

УДК 534.232.72

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЬЕЗОКЕРАМИКИ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Прилипко Юрий Степанович, Журавлев Станислав Олегович

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина.

Аннотация

Приведены результаты исследований по влиянию видов и режимов поляризации на свойства пьезокерамических элементов (ПКЭ), их временной и температурной зависимости, механическим свойствам, изменению УЗ – свойств от усилия зажатия в пакетном преобразователе. Предложены критерии по оценке качества пьезокерамики для источников ультразвука.

Ключевые слова: *интенсивность, поляризация, частота резонанса, пьезокерамика, ультразвуковая установка.*

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF PIEZOELECTRIC CERAMICS FOR ULTRASONIC TRANSDUCERS

Yrii Prilypko, Stanislav Zhuravlev

Donetsk national technical university, Donetsk, Ukraine.

Abstract

The results of studies on the effects of types and modes of polarization on the properties of piezoceramic elements (SCES), their time – and temperature dependence, mechanical properties, change of US – properties due to the change of closing force in the batch converter have been presented. Proposed criteria have been proposed for assessing the quality of piezoelectric ceramics for ultrasound sources.

Keywords: *intensity, polarization, resonance frequency, piezoelectric ceramic, ultrasonic installation.*

Одним из наиболее эффективных способов энергетического воздействия на различные процессы является использование акустических колебаний, осуществляемых через эффекты как первого порядка (частота, интенсивность и скорость колебаний), так и второго (кавитация, акустические течения, пульсации парогазовых пузырьков и др.). Создание и интенсивное использование современных пьезоэлектрических преобразователей позволило отказаться от громоздких и малоэффективных магнитострикционных источников ультразвуковых колебаний и послужили толчком к дальнейшему усовершенствованию и созданию принципиально нового аппаратного оформления.

Керамика ЦТС, используемая в таких устройствах, должна обладать не только высокими значениями стандартных электрофизических свойств ($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$, $\text{tg}\delta$, d_{31} , K_p , Q_m), но и высокой их стабильностью (температурной и временной), устойчивостью к воздействию сильных динамических напряжений и электрических полей, знания которых необходимы для успешного внедрения. На примерах пьезокерамик ЦТССт – 3 и ЦТСтБС – 4 показано, что наиболее стабильными свойствами обладает керамика, состав которой сдвинут в

тетрагональную область вблизи морфотропного фазового перехода. Безусловно, для изготовления такой керамики определяющим моментом является оптимальный вариант технологии, важнейшей задачей которой является как получение материала строго заданного состава, так и изделий с точно заданной нестехиометрией [1 – 3].

Результаты электрофизических параметров созданной отечественной пьезокерамики (ЦТССт – 3, ЦТСтБС – 4) в виде колец 37 x 15 x 4,5 мм в сравнении с импортными аналогами приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Средние результаты электрофизических параметров ПКЭ в виде колец.

№ п/п	Вид пьезокерамики (страна), размер, мм	$\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$	tg δ , %	$d_{31} \cdot 10^{12}$, Кл/Н	K_{31}	$V_{зв}$, м/с	Q_m
1	«Вернитрон» (США), $\varnothing(37,2 \times 15,7) \times 5$	1300	0,34	107	0,38	3440	790
2	«Брансон» (США), $\varnothing(37,0 \times 15,9) \times 5$	1420	0,26	117	0,323	3370	780
3	«Финнсонику» (Финляндия), $\varnothing(35,0 \times 15,0) \times 6$	1550	0,50	130	0,340	3330	175
4	ЦТССт-3 (Украина), $\varnothing(37,2 \times 15,2) \times 4,5$	1340	0,45	132	0,375	352	820
5	ЦТСтБС-4 (Украина), $\varnothing(37,3 \times 15,0) \times 4,5$	1300	0,50	120	0,365	3500	850

Несколько уступая по тангенсу угла диэлектрических потерь, пьезокерамики ЦТССт – 3 и ЦТСтБС – 4 превосходят остальные по пьезоактивности (K_{31} , d_{31}), что очень важно при реализации кавитационных технологий.

Исследование процесса поляризации образцов ЦТССт – 3 вышеуказанных размеров в масле показали, что увеличение напряженности поля от 2,5 кВ/мм до 3,5 кВ/мм практически не сказывается на свойствах ПКЭ. Электрофизические параметры образцов находятся примерно на одном уровне при различных значениях напряженности электрического поля.

Оптимальные условия поляризации на воздухе пьезокерамики ЦТССт – 3 можно ограничить следующими пределами: напряженность электрического поля $E = 0,578 \div 0,773$ кВ/мм, температура – (280 – 300) °С, время охлаждения под полем – 30 мин. Данный способ является приемлемым, однако выход годных изделий на 5 – 7 % ниже, чем при использовании масляной поляризации.

Прочностные испытания проводили на кольцах $\varnothing(35,5 \times 15,4) \times 4,5$ мм из материала ЦТССт – 3. Значения предела механической прочности на сжатие для каждого пьезоэлемента определяли в момент начала ($\sigma_{сж}^H$) и окончания ($\sigma_{сж}^K$) разрушения каждого пьезоэлемента приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Пределы механической прочности на сжатие ПКЭ из материала ЦТССт-3

№ п/п	Площадь поперечного сечения $S \cdot 10^4$, м ²	Усилие в момент разрушения $P_{сж}$, Н		Предел механической прочности на сжатие $\sigma_{сж} \cdot 10^{-6}$, Н/м ²	
		начальное	конечное	начальный	конечный
1.	5,87	421701	637455	718	1086
2.	5,90	411894	647262	698	1097
3.	5,80	431508	632552	744	1091
4.	5,66	416798	647262	736	1144
5.	5,65	397184	617841	703	1094
Среднее	5,78	415817	636474	720	1102

Для определения достаточности полученных механических свойств пьезоэлементов при работе в динамических условиях, изучали влияние усилия сжатия ПКЭ в оснастке на рабочие ультразвуковые параметры – резонансную (толщинную) частоту f_p и напряжение U_p резонанса. Напряжение резонанса (падение напряжения на резисторе 1,0 Ом, включенном последовательно с преобразователем при резонансе и возбуждающем напряжении 15 В) иммитирует уровень пьезоактивности излучателя.

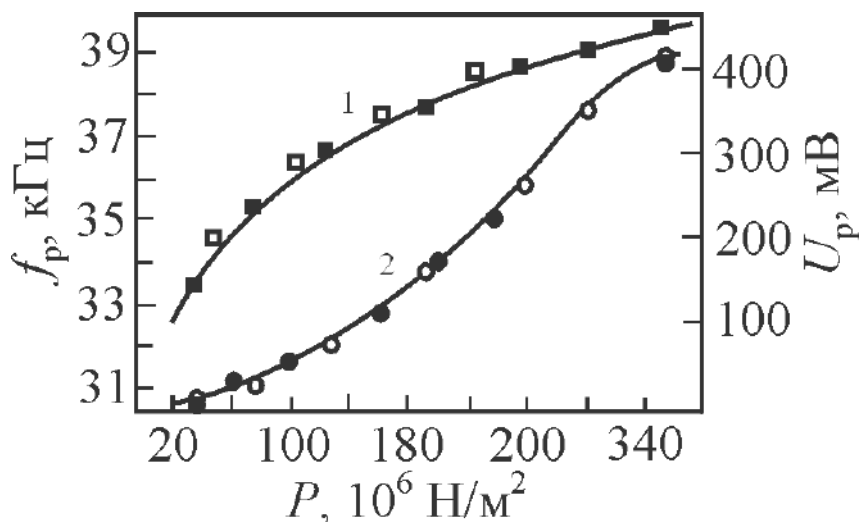


Рисунок 1 – Зависимости частоты резонанса f_p (кривая 1) и напряжения резонанса U_p (кривая 2) от усилия зажатия P ПКЭ из ЦТССТ – 3 (зачерненные значки) и ЦТСтБС – 4 (светлые)

Результаты представленные на рисунке 1 показывают, что с увеличением усилия зажатия f_p и U_p плавно повышаются, достигая максимальных значений соответственно 400 мВ и 40 кГц при усиллии зажатия $3,5 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$, что значительно меньше предела механической прочности керамики ЦТССТ – 3 (табл.2).

Наиболее важной характеристикой пьезокерамических элементов, используемых в ультразвуковых установках, является как можно более высокая стабильность их свойств в процессе эксплуатации преобразователей.

Изучение температурных зависимостей электрофизических параметров пьезокерамики в цикле нагрев – охлаждение в интервале температур 20 – 80°C проводили на пакетном преобразователе, помещенном в ультратермостат. Определяли температурные зависимости емкости C (для пары колец), тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, частоты резонанса преобразователя f_p и напряжения «отклика» U_p . Измерения каждого параметра проводили после двухчасовой выдержки при заданной температуре. Динамика изменения вышеперечисленных параметров показана на рисунке 2 на примере пьезокерамики типа ЦТССТ – 3 заполяризованных в масле. Полученные закономерности должны учитываться при согласовании колебательной системы (ванна + преобразователь) с генератором.

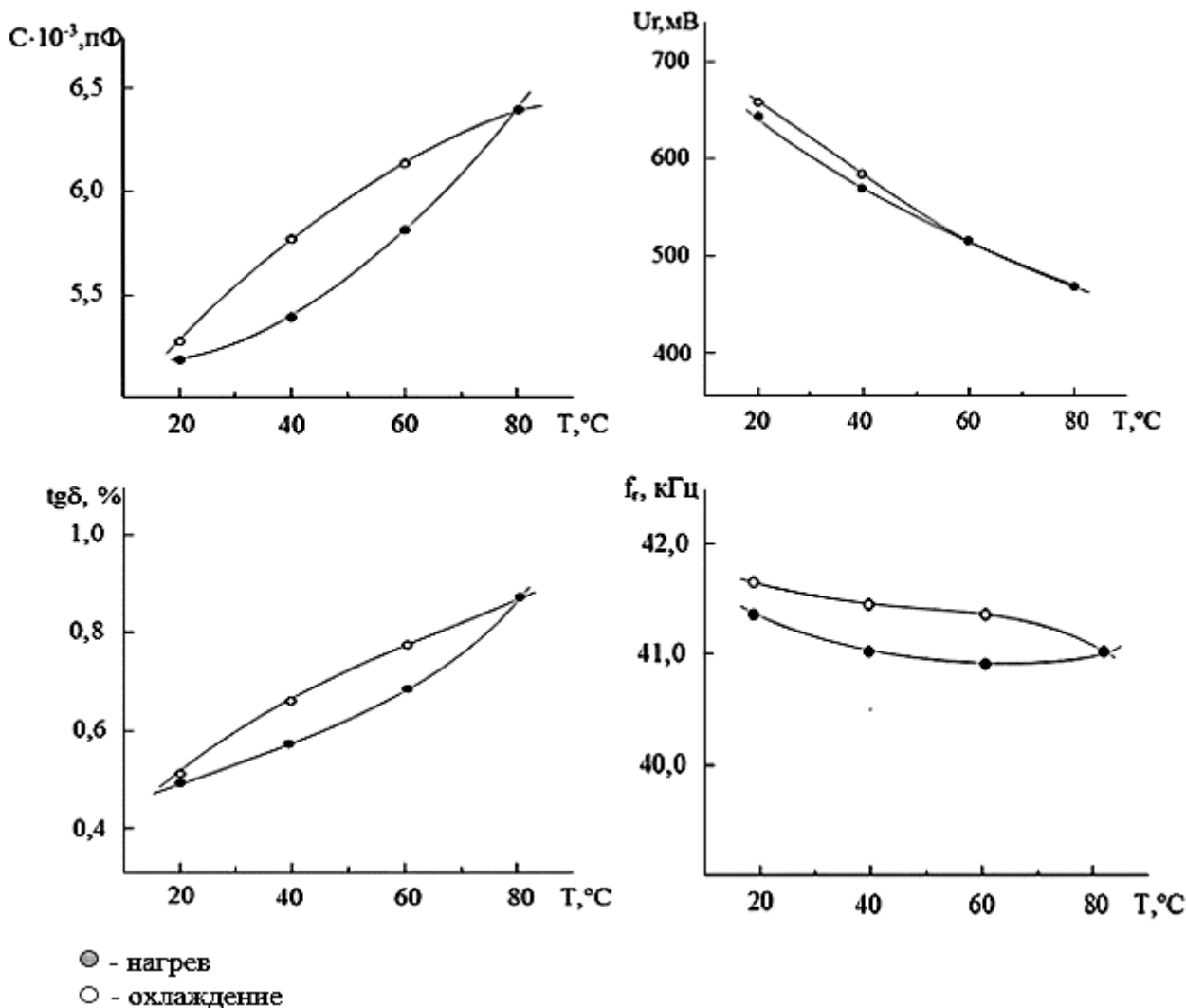


Рисунок 2 – Температурные зависимости частоты f_r и напряжения U_r резонанса, емкости C и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ пакетного преобразователя с пьезокерамикой ЦТССТ – 3

В таблице 3 приведены значения параметров преобразователей с различными ПКЭ при граничных значениях температур. Причем для пьезокерамики ЦТССТ-3 данные сняты для ПКЭ, заполяризованных в полиэтилсилоксановой жидкости (индекс М) и на воздухе (индекс В).

Таблица 3 – Характеристики работы ПКЭ различных марок в составе излучателя

Вид пьезокерамики	$C_{20}-C_{80}$, пФ	$\frac{\Delta C}{C_{20}}$, %	$f_{20}-f_{80}$, кГц	$\frac{\Delta f}{f_{20}}$, %	$U_{20}-U_{80}$, мВ	$\frac{\Delta U_p}{U_{20}}$, %	$\text{tg}\delta_{20}-\text{tg}\delta_{80}$
«Вернитрон»	4040–4840	19,8	40,62–40,20	–1,04	340–320	–6,3	0,30–0,56
«Финнсоник»	3240–3810	17,6	40,69–40,16	–1,32	460–360	–21,7	0,22–0,35
ЦТССТ-3М	5249–6426	22,4	41,25–41,00	–0,61	640–460	–28,1	0,49–0,76
ЦТССТ-3В	5229–6280	20,1	39,15–38,80	–0,89	540–560	3,7	0,54–0,80
ЦТСтБС-4	4784–6076	27,0	41,26–40,90	0,88	520–410	–26,8	0,58–1,04

Примечание. Знаком «минус» показана относительная убыль параметра с повышением температуры.

Оценивая полученные результаты, необходимо отметить следующее. По мере повышения температуры значения C и $\text{tg}\delta$ растут, а f_p и U_p – незначительно снижаются. При возвращении к исходной температуре данные параметры возвращаются примерно к исходным значениям, что является самым существенным условием использования пьезокерамики в УЗ – преобразователях. По емкости и тангенсу угла диэлектрических потерь наиболее стабильной является пьезокерамика «Финнсоник», а по частоте резонанса – ЦТССт – 3, поляризованная как в масле, так и на воздухе. Наименьший уход напряжения резонанса наблюдается у пьезокерамик «Вернитрон» и ЦТССт – 3, поляризованной на воздухе. Следует отметить, что при максимальной температуре значение U_p наиболее высокое у отечественной пьезокерамики ЦТССт – 3, что имеет важное значение с точки зрения увеличения уровня кавитации в промывочной ванне. Несмотря на самый существенный уход $\text{tg}\delta$ у пьезокерамики «Вернитрон», его численные значения при 80°C остаются благоприятно низкими, как и у пьезокерамики «Финнсоник». В реальных условиях температура на образцах составляет 52 – 60°C, а уход параметров, особенно C и $\text{tg}\delta$, более значителен после 60°C. Следовательно, можно говорить о технологическом запасе стабильности всех видов пьезокерамики и соответствии пьезокерамики составов ЦТССт-3 и ЦТСтБС – 4 импортным аналогам.

Что касается временной стабильности пьезокерамики наиболее исчерпывающую информацию дают средние результаты по десяти измерениям на 10 – ый день после поляризации и через 17 лет (таблица 4).

Таблица 4 – Электрические свойства пьезокерамики ЦТСтБС – 4 (диски Ø 35,2 x 6,5 мм) через различные промежутки времени после поляризации.

№ п/п	Промежуток времени после поляризации	$\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$	$\text{tg}\delta$, %	K_p	$d_{31} \cdot 10^{12}$, Кл/Н	Q_m
1.	10 дней	1435	0,50	0,600	136	895
2.	17 лет	1300	0,45	0,599	146	1010

Наблюдается снижение $\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$, $\text{tg}\delta \sim$ на 10 %, повышение $d_{31} \sim$ на 7,5 %, $Q_m \sim$ на 12 % и практически одинаковый уровень K_p .

На базе усовершенствованной технологии разработаны пьезокерамические элементы ультразвуковых пакетных преобразователей, реализующих кавитационные технологии в ультразвуковых ваннах, многоточечных системах распыления воды в парогенераторах, установках ферментного гидролиза древесины, уровнемерах – анализаторах, УЗ – системах подготовки топливно – воздушной смеси для двигателей внутреннего сгорания и т.д.

1. Прилипко Ю. С. Пьезокерамика для ультразвуковых преобразователей: технология и свойства // Огнеупоры и техническая керамика. - М.: ООО «Адвансед санознз», 2015. – № 11 – 12. – С. 27 – 33.

2. Приседский В. В. Нестехиометрические сегнетоэлектрики $A^{II} B^{IV} O_3$: монография. – Донецк: Изд – во «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2011. – 267с.

3. Прилипко Ю. С. Функциональная керамика. Оптимизация технологии: Монография. – Донецк: Норд – Пресс, 2007. – 492 с.