УДК 53.082.722

КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ НА ТОРЦАХ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ОРТОТРОПНЫХ СРЕД

А.А. Джежора, А.М. Науменко

Рассмотрены особенности полей накладных конденсаторов в их периферийной области, в частности, на торцах ленточных электродов, где поле не является плоскопараллельным. Разработана методика учета вклада поля на торцах электродов в емкость накладных конденсаторов. Для материалов, обладающих одноосной анизотропией, рассмотрен алгоритм исключения влияния краевого эффекта на результат контроля. Определены эффективные значения компонент тензора диэлектрической проницаемости сухого льноволокна.

Ключевые слова: модель накладного конденсатора с экраном, анизотропия, краевой эффект.

ВВЕДЕНИЕ

В общей проблеме контроля качества материалов на основе полимеров и изделий из них наиболее ответственный и сложный этап — диагностика показателей прочности и жесткости, то есть определение значений этих механических характеристик косвенным путем, по комплексу физических параметров, с использованием статистических и феноменостатистических методов. Рассматриваемый комплекс параметров включает параметры материалов, неразрушающий контроль которых требует значительных усилий. Одними из таких параметров являются значения составляющих тензора диэлектрической проницаемости ε_{ij}, проводимости σ_{ij}, характеризующие анизотропию диэлектрических свойств. Эти параметры, несущие необходимую информацию о структуре материала, наравне с другими физическими и геометрическими характеристиками могут использоваться для решения ряда самостоятельных задач контроля качества.

Методика неразрушающего контроля анизотропии диэлектрических свойств ортотропных материалов [1] основана на формировании плоскопараллельного электромагнитного поля в области контроля и анализе изменения отклика сигнала на изменение ориентации напряженности поля датчика по отношению к осям анизотропии материала. Плоскопараллельные электромагнитные поля формируют в области контроля с помощью ленточных накладных измерительных конденсаторов (НИК). В случае, когда силовые линии электрического поля НИК замыкаются в плоскости *ZOX* (в соответствии с рис. 1), взаимная емкость между ленточными электродами накладного измерительного конденсатора прямо пропорциональна среднегеометрическим значениям двух компонент тензора диэлектрической проницаемости [1]

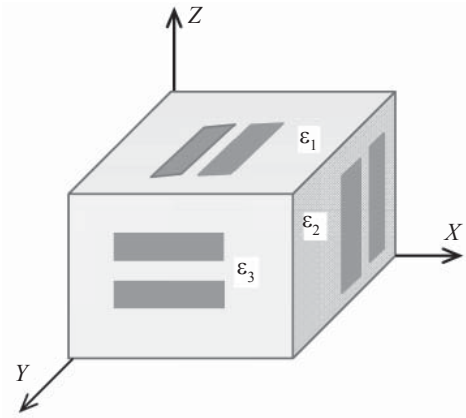

Рис. 1. Схема расположения ленточных электродов НИК при определении анизотропии физических свойств материала.

Александр Александрович Джежора, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой ТиТМ Витебского государственного технологического университета. Республика Беларусь. Тел. 8(033) 645-22-31. E-mail: jezhora@mail.ru

Андрей Михайлович Науменко, аспирант кафедры ПНХВ Витебского государственного технологического университета. Республика Беларусь. Тел. 8(029) 518-93-33. E-mail: nenaviguinsti@tut.by

$$C = \sqrt{\varepsilon_z \varepsilon_x}\,\varepsilon_0 \frac{K(k)}{K(k')} l = \sqrt{\varepsilon_z \varepsilon_x}\,\varepsilon_0 A, \qquad (1)$$

где A — геометрический коэффициент, определяемый размерами электродов и подложки; ε_0 — электрическая постоянная.

В зависимости от схемы расположения ленточных электродов НИК на контролируемой поверхности материала (см. рис. 1) измеренная диэлектрическая проницаемость для ортотропного материала равна [1]:

$$\varepsilon_1 = \sqrt{\varepsilon_z \varepsilon_x}; \quad \varepsilon_2 = \sqrt{\varepsilon_y \varepsilon_x}; \quad \varepsilon_3 = \sqrt{\varepsilon_z \varepsilon_y}. \qquad (2)$$

Таким образом, для определения компонент тензора диэлектрической проницаемости достаточно доступа к двум ортогональным поверхностям контролируемого изделия. В этом случае ε_x, ε_y, ε_z определяются как:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1\varepsilon_2/\varepsilon_3; \quad \varepsilon_y = \varepsilon_2\varepsilon_3/\varepsilon_1; \quad \varepsilon_z = \varepsilon_1\varepsilon_3/\varepsilon_2. \qquad (3)$$

Методика определения основных компонент тензора диэлектрической проницаемости с помощью НИК имеет ряд недостатков. Они связаны, в первую очередь, с задачей оптимизации конструкции НИК. Размеры электродов НИК должны быть выбраны таким образом, чтобы проникновение электрического поля датчика было меньше минимальной толщины материала и, следовательно, изменение толщины не сказывалось на результатах измерений. Во-вторых, поля ленточных электродов НИК в пяточной части (рис. 2) не являются плоскопараллельными, что приводит к методической ошибке определения диэлектрической проницаемости, не позволяет интерпретировать результаты измерений.

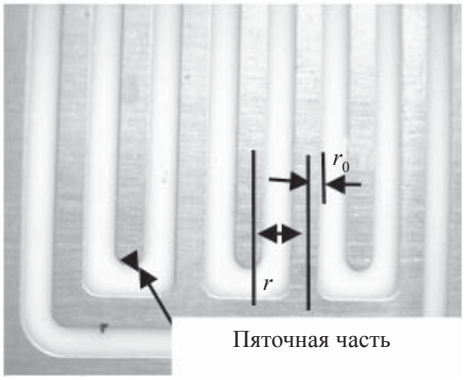

Рис. 2. Торцы электродов НИК:
r — размер секции НИК; r_0 — размер электродов НИК.

В-третьих, большая часть тонких полимерных материалов (искусственные и синтетические кожи, пленки, покрытия, ткани, картон, стеклопластики и т. д.) имеют неквазигомогенную структуру. Неоднородности структуры могут быть сравнимы с толщиной материалов. В силу этого выполнение узких ленточных электродов приведет к соразмерности неоднородностей и размеров НИК и, следовательно, к методическим погрешностям измерения. Кроме того, у линейно-протяженных полотнообразных материалов нет доступа к двум ортогональным поверхностям, а это не позволяет определять компоненты диэлектрической проницаемости согласно методике, предложенной в [1].

ИЗУЧЕНИЕ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА НА ТОРЦАХ ЛЕНТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Данная работа направлена на изучение особенностей плоскопараллельных полей в их периферийной области, в частности, на концах ленточных электродов НИК, а также разработку методики учета и исключения влияния краевого эффекта на результат контроля анизотропии диэлектрических свойств материалов с помощью накладных измерительных конденсаторов с компланарным заземленным экраном (ЭНИК) над электродами. Сечение секции экранированного НИК представлено на рис. 3. Ленточные электроды *1* и *2* создают плоскопараллельное поле в плоскости *ZOX*. Математическая модель ЭНИК построена посредством метода интегральных уравнений [2] в представлении потенциальных электродов *1* и *2* в виде зеркально-симметричных эквипотенциальных поверхностей, разнесенных на расстояние, равное толщине электродов *d* (рис. 3). Модель ЭНИК носит универсальный характер, и в частном случае, если удалить экран *4*, то переходит в модель НИК [1]. В отличие от накладного измерительного конденсатора геометрический коэффициент *A* экранированного накладного измерительного конденсатора является функцией компонент тензора диэлектрической проницаемости контролируемого материала, что позволяет за счет изменения геометрических размеров ЭНИК (расстояния *h* от плоскости электродов до экрана *4*) изменять долю горизонтальной составляющей напряженности электрического поля датчика и чувствительность ЭНИК к анизотропии в плоскости объекта контроля [2].

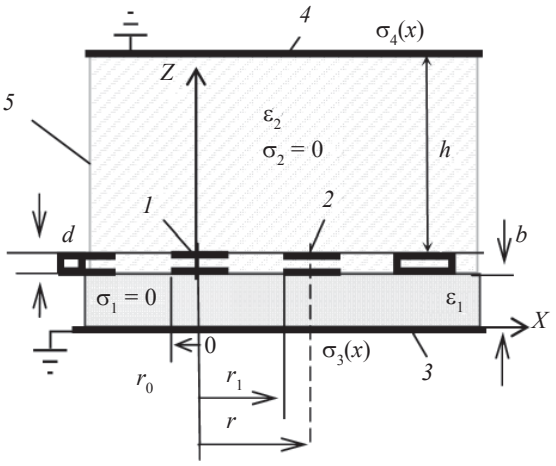

Рис. 3. Сечение секции ЭНИК:
1, *2* — потенциальные электроды; *3* — экран в подложке; *4* — экранирующая плоскость над поверхностью электродов НИК; *5* — контролируемый материал; *r* — размер секции; r_0 — размер электродов.

С уменьшением *h* чувствительность ЭНИК к анизотропии в плоскости объекта контроля возрастает. Экранирующая плоскость *4* не позволяет электрическому полю датчика проникать за пределы контролируемого материала. Для учета и определения взаимной емкости C_{12} между электродами *1* и *2* на линейном участке электродов (плоскопараллельное поле) предложена методика измерения краевого эффекта на торцах электродов. Методика состоит из последовательности операций:

изготовление НИК с различной длиной электродов l_1 и l_2, но одинаковой конфигурацией и геометрией (рис. 4);

контроль размеров электродов под микроскопом “Микромед P-1-LED”;

контроль компланарности экрана *4* плоскости электродов, измерение межэлектродного расстояния h с помощью двух индикаторов;

выбраковка НИК, металлизации поверхностей которых β_i $\left(\beta = \dfrac{r_0 + r - r_1}{r}\right)$ отличаются более чем на 1 %;

измерение взаимной емкости C^1_{12} между электродами первого датчика, длина электродов которого l_1, измерение емкости C^2_{12} второго датчика с электродами длиной l_2;

определение емкости $\Delta C = C^1_{12} - C^2_{12}$, создаваемой на плоскопараллельном участке поля, длиной l_1—l_2;

вычисление емкости C_i^*, создаваемой полем на концах электродов в их пяточной части $C_i^* = C_i - \Delta C L_i/(l_1 - l_2)$, где L_i — длина участка, соответствующая плоскопараллельному участку поля каждого датчика, $i = 1, 2$;

вычисление доли емкости δC_i^*, создаваемой полем на концах электродов в их пяточной части $\delta C_i^* = 1 - C_i^*/C_i$;

определение эффективной длины электродов как $l' = \Delta C_i l_i/(l_1 - l_2)$.

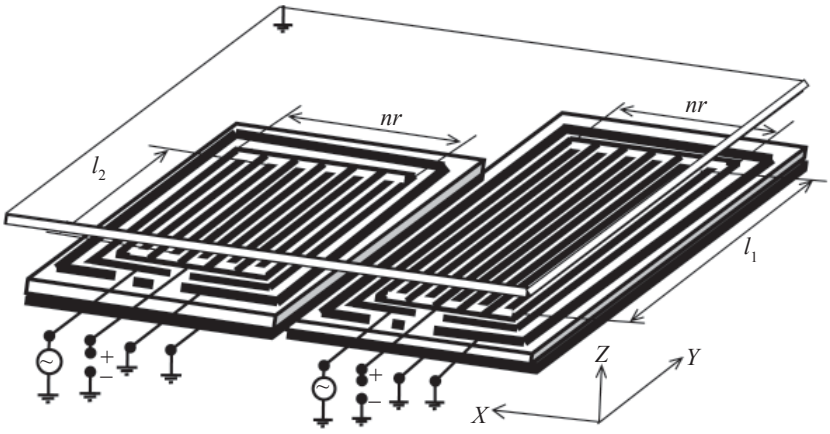

Рис. 4. Датчик в виде пары НИК с различной длиной ленточных электродов l_1 и l_2. Черным цветом выделены электроды, белым — подложка НИК. В нижней части (черный цвет) расположен экран подложки. Над компланарными НИК расположена экранирующая плоскость.

Методика измерения краевого эффекта на торцах электродов позволяет вычислять ошибку численного расчета емкости ЭНИК $\delta C_i^{\text{расч}} = 1 - C_i^p/(\Delta C L_i/(l_1 - l_2))$, где C_i^p — расчетная емкость датчика на участке плоскопараллельного поля длиной $L_i = l_i - 2r_0$. Датчики выполнены на подложке из тефлона ($\varepsilon = 2{,}1$) толщиной 2 мм, толщина электродов равна 30 мкм, длина электродов l — 53 и 27 мм. Для датчиков с размерами секций $r = 6$ и 4 мм длина электродов l составляла 52 и 26 мм. Металлизация поверхности датчика β_i планировалась 0,5 %. Из восьми выполненных датчиков с различной длиной электродов были отобраны датчики с отклонением в металлизации менее 1 %. Для отобранных датчиков измеряли взаимную емкость C_{12} между потенциальными электродами *1* и *2* на частоте 10 кГц прибором Е7-20. Для датчиков с близкой металлизацией поверхности, но различной длиной электродов l_1, l_2 вычисляли взаимную емкость ΔC_i, соответствующую плоскопараллельному участку поля длиной l_1—l_2. Для этого участка рассчитывали взаимную емкость C_{12} ЭНИК, и ошибка численных расчетов $\delta C_i^p = (1 - \Delta C_i^p/\Delta C_i)100$ %. Затем вычисляли емкость C_i^*, создаваемую полем на концах электродов в их пяточной части, и ее вклад в емкость датчика $\delta C_i^* = 1 - C_i^*/C_i$. Экспериментальные и теоретические исследования проводили для различных расстояний h

от экрана *4* до плоскости расположения ленточных электродов и представлены в табл. 1. В частном случае удаления экрана *4* ($h \to \infty$) все результаты соответствуют НИК.

Таблица 1

Расчетные ΔC_i^p и экспериментальные ΔC_i значения емкостей ЭНИК в воздухе

r, мм	r_0, мм	β	h, мм	l_i, мм	C_i, пФ	L_i, мм	ΔC_i, пФ	ΔC_i^p, пФ	δC_i^p, %	δC_i^*, %
3,916	1,024	0,523	∞	26	1,093	24	1,004	1,007	0,29	15
3,890	1,024	0,526	∞	52	2,097	50	1,930	1,959	1,50	8
5,874	1,517	0,516	∞	27	0,530	24	0,484	0,478	1,26	19
5,886	1,507	0,512	∞	27	0,529	24	0,485	0,471	2,84	19
5,872	1,500	0,511	∞	27	0,534	24	0,480	0,470	1,95	20
5,949	1,514	0,508	∞	53	1,014	50	0,923	0,880	2,77	11
3,890	1,024	0,526	7,98	52	1,937	50	1,758	1,795	–2,19	9
3,890	1,024	0,526	3,99	52	1,689	50	1,521	1,554	–2,45	10
3,916	1,024	0,523	7,99	26	1,023	24	0,914	0,919	–0,62	18
3,916	1,024	0,523	3,98	26	0,898	24	0,791	0,796	–0,63	19

Для НИК доля емкости δC_i^*, создаваемая полем на концах электродов в их пяточной части, составляет ≈15 % (L = 26 мм) и 8 % (L = 52 мм). С приближением компланарного экрана начинается незначительный рост доли емкости δC_i^*, создаваемой полем на концах электродов в их пяточной части. Погрешность расчета емкости, создаваемой плоскопараллельным полем ЭНИК, не превышает 2,5 % и позволяет использовать ранее созданную 2D-модель ЭНИК [2] для решения обратных задач.

Поля ленточных электродов НИК, ЭНИК на торцах электродов не являются плоскопараллельными (см. рис. 2), что приводит к методической ошибке определения компонент тензора диэлектрической проницаемости. Рассмотрим методику исключения краевого эффекта на торцах электродов при контроле компонент тензора диэлектрической проницаемости на примере льна. Льноволокна, хлопок характеризуются высокоориентированной целлюлозой и обладают одноосной анизотропией диэлектрических свойств (рис. 5).

В силу того, что диаметр волокон (порядка 10 мкм) меньше толщины электродов (d = 30 мкм), было сделано допущение о заполнении волокнами воздушных карманов ЭНИК подобно “жидкому диэлектрику”. Для исключения краевого эффекта на торцах электродов были выполнены две пары ленточных ЭНИК: первая создает поле вдоль волокон, вторая — поле в направлении, перпендикулярном волокну. Каждая пара состоит из двух НИК (см. рис. 4) с длинами электродов l_1 = 52 мм и l_2 = 26 мм, числом секций шесть и соответственно близкими металлизациями поверхности НИК. В пяточной части электродов поле является центрально симметричным в силу геометрии электродов. По этой причине емкости, создаваемые полем на концах электродов в их пяточной части, являются интегральными характеристиками ди-

электрических свойств ортотропного материала и практически одинаковы. Расхождения могут быть вызваны технологией изготовления электродов (отклонением геометрических размеров от заявляемых размеров).

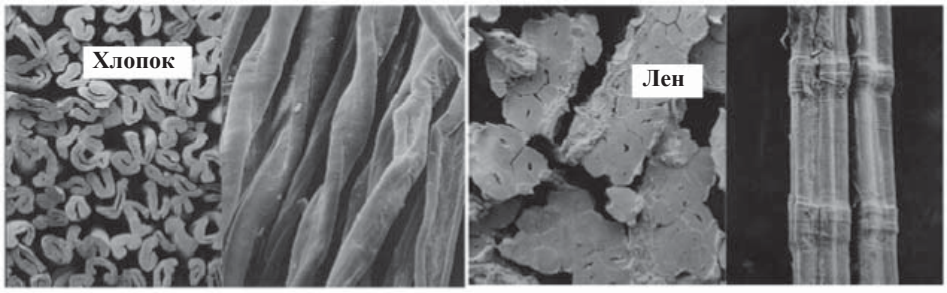

Рис. 5. Фотографии волокон хлопка и льна под микроскопом.

Первоначально измеряли емкости $C_{1\perp}$ и $C_{2\perp}$, соответствующие ЭНИК с электродами длиной l_1 и l_2. Затем вычисляли емкость $\Delta C_\perp = C_{1\perp} - C_{2\perp}$, соответствующую плоскопараллельному участку поля в направлении, перпендикулярном оси волокон. Эффективное значение компоненты тензора диэлектрической проницаемости в плоскости, перпендикулярной оси волокон $\varepsilon_\perp$, определяли на основе решения прямой задачи [2]. Многократное использование математической модели ЭНИК с изменением значений диэлектрической проницаемости $\varepsilon_\perp$ проводили до тех пор, пока относительные ошибки между расчетными значениями емкости, даваемыми численным моделированием, и экспериментально полученными значениями емкости $\Delta C_\perp$ не были минимизированы до ±0,1 %. Далее измеряли значения емкостей $C_{1\|}$ и $C_{2\|}$ и вычисляли емкость $\Delta C_\| = C_{1\|} - C_{2\|}$, отвечающую плоскопараллельному участку поля в направлении оси волокон. Определив эффективные значения компоненты тензора диэлектрической проницаемости в плоскости, перпендикулярной оси волокна $\varepsilon_\perp$, решали обратную задачу для вычисления эффективного значения компоненты тензора диэлектрической проницаемости в направлении оси волокна $\varepsilon_\|$.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований для ЭНИК, проведенные на частоте электромагнитного поля 10 кГц, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные эффективные значения компонент тензора диэлектрической проницаемости льноволокна

№	h, мм	$C_{1\|}$, пФ	$C_{2\|}$, пФ	$C_{1\perp}$, пФ	$C_{2\perp}$, пФ	$\Delta C_\|$, пФ	$\Delta C_\perp$, пФ	$\varepsilon_\|$	$\varepsilon_\perp$	$\varepsilon'_\|$	$\varepsilon'_\perp$
1	3,99	1,867	0,99	1,766	0,951	0,877	0,815	1,27	1,07	1,23	1,11
2	6,02	2,004	1,059	1,916	1,021	0,945	0,895	1,25	1,07	1,17	1,07
3	8,02	2,010	1,091	1,974	1,061	0,919	0,913	—	—	—	—
4	10,01	2,036	1,092	2,025	1,068	0,944	0,957	—	—	—	—

Результаты вычисления эффективных значений компонент тензора диэлектрической проницаемости выполнены для различных расстояний от плоскости электродов до компланарного экрана h. Эффективные значения компонент тензора диэлектрической проницаемости составляют: $\varepsilon_{\|} = 1{,}270 \pm 0{,}002$; $\varepsilon_{\perp} = 1{,}070 \pm 0{,}002$. Для случая, когда краевой эффект не исключен, эффективные значения компонент тензора диэлектрической проницаемости $\varepsilon'_{\|}$, $\varepsilon'_{\perp}$ изменяются с расстоянием h до экрана. При этом значения диэлектрической проницаемости в направлении оси волокон $\varepsilon'_{\|}$ занижены, а в перпендикулярном направлении $\varepsilon'_{\perp}$ завышены. Различие в определении анизотропии $\varepsilon_{\|} - \varepsilon_{\perp}$ значительно и составляет 40 %.

Для $h > 2r$ различия в $C_{i\|}$ и $C_{i\perp}$ малы в силу низкой чувствительности НИК к анизотропии диэлектрических свойств, и расчет $\varepsilon_{\|}$, $\varepsilon_{\perp}$ не проводили.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика исключения краевого эффекта на торцах ленточных электродов существенно повышает точность измерения компонент тензора диэлектрической проницаемости. Она позволяет проводить верификацию численных расчетов, выполненных для 2D-моделей ЭНИК, НИК.

Витебский государственный
технологический университет
Республика Беларусь

Поступила в редакцию
15 мая 2013 г.;
в окончательном варианте
28 июня 2013 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Штраус В.Д. Методики неразрушающего определения диэлектрической проницаемости анизотропных полимерных материалов.— Механика полимеров, 1974, № 4, с. 715—719.
2. Джежора А.А., Науменко А.М. Диэлькометрия ортотропных материалов текстильной промышленности.— Дефектоскопия, 2011, № 12, с. 67—76.