

важной роли принимаемой кинетической модели в закономерностях выхода на режим стационарной детонации. В заключение остановимся на вопросе о «критических» градиентах [1], факт существования которых используется в обзоре [2], посвященном механизмам перехода горения в детонацию в газовых смесях. Полученные в настоящей работе результаты позволяют утверждать, что при «критических» (в смысле [1]) градиентах температуры в системе никакой перестройки течения не возникает, а «критичность» связана только с длиной сосуда. Именно в этом диапазоне градиентов температуры на холодный торец сосуда данной длины воздействует детонационная волна. При больших градиентах температуры существующий в системе КДК распадается до прихода на стенку.

Поступила в редакцию 2/IV 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, В. Б. Либрович и др. ПМТФ, 1970, 2, 76.
2. J. H. S. Lee, I. O. Moen. Prog. Energy Combust. Sci., 1980, 6, 359.
3. Р. Рихтмайер, К. Мортон. Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972.
4. В. А. Левин, В. В. Марков. ФГВ, 1975, 11, 4, 623.
5. W. Fickett, W. W. Wood. Phys. Fluids, 1966, 9, 5, 903.
6. I. I. Erpenbeck. Phys. Fluids, 1967, 10, 2, 274.

ДЕФОРМАЦИЯ И ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЗРЫВА СМЕСЕЙ МЕТАЛЛ — ОКИСЛИТЕЛЬ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УДАРОМ И ТРЕНИЕМ

*С. М. Муратов, С. П. Бажанов, Е. Х. Гидаспова, Ю. В. Просвирина,
А. П. Амосов, Л. Я. Кашпоров, С. И. Воронков*

(Куйбышев)

Смеси металлов с окислителями широко применяются в металлотермии, самораспространяющемся высокотемпературном синтезе и других областях [1, 2]. Для обеспечения безопасности работ с этими смесями необходимо знать закономерности их инициирования механическими воздействиями (ударом, трением). В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования закономерностей деформирования и возбуждения взрывчатого превращения (горения) некоторых двойных стехиометрических смесей металл — окислитель при ударе на копре К-44-II и трении на копре К-44-III.

Воздействие ударом проводили стандартным роликовым прибором № 2 диаметром 10 мм [3, 4]. В качестве бойка применяли ролики диаметром 4 и 2,5 мм. О чувствительности судили по энергии удара E , соответствующей нижнему пределу чувствительности [4]. Результаты испытаний двойных стехиометрических смесей циркония и магния с нитратом и пероксидом бария на чувствительность к удару при различных диаметрах бойка D и начальных толщинах слоя h приведены на рис. 1. При изменении h для различных D величина E может изменяться очень сильно. При $h < 0,4 \div 0,6$ мм энергия инициирования уменьшается при увеличении толщины, достигает минимума, а затем возрастает с толщиной слоя.

Такое сильное изменение чувствительности в зависимости от h и D может быть связано с особенностями механизма инициирования смесей, в основе которого лежат различные деформационные процессы. Для их исследования проведены тензометрирование и фоторегистрация процесса деформации слоев различной толщины под действием удара. Тензометри-

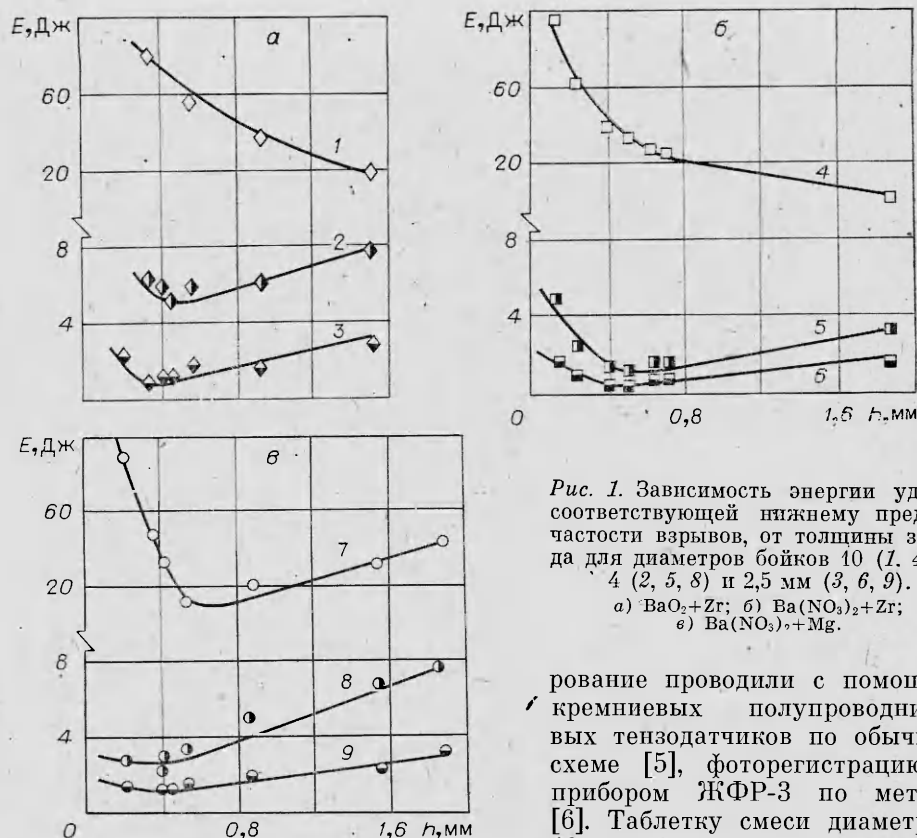


Рис. 1. Зависимость энергии удара, соответствующей нижнему пределу частоты взрывов, от толщины заряда для диаметров бойков 10 (1, 4, 7) 4 (2, 5, 8) и 2,5 мм (3, 6, 9).
а) $\text{BaO}_2 + \text{Zr}$; б) $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + \text{Zr}$; в) $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + \text{Mg}$.

рование проводили с помощью кремниевых полупроводниковых тензодатчиков по обычной схеме [5], фоторегистрацию — прибором ЖФР-3 по методу [6]. Таблетку смеси диаметром 10 мм помещали в центре

между роликами диаметром 30 мм и регистрировали увеличение ее диаметра в процессе удара (рис. 2).

В тонких слоях при ударе достигаются давления порядка 1,5 ГПа, и инициирование происходит в процессе хрупкого разрушения, сопровождаемого резким спадом давления в течение 20–30 мкс (рис. 2, б) и высокой (~100 м/с) скоростью разлета вещества. Такая картина характерна для процесса деформации и инициирования взрыва хрупких кристаллических бризантных ВВ [5, 6].

Деформация толстых слоев начинается при давлениях порядка 0,5 ГПа и сопровождается плавным нарастанием и убыванием давления (рис. 2, в, г). На стадии роста давления могут встречаться участки пластической деформации под постоянным давлением длительностью 100–150 мкс (рис. 2, д). Процесс деформации более длителен во времени. Инициирование происходит спустя ~600 мкс от начала удара при скоростях радиального движения слоя 10–15 м/с. Все эти факты свидетельствуют о том, что инициирование смесей металл — окислитель в толстых слоях наступает в результате пластической деформации, которой свойственны значительно меньшие давления и скорости движения слоя.

Как известно, бризантные ВВ требуют для своего инициирования ударом очень высоких давлений (сотни мегапаскалей), что обусловлено сравнительно низкими температурами плавления $T_{\text{пл}}$ этих ВВ (353 К у тротила и 476 К у гексогена), не позволяющими получать высокотемпературных очагов разогрева и воспламенения при низких давлениях [5]. Это объясняется тем, что главным источником образования очагов разогрева при механических воздействиях на ВВ являются процессы тепловыделения трения, а разогрев при этом ограничен температурой плавления наиболее легкоплавкого элемента пары трения. При механических воздействиях металлическими телами разогрев ограничен температурой плавления ВВ. Высокие давления повышают $T_{\text{пл}}$ ВВ примерно до 700–900 К, когда уже происходит воспламенение очагов разогрева,

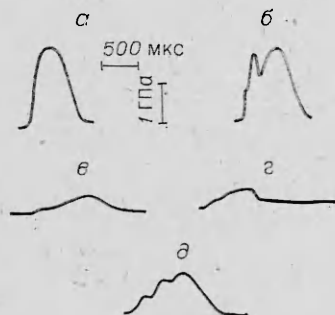


Рис. 2. Осциллограммы изменения давления во времени при ударе по зарядам смеси $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + \text{Zr}$ различной толщины в приборе № 2 при отказах (а, б) и взрывах (в — г).
а, б) $h=0,5$ мм, $E=50$ Дж; в — г) $h=1,89$ мм, $E=17$ Дж.

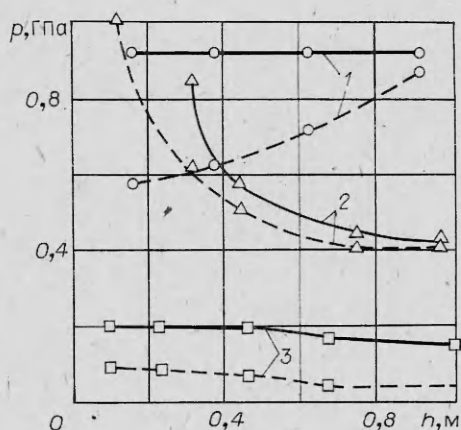


Рис. 3. Зависимость давления инициирования, соответствующего нижнему пределу частоты взрыва, при трении от толщины заряда и шероховатости роликов для смесей:
1 — $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + \text{Mg}$, 2 — $\text{BaO}_2 + \text{Zr}$,
3 — $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + \text{Zr}$.

образующихся при механических воздействиях, и инициируется взрыв ВВ. Высокие давления на таких малопрочных веществах, как ВВ, создаются только в тонком слое [5]. Как показано в [5, 7], инициирование бризантных ВВ при ударе и ударном сдвиге происходит по механизму хрупкого объемного разрушения, обусловленного высокими давлениями.

Главное отличие рассматриваемых смесей металл — окислитель от бризантных ВВ состоит в том, что они инициируются не только при высоких давлениях, сопровождаемых всегда хрупким разрушением, но и при значительно меньших с более длительной пластической деформацией и заметно меньшими скоростями движения слоя. Такое отличие объясняется большими по сравнению с бризантными ВВ $T_{пл}$ металлов и неорганических окислителей. Например, даже у такого легкоплавкого металла, как магний, $T_{пл} = 924$ К, у нитрата бария $T_{пл} = 868$ К и т. п. Уменьшение энергии инициирования исследуемых смесей при увеличении толщины слоя (область тонких слоев) объясняется снижением его прочности и энергии удара, необходимой для разрушения и инициирования слоя. Рост E при дальнейшем увеличении h после достижения минимума (область толстых слоев) объясняется тем, что часть энергии удара расходуется на пластическое выдавливание слоя из-под бойка прежде, чем будет достигнута оптимальная толщина, при которой наступит взрыв. Пластическое выдавливание слоя до оптимальной толщины легче происходит при использовании бойков малого диаметра. Поэтому для них наблюдаются малые значения E и меньшая зависимость $E(h)$. Следует заметить, что инициирования бризантных ВВ при воздействии ударом бойками малого диаметра не происходит, поскольку в данном случае не возникают высокие давления, необходимые для инициирования этих ВВ [5, 6].

Итак, сильное изменение энергии инициирующего удара при изменении толщины слоя и диаметра бойка, существование минимума на зависимости $E = f(h)$ объясняется протеканием двух деформационных процессов, формирующих взрыв: хрупкого разрушения или пластической деформации и переходом от одного к другому при изменении условий испытаний.

Если испытания на чувствительность смесей к удару проводить по стандартной методике в приборе № 2 [4], то величина $E \approx 50$ Дж рассматриваемых смесей окажется значительно выше энергии инициирования тетрила и гексогена ($E = 7$ и 5 Дж соответственно). Если же испы-

тания проводить при меньшем D , то величина E может упасть до значений меньших, чем тетрила и гексогена. Данные результаты подвергают сомнению пригодность стандартных условий испытаний ВВ для оценки чувствительности систем металл — окислитель, поскольку с практической точки зрения представляют интерес опасные воздействия, а методы оценки чувствительности должны их выявлять.

На рис. 3 представлены некоторые результаты проведенного на коп-ре К-44-III [3] исследования чувствительности к трению рассматриваемых смесей для различной толщины слоев и шероховатости роликов. Использовались «гладкие» ролики (сплошные линии) со средней высотой шероховатостей 0,63 мкм и «шероховатые» (20 мкм, штриховые линии). Проводилось также фоторегистрационное исследование деформации слоя в ходе сдвига верхнего ролика, как при ударе. Из рис. 3 и фоторегистрограмм следует, что смесь $BaO_2 + Zr$ инициируется по механизму разрушения, т. е. за время порядка 10^{-5} с [7, 8], и давление инициирования сильно зависит от толщины слоя, как и при ударе.

Смесь $Ba(NO_3)_2 + Zr$ не разрушается при сдвиге верхнего ролика и инициируется по механизму контактного трения (за время примерно 800 мкс), поэтому давление инициирования слабо зависит от толщины слоя. (Отметим, что это давление значительно ниже, чем у бризантных ВВ [5].)

Пластичная смесь $Ba(NO_3)_2 + Mg$ в опытах с «гладкими» роликами сравнительно легко выдавливается при отжатии муфты до тонкого слоя примерно одной и той же толщины, поэтому результаты этих испытаний не зависят от начальной толщины смеси. «Шероховатыми» роликами выдавливание тонких слоев затруднено. При увеличении толщины слоя ударный сдвиг сопровождается пластическим выдавливанием слоя, приводящим к падению начального давления прижатия и трению при меньшем давлении. Давление падает сильнее с ростом толщины слоя. В связи с этим для инициирования более толстых слоев смеси требуются более высокие начальные давления прижатия (см. рис. 3).

В целом для инициирования трением всех рассмотренных смесей при использовании «шероховатых» роликов требуются меньшие давления прижатия, чем в случае «гладких» роликов. Объясняется это тем, что «шероховатые» ролики при сдвиге срезают тонкий слой смеси и переводят поверхность трения внутрь смеси. При этом все тепло трения остается в смеси и дает более высокий разогрев, чем при «гладких» роликах, для которых поверхность трения совпадает с поверхностью контакта ролика со смесью или очень близка к ней, и заметная часть тепла трения уходит в металл ролика.

*Поступила в редакцию 9/II 1984,
после доработки — 13/VI 1984*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Дубровин.— В кн.: Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка, 1975.
2. А. Г. Мержанов. Там же.
3. А. Ф. Баум, Л. Н. Орленко и др. Физика взрыва/Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
4. ГОСТ 4545-80. Вещества взрывчатые. Методы определения чувствительности к удару. М.: Госстандарт, 1981.
5. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М.: Наука, 1968.
6. Б. Н. Кондриков, В. Д. Чубаров.— В кн.: Вопросы теории взрывчатых веществ. М., 1974.
7. С. М. Муратов.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1977.