

энергия его сгорания находится в ПД главным образом в виде «тепловой» энергии и может быть реализована лишь при больших степенях расширения ПД. При ускорении осколков степень расширения ПД, вероятно, значительно выше величины, оцениваемой по радиусу разрушения оболочки, что, по-видимому, является причиной различия между данными [2, 3] для медных трубок и результатами настоящей работы. Различие в результатах по торцевому и радиальному метанию связано, вероятно, с отставанием зоны догорания Al от фронта ДВ, которое затрудняет передачу вторичной энергии при метании падающей волной. При радиальном метании эта зона догорания «скользит» вдоль оболочки за фронтом ДВ и «участвует» в ее ускорении.

Таким образом, эффект от введения алюминия в ВВ зависит не только от скорости его окисления и времени отбора энергии метаемым телом от ПД, но и от газодинамических условий реализации этой энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев А. Ф., Курбангалина Р. Х.— В кн.: Физика взрыва. № 4.— М.: Изд-во АН СССР, 1955.
2. Finger M., Hornig H. C., Lee E. L. e. a. 5-th Symp. on Detonation. Pasadena, California, 1970.
3. Bjarnholt G. 6-th Symp. on Detonation. Coronado. California, Preprints.
4. Струков Г. В., Еременко Л. Т., Дубнов Л. В. и др.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация.— Черноголовка, 1980.
5. Воскобойников И. М., Воскобойникова П. Ф.— В кн.: Детонация. Материалы II Всесоюз. совещания по детонации.— Черноголовка, 1981.
6. Апин А. Я., Бардин Е. П., Велина П. Ф. Взрывное дело, № 52/9.— М.: Госгортехиздат, 1963.
7. Баум Ф. А., Державец А. С., Санасарян Н. С. и др. Термостойкие взрывчатые вещества и их действие в глубоких скважинах.— М.: Недра, 1969.
8. Mader Ch. L.— In: Basic and Applied Sciences, Univ. Calif. Press, 1979.

*Поступила в редакцию 1/VIII 1986,  
после доработки — 1/XII 1986*

### ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ АЗИДА СВИНЦА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*Ф. И. Иванов, В. Д. Сарычев, Н. А. Урбан*

*(Новокузнецк)*

Детонация азидов свинца при различного вида воздействиях широко изучалась, есть и объяснения механизма этого явления [1—4], но причины, приводящие к инициированию, только в общих чертах можно считать установленными. Это прежде всего касается решающей роли тепловых эффектов в современной теории инициирования и взрыва. Однако тепло может непосредственно не подводиться, поскольку энергия механических, электрических и других воздействий преобразуется в теплоту до инициирования химической реакции, т. е. возникает вопрос — является ли теплота единственным фактором, непосредственно отвечающим за инициирование быстрого разложения? Кроме того, в отличие от большинства твердых ВВ, азиды чувствительны к ударам такой малой интенсивности, что среднего возрастания температуры явно недостаточно для инициирования детонации. Поэтому приходится либо определять механизм локализации энергии в достаточно малом объеме, если пользоваться теорией «горячих точек», либо предлагать альтернативу.

В настоящей статье анализируются экспериментальные результаты по инициированию  $PbN_6$  электрополем, роль напряженно-деформированного состояния на изменение чувствительности к электрическому им-

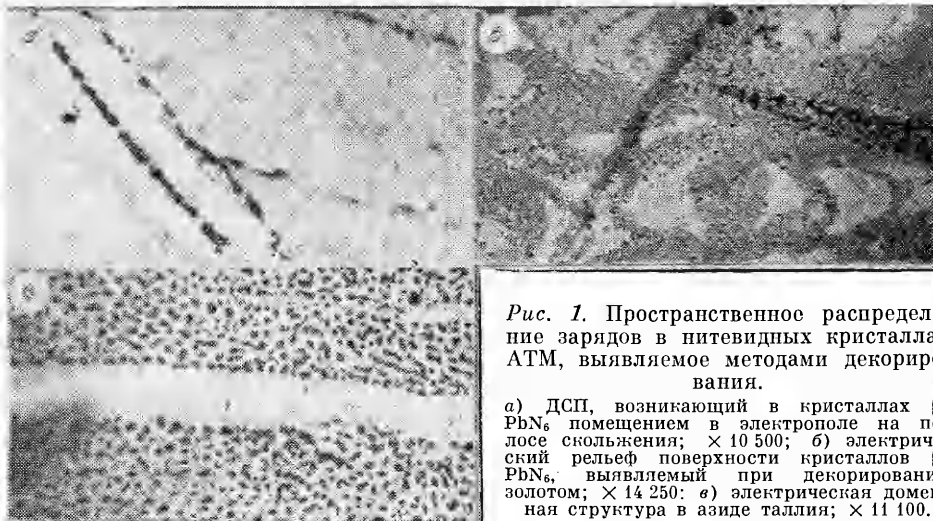


Рис. 1. Пространственное распределение зарядов в нитевидных кристаллах АТМ, выявляемое методами декорирования.

а) ДСП, возникающий в кристаллах  $\beta$ - $\text{PbN}_6$  помещением в электрополе на полосе скольжения;  $\times 10\,500$ ; б) электрический рельеф поверхности кристаллов  $\beta$ - $\text{PbN}_6$ , выявляемый при декорировании золотом;  $\times 14\,250$ ; в) электрическая доменная структура в азиде таллия;  $\times 11\,100$ .

пульсу [5], обнаруженные пиро- и пьезоэлектрические свойства кристаллов азиды свинца [6, 7]. Рассматриваются результаты, связанные с неоднородным распределением заряда в объеме и на поверхности кристаллов [8], позволяющие обобщить механизм разложения в электрополе<sup>1</sup> на процессы инициирования детонации ударом и объяснить возникновение спонтанных взрывов.

Объекты исследования: идеальные образования — нитевидные кристаллы азиды свинца моноклинной сингонии ( $\beta$ - $\text{PbN}_6$ ) с поперечными размерами  $(100 \div 50) \times (20 \div 5)$  мкм, длиной до 2 см, плотностью структурных дефектов (дислокаций) не более 40 на кристалл [9]. Сущность ЛХЭ [4—6] заключается в ионизации кристаллической решетки азиды тяжелого металла ( $\beta$ - $\text{PbN}_6$ ), помещенного в сильное электрическое поле, по туннельному или ударному механизму. Электрическое поле напряженностью  $E = 10^9 - 10^{10}$  В/м, необходимое для ионизации, концентрируется в локальных участках кристалла — доменах сильного поля (ДСП). Дальнейшее развитие процесса связано с взаимодействием продуктов ионизации в микроплазменном состоянии (быстрый распад) либо путем последовательного захвата на дефектах кристаллической решетки (медленное разложение).

Определяющим в ЛХЭ является создание ДСП. Некоторые физические процессы, приводящие к образованию ДСП, проанализированы в работах [5, 10, 11]. Это приконтактные явления, связанные с барьерами типа Шоттки [10] или Роуза [11], а также барьеры, возникающие в области дислокационных полос скольжения [5] и являющиеся эффективными концентраторами электрического поля (рис. 1, а).

Тождественность областей локального усиления внешнего электрического поля с ДСП доказана экспериментально независимыми измерениями сдвига края полосы собственного поглощения (эффекта Келдыша — Франца) и использованием методов декорирования [5]. Развитие методик декорирования и электронной микроскопии (применительно к АТМ), включающих декорирование золотом, хлористым серебром, и получение реплик с поверхности впервые позволило визуализировать сложные элементы электрического микро- и макрорельефа поверхности азидов (рис. 1, б, в) и проанализировать связь электрического рельефа поверхности с полями упругих напряжений у дислокаций или в области полос скольжения (рис. 1, б; 2, а). Светлые отдекорированные области на фотографии соответствуют положительному пространственно-закрепленному заряду, темные — отрицательному, т. е. даже в отсутствие электрического

<sup>1</sup> Механизм предложен в [4] и назван лавино-химическим эффектом (ЛХЭ).

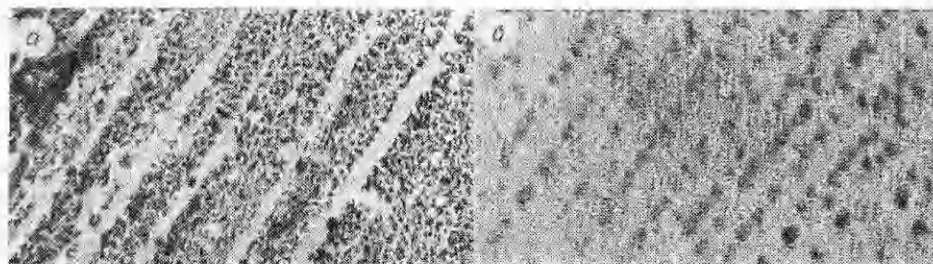


Рис. 2. Декорирование золотом нитевидных кристаллов  $\beta$ - $\text{PbN}_6$  в области полосы скольжения.

а) состаренная полоса скольжения;  $\times 20\,550$ ; б) свежая полоса скольжения;  $\times 18\,750$ .

поля кристаллы АТМ представляют собой систему электрически заряженных доменов.

Механизм образования таких доменов может быть различным: диффузионно-дрейфовый, разделение заряженных точечных дефектов (вакансий, междоузельных атомов) в полях упругих напряжений, создаваемых структурными дефектами (дислокациями, полосой скольжения или зародышами новой фазы). Существование данного механизма можно считать доказанным, так как если отдекорировать свежую полосу скольжения (рис. 2, б), то областей и пространственного разделения зарядов не наблюдается в отличие от состаренных кристаллов (рис. 2, а). Не исключена возможность механизма спонтанной избирательной поляризации областей кристаллов АТМ. В пользу этого свидетельствует ряд экспериментальных результатов — уменьшение температуры кристалла в электрополе [7], связанное с проявлением электрокалорического эффекта [12], присущего пироэлектрическим кристаллам, и обнаруженного ранее обратного пьезоэлектрического эффекта [6]. При макроскопическом рассмотрении кристаллы АТМ представляются образованиями из электрически заряженных микродоменов.

Оценки заряда по плотности центров декорирования и по расчетам траектории заряженных декорирующих частиц в поле периодического потенциала составили  $10^{10} - 10^{12}$  см<sup>-2</sup>, что соответствует напряженностям поля на границе разноименно заряженных областей  $10^7 - 10^9$  В/м. Полученные значения  $E$  соответствуют условиям ударной ионизации носителями заряда, что позволяет объяснить механизм спонтанных взрывов при кристаллизации  $\text{PbN}_6$  с позиций ЛХЭ, а также по-новому взглянуть на инициирование детонации ударом. Расчеты показывают, что механическое напряжение  $\sigma_0 = EY/d$ , необходимое для создания электрополя, удовлетворяющего условию ЛХЭ ( $E = 10^9$  В/м), только за счет прямого пьезоэффекта и при известных [6] модуле Юнга  $Y = 1,8 \cdot 10^{10}$  Н/м, пьезомодуле  $d = 5 \cdot 10^{10}$  В/м составляет  $3,6 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>, что по порядку величины совпадает с критическим напряжением механического ударного инициирования детонации в азиде свинца. Следовательно, кристаллы  $\text{PbN}_6$  с развитой доменной структурой инициируются при механическом ударе сравнительно легко из-за электрического пробоя в ДСП, т. е. реализуется механизм ЛХЭ.

Авторы признательны Г. И. Дисглеру за ряд ценных замечаний, связанных с декорированием поверхности, и Ю. Н. Сухову за помощь в электронно-микроскопических исследованиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Боуден Р. Р., Иоффе А. Р. Быстрые реакции в твердых телах.— М.: ИЛ, 1962.
2. Афанасьев Г. Г., Бобылев В. М. Иницирование взрывчатых веществ ударом.— М.: Наука, 1968.
3. Кук М. А. Наука о промышленных взрывчатых веществах.— М.: Недра, 1980.
4. Сухущин Ю. Н., Захаров Ю. А., Иванов Ф. И. Химия высоких энергий, 1973, 7, 3, 261.
5. Иванов Ф. И., Лукин М. А., Зуев Л. Б. и др. ФГВ, 1984, 20, 3, 86.

6. Иванов Ф. И., Лукин М. А., Зуев Л. Б. и др. Материалы I Всесоюз. симп. по макроскопической кинетике и химической газодинамике. Т. 2.—Алма-Ата, 1984.
7. Сухушин Ю. И., Иванов Ф. И., Захаров Ю. А.— В кн.: Физика диэлектриков и перспективы ее развития.—Л., 1973.
8. Иванов Ф. И., Зуев Л. Б., Урбан И. А. и др. Изв. СО АН СССР. Сер. хим., 1983, 5, 62.
9. Иванов Ф. И., Зуев Л. Б., Лукин М. А. и др. Кристаллография, 1983, 28, 1, 194.
10. Mark P., Gord T. J. Solid State Chem., 1975, 15, 79.
11. Захаров Ю. А., Иванов Ф. И., Сухушин Ю. И.— В кн.: Кинетика и механизм химических реакций в твердом теле.— Минск, 1975.
12. Шувалов Л. А., Урусовская А. А., Желудев И. Г. и др. Современная кристаллография. Т. 4. 1981.

*Поступила в редакцию 30/IX 1986*

## К МЕХАНИЗМУ ВЗРЫВОВ В ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

*Б. Е. Гельфанд, С. М. Фролов, С. А. Цыганов  
(Москва)*

Эффективная и надежная эксплуатация газотурбинных газоперекачивающих агрегатов (ГПА) магистральных газопроводов связана с вопросами пожаро- и взрывобезопасности рабочего процесса компрессоров и нагнетателей. Возгорания и пожары в нагнетателе, кроме перегрева деталей тракта, могут вызвать неустойчивую работу с автоколебаниями давления и расхода рабочего тела. Сопровождающие этот процесс помпажные удары и интенсивные волны давления могут привести к обрывам лопаток, разрывам дисков и т. д.

Экспериментальное исследование последствий загораний, пожаров и взрывов в ГПА трудоемко и сопряжено с большими затратами. В связи с этим большое значение приобретают вопросы моделирования газопроводных систем и исследования процессов, возникающих при установившихся и переходных режимах эксплуатации ГПА, для прогнозирования аварийных ситуаций. В настоящее время теоретическое исследование процессов в ГПА возможно лишь в приближенной постановке задачи. Как правило, ступени компрессоров или нагнетателей замещаются эквивалентными активными дисками, моделирующими устойчивую и неустойчивую работу агрегата и передающими воздействие лопаточных венцов на поток [1]. В [2] предложена квазиодномерная модель для анализа закономерностей распространения сильных возмущений давления в тракте силовой установки в приближении вязкого потока. Приведение системы уравнений задачи к упрощенным одномерным уравнениям движения идеального сжимаемого газа в [3] не привело к значительным качественным отклонениям расчетных динамических реакций компрессора от экспериментально измеренных.

Исследование проблемы пожаро- и взрывобезопасности рабочего процесса в нагнетателе ГПА предполагает включение в модель дополнительных уравнений, описывающих протекание химических реакций в тракте. Ситуация, когда в рабочем объеме возникают условия для протекания химических реакций, возможна при подсосе воздуха в приемную линию ГПА. Температура за последней ступенью нагнетателя может оказаться достаточной для самовоспламенения смеси. Кроме того, если состав газовой смеси находится во взрывных пределах, то может произойти возгорание смеси от горячих поверхностей в тракте нагнетателя, например, подшипника ротора, разогревающегося от недостатка смазки, и т. д.

Рассмотрим задачу о движении газовой смеси через многоступенчатый осевой нагнетатель. Ступени имеют одинаковую характе-