

Глава 14

КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫЕ ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕПЛООБМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ. РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО

В.В. МАЗЮК, А.Л. РАК, В.В. ДОКТОРОВ

Назначение и определяющий признак капиллярно-пористых материалов – транспорт жидкости под действием капиллярных сил. В качестве капиллярно-пористых материалов в настоящее время используются канавки, сетчатые, волоконные, высокопористые ячеистые и порошковые материалы. Применение капиллярно-пористых порошковых материалов (КППМ) особенно перспективно благодаря развитой поверхности порового пространства, хорошему сочетанию теплофизических и гидравлических свойств, возможности их регулирования в широких пределах, относительной простоте изготовления, высокой технологичности и низкой стоимости, недефицитности исходных материалов, возможности автоматизации производства. В отделении пористых материалов Института порошковой металлургии проводятся комплексные исследования, направленные на выявление взаимосвязи основных свойств КППМ, разработку теоретических и практических основ построения наиболее рациональных технологических процессов изготовления КППМ с требуемым уровнем свойств и их промышленное освоение.

Весьма перспективны разработанные в Институте КППМ с неоднородной по объему поровой структурой, обладающие повышенной транспортной способностью. Традиционным способом увеличения потока жидкости через КППМ является увеличение его толщины. Однако при этом, помимо роста массогабаритных характеристик изделия, возрастают и перепады температуры в нем. Поэтому предпочтительным способом повышения транспортной способности КППМ является усложнение поровой структуры, обеспечивающее сочетание высоких свойств капиллярности и проницаемости. Очевидно, что указанное сочетание возможно при наличии в КППМ пор с широким диапазоном размеров. Мелкие поры в таком материале создают высокое капиллярное давление, а крупные обеспечивают достаточную проницаемость. Материалы с переменными вдоль направления течения жидкости размерами пор находят применение в качестве капиллярных структур тепловых труб, в том числе для работы в условиях противодействия массовых сил, гидравлических предохранительных затворов, устройств для переливания жидкостей и др. В институте разработаны методики расчета оптимальной поровой структуры неоднородных КППМ различного назначения, а также технология их практического изготовления. В качестве примера рассмотрим возможности оптимизации порошковых капиллярных структур (КС) тепловых труб (ТТ). Рассмотрим цилиндрическую ТТ длиной l , наклоненную под углом $\varphi > 0$ к горизонту (зона испарения выше зоны конденсации). На внутренней стенке корпуса ТТ имеется КС площадью поперечного сечения S , насыщенная жидким теплоносителем, имеющим при рабочей температуре плотность ρ , поверхностное натяжение σ , динамическую вязкость μ , удельную теплоту парообразования γ и угол смачивания материала КС θ . Как известно, условием для определения предела теплопереноса ТТ является баланс сил вдоль контура, проходящего по парожидкостному тракту через сечения с максимально (сухая точка) и минимально (мокрая точка) возможной кривизной мениска в КС. В однородной КС при наличии достаточного количества теплоносителя в мокрой точке поверхность раздела почти плоская, т. е. капиллярное давление $p_{\min} = 0$, а в сухой точке кривизна определяется средним гидравлическим размером пор d , следовательно, $p_{\max} = 4 \sigma \cos \theta / d$. Между сухой и мокрой точками капиллярное давление уменьшается от $p_{\max}$ до $p_{\min}$. Таким образом, в промежуточных сечениях однородных КС капиллярное давление, создающееся в порах, не соответствует размеру последних; коэффициент же проницаемости k одинаков во всех сечениях. Следовательно, возможно не приводящее к нарушению работы ТТ увеличение размеров пор на отдельных участках КС. Коэффициент проницаемости этих участков повышается, одновременно капиллярное давление, создающееся в порах, приближается к соответствующему их размерам максимальному. Одним из способов увеличения размеров пор на отдельных участках КС является переход к многослойным вдоль оси КС. Основным признаком оптимальной конструкции таких КС является существование сухих точек (максимально возможная для слоя кривизна мениска) на границах слоев, обращенных к зоне испарения, при достижении предела теплопереноса. Предпосылкой аналитического рассмотрения является представление зависимостей капиллярного давления и проницаемости КС от среднего гидравлического размера пор в виде

$$p = 4\sigma \cos \theta / d; k = \xi d^v, \quad (1)$$

где ξ, v — параметры аппроксимации.

Выражения для оптимальных структурных параметров КС, состоящей из N слоев, могут быть получены путем дифференцирования выражения для передаваемого через слой i теплового потока (l_i — истинная, $\bar{l}_i$ — эффективная длины слоя i)

$$Q_i = \frac{ad_i^{v-1} - ad_i^v / d_{i-1} - bd_i^v l_i}{\bar{l}_i}, \quad i = 1, \dots, N, d_0 = \infty, \quad (2)$$

по соответствующему размеру пор d_i и приравнивания тепловых потоков, передаваемых через слои $i-1$ и i .

Здесь $a=4prSk\sigma\cos\Theta/\mu$, $b=\rho^2rkS\sin\varphi/\mu$, g — ускорение свободного падения.

В результате первой операции получаем:

$$d_i = \frac{(v-1)a}{\frac{va}{d_{i-1}} + vbl_i}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

а второй

$$\left(\frac{d_i}{d_{i-1}} \right)^{v-1} = \frac{l_i}{l_{i-1}}, \quad i = 2, \dots, N. \quad (4)$$

Выражения (3), (4) при условии

$$\sum_{i=1}^N l_i = l \quad (5)$$

позволяют рассчитать оптимальные структурные параметры d_i , l_i и предел теплопереноса многослойной КС. Связь между истинными и эффективными длинами слоев определяется с использованием уравнения

$$\bar{x} = \frac{1}{Q_0} \int_0^x Q(y) dy. \quad (6)$$

Вычисляемые по полученным выражениям размеры пор в зависимости от условий теплопередачи могут непрерывно изменяться в некотором интервале, что соответствует и непрерывному изменению размеров частиц исходного порошка для изготовления отдельных слоев.

Плавное варьирование размеров частиц получаемых фракций порошка возможно при использовании методов сепарации частиц из-за различия гидравлического сопротивления при их движении в жидкости, воздухе и др. Однако такие методы разделения порошка по фракциям пригодны при изготовлении небольших партий порошковых изделий ввиду их сложности и невысокой производительности. Промышленное разделение порошка, пригодное для серийного производства изделий, производится ситовым способом, для которого характерно то, что выделенные фракции содержат частицы определенных размеров, что соответствует фиксированному размеру пор получаемых материалов. Задача определения оптимальных значений длин N слоев и предела теплопереноса КС при фиксированных размерах пор представляет собой систему из $N+1$ уравнения, N первых из которых имеют вид (2), а $N+1$ -е — вид (5).

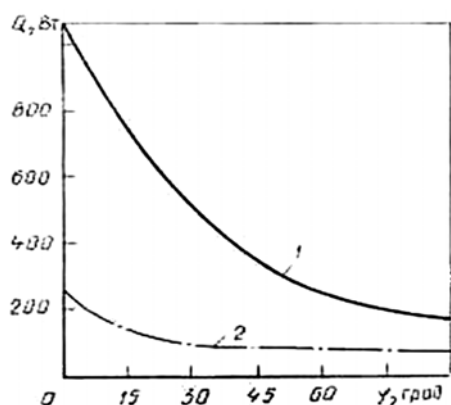


Рис. 1. Зависимость предела теплопереноса от угла наклона ТТ:
1 – расчетная для многослойной КС;
2 – экспериментальная для однородной КС

На рисунке 1 приведены результаты расчета предела теплопереноса ТТ с многослойной КС из порошка меди марки ПМС—Н в сравнении с экспериментальными данными для серийно выпускаемой ТТ с однородной вдоль оси КС из неразделенного на фракции порошка той же марки. Предполагалось, что КС рассчитываемой ТТ состоит из шести слоев с разными размерами частиц исходного порошка: 200—315, 160-200, 100—160, 63—100, 50—63 мкм. В обоих случаях геометрические размеры ТТ составляли: общая длина 0,36 м; длины зон: испарения 0,09 м, конденсации 0,26 м; диаметр 0,016 м; толщина стенки 0,001 м, толщина КС 0,002 м. Для разных углов наклона ТТ к горизонту (зона испарения выше) рассчитывались оптимальные длины слоев и соответствующий предел теплопереноса. Расчет показывает, что применение многослойной порошковой КС с оптимизированными структурными параметрами дает возможность в 2,5 – 4 раза повысить предел теплопереноса по сравнению с серийной

ТТ с однородной КС. Результаты расчета подтверждаются экспериментально. Так, ТТ с шести-слойной КС, изготовленной для работы в наиболее неблагоприятном вертикальном положении (зона испарения сверху), в полном соответствии с расчетом имела предел теплопереноса 175 Вт.

Использованный выше средний гидравлический размер пор характеризует транспортную и испарительную способность КППМ при полном насыщении его рабочей жидкостью. В случае частичного осушения порового пространства (например, при интенсивном испарении жидкости внутри КППМ, действии массовых сил и др.) существенным становится распределение пор по размерам. Возникает вопрос о взаимосвязи функции порораспределения и среднего гидравлического размера пор КППМ. Специальные эксперименты и последующие расчеты показали, что для КППМ, изготовленных по одной и той же технологии из разных фракций одного порошка, такая взаимосвязь существует. Если интегральная функция порораспределения КППМ со средним гидравлическим размером пор d_1 есть $F_1(d)$, то интегральная функция порораспределения КППМ со средним гидравлическим размером пор d_2 может быть вычислена из функции $F_1(d)$ посредством преобразования координат $d \rightarrow d' = d d_1 / d_2$:

$$F_2(d) = F_1\left(d \frac{d_1}{d_2}\right); \quad (7)$$

соответственно для дифференциальной функции порораспределения:

$$f_2(d) = -\frac{dF_2(d)}{dd} = -\frac{dF_1(d')}{dd'} \frac{dd'}{dd} = f_1\left(d \frac{d_1}{d_2}\right) \frac{d_1}{d_2}. \quad (8)$$

Сформулированное положение иллюстрируется рисунком 2, на котором экспериментальные данные для пористой бронзы марки БрОФ10-1 изображены в обычных координатах (f, d) (а) и в координатах, нормированных по среднему гидравлическому размеру пор, $(f_n, \frac{d}{d_i})$ (б). Как видно, в нормированных координатах экспериментальные точки ложатся практически на одну кривую.

Существующая между функцией порораспределения и средним гидравлическим размером пор d_0 взаимосвязь, таким образом, избавляет от необходимости проведения множества трудо-

емких экспериментов по определению функции порораспределения КППМ, позволяя вычислять последнюю для КППМ с любым средним гидравлическим размером пор по одной известной функции порораспределения эталонного КППМ с фиксированным средним гидравлическим размером пор.

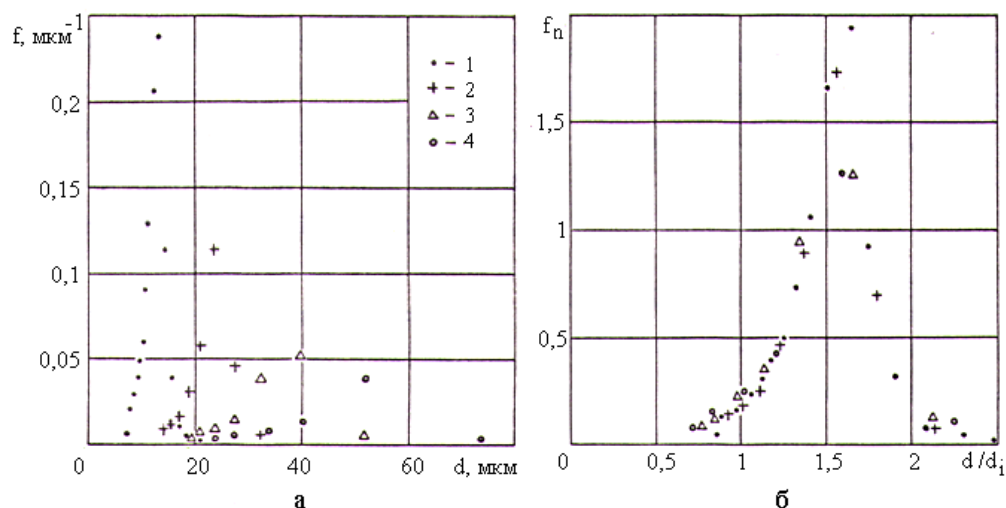


Рис. 2. Экспериментальные данные по исследованию порораспределения пористой бронзы в обычных координатах (а) и в координатах, нормированных по среднему гидравлическому размеру пор (б):

1 – размер частиц <63 мкм, $d_1 = 8,1$ мкм; 2 – $-100...+63$ мкм, $d_2 = 15,2$ мкм;
3 – $-160...+100$ мкм, $d_3 = 24,2$ мкм; 4 – $-200...+160$ мкм, $d_4 = 33$ мкм

Комплексная оценка того или иного теплообменного устройства включает многие параметры, в том числе вес, размер, удобство компоновки, стоимость. С этой точки зрения бесспорным преимуществом обладают миниатюрные (диаметром порядка 4 мм) ТТ традиционной конструкции. Однако малая площадь поперечного сечения ТТ не позволяет достичь высокой транспортной способности, особенно при расстоянии теплопередачи более 200 мм. Актуальным является создание мини-ТТ, способных передавать тепловой поток порядка 30 Вт на расстояние до 400 мм. В настоящее время ведущими фирмами-производителями такие характеристики мини-ТТ не достигнуты.

Для решения этой проблемы в Институте порошковой металлургии разработаны конструкция и технология изготовления мини-ТТ с артериальной порошковой капиллярной структурой. Конструкция артериальной мини-ТТ приведена на рисунке 3. Наружный диаметр ТТ может составлять несколько миллиметров. Основным отличием представленной конструкции мини-ТТ является наличие в капиллярной структуре тонкой (диаметром менее 1 мм) артерии, по которой конденсат под действием давления пара возвращается к зоне испарения. Для предотвращения образования в артерии паровых пузырей артерия не проходит через зону испарения, а заканчивается за несколько миллиметров перед ней. Для оценки эффективности разработанной конструкции артериальной мини-ТТ выполнены экспериментальные исследования теплотранспортных характеристик мини-ТТ, конструктивные параметры которых приведены в таблице. Результаты исследований приведены на рисунке 4 в виде зависимости теплопередающей способности ТТ от угла ее наклона к горизонту в земных условиях. Для сравнения приведены также аналогичные расчетные зависимости для ТТ традиционной конструкции с теми же наружными геометрическими параметрами. Как видно, по теплопередающей способности артериальные мини-ТТ значительно превосходят мини-ТТ традиционной конструкции.

Таблица. Конструктивные параметры ТТ

Параметры	ТТ-1	ТТ-2
Наружный диаметр корпуса, мм	3	4
Внутренний диаметр корпуса, мм	2	3
Общая длина, мм	200	300
Длина испарителя, мм	20	20
Длина конденсатора, мм	50	50
Диаметр парового канала, мм	1,2	1,8
Диаметр артерии, мм	0,6	1
Средний размер пор, мкм	20	20

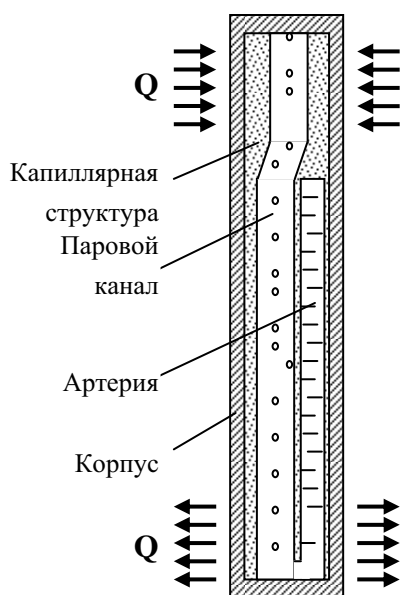


Рис. 3. Схема артериальной ТТ

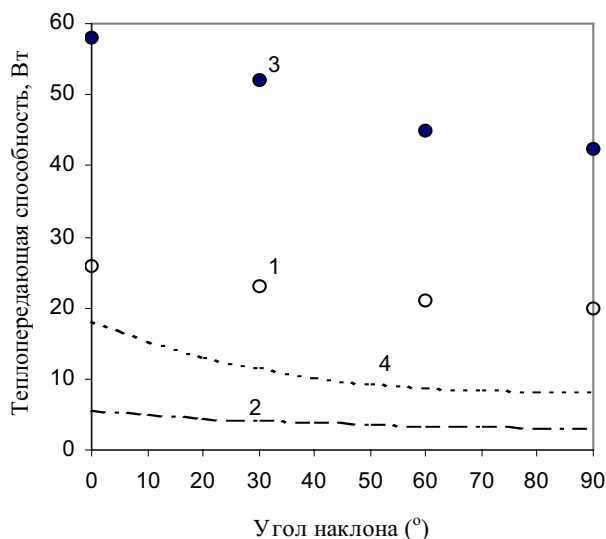


Рис. 4. Максимальная теплопередающая способность мини-ТТ в зависимости от угла наклона в поле силы тяжести:
 1 – эксперимент для ТТ1; 2 – расчет для традиционной ТТ Ø 3 мм;
 3 – эксперимент для ТТ2; 4 – расчет для традиционной ТТ Ø 4 мм

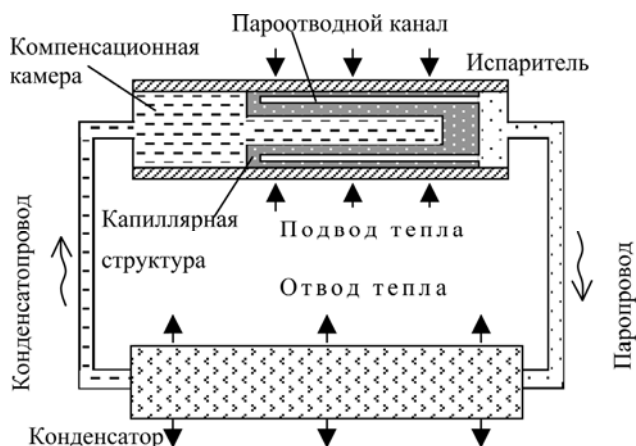


Рис. 5. Схема контурной ТТ

Необходимость совершенствования теплообменных устройств требует повышения теплопередающей способности ТТ. Эффективный теплоперенос обеспечивают контурные ТТ (КТТ) на основе разработанных в ИПМ испарителей с КС, изготовленной непосредственно в корпусе испарителя методом беззасадочного спекания двухкомпонентного КППМ. Схема КТТ, освоенной в производстве в ИПМ, приведена на рисунке 5.

Применяемые в настоящее время системы охлаждения на основе мини-КТТ используют испарители с инвертированным мениском (диаметром порядка 6 мм) той же принципиальной конструкции, что и КТТ больших размеров. По этой причине термическое сопротивление таких систем охлаж-

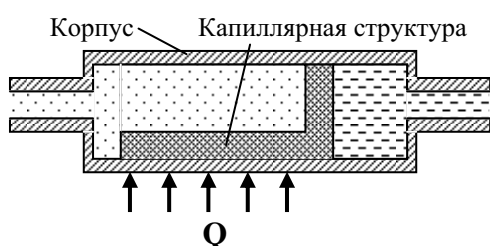


Рис. 6. Испаритель контурной мини-ТТ

денция довольно высоко. Между тем во многих случаях небольшие размеры компонентов аппаратуры позволяют организовать в испарителе КТТ продольное движение жидкости и испарение по схеме традиционной ТТ (с неинвертированным мениском). Простейшая конструкция испарителя мини-КТТ, отражающая принцип неинвертированного мениска, приведена на рисунке 6. Капиллярная структура состоит из двух частей. Утолщенная часть полностью перекрывает внутреннее пространство корпуса, разделяя компенсационную камеру и пароотводный канал и служа, таким образом, гидравлическим и тепловым затвором. Тонкая часть КС расположена на стенке корпуса и служит для распределения жидкости по всей поверхности подвода тепла. В данной конструкции испарителя КТТ возможно использование высокотеплопроводных металлов для корпуса испарителя и капиллярной структуры. Тем самым существенно снижается термическое сопротивление испарителя и системы охлаждения в целом.

На рисунке 7 приведена классификация основных видов ТТ с КС, изготовленной из капиллярно-пористых порошковых материалов и теплообменных устройств на их основе, а на рисунке 8 – фотографии теплообменных устройств на основе КППМ, освоенных в ИПМ.

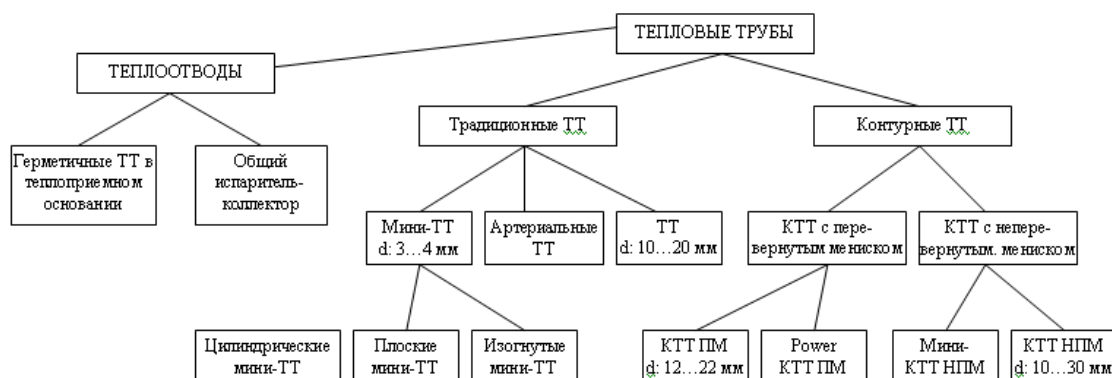


Рис. 7. Классификация основных видов ТТ и теплообменных устройств на их основе

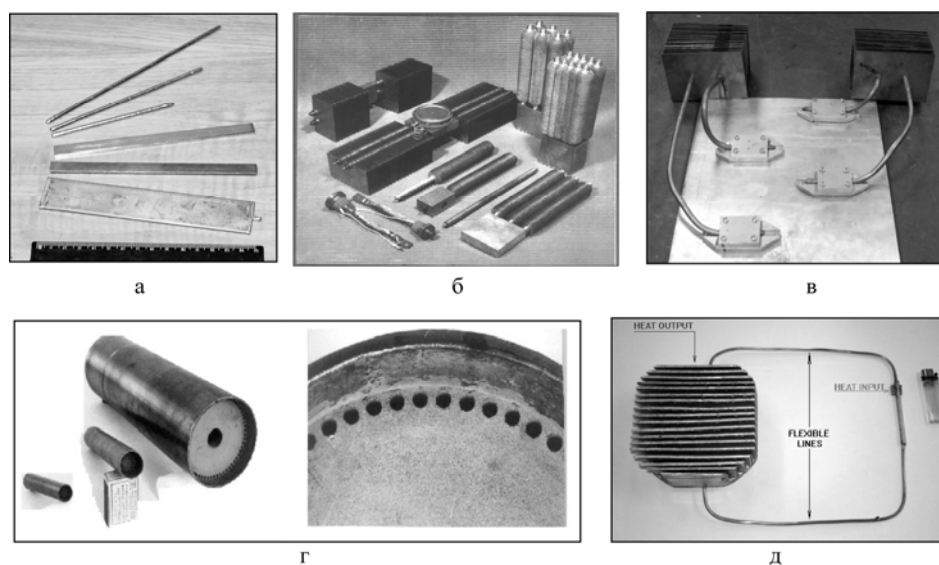


Рис. 8. Теплообменные устройства на основе КППМ: а – миниатюрные ТТ; б – теплоотводы для охлаждения силовых полупроводниковых приборов; в – теплоотводы для охлаждения компонентов высокопроизводительных ЭВМ на основе изогнутых мини-ТТ; г – испарители КТТ с перевернутым мениском; д – КТТ с неперевёрнутым мениском на основе медного испарителя с КС из медного порошка