

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров А.Г., Гарганеев А.Г., Полонский В.В., Целебровский И.В., Шурыгин Ю.А. Опыт применения систем аварийного электроснабжения при проведении хирургических операций и реанимационных мероприятий в лечебных учреждениях г. Томска и Томской области // Вестник «Здравоохранение Сибири». – 1999. – № 4. – С. 77–78.
2. Азаров А.Г., Гарганеев А.Г., Житков О.М. Интерактивные системы бесперебойного электропитания // Наука производству. – 1999. – № 7(20). – С. 40–41.
3. Азаров А.Г., Гарганеев А.Г., Полонский В.В. Аккумуляторные батареи в системах бесперебойного электропитания // Аппаратно-программные средства автоматизации технологических процессов: Сб. трудов НИИ АЭМ, посвящ. 30-летию института / Под ред. Ю.А. Шурыгина. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. – С. 197–207.

УДК 621.313.048

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОПИТОЧНЫХ И ЗАЛИВОЧНЫХ ЛАКАХ

А.Н. Дудкин, В.С. Ким, С.С. Марьин

Томский политехнический университет

E-mail: mariyn@elti.tpu.ru

*Проведен анализ влияния различных факторов (условий запекания и старения) на уровень внутренних механических напряжений в пропиточных (ФЛ-98 и БТ 987) и заливочных (УР-231) составах. Получено, что при запекании лаковых покрытий в соответствии с техническими условиями величина внутренних механических напряжений невелика и слабо меняется при температурном старении.*

### Введение

При проектировании изоляции электрических машин необходимо учитывать взаимное влияние компонентов изоляции друг на друга, в том числе и влияние пропитывающего состава на изоляцию эмаль-провода. В работе [1] отмечается, что взаимодействие между пропиточным материалом и эмалью проводом в системе может быть обусловлено либо физико-химическим, либо физико-механическим, либо тем и другим процессами.

Одним из видов взаимного влияния компонентов системы изоляции являются внутренние механические напряжения ( $\sigma_{вн}$ ). Пропиточный материал в отвержденном состоянии, эмаль-пленка и проводник образуют сопряженную систему. Эти элементы конструкции связаны друг с другом силами адгезии. При изменениях температуры или воздействии внешних нагрузок они вынуждены деформироваться вместе. В то же время, деформации в сопряженной системе затруднены именно вследствие разности теплофизических и физико-механических параметров, таких как температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), модуль упругости и других свойств компонентов системы изоляции. Вследствие различия физико-механических параметров материалов, составляющих систему изоляции, в них неизбежно возникают внутренние механические напряжения, которые могут привести к разрушению межвитковой изоляции. Под действием внутренних напряжений в межвитковой изоляции образуются различного рода дефекты (трещины, расслоения), которые снижают пробивное напряжение в процессе испытания и эксплуатации.

Внутренние механические напряжения не являются физическим параметром полимерных материалов в отличие от таких характеристик, как модуль упругости или ТКЛР. Они определяются не только физико-механическими свойствами полимерного материала, но также зависят от соотношения геометрических параметров компонентов системы (диаметра провода, величины изоляционного промежутка), режима отверждения и других факторов. При этом с точки зрения развития внутренних напряжений особый интерес представляют внутренние механические напряжения в пропитывающем составе, т.к. образование трещины в межвитковой системе изоляции, происходит именно в нем.

Целью данной работы является измерение величины  $\sigma_{вн}$  в пропиточных (ФЛ-98 и БТ 987) и заливочных (УР-231) составах, а также исследование влияния на  $\sigma_{вн}$  условий запекания и старения лакового покрытия. Работа выполнена в ЭЛТИ Томского политехнического университета совместно с ФГУП НПЦ «Полус» (г. Томск).

### Материалы и методика эксперимента

Покровные и пропиточные составы УР-231, ФЛ-98 и БТ 987, технологические режимы их запекания, используемые на производстве, а также режимы старения для исследования внутренних механических напряжений были предоставлены ФГУП НПЦ «Полус».

Лак ФЛ-98 (ГОСТ 12294-66) представляет собой смесь растворов смол алкидной и бутоксикрезолоформальдегидной в смеси ксилола и уайт-спирита в соотношении 1:1. В лаке содержится 10...15 вес. %

бутанола. Лак термореактивный, обладает высокой цементирующей способностью и маслостойкостью, условная вязкость по вискозиметру ВЗ-4 при  $20 \pm 0,5$  °С составляет 35...60 с. Лак предназначен для пропитки обмоток с изоляцией классов нагревостойкости А, Е и В при необходимости получения повышенной цементирующей способности.

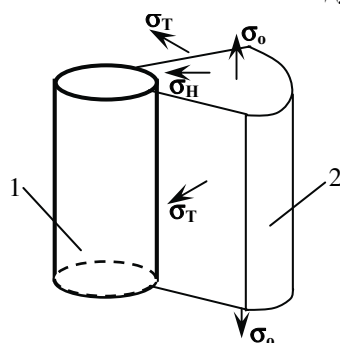
Битумный пропиточный лак БТ 987 (ГОСТ 6244-70), рабочая вязкость 18...22 с по ВЗ-4 при  $20 \pm 5$  °С. В случае необходимости лак разбавляется ксилолом или смесью ксилола с бензином (1:1). Применяется для пропитки обмоток электрических машин с изоляцией класса нагревостойкости А, Е и В общего назначения

Общим недостатком лаков ФЛ-98 и БТ 987 является необходимость длительной запечки в обмотках электрических машин.

Лак УР-231 (ТУ 6-21-14-90) предназначен для нанесения с целью сохранения влагостойкости изоляции статических преобразователей и аналогичных изделий в процессе хранения и эксплуатации. Лак поставляется в виде двух компонентов:

1. Лак УР-231 (алкидно-эпоксидная смола Э-30, изготовленная на смеси тунгового и льняного масел).
2. 70 % раствор диэтиленгликольуретана (ТУ 113-38-115-91) в циклогексаноне.

Для приготовления лака УР-231 необходимо смешать полуфабрикатный лак УР-0231 с раствором диэтиленгликольуретана (ДГУ) в соответствии 100 в.ч. лака и 18 в.ч. раствора ДГУ, тщательно перемешать и выдержать 30 мин. После смешивания состав должен быть прозрачным. Вязкость лака по вискозиметру ВЗ-4 должна быть равной 13...15 с. В случае повышенной вязкости лака разрешается разбавлять его до рабочей вязкости смесью ксилола и бутилацетата в соответствии объему. Срок службы лака УР-231 после введения продукта ДГУ составляет 6 ч, после чего допускается 1–2 разовое разбавление лака до рабочей вязкости в течение следующих 6 ч.



**Рисунок.** Составляющие внутренних механических напряжений в системе: 1) эмалированный провод, 2) пропиточный состав.  $\sigma_0$ ,  $\sigma_n$ ,  $\sigma_t$  – осевые, нормальные (радиальные) и тангенциальные (касательные) напряжения

Для измерения величины внутренних механических напряжений в пропиточных и заливочных составах применен консольный метод [2]. Этот метод основан на измерении отклонения от первоначального по-

ложения свободного конца консольно закрепленной упругой металлической пластины с полимерным покрытием под влиянием внутренних напряжений в покрытии. Возникновение внутренних напряжений в пленке полимерного покрытия на поверхности субстрата, схематически показано на рисунке.

По отношению к поверхности контакта адгезива с субстратом, направление внутренних напряжений может быть различным. Внутренние напряжения  $\sigma_{вн}$  являются векторной суммой тангенциальной  $\sigma_t$  и нормальной  $\sigma_n$  составляющих. Вклад  $\sigma_n$  по сравнению с  $\sigma_t$  обычно мал. Зная модуль упругости материала подложки  $E$  (для стали  $E=1,96 \cdot 10^5$  МПа), величина  $\sigma_{вн}$  может быть рассчитана по измеренной величине отклонения свободного конца пластины [3]:

$$\sigma_{вн} = \frac{\Delta h E h_k^3}{3l^2 \Delta h_k (h_k + \Delta h_k)}, \quad (1)$$

где  $\Delta h$  – отклонение пластины-подложки от первоначального положения, м;  $l$  – длина полимерного покрытия, м;  $h_k$  – толщина пластины-подложки, м;  $\Delta h_k$  – толщина полимерного покрытия, м. Чувствительность метода составляет  $\sim 0,3$  кг/м<sup>2</sup>.

При выборе геометрии образцов и технологии их изготовления были приняты во внимание следующие основные требования. Во-первых, в реальных конструкциях толщина пропиточного и заливочного материала находится в пределах 0,03...0,1 мм, поэтому толщина образцов для испытаний принята равной 0,1 мм. Во вторых, технология запекания заливочного и пропиточного состава должна быть максимально приближенной к используемой на производстве, поэтому время и температура запекания соответствовали существующим ТУ.

Металлическая подложка представляет собой две пластины из нержавеющей стали 1Х18Н9Т размером 0,08×0,015 м, толщиной 0,1 мм, (пластина-подложка) и 1 мм (пластина-основание), соединенные точечной сваркой через стальную прокладку из нержавеющей стали размером 0,02×0,015 м, толщиной 1 мм. В пластине-основании имеются 4 отверстия диаметром 10 мм для измерения толщины покрытия. Для снятия напряжений в металле перед применением пластины подвергались термической обработке в муфельной печи при 450 °С в течение 3 ч. При изготовлении образцов пропиточный и заливочный материал наносился на металлическую подложку беличьей кистью № 6. Для устранения статистической погрешности каждое измерение проводилось на десяти образцах. Измерения проводились при двух режимах: в исходном состоянии и после старения при повышенной температуре в течение 100 ч.

### Результаты эксперимента

В данной работе запекание образцов проводилось в течении 4 ч при температурах 140 и 160 °С. Кроме того, для каждой температуры запекания, после образования лакового покрытия, половина

образцов охлаждалась до температуры 25 °С быстро (~30 град/мин), а вторая половина образцов охлаждалась медленно (~5 град/мин). Результаты измерения величины внутренних механических напряжений представлены в табл. 1. Быстрое (~5 град/мин) охлаждение образцов соответствует технологии производства, принятой на ФГУП НПЦ «Полюс». Как видно из табл. 1, скорость охлаждения практически не влияет на величину  $\sigma_{вн}$ , что объясняется высокой эластичностью рассмотренных составов.

**Таблица 1.** Зависимость  $\sigma_{вн}$  (МПа) от режима полимеризации пропиточных составов ФЛ-98 и БТ 987. 1-й режим полимеризации соответствует температуре запекания образцов 140 °С, 2-й – 160 °С.  $V_{охл}$  – скорость охлаждения образцов

$V_{охл}$ , °С/мин	1-й режим		2-й режим	
	30	5	30	5
ФЛ-98	0,11	0,057	1,611	0,308
БТ 987	7,34	6,70	7,38	7,10

Старение образцов проводилось при 170 °С в течение 100 ч. Результаты изменения  $\sigma_{вн}$  в результате старения представлены в табл. 2. Как видно из приведённых результатов, в процессе старения наблюдается слабо выраженная тенденция к уменьшению величины  $\sigma_{вн}$ . Однако во всех случаях отмечается немонотонное спадание  $\sigma_{вн}$ . Наличие максимума, возможно, связано с тем, что процессы полимеризации и релаксации внутренних напряжений во время старения протекают одновременно. На начальных этапах полимеризационные процессы в лаковом покрытии преобладают, а по мере завершения структурообразования, преобладающими становятся релаксационные процессы.

**Таблица 2.** Изменение  $\sigma_{вн}$  (МПа) в ходе теплового старения образцов пропиточных составов ФЛ-98 и БТ 987. Режим охлаждения I соответствует скорости охлаждения 5 град/мин, II – 30 град/мин

Состав	Режим охлаждения	Время старения, ч					
		30	45	60	75	85	100
ФЛ-98	I	0,390	0,233	0,296	0,401	0,440	0,382
	II	1,405	1,216	1,438	1,461	1,505	1,500
БТ 987	I	0,456	2,982	3,088	1,18	1,428	1,092
	II	1,229	3,655	4,514	4,919	1,290	1,750

**Таблица 3.** Зависимость  $\sigma_{вн}$  от количества слоев покровного лака УР-231 (I – скорость охлаждения 5 град/мин, II – 30 град/мин)

Режим охлаждения	Внутренние механические напряжения ( $\sigma_{вн}$ ), МПа		
	2 слоя	3 слоя	4 слоя
I	0,389	0,832	0,794
II	0,612	0,395	0,266

Лак УР-231 предназначен для нанесения покрытий с целью сохранения влагостойкости изоляций статических преобразователей и аналогичных изделий в процессе хранения и эксплуатации. Покровный лак УР-231 наносится последовательно

3–4 слоя. После нанесения каждого слоя образцы запекаются в течение 4 ч. Результаты измерения  $\sigma_{вн}$  для лаковых покрытий различной толщины представлены в табл. 3. Как видно из табл. 3, внутренние напряжения в покрытии невелики и не могут оказывать существенного влияния на механические свойства покрываемых лаком деталей.

Развитие сквозного дефекта в межвитковой изоляции низковольтных обмоток электрических машин начинается с дефекта в пропиточном составе. При этом важным фактором является величина  $\sigma_{вн}$  [4]. Полученные в данной работе результаты показывают, что на величину внутренних механических напряжений существенное влияние оказывает степень полимеризации лакового покрытия. В зависимости от количества задействованных в ходе запекания функциональных групп изменяется характерное время релаксации и, соответственно, время, необходимое для уменьшения внутренних напряжений. В данной работе условия запекания были максимально приближены к производственным. В частности, запекание лака ФЛ-98 в соответствии с ТУ привело к невысокой степени полимеризации. Это, в свою очередь, приводит к малым по абсолютной величине внутренним механическим напряжениям и к незначительным изменениям  $\sigma_{вн}$  при старении. При условии сохранения высокой цементирующей способности за счёт малого времени релаксации это позволяет избежать нарушений сплошности, вызванных высокими внутренними напряжениями. Таким образом, в зависимости от назначения лакового покрытия, для выявления оптимальных параметров запекания следует учитывать не только степень полимеризации лакового покрытия, но и его механические характеристики, а также условия полимеризации, включая температурные режимы, способы нанесения покрытия и качество подготовки поверхности субстрата.

## Выводы

1. Абсолютная величина  $\sigma_{вн}$  в слое пропиточного лака невелика (табл. 1). Она примерно на порядок меньше внутренних напряжений, возникающих в аналогичном слое пропиточных компаундов. Изменение температуры запечки образцов на 20° не привело к существенным изменениям величины  $\sigma_{вн}$ , но есть тенденция к возрастанию  $\sigma_{вн}$  с ростом температуры запечки. Наблюдается общая тенденция увеличения  $\sigma_{вн}$  с ростом скорости охлаждения отверждённого лакового покрытия. Большая скорость охлаждения соответствует тепловому удару, при котором происходит нарушение режима полимеризации, и структурирование лакового покрытия протекает более хаотично.
2. Не обнаружено заметного влияния старения на величину внутренних напряжений в лаковых покрытиях (табл. 2). Возможно, это объясняется малым временем старения и высокой эластичностью лаковых плёнок. В любом случае

можно отметить высокую способность рассмотренных пропиточных лаков сохранять свои механические свойства при продолжительном тепловом воздействии.

3. Величина  $\sigma_{вн}$  в слое покровного лака УР-231 мала и сравнима с внутренними напряжениями, возникающими в пропиточных лаках. Увеличение толщины лакового покрытия не при-

водит к заметным изменениям величины  $\sigma_{вн}$  вплоть до четырёх слоёв лака. Полученные отклонения величин внутренних напряжений для слоёв различной толщины лежат в пределах погрешности эксперимента. Наблюдается общая тенденция к увеличению  $\sigma_{вн}$  с ростом скорости охлаждения отверждённого лакового покрытия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общего назначения. – М.: Энергоиздат, 1981. – 376 с.
2. Санжеровский А.Т. Методы определения механических и адгезионных свойств полимерных покрытий. – М.: Наука, 1974. – 154 с.
3. Галушко А.И., Максимова И.С., Оснач Р.Г. Надежность изоляции электрических машин. – М.: Энергия, 1979. – 176 с.
4. Дудкин А.Н., Леонов А.П., Марьин С.С. О механизме образования сквозного дефекта в межвитковой изоляции низковольтных обмоток электрических машин // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. тезисов докл. XVI научно-техн. конф. – Томск: НПЦ «Полос», 2000. – С. 232–233.

УДК 621.313.017.7

## ТЕПЛОВЫЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЗАКРЫТОГО ИСПОЛНЕНИЯ С ЕСТЕСТВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ И ОРЕБРЕННЫМ КОРПУСОМ

В.А. Жадан, С.В. Говязова

Томский политехнический университет  
E-mail: zhadanva@tpu.ru

*Представлена методика теплового расчета асинхронных двигателей закрытого исполнения с естественным охлаждением и ребренным корпусом, базирующаяся на результатах испытаний двигателей серии АРМ. Доказана возможность применения методики теплового расчета на стадии проектирования рольганговых двигателей новой серии 2АР. Приведено сравнение результатов тепловых испытаний опытных образцов двигателей серии 2АР и расчетов по предлагаемой методике.*

#### Введение

Электрические машины общепромышленного назначения мощностью до 100 кВт обычно выполняют в закрытом обдуваемом или в брызгозащищенном исполнении, в которых применена искусственная циркуляция охлаждающего воздуха с помощью вентиляторов. Такие электрические машины имеют высокие технико-экономические показатели, благодаря чему они получили широкое распространение. Для теплового расчета таких электрических машин широко применяется метод эквивалентных тепловых схем [1, 2].

Однако, существует большое количество типов электрических машин закрытого исполнения, в которых по ряду причин невозможно создать искусственную циркуляцию охлаждающей среды. Это, прежде всего, некоторые типы электрических микромашин, а также электрические машины специального назначения, в частности, рольганговые асинхронные электродвигатели.

Рольганговые электродвигатели имеют станину с кольцевыми ребрами и ребренные подшипниковые щиты с вертикальными ребрами [3], охлаждаемые путем естественной конвекции и теплового излучения. Одним из главных факторов, влияющих

на величину коэффициентов теплоотдачи естественной конвекцией и тепловым излучением, является температура корпуса, которая на стадии проектирования не известна.

С учетом изложенного применение известных методик теплового расчета [1, 2] без адаптации их к особенностям конструкции и к условиям эксплуатации рольганговых электродвигателей не допустимо.

Тепловое состояние асинхронных электродвигателей оценивается по величине среднего превышения температуры обмотки статора над температурой окружающей среды  $\theta_m$ . В промышленности для расчета  $\theta_m$  применяется упрощенная формула

$$\theta_m = \frac{\Sigma p}{S_a \cdot \alpha_a}, \quad ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где:  $\Sigma p$  – суммарные потери электродвигателя, Вт;  $S_a$  – условная поверхность охлаждения активной части электродвигателя, м<sup>2</sup>;

$$S_a = \pi D_a l_1 + \frac{\pi D_a^2}{2};$$

$D_a$  – наружный диаметр сердечника статора, м;  $l_1$  – длина сердечника статора, м;  $\alpha_a$  – условный коэффициент теплоотдачи с условной поверхности охлаждения активной части двигателя, Вт/(м<sup>2</sup>·К).