

ПВДФ-ДАТЧИК ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2008 г. В. А. Борисёнок, В. Г. Симаков, В. Г. Куропаткин, В. А. Брагунец,
В. А. Волгин, В. Н. Ромаев, В. В. Тукмаков, В. А. Кручинин,
А. А. Лебедева, Д. Р. Гончарова, М. В. Жерноклетов

*РФЯЦ–ВНИИ экспериментальной физики
Россия, 607188, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37*

Поступила в редакцию 06.09.2007 г.

Приведены технологии изготовления и поляризации датчика динамического давления на основе полимерного сегнетоэлектрика поливинилиденфторида (ПВДФ). Даны результаты теоретических и методических исследований датчика, результаты регистрации с его помощью профилей давления за фронтом ударной волны в твердых материалах.

PACS: 62.50.+р

Зависимость давления (напряжения) от времени $p(t)$ в ударно-сжатых веществах имеет большое значение для описания волновых процессов. Для ее измерения разработан ряд методов с использованием датчиков давления, работающих на разных физических принципах [1]. Среди них наибольшее распространение получили пьезорезистивные и пьезоэлектрические датчики.

Пьезоэлектрические датчики достаточно широко используются в практике ударно-волнового эксперимента. Хорошо известны кварцевый датчик, который явился первым устройством с наносекундным временным разрешением, и датчики на основе сегнетоэлектрика ниобата лития [2]. Они используются для измерений до давлений ~4.0 и ~1.5 ГПа соответственно. С относительно недавнего времени лидером среди пьезоэлектрических датчиков стал датчик на основе сегнетоэлектрического полимера поливинилиденфторида (ПВДФ), предложенный Ф. Бауэром [3, 4]. К настоящему времени проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований собственно датчика, а также регистрация с его помощью зависимостей $p(t)$ в твердом теле.

Цель данной работы – показать экспериментальный потенциал ПВДФ-датчика на примере результатов, полученных в РФЯЦ–ВНИИЭФ, публикаций Ф. Бауэра и других авторов.

КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКОВ

В основном используют датчик, изображенный на рис. 1а. Зона перекрещивания электродов является чувствительным элементом. Датчик такой конструкции стандартизован в Sandia National Laboratories (США) [5]. В РФЯЦ–ВНИИЭФ, наряду с указанным выше, применяется также датчик

торцевого типа (рис. 1б). В ряде случаев такой датчик более удобен на практике.

ТЕХНОЛОГИЯ

Для изготовления датчиков используется пленка ПВДФ толщиной 10–30 мкм. Металлические электроды наносятся методом напыления. У стандартизованного датчика [5] электрод состоит из подслоя платины (0.05 мкм) и слоя золота или алюминия (0.25 мкм). ПВДФ-пленка закрывается изолирующей тефлоновой пленкой толщиной 12.7 мкм.

В РФЯЦ–ВНИИЭФ используется ПВДФ-пленка Ф-2МЭ (НПО “Пластполимер”, С.-Петербург) [6]. Электроды изготавливаются из меди, их толщина ~0.5 мкм. Защитное покрытие из полимера (при необходимости) формируется на всей по-

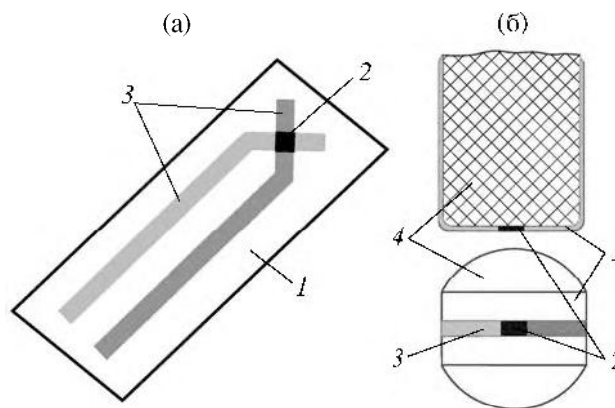


Рис. 1. Изображение плоского (а) и торцевого (б) ПВДФ-датчиков. 1 – пленка ПВДФ, 2 – чувствительный элемент, 3 – токовыводы, 4 – акустический отвод.



верхности датчика методом осаждения из газовой фазы.

Полимерная пленка ПВДФ обладает сравнительно низкой температурой стеклования $\approx 100^\circ\text{C}$, поэтому на процесс напыления накладываются температурные ограничения сверху. В то же время электроды должны обладать хорошей адгезией, что достигается обычно повышением температуры подложки при напылении. Кроме того, пленка после напыления электродов должна сохранить пьезосвойства.

Из многочисленных методов напыления был выбран магнетронный способ [7], как наиболее гибкий в отношении параметров технологического процесса. Модернизация магнетронной напылительной установки разработки РФЯЦ-ВНИИЭФ позволила обеспечить выполнение требуемых свойств, предъявляемых к ПВДФ-датчикам. Блок из 7–10 датчиков располагали на барабане, вращающемся относительно магнетрона со скоростью, обеспечивающей оптимальный для получения хорошей адгезии нагрев пленки в процессе напыления меди. Параметрами оптимизации процесса напыления являлись также:

- напряжение между электродами магнетрона и ток разряда в плазме;
- уровень вакуума в камере, определяющего структуру металлической пленки и ее внутреннее напряженное состояние;
- скорость напыления Си на подложку как функция напряжения на катоде.

В настоящее время на практике используется несколько способов защиты электродов. Для защиты нанесенных электродов в датчиках фирмы Dupasen Inc. (США) [8] используются изолирующие прокладки из каптона толщиной 25 мкм. По разработанной в ИПХФ РАН (Черноголовка) [9] технологии изоляцию осуществляют наклеиванием с обеих сторон чувствительного элемента полиамидной пленки ПМ-1 толщиной 12 мкм, обладающей высокой электрической и механической прочностью, водостойкостью и механической адгезией в клеевом соединении с ПВДФ.

Приведенные способы достаточно сложны, требуют многоходовых технологических операций и имеют ограничения по минимальной толщине. Мы использовали метод поли-пара-ксилиленовых (ППК) покрытий, широко используемый в РФЯЦ-ВНИИЭФ и имеющий определенные преимущества перед перечисленными выше способами.

Во-первых, образование ППК-покрытий из газовой фазы происходит без промежуточного обра-

зования жидкого состояния. В присутствии жидкости возникают силы поверхностного натяжения, что вызывает отслаивание покрытий и их разрушение вблизи острых краев и отверстий в подложке. Поэтому при осаждении из газа улучшается качество покрытия в щелях, отверстиях и других труднодоступных местах. Во-вторых, ППК-покрытия формируются одновременно по всей поверхности независимо от ее профиля и образуют на ней защитный однородный по толщине слой. Важной особенностью ППК-покрытий является отсутствие в них внутренних напряжений, которые обычно возникают из-за различного значения коэффициента термического расширения покрытия и подложки в том случае, когда покрытие затвердевает при повышенных температурах. Несомненным преимуществом является и относительно малая толщина осажденных ППК-покрытий, которая может составлять десятые доли микрометра.

ППК, получаемый по технологии РФЯЦ-ВНИИЭФ, имеет следующие характеристики: температура плавления кристаллической фазы 400°C ; предел прочности при растяжении 630 кг/см^2 ; теплопроводность $0.035 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$; коэффициент теплового расширения $6.9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; электрическая прочность 240 кВ/мм ; молекулярная масса 500000 ; плотность $1.1\text{--}1.13 \text{ г/см}^3$.

После нанесения электродов и защитного покрытия датчик поляризуется в знакопеременном электрическом поле по методу [10]. Для датчика [5] остаточная поляризация установлена в пределах $P_r^0 = 9.2 \pm 0.2 \text{ мкКл/см}^2$, для датчика РФЯЦ-ВНИИЭФ $P_r^0 = 7 \text{ мкКл/см}^2$. Время процесса поляризации 2–3 ч.

Описанные технологии позволяют изготавливать датчики со стабильными характеристиками.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Чувствительным элементом датчика является плоский конденсатор, заполненный поляризованным ПВДФ. При приложении механической нагрузки поляризация материала изменяется. В работе [11] предложена физическая модель ПВДФ-датчика, основанная на предположении, что приращение поляризации есть линейная функция сжатия материала. В рамках модели получены следующие выражения для плотности тока $j(t)$ и плотности заряда $Q(t)$, генерируемых датчиком, и его амплитудной характеристики $p(\eta)$:

$$j(t) = -\frac{P_r^0 \rho_0 c_0^2}{2} \left[\frac{2(s-1)^2 sp(t) + (1-s^2) \sqrt{4sp(t) + \rho_0 c_0^2} + (s^2+1) \rho_0 c_0^2}{[(s-1)^2 p(t) - \rho_0 c_0^2]^2 \sqrt{(4sp(t) + \rho_0 c_0^2) \rho_0 c_0^2}} \right] \frac{dp(t)}{dt} = f(p) \frac{dp}{dt}; \quad (1)$$



$$Q(t) = -\frac{P_r^0 2(s-1)p(t) + \rho_0 c_0^2 - \sqrt{(4sp(t) + \rho_0 c_0^2)\rho_0 c_0^2}}{(s-1)^2 p(t) - \rho_0 c_0^2}; \quad (2)$$

$$p(\eta) = \frac{\rho_0 c_0^2 (1 + \eta)\eta}{[1 - \eta(s-1)]^2}, \quad (3)$$

где ρ_0 и c_0 – начальные плотность и скорость звука в ПВДФ соответственно; p – давление; t – время; $\eta = Q(t)/P_r^0$; s – коэффициент при массовой скорости u [км/с] в соотношении между волновой скоростью D [км/с] и массовой скоростью для ПВДФ, которое согласно [9], имеет вид $D = 2.16 + 1.68u$ ($0.2 \leq u \leq 2.6$).

Выражения (1) и (2) служат для расчета характеристик электрического отклика датчика на механическое воздействие при подготовке эксперимента, если известна (например, по результатам компьютерного моделирования эксперимента) зависимость $p(t)$. Формула (3) используется для определения $p(t)$ по измеренному отклику датчика.

Отметим, что, в отличие от феноменологических моделей датчика [9, 12, 13], полученные выражения не содержат подгоночных параметров. Здесь и далее рассматривается одноосное нагружение ПВДФ.

СХЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ

Из выражения (3) следует, что для определения $p(t)$ в эксперименте нужно зарегистрировать $Q(t)$. Для этого используют две схемы регистрации: тока (рис. 2а) и заряда (рис. 2б).

При регистрации тока постоянная времени $\tau = C_d R_n$ должна быть много меньше длительности фронта токового импульса. Обычно $C_d \leq 100$ пФ, $R_n = 0.1$ – 1.0 Ом и расчетное значение $\tau = 10^{-11}$ – 10^{-10} с. $Q(t)$ получают интегрированием зависимости тока от времени. При регистрации заряда должно выполняться условие $C_n \gg C_d$. Обычно C_n выбирают равной ~ 0.1 мкФ. Для трансляции сигнала от датчика до регистратора используют

радиочастотный коаксиальный кабель с минимальными потерями, длину которого делают минимально возможной. Регистрируют сигналы цифровыми осциллографами с полосой пропускания 0.5–1.0 ГГц. В случаях, когда не предъявляются высокие требования к регистрации фронтальной части импульса давления, в схеме рис. 2б в качестве интегратора используют усилитель заряда [14].

АМПЛИТУДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Для использования датчика в эксперименте необходимо экспериментальное подтверждение справедливости выражения (3), с помощью которого получают конечный результат: зависимость давления от времени. Результаты экспериментального определения $p(Q)$ в диапазоне давлений до 36 ГПа приведены в [5, 8, 10–12, 15–20]. В работах [5, 8, 10, 16–18] эксперименты проведены на легкогазовой пушке. Мишени и ударники изготавливали из материалов с хорошо известными ударными адиабатами (кварц (z -срез), сапфир (z -срез) и т.п.). В работе [11] данные получены во взрывных опытах, в работах [19, 20] калибровка проводилась при квазистатическом нагружении.

Анализ результатов показал, что экспериментальные точки при давлениях >3 ГПа хорошо описываются теоретической зависимостью (3), если использовать D - u -соотношение для ПВДФ в виде [9]: $D = 2.16 + 1.68u$. Плотность ПВДФ $\rho_0 = 1.8$ г/см³, скорость звука $c_0 = 2.16$ км/с [11].

При более низких давлениях наблюдается различие теории и эксперимента, которое в области давлений 10^4 – 10^7 Па достигает $\sim 40\%$. Это различие устраняется, если в (3) принято $c_0 = 1.8$ км/с и

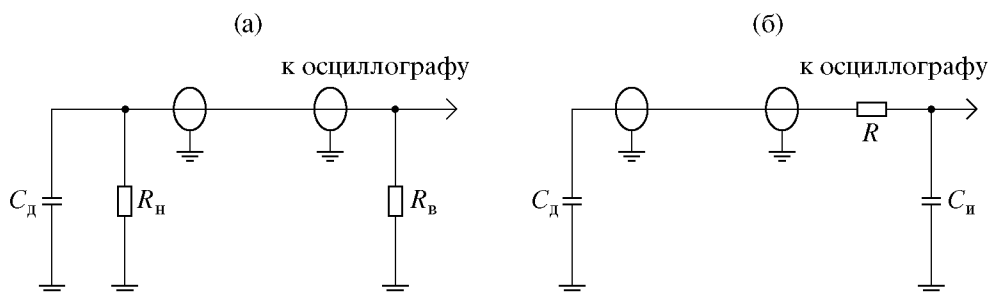


Рис. 2. Схемы регистрации тока (а) и заряда (б). C_d – емкость датчика; R_n – сопротивление нагрузки; R_b – согласующее сопротивление; R – активное сопротивление; C_n – интегрирующая емкость.



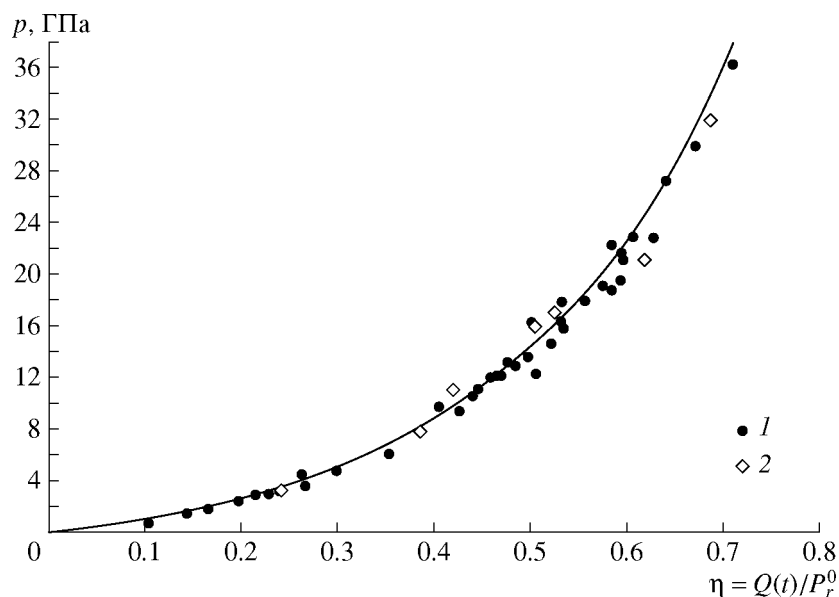


Рис. 3. Зависимость $p(Q/P_r^0)$ для ПВДФ-датчика: 1 – данные Sandia National Laboratories и Бауэра; 2 – РФЯЦ-ВНИИЭФ; линия – аналитическая зависимость.

$s = 1.95$. Такая ситуация, когда реальная скорость звука в области низких давлений меньше скорости, определенной экстраполяцией $D-u$ -соотношения, измеренного при высоких давлениях, типична для полимеров [21]. В нашем случае уменьшение c_0 составляет $\sim 17\%$.

Результаты исследований представлены на рис. 3, откуда следует, что аналитическая зависимость для амплитудной характеристики хорошо описывает эксперимент. Отметим, что при давлениях ≤ 0.1 ГПа хорошим приближением для выражения (3) является линейная функция $p = \rho_0 c_0^2 \eta$.

Выше рассмотрены экспериментальные данные, полученные при давлениях до 36 ГПа. В работе [21] эксперимент проведен до 60 ГПа. В этой работе наблюдалась аномалия на зависимости $p(\eta)$ при $p \approx 28$ ГПа. Авторы [22] связывают ее с фазовым превращением в ПВДФ при таком давлении. В последующих исследованиях других авторов [18] в этой области давлений такой эффект не наблюдался. Поэтому вопрос наличия или отсутствия упомянутой аномалии следует считать открытым.

Отметим, что максимальное давление, при котором зарегистрирован электрический отклик ПВДФ, составляет сегодня ~ 100 ГПа [23].

СТРУКТУРА ВЫХОДНОГО СИГНАЛА

При регистрации сигнала датчика по схеме рис. 2а ток пропорционален производной давления по времени (1). Поэтому структура выходно-

го сигнала будет определяться акустической жесткостью среды, в которой размещен датчик. Если жесткость среды выше акустической жесткости ПВДФ, то датчик следует рассматривать как тонкую мягкую прокладку, в противоположном случае – как тонкую жесткую прокладку.

Хорошо известно, что в конечном итоге в таких системах установится давление, равное давлению во фронте волны в среде. Однако это состояние достигается разными путями. Мягкая прокладка сжимается серией ударных волн, жесткая подвергается попеременному воздействию ударных волн и волн разрежения. Так как ток датчика пропорционален dp/dt , то это должно отражаться на структуре выходного сигнала. Например, при воздействии “ступеньки” давления сигнал “мягкого” датчика должен представлять собой последовательность однополярных импульсов, сигнал “жесткого” – быть разнополярным. Такая картина и наблюдается в эксперименте [11], что полностью соответствует классическим представлениям физики ударных волн.

При размещении датчика на границе раздела двух сред, одна из которых акустически согласована с датчиком (датчик с акустическим отводом), реверберация волн отсутствует, и электрическая реакция датчика на “ступеньку” давления должна быть однополярным “гладким” импульсом. В качестве материала акустического отвода можно использовать фторопласт, ударная адиабата которого близка к адиабате ПВДФ.

Из сказанного выше следует, что возможны два варианта размещения датчика: непосред-



ственно в исследуемом веществе и на границе раздела исследуемого вещества и акустического отвода. В первом случае давление измеряется в веществе, однако реверберация волн не позволяет регистрировать фронтальную часть импульса давления. Во втором случае такая возможность имеется, но давление измеряется в материале отвода, и для его определения в исследуемом веществе необходимо знать ударные адиабаты вещества и материала отвода.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОТКЛИК

ПВДФ, как и любой другой сегнетоэлектрик, обладает пьезоэлектрическим эффектом, т.е. зависимостью поляризации от температуры. При однородном нагреве различают первичный (при отсутствии деформаций) и вторичный (пьезоэффект при тепловой деформации) пьезоэлектрические эффекты. Первичный эффект при сжатии ПВДФ в диапазоне давлений до 36 ГПа не дает вклада в отклик датчика. Это следует из того, что зависимость $p(\eta)$, полученная без учета нагрева ПВДФ в ударной волне, хорошо описывает эксперимент (рис. 3). Вторичный пьезоэлектрический эффект должен проявляться в волнах разгрузки.

ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Принцип действия ПВДФ-датчика основан на пьезоэлектрическом эффекте, который практически безынерционен. Поэтому в качестве оценки для временного разрешения можно выбрать время пробега волны по толщине пленки ПВДФ. При низких давлениях ($D \approx c_0$) оно составляет 5–15 нс для толщин 10–30 мкм соответственно. При высоких давлениях ($D > c_0$) временное разрешение должно быть выше указанных значений.

Наиболее ярким подтверждением высокого временного разрешения датчика является опыт Бауэра [14], в котором одновременно проводились измерения ПВДФ-датчиком и лазерным интерферометром. Сравнение зависимостей давления и скорости свободной поверхности от времени показало, что временное разрешение датчика не хуже, чем у интерферометрической системы ($\sim 10^{-9}$ с).

УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ

Собственное сопротивление датчика R_d при толщине пленки 10–30 мкм и площади электрода 4 мм² составляет при нормальных условиях несколько сотен мегаом. Появление при сжатии ударно-индуцированной электропроводности приведет к уменьшению R_d и тем самым может повлиять на результат измерения.

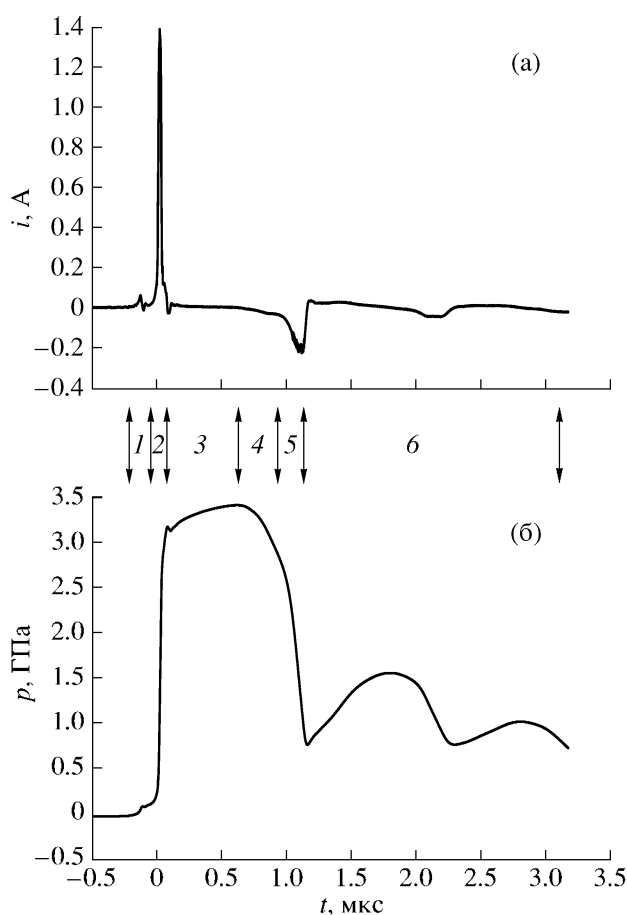


Рис. 4. Регистрация профиля давления в алюминии: **а** – осциллограмма тока, **б** – зависимость давления от времени. Толщина мишени 5 мм, ударника – 2.9 мм; подлетная скорость ударника 450 м/с. 1 – упругий предвестник, 2 – пластическая волна, 3 – зона постоянного течения, 4 – упругая разгрузка, 5 – пластическая разгрузка, 6 – откольное разрушение образца.

Этот вопрос исследован в работе [22]. Показано, что при давлении ниже 40 ГПа $R_d \gg 50$ Ом, при $p = 60$ ГПа – $R_d \approx 128$ Ом. Отсюда следует, что использование в экспериментах сопротивления нагрузки в несколько ом не приводит к утечке генерируемого датчиком заряда через его объем.

ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Относительную погрешность определения давления при использовании ПВДФ-датчика мы оцениваем сегодня как $\pm 10\%$. Оценка сделана исходя из базовой погрешности измерения напряжения цифровыми осциллографами TDS 5052, TDS 3054B (3%), погрешности измерения остаточной поляризации по петле гистерезиса ($\sim 4\%$) и погрешности определения амплитудной характеристики ($\sim 3\%$). Эта цифра уточняется по мере набора экспериментальной статистики.



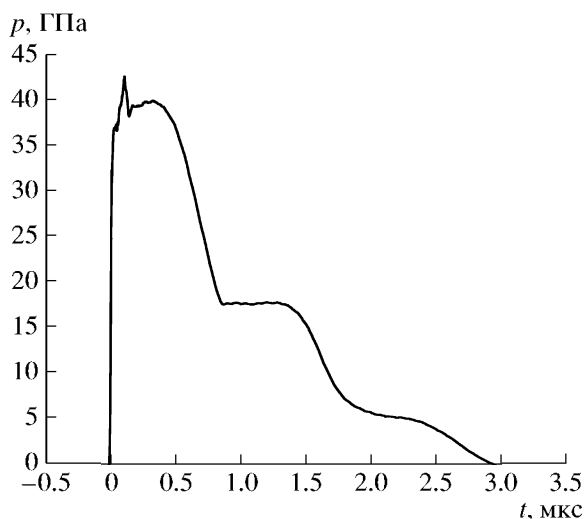


Рис. 5. Профиль давления в меди. Толщина образца 6 мм, ударника – 2 мм; подлетная скорость ударника 1.6 км/с.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

С целью демонстрации возможностей использования ПВДФ-датчика в ударно-волновом эксперименте приведем описание нескольких опытов по регистрации зависимости давления от вре-

мени в алюминии, меди, оргстекле, стали и титане.

Ударная волна в образцах из алюминия, меди и оргстекла формировалась ударом пластины из того же материала. Профили давления измеряли ПВДФ-датчиками торцевого типа (рис. 1б). Образцы из стали (Ст.3) и технически чистого титана (ВТ1-0) размещали на поверхности экрана взрывного плосковолнового нагружающего устройства. Ударную волну в экране формировали продуктами взрыва тротила (нагружение через воздушный зазор 5 мм).

Для регистрации встречной разгрузки в опыте со сталью плоский ПВДФ-датчик (рис. 1а) устанавливали в объеме материала: между двумя образцами диаметром 60 мм и толщинами 6 мм (со стороны нагружения) и 4 мм. В опытах с титаном использовали торцевой датчик. Во всех случаях толщина ПВДФ-пленки была 20 мкм, размер чувствительного элемента датчика 2 × 2 мм. В экспериментальной сборке датчик механически прижимался к полированной поверхности образца. Для устранения возможных воздушных зазоров место установки смачивалось очищенным, осушенным и обезгаженным трансформаторным маслом. Сигнал с датчика регистрировали цифровым осциллографом TDS 5052 (полоса пропускания 500 МГц). Длина измерительных линий (РК-

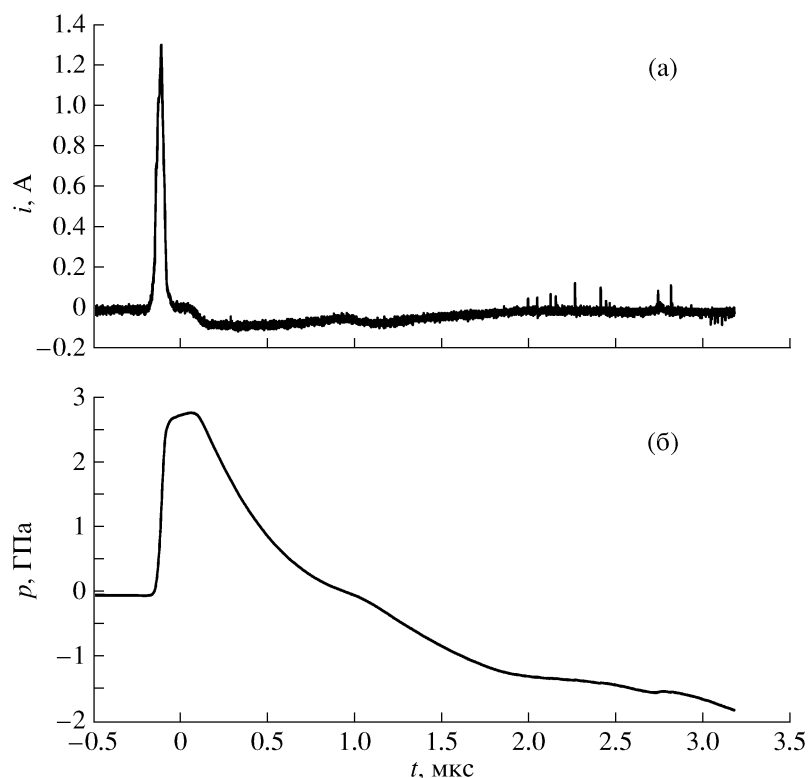


Рис. 6. Регистрация профиля давления в оргстекле: **а** – осциллограмма тока, **б** – зависимость давления от времени. Толщина мишени 2.2 мм, ударника – 1.1 мм; подлетная скорость ударника 1.35 км/с.



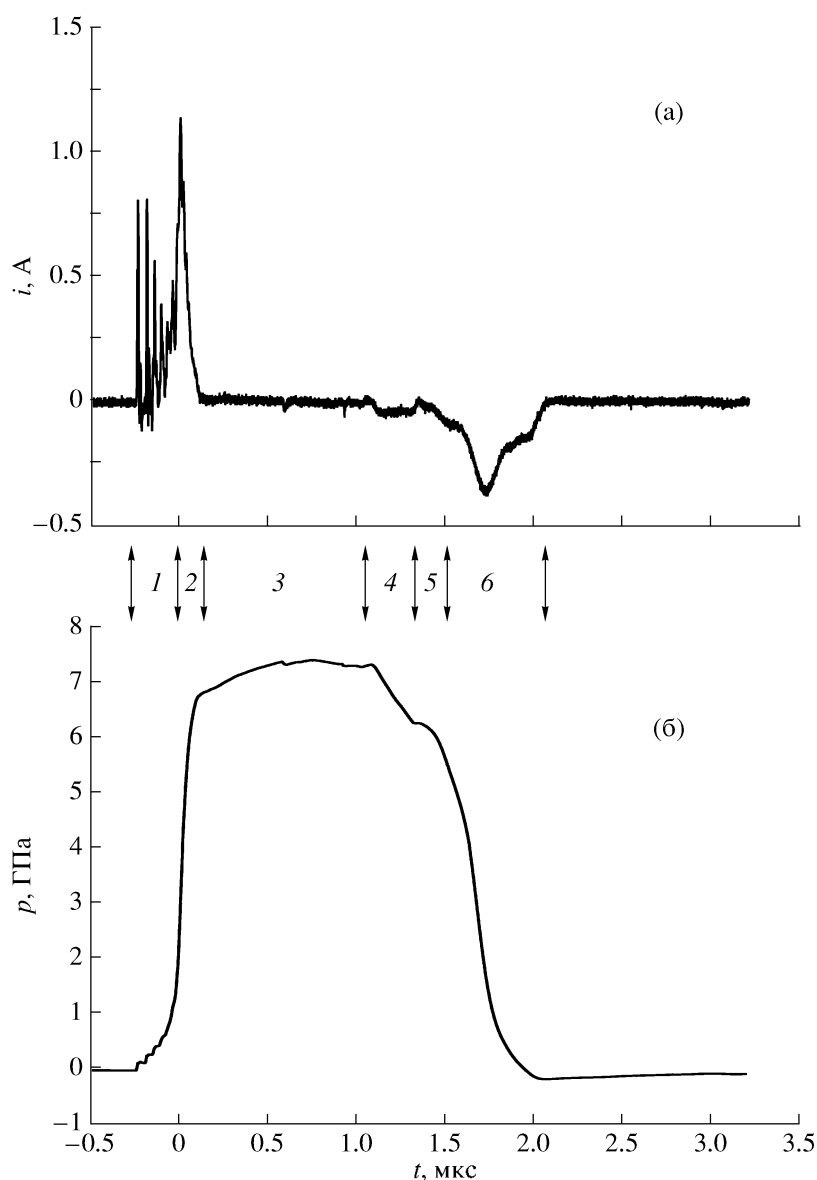


Рис. 7. Регистрация профиля давления в стали Ст.3: **а** – осциллограмма тока, **б** – зависимость давления от времени. 1 – упругий предвестник; 2 – пластическая волна; 3 – зона постоянного течения; 4 – упругая разгрузка 1; 5 – упругая разгрузка 2; 6 – пластическая разгрузка.

50-9-12) 3 м (алюминий) и 8–10 м в остальных опытах. Измерения проводились в токовом режиме (рис. 2а): сопротивление нагрузки датчика 2 Ом, постоянная времени измерительного канала $\approx 10^{-10}$ с. Результаты измерений приведены на рис. 4–рис. 8.

Структура зависимости $p(t)$ для алюминия АД-1 (рис. 4) следующая: упругий предвестник – пластическая волна – зона постоянного течения – упругая волна разрежения – пластическая волна разрежения – откольное разрушение образца. Особенностью ПВДФ-датчика является то, что его ток пропорционален производной давления по времени (см. выражение (1)). Т.е. датчик “диф-

ференцирует” реальную зависимость $p(t)$ в исследуемом материале. Поэтому на зарегистрированной в режиме измерительной цепи, близком к короткозамкнутому, осциллограмме тока (рис. 4а) четко выражены временные интервалы, относящиеся к каждой из вышеназванных составляющих $p(t)$. Это делает ПВДФ-датчик удобным инструментом для определения скоростей звука в сжатом материале. Используя технику $x-t$ -диаграмм, можно легко получить формулы для расчета этих скоростей. В качестве примера укажем, что оценки, проведенные по результатам данного опыта, дают для скоростей звука следующие значения: продольная упругая $c_l = 7.2$ км/с, объемная



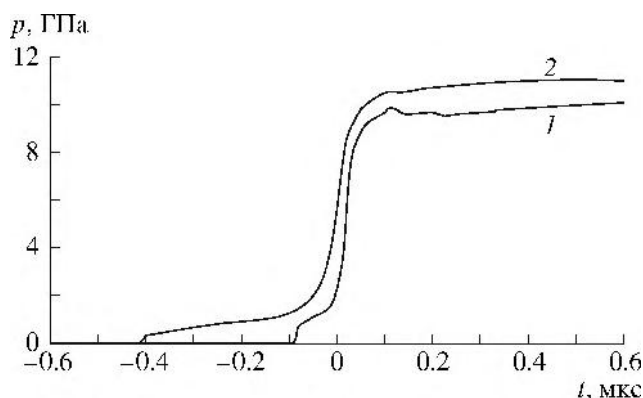


Рис. 8. Регистрация профиля давления в титане. 1 – толщина образца 4 мм, 2 – 15 мм.

$c_b = 5.6$ км/с. Отметим, что расчетная величина давления в алюминии составила 3.4 ГПа. Расчет проведен по измеренной скорости ударника и адиабате алюминия: $D = 5.333 + 1.356u$ [1].

В опытах с медью (рис. 5) и оргстеклом (рис. 6) расщепления волны разрежения на упругую и пластическую составляющие не зарегистрировано. Значения нагружающих давлений составили ~40 ГПа (Cu) и 2.8 ГПа (ПММА). Аномалия (выброс) на зависимостях $p(t)$ в меди и титане (рис. 8) – результат недостаточно хорошего согласования измерительной линии и осциллографа. Отрицательная часть на зависимости $p(t)$ для оргстекла объясняется проявлением вторичного пьезоэлектрического эффекта в ПВДФ. Генерирование электрического заряда после перехода $p(t)$ через ноль происходит за счет пьезоэффекта при тепловом расширении ПВДФ-пленки. Момент перехода $p(t)$ через ноль четко выражен на осциллограмме тока (рис. 6а). Аналогичный эффект наблюдался также в опытах с оргстеклом при регистрации встречной разгрузки ($p = 9$ ГПа) и с фторопластом ($p = 20$ ГПа).

В опытах с металлами отрицательная часть $p(t)$ отсутствует при давлениях нагружения до 40 ГПа как при размещении датчика на границе раздела исследуемый материал – фторопласт (интервал 5 на рис. 4), так и в объеме металла (рис. 7). По-видимому, описанный эффект может быть использован для измерения температуры материалов. Принципиальная возможность этого нами в настоящее время исследуется.

В опыте с железом (рис. 7) датчиком, размещенным в объеме материала, зарегистрированы упругий предвестник, пластическая волна, две упругих и пластическая волны разрежения. Отметим, что форма $i(t)$ и $p(t)$ на рис. 7 соответствует результатам теоретического рассмотрения работы датчика, приведенным выше. По оценкам, величины продольных упругих и объемной скоростей звука равны $c_{11} = 5.86$ км/с, $c_{12} = 6.5$ км/с,

$c_b = 5.0$ км/с. Амплитуда нагружающей волны ~7.5 ГПа.

В экспериментах с титаном при нагружении его ударной волной с амплитудой ~10.5 ГПа зарегистрирована двухволновая структура: упругий предвестник + пластическая волна (рис. 8). Отметим слабую зависимость амплитуды упругого предвестника от толщины образца. Последняя варьировалась от 1.4 до 20 мм.

Приведенные в данной работе данные позволяют характеризовать методику ПВДФ-датчика сегодня следующим:

- есть технологическая база для изготовления датчиков со стабильными характеристиками;
- развита физическая модель, аналитически описывающая электрический отклик;
- амплитудная характеристика датчика обоснована теоретически, правильность обоснования подтверждена экспериментально;
- в экспериментах с металлами и диэлектриками подтверждена способность датчика регистрировать профили давления с временным разрешением порядка нескольких наносекунд;
- погрешность определения давления составляет сегодня $\pm 10\%$;
- верхняя граница диапазона давлений, в котором может использоваться ПВДФ-датчик при его установке в объеме исследуемого материала, равна максимальному давлению на амплитудной характеристике (36 ГПа). При установке датчика на границе раздела исследуемый материал – фторопласт для более жестких, чем ПВДФ, материалов эта граница выше и, по оценкам, составляет 90 ГПа (Fe), 98 ГПа (Cu) и 150 ГПа (U).

Совокупность названных характеристик делает ПВДФ-датчик современным и удобным инструментом в практике ударно-волнового эксперимента. Особо отметим такую характеристику датчика, как пропорциональность выходного тока производной давления по времени. Это является ценным качеством датчика при решении таких задач, как исследование фазовых превращений [24] и измерение скоростей звука в ударно-волновых экспериментах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / Под ред. М.В. Жерноклетова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.
2. *Graham R.A.* Solids under high-pressure shock compression. N.Y.: Springer-Verlag, 1993. P. 103–113.
3. *Bauer F.* // Proc. of 1981 Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. N.Y.: AIP, 1982. P. 251.
4. *Bauer F.* // *Ferroelectrics*. 1983. V. 49. P. 281.



5. *Reed R.P., Graham R.A., Moore L.M. et al.* // Proc. of 1989 Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Amsterdam: North-Holland, 1990. P. 825.
6. *Голямина И.П., Лесных О.Л., Мясников Г.Д. и др.* // ПТЭ. 1991. № 3. С. 243.
7. *Данилин Б.С., Сырчин В.К.* Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1989. С. 6–69.
8. *Bauer F.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 1995. V. b105. P. 212.
9. *Набатов С.С., Якушев В.В.* // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30. № 3. С. 130.
10. *Bauer F.* // Proc. of 1997 Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. N.Y.: AIP, 1998. P. 789.
11. *Борисенок В.А., Симаков В.Г., Брагунец В.А. и др.* // Физика горения и взрыва. 2003. № 5. С. 109.
12. *Charest J. A., Lynch C. S.* // Proc. of 1991 Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Amsterdam: North-Holland, 1992. P. 897.
13. *Молодец А.М., Еремченко Е.Н.* // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30. № 5. С. 149.
14. *Bauer F.* // Proc. of 2003 Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. N.Y.: AIP, 2004. P. 1121.
15. *Hodges R.V., McCoy L.E., Toolson J.R.* // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2000. V. 25. P. 13.
16. *Bauer F.* // Journal de Physique IV. 1991. V. 1. P. 427.
17. *Graham R.A., Anderson M.U., Bauer F. et al.* // Proc. of 1991 Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Amsterdam: North-Holland, 1992. P. 883.
18. *Bauer F.* // Proc. of 2001 Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. N.Y.: AIP, 2002. P. 1149.
19. *Hydman D.A., Gaffney E.S.* // Proc. of 1989 Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Amsterdam: North-Holland, 1990. P. 809.
20. *Lynch C.S., Charest J.A.* // Proc. of 1991 Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Amsterdam: North-Holland, 1992. P. 901.
21. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред. Р.Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001.
22. *Chartagnac P., Decaso P., Jimenez B. et al.* // Proc. of 1991 Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Amsterdam: North-Holland, 1992. P. 893.
23. *Borissenok V.A., Morozov V.A., Novitsky E.Z.* // Proc. of X Int. Conf. High Energy Rate Fabrication. Ljubljana, Slovenia. 1989. P. 428.
24. *Борисёнок В.А., Симаков В.Г., Волгин В.А. и др.* // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. № 4. С. 121.

