

УДК 614.847

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ФРИКЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Е. В. Черненко, Л. Ф. Афанасьева, Н. И. Ваганова

Институт структурной макрокинетики РАН,
142432 Черноголовка

Показано, что воспламеняемость материалов может происходить при малом давлении прижатия трущего тела к испытываемому образцу. Обнаружено существование двух пределов воспламеняемости по давлению прижатия при фрикционном воздействии на порошковый материал. Методом фрикционного воздействия достигнута высокая степень уплотняемости порошкового материала при небольших давлениях прижатия ($\sim 10 \text{ кг/см}^2$). Исследовано влияние на разогрев и воспламеняемость образцов материала трущего тела. Выявлен эффект активации химически активного порошкового материала при фрикционном воздействии. Проведено обсуждение полученных результатов.

Цель настоящей работы — исследование разогрева и воспламеняемости порошковых материалов при длительном фрикционном воздействии. Согласно современным представлениям, основным фактором, ответственным за воспламенение и взрыв химически активных материалов при внешнем трении, является тепловыделение. Причем, зарождение активных химических реакций, способных привести к срывному разогреву материала, реализуется сначала в разогретых точках (очагах), которые возникают на поверхности трущегося материала. Причиной образования очагов, где первоначально достигаются значительные перегревы относительно средней температуры материала, могут служить локальные отличия в химическом составе материала, инородные включения, обладающие большей химической активностью или большим коэффициентом трения с трущим телом, аномально высокое содержание дефектов в локальной области, образование трещин или сколов и т. д.

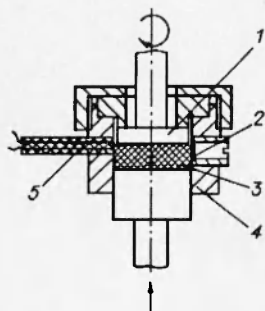


Рис. 1. Схема основного узла экспериментальной установки:

1 — трущее тело, 2 — отверстие в корпусе стаканчика, 3 — испытываемый образец, 4 — корпус металлического стаканчика с подвижным дном, 5 — термопара в керамической оболочке.

Размеры и температура локальных источников тепла в зоне фрикционного контакта монолитных материалов подробно исследовались в [1–3]. В то же время отсутствуют работы по исследованию разогревов поверхности порошкового материала и их воспламеняемости при длительном фрикционном воздействии. Единственная попытка исследовать воспламеняемость порошковых материалов при длительном трении [4] проводилась без приложения нагрузки на исследуемый материал трущим телом. В таких условиях в режиме длительного трения даже высокоактивные порошковые материалы не воспламеняются. Изучение воспламеняемости порошковых материалов на приборе И-6-2 [5] имеет ряд недостатков: во-первых, результаты испытаний не дают никакой информации о предвзрывном разогреве в материале, во-вторых, условия экспериментов нельзя назвать длительными (время проведения испытаний 3 с), в-третьих, использование небольших навесок

испытываемого материала (0,03 г) приводит к большим относительным теплотерям при разогревах образца. Поэтому даже самые высокочувствитель-

тельные материалы взрываются при давлениях прижатия трущего тела к образцу $p = 35 \text{ кг/см}^2$ (азид свинца). Все же промышленные взрывчатые вещества при трении без добавок кварцевого песка не взрываются при $p = 3000 \text{ кг/см}^2$. Поэтому исследования воспламеняемости порошковых материалов на приборе И-6-2 пригодны только для высокоактивных взрывчатых материалов и могут дать представление только об относительной опасности материалов в условиях, реализуемых на приборе.

Отсутствие работ по воспламеняемости порошковых материалов в режиме длительного трения объясняется техническими сложностями экспериментального моделирования процесса. В настоящей работе эту проблему удалось преодолеть. Эксперименты проводились на установке, основной узел которой показан на рис. 1. В металлический стаканчик с подвижным дном засыпался испытуемый образец, трение осуществлялось сменным металлическим диском, закрепленным на стержне, который вставлялся в патрон сверлильного станка. Температура образца вблизи трущего тела регистрировалась с помощью хромель-копелевой термопары. Связь образца с окружающей средой осуществлялась через отверстие в стенке стаканчика, перекрытое четырьмя рядами металлической сетки с размером ячеек 71 мкм , чтобы исключить выброс образца из стаканчика. Усилие к подвижному дну стаканчика передавалось с помощью рычажного приспособления.

В качестве объекта исследования выбрана шихта для самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), в состав которой входят порошки Mg , V_2O_5 , C . Масса образца $0,5 \text{ г}$.

На рис. 2 приведены типичные температурные кривые. Здесь и в дальнейшем в качестве трущего тела использовался диск, выполненный из Ст. 3 толщиной $2,5$ и диаметром 16 мм . Скорость вращения диска 710 об/мин . При малых p температура образца в начальные моменты времени резко возрастает, затем скорость разогрева образца постепенно уменьшается до нуля и при увеличении времени эксперимента температура образца остается неизменной (кривая 4). При увеличении p на температурной кривой появляется локальный максимум и после небольшого снижения температуры возможно ее возрастание, которое может закончиться воспламенением образца (кривая 3). При дальнейшем повышении p воспламенение может отсутствовать. Тогда на кривой $T(t)$ отчетливо проявляется максимум, после чего температура образца понижается и постепенно выходит на стационарный уровень (кривая 2). И, наконец, при больших p вплоть до предельно возможных на данной установке всегда регистрировалось воспламенение испытуемого материала (кривая 1).

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. С увеличением p возрастает уплотнение испытуемого материала, при этом увеличивается теплопроводность образца [6] и, как следствие, относительно большее количество тепла от фрикционного воздействия может уходить из образца в окружающую среду. Помимо этого, в процессе проведения эксперимента может происходить разрушение исходных частиц порошка и их пластическая деформация (с увеличением p процессы усиливаются), что

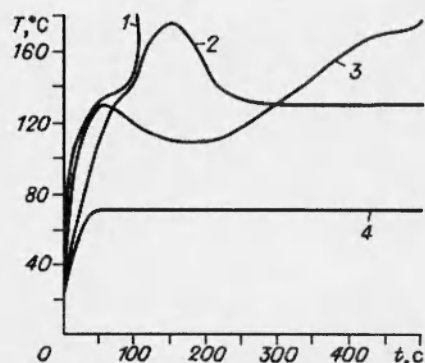


Рис. 2. Зависимость температуры образцов от времени с момента начала эксперимента при p , кг/см^2 : 1 — 6,3, 2 — 4,5, 3 — 2,8, 4 — 2,7.

приводит к снижению шероховатости трущейся поверхности. В результате коэффициент трения скольжения трущего тела по образцу снижается. Поэтому количество тепла, выделяемого при фрикционном воздействии, с увеличением p может и возрастать, но не пропорционально p , а слабее. Так, при $p = 4,5 \text{ кг/см}^2$ после 5-минутного испытания поверхность образца приобретает зеркальный блеск. Таким образом, существование двух пределов воспламенения исследуемых образцов по величине усилия прижатия — результат нелинейных зависимостей от p теплоприхода от фрикционного воздействия в образце и теплоотвода из образца в окружающую среду.

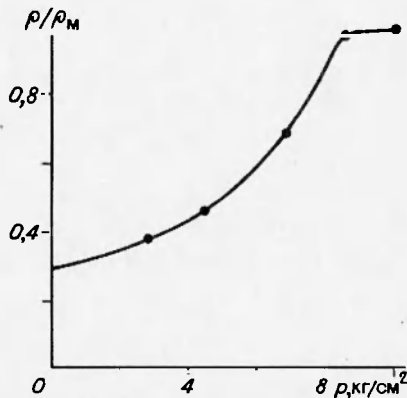


Рис. 3. Зависимость относительной плотности испытуемого материала через 60 с с момента начала эксперимента от давления прижатия трущего тела к образцу.

Для подтверждения этого определялись уплотняемости инертного материала при фрикционном воздействии и зависимость конечной температуры после 5-минутного эксперимента. Оказалось, что отношение плотности испытуемого материала ρ после минутного фрикционного воздействия к его плотности в монолитном состоянии ρ_m увеличивается при изменении p до $8,5 \text{ кг/см}^2$, а при $p = 10 \text{ кг/см}^2$ плотность материала после испытания в пределах точности эксперимента (3%) составляет 98% от расчетной монолитной плотности (рис. 3). Время проведения этих экспериментов t_3 выбрано из тех соображений, что при его дальнейшем увеличении плотность образцов не менялась. Однако температура в большинстве случаев продолжала ра-

сти. Поэтому для определения разогревов образцов от фрикционного воздействия были выбраны инертные материалы: порошки SiO_2 с размером частиц от 0,2 до 0,5 мм и розовый корунд с размером частиц от 0,5 до 1 мм. При $t_3 = 5$ мин температура образцов успевала выйти на стационарный уровень. Из рис. 4 видно, что при нагрузках $p < 5 \text{ кг/см}^2$ конечная температура образцов с увеличением p возрастает, однако скорость ее роста не постоянна. При больших нагрузках температура образцов с увеличением p также возрастает, однако что-либо более определенное сказать трудно из-за большого разброса результатов. Этот разброс, вероятно, вызван тем, что эксперименты проводились на абразивных материалах. Пластическая деформация частиц отсутствует, и небольшой разброс в шероховатости поверхности, сформировавшейся на начальных этапах экспериментов и не играющей существенной роли при тепловыделении в области малых p , при увеличении p оказывает все более сильное влияние.

На рис. 5 показаны зависимости стационарных температур в испытуемом образце от p при использовании различных трущих тел. Наиболее легко воспламеняющим оказался диск из Ст. 3. При использовании диска из нержавеющей стали X18H9T воспламенение образца не происходило даже при $p = 8,65 \text{ кг/см}^2$. В исследуемом диапазоне давлений прижатия при использовании дисков из Ст. 3 и алюминия Д16Т обнаружены две области воспламеняемости образцов. В опытах же с дисками из меди М1 и латуни ЛС-59 получен только один предел воспламенения. Однако, при использовании дисков из этих материалов, а также диска из нержавеющей стали отчетливо проявляются области повышенных температур, в которых образцы не воспламенялись.

Из теории теплопроводности известно [7], что в случае контакта двух полубесконечных тел, имеющих одинаковую начальную температуру, при наличии на поверхности раздела источника тепла между потоками тепла в обе среды имеет место соотношение

$$\frac{q_1}{q_2} = \sqrt{\frac{(\lambda\rho c)_1}{(\lambda\rho c)_2}} = K_\varepsilon,$$

где ρ — плотность, c — удельная теплоемкость; λ — коэффициент теплопроводности; K_ε — отношение тепловых активностей двух сред (1 и 2).

Экспериментально получено, что уплотнение испытуемого материала в пределах ошибок эксперимента не зависит от материала трущего тела. Следовательно, и его тепловая активность не зависит от этого фактора. Отсюда следует, что отношение тепловых активностей трущего тела к исследуемому материалу при смене материала трущего тела возрастает в следующей последовательности: нержавеющая сталь, Ст. 3, латунь, алюминий, медь.

В используемой экспериментальной установке трущий диск не является полубесконечным телом, так как его толщина мала и время его тепловой релаксации намного меньше времени проведения эксперимента, тогда как условия теплоотвода с противоположной от образца стороны диска для всех материалов диска идентичны. Конечно, величина тепловой активности диска должна оказывать существенное влияние на скорость остывания очагов, возникающих в зоне контакта трущихся тел. При этом стационарная температура образца от нее сильно зависеть не может. Здесь, вероятно, более значительную роль играет изменение коэффициента трения скольжения при замене одного диска на другой. Поэтому даже при малых p , когда тепловой вклад химической реакции в разогрев образца не должен быть существенным, максимальная температура образца при использовании диска из латуни намного выше, чем в остальных случаях, хотя тепловая активность у латуни выше, чем у нержавеющей стали и Ст. 3.

При проведении экспериментов было обнаружено, что трущая поверхность дисков заметно истирается и степень истирания возрастает с увеличением p . Поэтому отличие в разогревах образца при использовании дисков из различных материалов при одних и тех же p может быть вызвано не только влиянием тепловых активностей этих материалов и коэффициента трения скольжения дисков по образцу, но и возможным участием материала диска в процессе воспламенения образца. Оторвавшиеся частицы диска могут служить искровым инициатором воспламенения и участвовать в химической реакции взаимодействия с частицами испытуемого материала. Химический анализ сгоревших образцов не дал никаких результатов. Однако методом рентгенофазового анализа удалось обнаружить на поверхности сгоревших образцов соединения, в состав которых входил материал трущего тела. Возможно, что основное количество этих соединений образовалось уже во время горения образца.

Следует упомянуть еще об одном немаловажном факторе — активации образца в процессе проведения эксперимента. Механизм активации

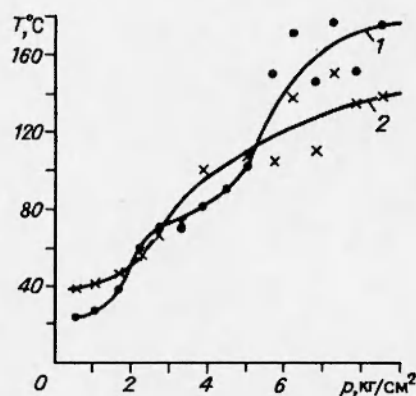


Рис. 4. Зависимость температуры инертного порошка материала через 5 мин с момента начала испытаний от давления прижатия трущего тела:
1 — розовый корунд, 2 — SiO₂.

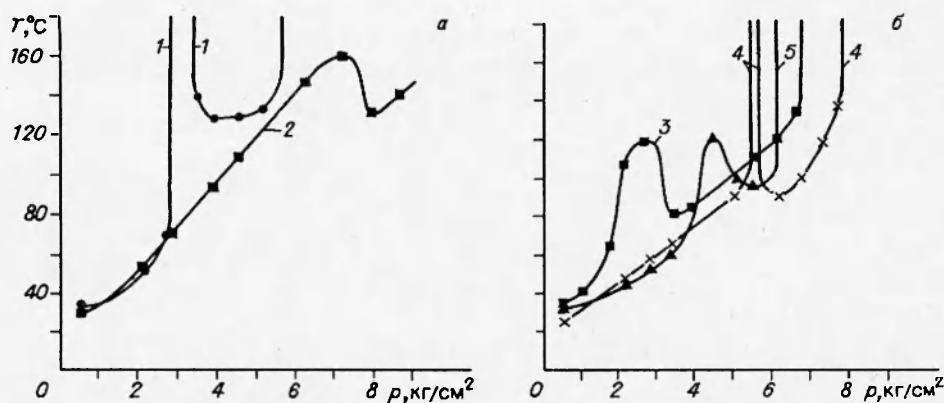


Рис. 5. Зависимость температуры в конце эксперимента от давления прижатия трущего тела к образцу. Материал трущихся тел: 1 — Ст. 3, 2 — нержавеющая сталь X18H9T, 3 — латунь ЛС-59, 4 — сплав алюминия Д16Т, 5 — медь М1. (Конец эксперимента — 5 мин с начала испытаний, если образец не воспламенился, или момент срыва температуры, если воспламенение произошло.)

образцов пока не совсем ясен, однако ее существование подтверждается следующими экспериментами. На установке, подробно описанной в [8], определены критические температуры воспламенения T_k исходного порошкового материала насыпной плотности и спрессованного до относительной плотности 0,64 в атмосфере воздуха, они оказались равными 900 и 865 °С соответственно. Здесь T_k — температура муфельной печи, ниже которой воспламенение испытуемых образцов при их введении в печь не происходит. А для образцов, подвергнутых трению диском из Ст. 3 в течение 5 мин при $p = 4,5 \text{ кг/см}^2$ значение $T_k = 510 \text{ °С}$. Если учесть, что активация испытуемого материала могла уменьшиться за время с момента его трения до проведения испытаний на определение T_k , и тот факт, что при трении возникают очаги разогрева, инициирующие воспламенение образцов, становится более понятным, почему температура в образцах, подвергаемых фрикционному воздействию, никогда не превышала 200 °С вплоть до момента воспламенения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-03-5584).

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданович П. Н., Белов В. М. // Докл. АН Беларуси. 1992. Т. 36, № 1. С. 38-42.
2. Белов В. М., Богданович П. Н., Сысоев П. В. // Изв. АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 1992. № 1. С. 42-47.
3. Белов В. М., Богданович П. Н., Сысоев П. В. // Изв. АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 1992. № 4. С. 49-54.
4. Олишевец В. А., Селиванова В. М. Опасность воспламенения порошков, используемых при получении карбида титана методом СВС, в условиях трения // Проблемы технологического горения. Т. 2. Химия, технология, свойства и применение продуктов горения. Черногоровка, 1981. С. 111-113.
5. Маурина Н. Д., Федосова Н. А., Рязанский В. С. Методы и результаты изучения чувствительности промышленных ВВ к механическим воздействиям // Взрывное дело. Борьба с ядовитыми газами при взрывных работах и новые методы испытаний промышленных ВВ / Под ред. Б. Д. Росси. М.: Недра, 1970. С. 158-168.
6. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974.

7. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.
8. Черненко Е. В., Афанасьева Л. Ф., Лебедева В. А. Воспламеняемость смесей окислов металлов с магнием // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 3. С. 3-9.

*Поступила в редакцию 8/VII 1994 г.,
в окончательном варианте — 28/IV 1995 г.*
