

программа не так популярна на российских предприятиях. В результате: рекомендуется Fusion 360 как экономически более целесообразная, освоение программы не представляет особых трудностей, особенно при адаптации в HSMWorks или Inventor.

Источники информации:

1. Норенков И. П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких технологий. CALS-технологии. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2002. 320 с.

Сведения об авторах:

Алтайский государственный технический университет: **Чепуштанов Александр Александрович** – к. т. н, доцент, кафедра «Информационные технологии», a.a.che2017@mail.ru; **Краснов Александр Владимирович** – магистрант, направления «Приборостроение», aleksandrkrasnov1@mail.ru.

УДК 67.02, 681.586.773

**К ВОПРОСУ О СПОСОБАХ ИСКУССТВЕННОГО СТАРЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ
В ПРОЦЕССЕ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

Г. А. КОШКИН, С. А. ТЮМЕНЕВ, В. В. КИКОТ

Аннотация. Приводятся результаты натурного эксперимента по исследованию применимости многократного термоударного воздействия на пьезоэлементы из ЦТС-материалов, а также композиционного материала для повышения временной стабильности технических характеристик. Установлено, что трехкратное термоударное воздействие при заданных температурных и временных режимах является эффективным способом повышения временной стабильности и прогнозируемости изменения характеристик пьезоэлементов.

Ключевые слова: пьезоэлемент, ЦТС-материалы, поляризация, термоударное воздействие, алюмохромфосфатное связующее, временная стабильность характеристик.

**TO THE QUESTION OF HOW TO ARTIFICIALLY AGING THE PIEZOELECTRIC
CELL DURING THE MANUFACTURING PROCESS**

G. A. Koshkin, S. A. Tumenev, V. V. Kikot

Abstract: The results of an experiment on the study of the applicability of multiple thermal shock effects on piezoelements made of PZT materials and a composite material to increase the temporal stability of technical characteristics are presented. It has been established that a threefold thermal shock effect at specified temperature and time conditions is an effective way to increase the temporal stability and predictability of changes in the characteristics of piezoelements.

Keywords: Piezoelement, PZT materials, polarization, thermal shock, alumochromophosphate binder, temporal stability of characteristics.

Одной из проблем, решаемых в АО «НИИФИ» при разработке пьезодатчиков с длительными сроками автономной эксплуатации (до 14,5 лет и более), является обеспечение временной стабильности измерений. Известно, что технические характеристики пьезодатчиков определяются аналогичными характеристиками используемых в их конструкции пьезоэлементов [1], и поэтому актуальна проблема повышения временной стабильности технических характеристик пьезоэлементов с использованием технологических способов (воздействия повышенной и пониженной температуры, механического напряжения, электрических полей).

Цель исследования. Целью натурального эксперимента является исследование применимости многократного термоударного воздействия на пьезоэлементы при искусственном старении в процессе изготовления для повышения временной стабильности их характеристик.

При искусственном старении часто используется общеизвестный способ, основанный на длительной (до нескольких суток) выдержке пьезоэлементов при температуре от 80 до 200 °С [2, 3]. В ходе натурального эксперимента исследовано влияние на характеристики пьезоэлементов циклов кратковременного нагрева пьезоэлементов с 25 до 200 °С со скоростью 200 °С/с в течение 2 мин с последующим их охлаждением путем выдержки при температуре 25 °С в течение 30 мин. Характеристики пьезоэлементов контролировались при температуре 25 °С до и после каждого температурного цикла.

Испытаниям подвергались пьезоэлементы четырех партий: 1) диски диаметром 5 мм и толщиной 1 мм, изготовленные по экспериментальной технологии (без спекания) из гетерогенного композиционного материала на основе НФИ-50 (аналог материала ЦТС-19 ОСТ 11 0444-87 с повышенной пьезочувствительностью) и алюмохромфосфатного связующего (АХФС), выдержка после поляризации – 60 сут; 2) спечённые диски диаметром 5 мм и толщиной 1 мм из материала-аналога ЦТСБ, выдержка – 60 сут; 3) спечённые диски диаметром 20 мм и толщиной 1 мм из НФИ-50, выдержка – 60 сут; 4) спечённые пластины (29,5×5,5×0,32) мм из НФИ-50, выдержка – 10 сут.

Выбор материалов НФИ-50 и ЦТСБ обусловлен их преобладающим использованием в разрабатываемых и серийно изготавливаемых пьезодатчиках: НФИ-50 используется для изготовления функциональных элементов датчиков и актюаторов, которые эксплуатируются в диапазоне температур от минус 50 до 50 °С; ЦТСБ используется для изготовления чувствительных элементов пьезодатчиков, которые эксплуатируются в диапазоне температур от минус 253 до 200 °С.

Композиционный материал на основе НФИ-50 и АХФС является экспериментальным инструментом при создании чувствительных элементов (пьезоэлементов и пьезопокровов) для эксплуатации в диапазоне температур от минус 60 до 60 °С в составе систем структурного мониторинга работоспособности элементов конструкций сложной формы. Технологический процесс изготовления композиционного материала подлежит отработке в части улучшения воспроизводимости характеристик материала и повышения технологичности пьезоэлементов и пьезопокровов, а свойства и характеристики материала – дальнейшему исследованию.

При проведении испытаний получены временные зависимости относительных пьезочувствительности d_{33}/d_{33} , электрической ёмкости C_{0i}/C_0 , тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta_i/tg\delta$ пьезоэлементов, которые приведены на участке длительностью $t_{экп}$ рисунка 1. Прогнозируемые временные изменения, обусловленные естественным старением и показанные на участке длительностью $t_{пр}$ рисунка 1 (около 11 лет), приведены по результатам измерений характеристик контрольных партий серийно изготавливаемых пьезоэлементов [4], а также в соответствии со сведениями о естественном старении пьезоэлементов, изложенными в [2, 3].

Анализ результатов исследований, приведенных в [2-4] показал, что для пьезоэлементов из материалов ЦТС-группы в течение первого месяца после изготовления (первый этап) характерно снижение d_{33} на 30 % и повышение электрической ёмкости C_0 на 15-20 %. Последующее старение (второй этап) сопровождается изменением характеристик по логарифмическому закону, также отмечается, что выдержка пьезоэлементов при повышенной температуре повышает временную стабильность характеристик и уменьшает длительность первого этапа старения.

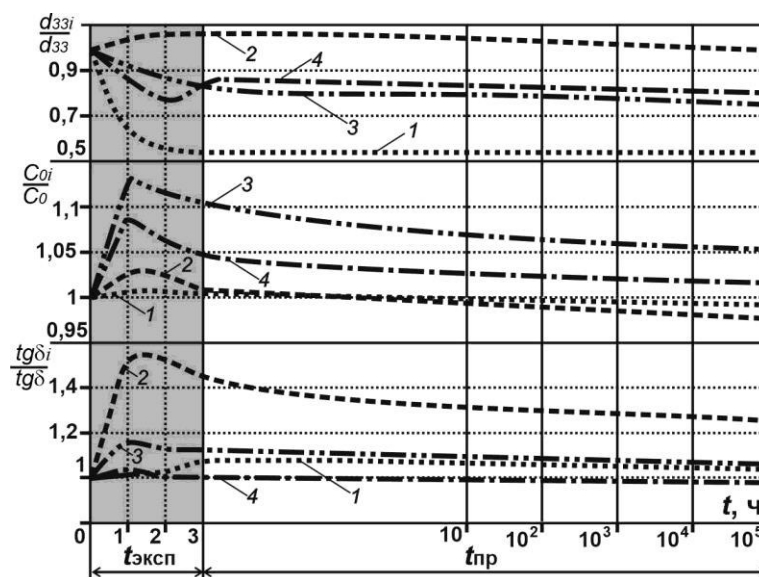


Рисунок 1 – Временные зависимости относительных характеристик пьезоэлементов:
1 – композиционный материал на основе НФИ-50 и АХФС; 2 – аналог ЦТСБ; 3 – НФИ-50 (диски); 4 – НФИ-50 (пластины)

У пьезоэлементов из НФИ-50 после каждого температурного цикла наблюдается снижение пьезочувствительности, причём у пьезоэлементов из аналога ЦТСБ пьезочувствительность повышается. Наибольшая располяризация у пьезоэлементов из материала НФИ-50 и композиционного материала наблюдается после воздействия первого цикла температуры. Электрическая ёмкость, следовательно, и диэлектрическая проницаемость, у спечённых пьезоэлементов (кривые 2-4) после первого цикла повышается, а затем снижается в течение всего срока эксплуатации пьезоэлементов, причём у пьезоэлементов из экспериментального материала (кривая 1) диэлектрическая проницаемость не претерпевает существенных изменений. Наибольшее изменение диэлектрических потерь отмечено у пьезоэлементов из аналога ЦТСБ, в то время как у пьезоэлементов из НФИ-50 наблюдается незначительное возрастание, причём у пьезоэлементов из композиционного материала рост диэлектрических потерь отмечается после третьего температурного цикла.

При перестройке доменной структуры материала пьезоэлемента при его поляризации в материале возникают внутренние механические напряжения, направленные на возврат доменной структуры в исходное состояние, что обуславливает изменение характеристик с течением времени, то есть старение пьезоэлементов [2]. Временное повышение диэлектрической проницаемости предположительно является следствием того, что доменная структура материала от воздействия температуры и электрического поля при поляризации находится в относительно нестабильном состоянии. При термоударных воздействиях в процессе искусственного старения в материале снижаются внутренние механические напряжения, что сопровождается ростом диэлектрической проницаемости из-за перемещения доменных границ и последующим ее снижением в процессе естественного старения из-за закрепления границ на дефектах зерен материала.

Выводы. В ходе натурального эксперимента установлено, что трёхкратное термоударное воздействие на пьезоэлементы после их поляризации в процессе изготовления является эффективным способом повышения временной стабильности и прогнозируемости изменения характеристик пьезоэлементов. Количество температурных циклов и их режимы подлежат оптимизации в ходе дальнейших исследований для последующего внедрения способа в технологический процесс изготовления пьезоэлементов.

Также вследствие того, что пьезодатчики в процессе эксплуатации подвергаются многократным температурным воздействиям, планируется исследовать устойчивость поляризо-

ванного состояния пьезоэлементов, в том числе из композиционного материала, к длительному циклическому воздействию температуры (более 20 циклов) в режиме холостого хода и короткого замыкания по изменению пьезочувствительности d_{33} .

Источники информации

1. Богуш М. В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 3. Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦ ВШ, 2006. 346 с.
2. Глозман И. А. Пьезокерамические материалы в электронной технике // Москва; Ленинград: Энергия, 1965. 192 с.
3. Смажевская Е. Г., Фельдман Н. Б. Пьезоэлектрическая керамика. М. : Сов. радио, 1971. 200 с.
4. Москалев С. А., Чебурахин И. Н., Волков В. С., Кикот В. В., Кошкин Г. А. Исследование временной стабильности характеристик пьезокерамических чувствительных элементов датчиков механических величин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. N 3 (29). С. 87–94.

Сведения об авторах:

«Научно-исследовательский институт физических измерений» / АО «НИИФИ: Кикот Виктор Викторович – к. т. н, начальник центра 6, АО «НИИФИ», piezo@niifi.ru; Тюменев Сергей Александрович – начальник участка центра 6, АО «НИИФИ», piezo@niifi.ru; Кошкин Глеб Александрович – аспирант, инженер-технолог центра 6, АО «НИИФИ», piezo@niifi.ru.