

Таблица 4

η	I_0 , кг·с	
	тиосульфат натрия	плексиглас
-0,5	290	180
0	580	390
1	770	—
∞	1070	550

и при $R \sim r$ практически достигает своего максимума I_0 . Величина I_0 для тиосульфата натрия в пересчете на 1 кг ВВ приведена в табл. 4. Там же для сравнения дано значение I_0 , оцененное для плексигласа при $n=1$. При оценках величины I_0 не принимался во внимание импульс, переданный твердой среде в отрицательном направлении оси z , который присутствует при $\eta > 0$.

Поступила в редакцию
24/XI 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Спивак, В. М. Цветков. ФТПРПИ, 1973, 5.
2. А. А. Спивак. ФГВ, 1973, 9, 2.
3. А. А. Спивак. ФГВ, 1974, 10, 3.
4. В. Н. Родионов и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1971.
5. Г. Родин. Сейсмология ядерных взрывов. М., «Мир», 1974.
6. В. В. Адушкин, А. П. Сухотин. ПМТФ, 1961, 4.
7. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1967, 4, 2.
8. В. Д. Алексеенко. ФГВ, 1967, 4, 1.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАНГАНИНОВЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ УДАРНОГО СЖАТИЯ И РАЗГРУЗКИ

Г. И. Канель, Г. Г. Вахитова, А. Н. Дремин

(Черноголовка)

Манганиновые датчики используются для измерения давлений ударного сжатия конденсированных сред давно [1], однако их метрологические характеристики все еще известны недостаточно полно. Принцип использования датчиков основан на сравнительно высокой чувствительности удельного электросопротивления манганина к изменению давления в окружающей среде при очень низкой чувствительности к изменению температуры. В опубликованных работах [2—6] сообщаются результаты более или менее систематических исследований зависимости электросопротивления манганиновых датчиков от давления за фронтом ударной волны. Данные же о зависимости электросопротивления от давления в окружающей среде при разгрузке, а также сведения о влиянии на показания датчика способа сжатия образца (ударное, «ступенчатое», плавное) до одного и того же давления практически отсутствуют. Получение этих данных и является целью представляемой работы.

Чувствительные элементы датчиков готовились травлением из твердой фольги марки МНМц АЖЗ-12-0, 25-0,2 толщиной 0,03 мм, имеющей, согласно сертификату, состав: 83,6% Cu, 3,26% Ni, 12,17% Mn, 0,3% Fe, 0,22% Al и температурный коэффициент электросопротивления $1,3 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Чувствительный элемент имел вид зигзагообразной ленты и занимал площадь $\sim 7 \times 7$ мм². Выводы представ-

ляли собой полоски медной фольги толщиной 0,02 и шириной 3—4 мм; выводы приваривались к концам манганиновой ленты точечной сваркой. Изменением ширины манганиновой ленты начальное электросопротивление датчиков варьировалось от 2,5 до 4 Ом. Сопротивление выводов не превышало 0,06 Ом.

Для манганина с составом, аналогичным составу использовавшихся в данной работе датчиков, зависимость величины изменения сопротивления от давления ударного сжатия не определялась, поэтому были проведены измерения скачка сопротивления датчиков, размещенных в образцах, которые нагружались ударными волнами известной интенсивности. Образцы составлялись из пластин алюминия, меди или оргстекла. Нагружение осуществлялось ударом разогнанной взрывом алюминиевой пластины толщиной 5—10 мм [7]. Геометрические размеры сборки обеспечивали одномерность процесса вблизи датчика в течение всего времени измерения. От металлических поверхностей датчики отделялись изолирующими прокладками из лавсана, фторопласта или слюды. Общая толщина датчика вместе с изоляцией составляла 0,15—0,25 мм. Использовался импульсный источник тока, который включался за 10—15 мкс до момента подхода ударной волны к датчику. Сила тока составляла 8 А. Падение напряжения на датчике регистрировалось по двухточечной мостовой схеме с использованием осциллографа ОК-33. В каждом опыте проводились измерения для двух манганиновых датчиков. Подробности монтажа датчиков и схема регистрации описаны в [6]. Одновременно с регистрацией изменения сопротивления датчиков в большинстве опытов для определения давления проводились измерения скорости свободной поверхности образца после выхода на нее фронта ударной волны. Для измерения скорости свободной поверхности применялись электроконтактные датчики, два из которых упирались в поверхность образца и два устанавливались на расстоянии 2 мм от поверхности. Осциллограммы одного из таких опытов приведены на рис. 1, а, б.

Результаты и условия измерений скачка сопротивления датчиков в зависимости от интенсивности ударной волны приведены в таблице. Давление за фронтом ударной волны в алюминиевых и медных образцах определялось по измеренной скорости свободной поверхности и ударной адиабате материала [8]. Давление в оргстекле определялось методом отражения.

Для проверки стабильности работы датчиков сравнивались их показания в одинаковых опытах, проведенных непосредственно после изготовления датчиков и спустя полгода. Показания датчиков были идентичны.

Проведенные измерения дают возможность построить калибровочную зависимость для определения давления (в диапазоне 50—500 кбар) за

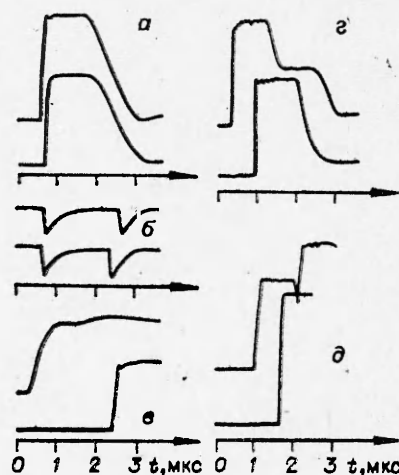


Рис. 1. Типичные осциллограммы опытов.

а) показания манганиновых датчиков, размещенных между двумя медными пластинами толщиной 6 мм. Нагруженные алюминиевым ударником толщиной 7 мм и скоростью 2,04 км/с; б) показания контактных датчиков скорости свободной поверхности образца в том же опыте; в) осциллограмма опыта по сравнению показаний датчиков в плавной волне сжатия и в ударной волне; г) регистрация ступенчатой разгрузки (верхняя осциллограмма получена с датчика, размещенного между алюминиевыми пластинами, нижняя соответствует датчику, размещенному между пластинами алюминия и оргстекла); д) регистрация ступенчатого сжатия (верхний луч соответствует первому датчику, размещенному между алюминиевыми пластинами, нижний луч — второму датчику, размещенному между алюминиевой и медной пластинами), разгрузка перед фронтом отраженной ударной волны, регистрируемая первым датчиком, появляется при отражении ударной волны от изоляции второго датчика.

Материал образца	Материал и толщина изоляции	p , кбар (+3 %)	$\Delta R/R_0$	$\Delta R_{\text{ост}}/R_0$ при $p=0$
Медь	Фторопласт или слюда по 0,1 мм	465	$1,08 \pm 0,012$	—
	Фторопласт по 0,1 мм	422	$1,005 \pm 0,025$	—
	Фторопласт по 0,07 мм	270	$0,73 \pm 0,012$	$0,0175 \div 0,022$
Алюминий	Фторопласт по 0,1 мм	304	$0,78 \pm 0,028$	—
	Фторопласт по 0,07 мм	181	$0,51 \pm 0,016$	$0,0172 \div 0,025$
Оргстекло	—	135	$0,373 \pm 0,007$	$0,014 \div 0,016$
		87	$0,255 \pm 0,005$	$0,016 \div 0,021$
		58	$0,167 \pm 0,005$	$0,014 \div 0,018$
		—	$0,068 \pm 0,001$	$0,008 \div 0,009$

фронтом ударной волны по относительному изменению сопротивления манганиновых датчиков $\Delta R/R_0$ в виде

$$p = [340(\Delta R/R_0) + 70(\Delta R/R_0)^3] \text{ кбар.} \quad (1)$$

Отклонение экспериментальных данных от зависимости (1) не превышает 2,5%, что находится в пределах погрешности осциллографических измерений. Приведенные в [2—6] данные для сплавов с близким составом при давлениях выше 40 кбар отклоняются от зависимости (1) не более чем на 6%, а данные работы [5] практически соответствуют выражению (1) при $p > 35$ кбар. При меньших давлениях результаты [5] отклоняются от зависимости (1). Давления ниже 58 кбар в настоящих экспериментах не измерялись, поэтому, учитывая превосходное совпадение данных при более высоких давлениях, для области малых давлений в дальнейшем анализе используется зависимость сопротивления манганина от давления ударного сжатия, полученная в [5].

В описанных выше экспериментах определялась также величина остаточного измерения сопротивления датчиков после ударного сжатия и разгрузки до нулевого давления. Полная разгрузка окружающей датчик среды осуществлялась при взаимодействии волны разрежения, распространяющейся от тыльной поверхности ударника, с волной разрежения, появляющейся после выхода ударной волны в образце на его свободную поверхность. Результаты измерения остаточного сопротивления также приведены в таблице. Для построения зависимости сопротивления манганина от давления в волне разрежения нужны также данные о сопротивлении датчиков при разгрузке до определенных промежуточных давлений. Эти данные были получены в экспериментах с образцами, набранными из слоев материалов с различной динамической жесткостью. При этом первый датчик размещался между двумя пластинами из более жесткого материала (алюминия), а второй — на поверхности раздела с менее жестким материалом — оргстеклом. Образцы нагружались ударом алюминиевой пластины толщиной 10 мм, имеющей перед соударением скорость 2,06 км/с и диаметр плоского участка ~ 65 мм. Ударная волна распространялась от более жесткого материала к менее жесткому. Осциллограмма одного из таких опытов приведена на рис. 1, г. Для первого датчика регистрируется скачок сопротивления, соответствующий скачку давления за фронтом ударной волны; в течение некоторо-

го промежутка времени давление и сопротивление датчика поддерживаются постоянными.

После отражения ударной волны от границы раздела с менее жесткой средой к первому датчику подходит волна разрежения, понижающая давление до величины, определяемой, как известно, пересечением изэнтропы разгрузки первого и ударной адиабаты второго материала в координатах давление — массовая скорость. Это давление поддерживается в течение промежутка времени, определяемого соотношением толщин ударников и слоев образца и величинами скорости ударных волн и волн разрежения в них. Таким образом, на первый датчик действует скачок давления до 181 кбар и затем разгрузка до 87 кбар, а на второй — скачок давления до 87 кбар и затем разгрузка до нулевого давления. Среднее по трем опытам изменение сопротивления первого датчика при $p=87$ кбар составляет $\Delta R/R_0=0,260 \pm 0,05$; изменение сопротивления второго датчика при $p=87$ кбар — $\Delta R/R_0=0,255 \pm 0,05$.

Изменив порядок чередования в направлении распространения волны слоев материалов с различной жесткостью, можно определить закон изменения сопротивления манганина при ступенчатом сжатии. Осциллограмма такого опыта приведена на рис. 1, д. Первый датчик размещался между алюминиевыми пластинами, второй — между алюминиевой и медной пластинами. Относительное изменение сопротивления первого датчика при $p=270$ кбар составляет $0,74 \pm 0,015$, а второго — $0,73 \pm 0,012$.

Результаты измерений относительного изменения сопротивления манганиновых датчиков при максимальных давлениях до 100 кбар представлены графически на рис. 2. На рис. 3, а, б приведены зависимости остаточного изменения сопротивления датчиков после полной разгрузки от давления за фронтом ударной волны. График на рис. 3 наглядно демонстрирует увеличение необратимого остаточного приращения сопротивления манганина в условиях ударного сжатия при давлениях до 80—100 кбар. При дальнейшем росте давления в ударной волне остаточное приращение сопротивления остается постоянным, а его отношение к максимальному изменению сопротивления за фронтом ударной волны (гистерезис) уменьшается.

Предположение о возможности необратимого роста сопротивления манганина при его деформации в ударной волне высказывалось и ранее [5]. Этим, в частности, объясняется различие между статическим и динамическим пьезокоэффициентами сопротивления манганина при давлениях выше 4—5 кбар. В связи с этим следует отметить, что наклон прямой на рис. 2, связывающий скачок сопротивления манганина при ударном сжатии до давления 24,5 кбар с величиной остаточного изменения сопротивления (см. таблицу), весьма близок к величине, соответствующей статическому пьезокоэффициенту сопротивления манганина. Естественно предположить, что полное изменение сопротивления манганинового датчика ΔR есть арифметическая сумма обратимого изменения сопротивления,

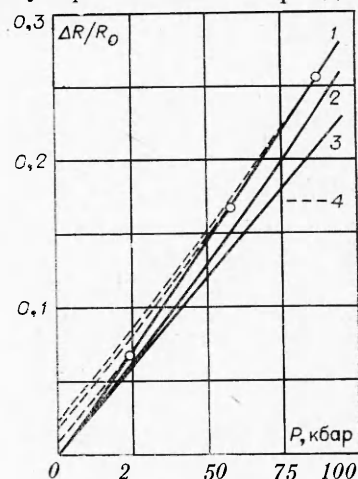


Рис. 2. Связь между давлением и относительным изменением сопротивления манганиновых датчиков.

1 — данные [5], точки соответствуют настоящим экспериментам; 2 — результат вычитания из скачков сопротивления манганина при ударном сжатии величин остаточного изменения сопротивления; 3 — зависимость сопротивления манганина от давления при гидростатическом сжатии [6]; 4 — связь между давлением и изменением сопротивления манганина при разгрузке.

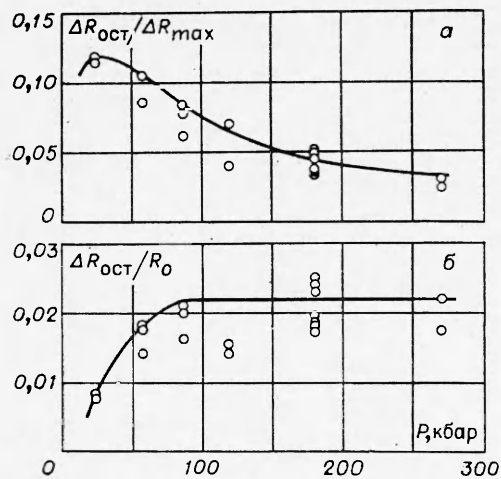


Рис. 3. Зависимость отношения остаточного изменения сопротивления $\Delta R_{ост}$ к максимальному в ударной волне ΔR_{max} (а) и к начальному R_0 (б) от давления ударного сжатия p .

как при давлениях в ударной волне выше 80 кбар рост величины $\Delta R_{ост}/R_0$ прекращается, то очевидно, что зависимость $\Delta R_p(p)/R_0$ при высоких давлениях идет параллельно непосредственно определенной зависимости $\Delta R(p)/R_0$.

В приведенном анализе автоматически предполагается, что остаточное изменение сопротивления манганина целиком обусловлено деформацией в ударной волне, а волна разрежения, в которой деформация происходит сравнительно медленно, не дает вклада в остаточное изменение сопротивления. Это предположение подкрепляется тем, что полученная из ударно-волновых экспериментов зависимость $\Delta R_p(p)/R_0$ нигде не пересекает кривую из экспериментов с гидростатическим сжатием. Необратимое изменение сопротивления манганиновых датчиков должно зависеть от предварительной обработки материала чувствительного элемента датчика. Так, для отожженных датчиков можно ожидать больший гистерезис, чем найденный в данной работе.

Таким образом, для определения давлений в волне разрежения по осциллограммам опытов с манганиновыми датчиками следует пользоваться зависимостью $\Delta R_p(p)/R_0$, смещенной по оси сопротивлений на величину $\Delta R_{ост}/R_0$, соответствующую данному давлению за фронтом ударной волны. Для давлений выше 80 кбар следует пользоваться зависимостью (1), ниже 80 кбар — выражением

$$p = 415 \left(\frac{\Delta R - \Delta R_{ост}}{R_0} \right) - 150 \left(\frac{\Delta R - \Delta R_{ост}}{R_0} \right)^2, \quad (3)$$

где $\Delta R_{ост}/R_0$ определяется из графика на рис. 3.

На рис. 1, в приведена осциллограмма опыта по сравнению показаний манганиновых датчиков при ударном и относительно плавном сжатии. Волна сжатия в оргстекле с различным фронтом получена при детонации заряда ВВ, отделенного от образца воздушным зазором толщиной 16 мм [7]. Для дополнительного «размытия» фронта волны на обращенную к заряду поверхность образца наклеивалась стеклянная пластина (экран) толщиной 6 мм. Первый датчик устанавливался в оргстекле на расстоянии 1,85 мм от экрана, второй — на расстоянии 11,85 мм. При распространении по образцу «размытой» волны сжатия формируется ударная волна, которая и регистрируется

обусловленного только действующим давлением ΔR_p , и необратимого изменения из-за деформации в ударной волне: $\Delta R_s = \Delta R_{ост}$. Тогда зависимость сопротивления манганина от давления $\Delta R_p(p)/R_0$ получается вычитанием величин $\Delta R_{ост}(p)/R_0$ из зависимости $\Delta R(p)/R_0$. Полученная кривая, приведенная на рис. 2 в диапазоне 0—80 кбар с точностью $\pm 3\%$, описывается выражением

$$p = 415 \left[\Delta R_p / R_0 - 150 (\Delta R_p / R_0)^2 \right] \text{ кбар. } (2)$$

При давлениях до 20 кбар зависимость (2) практически совпадает с результатами гидростатических измерений. Так

вторым датчиком. Изменение сопротивления первого датчика при максимальном давлении составляет 0,216, второго датчика — 0,220. Разница показаний датчиков находится в пределах погрешности измерений и в 4—5 раз меньше остаточного изменения сопротивления. По-видимому, максимально возможное расхождение показаний датчиков при плавном, ступенчатом и ударном сжатии до одного и того же давления равно остаточному изменению сопротивления.

Поступила в редакцию
27/XII 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. P. J. A. Fuller, J. H. Price. Brit. J. Appl. Phys., 1964, 35, 5, 1471.
2. J. W. Lyle, R. L. Schriver, A. R. McMillan. J. Appl. Phys., 1969, 40, 11, 4663.
3. D. D. Keough, J. I. Wong. J. Appl. Phys., 1970, 41, 8, 3508.
4. E. Barsis, E. Williams, C. Skoog. J. Appl. Phys., 1970, 41, 13, 5155.
5. L. M. Lee. J. Appl. Phys., 1973, 44, 9, 4017.
6. Г. И. Канель. Применение марганциновых датчиков для измерения давлений ударного сжатия конденсированных сред. ВИНТИ, № 477—74 деп.
7. Г. И. Канель, А. М. Молодец, А. А. Воробьев. ФГВ, 1974, 10, 6, 884.
8. Л. В. Альтшулер. УФН. 1965, 85, 2, 197.

ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ МАЛОПЛОТНЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

Л. Н. Акимова, М. Ф. Гоголя, В. Н. Галкин

(Москва)

Измерения параметров детонации малоплотных ВВ сделаны в ряде работ [1—5], однако большей частью полученные результаты соответствуют неидеальным режимам детонации и поэтому не могут быть использованы для теоретических расчетов. Основные трудности эксперимента связаны с получением малоплотных зарядов ВВ без внесения каких-либо добавок (пеноносителей, мипоры) и со сложностью применения традиционных методов исследования интенсивностей исследуемых волн.

В данной работе определялись параметры детонации малоплотных зарядов тэна и тротила. В экспериментах использовались тонкоизмельченные порошки (до 1 мкм), которые позволяли получать заряды с относительной плотностью 0,25—0,3 без внесения пористых или пенообразующих добавок. Поскольку условия возбуждения и распространения детонации не были известны при выбранных плотностях и дисперсностях зарядов, определялись зависимости скоростей детонации от диаметра зарядов.

Эксперименты проводились с зарядами в целлофановых оболочках толщиной 0,05 мм с регистрацией процесса на СФР. Оказалось, что для тротила в интервале плотностей 0,5—

Т а б л и ц а 1

ρ , г/см ³	D, м/с	d, мм	D, м/с
0,8	3580	8	3580
0,7	3200	20	4040
0,6	2900	30	4220
0,5	2600	40	4350
		50	4350