

Контроль процесса вторичной пропитки обмоток электродвигателей методом акустической эмиссии с целью повышения безопасности труда*

В. В. Шегай, О. О. Баранникова, К. О. Кобзев

(Донской государственный технический университет)

Доказана возможность использования метода акустической эмиссии для контроля процесса вторичной пропитки обмоток электродвигателей. Описан метод пропитки погружением. Предложена модель акустико-эмиссионного контроля вторичной пропитки обмоток электродвигателей методом погружения на примере гипсового образца. Представлены два возможных сценария выделения пузырьков и соответствующие математические модели. В первом случае пузырьки, попадающие в жидкость, схлопываются под действием гидростатического давления жидкости и сил поверхностного натяжения. Во втором случае пузырьки поднимаются к поверхности под действием Архимедовой силы и схлопываются под действием внутреннего давления. Использование акустико-эмиссионного контроля пропитки позволяет улучшить качество этого процесса, точно определить его длительность. Таким образом можно сократить время нахождения работника в токсичной зоне, снизить класс опасности цеха (и, соответственно, оптимизировать затраты на компенсации и льготы сотрудникам).

Ключевые слова: импрегнат, газы, акустика, эмиссия, средства индивидуальной защиты.

Введение. В процессе ремонта электродвигателей широко применяется импрегнирование обмоток электродвигателей методом погружения. Для диагностики физико-химических процессов в жидкости необходим особый метод — бесконтактный и исключительно информативный. Такими свойствами обладает метод акустической эмиссии (АЭ). В настоящее время метод АЭ применительно к жидкости почти не используется. Единственное исключение — АЭ утечки. Речь идёт о регистрации АЭ сигналов при определении образования свищей, сквозных трещин, протечек в уплотнениях, заглушках, арматуре и фланцевых соединениях.

Постановка задачи. Доказать возможность использования метода акустической эмиссии применительно к контролю процесса вторичной пропитки обмоток электродвигателей.

Решение задачи. Наиболее распространённый способ пропитки лаками — «погружение». Таким образом пропитываются и отдельные катушки, и обмотки, уложенные в пазы сердечников. Работник на предприятии определяет приблизительное время окончания данного процесса по некоторым визуальным признакам. Для оптимизации контроля пропитки может быть применён метод контроля акустической эмиссии.

Для изучения индуцируемых сигналов АЭ в процессе пропитки применялся акустико-эмиссионный комплекс *A-Line32D*. Это многоканальная система регистрации АЭ событий, позволяющая параллельно проводить до 8 экспериментов. Частотный диапазон использованных пьезодатчиков — 100—500 кГц.

Образец помещался в стеклянную ёмкость с исследуемой жидкостью. Форма ёмкости выбиралась таким образом, чтобы обеспечить усиление индуцируемого АЭ сигнала. Образец в процессе пропитки не соприкасался со стенками ёмкости. Таким образом, регистрация паразитных сигналов исключалась. Фиксировались только акустические сигналы, являвшиеся результатом физико-химического процесса импрегнирования.

При пропитке единичного капилляра и вытеснении микроскопического пузырька газа в жидкость пузырёк отрывается и схлопывается, среда разрежается и уплотняется, следовательно, образуются волны напряжения. Возбуждаемая единичная акустическая волна имеет настолько

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

слабую энергию, что вследствие процессов затухания в жидкой среде её энергия практически не доходит до поверхности. Однако, если процесс проходит в достаточно крупном образце со множеством пор, то акустический сигнал усиливается, что следует из известных формул акустических расчётов. В таком случае возможна регистрация акустических колебаний.

Экспериментально установлено, что при пропитке пористых материалов (минеральные образцы, древесина, ткани, металлические изделия сложной формы) индуцируются сигналы акустической эмиссии в частотном диапазоне 100—500 кГц. Физическая природа возникновения АЭ обычно связывается с микропроцессом деформирования и разрушения твёрдых материалов. Для диагностики физико-химических процессов в жидкости необходимо разработать бесконтактный и исключительно информативный метод, каковым и является метод АЭ. Применительно к жидкости в настоящее время широко используется только АЭ утечки (регистрация АЭ сигналов при определении образования свищей, сквозных трещин, протечек в уплотнениях, заглушках, арматуре и фланцевых соединениях) [1].

Возникающая в процессе импрегнирования АЭ во многом совпадает с АЭ при нагревании и кипении жидкости. Этот механизм связан с возникновением и исчезновением пузырьков газа в жидкости. В процессе импрегнирования испарением жидкости внутри пузырька можно пренебречь — в отличие, например, от кипения, где пары воды (жидкости) играют большую роль в образовании пузырьков. При этом пузырьки могут выделяться по-разному.

1. Попадающие в жидкость пузырьки схлопываются под действием гидростатического давления жидкости и сил поверхностного натяжения. Это происходит при малых размерах пузырьков и сравнительно низких температурах, когда можно пренебречь давлением паров жидкости.

2. Пузырьки могут подниматься к поверхности под действием Архимедовой силы и лопаться под действием внутреннего давления (аналогично процессу кипения). Увеличение объёма пузырька можно рассматривать как процесс изобарного нагревания газа.

В обоих случаях большую роль играют силы поверхностного натяжения, возникающие вокруг газового пузырька. Энергию поверхностного натяжения можно рассматривать как вид или часть внутренней энергии среды. При ликвидации пузырька эта энергия переходит в энергию колебаний частиц жидкости и воспринимается как белый шум (акустическая эмиссия) [2].

Очевидно, что число регистрируемых акустических импульсов пропорционально интенсивности возникновения, а энергия импульсов связана с силами поверхностного натяжения в жидкости и размерами пузырьков (чем меньше размеры, тем большую роль играет поверхностное натяжение).

Величина избыточного давления определяется формулой Лапласа

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R},$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; R — радиус пузырька.

Оценим величину R для воздушного пузырька в воде при комнатной температуре. Полагая избыточное давление в пузырьке равным атмосферному $\Delta p = 10^5$ Па, а $\sigma = 0,073$ Н/м, получаем критический радиус газового пузырька ($R_{кр}$):

$$R_{кр} = \frac{2\sigma}{\Delta p} = \frac{2 \times 0,073 \text{ Н/м}}{10^5 \text{ Па}} = 1,5 \text{ мкм},$$

что вполне соответствует экспериментальным данным.

Из формулы Лапласа следует, что равновесие газового пузырька в жидкости имеет неустойчивый характер:

а) при $R > R_{кр}$ силы поверхностного натяжения не могут сдержать рост пузырька — пузырёк растёт, всплывает и лопается;

б) при $R < R_{кр}$ силы поверхностного натяжения сжимают пузырёк до момента, пока плотность газа в нём не приблизится к плотности жидкости (т. е. объём пузырька должен уменьшиться в 10^3 раз), а это и есть схлопывание пузырька.

В обоих случаях при исчезновении пузырька возникают ударные волны (сам процесс носит быстродействующий и, следовательно, адиабатный характер). Поэтому газовый пузырёк может рассматриваться как сферический излучатель, работающий в жидкости [3].

Рассмотрим излучение сферически симметричных волн более подробно. Волновое уравнение для сферически симметричной волны имеет вид:

$$\frac{\partial^2(rp)}{\partial r^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2(rp)}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где ∂ — знак производной; r — радиальная координата; c — скорость волны; p — давление.

В общем случае решение уравнения (1) имеет вид

$$p = \frac{f\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r}, \quad (2)$$

где f — некоторая функция координаты r и времени t .

Отметим, что формула (2) описывает бегущую, расходящуюся сферическую волну. В силу центральной симметрии колебательная скорость v частиц среды направлена вдоль радиус-вектора \vec{r} , выходящего из центра сферы, и зависит только от расстояния r и времени t .

Связь между давлением и колебательной скоростью в сферической волне имеет вид

$$v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t p dt, \quad (3)$$

где d — диаметр пузырька; ρ — плотность среды.

Для бегущей волны, учитывая (2), получаем:

$$v = \frac{p}{\rho c} + \frac{1}{\rho r} \int_0^t p dt. \quad (4)$$

Отсюда следует, что в сферической бегущей волне скорость частиц не пропорциональна давлению. В гармонической бегущей сферически симметричной волне с единичной амплитудой давления на единичном расстоянии от центра сферы давление

$$p = \frac{e^{+ikr}}{r}, \quad (5)$$

где k — коэффициент; r — расстояние.

Соответственное значение скорости частиц

$$v = \frac{1}{i\rho ckr} \frac{+ikr - 1}{r} e^{ikr}, \quad (6)$$

где ρ — плотность среды.

При малом радиусе a сферы её можно рассматривать как монополюсный излучатель (монополь). В этом случае излучающая способность сферы определяется объёмной скоростью $V(t) = 4\pi a^2 u$, где u — колебательная скорость частиц на поверхности сферы.

Для гармонических колебаний, когда $V(t) = V_0 e^{-i\omega t}$, получаем зависимости амплитуды давления и скорости частиц в жидкости от координаты r :

$$\begin{aligned} p &= -i\rho\omega V_0 e^{ikr}, \\ v &= -V_0 \frac{ikr - 1}{4\pi r^2} e^{ikr}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число; λ — длина волны; ω — круговая частота волны.

Введём для сферически симметричной волны понятие волнового, или акустического, сопротивления среды $Z = \frac{p}{v}$. Учитывая (7), получаем

$$Z = \frac{p}{v} = \frac{ipckr}{ikr - 1} = -\frac{ipckr}{1 + (kr)^2} + \frac{\rho c (kr)^2}{1 + (kr)^2}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что для сферической волны волновое сопротивление оказывается комплексной величиной. Кроме того, оно зависит от расстояния до центра сферы и частоты. Мнимая часть волнового сопротивления отрицательна, то есть имеет инерционный характер. При $kr \ll 1$ преобладает мнимая часть, а при $kr \gg 1$ — действительная. Сопротивление, испытываемое при излучении поверхностью сферы пузырьков радиуса a ($ka \ll 1$),

$$Z(a) \approx -i\omega p r (1 + ikr). \quad (9)$$

Действительная часть волнового сопротивления в этом случае мала по сравнению с мнимой, а мнимая часть совпадает с реакцией $-i\omega p r$, которую оказывала бы несжимаемая жидкость на поверхность сферы. Действие реактивной части сопротивления в отсутствие среды можно интерпретировать как действие массы с поверхностной плотностью ρa , равномерно распределённой по поверхности сферы. Суммарная масса для всей сферы (присоединённая масса излучающей сферы) составляет $4\pi a^3 \rho$.

Рассмотрим в качестве монополя упругую сферу (пузырёк газа) радиусом a . Сфера находится в жидкости с удельным коэффициентом упругости k и плотностью ρ , которая значительно превышает плотность газа.

Оценим собственную частоту колебаний этой сферы. Приращение Δa радиуса сферы в процессе колебаний $\Delta a = -p/k$. Такая сфера, помещённая в несжимаемую среду, является сферически симметричным осциллятором с одной степенью свободы. Тогда масса этого осциллятора — присоединённая масса сферы, равная $4\pi a^3 \rho$. Обобщённый коэффициент упругости сферы будет равен $4\pi a^2 k$. Следовательно, собственная круговая частота такого осциллятора:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi a^2 k}{4\pi a^3 \rho}} = \sqrt{\frac{k}{a\rho}}. \quad (10)$$

Такой же расчёт можно выполнить и для сферы, помещённой в сжимаемую среду, если выполняется условие $k_0 a \ll 1$, где $k_0 = \omega_0/c$. Учитывая (10), это условие можно переписать в виде:

$$k \ll \frac{\rho c^2}{a}.$$

Если сфера — сплошное тело, значит, сжимаемость тела должна быть много больше сжимаемости среды. Для воздушного пузырька в жидкости (воде) это условие всегда выполняется. Колебания упругой сферы в сжимаемой среде можно по-прежнему рассматривать как колебания осциллятора с одной степенью свободы. Однако теперь эти колебания будут затухающими, так как их энергия расходуется на излучение упругих волн колеблющейся сферой.

Расчёт осциллятора в этом случае можно выполнить следующим образом. Если радиус сферы мал по сравнению с длиной волны, то воспользуемся формулой (9). Она отличается от формулы для несжимаемой среды только множителем $1 + ikr$, учитывающим активную часть реакции сферы. Полную реакцию сжимаемой среды на сферу можно, следовательно, имитировать, распределяя по поверхности сферы «комплексную поверхностную плотность» $\rho a(1 + ika)$. Тогда комплексную частоту колебаний снова находим по формуле (10):

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{\rho a(1 + ik_0 a)}} \approx \omega_0 \left(1 - \frac{1}{2} ik_0 a\right). \quad (11)$$

В этом расчёте было принято, что $k_0 a \ll 1$. Поэтому при оценке затухания колебаний волновое число можно было рассчитывать, исходя из вещественной частоты, полученной в отсутствие сжимаемости. А при комплексной частоте получаем и комплексное волновое число:

$$k = k_0 \left(1 - \frac{1}{2} i k_0 a \right). \quad (12)$$

Таким образом, давление в излучаемой волне будет иметь вид

$$p = p_0 \exp\left(-i\omega_0 t - \frac{1}{2} i k_0 a \omega_0 t\right) \frac{\exp\left(i k_0 r - \frac{1}{2} i k_0 a k_0 r\right)}{r}. \quad (13)$$

Колебания газового пузырька в жидкости можно рассматривать как колебания практически безмассовой упругой сферы. Найдём коэффициент упругости пузырька. Пусть радиус a пузырька получил малое приращение $\Delta a \ll a$. Тогда его объём получит приращение $\Delta V = 4\pi a^2 \Delta a$ и сжатие пузырька

$$s = -\frac{\Delta V}{V} = -\frac{3\Delta a}{a}.$$

В результате получаем избыточное давление в пузырьке $p = \frac{s}{\beta} = -\frac{3\Delta a}{a\beta}$, где β — сжимаемость газа. Отсюда следует, что коэффициент упругости пузырька

$$\kappa = -\frac{p}{\Delta a} = \frac{3}{a\beta}.$$

Таким образом, основная собственная круговая частота колебаний пузырька

$$\omega = \sqrt{\frac{\kappa}{a\rho}} = \sqrt{\frac{3}{a^2\rho\beta}}. \quad (14)$$

Считая процесс колебаний пузырька адиабатическим, получаем сжимаемость

$$\beta = 1 / \gamma P,$$

где P — давление газа в пузырьке, γ — показатель адиабаты.

Тогда формула (14) приобретает вид

$$\omega = \sqrt{\frac{3\gamma P}{a^2\rho}}. \quad (15)$$

Для пузырька воздуха вблизи свободной поверхности воды из формулы (15) получаем $\omega a \approx 600$, или $f a \approx 100$ Гц·м ($\gamma = 1,4$; $P = 10^5$ Па; $\rho = 1,3$ кг/м³). Полагая (в соответствии с приведёнными выше с помощью формулы Лапласа оценками) радиус пузырька $a \approx 1$ мкм, получаем, что собственная частота колебаний пузырьков воздуха в воде составляет несколько сотен килогерц.

Вместе с тем следует отметить, что амплитуда и, соответственно, интенсивность излучения отдельного пузырька очень малы. Реально в эксперименте регистрируется результат наложения множества некогерентных сигналов, излучаемых отдельными пузырьками, то есть белый шум.

В качестве примера оценки амплитуды и частоты суммарного сигнала рассмотрим случай наложения n гармонических колебаний равной амплитуды A с частотами, последовательно отличающимися друг от друга на величину $\Delta\omega$.

Результат этого наложения определяется суммой:

$$S_n(t) = \sum A \sin(\omega_1 + (k-1)\Delta\omega)t, \quad k = 1, \dots, n.$$

Для вычисления этой суммы воспользуемся формулой Эйлера:

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x.$$

Тогда $\sin x = \text{Im } e^{ix}$ и

$$S_n(t) = \sum A \sin(\omega_1 + (k-1)\Delta\omega)t = A \text{Im} \sum [e^{i(\omega_1+k\Delta\omega)t}] = A \text{Im} [e^{i\omega_1 t} + e^{i(\omega_1+\Delta\omega)t} + \dots + e^{i(\omega_1+k\Delta\omega)t}].$$

Таким образом, искомая сумма есть геометрическая прогрессия с множителем $q = e^{i\Delta\omega t}$ и первым слагаемым $b_1 = e^{i\omega_1 t}$.

Сумма геометрической прогрессии

$$S_n = b_1(q^n - 1)/(q - 1).$$

Отсюда получаем, что сумма n колебаний

$$S_n(t) = A \text{Im} [e^{i\omega_1 t} (e^{in\omega_1 t} - 1)/(e^{i\Delta\omega t} - 1)] = \frac{A \sin(n\Delta\omega t / 2)}{\sin(\Delta\omega t / 2)} \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_n}{2} t\right),$$

где $\omega_n = \omega_1 + (n-1)\Delta\omega / 2$.

Если принять $\omega_m = (\omega_1 + \omega_n)/2$, то окончательный результат сложения n колебаний будет иметь вид

$$S_n(t) = A \sin(n\Delta\omega t / 2) / \sin(\Delta\omega t / 2) \sin\omega_m t.$$

В этом случае амплитуда биений

$$A(t) = A \sin(n\Delta\omega t / 2) / \sin(\Delta\omega t / 2).$$

Максимумы амплитуды биений (главные максимумы) определяются условием:

$$\sin(\Delta\omega t / 2) = 0 \text{ или } \Delta\omega t / 2 = m\pi,$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$

Величину этих максимумов найдём через предел, к которому стремится отношение $\sin(n\Delta\omega t / 2) / \sin(\Delta\omega t / 2)$, когда $\Delta\omega t / 2 \Rightarrow m\pi$:

$$\lim(\sin(n\Delta\omega t / 2) / \sin(\Delta\omega t / 2)) = n,$$

при $\Delta\omega t / 2 \Rightarrow m\pi$.

Следовательно, максимальное значение амплитуды биений равно nA , а частота биений $f = \Delta\omega / 2\pi$.

Таким образом, можно утверждать, что регистрируемый сигнал АЭ — это результат биений, возникающих при сложении множества высокочастотных колебаний, генерируемых отдельными воздушными пузырьками в жидкости. Полоса частот этих колебаний определяет основную частоту регистрируемого сигнала АЭ, а концентрация пузырьков определяет интенсивность этого сигнала.

Результаты работы. Следует отметить, что в результате пропитки и сушки улучшаются свойства электрической изоляции.

1. Повышается нагревостойкость.
2. Улучшается теплопроводность обмоток за счёт уменьшения воздушных прослоек между проводниками и стенками паза сердечника.
3. Повышается влагостойкость изоляции, особенно волокнистой, за счёт уменьшения гигроскопичности в результате заполнения пор и создания лаковой плёнки, препятствующей проникновению влаги внутрь обмотки.
4. Увеличивается электрическая прочность изоляции, так как электрическая прочность пропиточных материалов выше электрической прочности воздуха, находящегося между волокнами не пропитанных материалов.
5. Повышается механическая прочность изоляции, так как пропитанная обмотка имеет хорошо сцепленные витки, плотно и прочно сидящие в пазах сердечников. Благодаря этому предотвращается перемещение проводников в результате вибрации и связанное с этим повреждение изоляции от истирания.

Выделяемые в это время пары растворителей, а также испарения с поверхности лака приводят к загазованности воздуха в пропиточно-сушильных отделениях. При определённой концентрации паров растворителей пропиточное отделение становится вредным для здоровья находящихся в нём работников, взрыво- и пожароопасным.

Самый распространённый лак, используемый на производстве, — ФЛ-98. Согласно ГОСТ 12294-66, электроизоляционный пропиточный лак ФЛ-98 является токсичным и легковоспламеняющимся материалом, что обусловлено свойствами входящих в его состав растворителей — бутилового спирта, уайт-спирита (нефраса С4-155/200).

Пары растворителей при большой концентрации в воздухе рабочей зоны оказывают раздражающее действие на слизистые оболочки глаз, дыхательных путей и кожу.

Работник должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты, согласно установленным нормам: костюмом из хлопчатобумажной ткани, перчатками, респиратором, кожаными ботинками, защитными маской, каской, очками.

На работника во время работы возможно воздействие вредных и опасных факторов: ароматические углеводороды, фенол, формальдегид, уайт-спирит, шум, теплоизлучение [3].

В связи с вредными условиями труда при работе с лаком ФЛ-98 работнику положены льготы: специальное питание (молоко), увеличение продолжительности регламентируемых перерывов, и дополнительный отпуск.

В связи с этим необходимо точно определить и сократить время нахождения работника в опасной зоне.

В результате проведённых экспериментов методам АЭ применительно к импрегнированию было выявлено следующее.

1. В процессе пропитки происходит вытеснение газа из твёрдого пропитываемого пористого материала импрегнатом.

2. Выделяемый газ (пары) проходит различные стадии образования газового пузырька, что вызывает волны напряжения в локальном объёме лака.

3. Дегазация не является признаком прекращения процесса полной пропитки. После прекращения выделения пузырьков газа эффекты АЭ сохраняются. Это говорит о том, что не все пустоты пористого материала заполнены и пропитка продолжается.

4. При пропитке идентифицируются несколько различных акустико-эмиссионных картин. Это свидетельствует о сложности процесса импрегнирования.

5. Прекращение эффектов АЭ свидетельствует об окончании процесса пропитки (все поры заполнены).

Выводы. Результаты проведённых экспериментов позволяют определить точное время окончания процесса вторичной пропитки обмоток электродвигателей и улучшить его качество. Используя эти данные в условиях производства, можно снизить класс опасности цеха и, соответственно, сократить затраты на компенсации и льготы.

Библиографический список

1. Исследование процесса импрегнирования методом акустической эмиссии / В. Л. Гапонов [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 7 (58). — С. 1016–1024.

2. Безопасность жизнедеятельности : учебник для студентов вузов / под ред. Л. А. Михайлова. — Москва : Академия, 2009. — 271 с.

3. Теория и методика обучения безопасности жизнедеятельности : учебное пособие для студентов вузов / под ред. Л. А. Михайлова. — Москва : Академия, 2009. — 287 с.

Материал поступил в редакцию 25.06.2013.

References

1. Gaponov, V. L., et al. Issledovaniye protsessa impregirovaniya metodom akusticheskoy emissii. [Investigating impregnation by acoustic emission method.] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 7 (58), pp. 1016–1024 (in Russian).
2. Mikhaylov, L. A., ed. Bezopasnost zhiznedeyatelnosti : uchebnik dlya studentov vuzov. [Life Protection Sciences : college textbook.] Moscow : Akademiya, 2009, 271 p. (in Russian).
3. Mikhaylov, L. A., ed. Teoriya i metodika obucheniya bezopasnosti zhiznedeyatelnosti : uchebnoye posobiye dlya studentov vuzov. [Theory and training methods of Life Protection Sciences : student training manual.] Moscow : Akademiya, 2009, 287 p. (in Russian).

CONTROL OF MOTOR WINDING REIMPREGNATION THROUGH ACOUSTIC EMISSION METHOD AIMED AT LABOR SAFETY IMPROVING*

V. V. Shegay, O. O. Barannikova, K. O. Kobzev

(Don State Technical University)

The applicability of the acoustic emission method for monitoring the motor winding reimpregnation is proved. The dip infiltration technique is described. An acoustic emission monitoring model for the motor winding reimpregnation through the impregnation method by example of a plaster prototype is offered. Two project scenarios of bubbling and corresponding mathematical models are presented. In the first instance, bubbles entering the liquid collapse, as they are affected by the liquid hydrostatic load and surface tension forces. In the latter case, bubbles caused by the buoyancy force come to the top and collapse being affected by the intrinsic pressure. The acoustic emission impregnation control provides process quality improvement, precise determination of the process time. Thus, the residence time in the toxic area can be shortened, the shop hazard rating can be lowered (and consequently, costs of employee compensations and benefits can be optimized).

Keywords: *impregnat, gases, acoustics, emission, personal protective equipment.*

* The research is done within the frame of the independent R&D.