

## КАПИЛЛЯРНО-ТРАНСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ 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 капиллярного давления, создаваемого металлическими тонковолокнистыми капиллярными структурами тепловых труб, в зависимости от исходных структурных параметров — пористости, предельной пористости, диаметра и длины волокон.*

*Ключевые слова: тепловая труба, система охлаждения, металловолоконная капиллярная структура, капиллярное давление.*

Тепловые трубы (ТТ) с металловолоконными капиллярными структурами (МВКС) могут эффективно применяться при создании систем обеспечения тепловых режимов устройств электронной техники [1]. МВКС обладает высокой капиллярно-транспортной способностью, особенно при работе против сил тяжести. При их использовании возможна оптимальная реализация противоречивых требований, предъявляемых к капиллярным структурам (КС) ТТ, а именно сочетать достаточно высокие жидкостную проницаемость и капиллярное давление. Показателем качества КС ТТ может быть произведение коэффициента жидкостной проницаемости на капиллярное давление. По этому показателю МВКС превосходят применяемые КС, например сетчатые и порошковые. Такие достоинства МВКС обусловлены спецификой их строения, которая обеспечивает высокую предельную пористость, отсутствие закрытых и тупиковых пор, низкую извилистость поровых каналов. Данные преимущества металлических тонковолокнистых капиллярных структур обуславливают достижение высокой тепло-транспортной способности ТТ с такими структурами.

Для проектирования и оптимизации параметров ТТ с МВКС необходима информация о характеристиках таких капиллярных структур. В продолжение работ [2, 3], где были рассмотрены структурные и гидродинамические характеристики МВКС, в настоящей работе было исследовано капиллярное давление, создаваемое такими капиллярными структурами.

Капиллярное давление выполняет функцию движущего напора, поскольку фильтрация в капиллярных структурах (КС) ТТ является капиллярной. Капиллярное давление  $p_{\text{кп}}$ , которое создается нерегулярными структурами, к которым относятся МВКС, может определяться по уравнению Лапласа для цилиндрических капилляров, в котором вместо диаметра капилляра используется эффективный диаметр пор  $D_{\text{эф}}$ :

$$p_{\text{кп}} = \frac{4\sigma \cos \theta}{D_{\text{эф}}}, \quad (1)$$

где  $\theta$  — краевой угол смачивания;  $\sigma$  — поверхностное натяжение.

Поскольку эффективный диаметр пор, определяемый по обобщающей зависимости [2]

$$D_{\text{эф}} = 0,25d_{\text{в}}^{0,6}l_{\text{в}}^{0,4} \frac{\Pi^{1,2}}{(1-\Pi)^{0,4}} \quad (2)$$

( $d_{\text{в}}$ ,  $l_{\text{в}}$  — диаметр и длина волокон;  $\Pi$  — пористость), является величиной условной, а капиллярное давление  $p_{\text{кп}}$  — реальная величина, которую можно измерить, корректность применения формулы (1) требует экспериментального подтверждения. Для этого кроме величины  $D_{\text{эф}}$  необходимо иметь экс-

периментальные значения  $p_{\text{кп}}$  при капиллярной фильтрации в МВКС и корректно учесть величину краевого угла смачивания  $\theta$ .

Капиллярное давление можно определить экспериментально по гидростатическому давлению равновесного столба жидкости:

$$p_{\text{кп}} = \rho_{\text{ж}} gH, \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости;

$H$  — высота капиллярного равновесия.

Измерение высоты  $H$  было проведено на экспериментальной установке, основным элементом которой являлся стеклянный цилиндр, который герметично закрывался крышкой при помощи прокладки из вакуумной резины. Цилиндр с крышкой соединялся с емкостью с рабочей жидкостью и с вакуумным насосом. Внутри цилиндра размещался опытный образец, к поверхности которого по его высоте с определенным интервалом крепились зажимами полоски индикаторной бумаги.

Опытные образцы МВКС были изготовлены в форме пластин толщиной примерно 2 мм из медных волокон ( $l_{\text{в}} = 3$  мм,  $d_{\text{в}} = 20; 40; 70$  мкм), а также из волокон нержавеющей стали ( $l_{\text{в}} = 3$  мм,  $d_{\text{в}} = 30$  мкм и  $l_{\text{в}} = 2$  мм,  $d_{\text{в}} = 10$  мкм).

Все медные образцы имели длину 500 мм, ширину 45 мм и различную пористость:  $\Pi = 0,79; 0,9; 0,95$  для  $d_{\text{в}} = 20$  мкм;  $\Pi = 0,7; 0,79; 0,89$  для  $d_{\text{в}} = 40$  мкм;  $\Pi = 0,61; 0,7; 0,79$  для  $d_{\text{в}} = 70$  мкм (всего 9 образцов). В качестве рабочей жидкостей для этих образцов использовались вода и ацетон.

Образец из стали с  $l_{\text{в}} = 3$  мм и  $d_{\text{в}} = 30$  мкм имел длину 500 мм, ширину 45 мм и пористость  $\Pi = 0,58$ , в качестве рабочей жидкости для него использовался ацетон. Образцы из стали с  $l_{\text{в}} = 2$  мм и  $d_{\text{в}} = 10$  мкм имели длину 300 мм, ширину 20 мм и пористость  $\Pi = 0,85; 0,9; 0,93$  (всего три образца). В качестве рабочей жидкости для них использовался этанол.

Для обеспечения условий смачивания материалов МВКС (медь, нержавеющая сталь) рабочей жидкостью (вода, ацетон, этанол), приближенных к идеальным смачиванию, при котором  $\cos \theta = 1$ , все образцы, в соответствии с результатами и рекомендациями [4], подвергались термическому окислению.

Перед каждым опытом по определению высоты капиллярного равновесия рабочей жидкости в исследуемом образце МВКС производилось удаление воздуха из полости стеклянного цилиндра. Далее рабочая жидкость из емкости поступала в стеклянный цилиндр в количестве, необходимом для погружения нижнего края опытного образца. Уровень жидкости в цилиндре фиксировался и рассматривался как начальный при определении высоты капиллярного равновесия  $H$ . Измерение этой высоты базируется на изменении электросопротивления и цвета полосок индикаторной бумаги, которые намокают при достижении их фронтом жидкости, движущейся вверх по КС. Для полного достижения капиллярного равновесия каждый опыт длился несколько часов.

Было установлено, что экспериментальные значения капиллярного давления для исследованных образцов с водой в качестве рабочей жидкости достигают уровня 500 Па.

Далее было проведено сравнение экспериментальных значений капиллярного давления  $p_{\text{кп}}^{\text{эк}}$ , полученных для исследуемых образцов и рабочих жидкостей при помощи формулы (3), с соответствующими значениями капиллярного давления  $p_{\text{кп}}^{\text{р}}$ , рассчитанными по формуле (1). При этом эффективный диаметр пор  $D_{\text{эф}}$  определялся по соответствующим структурным параметрам МВКС по обобщающей зависимости (2). Сравнение выявило удовлетворительное согласование указанных величин капиллярного давления за исключением тех образцов, пористость которых была близка к предельному значению  $\Pi_{\text{пр}}$  [2]. Для образцов с такой пористостью расчетные значения  $p_{\text{кп}}^{\text{р}}$  значительно превышают экспериментальные  $p_{\text{кп}}^{\text{эк}}$ . При пористости, близкой к предельной, для МВКС характерна повышенная неравномерность, и поэтому в таких структурах больше чем в других, проявляется капиллярный гистерезис. Результатом такого гистерезиса и является значительное расхождение величин  $p_{\text{кп}}^{\text{р}}$  и  $p_{\text{кп}}^{\text{эк}}$ .

Таким образом, можно заключить, что использование формулы (1) для определения капиллярного давления для МВКС в целом правомерно, но требует знания величины эффективного диаметра

пор. Как упоминалось выше,  $D_{эф}$  является величиной условной и определяется, как правило, на основе модели идеальной пористой среды и экспериментального исследования газовой проницаемости. Поэтому достаточно важным является получение зависимости капиллярного давления не от  $D_{эф}$ , а непосредственно от исходных структурных параметров.

Из рассмотрения модели МВКС с выделением части объема структуры в виде куба с ребром  $kl_b$  ( $k < 1$ ), получено выражение для определения капиллярного давления, которое создается МВКС:

$$p_{кп} = 35 \frac{\sigma}{d_b} (1 - \Pi)(1 - \Pi_{пр})^{0,5} \cos \theta, \quad (4)$$

где  $0,55 \leq \Pi \leq 0,95$ .

Результаты расчетов по данной модели с точностью до 20% согласуются с полученными экспериментальными данными. Анализ формулы (4) как функции независимых величин  $\Pi$ ,  $d_b$ ,  $l_b$  показывает, что при двух фиксированных аргументах функция  $p_{кп}$  третьего аргумента является убывающей.

Характеристики МВКС, полученные в широком диапазоне изменения исходных структурных параметров, а также технологические возможности обеспечения их воспроизводимости явились необходимыми условиями получения надежных функциональных зависимостей между структурными параметрами капиллярной структуры и тепломассообменными характеристиками ТТ, что позволяет проводить их оптимизацию и расчеты. Прогнозирование и оптимальное управление характеристиками ТТ обеспечиваются достаточной точностью этих зависимостей в широком диапазоне изменения определяющих параметров, поэтому ТТ с МВКС достаточно полно реализуют возможности ТТ и позволяют значительно расширить круг задач по обеспечению тепловых режимов электронной аппаратуры.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Семена М. Г., Гершуни А. Н., Зарипов В. К. Тепловые трубы с металловолоконистыми капиллярными структурами. — Киев: Вища шк. Головное изд-во, 1984.
2. Гершуни А. Н., Нищик А. П. Структурные характеристики металлических пористых тонковолокнистых материалов для систем охлаждения электронной аппаратуры // Труды XVII международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, Одесса. — 2016. — С. 170—171.
3. Гершуни А. Н., Нищик А. П. Гидродинамические характеристики металлических пористых тонковолокнистых материалов для систем охлаждения электронной аппаратуры // Труды XVIII международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, Одесса. — 2017. — С. 39—41.
4. Семена М. Г., Косторнов А. Г., Гершуни А. Н., Зарипов В. К. Исследование краевых углов смачивания фитилей низкотемпературных тепловых труб // Инженерно-физический журнал. — 1975. — Т. 28. — № 2. — С. 217 — 222.

A. N. Gerchuni, A. P. Nishchik

#### Capillary-transport characteristics of metal porous fine-fiber materials for cooling systems of electronic equipment

*The paper presents the results of the study of capillary pressure produced by metallic fine-fiber capillary structures of heat pipes, depending on the initial structural parameters: porosity, ultimate porosity, diameter, and fiber length.*

*Keywords: heat pipe, cooling system, metal-fiber capillary structure, capillary pressure.*