

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ХОЛОДИЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Шумило В.С., Сычик В.А., Уласюк Н.Н.

Международное научное ОО «МАИТ»

Минск. Республика Беларусь

Анализ дефектов холодильной аппаратуры осуществляется на стадии выходного контроля путем точного измерения интенсивности оптических излучений ИК-диапазона от поверхности хладоэлементов, величина которой  $J_0$  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.

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

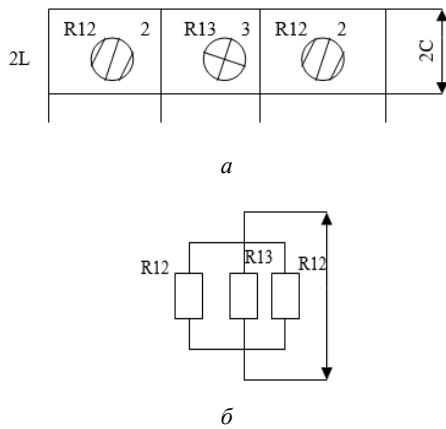


Рисунок 1 – Анизотропная структура базовой ячейки поверхности хладоэлемента (а); схема соединения тепловых сопротивлений базовой ячейки (б)

Эффективная теплопроводность такой дефектной структуры хладоэлемента в форме базовой ячейки находится из выражения [1]

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

Здесь  $m_2 = \nu_2/\nu$  – объемная концентрация включений;  $\nu_2/\nu$  – объемы включений и всей ячейки;  $\nu = \lambda_1/\lambda_2$ ;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – теплопроводность основного материала и включений.

Тепловое сопротивление соответствующего элемента базовой ячейки может быть найдено как

$$R_i = \frac{l_i}{S_i \lambda_i} \quad (2)$$

причем  $l_i$ ,  $S_i$ ,  $\lambda_i$  – соответственно длина, площадь элемента и его теплопроводность.

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

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

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

Выражение (2) позволяет определить тепловое сопротивление дефектного участка хладоэлемента, по величине которого оценивается разность температур  $\Delta T$  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  $\Delta T$  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 хладагента в системе, качества вакуума в системе, степени ее засорения и в общем случае для его определения используем уравнение теплопроводности и конвекции

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

Здесь  $W_x$ ,  $W_y$ ,  $W_z$  – составляющие скорости движения компонент системы по координатам;  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $a = \lambda/c\rho$  – коэффициент температуропроводности;  $c$ ,  $\rho$  – теплоемкость и плотность образца.

В квазистационарном режиме тепловые перепады  $\Delta T$  на выходе и входе конденсатора можно определить из зависимости  $\Delta T = R_{\Sigma} \cdot P$ .

$$\text{где } R_2 = 1/\alpha_1 S_n + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i S_i} -$$

тепловое сопротивление участка конденсатора на его входе (выходе);  $\lambda_i, \delta_i, S_i$  – коэффициент теплопроводности, толщина и площадь дефектной области конденсатора;  $1/\alpha_1 S_n$  – тепловое сопротивление между областью конденсата площадью  $S_n$  и воздушной средой;  $\alpha_1$  – коэффициент теплообмена.

Температура  $T_{m,m+1}$  на стыке  $m$  и  $(m+1)$  дефектных слоев конденсатора рассчитывается по формуле [2]

$$T_{m,m+1} = T_1 - \frac{1}{R} \left( \frac{1}{\alpha_1 S_n} + \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\lambda_i S_i} (T_1 - T_2) \right), \quad (4)$$

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  $\Delta T_r$  наступает за время  $t_r$ , когда процесс нагрева конденсатора выходит на регулярный режим. Показано [3], что на стадии регулярного режима нагрева дальнейшее повышение температуры конденсатора идет с постоянным перепадом температур  $\Delta T_r$  между участками его структуры с различным тепловым сопротивлением. Перепад температур  $\Delta T_r$  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

$$\frac{1}{mF_j} \frac{d(\Delta T_i)}{dt} + \frac{1}{F_j} \Delta T_j = p. \quad (5)$$

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  $S_1, \delta, \lambda$  – площадь внешней поверхности,

толщина и коэффициент теплопроводности оболочки;  $C$  – полная теплоемкость ядра;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

С учетом (7) время выхода процесса нагрева тела

$$t_r = \frac{1}{m} \ln T_2/T_0,$$

где  $T_0$  – начальная температура конденсатора.

Поскольку выход на регулярную стадию режима нагрева тела наступает при изменении (повышении) его начальной температуры в  $\epsilon$  раз, из (9) следует, что время выхода процесса нагрева конденсатора на регулярный режим  $\Delta t \equiv \Delta t_{max}$ , то есть 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  $t_{ropt} = K_t t_r = 1,3 t_r$ .

В результате обработки экспериментальных данных и проведенных испытаний установлены значения  $t_{ropt}$  для всех базовых типов холодильных аппаратов, изготавливаемых на ЗАО «Атлант». Значения для указанных аппаратов представлены в таблице 1.

Таблица 1

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

Другим ключевым параметром, оценивающим работоспособность холодильных аппаратов, является величина тепловых перепадов  $\Delta T$  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 1 типов холодильных аппаратов составляет 0,9–1,3 °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  $T_{вв}$ , величина которой определяется с помощью специального устройства контроля оптической информации.

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

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

#### Литература

1. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. - Л.: Энергия, 1994. – 264 с.
2. Сычик В.А., Шумило В.С., Черняк Г.И. Тепловой контроль дефектов хладоэлементов электронной техники/ Материалы международной 51-й НТК БГПА. – Минск, ч. 4, 1995. – С. 33.
3. Сычик В.А., Уласюк Н.Н., Шумило В.С. и др. Оценка качества структуры ЭИ/ Материалы международной 53-й НТК БГПА. - Минск, 1999, ч. 2. – С. 26.