

Защита пьезоэлемента датчика ударных ускорений от посторонних воздействий

Н. А. ИВАШИН, М. Д. СОБОЛЕВ

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия, e-mail: niik@vniitf.ru

Усовершенствованы конструктивные схемы пьезоэлектрических датчиков ударных ускорений с целью расширения диапазона измерений и повышения надежности датчиков в условиях жесткого нагружения при высоком уровне высокочастотных колебаний, поперечной составляющей ускорения, деформации установочной поверхности, температуры окружающей среды.

Ключевые слова: пьезоакселерометр, пьезоэлектрический датчик ударных ускорений, эластичная клеевая прослойка, механический фильтр.

The designs of piezoelectric shock accelerations sensors with the purpose of measured accelerations range extension and raise of reliability of measurements in the conditions of «rough» loading with a high level of high-frequency components, transverse acceleration, deformation of adjusting surface, environment temperature have been improved.

Key words: piezoaccelerometer, piezoelectric transducer of shock accelerations, elastic glue layer, mechanical filter.

Для повышения надежности измерений интенсивных ударных ускорений, сопровождаемых посторонними воздействиями, широко используют приемы защиты от таких воздействий как корпуса датчика [1—3], так и непосредственно пьезоэлемента (ПЭ) [4]. В данном случае измеряемое воздействие на датчик — то, которое требуется измерить, т. е. ускорение в частотном диапазоне до 10 кГц, действующее вдоль оси чувствительности датчика. Посторонние воздействия — те, которые не требуется измерять, они — паразитные, и их воздействие на датчик нужно снизить. К посторонним воздействиям относятся, например, деформация контролируемой поверхности, наложенные колебания частотой более 10 кГц. Один из результативных способов защиты — применение соединения ПЭ с инерционным элементом (ИЭ) и основанием (опорой) датчика с помощью эпоксидного клея ЭЛ-20, модифицированного низкомолекулярным каучуком ПДИ-ЗАК с наполнителем из никелевого порошка ПНК-1 [5]. В данном решении эластичность соединению придает каучук, а ПНК-1 с зернами диаметром 5—10 мкм обеспечивает как съем зарядов, так и заданную толщину клеевого шва.

Дальнейшее увеличение диапазона измеряемых ускорений в условиях высокого уровня посторонних компонентов движения требует еще большей защиты ПЭ. Этого можно достичь с помощью заключения его в своеобразную по-

душку, т. е. снижением жесткости клеевых швов, граничащих с поверхностью элемента. Естественно, последнее приводит к уменьшению соответствующей нижней собственной частоты. Однако в этом нет большой опасности, так как рабочий диапазон частот датчика определяется его установочным резонансом, который, как правило, в два-три раза ниже частоты механической системы ПЭ—ИЭ—опора. Более того, обеспечение дополнительной защиты ПЭ за счет допустимого снижения нижней резонансной частоты соединения этой системы авторы рассматривают как пока еще неизрасходованный резерв в повышении надежности датчиков ударных ускорений.

Отметим, что какие-либо систематизированные исследования влияния эластичности соединения элементов конструкции датчика на его характеристики неизвестны. По-видимому, это объясняется встречающимися в литературе предупреждениями такого рода: «клеевой слой не должен обладать эластичностью» [6] или «в общем случае любые пьезодатчики должны быть, возможно, более высокочастотными» [7]. Таким образом, разработчики ударных пьезоакселерометров чаще стремились к созданию неэластичных, жестких конструкций, для которых собственные частоты оставались намного выше частоты ударного процесса, что не приводило к возбуждению в элементах датчика высокочастотных колебаний, способных повлиять на точность проводимых измерений.

Известно, что вид напряженно-деформированного состояния ПЭ зависит от эластичности клеевого соединения и оказывает решающее влияние на его выходной сигнал. Например, заряд ПЭ при его одноосном нагружении может в 2—3 раза превышать сигнал при жестком креплении ПЭ и ИЭ (ПЭ и опоры), определяющем двухосное приложение силы [8—10]. На рис. 1 для датчика ускорения компрессионного типа с ПЭ диаметром 7 мм и толщиной 0,5 мм из пьезокерамики ЦТС-19 представлена полученная авторами экс-

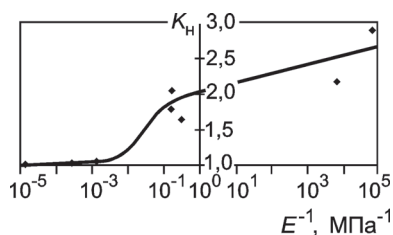


Рис. 1. Зависимость коэффициента K_n от величины, обратной модулю упругости E

периментальная зависимость нормированного коэффициента преобразования K_H от величины, обратной модулю упругости E клеевого состава. Во всех случаях, кроме начального, когда $K_H=1$, толщина клеевого соединения была одинаковой $h \approx 40$ мкм. Для $K_H=1$ элементы датчика склеивали Циакрином, т. е. толщина соединения зависела лишь от шероховатости склеиваемых поверхностей порядка 5 мкм. Коэффициент преобразования определяли в ударном режиме по схеме, приведенной на рис. 2, по серии сбросов молота 1 на наковальню 2 маятниковой установки методом сравнения с показаниями контрольного датчика 3 (типа В&К4344), размещенного рядом с исследуемым датчиком 4. Сигналы с датчиков подавали на согласующий усилитель заряда В&К2692 NEXUS и регистрировали цифровым осциллографом TDS-2014В.

Анализ зависимости, представленной на рис. 1, показывает, что при переходе от жесткого закрепления ПЭ к более свободному заметно увеличивается K_H . В диапазоне $E=10 \dots 500$ МПа небольшое изменение E (из-за размягчения материала при нагреве или его упрочнения при сжатии во время удара) приводит к значительному изменению K_H , что весьма нежелательно. При $E < 10$ МПа наблюдается некоторая стабилизация K_H , и эту область можно использовать для создания датчика с большей защищенностью ПЭ от посторонних воздействий. Ожидаемое в данном случае повышение K_H в полтора—два раза не следует расценивать как серьезное преимущество. Для пьезоэлектрических датчиков, измеряющих ускорения порядка 10^5 м/с², нет необходимости повышать уровень выходного сигнала. Если, конечно, это не кварцевые датчики, коэффициент K_H которых на два порядка меньше, чем у пьезокерамических, и где трибоэлектрический эффект (электризация) кабеля может привести к уменьшению отношения полезный сигнал—шум. Гораздо важнее оценить, как в подобной реализации датчика изменяется поперечная чувствительность и коэффициент влияния температуры на K_H .

Чтобы повысить эластичность соединения элементов конструкции датчика ускорения, необходимо решить несколько взаимосвязанных задач: выбрать клеевой состав, обеспечивающий требуемые эластичность, прочность и отсутствие электризации в клеевом слое при деформации, надежность съема зарядов с электродов ПЭ; создать приемлемую технологию изготовления. Согласно [11] всего этого можно достичь, если использовать эпоксидный компаунд, в который введен графит (не более 10 % массовой доли), при этом содержание каучука в клеевом составе не менее 60 %, а толщина клеевого слоя и съем зарядов обеспечиваются калиброванными частицами размером 20—80 мкм. В качестве таких частиц можно применить просеянный через соответствующие сита железный порошок — носитель электрографический магнитный (НЭМ 12М). Толщину клеевого соединения так же, как и электропроводность, задают только самые крупные частицы (теоретически их может быть всего три). Для надежного съема зарядов при повышенных температурах, а также при работе соединения на растяжение, окончательную вулканизацию состава проводят под давлением при максимальной рабочей температуре датчика. Следует учитывать, что эластичность клеевого шва зависит не только от модуля упругости состава и его толщины, но и от

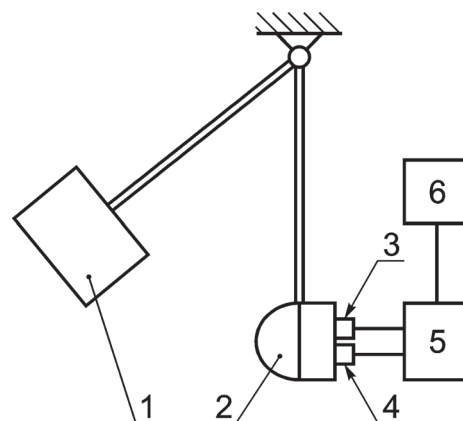


Рис. 2. Схема проведения экспериментов по исследованию характеристик датчиков ударных ускорений:

1 — молот; 2 — наковальня; 3, 4 — контрольный и исследуемый датчики, соответственно; 5 — согласующий усилитель; 6 — цифровой осциллограф

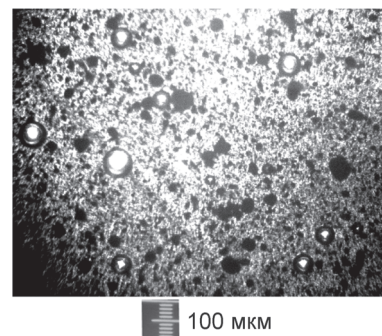


Рис. 3. Фотография клеевого слоя:

темные пятна размером 10—40 мкм — зерна наполнителя НЭМ 12М, до 10 мкм — частицы графита; светлые круги — пузырьки воздуха

технологии подготовки к склеиванию. Состав не рекомендуется вакуумировать. На рис. 3 показано, что при отсутствии вакуумирования клеевой шов равномерно заполнен пузырьками воздуха, которые обеспечивают эластичность при работе на сжатие.

В таблице приведены сравнительные характеристики датчиков РДУС2021 с клеевыми соединениями толщиной 5—10 мкм [5] и РДУС2037 (40 мкм) [11].

Сравнительные характеристики датчиков

Характеристика	Датчик	
	РДУС2021	РДУС2037
Диапазон измеряемых ускорений, м/с ²	$\pm 1,5 \cdot 10^5$	$\pm 2,0 \cdot 10^5$
Коэффициент преобразования, пКл·с ² /м	0,12	0,25
Коэффициент влияния температуры в рабочем диапазоне –50...+100 °С, %/°С	0,5—1,2	0,5
Коэффициент влияния деформации, м ² /((мкм·с ²))	0,2	0,02
Поперечная чувствительность, %	10	10

Для определения коэффициента влияния температуры на коэффициент K_n исследуемый датчик помещали в пенопластовый термос и выдерживали при заданной температуре в термокамере «Клима» Excal-2221TA, затем закрепляли на наковальне маятниковой установки рядом с контрольным датчиком и проводили регистрацию их выходных сигналов по схеме, изображенной на рис. 2. Температуру датчика контролировали термогигрометром CENTER-314. Для нахождения поперечной чувствительности в ударном режиме на маятниковой установке закрепляли специальную поворотную наковальню, позволяющую снимать сигнал с исследуемого датчика при действии ударного ускорения в плоскости его посадочной поверхности. Коэффициент влияния деформации посадочной поверхности на выходной сигнал датчика определяли в ударном режиме по методике [12].

Из данных таблицы следует, что датчик РДУС2037 практически по всем основным характеристикам превосходит РДУС2021 за исключением поперечной чувствительности. В процессе производства процент выхода за максимально допустимое значение у РДУС2037 оказался выше, чем РДУС2021 (30 % против 15 % от количества изготавливаемых датчиков). Жесткие включения из зерен порошка НЭМ 12М в клеевом слое привели к повышению поперечной чувствительности.

Датчик РДУС2037 имеет эластичные клеевые соединения элементов конструкции, защищающие пьезоэлемент от посторонних воздействий, что позволяет надежно измерять ударные ускорения $\pm 2 \cdot 10^5$ м/с². Он прошел процедуру аттестации типа и зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений (RU.28.086.A № 51763).

Л и т е р а т у р а

1. Колесникова Л. А., Мальгун М. М., Скрыпникова Л. Ф., Соболев М. Д. Способы защиты датчика ускорений от неизмеряемых воздействий // Измерительная техника. 1990. № 2. С. 35—36.

2. Баженов А. А., Лобастов С. А., Яровиков В. И. Пьезоэлектрические датчики для измерения параметров взрывных и ударных нагружений. Ч. 2 // Метрология. 2003. № 11. С. 19—32.

3. Пат. 2410704 РФ. Механический фильтр для пьезоакселерометра / Т. Б. Зинченко, Д. Б. Клещев, А. Г. Ремезов, Г. Б. Ремезов // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 3.

4. Пат. 2026556 РФ. Пьезоэлектрический акселерометр / В. Е. Иванов, М. Д. Панайот, М. Г. Попруга // Изобретения. 1995. № 1.

5. Громов А. А., Ивашин Н. А., Соболев М. Д. Пьезоэлектрический датчик ускорения с повышенной устойчивостью к уходу нуля // Измерительная техника. 2009. № 3. С. 42—45.

6. Глозман И. А. Пьезокерамика. М.: Энергия, 1972.

7. Баженов А. А., Лобастов С. А., Яровиков В. И. Пьезоэлектрические датчики для измерения параметров взрывных и ударных нагружений. Ч. 1 // Метрология. 2003. № 10. С. 25—35.

8. Крамаров О. П., Богуш М. В., Мадорский В. В. Упругое взаимодействие пьезоэлемента с прокладкой под действием одноосной квазистатической силы // Физические явления в поликристаллических сегнетоэлектриках. 1981. С. 61—66.

9. Цеханский К. Р., Макеев В. П. Способы повышения коэффициента преобразования пьезоакселерометров // Вибрационная техника. 1975. С. 150—153.

10. Пат. 2018134 РФ. Пьезоэлектрический виброизмерительный преобразователь / С. Н. Сидоркин // Изобретения. 1994. № 15.

11. Пат. 2495438 РФ. Пьезоэлектрический датчик ударного ускорения / Н. А. Ивашин, М. Д. Соболев // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 28.

12. Мальгун М. М., Соболев М. Д. Определение деформационной чувствительности пьезоэлектрических измерительных преобразователей ударных ускорений // Метрология. 1986. № 6. С. 60—64.

Дата принятия 16.04.2015 г.

