

ПРИРОДА ВЗРЫВОВ СЖИМАЕМЫХ ТОНКИХ СЛОЕВ

В. Н. Буров, П. П. Житников, В. В. Неверов,
В. Г. Супнес

(Новокузнецк)

Впервые взрывы тонких слоев материалов под действием давления и сдвига описал Бриджмен [1]. Впоследствии расширен круг материалов, в которых это явление наблюдается [2—5]. О природе явления высказано несколько предположений. По [2] взрыв представляет хрупкое разрушение образца, по [3, 4, 6] — химическую реакцию. Однако количественного исследования явления не проводилось, и поэтому следует согласиться с мнением авторов [5], что причины взрывных явлений нельзя считать выясненными.

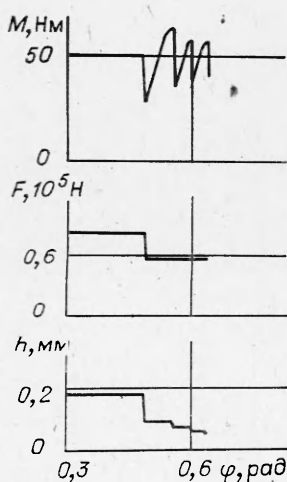
Взрывы тонких слоев представляют не только теоретический интерес. Есть основания полагать, что подобное происходит в энергонапряженных мельницах при помоле порошков. Так, при вальцевании порошков наблюдались взрывы, приводившие к разрушению валков диаметром 20 см [7].

В данной работе экспериментально изучены взрывы тонких сжимаемых слоев. Предложена модель явления, на основании которой дано объяснение полученным и некоторым литературным данным.

Методика опытов. Опыты проводились по методике Бриджмена. Исследуемый материал сжимали между плоскими пуансонами, один из которых под давлением можно было вращать со скоростью 0,13 град/с.

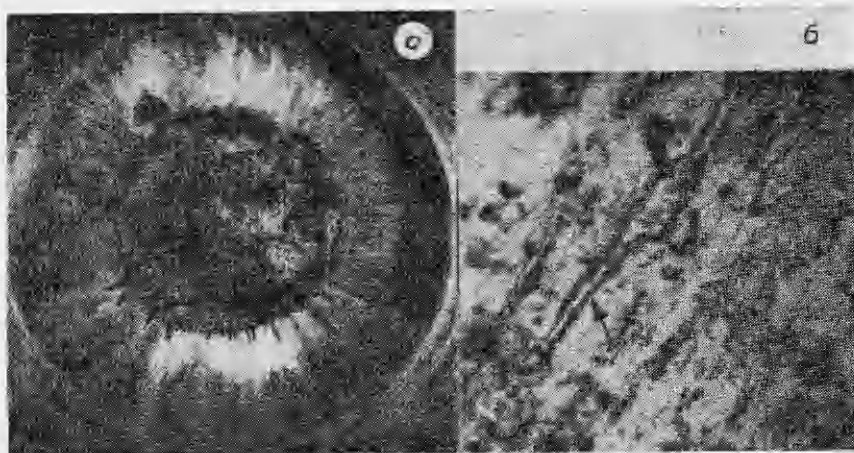
Угол возможного перекося пуансонов не превышал $0,2^\circ$. Для используемых материалов коэффициент трения не меньше 0,1. Соответственно угол трения больше 6° , что значительно превышает $0,2^\circ$, и поэтому влиянием возможного перекося пренебрегали. Использовались пуансоны диаметром 7 мм из закаленной стали ШХ15. Во время опытов регистрировали сжимающую силу F с точностью $\pm 1,3 \cdot 10^3$ Н, толщину образца h с точностью $\pm 2 \cdot 10^{-3}$ мм (по этим данным строили диаграммы сжатия) и крутящий момент M с точностью $\pm 0,7$ Нм. Скорость приложения сжимающей силы $2 \cdot 10^2$ Н/с, скорость разгрузки 10^5 Н/с. Опыты проводили с порошкообразными материалами. Для регистрации упругих волн, возникающих при взрыве, использовали запоминающий осциллограф. Сигнал снимали с тензодатчика, закрепленного на одной из тяг пресса, или с пьезодатчика, установленного на пуансоне. Изменение структуры материалов изучали путем рентгеновской съемки с записью дифрактограмм.

Результаты опытов. Взрывы могут происходить во время нагружения, во время вращения пуансона под нагрузкой, при выдержке под нагрузкой, при разгрузке. Феноменология явления во всех случаях одинакова. Взрыв сопровождается скачкообразным уменьшением M , F и h



Р и с. 1

(первый спад на рис. 1, опыт с ZnSb), резким звуком, выбрасыванием материала, иногда разрушением пуансонов (системой радиальных трещин), а для материалов с температурой плавления выше 1000 К — искрением. На поверхности пуансонов после взрыва остается пленка толщиной около 1 мкм. Вблизи от места взрыва она сплошная с гладкой поверхностью (рис. 2, а, увеличение $\times 5,4$). По мере удаления от места взрыва сплошность пленки нарушается. Границы разрывов имеют плавные контуры. Можно наблюдать застывшие ручки (показано стрелкой) и капли сферической формы (рис. 2, б, увеличение $\times 200$). Пленка прочно прилипает к пуансону. Это свидетельствует о том, что выбрасываемый материал частично расплавляется. В опытах с теми материалами, в которых происходят взрывы, во время вращения пуансона под давлением происходят щелчки, они сопровождаются теми же явлениями, что и взрывы, но в меньших масштабах (рис. 1).



Р и с. 2

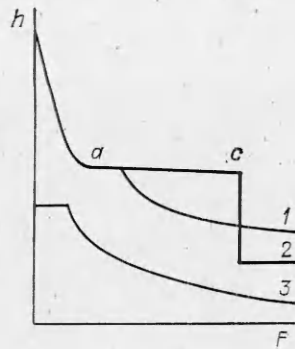
Вначале изучалась способность к взрыву различных веществ в ходе одинакового воздействия: нагружение до давления 2 ГПа, вращение в течение 3 мин, разгрузка. При этом удалось вызвать взрыв веществ с ковалентной связью (9 элементов и соединений), кристаллогидратов (12 соединений), а также CuI , PbI , V_2O_5 . Не взрывались окислы (11 соединений), металлы, 5 щелочно-галлоидных соединений, а также K_2SO_4 , N_2SO_4 , CaSO_4 , KNO_3 , NaNO_3 .

Типичные виды диаграмм сжатия представлены на рис. 3. Диаграмма сжатия пластин пластичных материалов 3 состоит из двух участков: зависания, на котором с ростом силы сжатия толщина слоя не меняется, и выдавливания, на котором толщина убывает. На диаграммах сжатия порошков хрупких материалов также имеется участок зависания *ac*. С увеличением силы сжатия зависание либо нарушается взрывом 2, либо переходит в пластическое выдавливание 1.

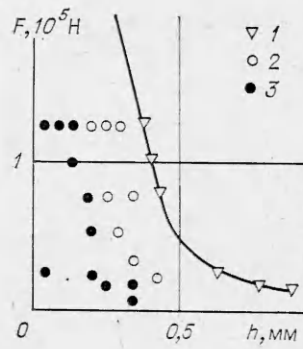
Для ряда веществ установлена зависимость критической силы сжатия, при достижении которой во время нагружения наступает взрыв, от толщины слоя (рис. 4, 5). На рис. 5 точки 1 — V_2O_5 ; 2 — S, 3 — Ge, 4 — Si, 5 — стекло. Зависимость длительности выдержки до взрыва от давления и дифрактограммы алюминиевых квасцов до и после выдержки под давлением представлена на рис. 6 и 7.

Изучение сигналов от тензодатчика и пьезодатчика показало, что первым по упругой системе в момент взрыва проходит импульс разгрузки.

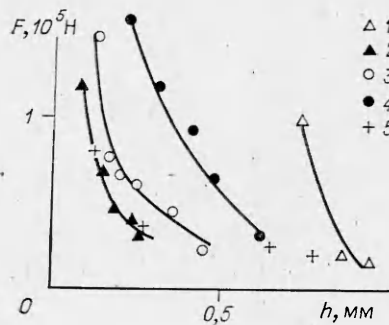
Обсуждение результатов. Так как пленки застывшего материала (см. рис. 2,а) и трещины в разрушенных пуансонах располагаются симметрично относительно центра пуансонов, то, следовательно, перекосы пуансонов не являются причиной взрыва. Связь между способностью взрываться и хрупкостью материалов (см. рис. 3), разгрузочный характер первого импульса, порождаемого взрывом, подтверждают гипотезу о взрыве как о процессе хрупкого разрушения, которое развивается вследствие нарушения механической устойчивости. Так как критическая сила не зависит от прочностных характеристик материалов (см. рис. 5), то, очевидно, устойчивость слоя определяется силами трения, действующими по поверхности контакта образца и пуансонов, а точнее, соотношением между вытесняющим действием сжимающей силы и удерживающим действием сил трения. В режиме зависания преобладает удерживающее действие. С увеличением сжимающей силы вытесняющее действие нарастает, становится преобладающим, и зависание сменяется пластическим вытеснением или взрывом. Естественно принять, что соотношение вытесняющего и удерживающего действия определяется распределением давления по радиусу пуансона, т. е. видом функции $\sigma(r)$.



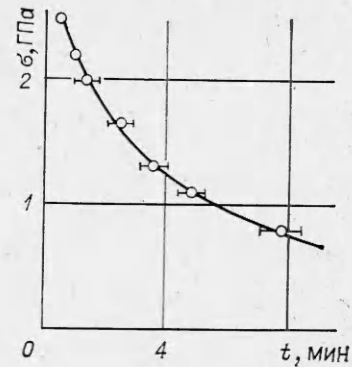
Р и с. 3



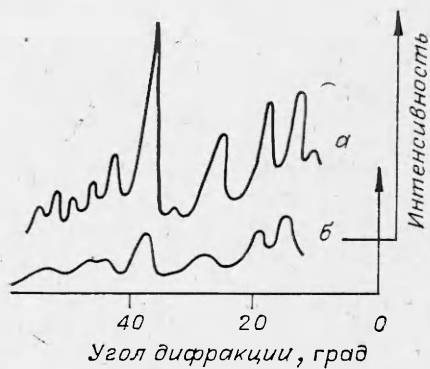
Р и с. 4



Р и с. 5



Р и с. 6



Р и с. 7

Рассмотрим изменение $\sigma(r)$ при сжатии пластин пластичного материала. Если слой материала тонкий и находится в упругом состоянии, то $\sigma(r)$ подобна распределению давления при контактом взаимодействии упругих тел [8]. Действительно, изменения, связанные с присутствием слоя, обусловлены упругой деформацией слоя. Эта деформация пропорциональна давлению, т. е. там, где больше давление, больше сжатие слоя, поэтому градиенты давления в присутствии слоя будут меньше, но характер распределения сохранится. В этом случае наибольшие давления действуют на краях пуансонов [9], а при пластическом состоянии слоя — в центре пуансонов [10, 11]. Переход от упругого состояния в пластическое с ростом силы сжатия начинается с течения материала на краях слоя, а затем граница пластической и упругой зон перемещается к центру. Так как градиент давления в пластической зоне отрицателен, а в упругой — положителен, то область наибольших давлений располагается на границе зон и также смещается к центру. Изменение вида $\sigma(r)$ приводит к тому, что заземление слоя в краевой части и, следовательно, удерживающее действие ослабевают, а вытесняющее действие по мере установления распределения с отрицательным градиентом нарастает. В пластичных материалах и в материалах, приобретающих пластические свойства под давлением [12], перераспределение давления, а затем и выдавливание слоя происходят постепенно.

В хрупких слоях перераспределение давления может привести к взрывообразному выбросу. Вытеснение краевых частей слоя сопровождается

их разрушением. Снижаются несущая способность разрушенного материала и боковая поддержка, которую он оказывал на соседний расположенный ближе к центру материал. Этот материал может разрушиться, затем разрушается следующий за ним и т. д. Процесс имеет самоподдерживающийся характер. Таким образом, смещение области наибольшего давления к центру вызывает взрывообразное разрушение всего слоя. Однако не каждое выкрашивание слоев, которое при обжатии хрупких материалов наблюдается постоянно, приводит к взрыву. Значит, для развития взрыва требуется выполнение другого условия — нарушения устойчивости всего слоя в целом.

Для количественного описания условий наступления взрывов используем трактовку устойчивости [13]. Энергией, затрачиваемой на деформацию слоя, будем пренебрегать, считая ее малой при хрупком разрушении во время выброса. Устойчивость нарушится, если при малом сближении пуансонов на δh работа силы сжатия δA превышает работу силы трения δA_T . Энергия δA_T превращается в тепло, энергия $(\delta A - \delta A_T)$ — в кинетическую энергию выбрасываемого материала.

Для критического состояния

$$(1) \quad \delta A = \delta A_T = F \delta h;$$

$$(2) \quad \delta A_T = 2 \int_0^R 2\pi r k \sigma(r) \delta r dr$$

(k — коэффициент трения, r — радиус слоя).

Рассмотрим вид $\sigma(r)$ в порошковых слоях. В отличие от монолитных в порошковых слоях имеется готовая система внутренних разрывов, и поэтому они обладают способностью к пластическим деформациям [12]. К выводу о пластическом поведении при сжатии тонких порошковых слоев приходят авторы [14, 15] на основании сравнения экспериментальных данных о распределении давления в порошковых и монолитных слоях. Для расчетов принято, что в порошковых слоях, как и для пластичных материалов, имеются две зоны: пластическая на краях и упругая в центре с распределением давления в пластической зоне, как в [10, 11].

В упругой зоне монолитных образцов давление уменьшается к центру. Это распределение в порошковых слоях изменится за счет уплотнения порошков. Уплотнение порошков представляет способность к остаточной деформации в направлении осевого сжатия. За счет большего уплотнения материала в области больших давлений максимум $\sigma(r)$ на краю упругой зоны вылаживается и давление в центре повышается. Поэтому для упругой зоны принято $\sigma = \text{const}$, что подтверждается следующим. По расчетам [11] в упругой зоне давление равномерное. Отличие этого результата от [9] обусловлено тем, что в [11] пуансоны считаются жесткими. Такое допущение приемлемо в опытах с порошками, так как упругой деформацией пуансонов по сравнению с деформацией слоя можно пренебречь. Кроме того, в [14, 16] экспериментально обнаружено, что если ширина краевого поддерживающего кольца превышает половину радиуса пуансона, то давление в центральной зоне (заполненной в [14] порошком кварца) равномерное. Как показали расчеты, в наших опытах при критической силе сжатия ширина пластической зоны больше половины радиуса и необходимое условие устойчивости — существование в центре пуансонов зоны, давление в которой, по крайней мере, не возрастает к центру. Этот результат согласуется с предположением об упругой зоне с равномерным давлением.

Пренебрегая изменением плотности слоя в начальный момент выброса, из условия сохранения объема имеем

$$(3) \quad \pi r^2 h = \text{const}, \quad \delta r = r \delta h / 2h.$$

Используя (1), а также выражения

$$(4) \quad F = \int_0^R 2\pi r \sigma(r) dr;$$

$$(5) \quad M = \int_0^R 2\pi r k \sigma(r) r dr,$$

для ряда значений критических сил получим ряд алгебраических систем из трех трансцендентных уравнений с четырьмя неизвестными: r — радиус границы пластической и упругой зон; τ_s — критическое напряжение сдвига материала; k — постоянная величина; h . Расчеты показывают, что интервал возможных значений k , для которых системы имеют решение и перенные принимают физически реальные значения, узок и составляет несколько сотых. Расчетная зависимость $F_k(h)$ для ZnSb при $k = 0,15$ удовлетворительно согласуется с результатами опытов (см. рис. 4, где 1 — взрывы получены при нагружении, 2 — при вращении под нагрузкой, 3 — взрыв получить нельзя, сплошная линия — результат расчетов).

Подставив (3) и (5) в (2) и используя (1), найдем $F = Mh^{-1}$. Так как измеренные моменты определяются силами трения движения, которые меньше сил трения покоя, то для взрывов при нагружении должно выполняться неравенство $F_k > Mh^{-1}$. Результаты опытов соответствуют этому неравенству (рис. 8, где цифры отвечают условиям опытов, а цифры в кружках — условиям, при которых происходят взрывы, 1 — V_2O_5 , 2 — Si, 3 — Ge, 4 — ZnSb, 5 — S, 6 — InSb, 7 — $AlNH_4(SO_4)_2 \cdot 12 H_2O$, 8 — $NaMoO_4 \cdot 2H_2O$, 9 — $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, 10 — CaF, 11 — SiO_2 , 12 — Fe_2O_3 , 13 — CuO, 14 — Al_2O_3).

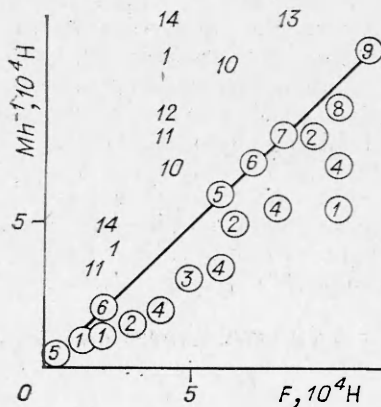
Развитие представления позволяют объяснить ряд наблюдений. Вращение пуансона за счет снижения коэффициента трения (см. рис. 4) и выдержка под нагрузкой за счет ползучести приводят к расширению пластической зоны, потере устойчивости и взрыву. Щелчки, очевидно, происходят вследствие неустойчивости не всего слоя, а только краевой кольцевой зоны.

Вытесняемый после нарушения устойчивости материал под действием сил трения за счет подвода к нему упругой энергии нагружающей системы разогревается. Расчет энергетического баланса с учетом теплоотвода через пуансоны показывает, что выбрасываемый материал частично расплавляется. Время развития процесса $2 \cdot 10^{-4}$ с, что совпадает с данными осциллографирования. Скорость выбрасываемых частиц, вычисленная как из условия совместного движения пуансонов и материала слоя, так и по данным о величине пути пролета порошинок в воздухе, совпадает и равна 10^3 м/с.

Случаи взрывов смесей металл — сера [3], которые за счет присутствия металлов обладают пластическими свойствами, кажется, противоречат гипотезе о хрупком разрушении. Однако опыты показали, что взрывы в таких

и подобных смесях элементов, например цинка или кадмия с сурьмой, происходят после предварительной пластической деформации, протекающей при вращении одного из пуансонов. В ходе этой деформации в смесях образуются хрупкие соединения, и взрыв представляет процесс разрушения этих соединений. Образование промежуточных соединений при совместной пластической деформации смесей элементов наблюдалось в [3] и изучено в [17].

Искажение структуры алюминиевых квасцов $AlNH_4(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ в результате выдержки под давлением 1 ГПа ($a = 1$ мин,



Р и с. 8

6 — 30 мин), регистрируемое по снижению и уширению дифракционных пиков (см. рис. 7), нельзя объяснить пластической деформацией, которая, хотя и имеет место при смещении границы пластической зоны к центру, но очень мала. Остается предположить, что в самом материале развиваются процессы, приводящие к искажению структуры. По-видимому, в квасцах протекает дегидратация, так как молекулы воды удерживаются в соединении наиболее слабо. Поскольку давление увеличивает стабильность гидратных форм [18], движущая сила процесса связана с неоднородностью давления в пластической зоне. Подобный процесс диссоциации под действием градиента давления иодистого серебра с образованием в области низкого давления молекул галогена наблюдали в [19]. Свободные молекулы воды снижают силы трения, что приводит к взрывам.

Итак, взрывы в тонких сжимаемых слоях развиваются в результате потери системой механической устойчивости, которая может происходить вследствие химических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва.— М.: ИЛ, 1955.
2. Воларович М. П., Пархоменко З. И. Исследование разрушений при кручении тонких образцов горных пород при одностороннем давлении.— Изд-во АН СССР. Сер. геофиз., 1957, № 2.
3. Зубова Е. В., Коротаева Л. А. Явления химических превращений в твердой фазе под давлением 50 000 кг/см² при одновременном действии сдвига.— Журн. физ. химии, 1958, т. 32, с. 1576.
4. Верещагин Л. Ф., Зубова Е. В. и др. Поведение окислов при действии высокого давления с одновременным приложением напряжения сдвига.— ДАН СССР, 1971, т. 196, № 4.
5. Гоникберг М. Г. Химическое равновесие и скорость химических реакций при высоких давлениях.— М.: Химия, 1969.
6. Teller E. On the speed of reactions at high pressure.— J. Chem. Phys., 1962, v. 36, N 4.
7. Tissen P. A., Meyer K., Heinike G. Grundlagen der Tribochemie.— Berlin: Akademie-Verlag, 1967.
8. Александров В. П., Мхитарян С. М. Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками.— М.: Наука, 1983.
9. Галин Л. А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости.— М.: Наука, 1980.
10. Унксов Е. П. Инженерная теория пластичности.— М.: Машгиз, 1959.
11. Fichson J. W., Waxman M. An analysis of pressure and stress distribution under rigid Bridgman type anvils.— In: High-pressure measurements. Washington: Butterworths, 1963.
12. Николаевский В. Н., Лившиц Л. Д., Сизов И. А. Механические свойства горных пород. Деформации и разрушения. Итоги науки и техники. Сер. Механика деформируемого твердого тела/ВИНИТИ, 1978, т. 11.
13. Линьков А. М. Об условиях устойчивости в механике разрушения.— ДАН СССР, 1977, т. 233, № 1.
14. Myers M., Dackillie F., Roy R. Contribution to calibration of high-pressure systems from study in an opposed anvil apparatus.— In: High-pressure measurements. Washington: Butterworths, 1963.
15. Connel C. A. W. Pressure profiles in opposed anvil high pressure cells.— J. Appl. Phys., 1966, v. 17, N 3.
16. Montgomery P. W., Stromberg H., Jura G. H., Jura G. Calibration of Bridgman anvils a pressure scale to 125 kb.— In: High-pressure measurements. Washington: Butterworths, 1963.
17. Неверов В. В., Буров В. Н. Условия образования соединений при механической активации.— Изв. СО АН СССР, 1979, № 9. Сер. хим. наук, вып. 4.
18. Pectorius W. F. T. Incongruent melting and polymorphism of LiSO₄·H₂O up to 40 kilobars.— Z. für Phys. Chem. Neuer Folge, 1967, Bd 54, S. 225.
19. Schock R. N., Katz S. High pressure study of AgI: diffusion in a pressure gradient.— J. Phys. Chem. of Solids, 1967, v. 28, N 10.

Поступила 16/X 1984 г.