

УДК 621.78

КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ В ХОЛОДИЛЬНЫХ АППАРАТАХ

В.А. СЫЧИК, В.С. ШУМИЛО

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, Минск, 220027, Беларусь

Поступила в редакцию 31 октября 2011

Рассмотрены вопросы контроля дефектов в холодильных аппаратах путем оценки теплового сопротивления участков с нарушенной их структурой и градиента температуры на дефектных участках аппаратов. Показано, что важнейшими параметрами точного контроля дефектов в холодильных аппаратах являются время установления перепада температур между поврежденными участками структуры конденсатора хладоэлемента и величина тепловых перепадов на поверхности конденсатора.

Ключевые слова: холодильный аппарат, температурный перепад, темп охлаждения, конденсатор хладоэлемента.

Введение

Контроль качества холодильной аппаратуры обычно выполняют путем оценки электрофизических параметров после их термовыдержки в камерах тепла и холода [1]. Такой процесс реализуется квалифицированными операторами и длителен во времени. Поэтому актуально создание методики контроля качества холодильных изделий, свободной от указанных недостатков.

По предлагаемой методике контроль дефектов холодильной аппаратуры осуществляется на стадии выходного контроля путем точного измерения интенсивности оптических излучений ИК-диапазона от поверхности хладоэлементов, величина которой \mathcal{L} отражает целостность структуры контролируемых хладоэлементов и герметичность их соединений. Как показали результаты экспериментальных исследований, в качестве сигнала использовано температурное поле поверхности конденсатора на его входе и выходе, которое является источником информации о процессе теплопередачи, отражающем надежность механических соединений, наличие внутренних или наружных дефектов – скрытых раковин, трещин, инородных включений, т.е. возможных отклонений физических свойств объекта от нормы.

Теоретические основы метода контроля дефектов в холодильных аппаратах

Дефектную поверхность хладоэлемента можно представить в виде анизотропной структуры с порами и включениями. Она может быть отражена в форме, представленной на рис. 1 базовой ячейкой, в которой элемент 2 – это микротрещина, а элемент 3 – инородное включение.

Эффективная теплопроводность такой дефектной структуры хладоэлемента в форме базовой ячейки находится из выражения

$$\lambda = \lambda_1 \left[1 - \frac{m_2}{1(1-\nu) - (1-m_2)/3} \right], \quad (1)$$

Здесь $m_2 = v_2 / v$ – объемная концентрация включений; v_2 / v – объемы включений и всей ячейки; $v = \lambda_1 / \lambda_2$; $\lambda_1 - \lambda_2$ – теплопроводность основного материала и включений.

Тепловое сопротивление соответствующего элемента базовой ячейки может быть найдено как

$$R = l_i / (S_i \lambda_i), \quad (2)$$

причем l_i , S_i , λ_i – соответственно длина, площадь элемента и его теплопроводность.

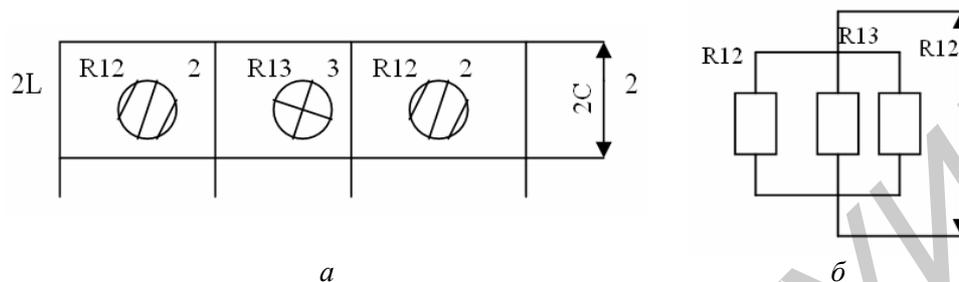


Рис. 1. Анизотропная структура базовой ячейки поверхности хладогента (а); схема соединения тепловых сопротивлений базовой ячейки (б)

В соответствии со схемой соединения тепловое сопротивление элементарного массива анизотропной структуры с порами и включениями

$$R = \frac{R_{12} R_{13}}{N R_{12} + K R_{13}} = \frac{2\ell}{\lambda S}, \quad (3)$$

где $S = (N + K)4\ell^2$, N и K – число включений типа 2 и 3.

Выражение (3) позволяет определить тепловое сопротивление дефектного участка хладоэлемента, по величине которого оценивается разность температур ΔT дефектной и бездефектной областей.

Основным информационным параметром при анализе качества холодильной аппаратуры является локальная разность температур между дефектной T_A и бездефектной T_B областями объекта $\Delta T = T_A - T_B$. При этом знак перепада ΔT зависит от соотношения теплофизических свойств дефекта и изделия исследуемой поверхности. При нагреве изделий, содержащих плохо проводящие теплодефекты (газовые включения, неоднородности структуры, микротрещины) перепад положительный для поверхности, подвергнутой нагреву ($\Delta T > 0$) и отрицательный для противоположной стороны. Величина перепада температур на входе и выходе конденсатора хладоэлемента зависит от дефектности структуры, избытка или недостатка хладона в системе, качества вакуума в системе, степени ее засорения и в общем случае для его определения используем уравнение теплопроводности и конвекции

$$a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \left(W_x \frac{\partial T}{\partial x} + W_y \frac{\partial T}{\partial y} + W_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{q}{\lambda / c\rho} = 0. \quad (4)$$

Здесь W_x , W_y , W_z – составляющие скорости движения компонент системы по координатам; q – плотность теплового потока, Вт/м²; $\alpha = \lambda / c\rho$ – коэффициент температуропроводности, c , ρ – теплоемкость и плотность образца.

В квазистационарном режиме тепловые перепады ΔT на выходе и входе конденсатора можно определить из зависимости $\Delta T = R_\Sigma P$,

$$\text{где } R_\Sigma = \frac{1}{\alpha_1 S_n} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i S_i} \quad (5)$$

тепловое сопротивление участка конденсатора на его входе (выходе); λ_i , δ_i , S_i – коэффициент теплопроводности, толщина и площадь дефектной области конденсатора; $1 / \alpha_1 S_n$ – тепловое

сопротивление между областью конденсата площадью S_n и воздушной средой; α_1 – коэффициент теплообмена.

Температура $T_{m,m+1}$ на стыке m и $(m+1)$ дефектных слоев конденсатора рассчитывается по формуле [3]:

$$T_{m,m+1} = T_1 - \frac{1}{R} \left(\frac{1}{\alpha_1 S_n} + \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\lambda_i S_i} (T_1 - T_2) \right) \quad (6)$$

где $R = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i S_i}$ – тепловое сопротивление области конденсатора без учета конвективного теплообмена между конденсатором хладагента и окружающей средой.

Важнейшим параметром неразрушающего контроля дефектов структуры хладоэлементов, обеспечивающим точную разбраковку холодильных аппаратов на стадии выходного контроля при многократном снижении длительности процесса выявления дефектов, является время установления заданного перепада температур между поврежденными участками структуры конденсатора хладоэлемента на его поверхности. Этот температурный перепад ΔT_r наступает за время t_r , когда процесс нагрева конденсатора выходит на регулярный режим. Показано [4], что на стадии регулярного режима нагрева дальнейшее повышение температуры конденсатора идет с постоянным перепадом температур ΔT_r между участками его структуры с различным тепловым сопротивлением. Перепад температур ΔT_r является основным информационным параметром по выявлению дефектных участков хладоэлемента.

Время выхода процесса нагрева конденсатора на регулярную стадию t_r в нагрузочном режиме зависит от мощности источника нагрева P , теплового коэффициента тела F и в общем случае определяется из зависимости

$$\frac{1}{mF_j} \frac{d(\Delta T_j)}{dt} + \frac{1}{F_j} \Delta T_j = p. \quad (7)$$

Здесь m – темп охлаждения (нагрева) тела. При вычислении темпа нагревания конденсатор хладоэлемента представлен системой из двух тел – ядро произвольной формы и окружающей его оболочки, для которой

$$m = S_1 / C(1/\alpha + \delta/\lambda),$$

где S_1 , δ , λ – площадь внешней поверхности, толщина и коэффициент теплопроводности оболочки; C – полная теплоемкость ядра; α – коэффициент теплоотдачи.

С учетом (7) время выхода процесса нагрева тела

$$t_r = \frac{1}{m} \ell n \frac{T_2}{T_0}, \quad (8)$$

где T_0 – начальная температура конденсатора.

Поскольку выход на регулярную стадию режима нагрева тела наступает при изменении (повышении) его начальной температуры в e раз, следует, что время выхода процесса нагрева конденсатора на регулярный режим $\Delta t \equiv \Delta t_{\max}$, т.е. перепад температур, представляет достоверный информационный сигнал о наличии структурных дефектов в хладоэлементе, $t_r = 1/m$.

С целью обеспечения заданной точности контроля дефектов хладоэлементов введен коэффициент временного запаса K_t , который составил $K_t = 1,3$. Поэтому оптимальный интервал времени от момента включения в работу холодильного аппарата до начала измерения температурного поля конденсатора составляет $t_{\text{opt}} = K_t t_r = 1,3 t_r$.

В результате обработки экспериментальных данных и проведенных испытаний установлены значения t_{opt} для всех базовых типов холодильных аппаратов, изготавливаемых на ЗАО «Атлант». Значения для указанных аппаратов представлены в таблице.

Оптимальное время нагрева холодильных аппаратов

Тип холодильного аппарата	KSH-212	KSH-216	KSHP-215	KSHD-126	KSHD-128	KSHD-130
$t_{грот}$, мин.	9,5	10,0	10,0	13	15	15

Другим ключевым параметром, оценивающим работоспособность холодильных аппаратов, является величина тепловых перепадов ΔT и локальность их концентрации. Результаты расчета по формулам (5), (6) и экспериментальных исследований по выявлению дефектов в хладоэлементах с помощью сравнительных измерений высокочастотным электромагнитным дефектоскопом типа ВД-22Н и предложенным методом показали, что минимальная граница тепловых перепадов для указанных в таблице типов холодильных аппаратов составляет $0,9...1,3^{\circ}\text{C}$.

Локальные перепады температуры по поверхности конденсатора характеризуют качество его структуры. Кроме выявления указанных дефектов контроль в холодильной аппаратуре таких важных параметров, как недостаток или избыток хладона в системе, степень засоренности системы хладоэлемента, уровень вакуума в системе. Указанные параметры определяются по разности температуры на входе и выходе конденсатора, величина которой определяется с помощью специального устройства контроля оптической информации.

Заключение

Изложены вопросы эффективной оценки дефектов в холодильных аппаратах и определены базовые метрологические параметры методики контроля.

1. Важнейшим фактором точного контроля дефектов в холодильных аппаратах является время установления перепада температур между поврежденными участками структуры конденсатора хладоэлемента на его поверхности.

2. Ключевым параметром разработанной методики неразрушающего контроля качества холодильных агрегатов является величина тепловых перепадов на поверхности конденсатора и локальность их концентрации.

DEFECTS DETECTION IN COOLING DEVICES

V.A. SYCHIC, V.S. SHUMILO

Abstract

Aspects of the defects detection in cooling devices by the means of evaluation of the local thermal resistance between the areas with defected structure and the temperature gradients are analyzed. It is shown that most important parameters for precise defects detection in cooling devices are the time for temperature gradients setting between the defected areas of condensator structure and the value of temperature variations along the surface of the condensator.

Литература

1. Чесноков В.С., Шумило В.С. // Испытание морозильников и холодильников по проекту ускоренной методики. Заключительный отчет №78–95. Минск, 1995.
2. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л., 1974.
3. Сычик В.А., Шумило В.С., Черняк Г.И. // Материалы международной 51-й НТК БГПА. Минск. 1995. С. 33.
4. Сычик В.А., Уласюк Н.Н., Шумило В.С. и др. // Материалы международной 53-й НТК БГПА. Минск. 1999. С. 26.