

Е. З. Коварская¹ (✉), к. т. н. М. А. Красавина², А. В. Краснов³,
д. т. н. С. И. Пугачев³, М. С. Шадрина¹

¹ ООО «ЗВУК», Санкт-Петербург, Россия

² ЗАО «Завод энергозащитных устройств», Санкт-Петербург, Россия

³ АО «Концерн «Морское подводное оружие — Гидроприбор»,
Санкт-Петербург, Россия

УДК 666.76.017:620.179.163

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОКСИДНО-ЦИНКОВЫХ ВАРИСТОРОВ, ПОСТАВЛЯЕМЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ИЗГОТОВИТЕЛЯМИ

Представлены результаты исследования неразрушающим акустическим методом физико-механических свойств оксидно-цинковых керамических варисторов, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами АВВ, Ерсос, а также Санкт-Петербургским заводом энергозащитных устройств. Приведены и обсуждены результаты применения этого метода для определения свойств варисторов в форме дисков с различным отношением диаметра к высоте. Отмечено влияние на физико-механические свойства варисторов дисперсности порошков, применяемых при формовании.

Ключевые слова: неразрушающий контроль (НК), оксидно-цинковые варисторы (ОЦВ), частота собственных колебаний (ЧСК).

Показано [1], что использование неразрушающего контроля (НК) может быть полезно как при исследовании оксидно-цинковых варисторов (ОЦВ), изготовленных различными способами формования, так и при контроле готовых изделий. Рассмотрены также возможности оценки разброса свойств внутри технологической партии, результаты анализа однородности партии варисторов, связь скорости распространения акустических волн с плотностью материала, возможность оценки физико-механических свойств ОЦВ, изготовленных по различным технологиям [1].

В настоящей работе приведены результаты использования НК для определения и сравнения физико-механических свойств ОЦВ, изготовленных зарубежными фирмами АВВ и Ерсос, а также Санкт-Петербургским заводом энергозащитных устройств (ЗЭУ). Дана оценка однородности свойств варисторов по толщине. Для НК физико-механических свойств ОЦВ [1] был применен акустический метод контроля, основанный на измерении частот собственных колебаний (ЧСК) изделий [2, 3]. Для измерений использовали прибор Звук-130, в котором ЧСК определяли резонансным методом.

С позиций теории колебаний рассматриваемые ОЦВ представляют собой диски большой толщины, в которых предпочтительными для ре-

гистрации являются низкочастотные изгибные колебания двух типов: мода с двумя узловыми диаметрами f_1 и мода с одной узловой окружностью f_2 (рис. 1) [2, 4].

В соответствии с рекомендациями компьютерной программы прибора Звук-130 для регистрации были выбраны колебания типов f_1 и f_2 . Расчет приведенной скорости распространения акустических волн C_l (определение по ГОСТ Р 52710 — ранее ГОСТ 25961–83) проводили по значению f_1 , расчет коэффициента Пуассона ν — по соотношению измеренных частот f_1 и f_2 . Для обеспечения наибольшей точности измерение частот проводили вблизи узлов колебаний. Для этого изделия закрепляли в измерительной стойке между двумя пьезоэлектрическими оппозитно расположенными датчиками без специальных дополнительных опор при расположении датчиков по толщине посередине радиуса диска. Такая методика НК обеспечивала минимальное искажение спектра ЧСК, достаточную точность и воспроизво-

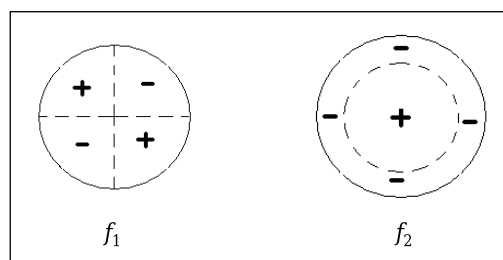


Рис. 1. Формы колебаний изделий на частотах f_1 и f_2 : - - — узловые линии (линии, на которых колебания отсутствуют); + — движение вверх; - — движение вниз



Е. З. Коварская
E-mail: info@ndtest.ru

димось результатов измерения. При проведении измерений следует иметь в виду, что C_l — весьма информативный параметр, характеризующий физико-механические свойства материала изделия. Он связан с плотностью ρ , а также с упругими свойствами изделий зависимостью $C_l = \sqrt{E/\rho}$, где E — модуль нормальной упругости.

Дополнительную информацию об упругих свойствах изделий позволяет получить расчет коэффициента Пуассона ν . Для изделий размерами $H/D < 0,3$, где H и D — высота и диаметр образца, ν и C_l определяли по значению f_1 по методике, изложенной в статье [4], а для изделий с $0,3 < H/D < 0,5$ по данным [5]. В толстых дисках ($H/D > 0,5$) идентификация ЧСК вызывает определенные трудности, и определение C_l и ν производится по эмпирическим зависимостям. Поэтому для повышения точности определения свойств таких изделий, а также для оценки однородности их свойств по толщине «толстые» изделия разрезали на 2–3 части до получения тонких дисков (рис. 2).

Результаты измерений ЧСК, расчета C_l и ν на исходных изделиях и их частях, полученных в результате разрезания, представлены в табл. 1. Из соотношений между скоростями C_l , полученными на разрезанных изделиях внутри одной партии, видно, что максимальный разброс свойств в исследованных образцах всех изготовителей не превышает 1,6 %. Это свидетельствует об идентичности реализуемых фирмами технологических процессов и достижении однородности изделия по высоте. Различия свойств между изделиями одной партии составляют 0,2 % для фирмы ABB и ЗЭУ и 5,8 % для фирмы Еrcos; в последнем случае

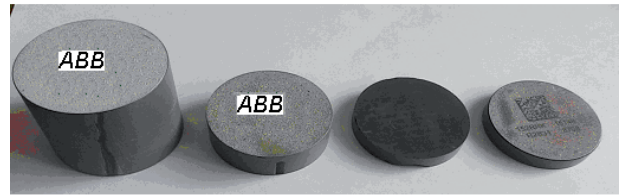


Рис. 2. Исходный ОЦВ фирмы ABB и его части, полученные после разрезания

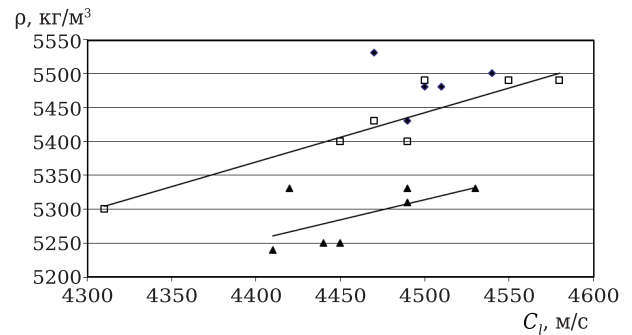


Рис. 3. Изменение плотности ОЦВ в зависимости от скорости распространения акустических волн: $\blacklozenge$ — ABB; $\square$ — Еrcos; $\blacktriangle$ — ЗЭУ

различие, возможно, обусловлено сравнением образцов разных технологических партий.

Полученные данные показали (рис. 3), что образцы фирм ABB и Еrcos близки по значениям ρ и C_l . В то же время ρ варисторов, изготовленных ЗЭУ, несколько ниже. Из рис. 3 следует также, что даже при малом количестве измеряемых изделий существует надежная линейная корреляционная связь между плотностью и результатами акустического контроля. Эта связь может

Таблица 1. Результаты измерений ЧСК и расчета C_l и ν

Образец*	H, мм	D, мм	H / D	m, кг	ρ , кг/м ³	f_1 , кГц	f_2 , кГц	C_l , м/с	$C_l \text{ max} / C_l \text{ min}$	ν
ОЦВ фирмы ABB										
1	42,8	47,5	0,9	0,416	5480	41,34	46,26	4510	—	0,340
2	42,8	47,5	0,9	0,416	5480	41,24	46,25	4500	—	0,340
2a	7,8	47,5	0,16	0,075	5430	14,27	24,03	4490	1,016	0,340
2б	8,0	47,5	0,17	0,078	5500	14,77	24,88	4540	1,016	0,342
2в	14,8	47,5	0,31	0,145	5530	22,85	36,55	4470	1,016	0,337
ОЦВ фирмы Еrcos										
3	2,9	41,7	0,07	0,021	5300	7,12	12,51	4310	—	0,354
4	22,1	33,8	0,65	0,107	5400	45,71	62,20	4450	—	0,342
4a	8,2	33,8	0,24	0,040	5400	27,0	44,27	4490	1,005	0,342
4б	8,2	33,8	0,24	0,040	5430	27,07	44,38	4470	1,005	0,341
5	35,5	47,4	0,75	0,343	5490	34,39	48,09	4500	—	0,340
5a	9,7	47,4	0,21	0,094	5490	17,29	28,70	4550	1,007	0,340
5б	9,7	47,4	0,20	0,094	5490	17,41	28,89	4580	1,007	0,340
5в	9,7	47,4	0,20	0,094	5490	17,41	28,89	4580	1,007	0,340
ОЦВ ЗЭУ										
6	3,6	41,3	0,09	0,033	5240	11,71	20,06	4410	—	0,340
7	21,0	41,4	0,51	0,148	5250	33,48	49,15	—	—	0,334
7a	8,2	41,4	0,20	0,058	5250	18,89	31,27	4440	1,002	0,333
7б	8,2	41,4	0,20	0,058	5250	18,94	31,34	4450	1,002	0,334
8	30,0	47,5	0,63	0,283	5330	31,81	48,85	4420	—	0,343
8a	7,3	47,6	0,15	0,069	5310	13,43	22,70	4490	1,009	0,339
8б	7,3	47,5	0,15	0,069	5330	13,58	23,09	4530	1,009	0,348
8в	7,3	47,5	0,15	0,069	5330	13,49	22,80	4490	1,009	0,341

* Сквозной цифровой нумерацией обозначены исходные образцы варисторов и результаты измерений изделий до разрезания; цифрами с буквами — части (диски) образцов варисторов после разрезания.

Таблица 2. Исходные и разрезанные образцы ОЦВ ЗЭУ

Образец	D, мм	H, мм	H / D	m, кг	ρ , кг/м ³	Звук 130		Звук 203М		C _i , м/с
						f ₁ , кГц	f ₂ , кГц	f ₁ , кГц	f ₂ , кГц	
6	45,5	22,9	0,50	0,203	5450	30,29	46,90	—	—	4550
Верх	45,3	1,9	0,04	0,015	4890	—	—	3667	6334	3890
Середина	45,5	2,0	0,04	0,018	5540	—	—	4296	7444	4375
Низ	45,7	2,0	0,04	0,016	4880	—	—	3805	6455	3930
7	45,7	22,8	0,50	0,203	5430	30,39	46,96	—	—	4580
Верх	45,5	2,0	0,04	0,016	4920	—	—	3892	6672	3960
Середина	45,6	2,0	0,04	0,018	5510	—	—	4236	7348	4320
Низ	45,6	1,9	0,04	0,016	5160	—	—	3778	6525	4035

Таблица 3. ОЦВ ЗЭУ, изготовленные из порошков различной дисперсности

Образец	C, пФ	tgδ, 10 ⁻²	D, мм	H, мм	m, кг	ρ , кг/м ³	f ₂ , кГц	f ₁ , кГц	C _i (f ₁), м/с	ν
<i>Порошки промышленной дисперсности</i>										
1	660	1,40	45,3	19,9	0,173	5400	45,32	29,03	4500	0,345
2	783	1,53	45,6	19,6	0,174	5420	44,30	28,40	4480	0,360
3	784	1,50	45,7	19,7	0,174	5380	44,47	28,40	4500	0,360
4	726	1,39	45,6	19,7	0,173	5370	44,30	28,35	4470	0,360
Среднее значение	740	1,45	45,5	19,7	0,174	5385	44,60	28,54	4485	0,355
<i>Мелкодисперсные порошки</i>										
5	612	0,94	45,0	20,0	0,173	5440	46,10	29,60	4520	0,339
6	640	0,93	45,7	19,8	0,175	5410	45,08	28,40	4500	0,350
7	619	0,92	45,0	20,0	0,173	5450	46,01	29,60	4510	0,338
8	605	0,93	45,7	19,5	0,174	5450	45,35	28,63	4520	0,364
Среднее значение	619	0,93	45,4	19,8	0,174	5440	45,64	29,06	4513	0,348

быть использована для определения ρ изделий по значению C_i.

В табл. 2 представлены результаты измерения свойств образцов 6 и 7 в исходном состоянии на приборе Звук-130, а также результаты измерения ЧСК дисков после разрезания этих образцов, полученные на приборе Звук-203М, реализующем метод свободных колебаний. Поскольку разрезанные образцы имели небольшую толщину и представляли собой тонкие диски, результаты измерений, проведенных на приборе Звук-130, могут быть существенно завышены из-за влияния закрепления между преобразователями. Различие значений C_i исходного изделия и тонких дисков может быть связано с использованием разных методик расчета, однако следует учесть, что эти изделия имеют различные значения C_i по толщине: на дисках, вырезанных из середины исходных образцов, C_i существенно (на 9–12 %) выше, чем на крайних образцах. Полученный результат совпадает также с изменением плотности. Таким образом, следует учитывать существенное различие свойств тонкого (~2 мм) слоя, граничащего с электродами. Для сравнения отметим, что на дисках толщиной 8,2–9,7 мм такой эффект не наблюдается (см. табл. 1).

В табл. 3 приведены результаты измерений характеристик ОЦВ, изготовленных ЗЭУ с использованием порошков промышленной дисперсности с размерами частиц 2–6 мкм и мелкодисперсных с размерами частиц 0,9–1,0 мкм (порошки измельчали на установке IKA Magic LAB). Видно, что уменьшение размеров частиц приводит к некоторому повышению плотности ОЦВ и существенно уменьшению диэлектрических потерь tgδ.

Полученные результаты расширяют возможности использования неразрушающего акустического метода контроля для оценки физико-механических свойств ОЦВ, выпускаемых различными изготовителями, для определения изменения этих свойств у варисторов в форме диска с различным отношением диаметра к высоте, а также влияния на рассматриваемые свойства дисперсности порошков, применяемых в процессе формирования варисторов.

Библиографический список

1. Красавина, М. А. Неразрушающий контроль физико-механических свойств оксидно-цинковых варисторов / М. А. Красавина, Е. З. Коварская, С. И. Пугачев // Новые огнеупоры. — 2007. — № 8. — С. 59–63.
2. Krasavina, M. A. Non-destructive monitoring of the physico-mechanical properties of zinc oxide varistors / M. A. Krasavina, E. Z. Kovarskaya, S. I. Pugachev // Refractories and Industrial Ceramics. — 2007. — Vol. 48, № 4. — P. 306–309.
3. Глаговский, Б. А. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении / Б. А. Глаговский, И. Б. Москоуленко. — Л.: Машиностроение, 1977. — 208 с.
4. Коварская, Е. З. Неразрушающий контроль физико-механических свойств оксидно-цинковых варисторов / Е. З. Коварская, И. Б. Москоуленко // В мире НК. — 2012. — № 4 (58). — С. 5–8.
5. Баранов, В. М. Определение констант упругости образцов материалов, имеющих форму диска / В. М. Баранов // Заводская лаборатория. — 1972. — № 9. — С. 1120–1124.
6. Баранов, В. М. Ультразвуковые измерения в атомной технике / В. М. Баранов. — М.: Атомиздат, 1975. — 264 с. ■

Получено 21.07.17

© Е. З. Коварская, М. А. Красавина, А. В. Краснов, С. И. Пугачев, М. С. Шадрин, 2018 г.