

представляющий одно из специфических гидродинамических явлений при аварийных взрывах, можно использовать для соответствующих оценок. При этом надо иметь в виду, что зафиксировать размеры огненного шара с достаточной точностью обычно не удастся. Свидетельства очевидцев, особенно людей, попавших в зону поражения огненного шара, субъективны и малодостоверны; поэтому ошибка в определении радиуса (а тем более массы топлива) может быть значительной. Напротив, величины γ_1 и особенно γ_2 , как правило, могут быть достаточно точно измерены непосредственно на местности, что дает возможность по результатам проведенного исследования определить и величину массы топлива.

Отметим, что масса пролитого горючего может существенно отличаться от массы, вовлеченной в энерговыделение. Действительно, в зависимости от условий образования и зажигания парового облака часть горючего может остаться в жидком состоянии. Кроме того, в силу особенностей ландшафта облако может быть разделено на несколько частей, некоторые из них рассеются без зажигания. В указанном смысле приведенные выше расчеты дают, очевидно, нижнюю оценку величины M пролитого горючего.

Аналогичным образом можно рассмотреть и другие характерные точки шкалы Бофорта. Соответствующие величины M_* могут быть использованы для классификации аварий по степени их разрушительных последствий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бейкер Ч., Коке П., Уэстайн П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия.— М.: Мир, 1986.
2. Маршалл В. Основные опасности химических производств.— М.: Мир, 1989.
3. Lees F. P. Loss prevention in the process industries.— L.: Butterworths, 1980.
4. Дубов А. С., Быкова Л. П., Марунчи С. В. Турбулентность в растительном покрове.— Л.: Гидрометеиздат, 1978.
5. Хргиан А. Х. Физика атмосферы.— Л.: Гидрометеиздат, 1978.
6. Махвиладзе Г. М., Мелихов О. И., Якуш С. Е. Турбулентный осесимметричный термик в неоднородной сжигаемой атмосфере. Численное исследование.— М., 1987.— (Препр./АН СССР. ИПМ; № 303).
7. Гостинцев Ю. А., Махвиладзе Г. М., Мелихов О. И. Вынос аэрозольных частиц в стратосферу горячим термиком // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1987.— № 6.— С. 146.
8. Гостинцев Ю. А., Солодовник А. Ф., Лазарев В. В. и др. Турбулентный термик в стратифицированной атмосфере/АН СССР. ИХФ.— Препр.— Черноголовка, 1985.

г. Москва

Поступила в редакцию 1/VII 1991

УДК 539.375 : 539.219.2

Е. Г. Фатеев, В. П. Хан

НЕОДНОРОДНЫЙ МАССОПЕРЕНОС В ТВЕРДЫХ СПЛАВАХ В УСЛОВИЯХ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ВЗРЫВА

Представлены экспериментальные исследования, свидетельствующие о том, что в процессе реологического взрыва твердые сплавы испытывают необратимые изменения, связанные с явлениями массопереноса при возбуждении импульса нагружения и аномально быстрых слоевых потоков отдельных фракций. Показано, что неоднородный массоперенос в процессе эффекта приводит к скачкообразному изменению характера протекания по материалу электрического тока.

Явление реологического взрыва (РВ)— это возбуждение аномально быстрого (скорость ~ 1 км/с) квазижидкого течения взрывоподобно разрушенного твердого тела в критических полях сдвиговых напряжений, возникающих при относительно медленных нагружениях в открытых системах сжатия. Характерные времена нагружения системы с наковальнями Бриджмена до проявления РВ и времена процессов импульсного сжатия с аномальным течением вещества в момент РВ существенно от-

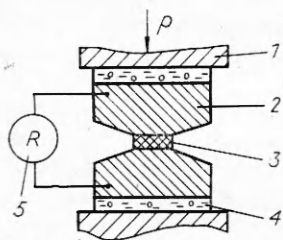


Рис. 1. Система сжатия, используемая для возбуждения РВ.

личаются и соответствуют $\sim 10^2$ и $\sim 10^{-6}$ с [1, 2]. В условиях одноосного сжатия в [1] наблюдались такие эффекты с оксидами металлов, полимерными материалами, полупроводниками и диэлектриками.

При реологическом взрыве происходят значительные структурные изменения. Так, в [2] обнаружена сильная степень ориентации разрушенного в РВ материала; кристаллиты были веерообразно вытянуты от центра к краю дискообразного образца. В работе [3] описан подобный эффект ориентации полимерных волокон и «кластерных блоков» в пластиках. Наблюдения структурных изменений в материалах приводят к выводу, что после РВ тело насыщается сетчатыми структурами с многочисленными трещинами, параллельными плоскостям наковален [2]. При снятии нагрузки с образца, испытывавшего РВ, грани «спеченных» дисперсно разупорядоченных частиц разрушенного тела (напоминающих плоские эллипсоиды с толщиной ~ 1 мкм) оказываются с наибольшей концентрацией дефектов и большими внутренними напряжениями, из-за чего по этим местам происходят расслоения в теле.

В настоящей работе приводятся экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что в процессе РВ твердые сплавы (на примере двухкомпонентных GeSe_2 и SiTe_4) испытывают радикальные и необратимые изменения, связанные с массопереносом при возбуждении в РВ импульса нагружения и аномально быстрых слоев потоков отдельных фракций. Такой характер массопереноса ведет к скачкообразному изменению в момент РВ характера протекания по образцу электрического тока.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Исследуемые образцы 3 в дисперсном виде (характерный размер частиц $\sim 2-7$ мкм) подвергались медленному одноосному сжатию со скоростью $\sim 0,1$ ГПа/с между наковальнями 2, изготовленными из твердого сплава ВК-8 с диаметром рабочей плоскости 5 мм. Активные части пресса 1 и наковальни отделались тефлоновыми прокладками 4 для создания возможности измерения омметром 5 (типа ШЗ8) сопротивления образца. Схема пресса аналогична описанному в [2]. Давление определяли по манометру, предварительно проградуированному манганиновым датчиком.

Анализ характера массопереноса проводился с использованием оже-спектрометра JAMP-10S высокого разрешения и анализатора типа цилиндрического зеркала, в котором анализ поверхности вели методом оже-электронной спектроскопии. Поток возбуждающих электронов с энергией 3 КэВ, током 0,1 мкА и диаметром 10 мкм падал на поверхность образца под углом 70° относительно нормали к поверхности, для уменьшения электронно-стимулированных эффектов и зарядки образца. Вакуум в оже-спектрометре был не хуже $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ Па.

При выяснении характера массопереноса в сплавах, испытывавших РВ, проведены исследования относительного распределения отдельных компонентов на поверхности дискообразных образцов из GeSe_2 , As_2Se_3 , SiTe_4 в различных стадиях сжатия и после испытания ими РВ. Исследовался также кристаллический сплав GeSe_2 , в котором РВ возбуждается при критических давлениях $p_{кр} \sim 2,5 \pm 0,3$ ГПа.

В результате оже-анализа получено изображение отношения концентраций элементов сплава в точках образца, расположенных по его диагонали. На рис. 2 видно, что в самой критической стадии сжатия перед РВ существуют области, как обогащенные, так и обедненные на 5-7% тем или иным элементом. Такие же отклонения, но более выраженные, имеются в образце после РВ, однако с аномально богатым содержанием Se, достигающим до $\sim 15-20\%$ на периферии диска. Для контроля приведены

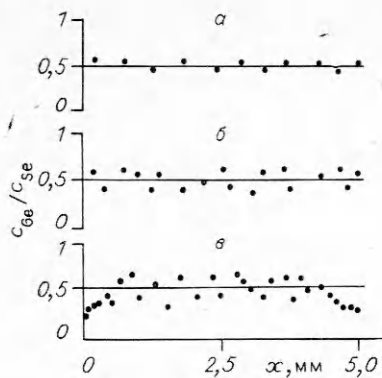


Рис. 2. Отношение атомных концентраций Ge и Se в различных точках поверхности дискообразного образца, испытывавшего три степени сжатия. p , ГПа: a — 0,5, b — 2,0, c — 2,5 (с возбуждением РВ).

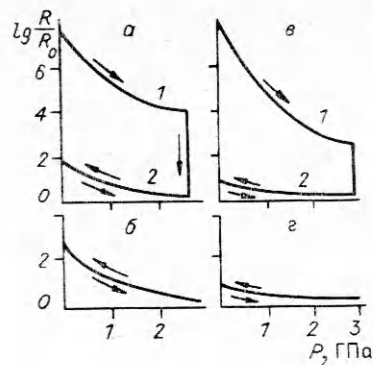


Рис. 3. Зависимости логарифма относительного сопротивления от давления. 1 — при нагружении; 2 — цикл нагружение — разгрузка после РВ. a — GeSe_2 , $R = 10$ Ом; b — Ge, $R = 0,3$ Ом; c — SiTe_4 , $R = 0,2$ Ом; d — Te, $R = 5 \cdot 10^{-3}$ Ом.

подобные наблюдения с образцом, испытывавшим малые деформации (рис. 2, a), достаточные только для компоновки порошка сплава в моноклит между наковальнями при $p \approx 0,5$ ГПа. В последнем случае отклонения от средней линии распределения для сплава GeSe_2 не превышали статистических ($\sim 0,3\%$).

Описанные наблюдения дополняют измерения электрического сопротивления в дискообразных образцах сплавов GeSe_2 и SiTe_4 в соответствующих стадиях сжатия. Полученные в процессе экспериментов с РВ зависимости логарифма относительного сопротивления от давления на наковальнях представлены на рис. 3 (здесь R_0 — минимальное сопротивление в процессе сжатия). Для того и другого сплава при сжатии между наковальнями типично плавное падение сопротивления до $p_{кр}$, а затем скачкообразное на 4—6 порядков в момент взрыва. После РВ при полном снятии давления на образец сопротивление повышается только на порядок. И далее, в циклах нагружения — разгрузки системы наковален с образцом, испытывавшим РВ, сопротивление стабилизируется кривой 2, которая на 4—6 порядков ниже, чем до взрыва. Можно заметить, что кривые 2 на рис. 3 для обоих сплавов напоминают найденные при сжатии между наковальнями без РВ элементарных поликристаллических Ge и Te соответственно. Совпадение имеется и по порядку величин сопротивлений. Такой характер протекания тока в образце легко объясняется, как показано выше, возникновением в теле в процессе РВ многочисленных неоднородностей типа включений, обогащенных тем или иным элементом из-за неоднородного массопереноса. В отличие от структурно-фазовых неоднородностей, происходящих в твердых телах при гидростатическом сжатии, неоднородности после РВ возникают в необратимых процессах, поэтому при декомпрессии образцы не релаксируют к структуре до РВ. Отсутствие релаксации ясно видно из рис. 2 и 3.

Неоднородный массоперенос элементов в сплавах в условиях одноосного сжатия между наковальнями, где реализуется весьма сложное поле механических напряжений [4], может возникать, когда миграционные потоки атомов направлены так, чтобы компенсировать эту неоднородность [5, 6]. При этом атомные вакансии могут мигрировать в противоположную сторону [7]. Из-за различной подвижности атомов соотношение потоков мигрирующих компонентов не пропорционально отношению элементов в сплавах. Благодаря этому в условиях предкристических деформаций на границах различных макродефектов могут образовываться области, обогащенные тем или иным элементом. Заметим, однако, что в процессе РВ, очевидно, протекают еще более радикальные эффекты массопереноса, о чем может свидетельствовать существование

аномально высокого обогащения селеном края дискообразного образца после РВ (см. рис. 2, в).

Действительно, при диссипации энергии в динамическом нагружении образца, инициированного РВ, возможны значительные локальные перегревы в материалах [8], что в сочетании со сверхбыстрым течением вещества между наковальнями [2] может привести к фракционированию элементов в сплавах с размерами неоднородностей, большими, чем до взрыва. Этим, в свою очередь, легко объясняется более сильный вынос скоплений селена к краю диска в условиях РВ, поскольку из-за его легкоплавкости (температуры плавления Se и Ge составляют ~490 и ~1210 К соответственно) закономерно его большая подвижность в квазивязких потоках вещества между наковальнями. Реологическая же природа течения твердого материала в открытых системах сжатия при импульсном нагружении возможна, как показано в [9], из-за резкого падения сопротивления межзеренному проскальзыванию и возникновения нового эффективного канала вязкого течения по внутренним границам раздела. При этом могут происходить локальные разогревы этих границ с эффектами деформационно-стимулированного увеличения коэффициентов зернограничной диффузии. Этот механизм в сочетании со звуковыми скоростями фракционирующихся элементов в твердых смесях реагентов может играть решающую роль в сверхбыстрых химических взаимодействиях в условиях РВ, описанных в работах [10, 11].

Таким образом, проведенные исследования распределения элементов в твердых сплавах показали, что в процессе реологического взрыва протекают необратимые изменения, связанные с эффектами неоднородного массопереноса, как в виде миграций отдельных атомов, так и при быстрых слоевых течениях, обогащенных каким-либо элементом.

Авторы искренне признательны В. В. Меньшикову за помощь при изготовлении оснастки и С. П. Сентемову за оже-анализ образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bridgman P. W. Effects of high shearing streams combined with high hydrostatic pressure // *Phys. Rev.*— 1935.— 48, N 15.— P. 825.
2. Ярославский М. А. Реологический взрыв.— М.: Наука, 1982.
3. Александров А. П., Гаспарян Э. Э., Свистунов В. С. и др. Образование ориентированных кластерных систем при механическом взрыве // *Докл. АН СССР.*— 1990.— 314, № 3.— С. 648.
4. Левитас В. П. Большие упруго-пластические деформации материалов при высоком давлении.— Киев: Наук. думка, 1987.
5. Лифшиц И. М. К теории диффузионно-вязкого течения поликристаллических тел // *ЖЭТФ.*— 1963.— 44, № 4.— С. 1349.
6. Бокан А. С. Поликластерные аморфные тела.— М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Кирсанов В. В., Кислицин С. Б., Кислицина Е. М. Влияние неоднородных полей напряжений на процессы миграций точечных дефектов // *ЖТФ.*— 1988.— 58, № 7.— С. 1440.
8. Хан В. П., Фатеев Е. Г. Корреляция диаграммы состояний с критическим давлением взрывных эффектов в твердых растворах Ge — Se при сильном сжатии // *Письма в ЖТФ.*— 1990.— 16, № 8.— С. 81.
9. Краснощеков Ю. П., Кузнецов Л. К., Перевезенцев В. И. и др. К теории аномальной пластичности материалов при высокоскоростной деформации // *Докл. АН СССР.*— 1990.— 312, № 4.— С. 872.
10. Епиколопян И. С., Мхитарян А. А., Карагезян А. С. и др. Критические явления при взрыве твердых тел под высоким давлением // *Там же.*— 1987.— 292, № 4.— С. 887.
11. Епиколопян И. С., Вольева В. Б., Хзарджян А. А. и др. Взрывные химические реакции в твердых телах // *Там же.*— 1987.— 292, № 5.— С. 1165.

г. Ижевск

*Поступила в редакцию 29/X 1989,
после доработки — 30/VII 1991*