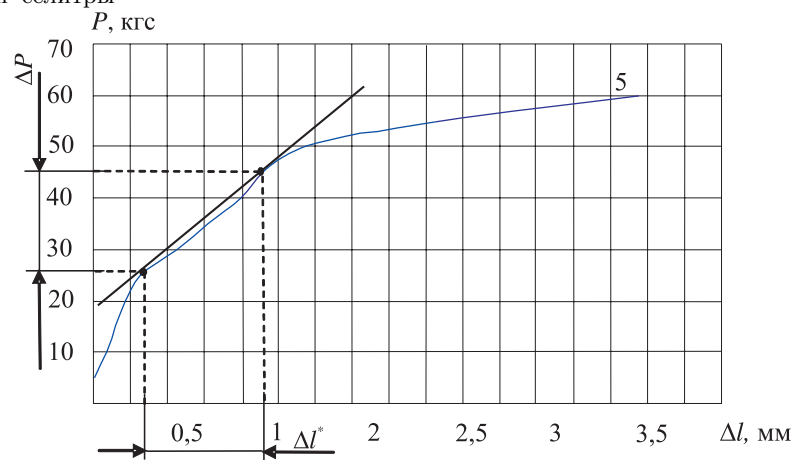


Рис. 5. Схема к графическому определению модуля упругости

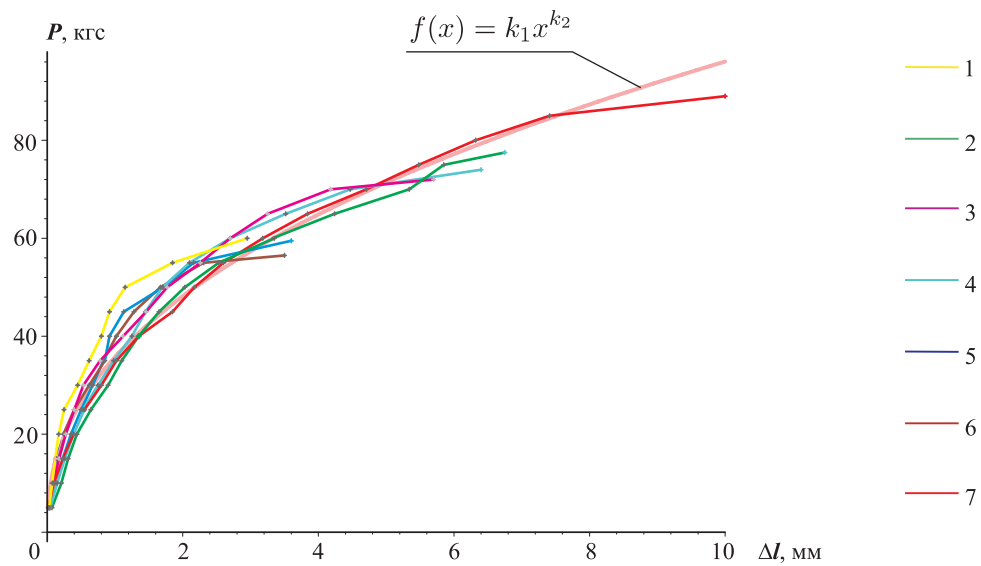


Рис. 6. График соответствия расчетных и исходных значений

Таблица 1

Сводный протокол испытаний

№ образца	Разрушающее напряжение	Критическая деформация разрушения		Модуль Юнга
	σ (кгс/см ²)	Δl^* (мм)	ε	E (кгс/см ²)
1	23,2	1,99	0,067	344
2	27,2	2,920	0,093	291,4
3	26,8	4,460	0,161	166,8
4	28,5	4,219	0,147	193,4
5	24,2	2,124	0,072	336,9
6	17,8	2,251	0,071	251,1
7	21,2	2,982	0,105	201,7

3. Статистическая обработка результатов испытаний

С целью построения адекватной модели разрушения исследуемых образцов, полученные экспериментальные данные после семи повторений обрабатывают с использованием статистических методов и определяют следующие характеристики [8, 9]:

Среднее арифметическое из результатов испытаний для соответствующих механических характеристик подлежащих оценке:

$$\bar{Y} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Y_i, \quad (3.1)$$

где Y_i — данные испытания i -го образца (см. табл 1), k — число испытаний, составляющих данную совокупность;

Среднее квадратическое отклонение (дисперсия) при малой выборке

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{k - 1}}; \quad (3.2)$$

Выборочная дисперсия как квадрат среднего квадратического отклонения

$$S = \sigma^2; \quad (3.3)$$

Долю изменчивости выборки (коэффициент вариации)

$$v = \frac{\sigma}{\bar{Y}}. \quad (3.4)$$

Ошибка средней арифметической при малой выборке

$$m = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{k - 1}} \quad (3.5)$$

Количество достаточных и необходимых повторений в эксперименте, было установлено исходя из установившейся практики и принималось равным семи [10]. Среднее арифметическое значение (3.1) принималось за наиболее вероятное значение, установленное из всего ряда образцов. Статистические результаты испытаний по оценке параметров механических характеристик приводят в (табл. 2).

Таблица 2

Результаты статистической обработки

Параметры	Разрушающее напряжение	Критическая деформация разрушения		Модуль Юнга
Оценка	σ (кгс/см ²)	Δl (мм)	ε	E (кгс/см ²)
Среднее значение	24,1	2,99	0,102	255
Дисперсия	3,76	0,99	0,03	71,1
Выборочная дисперсия	14,1	0,99	0,001	5063,9
Коэффициент вариации	0,156	0,331	0,294	0,279

Полученные эмпирические результаты исследований обрабатывают с помощью математических пакетов Maple V и Excel. С привлечением этих программ была подобрана степенная зависимость, оптимальным образом аппроксимирующая экспериментальные данные:

$$f(x) = k_1 x^{k_2}, \quad (3.6)$$

где коэффициент $k_1 = 35,76..35,80$, а показатель $k_2 = 0,4287..0,4296$.

Кривая, определенная данным уравнением регрессии (3.6), является кривой наилучшего среднеквадратического приближения к эмпирическим точкам (рис. 6.) В общем случае данное уравнение показывает, как линия регрессии y на x в среднем изменяет величину y при изменении величины x .

Заключение

В работе рассмотрены механические характеристики хрупких тел (образцов из аммиачной селитры) при испытании на сжатие. Экспериментально определены критические значения разрушения образцов, которые составили для напряжения — 24,1 кгс/см², деформации — 0,102, для модуля Юнга — 255 кгс/см². Установлено, что исследуемые тела полностью распадаются на отдельные несвязные части при небольших обратимых деформациях т.е. разрушаются по хрупкому типу. Кроме того отмечено, что исследуемые хрупкий материал при определенных условиях разрушения обладает свойствами квазихрупкости. Эти свойства — хрупкость и квазихрупкость — зависят от количества повторностей в эксперименте, от способа подготовки и степени идентичности исследуемых образцов в параллельных испытаниях и др. Также проведена обработка результатов исследований посредством статистических методов. Ошибка среднего арифметического приближения составила для напряжения — 6,3%, для деформации — 12%, для модуля Юнга — 11,4%. Некоторый разброс результатов механических испытаний определяется наличием внутренних микродефектных зон в материале. По этой причине все меры направленные на повышение точности отдельно взятого эксперимента при существующем эксплуатационном оборудовании будут иметь незначительное влияние. Повысить же точность измерений возможно только за счет осуществления комплексных испытаний, при которых учитывались бы различные факторы: характер нагружения, влияние микротрещин, влияние окружающей среды и др. Однако

проведение таких комплексных испытаний ограничивается техническими и экономическими возможностями.

Литература

- [1] Сиденко, П.М. Измельчение в химической промышленности / П.М. Сиденко. М.: Химия, 1968. 379 с.
- [2] Левенсон, Л.Б. Дробление и грохочение полезных ископаемых / Л.Б. Левенсон, Г.И. Прейгерзон. М–Л.: Гостоптехиздат, 1940. 772 с.
- [3] Попов, П.Д. Выполнение федеральной целевой программы стабилизации и развития АПК на 1996–2000 г.г. / П.Д. Попов, А.В. Постников, А.Н. Кондратенко // Агрохимический вестник. 2000. №1. С. 7–10.
- [4] Белл, Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел: в 2 ч. Ч. 1. Малые деформации / Дж.Ф. Белл. М.: Наука, 1984. 600 с.
- [5] Испытание материалов / под. ред. Х. Блюменауэра. М.: Металлургия, 1979. 448 с.
- [6] Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. М.: Наука, 1974. 640 с.
- [7] Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко. М–Л.: ОНТИ, 1937. 453 с.
- [8] Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов: в 2 ч. Ч.1. Деформация и разрушение / Я.Б. Фридман. М.: Машиностроение, 1974. 472 с.
- [9] Ведяпин, Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных / Г.В. Ведяпин. М.: Высшая школа, 1988. 320 с.
- [10] Кувшинников, И.М. Метод определения слеживаемости минеральных удобрений / И.М. Кувшинников, Н.Л. Малоносов // Химия в сельском хозяйстве. 1970. №10. С. 27–31.

Поступила в редакцию 3/III/2006;
в окончательном варианте — 3/III/2006.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF BRITTLE FRACTURE⁴

© 2006 A.V. Klyukanov⁵

The present study deals with experimental mechanical characteristics of brittle fracture (specific for ammoniacal saltpeter). In the work the critical values are experimentally obtained, characterizing fracture of specimens, which give for compressing stresses — 2,41 MPa, for strains — 0,102 and for Young's Modulus — 25,5 MPa. Statistical processing of obtained experimental data is carried out. Measurement errors are given for compressing stresses — 6,3%, for strains — 12% and for Young's Modulus — 11,4%.

Paper received 3/III/2006.

Paper accepted 3/III/2006.

⁴Communicated by Dr. Sci. (Phys. & Math.) Y.N. Radayev

⁵Klyukanov Alexei Vassilyevich, Dept. of Management of Freight and Commercial Enterprises, Samara State Academy of Railway Communications, Samara, 443022, Russia.