

Контроль и испытания

УДК 621.002.3-419; 620.22-419

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ «ОРГАНИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ЛАК – НАНООКСИДНИТРИДНЫЙ МОДИФИКАТОР»

*С.М. Красильников, А.И. Ягупов, Д.А. Бекетов,
М.В. Баранов, А.Р. Бекетов, А.Т. Хлюпин*

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIALS "ORGANIC ELECTRICAL ISOLATION LAC – NANOOXIDENITRIDE MODIFIER"

*S.M. Krasil'nikov, A.I. Yagupov, D.A. Beketov,
M.V. Baranov, A.R. Beketov, A.T. Hlyupin*

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.

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

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.

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

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 наноксиднитридных материалов. 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 табл. 1.

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

№ п/п	Модификатор	Диэлектрическая постоянная	Удельное электро-сопротивление, 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	–

Наноксидонитридные материалы, полученные на опытно-промышленной установке имеют теплопроводность 60–100 Вт/м·К. Материалы имеют различный гранулометрический состав (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 улучшение коррозионно-эрозийной стойкости, определение 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 полимеризованного органического электроизоляционного лака.

Учитывая многостадийность необходимых исследований, в настоящей работе проведено определение электрофизических свойств композита «органический электроизоляционный лак КО-916к – наноксидонитридный модификатор». Для измерения характеристик удельного сопротивления материалов применялись специально приготовленные образцы в виде пленок, содержащих различный объемный процент наноксидонитридного модификатора 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 [5].

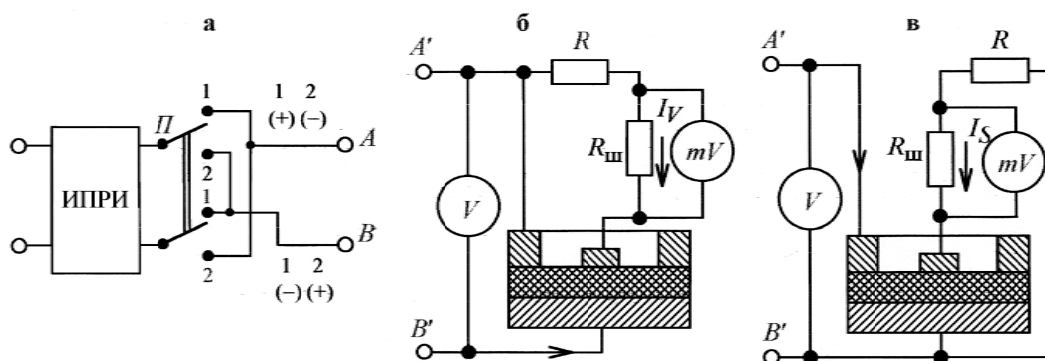


Рис. 1. Принципиальная схема установки для измерения ρ_v и ρ_s :
 а – общая схема; б – схема присоединения электродов для определения ρ_v ;
 в – схема присоединения электродов для определения ρ_s

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

Ввиду 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 рис. 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 °С, 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, электрические параметры определялись спустя несколько десятков секунд, как рекомендуется в нормативах.

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

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

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

где $U_{ср.проб} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{проб}^i}{n}$ кВ; Δ – толщина образцов, мм; n – количество образцов.

Разброс данных характеризуется:

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

Контроль и испытания

Результаты измерения удельного объемного сопротивления ρ_v полимеризованной композиции «органический электроизоляционный лак КО-916к – нанооксидонитридный модификатор» приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения удельного объемного сопротивления ρ_v и напряжения пробоя $U_{\text{проб}}$ композиции «органический электроизоляционный лак КО-916к – нанооксидонитридный модификатор»

№ п/п	Состав композита, об% модификатора	Удельное объемное сопротивление, Ом·м	Напряжение пробоя, кВ/мм
1	0 (чистый лак КО-916к)	$3,0 \cdot 10^{11}$	3,89
2	10	$3,3 \cdot 10^{11}$	5,30
3	30	$3,4 \cdot 10^{11}$	5,64

Приведенные данные наглядно свидетельствуют о том, что с ростом содержания нанооксидонитридных материалов 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 «полимеризованный электроизоляционный лак КО-916к – нанооксидонитридный модификатор».
4. Показано, что введение нанооксидонитридного модификатора улучшает электрофизические характеристики пропиточного электроизоляционного лака КО-916к.

Литература

1. Бернштейн, Л.М. *Изоляция электрических машин общего назначения*. – 3-е изд., перераб. и доп. / Л.М. Бернштейн. – М.: Энергоиздат, 1981. – 376 с.
2. Богородицкий, Н.П. *Электротехнические материалы* / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – 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* / Г.В. Самсонов. – М.: Металлургия, 1969. – 453 с.
5. Казарновский, Д.М. *Испытание электроизоляционных материалов* / Д.М. Казарновский, Б.Н. Тареев. – Л.: Энергия, 1969. – 296 с.

Поступила в редакцию 27 июня 2011 г.

Бекетов Дмитрий Аскольдович. Кандидат технических наук, доцент кафедры электрохимических производств, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Область научных интересов – композиционные материалы и покрытия высокотемпературного назначения. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Тел.: (343)-375-47-08; e-mail: beketovar@dpt.ustu.ru

Beketov Dmitrii Askol'dovich. Candidate of technical science, docent of electrochemical processes department of Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltzin. Field of scientific interests: composite materials and covers for high temperatures. 620002, Yekaterinburg, Mira str., 19, Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltzin. Phone: (343)-375-47-08; e-mail: beketovar@dpt.ustu.ru

Бекетов Аскольд Рафаилович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой редких металлов и наноматериалов, Уральский федеральный университет имени первого Президента

России Б.Н. Ельцина. Область научных интересов – Композиционные материалы и покрытия высокотемпературного назначения. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Тел.: (343)-374-54-91; e-mail: beketovar@dpt.ustu.ru

Beketov Askold Rafailovich. Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Rare Metals and Nanomaterials department of Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltzin. Field of scientific interests: composite materials and covers for high temperatures. 620002, Yekaterinburg, Mira str., 19, Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltzin. Phone: (343)-374-54-91; e-mail: beketovar@dpt.ustu.ru

Ягупов Александр Иванович. Инженер кафедры редких металлов и наноматериалов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Область научных интересов – Композиционные материалы и покрытия высокотемпературного назначения. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Тел. (343)-374-54-91; e-mail: uirs@mail.ru

Yagupov Alexander Ivanovich. Engineer of the Rare Metals and Nanomaterials department of Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltzin. Field of scientific interests: composite materials and covers for high temperatures. 620002, Yekaterinburg, Mira str., 19, Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltzin. Phone: (343)-374-54-91; e-mail: uirs@mail.ru

Хлюпин Анатолий Трофимович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Область научных интересов – специальные электрические машины. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Тел.: (343)-375-45-73; e-mail: kem_em@mail.ustu.ru

Хлюпин Anatoliy Trofimovich. Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Electric Machine department of Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltzin. Field of scientific interests: special electric machines. Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltzin. Phone: (343)-375-45-73; e-mail: kem_em@mail.ustu.ru

Баранов Михаил Владимирович. Доктор технических наук, профессор кафедры редких металлов и наноматериалов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Область научных интересов – Композиционные материалы и покрытия высокотемпературного назначения. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Тел.: (343)-374-54-91; e-mail: beketovar@dpt.ustu.ru

Baranov Mihail Vladimirovich. Doctor of technical sciences, Professor of the Rare Metals and Nanomaterials department of Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltzin. Field of scientific interests: composite materials and covers for high temperatures. 620002, Yekaterinburg, Mira str., 19, Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltzin. Phone: (343)-374-54-91; e-mail: beketovar@dpt.ustu.ru

Красильников Сергей Михайлович. Студент кафедры редких металлов и наноматериалов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Область научных интересов – Композиционные материалы и покрытия высокотемпературного назначения. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Тел.: (343)-374-54-91; e-mail: beketovar@dpt.ustu.ru

Krasil'nikov Sergei Mihailovich. Student of the Rare Metals and Nanomaterials department of Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltzin. Field of scientific interests: composite materials and covers for high temperatures. 620002, Yekaterinburg, Mira str., 19, Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltzin. Phone: (343)-374-54-91; e-mail: beketovar@dpt.ustu.ru