



ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В. Ю. ГЛУХОВСКИЙ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 03680, Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрена возможность применения тепловизионного неразрушающего контроля паяных соединений элементов электродвигателей. Основным типом дефектов в паяных соединениях является наличие газовых включений в зоне спаивания, что негативно влияет на эксплуатационные характеристики конечного изделия. Для выявления возможности проведения тепловизионного контроля паяных соединений роторных обмоток электродвигателей были изготовлены контрольные образцы, как бездефектные, так и с заложенными дефектами. Пайка осуществлялась контактным методом с последующим пропусканием электрического тока и нанесением припоя. Для определения граничного значения превышения температуры зоны спаивания составлено основное уравнение и проведены соответствующие математические расчеты. Получена зависимость значения разности температур над зоной спаивания от процентного содержания несплошностей внутри паяного соединения. Проведены экспериментальные работы по тепловизионному контролю паяных соединений, подтверждающие расчетные значения температур. Построены сравнительные температурные гистограммы для бездефектного и дефектного соединений. Библиогр. 5, рис. 4.

Ключевые слова: паяные соединения, статорная обмотка электродвигателя, тепловой неразрушающий контроль, тепловизор

Качество паяных изделий определяется их прочностью, надежностью, степенью работоспособности, коррозионной стойкостью, способностью выполнять специальные функции (тепло- и электропроводность, коммутационные характеристики и т. д.). Обеспечение этих характеристик достигается оптимальными решениями в процессе производства паяного изделия. Дефекты, возникающие при изготовлении паяных изделий, можно разделить на дефекты заготовки и сборки, дефекты паяных соединений и паяных изделий.

К наиболее типичным дефектам паяных соединений относятся поры, раковины, шлаковые и флюсовые включения, непропаи, трещины. Эти дефекты классифицируют на две группы: дефекты, связанные с заполнением расплавом припоя зазора между соединенными пайкой деталями, и возникающие в процессе охлаждения изделия. Дефекты первой группы связаны главным образом с особенностями заполнения капиллярных зазоров в процессе пайки. Дефекты второй группы обусловлены уменьшением растворимости газов в металлах при переходе из жидкого состояния в твердое и усадочным явлением. К ним относится пористость кристаллизационного и диффузионного происхождения.

Одним из основных дефектов, которые чаще всего встречаются в паяном шве, является отсутствие его сплошности, пустоты и пористость. Эти дефекты нарушают непрерывность слоя припоя, они неизбежно оказывают неблагоприятное влияние на прочность паяного соединения. В зависи-

мости от условий пайки площадь пустот в паяном соединении может изменяться в пределах от 5 до 65 % всей площади спаивания и приводить к резкому снижению его усталостной прочности. В связи с этим для обеспечения высокого качества паяных соединений прежде всего необходимо применять методы неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики [1].

При неудовлетворительном качестве паяных соединений контактов статорных обмоток электродвигателей локальный нагрев и электродинамические силы, возникающие в обмотке и зоне пайки проводников, снижают их электрическую и механическую прочность, приводят к возникновению электроразрядных процессов и к последующему выходу машины из строя. Исходя из статистики повреждаемости электродвигателей, наиболее уязвимым узлом является статор, на долю которого приходится до 60 % отказов, на втором месте – подшипниковый узел (до 22 %), далее – ротор (до 9 %) [2].

Таким образом, паяные соединения в процессе производства статорных обмоток электродвигателей должны подвергаться НК согласно соответствующим нормативным документам (ГОСТы 19249–73, 23479, 18442–80, 24715–81, 26126–84). Принцип НК – наблюдение, регистрация и анализ результатов взаимодействия с объектом контроля (ОК) воздействующих факторов (физических полей, т.е. излучений, или веществ), причем характер этого взаимодействия зависит от химического состава, строения, состояния структуры ОК и т. п.

В зависимости от типа физического взаимодействия с ОК НК подразделяют на девять основных видов: оптический, электрический, тепловой, акустический, магнитный, вихретоковый, радиоволновой, радиационный и контроль проникающими веществами [3].

Традиционно применяемый визуально-измерительный метод не дает полной картины состояния пайки элементов статорной обмотки и не позволяет гарантированно и своевременно обнаружить скрытые дефекты. При этом задача раннего обнаружения дефектов паяных соединений может быть решена средствами тепловизионной техники под нагрузкой и может выполняться на машинах с открытым оптическим доступом при снятых торцевых щитах электродвигателя. При расположении электродвигателей во взрывоопасных помещениях на производстве (например, двигатели нефтяных насосов) их работа при снятых торцевых щитах недопустима, и в этой связи возникает необходимость для создания методики, которая позволит проводить диагностику паек в любых по классу взрывоопасности помещениях [4].

Тепловой контроль качества паяных соединений ошинок и обмоток двигателей всех типов и классов напряжений является наиболее естественным, поскольку связан с изменением основного параметра обмотки ее локального электрического сопротивления. При контроле теплового (температурного) режима фрагментов обмоток и зон с прямым оптическим доступом паяных соединений в лобовой части использовали тепловизионную технику и термопары. Для контроля температурного поля применялся тепловизор Testo 876 с функцией SuperResolution, обеспечивающий температурную чувствительность < 80 мК. Данная модель тепловизора оснащена охлаждаемой болометрической матрицей с разрешением 160×120 (программно 320×240) с диапазоном температур до 280 °С.

Тепловой режим в зоне дефектного соединения характеризуется трехмерным температурным полем как в поперечном, так и продольном направлении относительно оси проводника. Элементарные проводники обмоток не имеют осевую симметрию в направлении, перпендикулярном продольной оси, поэтому для них характерен увеличенный уровень теплоотдачи с боковой поверхности и, как правило, большая скорость снижения температуры в продольном направлении по сравнению с цилиндрическими проводниками.

Паяное соединение статорных обмоток электродвигателя представляет собой нахлесточное соединение двух проводников с прямоугольным сечением. Величина нахлеста лежит в пределах от 2 до 2,5 длины большей стороны прямоугольника (рис. 1).

Рассмотрим модель прохождения электрического тока через плоскость припоя, лежащего меж-

ду двумя медными проводниками. При этом в качестве припоя выступает материал Пср-10. Это твердый припой на основе меди (52...52%), с добавлением цинка (35,39...38,15%) и серебра (9,7...10,3%), с температурой плавления 822...850 °С [5].

Если через проводник, имеющий температуру окружающей среды, проходит ток, то температура проводника постепенно повышается, так как вся энергия потерь при прохождении тока переходит в тепло. Скорость нарастания температуры проводника при нагреве током зависит от соотношения между количеством выделяющегося тепла и интенсивностью его отвода, а также теплопоглощающей способности проводника.

Количество тепла, выделенного в проводнике в течение времени dt , будет составлять:

$$dQ = Pdt = I^2 R_a dt, \quad (1)$$

где I – действующее значение тока, проходящего по проводнику, А; R_a – активное сопротивление проводника при переменном токе, Ом; P – мощность потерь, переходящих в тепло Вт.

Часть этого тепла идет на нагрев проводника и повышение его температуры, а остальное тепло отводится с поверхности проводника за счет теплоотдачи.

Энергия, переходящая в нагрев проводника, равна:

$$dQ_1 = Gcd\Delta T, \quad (2)$$

где G – масса токоведущего проводника, кг; c – удельная теплоемкость материала проводника (кДж/кг·К); ΔT – перегрев, т.е. превышение температуры проводника по отношению к окружающей среде:

$$\Delta T = T - T_0, \quad (3)$$

где T и T_0 – температуры проводника и окружающей среды, °С.

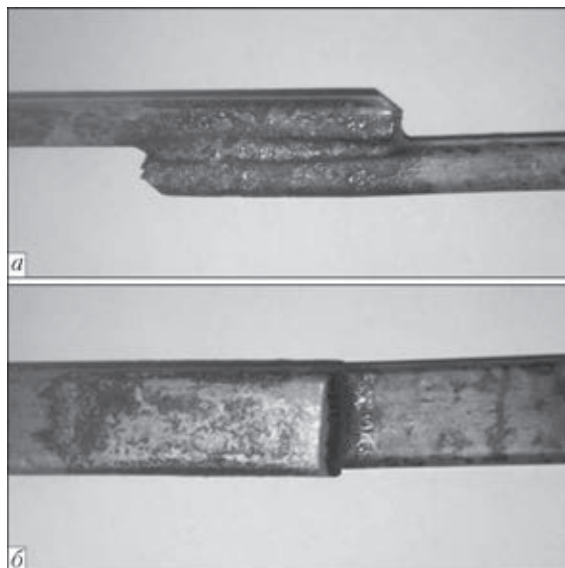


Рис. 1. Общий вид паяного соединения статорных обмоток электродвигателя: а – вид сбоку; б – сверху



Энергия, отводимая с поверхности проводника в течение времени dt за счет теплоотдачи, пропорциональна превышению температуры проводника над температурой окружающей среды:

$$dQ_2 = KF(T - T_0)dt = KF\Delta Tdt, \quad (4)$$

где K – общий коэффициент теплоотдачи, учитывающий все виды теплоотдачи, Вт/м \cdot °С; F – поверхность охлаждения проводника, см 2 .

Уравнение теплового баланса за время неустановившегося теплового процесса можно записать в следующем виде:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2, \quad (5)$$

или

$$I^2 R_a dt = Gcd\Delta T + KF\Delta Tdt, \quad (6)$$

или

$$\frac{I^2 R_a}{Gc} = \frac{d\Delta T}{dt} + \frac{KF}{Gc}\Delta T. \quad (7)$$

Для условий нормального режима, когда температура проводника изменяется в небольших пределах, можно принять, что R , c , K представляют собой постоянные величины. Кроме того, следует учесть, что до включения тока проводник имел температуру окружающей среды, т. е. начальное превышение температуры проводника над температурой окружающей среды равно нулю.

Решение этого дифференциального уравнения нагрева проводника будет:

$$\Delta T = Ae^{-\frac{KF}{Gc}t} + \frac{I^2 R_a}{KF} \quad (8)$$

где A – постоянная интегрирования, зависящая от начальных условий.

При $t = 0$ $\Delta T = 0$, т. е. в начальный момент нагреваемый проводник имеет температуру окружающей среды.

Тогда для $t = 0$ получаем:

$$\Delta T = A + \frac{I^2 R_a}{KF} \text{ и } A = -\frac{I^2 R_a}{KF}. \quad (9)$$

Подставляя значение постоянной интегрирования A , получаем:

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{I^2 R_a}{KF} (1 - e^{-\frac{KF}{Gc}t}). \quad (10)$$

Из этого уравнения следует, что нагрев токоведущего проводника происходит по экспоненциальной кривой. Как видно, с изменением времени подъем температуры проводника замедляется и температура достигает установившегося значения. Уравнение (10) дает температуру проводника в любой момент времени t с начала прохождения тока.

Величина установившегося перегрева может быть получена, если в уравнении нагрева принять время $t = \infty$:

$$\Delta T_y = T_y - T_0 = \frac{I^2 R_a}{KF}, \quad (11)$$

где T_y – установившаяся температура поверхности проводника; ΔT_y – установившееся значение превышения температуры проводника над температурой окружающей среды.

Таким образом, при постоянном токе 500 А, проходящем через плоскость припоя с параметрами 220×100×2 мм, предельное значение ΔT_y будет равным 24,35 °С. При этом данное значение разности температур соответствует бездефектному паяному соединению. Наличие несплошностей в паяном соединении будет способствовать увеличению температуры над зоной припоя (рис. 2).

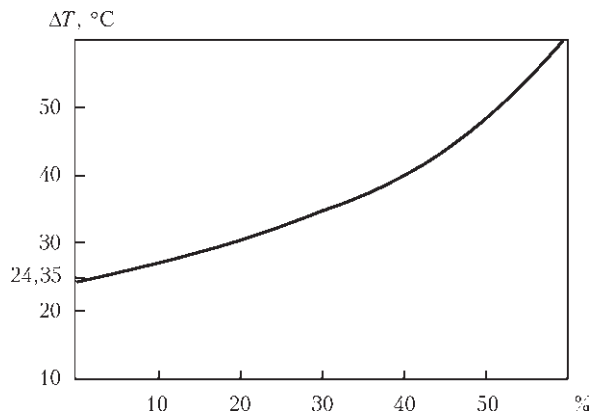


Рис. 2. Зависимость предельного значения разности температур ΔT_y в зоне припоя от процентной составляющей площади пусот в паяном соединении при токе 500 А

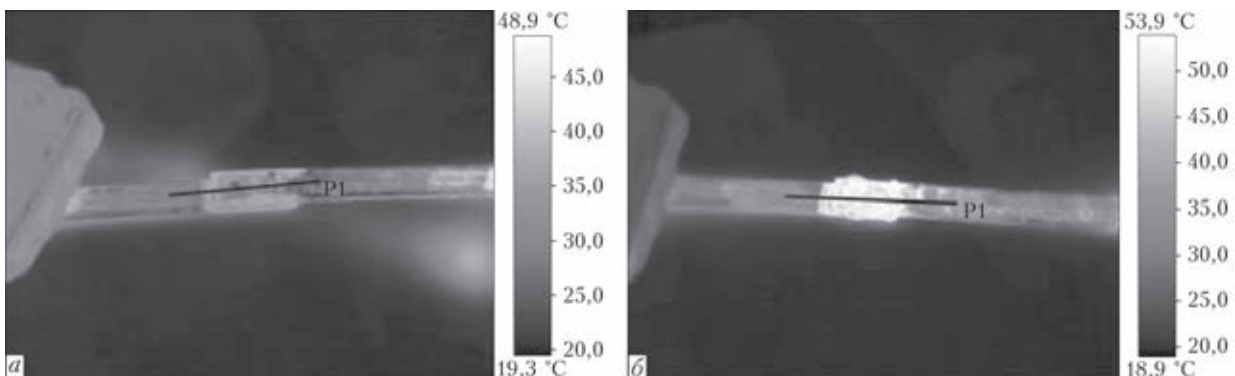


Рис. 3. Термограммы бездефектного (а) и дефектного (б) паяных соединений (P1 – линия распределения температуры)

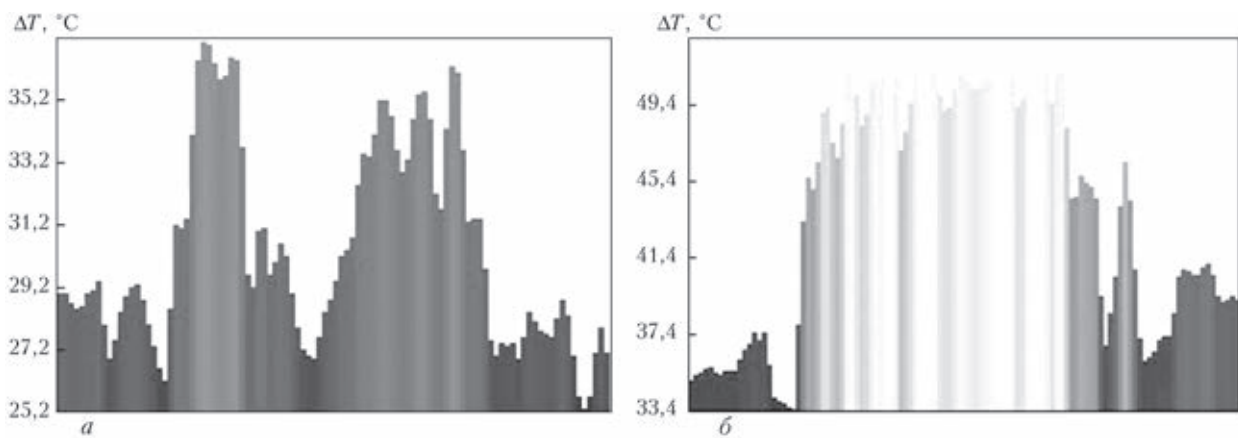


Рис. 4. Гистограммы температурного поля вдоль линии P1 бездефектного (а) и дефектного (б) паяных образцов: а – $T_{\min} = 25,2$ °С, $T_{\max} = 37,1$, $T_{\text{cp}} = 30,4$; б – $T_{\min} = 33,5$ °С, $T_{\max} = 52,6$, $T_{\text{cp}} = 44,1$

Предварительный тепловизионный контроль паяных соединений статорных обмоток электродвигателя проводили на специально изготовленных образцах, один из которых имел явные дефекты в виде локальных непропаев, термограммы которых представлены на рис. 3. Через паяные соединения пропускался переменный ток равный 500 А в течение 30 с. После чего проводилась термографическая съемка тепловизором марки TESTO 876.

Как видно из гистограмм (рис. 4), максимальная температура зоны спаивания в бездефектном соединении равна 37,1 °С при средней температуре медных токопроводов равной 27,2 °С. При этом ΔT для зоны спаивания 17,8 °С. Для дефектного пая максимальная температура равна 52,6 °С при средней температуре медных токопроводов равной 38,1 °С. Значение ΔT для дефектной зоны составляет 33,7 °С.

Выводы

Проведенные опытные испытания и предварительные расчеты показали, что при токе 500 А, проходящем через зону припоя, граничное значение

превышения температуры для бездефектного соединения составляет 24,35 °С (для соединения 220×100×2 мм).

Превышение граничного значения температуры для подобных паяных соединений будет свидетельствовать о наличии внутренних дефектов.

Применение тепловизионного контроля позволяет эффективно выявлять дефектные участки в паяных соединениях статорных обмоток электродвигателя на стадии производства и может быть основой для разработки методики контроля паяных соединений.

1. Калиниченко Н. П., Викторова М. О. Атлас дефектов паяных соединений. – Томск: Изд-во Томск. политехн. инта. – 2012. – С. 40–42.
2. ГОСТ 27471–87. Машины электрические вращающиеся. Термины и определения. – Гос. комитет СССР по стандартам. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – С. 2.
3. Тепловизионный контроль паяных соединений статорных обмоток вращающихся машин / В. И. Завидей, В. А. Головичер, С. В. Милованов и др. // Энергетик. – 2008. – № 3. – С. 53–57.
4. Урлучич Ю. М., Данилин Н. С. Неразрушающий контроль паяных соединений в радиоэлектронной аппаратуре // Мир измерений. – 2010. – № 6. – С. 31–38.
5. ГОСТ 19738–74. Припой серебряные. Марки. – Межгосударств. стандарт, 1985. – С. 1–5.

The possibility of application of nondestructive heat monitoring for soldered joints of electric motor elements is considered. The main type of defect in soldered joints is presence of gas inclusions in the soldered joint zone that has a negative impact on service properties of the final product. To determine the possibility of conducting heat monitoring of soldered joints of rotor winding of electric motors, control samples were made, both defect free and with introduced defects. Soldering was performed by contact method with subsequent passage of electric current and by flow soldering. To determine the limit value of exceeding the soldered joint zone temperature, the main equation has been formulated, and respective mathematical calculations have been performed. Dependence of the value of temperature difference above the soldered joint zone on percentage of discontinuities inside the soldered joint has been derived. Experimental work has been conducted on heat monitoring of soldered joints, confirming the calculated temperature values. Comparative temperature histograms have been plotted for defectfree and defective joints. 5 References, 4 Figures.

Keywords: soldered joints, stator winding of electric motor, thermal imaging monitoring, thermal imager

Поступила в редакцию
25.03.2014