

А. И. Ягунов, А. Р. Бекетов, М. В. Баранов,  
О. В. Стоянов

## ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ НАПОЛНИТЕЛЯ НА ВЯЗКОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА «КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИЙ ЛАК КО-916К – НИТРИД АЛЮМИНИЯ»

*Ключевые слова:* вязкость, кремнийорганический лак, нитрид алюминия.

*Изучено изменение вязкости лака КО-916К, при введении порошкообразного нитрида алюминия для различных температур и содержания керамической добавки.*

*Keywords:* viscosity, silicon-organic lacquer, aluminum nitride.

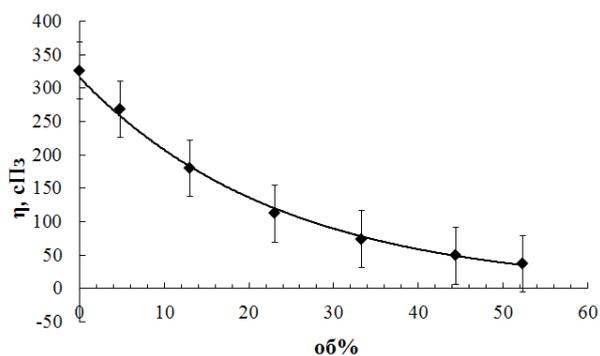
*The changes of the viscosity of lacquer КО-916К, with the introduction of powdered aluminum nitride for different temperatures and contents of ceramic additives.*

Кремнийорганические лаки находят широкое практическое применение в электротехнической промышленности. В частности они используются в качестве пропиточных составов для изоляции проводов обмоток статоров электрических машин. Введение керамических добавок улучшает физико-химические свойства кремнийорганических лаков. С целью практической оценки влияния добавки тонкодисперсного нитрида алюминия (AlN) на вязкость кремнийорганических лаков были поставлены настоящие исследования.

В работе изучалась вязкость композиционного материала на основе электроизоляционного кремнийорганического лака КО-916К с различным содержанием порошкообразного нитрида алюминия в диапазоне температур от 20 до 80°C. Для создания электроизоляционного слоя на проводах обмотки статора электрической машины статор погружают в пропиточный лак, либо другим способом заполняют лаком все свободное пространство между витками обмотки. Такая операция называется пропиткой. Для организации процесса пропитки очень важным свойством пропиточного состава является его вязкость. Вязкость влияет не только на условия процесса пропитки, но и позволяет рассмотреть реологические особенности дисперсной системы [1]. Вязкость регулируется двумя основными способами: изменением температуры и добавлением растворителя, изменяя содержание модификатора. Первый способ более энергозатратен и сложен, но при этом состав и пропорции компонентов в композиционном материале не меняются. В случае регулирования вязкости композита добавлением растворителя отсутствуют недостатки первого способа, но появляются такие минусы, как увеличение времени отверждения, ухудшение прочности связей внутри полимера и между компонентами композита, увеличение пористости конечных отвержденных изделий из композиционного материала, увеличение доли летучих компонентов и, как следствие, увеличение вредного воздействия на человека в процессе производства.

В литературе нет сведений о влиянии температуры, содержания наполнителя и других факторов на вязкость неотвержденных композиционных материалов «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» [1]. Чтобы оценить влияние рас-

творителя на вязкость кремнийорганического лака КО-916К, мы измерили вязкость последнего при различном содержании растворителя (ксилола). Все измерения вязкости в настоящей работе проводились на вискозиметре BROOKFIELD DV-II+PRO. По результатам измерений была построена зависимость, представленная на рисунке 1.



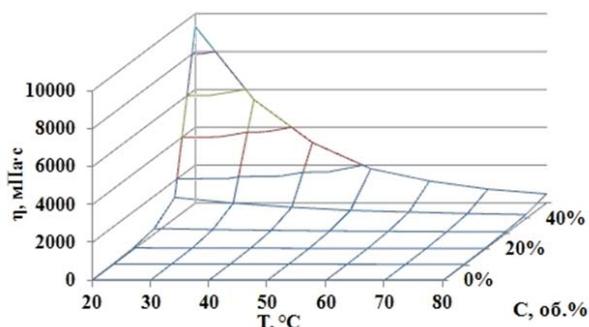
**Рис. 1 – Зависимость вязкости кремнийорганического лака КО-916К от содержания растворителя (ксилол)**

По полученным данным (рис. 1) видно, что добавление растворителя значительно снижает вязкость органического связующего и при добавлении 100 об.% растворителя к лаку (достигается содержание растворителя 50 об.%) можно добиться снижения вязкости более чем в 8 раз.

Далее изучалось влияние температуры и содержания дисперсного наполнителя – нитрида алюминия (AlN) на вязкость электроизоляционного лака КО-916К [2]. Измерения вязкости для всех составов проводились в интервале температур от 20 до 80°C при содержании модификатора до 50 об.%. Результаты измерений представлены на рисунке 2.

Из приведенных данных (рис. 2) мы видим, что увеличением температуры до значений, при которых не начинаются процессы отверждения, можно добиться многократного снижения вязкости исходного лака. В свою очередь добавление нитрида алюминия увеличивает значение вязкости, причем зависимость эта нелинейная. Выбор способа регулирования вязкости композиционного материала в большей степени определяется технологией процес-

са отверждения и требованиями к конечным свойствам композита и в каждом конкретном случае нужно подбирать методику приготовления смеси. Для упрощения этой процедуры нами были проанализированы результаты и предложены математические уравнения для описания зависимости вязкости неотвержденных композиционных материалов «AlN – кремнийорганический лак КО-916К».



**Рис. 2 – Зависимость коэффициента вязкости композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» от температуры и содержания наполнителя**

Зависимость коэффициента вязкости неотвержденного композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак» от температуры

Ни одна теория не приводит к простой зависимости, которая позволила бы рассчитать вязкость композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» априори, и приходится использовать эмпирические расчетные методы. Эти методы не противоречат теории, они только позволяют аппроксимировать эмпирически некоторые неизвестные или не поддающиеся расчету теоретические константы по структурным характеристикам или по другим физическим свойствам.

Вязкость жидкости уменьшается с увеличением температуры и зависимость коэффициента вязкости от температуры чаще всего записывают следующим образом:

$$\eta = A e^{\frac{B}{T}}, \quad (1)$$

где  $\eta$  – величина вязкости, Па·с;  $B$  – температурный коэффициент;  $A$  – постоянный член;  $T$  – температура, К.

Уравнение (1) известно как корреляция Андраде, поскольку он первым предложил эту форму на основе анализа теории вязкости жидкостей. Со времени появления уравнения (1) предложены буквально сотни других соотношений «вязкость – температура». Многие из них могут быть записаны в следующем обобщенном виде:

$$\eta \cdot f_1(V) = A \exp \frac{B \cdot f_2(V)}{T}, \quad (2)$$

где функции  $f_1$  и  $f_2$  отличаются широким разнообразием форм.

Несмотря на многие предложенные модифицирования, уравнение (2) до сих пор является наиболее широко используемой корреляцией для установления влияния температуры на вязкость жидкостей.

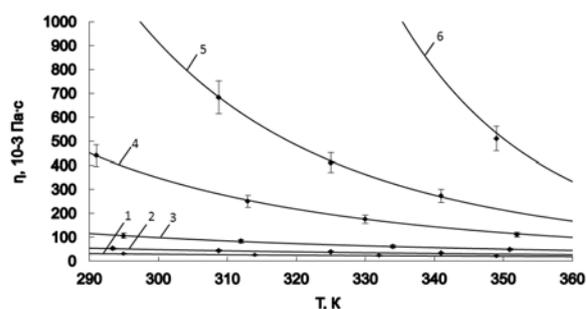
Влияние температуры в интервале 20 – 80 С на значение вязкости полимерных лаков хорошо описывается уравнением (1). Для всех изученных составов были рассчитаны постоянные коэффициенты из уравнения (1), которые приведены в табл. 1.

**Таблица 1 – Значения постоянных коэффициентов в уравнении (1) для неотвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К»**

Коэффициент	Содержание AlN, об.%					
	0	10	20	30	40	50
A	2,34	1,51	0,89	0,19	0,035	0,0001
B	753	1039	1412	2254	3051	5389

Описание математическими уравнениями экспериментальных данных влияния температуры на коэффициент вязкости неотвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К» представлено на рисунке 3. Точки на графиках – это экспериментальные данные с указанием доверительных интервалов, а линиями нанесены результаты расчетов по уравнению (1) с соответствующими коэффициентами из таблицы 1.

Для наглядности на рисунке 3 представлены зависимости коэффициентов вязкости неотвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К» с различным содержанием нитрида алюминия от температуры в диапазоне вязкости до 1 Па·с.



**Рис. 3 – Зависимости коэффициента вязкости неотвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К» от температуры при различном содержании AlN: 1 – 0 об.%; 2 – 10 об.%; 3 – 20 об.%; 4 – 30 об.%; 5 – 40 об.%; 6 – 50 об.%**

На рисунке 3 видна традиционная закономерность для всех составов: с увеличением температуры вязкость снижается, и влияние температуры растет с увеличением содержания наполнителя. Уравнение (1) с расчетными коэффициентами из таблицы 1 хорошо описывает экспериментальные результаты в исследуемой области концентраций и температуры композиционного материала на основе

кремнийорганического лака КО-916К наполненного порошкообразным нитридом алюминия.

### Зависимость коэффициента вязкости неотвержденного композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак» от содержания модификатора

Влияние содержания наполнителя – нитрида алюминия на вязкость неотвержденного композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» в интервале 10 – 50 об.% при различных температурах хорошо описывается уравнением вида:

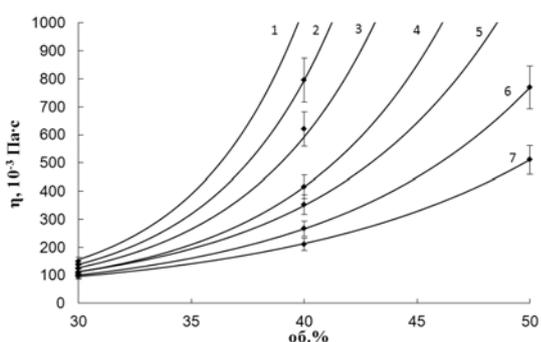
$$\eta = \eta_0 + A e^{\frac{c}{B}}, \quad (3)$$

где  $\eta$  – величина вязкости, Па·с;  $\eta_0$  – вязкость чистого лака при данной температуре, Па·с;  $A$  и  $B$  – постоянные коэффициенты;  $c$  – объемное содержание нитрида алюминия, об.%.

Значения констант  $A$  и  $B$  рассчитывали с помощью пакета OriginPro 7.0 для каждой зависимости. Значения постоянных коэффициентов уравнения (3) в исследуемом интервале температур приведены в таблице 2.

**Таблица 2 – Значения постоянных коэффициентов в уравнении (3) для неотвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К»**

Коэффициент	Температура, °C						
	20	30	40	50	60	70	80
A	0,23	0,33	0,56	1,02	1,94	2,86	4,72
B	4,76	5,16	5,78	6,70	7,80	8,98	10,76
$\eta_0$	30,5	28,0	26,0	24,0	22,0	20,0	19,0



**Рис. 4 – Математические зависимости описывающие изменение коэффициента вязкости неотвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К» от содержания AlN: 1 – 20°C; 2 – 30°C; 3 – 40°C; 4 – 50°C; 5 – 60°C; 6 – 70°C; 7 – 80°C**

Описание математическими уравнениями влияния содержания наполнителя на коэффициент вязкости неотвержденного композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический

лак КО-916К» представлено на рисунке 4. Точками на графиках обозначены экспериментальные данные с указанием доверительных интервалов, а линией нанесены результаты расчета по уравнению (3) с соответствующими коэффициентами из таблицы 2.

Представленные результаты свидетельствуют, что вязкость кремнийорганического лака закономерно изменяется с увеличением содержания наполнителя и температуры измерений. С ростом содержания нитрида алюминия увеличивается вязкость полимера, а с ростом температуры – уменьшается. В соответствии с современными теориями вязкого течения жидкостей [3, 4] постоянный коэффициент  $B$  в уравнении (1) можно рассматривать как энергию активации процесса. Однако тщательное рассмотрение требует учитывать характер взаимодействия на границе «наполнитель – полимер» и ряда других факторов, трудно поддающихся оценке. Поэтому, на наш взгляд, коэффициент  $B$  более правильно рассматривать как температурный коэффициент, позволяющий в исследованном интервале температур описать изменение вязкости, что может быть использовано на практике.

Многое из вышесказанного справедливо и для зависимости вязкости композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» от объемного содержания нитрида алюминия.

### Выводы

1. Уравнения для расчета значений коэффициента вязкости в зависимости от температуры и состава композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» с рассчитанными в настоящей работе коэффициентами хорошо описывают экспериментальные данные и могут рекомендоваться для расчета технологических параметров при создании пропиточных составов на основе композита «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К».

2. При содержании нитрида алюминия в композиционном материале «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» до 20 об.% вязкость композита изменяется незначительно и для её снижения предпочтительнее использовать добавление небольших количеств растворителя. Дальнейшее увеличение содержания нитрида алюминия ведёт к резкому увеличению вязкости композиционного материала и при таких концентрациях AlN целесообразнее регулировать вязкость композита изменением его температуры либо комбинируя оба способа.

3. Технологически приемлемого значения вязкости для пропиточных составов статоров электрических машин равно 200 мПа·с можно достичь при содержании нитрида алюминия в композиционном материале «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» менее 40 об.%.

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

## Литература

1. Бекетов Д.А. Влияние добавок порошкообразного нитрида алюминия на вязкость полимерных материалов / Д.А. Бекетов, А.Р. Бекетов, А.И. Ягулов // *Керамика и композиционные материалы: материалы VI Всероссийской научной конференции*. – Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН. – 2007. – С.11.
2. Применение композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» в качестве пазовой изоляции обмоток статора асинхронных электродвигателей малой и средней мощности / Ягулов 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.
3. Френкель Я.И. *Кинетическая теория жидкостей* / Я.И. Френкель. – Л.: Наука, 1975. – 592 с.
4. Панченков Г.М. *Теория вязкости жидкостей* / Г.М. Панченков. - М.-Л: Гостоптехиздат, 1947. – 154 с.

---

© **А.И. Ягулов** — вед. инж. каф. редких металлов и наноматериалов Уральского федер. ун-та имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, [ягулов.alexander@gmail.com](mailto:ягулов.alexander@gmail.com); **А. Р. Бекетов** – д.т.н., проф. той же кафедры, [beketovar@dpt.ustu.ru](mailto:beketovar@dpt.ustu.ru); **М. В. Баранов** – д.т.н., проф. той же кафедры, [mbaranov@k66.ru](mailto:mbaranov@k66.ru); **О. В. Стоянов** – д.т.н., проф., зав. каф. технологии пластических масс КНИТУ, [ov\\_stoyanov@mail.ru](mailto:ov_stoyanov@mail.ru).