

В.К. АБРАМЯН, С.П. ДАВТЯН, С.Н. ЕНГИБАРЯН

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ИНИЦИИРОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ВЗРЫВА

Рассматривается электродинамическая природа реологического взрыва (РВ) на примере прессования мелкозернистого диэлектрического кристаллического нитрата свинца. Показано, что оно сопровождается электризацией образца, которое в порах и микротрещинах прессованного образца образует частичные разряды. Определены условия образования и продолжительности разрядов, поглощения энергии, а также энергетические и частотные характеристики частичных разрядов.

Ключевые слова: реологический взрыв, прессование, сдвиг, электризация, частичные разряды, частотные и энергетические спектры, поглощение энергии, взрывоопасность.

Явление “реологического взрыва” подразумевает инициирование мгновенной химической реакции в твердом диэлектрическом теле, одновременно подвергнутом сильному одноосному сжатию и сдвигу [1-4]. Из анализа данных указанных работ следует однозначный вывод о том, что при тех давлениях, которые были использованы в экспериментах – $(6-60) \cdot 10^3$ Па, не имеет место деформация внешних электронных оболочек атомов, т.е. при этом отсутствуют внутриатомные процессы. Явление “реологического взрыва” (РВ) некоторые исследователи стали применять для реализации различных химических реакций вплоть до гомо- или сополимеризации из мономеров или готовых полимеров, которые в нормальных условиях не протекают. Скорости подобных “твердотельных” реакций на 3...8 порядков выше, чем скорости аналогичных реакций в газовой фазе. Очевидно, что указанные реакции не связаны с резким усилением диффузионных явлений, т.к. при формальных оценках значений коэффициентов диффузии оно оказывается на 10...15 порядков выше, чем в обычных условиях, из чего, собственно, и следует, что диффузия к этим процессам не имеет отношения [5-8].

В.И. Гольданский называет РВ “химическим ускорителем” [9], но при этом никакой аналогии между безактивационными “холодными” реакциями и реакциями при РВ нет, т.к. низкие температуры не могут заменить высокое давление, а аналога сдвига при “холодных” реакциях вообще нет.

Следует указать также, что в хороших проводниках [10] реологического взрыва не наблюдается, однако он происходит в неметаллических смесях с металлическими порошками или солями [11]. Это уже указывает на электродинамическую природу РВ. Последующая работа В.А. Закревского [12] подтверждает этот вывод. Он показал, что механическое разрушение любого твердого тела представляет собой сложный электронный и ионный процесс. При этом происходит разрыв ковалентных, ионных или иных межатомных связей, приводящих к поляризации, ионизации, появлению свободных радикалов и ион-радикалов, образованию не только локального температурного, но и сильного локального электрического поля, т.е. множественных микропробоев. Оставляя

за пределами данной статьи интерпретацию сопровождающих взрывов при высоких давлениях (ВД) физико-химических процессов, приведём наши данные для доказательства электродинамической природы РВ с учетом того факта, что сдвиг в вышеуказанных опытах приводит к сильной статической электризации (СЭ) (возникновению сильного электрического поля) и нагреву трением своего рода “пускового механизма”. В качестве аналога нами рассматриваются несанкционированные срабатывания (детонирования) высокочувствительных изделий при их производстве, транспортировке и хранении, сопровождающиеся разрушительными последствиями, в частности, в оборонной промышленности.

В горной и оборонной промышленности при проведении взрывных работ широко используются изделия с двухкомпонентной диэлектрической системой, одним из которых является прессованный высокочувствительный порошкообразный материал. В процессе прессования верхний слой, обладающий высокими диэлектрическими свойствами, приобретает “электростатические” заряды, которые создают сильное электрическое поле с потенциалом на поверхности слоя около $(1-2) \cdot 10^3$ В. Проведенный анализ случаев несанкционированных срабатываний изделий при их производстве, транспортировке и хранении свидетельствует о необходимости изучения качественного и количественного изменения физико-химических характеристик таких систем под влиянием поля “статического электричества”.

Важным фактором в процессе исследования влияния электрического поля и обусловленных этим полем “частичных разрядов” (ЧР) является образование пор и микротрещин в образце и их развитие. Из-за остаточных перенапряжений и электродинамических сил ЧР, возникающих, в частности, при нарушении адгезионных связей [13], завершение образования микроструктуры образца после прессования продолжается довольно долго. Наложение внешнего электрического поля на этот процесс приводит к существенному увеличению энергии ЧР и повышению их роли в тепло- и массообменных процессах, в том числе в иницировании зажигания высокочувствительного компонента изделия. Например, процесс прессования порошкообразных диэлектрических материалов оказывает существенное влияние на релаксацию зарядов в двухкомпонентной диэлектрической системе. В рассматриваемых изделиях движение “электростатических” зарядов направлено с верхнего заряженного слоя на нижний слой. Это обусловлено высокими диэлектрическими свойствами ($\sim 10^{13}$ Ом.м) верхнего заряженного слоя и слабым выражением диэлектрических свойств ($\sim 10^9$ Ом.м) нижнего слоя. В этих условиях постоянная времени релаксации, рассчитанная по приближенному методу Хоу [14], выражается по формуле

$$T = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \rho}{1 + r/h - \sqrt{1 + (r/h)^2}},$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε и ρ – диэлектрическая проницаемость и удельное электрическое сопротивление образца; r и h – радиус и высота цилиндрического образца.

Однако следует учесть, что значение T существенно изменяется вследствие изменения ρ образца в процессе и после завершения прессования. При этом изменение ρ зависит от характера процесса прессования. В качестве примера на рис.1а приводится

характерное изменение сопротивления R образца в течение времени после прессования сухого порошкообразного $Pb(NO_3)_2$ при различных давлениях в интервале $(1,25 \dots 2,25) \cdot 10^8$ Па, на рис. 16 - изменение сопротивления R прессованного при $P=1,8 \cdot 10^8$ Па образца в зависимости от температуры T , К.

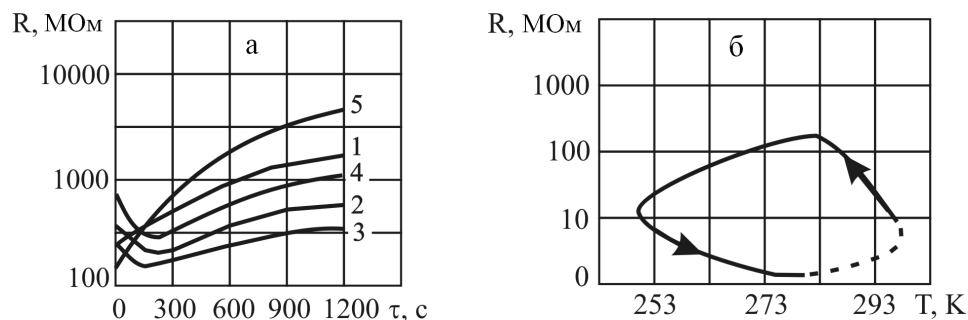


Рис.1. Зависимость удельного сопротивления образцов, прессованных при: а- различных давлениях от времени после прессования; 1 – 125 МПа; 2 - 150 МПа; 3 - 175 МПа; 4 - 200 МПа; 5 - 225 МПа; б - $P=180$ МПа от температуры

Следует отметить, что указанный характер изменения R в зависимости от температуры является общим для большой группы материалов, испытанных нами. Важным в этих испытаниях является то обстоятельство, что при достижении сопротивления образца 10^6 - 10^7 Ом в нем возникают ЧР при очень низких приложенных к образцу напряжениях (около 10 В). В этой аномалии, по-видимому, существенную роль играет эмиссия электронов, обнаруженная Б.В. Дерягиным и его сотрудниками при образовании микротрещин в монолитных телах [13], которые служат в качестве “спускового механизма” для возникновения более мощных ЧР. Восстановление первоначального значения сопротивления образца при комнатной температуре происходит в течение 3...4 ч. Этот участок характеристики на рис. 1 б указан пунктиром. О важной роли ЧР в изменении электрофизических характеристик прессованных образцов свидетельствует характерная зависимость пробивной напряженности поля в образце от его плотности (рис. 2а).

Увеличение плотности упаковки (давления прессования) образца приводит к сжатию пор и, в соответствии с законом Пашена, увеличению пробивной напряженности поля. В соответствии с этим законом существуют критические значения размеров пор и трещин, при которых пробивная напряженность поля минимальная. Сказанное в полной мере подтверждается снятой зависимостью напряжения возникновения ЧР от давления прессования $PbCNS$ (рис. 2 б).

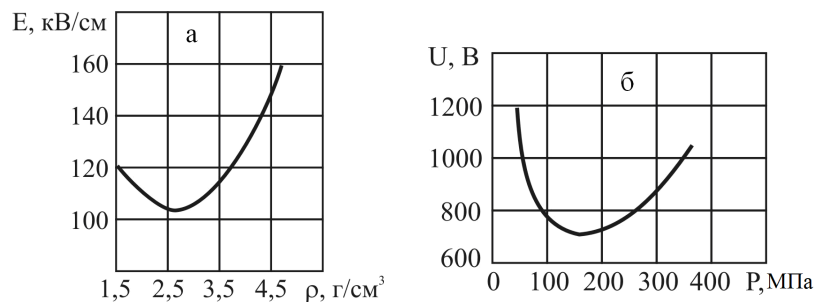


Рис. 2. Зависимости пробивной напряженности поля от плотности образца (а) и напряжения возникновения ЧР от давления прессования образца (б)

При этом, как показывает опыт, увеличивается также частота следования ЧР. Например, при увеличении давления от $2,5 \cdot 10^8$ до $4,5 \cdot 10^8$ Па частота ЧР уменьшается от 35 до 4 Гц. Характерно, что при одной и той же большой плотности образцов увеличение размера кристаллов продукта снижает значение пробивной напряженности поля. Насыщение прессованных образцов глицерином, обладающим примерно такой же электрической прочностью, что и образец, не приводит к существенному изменению пробивной напряженности поля. В то же время при насыщении образца парафином, имеющим более высокую электрическую прочность, существенно увеличивается пробивное значение напряженности поля. При снятии зависимости частоты следования ЧР от величины приложенного напряжения при различных давлениях прессования наблюдается изменение частоты в течение времени. Этот факт свидетельствует о нарастании ЧР вследствие лавинообразного переключения и включения пор и трещин в образце. Анализ экспериментальных результатов зависимости частоты ЧР от времени при различных толщинах образца свидетельствует о том, что существуют определенное количество, размеры и формы пор и трещин, при которых отсутствует лавинообразное нарастание ЧР в образце. Уменьшение толщины образца объективно приводит к увеличению пробивной напряженности поля из-за ослабления неоднородности распределения поля. Наблюдаемые ЧР в образце оставляют темные следы, которые углубляются клинообразно внутрь образца. Это свидетельствует о важной роли ЧР в физико-химических превращениях в образце, в частности, в диффузионном характере тепло- и массообмена.

Определенный практический интерес представляет анализ влияния на величину омического тока, частоту и амплитуду ЧР введенного в состав прессованного диэлектрического образца небольшого количества (0,5...1,5 %) графита. Выяснилось, что содержание такого количества графита практически не оказывает влияния на величину омического тока. В то же время оно оказывает существенное влияние на амплитуду (энергию) ЧР. Это, в конечном итоге, приводит к несанкционированному срабатыванию изделия. Увеличение содержания графита до 3,5...4,0 % приводит к резкому увеличению омического тока до 1000 мкА при полном отсутствии ЧР. При этом не были зафиксированы случаи срабатывания изделия.

Таким образом, подтверждена решающая роль ЧР в инициировании зажигания взрывоопасной смеси в проведенных экспериментах. Однако возникают трудности, связанные с объяснением зажигающей способности ЧР, если учесть их небольшую энергию (порядка 10^{-9} - 10^{-8} Дж). Спектроскопические исследования показали, что выделяемая ЧР энергия в основном приходится на диапазон длин волн $\lambda = 2500 \dots 4300$ А. Характерно, что ряд экспериментов для взрывчатых веществ подтверждает резонансное поглощение электромагнитной энергии в этом диапазоне длин волн [15]. Полученные результаты, наряду с результатами развития теории протекания [16], позволяют выработать конкретные предложения по устранению опасных проявлений “технологической” электризации в рассматриваемых изделиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бриджмен П.В. Физика высоких давлений.- М.: ГТТЛ, 1935.- 342с.
2. Бриджмен П.В. Новейшие работы в области высоких давлений.- М.: ИЛ, 1948.- 300 с.
3. Бриджмен П.В. Образование больших пластических деформаций и разрыва.- М.: ИЛ, 1955.- 444 с.
4. Жаров А.А. // ЖВХО им. Д.И. Менделеева.- 1973. - Т. 1818, N1.- С. 73-79.
5. Ениколопан Н.С. Проблемы химической кинетики.- М.: Наука, 1973.
6. Капустян В.М., Жаров А.А. Ениколопан Н.С. //ДАН СССР.- 1968.- Т. 179.- С. 627.
7. Ениколопан Н.С // ДАН СССР.- 1985. - Т. 283, N4.- С. 897-899.
8. Ениколопан Н.С., Мхитарян А.А., Карагезян А.С. //ДАН СССР.- 1986.- Т. 288, N3.-С.657-660.
9. Гольданский В.И. // ЖВХО им Д.И. Менделеева.- 1073.- Т. 18, N 1.- С. 2-6.
10. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов. 3 изд.-М.-Л., 1958.- 265 с.
11. Ениколопан Н.С., Мхитарян А.А., Карагезян А.С. // ДАН СССР.- 1987.- Т. 294, N4.- С. 312-315.
12. Закревский В.А., Слуцкер А.И. // ВМС.- 1984.- Т. 26, N6.- С. 1201-1296.
13. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел.- М.: Наука, 1973.- 27с.
14. Миролубов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.А. и др. Методы расчета электрических печей. – М.: Высшая школа, 1963.- 415 с.
15. Кук Мелвин А. Наука о промышленных взрывчатых веществах / Пер. с англ. Б.Н. Кукиба; Под ред. Г.П. Демидова.- М.: Недра, 1980.- 455 с.
16. Шкловский Б.И., Эфрос А.А. Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред // УФН.- 1975.- Т. 117, вып. 3.- С. 401-403.

Военная академия связи (СПб), ГИУА, ИОНХ НАН РА. Материал поступил в редакцию 09.11.2007.

Վ.Ղ. ԱԲՐԱՄՅԱՆ, Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Ս.Ն. ԵՆԳԻԲԱՐՅԱՆ

ԵԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՊԱՅԹՅՈՒՆԻ ԶԱՐՈՒՑՄԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ
ՄԵԽԱՆԻԶՄ

Մի շարք գիտական աշխատանքների տվյալներից և հոդվածի հեղինակների աշխատանքներից բխում է ԵԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՊԱՅԹՅՈՒՆԻ ԶԱՐՈՒՑՄԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄ: Մասնավորապես ցույց է տրված, որ մանրահատիկ մեկուսիչ կապարի նիտրատի բյուրեղների սեղմումը ընթանում է նմուշի էլեկտրականացումով, որը նրա ծակոտիներում և մանրաճեղքերում առաջ է բերում «մասնակի պարպումներ» (ՄՊ): Որոշված են ՄՊ-ի առաջացման և վերացման պայմանները, էներգետիկ և հաճախականային բնութագրերը և էներգիայի կլանման պայմանները:

Առանցքային բառեր. ռեոլոգիական պայթյուն, մամլում, սահք, էլեկտրականացում, մասնիկային լիցքեր, հաճախականային և էներգետիկ սպեկտրներ, էներգիայի կլանում, պայթյունավտանգություն:

V.K. ABRAMYAN, S.P. DAVTYAN, S.N. YENGIBARYAN

ELECTRODYNAMIC MECHANISM of INITIATION « REOLOGICAL EXPLOSION»

Data from several scientific studies prove electrostatics nature of reological exposure. Particularly, it is shown that pressing fine-grained dielectric crystalline lead nitrate is accompanied by electrization of the specimen, which forms "partial discharges" in the pores and splits of the pressed specimen. The conditions of formation, duration of discharges and absorption of the energy are defined and the energetic and frequency characteristics of "partial discharges" are defined as well.

Keywords: reological exposure, pressing, shift, electrization, partial discharges, frequency and energetic spectra, energy absorption, danger of exposure.