

Литература:

1. Порошковая металлургия. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. М., «Металлургия», 1980. 496 с.
2. Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под общ. Ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 8-е изд., стереотип. – Изд-во МГТУ им. Баумана, 2008. – 648 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НЕОДНОРОДНЫХ Порошковых Капиллярных Структур Тепловых Труб

ДОКТОРОВ В. В., МАЗЮК В. В., РАК А.Л.

Институт порошковой металлургии, г. Минск, Беларусь

Введение. Ключевым элементом порошковых тепловых труб является порошковая капиллярная структура (ПКС). Во многих известных прежде применениях использовались однородные ПКС, которые изготавливались из порошков одной фракции. Между тем в ряде случаев (в миниатюрных и антигравитационных тепловых трубах) применение однородных ПКС не позволяет достичь требуемых характеристик. При этом использование неоднородных ПКС является, с одной стороны, перспективным способом улучшения теплопередающих характеристик ПКС, а с другой стороны, является еще мало изученной областью порошкового материаловедения. В основу создания неоднородных ПКС заложен принцип увеличения среднего размера пор от зоны испарения к зоне конденсации [1]. В данной работе проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния параметров неоднородных ПКС на теплопередающую способность тепловых труб.

Свойства порошковых капиллярных структур. Прежде всего, были исследованы свойства ПКС, которые применялись при изготовлении исследуемых тепловых труб.

Пористость образцов ПКС определялась методом гидростатического взвешивания (ГОСТ 18898–89) [2].

Капиллярное давление, создаваемое ПКС, определялось методом измерения давления, необходимого для выделения на поверхности полностью насыщенного жидкостью образца первого пузырька воздуха (ГОСТ 26849–86) [3]. Средний гидравлический диаметр пор ПКС находился методом измерения давления, соот-

ветствующего началу равномерного выделения пузырьков воздуха по всей поверхности образца исследуемой ПКС толщиной 3–5 мм [4]. Коэффициент проницаемости ПКС определялся методом измерения перепада давления и расхода жидкости при ее протекании через исследуемый образец (ГОСТ 25283–93 [4]).

В первой серии опытов проводилось исследование пористости ПКС, сформованных из медного порошка ПМС-Н методом свободной насыпки и утряски в трубках различного диаметра. Результаты исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость свойств ПКС от размера частиц исходного порошка

Размер частиц порошка, мкм	Коэффициент проницаемости, 10^{-11} м^2	Капиллярное давление, Па	Пористость	Средний диаметр пор, мкм
+63...-100	1.3 ± 0.1	5500 ± 400	0.62 ± 0.02	32 ± 2
+100...-160	1.9 ± 0.2	4900 ± 300	0.59 ± 0.02	40 ± 4
+160...-200	4.2 ± 0.3	3100 ± 200	0.61 ± 0.02	62 ± 6
+200...-315	10.0 ± 0.8	2100 ± 150	0.55 ± 0.02	100 ± 8

Расчет порошковых капиллярных структур тепловых труб. Далее проведем теоретическое сравнение теплопередающей способности тепловых труб с различным типом капиллярной структуры. Будем считать, что имеют место следующие общепринятые [5, 6] допущения: 1) тепловая труба является конвенционной с паровым каналом цилиндрической формы; 2) капиллярная структура полностью насыщена теплоносителем, а ее толщина неизменна вдоль оси тепловой трубы; 3) тепловая труба работает в испарительном режиме; 4) плотности радиального теплового потока по длине зон испарения и конденсации постоянны; 5) определяющей температурой является температура насыщения; 6) течение пара и жидкости может быть описано уравнениями Навье-Стокса для несжимаемой жидкости; 7) в паровой фазе отсутствуют источники и стоки тепла; 8) движение жидкости в капиллярной структуре ламинарное и подчиняется закону Дарси; 9) силы трения на границе пар-жидкость пренебрежимо малы по сравнению с силами трения внутри капиллярной структуры; 10) задача рассматривается как одномерная (вдоль оси тепловой трубы).

Для эффективной работы тепловой трубы необходимо, чтобы капиллярное давление, создаваемое порами капиллярной структуры в зоне испарения, превосходило потери давления, вызванные движением теплоносителя по тепловой трубе:

$$p_{\text{кап}} \geq \Delta p_{\text{к.с}} + \Delta p_{\text{пар}} + \Delta p_{\text{гидр}}, \quad (1)$$

где $p_{\text{кап}}$ – капиллярное давление, создаваемое порами капиллярной структуры в зоне испарения, Па; $\Delta p_{\text{к.с}}$ – давление, необходимое для фильтрации жидкости через капиллярную структуру, Па; $\Delta p_{\text{пар}}$ – давление, необходимое для движения пара от зоны испарения к зоне конденсации, Па; $\Delta p_{\text{гидр}}$ – гидростатическое давление, определяемое по формуле

$$\Delta p_{\text{гидр}} = \rho_{\text{ж}} g H, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; H – разность высот зоны испарения и зоны конденсации, м.

H считается положительной, если зона испарения выше зоны конденсации, и отрицательной в противоположном случае.

При ламинарном течении жидкости в капиллярной структуре конвенционной ТТ значение $\Delta p_{\text{к.с}}$ по закону Дарси можно определить как:

$$\Delta p_{\text{к.с}} = \frac{Q x_{\text{и-к}} \nu_{\text{ж}}}{L S_{\text{н.с}} k}, \quad (3)$$

где Q – подводимый к ТТ тепловой поток, Вт; $x_{\text{и-к}}$ – расстояние между серединой зоны испарения и серединой зоны конденсации, м; $\nu_{\text{ж}}$ – кинематическая вязкость жидкости, м²/с; L – удельная теплота испарения теплоносителя, Дж/кг; $S_{\text{н.с}}$ – площадь поперечного сечения капиллярной структуры, м²; k – коэффициент проницаемости капиллярной структуры, м².

Величина $\Delta p_{пар}$ для цилиндрических каналов может быть определена по известной формуле Пуазейля [7]. Расчетная температура пара внутри тепловой трубы – 60 °С.

Результаты расчетов максимальной теплопередающей способности при различных углах наклона тепловых труб для различных ПКС приведены в таблицах 2-5. Из представленных теоретических данных следует, что максимальная теплопередающая способность возрастает с увеличением числа слоев ПКС.

Экспериментальное исследование тепловых труб с неоднородными порошковыми капиллярными структурами. Для проверки теоретических расчетов были проведены экспериментальные исследования свойств тепловых труб с неоднородной ПКС в различных условиях эксплуатации. Эксперименты проводились следующим образом. К зоне испарения крепился электронагреватель. Тепловой поток, выделяемый нагревателем, определялся как произведение напряжения на силу проходящего через него тока. Нагреватель и испаритель теплоизолировались от окружающей среды, чтобы мощность, передаваемая ПКС, точнее соответствовала мощности, которая выделяется на нагревателе.

Разность между мощностью, выделяющимся на нагревателе, и мощностью, подводимой к ПКС, определялась следующим образом. Допустим, в результате эксперимента установлено, что если на теплоизолированном и присоединенном к тепловой трубе нагревателе выделилась мощность $Q_{изм}$, температура нагревателя составила $T_{изм}$. Затем тепловая труба отсоединялась от нагревателя, и измерялась мощность $Q'_{изм}$, при котором температура нагревателя без тепловой трубы составила бы $T_{изм}$. Тогда мощность, подведенный к тепловой трубе, равна $Q_{изм} - Q'_{изм}$. Расчетная температура пара внутри тепловой трубы – 60 °С.

Для измерения температур на корпус тепловой трубы устанавливались хромель–алюмелевые термодпары. Максимальная теплопередающая способность определялась по резкому увеличению угла наклона зависимости подводимая мощность – перепад температур по тепловой трубе [8].

При десяти измерениях и доверительной вероятности 0.95 критерий Стьюдента t_{10-1} равен 2.26. Дисперсия любой измеряемой в данной работе величины X рассчитывалась по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{cp})^2}{n-1}}, \quad (4)$$

где X_{cp} – среднее значение измеряемой величины;
 n – количество произведенных измерений.

Тогда значение исследуемой величины составляет

$$X = X_{cp} \pm \frac{\sigma \cdot t_{n-1}}{\sqrt{n}}. \quad (5)$$

Для исследования влияния свойств неоднородных ПКС на характеристики тепловых труб были изготовлены тепловые трубы со следующими параметрами:

- тепловая труба № 1: длина 300 мм; длина зоны испарения 100 мм; длина зоны конденсации 100 мм; внутренний диаметр 3 мм, диаметр парового канала 1,5 мм; капиллярная структура однородная, выполнена из медного порошка ПМС-Н фракции (+100...-160) мкм;

- тепловая труба № 2: длина 300 мм; длина зоны испарения 100 мм; длина зоны конденсации 100 мм; внутренний диаметр 3 мм, диаметр парового канала 1,5 мм; капиллярная структура неоднородная, двухслойная, выполнена из медного порошка ПМС-Н; первый слой длиной 150 мм выполнен из порошка фракции (+63...-100) мкм; второй слой длиной 150 мм выполнен из порошка фракции (+100...-160) мкм;

- тепловая труба № 3: длина 300 мм; длина зоны испарения 100 мм; длина зоны конденсации 100 мм; внутренний диаметр 3 мм, диаметр парового канала 1,5 мм; капиллярная структура неоднородная, трехслойная, выполнена из медного порошка ПМС-Н; первый слой длиной 100 мм выполнен из порошка фракции (+63...-100) мкм; второй слой длиной 100 мм выполнен из порошка фракции (+100...-160) мкм; третий слой длиной 100 мм выполнен из порошка фракции (+160...-200) мкм;

- тепловая труба № 4: длина 450 мм; длина зоны испарения 150 мм; длина зоны конденсации 150 мм; внутренний диаметр 8 мм, диаметр парового канала 3 мм; капиллярная структура однородная, выполнена из медного порошка ПМС-Н фракции (+100...-160) мкм;

- тепловая труба № 5: длина 450 мм; длина зоны испарения 150 мм; длина зоны конденсации 150 мм; внутренний диаметр 8 мм, диаметр парового канала 3 мм; капиллярная структура неоднородная, двухслойная, выполнена из медного порошка ПМС-Н; первый слой длиной 225 мм выполнен из порошка фракции (+63...-100) мкм; второй слой длиной 225 мм выполнен из порошка фракции (+100...-160) мкм;

- тепловая труба № 6: длина 450 мм; длина зоны испарения 150 мм; длина зоны конденсации 150 мм; внутренний диаметр 8 мм, диаметр парового канала 3 мм; капиллярная структура неоднородная, трехслойная, выполнена из медного порошка ПМС-Н; первый слой длиной 150 мм выполнен из порошка фракции (+63...-100) мкм; второй слой длиной 150 мм выполнен из порошка фракции (+100...-160) мкм; третий слой длиной 150 мм выполнен из порошка фракции (+160...-200) мкм.

Результаты экспериментального исследования зависимости максимальной теплопередающей способности от параметров ПКС при различных углах наклона тепловых труб приведены в таблицах 2-5.

Таблица 2

Зависимость максимальной теплопередающей способности от параметров ПКС при углах наклона 0 градусов

Номер тепловой трубы	1	2	3	4	5	6
Теоретическая максимальная теплопередающая способность	10	12	13	60	70	79
Теоретическая максимальная теплопередающая способность	9	10	11	57	69	84

Таблица 3

Зависимость максимальной теплопередающей способности от параметров ПКС при углах наклона 30 градусов

Номер тепловой трубы	1	2	3	4	5	6
Теоретическая максимальная теплопередающая способность	7	9	10	33	42	47
Теоретическая максимальная теплопередающая способность	7	10	12	31	37	44

Таблица 4

**Зависимость максимальной теплопередающей способности от параметров
ПКС при углах наклона 60 градусов**

Номер тепловой трубы	1	2	3	4	5	6
Теоретическая максимальная теплопередающая способность	5	6	7	13	21	23
Теоретическая максимальная теплопередающая способность	4	6	8	10	18	24

Таблица 5

**Зависимость максимальной теплопередающей способности от параметров
ПКС при углах наклона 90 градусов**

Номер тепловой трубы	1	2	3	4	5	6
Теоретическая максимальная теплопередающая способность	4	5	6	6	14	15
Теоретическая максимальная теплопередающая способность	3	5	8	6	11	16

Из представленных данных следует, что эффективность применения неоднородных ПКС наиболее сильно проявляется при работе тепловых труб в антигравитационном режиме. Максимальная теплопередающая способность возрастает с увеличением числа слоев ПКС и может возрасти более чем в 2 раза.

Заключение. На основе исследования влияния параметров неоднородных капиллярных структур на теплопередающую способность при различных углах наклона тепловых труб проведено сравнение этого показателя для тепловых труб с однородной и неоднородной структурой, приведена методика расчета многослойных порошковых капиллярных структур. Показано, что использование неоднородных порошковых капиллярных позволяет увеличить максимальную теплопередающую способность тепловых труб. Из представленных данных следует, что эффективность применения неоднородных ПКС наиболее сильно проявляется при работе тепловых труб в антигравитационном режиме. При этом максимальная теплопередающая способность возрастает с увеличением числа слоев ПКС.

Также приведены результаты исследования некоторых параметров (пористости, среднего размера пор, капиллярного давления, коэффициента проницаемости) порошковых капиллярных структур в зависимости от фракции исходного порошка.

Литература:

1. Мазюк В.В. Расчет и оптимизация по пределу теплопереноса порошковых капиллярных структур низкотемпературных тепловых труб: [Текст] Дисс. канд. техн. наук. – Минск, 1990. – 139 с.
2. Изделия порошковые. Методы определения плотности содержания масла и пористости. ГОСТ 18898-89. – Введ. 01.01.91. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1991. – 10 стр.
3. Материалы порошковые. Метод определения величины пор: ГОСТ 26849-86. – Введ. 27.04.89. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. – 8 стр.
4. Материалы спеченные проницаемые. Определение проницаемости жидкости: ГОСТ 25283-93. – Введ. 1.10.97. – Минск: Госстандарт Беларуси, 1997. – 19 стр.
5. Семена М.Г. Тепловые трубы с металловолоконистыми капиллярными структурами [Текст] / М.Г. Семена, А.Н. Гершуни, В.К. Зарипов – Киев: Вища школа, 1984. – 215 с.
6. Воронин В.Г. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов [Текст] / В.Г. Воронин, А.В. Ревякин, В.Я. Сасин и др. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В. 10 т. Т IV. Гидродинамика. – 3-е изд., перераб. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 736 с.
8. Maziuk, V.V. Miniature loop heat pipes with noninverted meniscus concept and treatment / V.V. Doktorau, V.V. Maziuk, A.L. Rak // Int. Journal of Low Carbon Technologies. – Manchester, 2006. – № 1/3. – P. 228–235.

ТЕРМИЧЕСКАЯ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕМ УГЛЕРОДИСТЫХ ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННЫХ Порошковых сталей

ДОРОФЕЕВ В.Ю., КОЧКАРОВА Х.С.

*Южно-Российский государственный технический университет,
г.Новочеркасск, Россия, тел.: (+7 86352) 55438;
e-mail: dvyu56.56@mail.ru*

Микролегирование алюминием позволяет улучшить качество межчастичного сращивания и повысить уровень структурно чувствительных свойств горячедеформированных порошковых материалов на основе железа [1, 2]. В работе [3] были установлены зависимости механических свойств углеродистых порошковых сталей от содержания углерода, микролегирующей добавки и температурного режима проведения горячей штамповки (ГШ). Указанные характеристики определялись на образцах в