

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО РАЗМЕРАМ ПОР МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРИСТЫХ ТОНКОВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

К. т. н. А. Н. Гершуни, к. т. н. А. П. Нищик

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»  
Украина, г. Киев  
politekhins@gmail.com

*Приведены результаты исследования распределения по размерам пор металлических тонковолокнистых капиллярных структур, которые могут эффективно использоваться при создании систем охлаждения электронной аппаратуры, в зависимости от исходных структурных параметров: пористости  $\Pi$ , диаметра волокон  $d_v$  и их длины  $l_v$ , которые изменялись в диапазонах  $\Pi = 0,33 — 0,94$ ;  $d_v = 20 — 130$  мкм;  $l_v = 3 — 12$  мм.*

*Ключевые слова: охлаждение РЭА, пористость, распределение пор по размерам, металловолоконистая капиллярная структура.*

Теплопередающие устройства испарительно-конденсационного типа с металловолоконистыми капиллярными структурами (МВКС) могут эффективно использоваться при создании систем охлаждения электронной аппаратуры. В [1—3] рассмотрены основные результаты исследований, соответственно, структурных, гидродинамических и капиллярно-транспортных характеристик МВКС. Целью данной работы является получение информации о распределении пор МВКС по размерам, которая также необходима для рационального проектирования систем охлаждения.

Распределение пор по размерам характеризует степень однородности пористых материалов (степень близости размеров пор). Одним из основных недостатков традиционных методов изучения равномерности пористых материалов является наличие ошибок, вносимых чувствительными элементами. В отличие от них, в данном исследовании применялся бесконтактный метод, основанный на развитии оптической диагностики потоков с использованием эффекта Доплера. Всего было исследовано 89 серий образцов, выполненных из медных волокон диаметром  $d_v$  от 20 до 130 мкм и длиной  $l_v$  от 3 до 12 мм. Пористость  $\Pi$  образцов варьировалась в пределах от 0,33 до 0,94. Толщина образцов изменялась от 1 до 28 мм. Количество измерений для каждого из образцов составляло 493.

Размеры пор рассчитывались на основе полученных экспериментальных значений определяющих величин из совместного решения уравнений Гагена — Пуазейля и Дарси при течении воздуха через пористые образцы. Анализ полученных результатов показал, что распределение пор МВКС по размерам относится к асимметричным распределениям. Согласно расчетам, асимметрия  $A$  и эксцесс  $E$  распределения принимают относительно небольшие значения. Поэтому в качестве рабочей была принята гипотеза, согласно которой распределение пор по размерам описывается зависимостями Грама — Шарлье, которые являются обобщением нормального распределения (Гаусса) и распределения Пуассона. Для обоснования принятой гипотезы были применены критерии оценивания Пирсона и Романовского, а для проверки правомерности гипотезы использовался критерий Романовского. Проверка принятой гипотезы при помощи указанных критериев подтвердила ее правомерность. Выражение для плотности вероятности распределения Грама — Шарлье имеет вид

$$f_{\text{ш}}(D) = f(D) - \frac{A}{3!} f^{(3)}(D) + \frac{E}{4!} f^{(4)}(D),$$

где  $f(D) = \frac{1}{s\sqrt{2p}} \exp\left[-\frac{(D-\bar{D})^2}{2s^2}\right]$ ;

$D, \bar{D}$  — соответственно, текущее и среднее значение размеров (диаметров) пор.

Для определения вероятности нахождения пор в некотором интервале их размеров  $P(D_1 < \bar{D} < D_2)$  проведено интегрирование данного выражения. В результате получена зависимость

$$P(D_1 < D < D_2) = \Phi\left(\frac{D_1 - \bar{D}}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{D_2 - \bar{D}}{\sigma}\right) + \frac{A}{3!} \left[ f''\left(\frac{D_1 - \bar{D}}{\sigma}\right) - f''\left(\frac{D_2 - \bar{D}}{\sigma}\right) \right] + \frac{E}{4!} \left[ f^{(3)}\left(\frac{D_2 - \bar{D}}{\sigma}\right) - f^{(3)}\left(\frac{D_1 - \bar{D}}{\sigma}\right) \right],$$

где функции  $\Phi\left(\frac{D_1 - \bar{D}}{\sigma}\right)$ ,  $\Phi\left(\frac{D_2 - \bar{D}}{\sigma}\right)$ ,  $f''\left(\frac{D_1 - \bar{D}}{\sigma}\right)$ ,  $f''\left(\frac{D_2 - \bar{D}}{\sigma}\right)$ ,  $f^{(3)}\left(\frac{D_2 - \bar{D}}{\sigma}\right)$ ,  $f^{(3)}\left(\frac{D_1 - \bar{D}}{\sigma}\right)$  определяются по таблицам [4], средние (эффективные) размеры пор — по зависимости (2), приведенной в [1], а среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ , асимметрия и эксцесс — по зависимостям

$$\sigma = 0,2d_b^{0,7}l_b^{0,3}\Pi \left[ \frac{0,28}{\sqrt{1-\Pi}} + \Pi(\Pi^2 - 0,16) \right]; A = \exp \left[ \left( \frac{l_{b \min}}{l_b} \right)^k \frac{1 - \Pi_{\text{пр}}}{(1 - \Pi)^m} \right]; E = \exp \left[ \left( \frac{l_{b \min}}{l_b} \right)^k \Pi_{\text{пр}} (1 - \Pi) \right],$$

где  $\Pi_{\text{пр}}$  — предельная пористость, зависимость (1) для определения которой приведена в [1];  $l_{b \min} = 3$  мм;  $k = 0,8$ ;  $m = 0,7$ .

Максимальный диаметр пор  $D_{\text{max}}$ , необходимый для определения диапазона изменения их размеров, рассчитывается по зависимости (3), приведенной в [1], а минимальный размер пор — по полученной зависимости

$$D_{\min} = 6,4 \cdot 10^{-2} d_b^{0,7} l_b^{0,3} \left( \frac{\Pi}{\sqrt{1-\Pi}} + 3\Pi^2 \right).$$

Таким образом, распределение пор металлических пористых тонковолокнистых материалов по размерам относится к асимметричному распределению Грама — Шарлье. Полученные зависимости для определения доли пор в определенном диапазоне изменения их размеров необходимы для рационального проектирования МВКС с заданными характеристиками.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гершуни А.Н., Нищик А.П. Структурные характеристики металлических пористых тонковолокнистых материалов для систем охлаждения электронной аппаратуры // Труды XVII междунар. научно-практ конф. «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, Одесса. — 2016. — С. 170—171.
2. Гершуни А.Н., Нищик А.П. Гидродинамические характеристики металлических пористых тонковолокнистых материалов для систем охлаждения электронной аппаратуры // Труды XVIII междунар. научно-практ конф. «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, Одесса. — 2017. — С. 39—41.
3. Гершуни А.Н., Нищик А.П. Капиллярно-транспортные характеристики металлических пористых тонковолокнистых материалов для систем охлаждения электронной аппаратуры // Труды XIX междунар. научно-практ конф. «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, Одесса. — 2018. — С. 101—103.
4. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. — М.: Наука, 1971.

A. N. Gerchuni, A. P. Nishchik

#### Pore size distribution of metal porous thin fibrous materials for cooling systems of electronic equipment

The paper presents the results of a study of pore size distribution of metal thin fibrous capillary structures, depending on the initial structural parameters: porosity  $\Pi$ , diameter  $d_e$  and length  $l_e$  of the fibers, which were varied in the following ranges:  $\Pi = 0,33 - 0,94$ ,  $d_e = 20 - 130 \mu\text{m}$ ,  $l_e = 3 - 12 \text{ mm}$ . Such structures can be effectively used to create cooling systems for electronic equipment.

Keywords: electronics cooling, pore size distribution, metal-fiber capillary structure.