

А. И. Ягупов, А. Р. Бекетов, М. В. Баранов,
В. И. Денисенко, А. Т. Пластун, О. В. Стоянов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ «ОРГАНИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ЛАК – НИТРИД АЛЮМИНИЯ»

Ключевые слова: нитрид алюминия, удельное объемное сопротивление, электрическая изоляция, композиционный материал, модификатор.

Повышение электрофизических параметров изоляционных пропиточных материалов является эффективным способом улучшения эксплуатационных свойств электротехнических устройств, применяемых в различных отраслях промышленности. Одним из путей повышения электрофизических параметров является введение в пропиточные лаки неорганических соединений с высокими электрофизическими характеристиками.

Keywords: aluminum nitride, specific volume resistance, electrical isolation, composite material, modifier.

Increasing electrophysical parameters of the isolation impregnating materials is an efficient way of improving working properties of electrotechnical equipment used in various branches of industry. One of the ways of increasing electrophysical parameters is introducing inorganic compounds having high electrophysical characteristics into impregnating lacs.

Повышение электрофизических параметров изоляционных пропиточных материалов является эффективным способом улучшения эксплуатационных свойств электротехнических устройств, применяемых в различных отраслях промышленности.

Как показывают опубликованные данные [1], одним из путей повышения электрофизических параметров является введение в пропиточные лаки неорганических соединений с высокими электрофизическими характеристиками. Известны попытки применения таких модификаторов, как маршалит, нитрид бора, кварц, оксиды магния и бария, диоксид титана, карбид бора [2], в различные пропиточные лаки.

Тем не менее, отсутствуют какие-либо сведения об использовании добавок нитрида алюминия. Эти материалы обладают уникальными свойствами: высоким удельным электросопротивлением и повышенным напряжением пробоя, высоким значением диэлектрической постоянной [3].

Эти материалы дополнительно обладают спектром уникальных характеристик. В частности, при высоком удельном электросопротивлении они имеют превосходную теплопроводность (до 300 Вт/мК в монокристаллическом состоянии) [3]. Электрофизические характеристики некоторых неорганических модификаторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Электрофизические характеристики модификаторов органических пропиточных электроизоляционных лаков [3, 4]

№/№	Модификатор	Диэлектрическая постоянная	Удельное электросопротивление, Ом·м	Электрическая прочность, кВ/мм
1	Оксид кремния (SiO ₂)	3,5-4,1	10 ¹²	-
2	Оксид алюминия (Al ₂ O ₃)	10,5-12	3,2·10 ¹²	20,3
3	Оксид магния (MgO)	8-9	10 ¹⁴	-
4	Нитрид алюминия (AlN)	9	> 10 ¹¹	30
5	Нитрид бора (BN)	3,6-4,2	1,7·10 ¹¹	-
6	Оксид бария (BaO)	4,2-3,25	-	-
7	Диоксид титана (TiO ₂)	40,0-80,0	-	-
8	Нитрид кремния (Si ₃ N ₄)	6,3-7,1	10 ¹¹ – 10 ¹²	-

Нитрид алюминия, полученный на опытно-промышленной установке кафедры редких металлов и наноматериалов УрФУ имеет теплопроводность 60-100 Вт/м·К и различный гранулометрический состав, начиная от 100 нм и до 5-10 мкм. Электротехнические устройства, как правило, работают при повышенных температурах, поэтому улучшение отвода тепла способствует их надежности и увеличению сроков эксплуатации. Следует также подчеркнуть, что практическое использование неорганических модификаторов требует проработки таких вопросов как коррозионно-эрозийной стойкости, определения теплофизических характеристик, адгезии по отношению к органическому электроизоляционному лаку. Нельзя обходить и чисто технологические вопросы: вязкости, устойчивости раствора во времени, наконец, характера распределения модификатора в объеме отвержденного органического электроизоляционного лака.

Учитывая многостадийность необходимых исследований [5], в настоящей работе проведено определение электрофизических свойств композита «органический электроизоляционный лак КО-916К – нитрид алюминия». Для измерения характеристик удельного сопротивления материалов применялись специально приготовленные образцы в виде пленок содержащих различный объемный процент нитрида алюминия толщиной 0,15-0,2 мм. Диаметр основного электрода 35 мм.

Принципиальная схема установки для измерений удельных объемных и поверхностных сопротивлений плоских образцов представлена на рис. 1.

Для определения характеристик электрической прочности и удельного сопротивления образцов использовались нормативы и рекомендации государственных стандартов и нормативных документов [6].

Испытательная установка состояла из источника постоянного регулируемого напряжения (ИПРН), который позволяет регулировать напряжение в пределах от 0 до 600 В, и переключателя П, предназначенного для изменения полярности на-

пряжения, подводимого к образцу с измерительными электродами (рис. 1а). Схемы присоединения приборов и электродов на испытуемых образцах диэлектриков для определения ρ_v и ρ_s показаны на рис. 1б и рис. 1в.

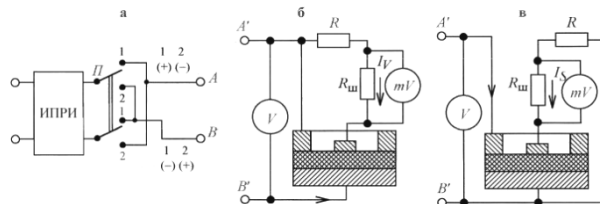


Рис. 1 – Принципиальная схема установки для измерения ρ_v и ρ_s : а - общая схема; б - схема присоединения электродов для определения ρ_v ; в - схема присоединения электродов для определения ρ_s

В виду того, что сопротивление изоляции из материалов даже с весьма неважными характеристиками имеет величину, которая при напряжении несколько сотен вольт ограничивает ток на уровне микро-, пикоампер и меньше, требуются измерители тока с очень большой чувствительностью или специальные методы измерения. На рисунке 1 также показана схема измерения тока, протекающего через диэлектрик с применением цифрового милливольтметра. Схема позволяет измерять падение напряжения на шунте с известным сопротивлением от тока, определяемого приложенным напряжением и сопротивлением изоляции.

Величины сопротивлений шунта $R_{ш}$ и разделяющего резистора R многократно меньше измеряемого. Поэтому разницей напряжений на измерительных электродах образца и измеряемого на выходе источника ИПРН можно пренебрегать. Ток, протекающий через измеряемое сопротивление, определяется по формуле:

$$I_{изм} = \frac{U_{ш}}{R_{ш}},$$

где $U_{ш}$ – измеренное электронным прибором напряжение на шунте; $R_{ш}$ – установленная при этих измерениях величина сопротивления шунта.

После измерения тока, протекающего через образец, при заданном напряжении определяется объемное сопротивление R_v образца и удельное объемное сопротивление ρ_v и соответственно поверхностное сопротивление образца R_s и удельное поверхностное сопротивление ρ_s по формулам:

$$R_v = \frac{U_y}{I_{шv}} = \frac{U_y R_{ш}}{U_{шv}}, \quad \rho_v = R_v \frac{S}{d} = R_v \frac{2\pi r_1}{d};$$

$$R_s = \frac{U_y}{I_{шs}} = \frac{U_y R_{ш}}{U_{шs}}, \quad \rho_s = R_s \frac{2\pi}{\ln \frac{R_2}{R_1}},$$

где S - площадь измерительного электрода 1; U_y – напряжение, подводимое к образцу, d - толщина

образца; R_1 и R_2 - радиусы измерительного электрода 1 и экранирующего 3 соответственно. Геометрические размеры образцов подставляются в метрах.

Атмосферные условия, особенно температура и влажность, а также чистота среды оказывают влияние на величины сопротивлений изоляции и удельные объемные и поверхностные сопротивления. По этой причине величины сопротивлений, приводимые в справочниках, относятся к нормальным атмосферным условиям (давление 760 мм рт. ст., температура воздуха 20°C, абсолютная влажность воздуха 11 г/м³). Характеристики, полученные при измерениях, также приводятся к нормальным атмосферным условиям.

Ввиду того, что токи через твердые диэлектрики при подключении к источнику постоянного напряжения устанавливаются, как правило, с задержкой по времени, поэтому электрические параметры определялись спустя несколько десятков секунд, как рекомендуется в нормативах.

Для определения электрической прочности образцов применялась испытательная установка высокого переменного напряжения ТуР-10 (10кВ), образцы помещались между электродами диаметром 60 мм образующими равномерное электрическое поле.

Результаты эксперимента обрабатывались с применением статистических характеристик. Энергия пробоя определялась по формуле:

$$E_{пр} = \frac{U_{ср.проб.}}{\Delta}; \text{кВ/мм},$$

$$U_{ср.проб.} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{проб}^i}{n} \text{кВ}, \quad \Delta - \text{толщина образцов, мм; } N - \text{количество образцов.}$$

Разброс данных характеризуется:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{проб}^i - U_{ср.проб.})^2}{n-1}}.$$

Результаты измерения удельного объемного сопротивления ρ_v отвержденной композиции «электроизоляционный лак КО-916К – нитрид алюминия» приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерения удельного объемного сопротивления ρ_v и напряжения пробоя $U_{проб}$ композиции «органический электроизоляционный лак КО-916К – нитрид алюминия»

Состав композиции (об% модификатора)	Удельное объемное сопротивление, (Ом·м)	Напряжение пробоя, (кВ/мм)
0 (чистый лак КО-916К)	$3,0 \cdot 10^{13}$	75
10	$3,3 \cdot 10^{13}$	102
30	$3,4 \cdot 10^{13}$	109

Приведенные данные наглядно свидетельствуют о том, что с ростом содержания нитрида алюминия увеличивается как объемное сопротивление, так и напряжение пробоя. Пробой образцов происходит на плоской поверхности образца, без консолидации в местах расположения частиц неорганического модификатора.

Выводы

1. Анализ опубликованных данных свидетельствует о том, что введение неорганических модификаторов повышает электрофизические свойства пропиточных электроизоляционных лаков.

2. Практическое применение неорганических модификаторов определяется комплексом свойств: физико-химических и технологических.

3. Разработана и смонтирована установка для определения удельного объемного сопротивления композитов «электроизоляционный лак КО-916К – нитрид алюминия»

4. Показано, что введение нитрида алюминия улучшает электрофизические характеристики пропиточного электроизоляционного лака КО-916К.

Исследование проведено при финансовой поддержке молодых ученых УрФУ в рамках реализации программы развития УрФУ.

Литература

1. Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общего назначения. 3-е издание, перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 376 с.
2. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий и др. – Л.: Энергия, 1977. – 352 с.
3. Самсонов Г.В. Тугоплавкие соединения / Г.В. Самсонов, И.М. Винницкий. – М.: Металлургия, 1976. – 557 с.
4. Самсонов Г.В. Физико-химические свойства окислов. – М.: Металлургия, 1969. – 453 с.
5. Применение композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» в качестве пазовой изоляции обмоток статора асинхронных электродвигателей малой и средней мощности / Ягунов А.И., Елагин А.А., Лихачев С.С., Поротникова Н.М., Баранов М.В., Бекетов А.Р., Стоянов О.В. // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т.16, №5. – С. 161-166.
6. Казарновский Д.М. Испытание электроизоляционных материалов / Д.М. Казарновский, Б.Н. Тареев. – Л.: Энергия, 1969. – 296 с.

© **А. И. Ягунов** — вед. инж. каф. редких металлов и наноматериалов Уральского федер. ун-та имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, yagupov.alexander@gmail.com; **А. Р. Бекетов** — д.т.н., проф. той же кафедры, beketovar@dpt.ustu.ru; **М. В. Баранов** — д.т.н., проф. той же кафедры, mbaranov@k66.ru; **В. И. Денисенко** — д.т.н., проф. каф. электрических машин того же вуза, kem_em@mail.ustu.ru; **А. Т. Пластун** — д.т.н., проф., зав. каф. электрических машин того же вуза, **О. В. Стоянов** — д.т.н., проф., зав. каф. технологии пластических масс КНИТУ, ov_stoyanov@mail.ru.