

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА АIN – ЛАК КО-916К

Грахов Д.В., Ягупов А.И., Бекетов А.Р., Баранов М.В.

*ФГАОУ ВПО «Уральский государственный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия, e-mail: info@ustu.ru*

---

В тексте статьи рассматривается проблема эффективности электродвигателей, в сотни раз превышающей интенсивность отказов изделий машиностроения. В статье говорится о программе для расчёта теплопроводности композиционных материалов, позволяющей автоматизировать расчёты, связанные с вычислением коэффициента теплопроводности композиционного материала, состоящего из органического связующего и дисперсного тугоплавкого неметаллического наполнителя. Специальное внимание уделяется методам расчёта теплопроводности композиционных материалов в соответствии с предложенными моделями, а также сравнению результатов расчётов с обработанными экспериментальными данными и записи информации в базы данных. Авторы подчёркивают, что полученные значения теплопроводности образцов в 4,5 раза выше исходного материала. В заключение говорится о том, что представленные результаты позволяют высказать предположение о структуре композита «электроизоляционный лак – нитрид алюминия».

---

Ключевые слова: композиционные материалы, программа.

## HEAT CONDUCTIVITY OF POLYMER COMPOSITE AIN – LACQUER KO-916K

Grahov D.V., Yagupov A.I., Beketov A.R., Baranov M.V.

*FGAEE HPE Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, e-mail: info@ustu.ru*

The text deals with problem of effectiveness of electric motors, that in hundreds times is exceeding one of item's failure in engineering industry. In general the article speaks about the program for reckoning of heat conductivity of composition materials, that is allow to automatize for accounts, associated with computing of heat conductivity coefficient of composition materials, composed of the organic binder and the disperse refractory nonmetallic filler. Special attention is paid to techniques of reckoning of heat conductivity of composition materials in accordance with introduced models, as well as comparing of accounts's results with processed experimental data and information recording in database. The authors stress that obtained scores of sample's heat conductivity is above in 4,5 times that ones of starting materials. In conclusion is said that presented results are allowing suggest about supposition about structure of composite "dielectrical lacquer – aluminium nitride".

Key words: composition materials, program.

### Введение

Сегодня в мировом электромашиностроении интенсивность отказов электродвигателей в сотни раз превышает интенсивность отказов изделий машиностроения, причём 40% и более электродвигателей выходят из строя из-за повреждения обмотки статора. Повышение эффективности электродвигателей предусматривает применение новых материалов с улучшенными теплофизическими характеристиками, т.к. уменьшение рабочей температуры двигателя на 10° продлевает срок его работы в 2–3 раза.

В связи с этим актуальным является введение в промышленные электроизоляционные лаки неорганических модификаторов с высокой температурой с высокой теплопроводностью при сохранении остальных физико-химических характеристик: малой усадки при полимеризации, высокой адгезии к эмали провода, эластичности и прочности, – а также сохранение технологических характеристик: высокой степени заполнения обмотки статора и лобовой части при капсулировании, низкой вязкости и равномерного распределения модификатора в объеме пропиточного материала.

Для заполнения обмоток статора корпусной изоляции электромеханических преобразователей используются органические наполнители типа лаков или термореактивных смол.

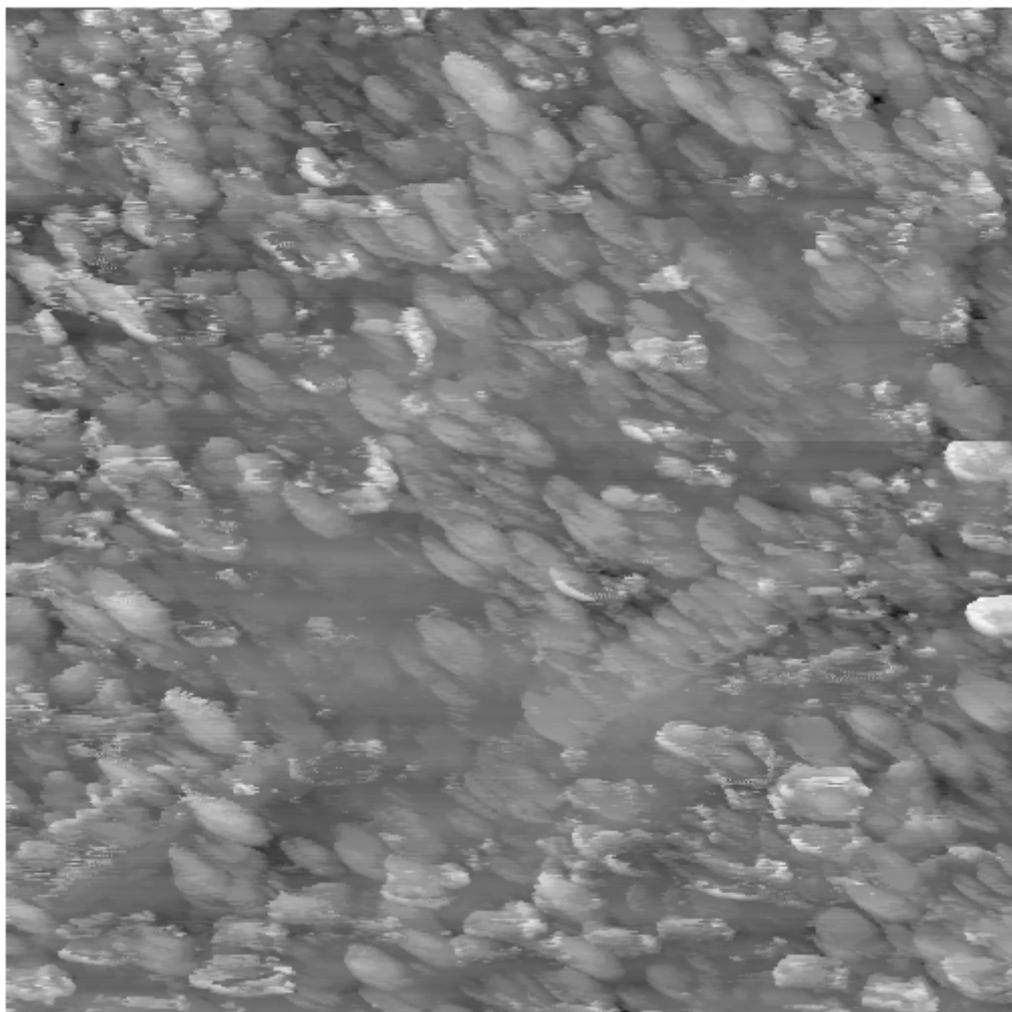
Анализ литературных данных показывает, что при создании композиционных электроизоляционных материалов с модификаторами практически не исследованы тугоплавкие компоненты с высокой теплопроводностью, такие как изотропные керамические, нитридные материалы. Известные наполнители имеют существенные недостатки [6; 7].

### **Цель исследования**

Целью исследования настоящей работы являются определение теплофизических характеристик полимерных композиционных материалов, состоящих из органического связующего и тугоплавкого неметаллического наполнителя. Настоящее исследование включает анализ литературных данных по теплопроводности полимерных материалов с неорганическими добавками, существующих моделей для расчёта теплопроводностей композиционных материалов с полимерным связующим, изготовление образцов и определение теплофизических характеристик электроизоляционного лака с добавками нитрида алюминия и выбор моделей изменения теплофизических характеристик с составом, природой и структурой композиционного полимерного материала.

### **Материал и методы исследования**

Нитрид алюминия ( $AlN$ ) обладает уникальными свойствами: высоким удельным электросопротивлением и повышенным напряжением пробоя, высоким значением диэлектрической постоянной, превосходной теплопроводностью (до 300 Вт/мК в монокристаллическом состоянии). Важную роль играет размер и форма частиц вещества в наноразмерном состоянии (рис. 1).



**Рис. 1. Структура нитрида алюминия.**

Для расчёта теплофизических характеристик в зависимости от концентрации наполнителя, пористости и температуры была написана программа «Теплопроводность композита». Она позволяет автоматизировать расчёты, связанные с вычислением коэффициента теплопроводности композиционного материала, состоящего из органического связующего и дисперсного тугоплавкого неметаллического наполнителя, по следующим двенадцати моделям (в том числе с учётом пористости композита, а также температуры) [1]:

1. С замкнутыми включениями, адиабатное дробление.
2. С замкнутыми включениями, изотермическое дробление.
3. С замкнутыми включениями Оделевского.
4. С взаимопроникающими компонентами, адиабатное дробление.
5. С взаимопроникающими компонентами, изотермическое дробление.
6. С взаимопроникающими компонентами, средняя.

7. Комбинированная.
8. Обобщённая проводимость Лихтенеккера 1.
9. Обобщённая проводимость Лихтенеккера 2.
10. Многокомпонентная.
11. Перколяционная [2].
12. С учётом пористости [3].
13. С учётом температуры (газовая фаза) [4].
14. С учётом температуры (твёрдая фаза, наполнитель) [5].

Для расчёта по формуле любой модели обязателен ввод коэффициентов теплопроводности, плотностей, масс или объёмных концентраций (в последнем случае осуществляется взаимоисключающий выбор). Для осуществления расчётов по формулам некоторых моделей обязателен ввод дополнительных параметров (вероятности того, что пластины перпендикулярны потоку – для модели обобщённой проводимости Лихтенеккера 2 и критической объёмной концентрации – для перколяционной модели).

Программа также даёт следующие возможности.

1. Расчёт концентраций компонентов без расчёта коэффициента теплопроводности композита.
2. Выбор модели расчёта коэффициента теплопроводности композита.
3. Расчёт коэффициента теплопроводности композита с предварительным расчётом концентраций компонентов.
4. Расчёт коэффициента теплопроводности композита с учётом его пористости, а также температуры.
5. Построение графиков зависимостей коэффициента теплопроводности композиционного материала или его отношения к коэффициенту теплопроводности 1-го компонента от объёмной или массовой концентрации.
6. Построение графиков зависимостей коэффициента теплопроводности композиционного материала от его пористости, а также температуры.
7. Нанесение экспериментальных данных на плоскость с той же системой координат, в которой построен график.
8. Вычисление значения отклонений экспериментально полученных значений коэффициента теплопроводности композиционного материала от теоретически рассчитанных по всем моделям.
9. Представление информации на русском и английском языках.

10. Введение записи массивов абсцисс и ординат точек при построении графиков в базу данных Access с указанием для каждого графика значений параметров и названия модели, по формуле которой он строился.

### Результаты исследования и их обсуждение

Для проверки адекватности моделей изготовили образцы с различным содержанием наполнителя (т.е. *AlN*) на измерение теплопроводности. Измерение теплопроводности проводили в зависимости от содержания наполнителя и температуры. Результаты измерений теплопроводности представлены в таблице 1.

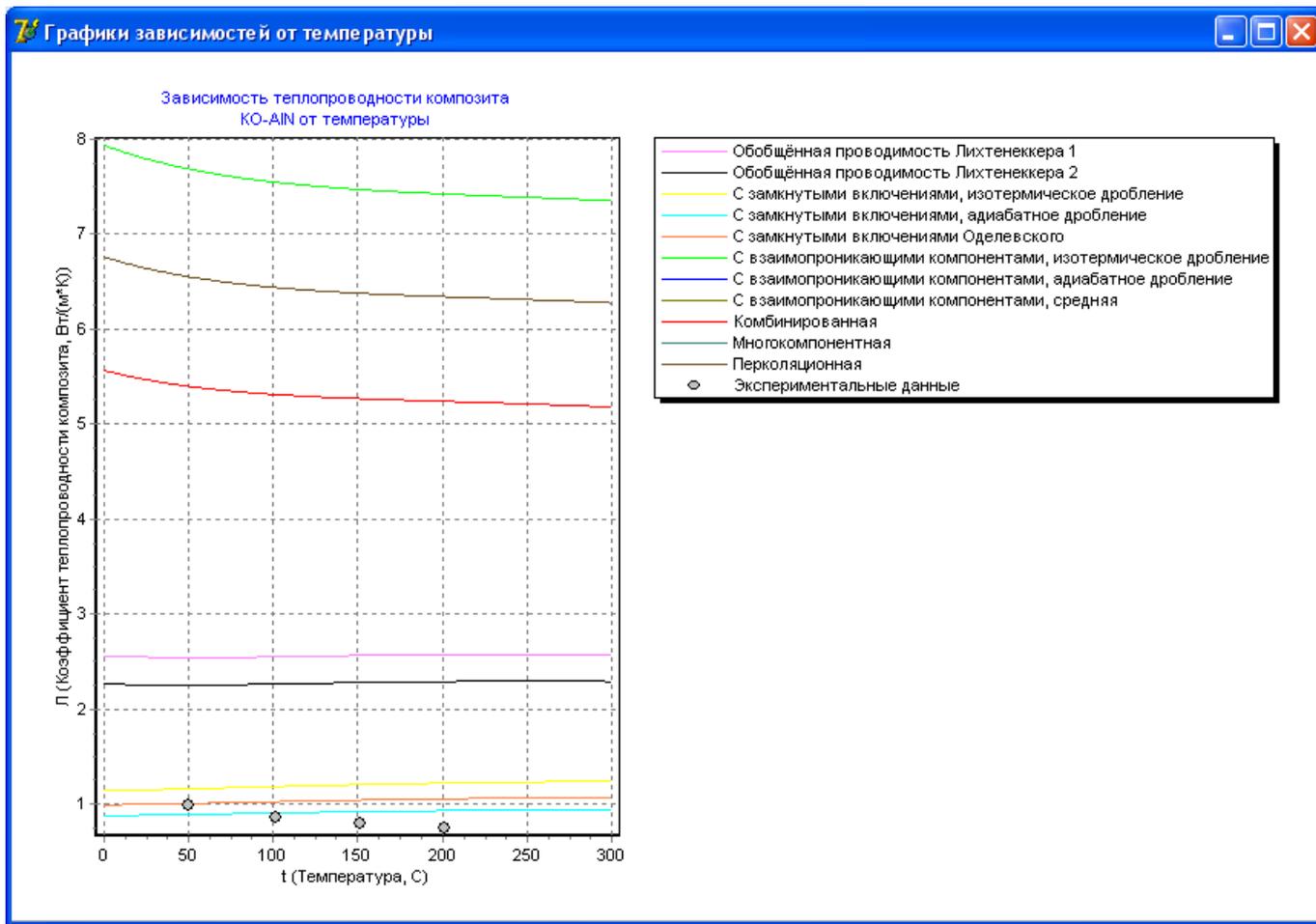
**Таблица 1 – Результаты измерения теплопроводности композита**

Объёмная доля, %		$\rho, \frac{г}{см^3}$	t, °C	$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$
КО-916К	AlN			
45	55	2	49,5	0,981
			101,3	0,855
			151,4	0,793
			201,4	0,745
0	100	2,925	50,3	32,68

Полученные значения теплопроводности образцов в 4,5 раза выше исходного материала.

По полученным данным чётко прослеживается зависимость теплопроводности композита от содержания наполнителя и температуры.

На рис. 2 представлены экспериментальные значения теплопроводности композита, а также результаты расчёта теплопроводности электроизоляционного лака с добавками *AlN* по вышеприведённым моделям.



**Рис. 2. График зависимости теплопроводности композита *KO-AlN* от температуры (55,1724% *AlN*, 10,7701% пористости).**

Как видно из данного графика, наиболее адекватно наш эксперимент описывает модель с взаимопроникающими компонентами, изотермическое дробление.

Различия расчётных и экспериментальных данных, вероятно, связаны с тем, что весьма приблизительно выбран состав газов в порах, образующихся при пиролизе изоляционного лака. Нам, к сожалению, не известен точный состав, что требует проведения специальных исследований, поэтому для расчётов использовались данные по теплопроводности газов (ацетилен, метан, углекислого газа, этана, пропана), взятые из справочной литературы [4; 5].

### Выводы

Представленные результаты не только позволяют прогнозировать изменение теплопроводности композита «электроизоляционный лак – нитрид алюминия», но и высказать предположение о его структуре.

## Список литературы

1. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Справочная книга. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.
2. Фургель И.А. [и др.]. Теплопроводность композиционных материалов с дисперсным наполнителем // Инженерно-физический журнал. – 1992. – 95 с.
3. МДС 41-7.2004 Методика оценки влияния влажности на эффективность теплоизоляции оборудования и трубопроводов. – 20 с.
4. Эберт Г. Краткий справочник по физике. – М. : Гос. изд-во физико-математических методов, 1963. – 561 с.
5. Самсонов Г.В. Нитриды. – Киев : Наукова думка, 1969. – 285 с.
6. Денисенко В.И. [и др.] Опыт применения ультразвукового способа пропитки обмоток машин переменного тока с использованием нанооксидонитридных, теплопроводящих наполнителей // Проблемы и достижения в промышленной энергетике : сб. докладов 9-й Международной научно-практической конференции в рамках выставки «Энергетика и электротехника. Автоматизированные системы и приборостроение. Светотехника». – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2010. – С. 159–162.
7. Денисенко В.И. [и др.]. Оценка влияния капсулирования лобовых частей статора с высшими обмотками на нагрев и КПД асинхронных двигателей / Проблемы и достижения в промышленной энергетике : сб. докладов 9-й Международной научно-практической конференции в рамках выставки «Энергетика и электротехника. Автоматизированные системы и приборостроение. Светотехника». – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2010. – С. 155–158.

## Рецензенты:

Белоусова В.С., д.т.н., профессор, зав. кафедрой, ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Уральский энергетический институт», г. Екатеринбург.

Волобуев П.В., д.ф.-м.н., профессор кафедры технической физики, ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Физико-технологический», г. Екатеринбург.

Работа получена 14.11.2011