

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ «ПРОПИТОЧНЫЙ СОСТАВ – ЭМАЛИРОВАННЫЙ ПРОВОД»

Супуева А.С., Леонов А.П.

Научный руководитель: Леонов А.П., к.т.н., доцент

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: leonov_ap@tpu.ru

Межвитковая изоляция обмоток низковольтных электрических машин является, самым слабым с точки зрения надежности элементом. Критерием отказа данного элемента является наличие сквозного дефекта на двух соседних витках обмотки. В случае плохой совместимости процесс образования таких дефектов значительно ускоряется, и, как следствие, резко снижается средний срок службы такой изоляции. Установлено, что образование сквозных дефектов в межвитковой изоляции зависит от величины внутренних механических напряжений в пропиточном составе и от адгезионного взаимодействия между пропиточным составом и эмалевой изоляцией обмоточного провода. Большой уровень внутренних механических напряжений приводит к растрескиванию пропиточного состава, а слишком высокая адгезия способствует дальнейшему разрушению эмалевой изоляции [1, 2]. При разрушении композиционных систем, в данном случае системы «пропиточный состав – эмалированный провод», развитие трещины может быть приостановлено, если адгезионная прочность на границе раздела фаз не превышает определенного уровня, иначе трещина может прорасти в пленку эмальлака [2]. В то же время слишком малая адгезия может привести к потере цементации витков обмотки и их ускоренному износу под действием вибрационных нагрузок. Т.е. оптимальная адгезия пропиточного состава $A_{ОПТ}$ к эмали провода должна быть в пределах:

$$A_{\min} \leq A_{ОПТ} \leq A_{\max}$$

Согласно современным представлениям о разрушении комбинированных материалов развитие трещины из одной компоненты в другую может быть остановлено в случае умеренной адгезии между ними. При разрушении межвитковой изоляции ловушкой для трещины, возникшей в слое пропиточного состава, может стать граница раздела фаз "пропиточный состав - эмалевая изоляция", при условии, что адгезионная прочность на этой границе не превышает некоторого значения. Таким пределом, согласно [2], является $1/5P$, где P - прочность пленки эмальлака. Таким образом, надежная совместная работа пропиточных составов и эмалированных обмоточных проводов будет обеспечена при сравнительно невысоком уровне внутренних напряжений и адгезии между компонентами изоляции $A \leq 1/5P$.

Таким образом, определение величин адгезии в системе "пропиточный состав - эмалевая изоляция" позволит оценить целесообразность совмест-

ного использования компонентов межвитковой изоляции. К сожалению, существующие в настоящее время методы определения работы адгезии полимерных пленок в большинстве случаев не применимы для систем межвитковой изоляции, в ряде случаев полученные результаты условны, при проведении измерений учитываются существенные допущения, значительно снижающие точность полученных результатов.

Величина адгезии зависит от ряда факторов: температуры, времени контакта, вязкости адгезива, площади контактирующих поверхностей, числа связей, определяющих адгезию и их энергии; величиной и временем действия силы, направленной на разрыв адгезионного взаимодействия; состояния поверхности субстрата. Наиболее значимыми является вязкость адгезива (определяет площадь контакта и число связей) и энергия смачивания (обуславливает величину свободной поверхностной энергии и силу межмолекулярного взаимодействия между пропиточным составом и эмалевой изоляцией) [3].

Суммарная свободная энергия образуется из вкладов различных межмолекулярных сил, действующих на этой поверхности. Предполагая, что на ее поверхности выполняются принципы аддитивного и независимого действия межмолекулярных сил, поверхностную энергию γ можно записать как:

$$\gamma = \gamma^d + \gamma^h$$

где d и h – указывают соответственно на дисперсионную и полярную составляющие, обусловленные образованием водородных связей и дипольным взаимодействием.

Межфазное $\gamma_{1,2}$ натяжение между пропиточным составом γ_1 и эмалевой изоляцией γ_2 можно найти по выражению:

$$\gamma_{1,2} = \gamma_1 + \gamma_2 - 2\sqrt{\gamma_1^d \gamma_2^d} - 2\sqrt{\gamma_1^h \gamma_2^h}$$

Это позволяет связать составляющие сил свободной энергии поверхности твердого тела (γ_s^d , γ_s^h) и жидкости (γ_L^d , γ_L^h) со значением $\cos \varphi$ - краевого угла смачивания твердого тела жидкостью:

$$\gamma(1 + \cos \varphi) = 2\left(\sqrt{\gamma_s^d \gamma_L^d} + \sqrt{\gamma_s^h \gamma_L^h}\right) \quad (1)$$

Из уравнения (1) можно найти γ_s^d и γ_s^h по данным измерения углов смачивания φ двумя жидкостями, если значения γ , γ_L^d , γ_L^h для обеих жидкостей известны [4].

В нашем случае используется дистиллированная вода и глицерин, для которых параметры γ , γ_L^d , γ_L^h приведены ниже в таблице 1.

Таблица 1. Значения γ , γ^d_L , γ^h_L для различных жидкостей.

	$\gamma \cdot 10^3$, Н/м	$\gamma^d \cdot 10^3$, Н/м	$\gamma^h \cdot 10^3$, Н/м
Глицерин	63,0	37,0	26,0
Вода	73,0	22,0	51,0

Определение величин поверхностных энергий пропиточного состава и эмаливой изоляции производится путем последовательного гидростатического взвешивания. С помощью электронных аналитических весов CAUW 120D измеряется кажущееся изменение массы образца при его контакте с жидкостью. Образцы представляют собой отрезки эмалированного провода.

Часть образцов была использована для определения смачивания воды и глицерина к поверхности эмаливой изоляции. Другая партия образцов погружалась в пропиточный материал, сушилась при повышенной температуре в соответствии с нормативно-технической документацией. Затем были определены параметры смачивания воды и глицерина к поверхности отвержденного пропиточного состава.

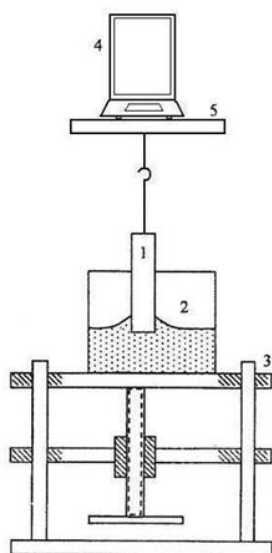


Рис 1. Схема установки для определения энергии смачивания:

- 1 - испытываемый провод;
- 2 - сосуд с жидкостью;
- 3 - подъемный столик;
- 4 - аналитические весы;
- 5 - столик для весов.

Термодинамическую работу адгезии жидкости можно определить по выражению:

$$W_a = \gamma_L (1 + \cos \phi) \quad (2),$$

где γ_L - свободная поверхностная энергия адгезива (равна $\sigma_{жж}$ - поверхностному натяжению жидкости); ϕ - краевой угол смачивания твердой поверхности жидкостью.

Поверхностное натяжение жидкости $\sigma_{жж}$ и краевой угол смачивания ϕ поддаются непосредственному и достаточно точному измерению. Поэтому по уравнению (2) определяют равновесную работу адгезии жидкости и при помощи этой величины сравнивают адгезионную способность жидкостей к различным твердым телам. Тогда величина работы адгезии может быть представлена как:

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{1,2} = 2(\sqrt{\gamma_1^d \gamma_2^d} - 2\sqrt{\gamma_1^h \gamma_2^h}) \quad (3)$$

Используя выражение (3) проведен расчет работы адгезии для различных систем межвитковой изоляции. Полученные данные сопоставлены с литературными данными скоростей дефектообразования (N_B) в рассмотренных системах (таблица 2).

Таблица 2. Сравнительные данные величин работы адгезии (W_a) и скоростей дефектообразования в некоторых системах межвитковой изоляции.

Система "пропиточный состав - эмаливая изоляция"	$W_a \cdot 10^{-3}$ Дж/м ²	$N_B \cdot 10^{-6}$ мм ⁻¹ ч ⁻¹
ПЭ-9153М + ПЭТ-155	1,854	0,0085
КО-916К + ПЭТ-155	11	0,07
КО-916К + ПЭФД-2-200	6,673	0,01
ГФ-95 + ПЭТВ-2	13	0,18

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы:

1. Используемый подход расчетно - экспериментального определения работы адгезии W_a в системе «полимер - полимер» применим для оценки величин адгезионного взаимодействия в системах «пропиточный состав - эмалированный провод».

2. Сопоставление расчетных данных работы адгезии W_a с литературными данными о скорости дефектообразования N_B исследуемых систем показали, что с увеличением работы адгезии увеличивается скорость дефектообразования, тем самым увеличивается вероятность развития сквозного дефекта в системе «пропиточный состав - эмалированный провод» что провоцирует снижения надежности полученной композиции

3. Предлагаемый метод прост и имеет сравнительно малую продолжительность проведения работ. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования уровня скорости дефектообразования N_B в композициях «пропиточный состав - эмалированный провод».

4. Предварительный отбор компонентов межвитковой изоляции позволит прогнозировать интенсивность процессов дефектообразования в межвитковой изоляции и оптимизировать выбор её компонентов, что повысит надежность всей изоляции в целом.

Список литературы

1. Галушко А.И., Максимова И.С., Оснач Р.Г. Надежность изоляции электрических машин. - М.: Энергия, 1979.-175с.
2. Басин В.Е. Адгезионная прочность. - М.: Изд-во «Химия», 1981.-208с.
3. Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. - М.: Изд-во «Химия», 1977.-352 с.
4. Каган Д.Ф., Гуль В.Е., Самарина Л.Д.. Многослойные и комбинированные пленочные материалы. - М.: «Химия», 1989.-288 с.