

- симп. «Использование энергии взрыва для производства материалов с новыми свойствами», ЧССР, Марианские Лазни, 1976.— Т. 1.— С. 117—130.
8. Седых В. С., Бондарь М. П. Основные параметры сварки взрывом и прочностные характеристики сварных соединений // Свароч. пр-во.— 1963.— № 2.— С. 1—5.
 9. Кривенцов А. Н., Седых В. С. О роли пластической деформации металла в зоне соединения при сварке взрывом // Физика и химия обработки материалов.— 1969.— № 1.— С. 132—141.
 10. Кузьмин Г. Е. О метании пластин в условиях сварки взрывом // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр./АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики.— 1977.— Вып. 29.— С. 137—142.
 11. Стефанович Р. В. Пластическая деформация металлов и ее связь с критическими режимами при сварке взрывом // Порошковая металлургия.— 1978.— Вып. 2.— С. 51—56.
 12. Бондарь М. П., Оголихин В. М. О пластической деформации в зоне соединения при плакировании взрывом // ФГВ.— 1985.— 21, № 2.— С. 147—151.
 13. Бондарь М. П., Оголихин В. М. Пластическая деформация и образование связи при сварке медных пластин // ФГВ.— 1988.— 24, № 1.— С. 122—127.
 14. Дерibas А. А. Классификация течений, возникающих при косых соударениях металлических пластин // Междунар. симп. «Использование энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами», ЧССР, Марианские Лазни, 1973.— Т. 1.— С. 31—43.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 2/VII 1990

УДК 53.082.73 + 531.787.913 + 534.222.2

Г. А. Лямин, А. В. Пинаев, А. С. Лебедев

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ И СТАТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ

Разработаны пьезодатчики на основе пьезокерамики, природного и искусственного турмалинов для измерения давлений ≤ 3 кбар. Показана эквивалентность статического и динамического методов тарирования, предложена методика скоростного удара с гладким прямоугольным профилем давления. Установлено, что в пьезокерамике отсутствуют релаксационные процессы и ее пьезомодуль не зависит от давления, если измерения вести по схеме, исключающей утечку зарядов.

1. Измерения давлений можно разделить на прямые, при которых регистрируют силовые воздействия среды на чувствительный элемент датчика или прибора, и косвенные, когда по различным физическим эффектам самой среды или по изменению ее параметров определяют величину давления. К косвенным методам прибегают в случае невозможности размещения датчика в измеряемой среде или при работе с вакуумом.

В физике быстротекущих процессов наибольшее использование нашли прямые методы; разрешение 10^{-4} — 10^{-7} с обеспечивают с помощью датчиков из пьезоэлектриков (кварца, турмалина, пьезокерамики) [1—12], полупроводниковых или резистивных преобразователей давления [13—18], электретов [19—21]. В отдельных случаях, когда сильные электромагнитные помехи мешают измерению электрических сигналов, применяют оптические методы — в [22] разработана методика спектрального измерения сдвига R_1 -линии люминесценции рубина в зависимости от приложенного давления. Измерение тензочувствительности пьезоэлектриков (зависимости их резонансной частоты от механических напряжений [23]) существенно расширяет границы их применения, поскольку позволяет регистрировать не только импульсные, но постоянные и медленно меняющиеся давления в течение очень длительного времени.

В литературе существуют различные мнения по поводу возможности использования отдельных чувствительных материалов для датчиков. Так, в [24] приведены данные о зависимости пьезомодуля керамики ЦТС-19 от времени нагружения ($2 \cdot 10^{-6}$ — 10^{-1} с) при давлениях $p \leq 500$ атм. Авторы [11], получив совпадение статической и динами-

ческой тарировок при $p \leq 10$ атм, подвергают данные [24] сомнению. В работах редко содержатся полезные рекомендации по изготовлению датчиков, отсутствует анализ влияния конструкции датчика на его параметры. Так, датчики, содержащие заполненные жидкостью полости с мембранами [12, 15], обладают, по нашему мнению, сравнительно низкой разрешающей способностью, определяемой периодом собственных колебаний мембраны и временем установления давления в полости. Датчиками со стержневыми волноводами [3—6], залитыми воском, нельзя измерить большие квазистатические давления. Для пьезокерамики с ее особой доменной структурой нет экспериментов, в которых были бы получены и сопоставлены результаты ее тарировки в разомкнутом и замкнутом на внешнюю цепь состояниях. На необходимость таких исследований указывает обнаруженное в [25] различие сигналов ударного нагружения при замкнутом на сопротивление 1 Ом и условно разомкнутом керамическом пьезоконденсаторе.

Самостоятельное изготовление датчиков из пьезоэлектриков и электретов обычно не встречает принципиальных затруднений, однако для обеспечения характерного времени разряда пьезоконденсатора $\geq 10^{-1} - 10^2$ с требуется сравнительно сложная радиоаппаратура. При изготовлении контактов у полупроводников следует обеспечить высокую чистоту в месте контакта и применять соответствующую технологию. Недостаток электретов состоит в том, что наилучшие из них сохраняют свои свойства в течение лишь нескольких лет. Датчики из кварца, турмалинов обладают постоянными характеристиками неограниченно долго и могут служить эталонами. Привлекательно использовать для их изготовления минералы, выращенные в лабораторных условиях и обладающие известными свойствами. Авторы не знакомы с работами, в которых наряду с природными использовались и синтезированные минералы.

Цель настоящей работы — выяснение возможности применения искусственных турмалинов для измерения давления, разработка различных типов датчиков и сравнение их характеристик, анализ зависимости результатов измерений от способа включения пьезодатчика. Поскольку до сих пор не существует единого метода тарировки датчиков, проведено сопоставление результатов тарировок по различным методикам и даны полезные рекомендации по их применению.

2. Измерения проводили в установках статического и динамического сжатия и ударной трубе. Установка статического сжатия — толстостенная стальная камера с диаметром рабочего канала 8 мм, в котором жидкости (воду, глицерин) сжимали поршнем до $p_0 = 2 \div 2000$ атм, измеряемого манометрами класса 0,4. Сброс давления происходил за время $\leq 5 - 10$ мс через отверстие диаметром 0,8 мм, предварительно закрытое стальной иглой. Сигнал с датчиков поступал на осциллограф через согласующий усилитель, изготовленный по схеме из [10], с входным сопротивлением $R_{вх} \approx 10^{12}$ Ом и постоянной времени входной цепи $\tau_{вх} \approx 3 \cdot 10^2 \div 10^4$ с.

Установка динамического сжатия состояла из двух секций вертикальной трубы из нержавеющей стали длиной 1000 и 200 (или 3) мм с внутренним диаметром 30 и толщиной стенки 40 мм. Снизу трубы располагался ресивер объемом 10 л, заполняемый воздухом. Быстродействующий клапан многократного действия играл роль рвущейся диафрагмы и обеспечивал подачу воздуха из ресивера в рабочий канал трубы для разгона поршня. Поршни длиной 20, 80, 250, 300 мм изготавливали из дюралюминия и полиэтилена, в качестве рабочей жидкости использовали воду. Верхняя секция снизу имела диафрагму из лавсановой пленки толщиной 50 мкм. С целью выбора наиболее удобного варианта тарировки опыты вели в различных постановах (рис. 1). Высота нижнего столба воды (20—80 см) определяла длительность фазы сжатия. При изменении p_0 от 0,8 до 60 атм жидкость или поршень разгоняли до скоростей 4—200 м/с и получали при соударении

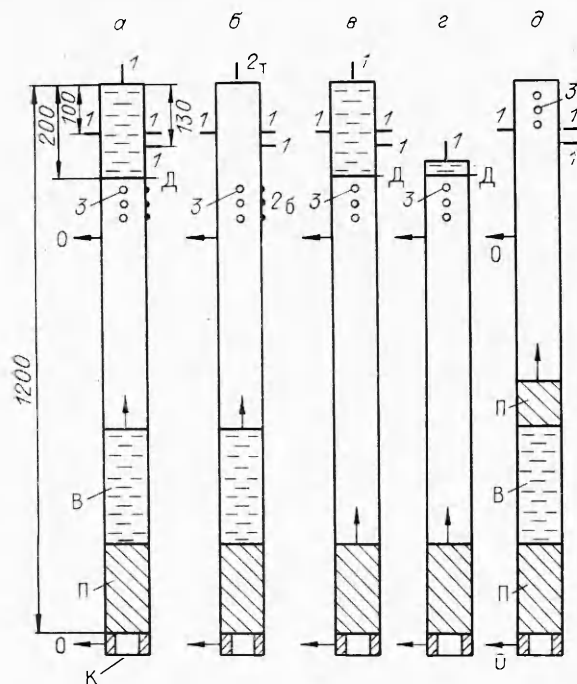


Рис. 1. Варианты динамической тарировки при скоростном ударе.

1 — пьезодатчики; 2 — контактные датчики; 3 — прозрачные окна; В — столб воды; П — поршень; Д — диафрагма; К — клапан; О — отверстия для откачки газа.

соответственно 65—3500 атм. Перед опытом поршень опускали вниз и заливали при необходимости воду над ним и в верхнюю секцию, вакуумировали трубу под поршнем и на участке его разгона. Скорость жидкости или поршня перед диафрагмой или торцом трубы измеряли частотомерами ЧЗ-34, запускаемыми контактными или оптическими датчиками с быстродействующими схемами (время срабатывания ≈ 1 мкс). Тор-

цевой контактный датчик (2_т) в отличие от бокового (2_б), где электрод заделан заподлицо в корпус, имел еще дополнительно два электрода диаметром 1 мм, выступающих на 30 и 60 мм. Давление в воде вычисляли с учетом ее сжимаемости по ударной адиабате [26] $p = \rho_{ж} u D$, $D = (1483 + 25 306 \lg(1 + u/5190))$ м/с, где $\rho_{ж}$ — плотность воды при 20 °С, u — ее скорость. Погрешность измерения скорости и давления не превышала 5 %.

Ударная труба из дюралюминия с внутренним диаметром 50 мм состояла из секции высокого давления длиной 1 м и рабочей секции (6 м), давление измеряли в толстостенной стальной секции на расстоянии 3 м от разделительной диафрагмы. Сигналы с пьезодатчиков поступали на осциллографы через истоковый повторитель с $R_{вх} \approx 10^9$ Ом, запись вели осциллографами С8-1, С8-17.

3. Корпус датчика выполнен из латуни, на одном его конце размещали пьезоэлемент, на другом — коаксиальный разъем для съема электрического сигнала (рис. 2). Цилиндрические полости изготавливали двух видов — заглубленные (диаметром $d_0 = 3$ и 2 мм, глубиной $h = 5$ и 4 мм соответственно), заливаемые пластилином, вазелином или твердым нефтяным битумом, и закрытые сверху тефлоновой мембраной толщиной 10—50 мкм, и более мелкие ($d_0 = 2$ и 3,5 мм, $h = 1,8$ мм) с заливкой эпоксидной смолой, пластилином или битумом. Наполнители перед заливкой обезвоживали, нагревая их в вакуумном термостате. Пьезоэлементы (керамика ЦТС-19 толщиной $\delta = 0,3$ мм, турмалин $\delta = 0,5 \div 0,9$ мм размером 1×1 , $1,5 \times 1,5$ и 2×2 мм) размещали в полости вертикально (рис. 2, а) либо горизонтально (рис. 2, б, в). Одной или обеими металлическими обкладками для турмалина служила фольга толщиной 50 мкм — расклепаный конец медной проволоки диаметром 0,4 мм. Турмалин приклеивали к фольге или корпусу датчика клеем БФ-2. Контакт посеребренных поверхностей ЦТС-19 с корпусом или одной из жилок диаметром 0,1 мм многожильного провода обеспечивали сплавом Вуда.

4. Природные турмалины, как и кварц, практически безынерционны и в отличие от пьезокерамики обладают постоянным пьезомодулем, выдерживают без разрушения давления, не меньше $(2 \div 3) \cdot 10^3$ атм.

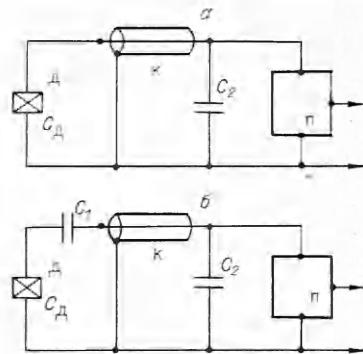
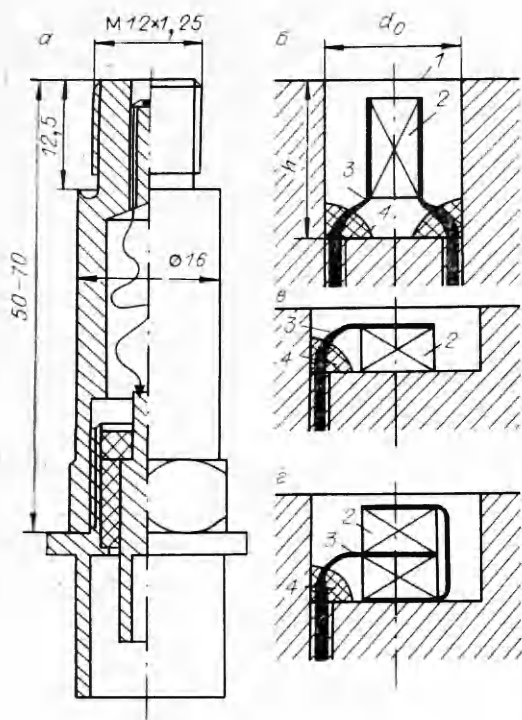


Рис. 3. Принципиальные схемы включений пьезодатчиков. д — пьезодатчик; п — прибор, к — кабель.

Рис. 2. Конструкция пьезодатчика, размещение пьезоэлементов в его полости.

1 — мембрана; 2 — пьезоэлемент; 3 — проводник; 4 — эпоксидная смола.

Турмалин — сложный твердый раствор с общей формулой $XY_3Z_6(BO_3)_3(Si_6O_{18})(O, OH, F)$, который кристаллизуется в дитригональном классе ромбоэдрической сингонии, пространственная группа $R3m$. Как правило, позиция X представлена Li, Na, K, Ca, а Y_3Z_6 — Al, Mg, Fe, Ti, Mn, Ni, Cu. По составу двух неэквивалентных октаэдрических позиций Y и Z в структуре турмалина обычно выделяют следующие минералы: Li, Al — эльбаит, Al, Fe^{2+} — шерл, Al, Fe^{3+} — алюмобургерит, Al, Mg — дравит. Как типичный пьезоэлектрик турмалин проявляет электрическую поляризацию вдоль полярной оси Z при всестороннем (гидростатическом) сжатии и широко используется в пьезодатчиках [27, 28] в виде пластинок, вырезаемых перпендикулярно оси Z. Используемые в датчиках природные турмалины обладают большим внутренним сопротивлением и высокой степенью релаксации.

В работе наряду с природными исследованы и синтетические турмалины, выращенные в ИГиГ СО АН СССР [29]. В качестве исходного материала для изготовления датчиков использовали бесцветные и слабо-розовые эльбаиты из Калбы (Казахстан) — Э-1, 140-4, Читинской области — Э-3, Д-1, Памира — ТП2-Г, ТП2-Э, шерло-дравит из Мамского района (Якутская АССР) — Ш-1. Синтетические разновидности, полученные в гидротермальных условиях, представлены чистым дравитом (К-1), шерлом (СА-1), Fe^{3+} — турмалином (СФ-1) и Ni^{3+} — турмалином (140-9) (табл. 1).

5. В опытах изучены схемы включения датчиков (рис. 3), позволяющие вести запись длительных процессов без существенных искажений. Обычно всеми исследователями используется вариант а, когда к пьезодатчику параллельно подключают дополнительную емкость и прибор (источковый или катодный повторитель) для повышения $R_{вх}$. Здесь $C_2 = C_k + C_{вх}$; C_k — емкость кабеля; $C_{вх}$ — емкость на входе прибора. Для увеличения $\tau_{вх}$ и ограничения электрического сигнала пьезодатчика с давлением обычно увеличивают $C_{вх}$. Характерные значения емкости датчика $C_d \approx 20 \div 100$ пФ, $C_k > 100$ пФ, $C_{вх} \approx 10^2 \div 10^5$ пФ, т. е. $C_2 > C_d$. В результате после изменения давления в цепи (датчик — C_2) возникает электрический ток и происходит перераспределение зарядов

Массовый состав и формульные коэффициенты природных и синтезированных турмалинов

Виды турмалинов	Массовый состав, %																
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	MnO	NiO	CuO	B ₂ O ₃	Li ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O	F	H ₂ O	Сумма
Э-1	38,4	—	43,4	0,10	0,26	0,02	0,27	0,19	—	—	9,4	1,11	2,16	0,10	—	4,01	99,42
ТП2-Э	36,8	0,04	43,59	0,35	—	0,01	1,02	0,09	—	—	10,52	1,38	1,72	0,02	0,37	4,34	100,25
ТП2-Т	36,68	0,06	41,67	0,05	—	0,01	2,03	0,64	—	—	11,16	1,56	1,70	0,06	0,39	4,09	100,10
Э-3	37,10	0,17	39,64	0,32	1,01	0,04	1,55	1,74	—	—	10,29	1,44	2,00	0,02	0,43	4,06	99,81
Д-1	36,89	0,01	42,38	0,23	—	0,01	2,68	0,02	—	—	10,12	1,63	1,65	0,02	0,42	4,29	100,35
140-4	38,50	0,10	42,80	1,19	0,73	0,02	0,43	0,49	—	—	7,80	1,05	2,14	0,27	—	4,09	99,15
Ш-1	35,43	0,76	34,76	—	6,67	5,64	0,85	0,07	—	—	10,10	1,01	1,92	0,04	0,09	2,81	100,58
СФ-1	36,02	—	40,22	10,64	—	—	—	—	—	2,00	9,50	—	—	—	—	2,20	100,58
СА-1	32,21	—	37,99	—	12,95	—	—	—	—	—	9,80	—	3,04	—	—	4,00	99,99
К-1	37,43	—	33,91	—	—	10,77	—	—	—	—	11,17	—	2,62	—	—	4,08	99,98
140-9	33,49	—	30,41	0,01	—	—	—	—	16,20	—	10,50	—	2,26	—	—	4,10	96,97

О к о н ч а н и е т а б л. 1

Виды турмалинов	Формульные коэффициенты									Сумма
	Si ⁴⁺	Ti ⁴⁺	Al ³⁺	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mg ²⁺	Mn ²⁺	Ni ²⁺	Cu ²⁺	
Э-1	6,40	—	8,52	0,01	0,04	0,00	0,03	—	—	15,00
ТП2-Э	6,23	0,01	8,70	0,04	—	0,00	0,01	—	—	15,0
ТП2-Т	6,37	0,01	8,52	0,01	—	0,00	0,09	—	—	15,0
Э-3	6,43	0,02	8,10	0,04	0,15	0,01	0,26	—	—	15,00
Д-1	6,36	0,00	8,61	0,03	—	0,00	0,00	—	—	15,00
140-4	6,35	0,01	8,32	0,15	0,10	0,00	0,07	—	—	15,00
Ш-1	5,84	0,09	6,75	—	0,92	1,39	0,01	—	—	15,00
СФ-1	5,81	—	7,65	1,29	—	—	—	—	0,24	15,00
СА-1	5,50	—	7,65	—	1,85	—	—	—	—	15,00
К-1	6,01	—	6,41	—	—	2,58	—	—	—	15,00
140-9	6,10	—	6,53	0,00	—	—	—	2,37	—	15,00

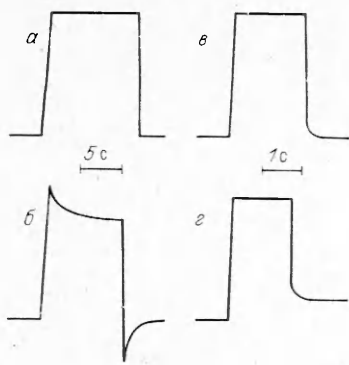


Рис. 4. Осциллограммы профилей действия при статическом способе нагружения датчиков.

a — природные турмалины Ш-1, Д-1, Э-1, Э-3, ТП2-Э, ТП2-Т, 140-4, искусственные турмалины СА-1, К-1, 140-9, пьезокерамика ЦТС-19 (схема рис. 3, б); б — искусственный турмалин СФ-1; *в* — ЦТС-19, $\Delta p \leq 200 \div 500$ атм (схема рис. 3, а); *г* — ЦТС-19, $\Delta p \geq 500$ атм (схема рис. 3, а).

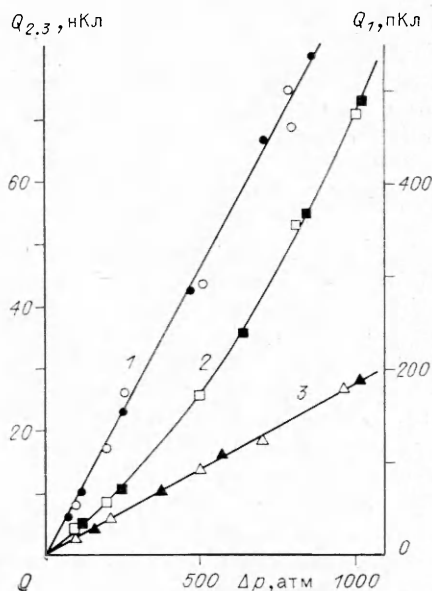


Рис. 5. Результаты статической (светлые точки) и динамической (черные) тарировки для турмалина (1) и пьезокерамики (2, 3). 2 — схема рис. 3, а; 3 — схема рис. 3, б.

между C_d и C_2 — внешняя цепь оказывает влияние на электрическое поле (т. е. на процессы) внутри датчика. В этом смысле наблюдается аналогия со схемой закороченного датчика [25], однако от нее рассмотренный вариант выгодно отличает большее $\tau_{вх}$.

Схема на рис. 3, б отличается тем, что разделительный конденсатор C_1 позволяет при сохранении (как и в варианте *a*) условия $\tau_{вх} \gg t_{пр}$ (где $t_{пр}$ — длительность измеряемого процесса) практически исключить перераспределение зарядов между датчиком и внешней измерительной цепью, если $C_1 \ll C_d$. Для повышения точности проводили тестовое измерение величины $K = U_d/U_2$ ($U_d/U_2 = 1 + C_2/C_1$, U_d и U_2 — напряжения на C_d и C_2), подавая на датчик калиброванное напряжение U_d . В настоящих опытах $C_1 \approx 2$ пФ. Авторам неизвестны работы, в которых измерения давления выполнены по такой схеме. Этот вариант реализует случай с разомкнутым пьезодатчиком, когда влияние внешней цепи на процессы внутри датчика сводится к минимуму.

Характерные осциллограммы давлений по статическому нагружению турмалинов и керамики в диапазоне $p_0 = 2 \div 2000$ атм приведены на рис. 4. Чувствительность датчиков из природных и синтетических турмалинов оказалась близка. Все виды турмалинов, а также пьезокерамика, включенная по схеме рис. 3, б, имеют постоянный пьезомодуль \bar{a}^+ — линейную зависимость между напряжением и положительной фазой давления (см. рис. 5, где по вертикали отложена величина заряда на датчике $Q = p_0 \bar{a}^+$, каждая точка — результат усреднений 5–10 опытов, разброс данных и величина ошибки не превышали 10%). Для предотвращения разрушения датчиков большинство опытов по тарировке проведено при $\Delta p \leq 10^3$ атм. При измерениях по обычной схеме (см. рис. 3, а) для пьезокерамики наблюдается рост \bar{a}^+ с давлением, начиная с $p_0 \geq 10$ атм, и достигается почти двукратное превышение при $p_0 = 10^3$ атм.

Реакция турмалинов при обеих схемах включения и пьезокерамики, включенной по схеме рис. 3, б, одинакова на положительную и отрицательную фазу давления ($\bar{a}^+ = \bar{a}^-$), что видно, например, из рис. 4, а. У турмалина СФ-1 прослеживается зависимость чувствительности от

времени на обеих фазах нагружения (см. рис. 4, б), что делает его малоприменимым для измерений процессов, длительность которых сравнима с характерным временем релаксации $\tau_p \approx 1 \div 2$ с. Для пьезокерамики при $\Delta p \leq 200 \div 500$ атм, если измерения проводить по обычной схеме (см. рис. 3, а), на стадии разгрузки наблюдается релаксация с $\tau_p \approx 0,2 \div 0,3$ с (см. рис. 4, в). При дальнейшем увеличении давления у керамики кроме этой релаксации добавляется еще более длительная ($\tau_p \geq 10^1 \div 10^2$ с), вызывающая смещение нуля сигнала (см. рис. 4, г).

Релаксацию СФ-1 можно объяснить особенностями изменения его внутренних напряжений во времени. Релаксация в пьезокерамике зависит (в отличие от СФ-1) от схемы включения и вызвана влиянием перераспределения зарядов на ее внешних поверхностях и, как следствие, изменением внутреннего электрического поля, которое помимо внешней механической нагрузки определяет поворот доменов. Такой физический эффект влечет по крайней мере два следствия — нелинейность пьезомодуля керамики с давлением (см. рис. 5) и медленный возврат сигнала на ноль после снятия давления (см. рис. 4, в, г). С ростом p оба эти процесса проявляются заметней, по-видимому, изменение электрических сил между доменами из-за перетекания зарядов с обкладок пьезоконденсатора становится сравнимым с механическими напряжениями в керамике.

6. Выбор материалов для поршней определило значение акустического импеданса ρc (ρ — плотность, c — скорость звука) для воды, полиэтилена и дюралюминия: соответственно $1,48 \cdot 10^6$, $1,4 \cdot 10^6$ и $14,8 \cdot 10^6$ кг/(м² · с). Поэтому на границе раздела вода — полиэтилен практически отсутствуют отраженные волны, а при ударе дюралюминиевого поршня о воду можно создавать более высокие давления.

В вариантах тарирования рис. 1, а — г на осциллограммах давления присутствуют меняющиеся по амплитуде от опыта к опыту колебания давления («звон») с периодом ≈ 20 — 30 мкс, что почти на порядок превышает период собственных колебаний датчиков. Наиболее вероятная причина возбуждения колебаний в жидкости — неплоская форма ее поверхности из-за прогиба мембраны (см. рис. 1, а, в, г) и неровности поверхности разгоняющегося столба воды (а, б).

В варианте рис. 1, г после завершения в тонком слое воды серии отражений устанавливается давление, соответствующее удару дюралюминиевого поршня о стальной торец трубы. Если устранить утечки воды в зазор между поршнем и стенками трубы, то можно уже при $u = 100$ м/с получить $\Delta p \approx 15 \cdot 10^3$ атм.

Наиболее удобен в работе вариант рис. 1, б, в котором вода и полиэтиленовый поршень ударяются о торец трубы — профиль давления имеет вид прямоугольной полочки (рис. 6). Датчики с углубленной полостью (см. рис. 2, а) обладают повышенным «звоном» из-за возбуждения колебаний в полости и мембраны (рис. 6, а). Такая конструкция представляется менее удачной, чем на рис. 2, б. Результаты измерений давления датчиком на рис. 2, б не зависели от типа используемого наполнителя, но наиболее удобна в работе эпо-

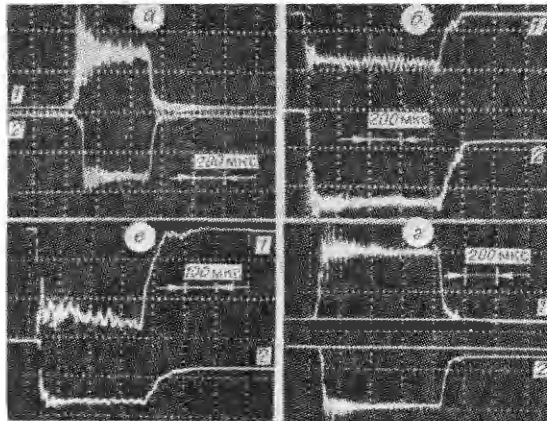


Рис. 6. Осциллограммы давления при скоростном ударе.

Турмалин — а (1, 2), б (1), в (1), пьезокерамика — б (2), в (2), г (1, 2). Δp , атм: 160 (а), 1000 (б), 1860 (в), 365 (г).

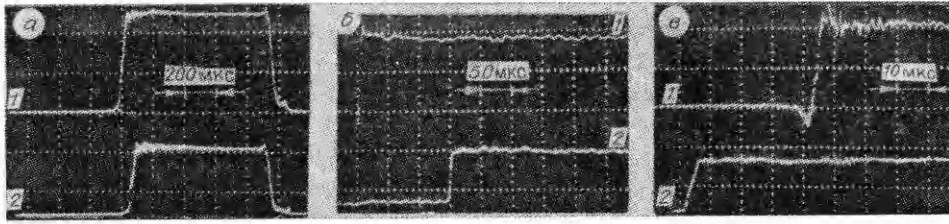


Рис. 7. Осциллограммы давления при скоростном ударе (а) и в ударной трубе (б, в).

1 — пьезокерамика; 2 — турмалин. Δp , атм: 500 (а); 1,45 (б, в).

кисдная смола. В варианте закрепления с эпоксидной смолой разрушение пьезокерамики происходило при $\Delta p \geq (1 \div 2) \cdot 10^3$ атм, тогда как турмалин не разрушался при $\Delta p \geq 3 \cdot 10^3$ атм. Цель создания датчика с двумя пластинами пьезоэлементов (см. рис. 2, в) состояла в уменьшении собственных колебаний, однако такие датчики сложнее в изготовлении и они не имеют преимуществ по сравнению с вариантом рис. 2, б. Для датчиков из пьезокерамики, включенных по схеме рис. 3, а, как и при статическом методе нагружения, существует рост a^+ с давлением (см. рис. 5) и релаксация (выбивание нуля) на спаде давления (см. рис. 6, б—в). Характерно, что при $\Delta p \geq 10^3$ атм пьезокерамика «запирается» и не воспроизводит не только усредненный профиль, но и колебания давления в жидкости (см. рис. 6, в). Пьезомодули всех видов турмалинов и пьезокерамики, включенной по схеме рис. 3, б, постоянны с давлением (см. рис. 5), релаксационные процессы здесь, как и в статике, отсутствуют (см. рис. 6).

В варианте, когда сверху и снизу столба воды помещены поршни из полиэтилена (см. рис. 1, д), соударение плоское и в жидкости не возникают пульсации давления (рис. 7, а). Скорость поршня удобнее измерять оптическим методом. Этот вариант мы рекомендуем как наилучший метод тарировки скоростным ударом.

7. В методиках с метаемым столбом жидкости скорости ударных волн (УВ) околозвуковые и ширина их фронта достигает 3 см (рост давления происходит за 10—20 мкс). Тарирование в ударной трубе, заполненной газом, не позволяет получать столь высокие давления как в методах скоростного удара, однако получаемые здесь УВ имеют достаточно узкий фронт, порядка нескольких длин свободного пробега молекул. При прохождении УВ вдоль датчиков в пьезокерамике, в отличие от турмалинов, наблюдаются отрицательный предвестник и положительный выброс на переднем фронте (рис. 7, б, в). Наличие этого эффекта не зависит от способа включения и вызвано чувствительностью пьезокерамики к изгибу с начала входа волны до момента ее выхода с датчика. Отсутствие таких паразитных сигналов для турмалина объяснено его малой чувствительностью к изгибу, поскольку он реагирует на объемное сжатие. Повышенная чувствительность пьезокерамики к изгибу проявляется также в зависимости пьезомодуля (его изменение может достигать 20—50 %) от силы затяжки датчика в отверстии стенки трубы.

8. Из-за несовпадения температур среды и пьезодатчика в последнем происходят деформации и возникает сигнал даже в отсутствие внешнего давления. В табл. 2 приведены параметры возникающего паразитного сигнала при погружении датчика в теплую воду с перепадом температур $\Delta T = 10$ К. Сигнал, постепенно возрастая, выходит на максимум через 1—2 с и достигает 2—8 атм/град.

Из решения задачи о теплопроводности на границе двух сред [30] следует, что тепловой нагрев латунного датчика при конвективном теплообмене с горячим воздухом ($\Delta T = 1000$ К, $p_0 = 1$ атм) сравним с его нагревом при кондуктивном теплообмене с водой ($\Delta T = 10$ К). В УВ

Таблица 2

Параметры паразитного сигнала

Тип датчика	Знак сигнала	Величина сигнала (атм/град) за время		
		10 мс	100 мс	Максимум, после 1—2 с
ЦТС-19	+	$\leq 0,05$	$\approx 0,1-0,2$	2—8
Турмалин	—	$\leq 0,05$	$\approx 0,1-0,2$	2—5

влияние нагрева можно не учитывать при временах $\leq 0,1$ с. Защитный слой вязкой смазки позволяет предохранить пьезодатчик от нагрева и устранить его тепловую деформацию.

При воздействии на пьезоэлемент датчика светового потока с лампы вспышки ИФК-50 практически без задержки появляется возрастающий сигнал. Природа воздействия света на пьезоэлемент тепловая, зачернение или покрытие алюминиевой пудрой поверхности датчика уменьшает паразитный сигнал соответственно на один и два порядка. Без принятия защитных мер паразитный сигнал от ИФК-50 с энергией разряда ~ 5 Дж или от свечения волны газовой детонации может через 100 мкс достигать нескольких атмосфер.

Подведем итоги проведенной работы. Разработано и исследовано несколько конструкций пьезодатчиков. Показана эквивалентность методик статического и динамического тарирования датчиков. Рекомендована методика скоростного удара, где плоское соударение с торцом трубы достигается с помощью размещения над столбом воды полиэтиленового поршня. Показано, что в пьезокерамике не проявляются релаксационные процессы и сохраняются с давлением постоянная чувствительность, если не происходит утечка зарядов. Предложена схема таких измерений. Наряду с природными исследованы пьезосвойства синтезированных турмалинов и показана их пригодность для измерения квазистатических и динамических процессов. Измерена степень светового и теплового воздействия на пьезодатчик, предложены способы защиты от них.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yoler Y. A., Nagamatsu H. T. A study of piezoelectric elements for the measurements of transient forces. GALCIT Hypersonic Wind Tunnel Memo, 1954.
2. Основные результаты экспериментов на ударных трубах/Под ред. А. Ферри.— М.: Госатомиздат, 1963.
3. Зайцев С. Г. Об измерении быстроменяющихся давлений в газовой среде // ПТЭ.— 1958.— № 6.— С. 97.
4. Edwards D. H. A piezo-electric pressure bar gauge // J. Sci. Inst.— 1958.— 35.— Р. 346—349.
5. Солоухин Р. П. Импульсный пьезодатчик давления // ПТЭ.— 1961.— № 3.— С. 170—171.
6. Толчий М. Е. Экспериментальные исследования спиновой детонации датчиками давлений // ПМТФ.— 1962.— № 4.— С. 94—99.
7. Солоухин Р. П. Ударные волны и детонация в газах.— М.: Физматгиз, 1963.
8. Васильев А. А., Гавриленко Т. П., Толчий М. Е. Давление во фронте детонационной волны в газах // ФГВ.— 1973.— 9, № 5.— С. 710—716.
9. Бодренко С. П., Гердюков Н. П. и др. Применение кварцевых датчиков давления для исследования ударно-волновых процессов // Там же.— 1981.— 17, № 3.— С. 146—148.
10. Медведев В. М., Шаколько О. В., Цветков А. П. Об измерении пульсаций давления пьезоэлектрическими преобразователями // Движение сжимаемой жидкости и неоднородных сред.— Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1982. (Газодинамика и теплообмен.— Вып. 7).
11. Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А. Пьезодатчик давления // ФГВ.— 1982.— 18, № 3.— С. 127—129.
12. Бурминский Э. П., Горячев В. Л., Новоселов П. В. Пьезоэлектрический датчик для измерения давления за фронтом ударной волны // ИФЖ.— 1971.— 21, № 1.— С. 168—171.

13. Кедринский В. К., Солоухин Р. И., Стебновский С. В. Полупроводниковый датчик давления для измерения сильных ударных волн в жидкости ($\geq 10^3$ атм) // ПМТФ.— 1969.— № 4.— С. 92—94.
14. Викулин И. М., Стафеев В. И. Полупроводниковые датчики.— М.: Сов. радио, 1975.
15. Бернотас К. Э., Грицюс А. А. и др. Полупроводниковый датчик импульсного давления // ФГВ.— 1986.— 22, № 2.— С. 133—135.
16. Циклис Д. С., Бородина Н. Д. Малоинерционный манганиновый манометр // ПТЭ.— 1965.— № 2.— С. 200—204.
17. Немец И. Практическое применение тензорезисторов.— М.: Энергия, 1970.
18. Заседателев С. М., Беликов Л. В. и др. О проектировании датчиков давления с интегральными тензопреобразователями // Приборы и системы управления.— 1971.— № 11.— С. 45—48.
19. Луцкейкин Г. А. Полимерные электреты.— М.: Химия, 1966.
20. Черкашин А. В. Пьезоэффект в электретированном винилпласте при динамических нагрузениях // ФГВ.— 1981.— 17, № 3.— С. 139—141.
21. Уртъев П. А., Эрикссон Р. М. и др. Измерение давления и массовой скорости в твердых телах при динамическом нагружении // Там же.— 1986.— 22, № 5.— С. 113—126.
22. Григорьев П. В., Правдин С. С., Фомичев В. П. Пьезоспектральный метод измерения импульсов давления // Пятая Междунар. конф. по генерации мегагаусных магнитных полей и родственным экспериментам: Тез. докл.— Новосибирск, 1989.
23. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики.— М.: Энергоатомиздат, 1989.
24. Хохлов Н. П., Минеев В. Н. и др. Динамический пьезомодуль керамики ЦТС-19 // ФГВ.— 1978.— 14, № 4.— С. 146—149.
25. Новицкий Е. З., Садунов В. Д., Карпенко Г. Я. Поведение сегнетоэлектриков в ударных волнах // Там же.— 1978.— 14, № 4.— С. 115—129.
26. Walsh J. M., Rice M. H. Dynamic compression of liquids from measurements on strong shock waves // J. Chem. Phys.— 1957.— 26, N 4.— P. 815—823.
27. Frondel C. Tourmaline pressure gauges // Amer. Miner.— 1948.— N 33.— P. 1—17.
28. Синани П. Б. Турмалиновые индикаторы ударных волн в жидкостях // ПТЭ.— 1957.— № 4.— С. 85—89.
29. Лебедев А. С., Каргальцев С. В., Павлюченко В. С. // Материалы по генетической и экспериментальной минералогии. Рост и свойства кристаллов. Синтез и свойства турмалинов ряда Al—Mg—(Na) и Al—Fe—(Na).— Новосибирск: Наука, 1988.— С. 58—75.
30. Лыков А. В. Тепломассообмен: Справочник.— М.: Энергия, 1978.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 28/VI 1990

УДК 621.787.044 — 621.7.044.2

М. П. Бондарь, В. Ф. Нестеренко

ДЕФОРМАЦИИ НА КОНТАКТАХ И КРИТЕРИИ ОБРАЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Связь при сварке и прессовании взрывом образуется прежде всего вследствие локализованных деформационных процессов на контактах. Деформационное состояние на контакте динамически взаимодействующих поверхностей выявлено методом рекристаллизации. Найден интервал гомологических температур для определения деформационного состояния соединений и величины зоны интенсивной пластической деформации R , параметра, связанного с физическими условиями реализации связи.

Процессы образования соединений на контакте металлических поверхностей играют большую роль при разных способах сварки, компактирования, нанесения покрытий, получения композиционных материалов. Особое место принадлежит динамическим методам, при которых соединения образуются за времена порядка нескольких микросекунд при высокой степени пластической деформации контактных областей, сопровождаемых качественным изменением свойств материала: упрочнение, фазовые превращения и др. Благодаря кратковременности динамических процессов соединения и особому влиянию этих методов на структуру они зачастую представляются основными в создании, например, метастабильных материалов, материалов с особым химическим составом и для соединения пар металлов, которые другими методами не