

## КАПИЛЛЯРНЫЕ СТРУКТУРЫ КОНТУРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ: ТЕНДЕНЦИЯ РАЗВИТИЯ

**В. Е. Романенков<sup>1</sup>, Т. Е. Евтухова<sup>1</sup> В. В. Мазюк<sup>2</sup>, Е. Е. Петюшик<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, 220113, г. Минск, Беларусь,  
e-mail: rom52@mail.ru

<sup>2</sup>Институт порошковой металлургии, ул. Платонова, 41, 220005, г. Минск, Беларусь

<sup>3</sup>ГНПО порошковой металлургии, ул. Платонова, 41, 220005, г. Минск, Беларусь,  
e-mail: pet65@bk.ru

Поступила 07. 10. 2016 г.

*Выполнен обзор современных капиллярных структур контурных тепловых труб на основе дискретных структурообразующих элементов. Приведены результаты собственных работ по изготовлению капиллярно-пористых материалов на основе титана, никеля, алюминия. Выявлены тенденции к снижению массы теплопередающих устройств при сохранении и повышении функциональных характеристик за счет применения новых материалов.*

Согласно ГОСТ 23073-78 тепловыми трубами (ТТ) называются испарительно-конденсационные устройства для передачи тепла за счет испарения жидкости-теплоносителя в зоне подвода тепла (испаритель) и конденсации ее паров в зоне отвода (конденсатор), т. е. при фазовых переходах жидкость–пар–жидкость. ТТ отличаются высокой эффективной теплопроводностью, в десятки раз превышающей теплопроводность металлов. Это позволяет эффективно решать многие теплофизические задачи, например, обеспечивать термическую стабилизацию космической электронной аппаратуры. Контурные тепловые трубы (КТТ) (рис. 1) имеют замкнутый контур циркуляции теплоносителя, в котором пути перемещения пара и жидкости разделены. Циркуляцию теплоносителя внутри испарителя обеспечивает капиллярная структура (КС) – наиболее сложный в конструктивном плане элемент КТТ, который и является предметом настоящего сообщения.

За последние 10 лет опубликовано значительное количество аналитических обзоров, рассматривающих устройство испарителей КТТ, методы получения КС и их конструкцию, например в работах [2–7]. В современных тепловых трубах наиболее распространены КС, изготовленные на основе сеток, металлического войлока, металлических и керамических порошков. Типичная КС представляет собой пористый стакан

(рис. 2), который содержит систему продольных и радиальных каналов на границе с корпусом КТТ и выполняет одновременно функции капиллярного насоса и теплового затвора.

Транспортные каналы для пара и жидкости пространственно разделены, а путь движения теплоносителя в КС составляет несколько миллиметров. Анализ способов получения КС КТТ показал, что на современном уровне развития технологии наиболее эффективными являются методы порошковой металлургии [1, 8–11]. Основными материалами, которые применяются для изготовления КС, являются коррозионностойкая сталь, медь, никель, титан, а также полимеры. Широко известны разработки Института теплофизики Уральского отделения РАН [2, 6, 8, 9]. Одна из первых конструкций КС из порошка никеля, разработанная сотрудниками указанного института, представлена на рис. 2. В табл. 1 приведены основные характеристики КС КТТ из порошков титана и никеля [9].

В научно-технической литературе опубликованы десятки статей, авторы которых демонстрируют различные способы формирования структуры и свойств КС для КТТ. Так, авторы [10, 11] разработали КС из порошков никеля, титана, коррозионно-стойкой стали, а также из полиэтилена (рис. 3) с размером пор 4 мкм и меньше и пористостью 50 %.

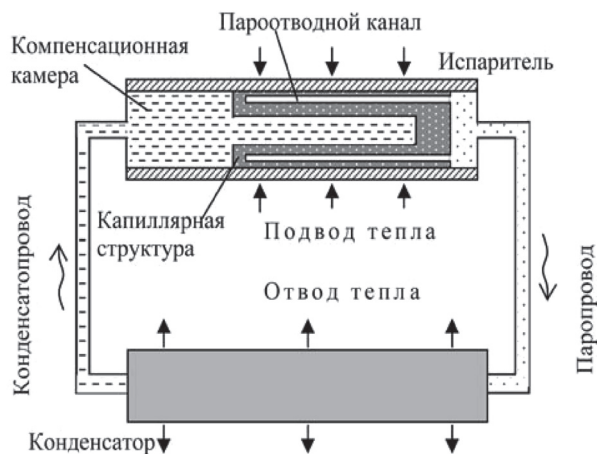


Рис. 1. Схема контурной тепловой трубы [1]

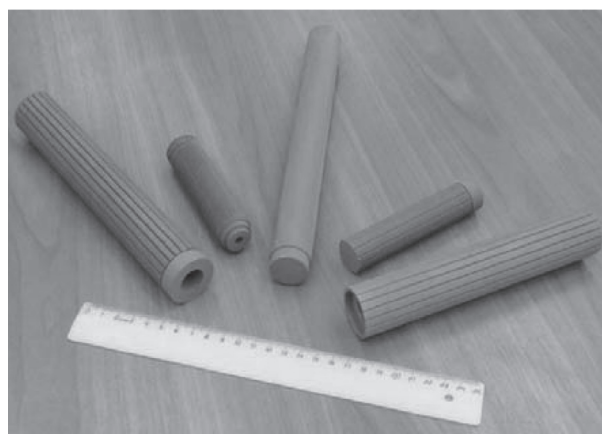


Рис. 2. КС из порошка никеля

Таблица 1. Основные характеристики КС КТТ [9]

Порошок	Размер частиц порошка, мкм	Пористость, %	Средний диаметр пор, мкм	Коэффициент проницаемости, $K \times 10^{-13}, \text{м}^2$	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \times \text{К})$
ПТМ	23–26	60–68	53–7,0	8–18	0,6–1,2
ПТОМ	15–18	56–63	3,5–4,8	4–8	0,8–1,5
ПНК1Л5	9,5	58–67	1,3–1,7	0,5–1,0	5–10
ПНК1Л6	6,6	60–67	1,1–1,4	0,4–0,7	5–8
ПНК1Л7	5,4	60–67	0,83–1,3	0,2–0,6	–
ПНК1Л8	5,2	62–67	0,72–1,1	0,2–0,4	–

\* Предел прочности таких материалов составляет 5–15 МПа.

В работе [12] представлены результаты исследования свойств КС из полимера с размером пор 0,8–2,2 мкм, пористостью до 50% и коэффициентом проницаемости  $10^{-14}$ – $10^{-16} \text{ м}^2$  (рис. 4). Результаты исследований показали, что передаваемая мощность КТТ с полимерной КС может достигать 55 Вт.

Авторы [13] формировали КС способом радиального прессования на оправку порошка ти-

тана марки ПТОМ (ТУ 14-1-3086-80) при давлении 85–120 МПа и последующего спекания. КС была использована в конструкции испарителя КТТ (рис. 5), в качестве теплоносителя использовали воду. КС представляла собой толстостенный стакан с доньшком, внутренняя полость которого является резервуаром для жидкости, а на внешней поверхности, граничащей с корпусом, резанием выполнены каналы для транспорта водяного пара. Пористая структура имела общую пористость до 45 %, длина испарителя 280 мм,

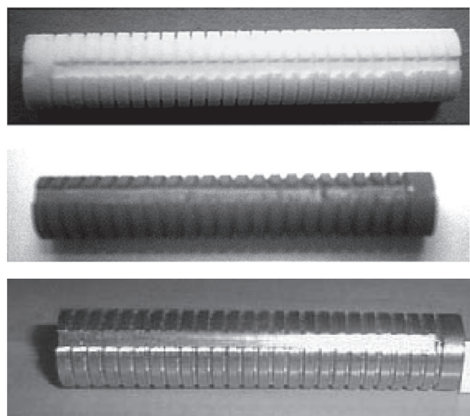


Рис. 3. КС из полиэтилена, титана и никеля [10]

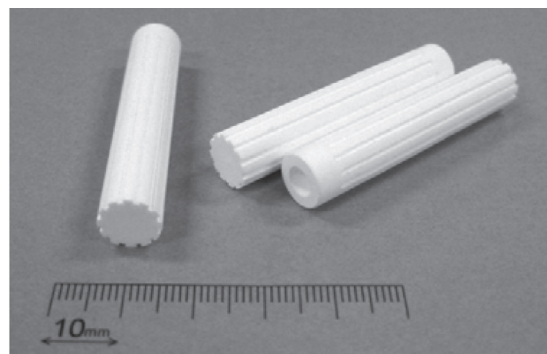


Рис. 4. КС из полимера [12]

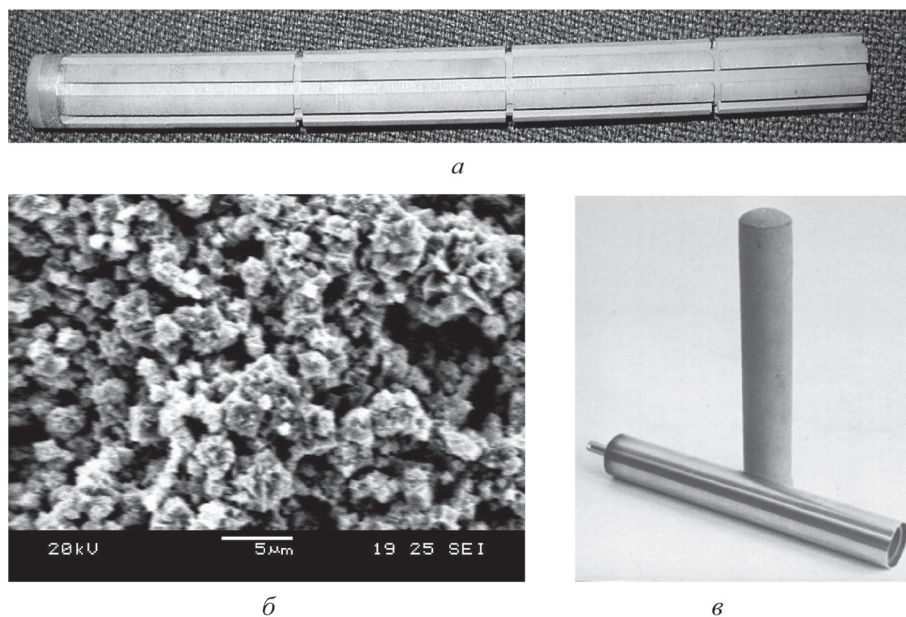


Рис. 5. КС из порошка титана с паровыми каналами (а), микроструктура КС (б), спрессованный и спеченный толстостенный стакан и корпус КТТ из коррозионно-стойкой стали (в) [13]

выходной диаметр 38 мм, максимальный размер пор 10 мкм, средний диаметр пор 5–7 мкм. Толщина пористого слоя составляла 4 мм. Такие структурные и геометрические характеристики испарителя обеспечили высокое капиллярное давление (20–30 кПа) и высокую эффективную теплопроводность, что позволило преодолеть силы гравитации и осуществить устойчивую работу КТТ с конденсатором, расположенным выше или на одном уровне с испарителем. Тепловой поток, подводимый к КПИ был равен 1000 Вт, термическое сопротивление КПИ  $R = 0,03$  К/Вт, капиллярное давление  $p_{cap} = 20$ .

В [14] разработана керамическая КС диаметром 10 мм и длиной 25 мм, полученная методом порошковой металлургии из смеси порошков оксида алюминия и муллита. КС имела пористость 50%, размер пор 1–3 мкм, коэффициент

проницаемости  $35 \times 10^{-15} \text{ м}^2$  и после спекания была механически обработана для формирования каналов (рис. 6) и плотной установки в корпусе испарителя. В качестве теплоносителя в КТТ использовали деионизированную воду, значения теплопередачи составили до 30 Вт или  $0,53\text{--}1,06 \text{ Вт/см}^2$ .

Авторы [15] разработали и исследовали характеристики КС из порошка никеля, использованных в КТТ для космического применения. КС (рис. 7) имела длину 275 мм, на внешней поверхности сформирована система каналов для перемещения пара. Смесь порошка никеля с размером частиц 12 мкм, порошка полипропилена и парафина подвергали формованию методом экструзии при температуре 140 °С при усилии 150 тс. После предварительной термообработки с целью удаления связующего проводили спекание прессовки в среде водорода при 900–950 °С в течение 30–90 мин. КС имела пористость 55%, коэффициент проницаемости  $1,94 \times 10^{-12} \text{ м}^2$ , средний диаметр пор 2,6 мкм, коэффициент теплопроводности  $9,37 \text{ Вт/м} \times \text{К}$ .

Основными операциями, которые входят в процесс изготовления КС из металлических порошков, являются: выбор порошка с подходящим гранулометрическим составом и физико-химическими свойствами, формование, прессование и спекание. Поскольку основным требованием к КС является высокое капиллярное давление,

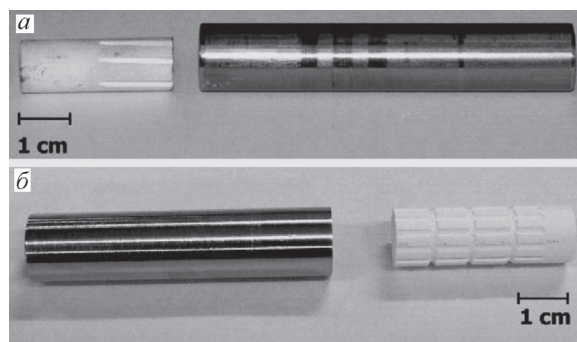


Рис. 6. Керамические КС и корпус испарителя КТТ [14]



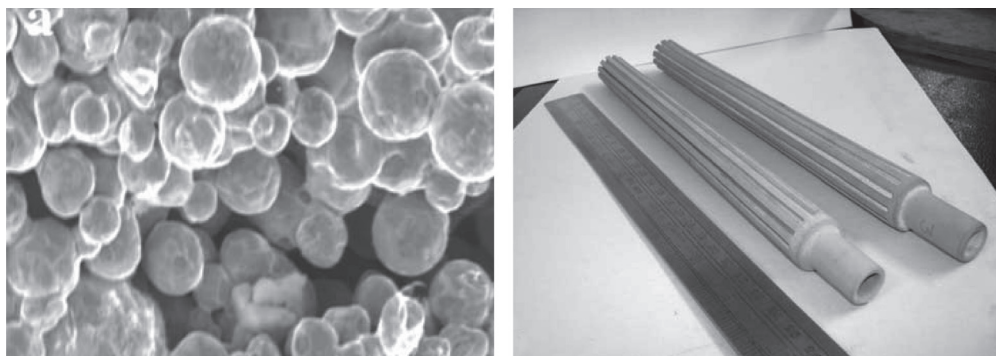


Рис. 7. КС из спеченного порошка никеля и ее микроструктура [15]

которое обеспечивает малый размер пор, в качестве исходного материала обычно выбирают мелкодисперсные никелевые порошки марок ПНК1Л5, 11НК1Л6, ПНК1Л7, 1Г (1Л8 (ГОСТ 9722-79) и титановые порошки марок ПТМ и ПТОМ (ТУ 14-1-3086-80). Производство КС из этих материалов требует существенных энергозатрат и специального оборудования, например, вакуумные печи для спекания и прессовое оборудование для компактирования волокон и порошков в КС. После спекания на внешней поверхности КС необходимо нарезать паровые каналы и запрессовать ее в корпус КТТ, что также сопряжено с рядом технологических трудностей. Так, запрессовку КС значительной длины в корпус испарителя сложно осуществить без ее разрушения, кроме того, контакт КС и корпуса испарителя КТТ имеет большое тепловое сопротивление, поскольку запрессовка в корпус, во-первых, не всегда позволяет обеспечить надежный тепловой контакт КС с корпусом ввиду возможных нарушений геометрии при приложении давления, во-вторых, связана с существенными технологическими трудностями, особенно для длинномерных КС.

Серьезной проблемой также является усадка при спекании, в результате которой на границе между КС и корпусом испарителя возникают крупные поры, которые уменьшают капиллярное давление в КС. По указанным причинам в настоящее время не созданы испарители для КТТ мощностью более 2,5 кВт [1], поэтому целесообразно формировать КС непосредственно в корпусе испарителя с использованием жидкофазного спекания порошковых композиций Cu–Al, Cu–Sn, Cu–Mg, Al–Mg, Al–Zn, Ti–Al, Ni–Al и др., когда процесс сопровождается не усадкой, а значительным объемным ростом спекаемых материалов [1]. Капиллярные структуры испарителей

КТТ из порошков Ni, Cu, Ti, Al (рис. 8), разработанные в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси, КТТ успешно используются для охлаждения компьютерных компонентов, тепловыделяющих объектов в силовой электронике, радиотехнике и т. д.

Метод гидратационного твердения порошка алюминия [16] также обеспечивает некоторое расширение материала и плотное прилегание КС к корпусу. Авторы [17] разработали способ формирования КС с анизотропной пористой структурой непосредственно в корпусе испарителя КТТ. Оснастка для формирования КС с анизотропной пористой структурой непосредственно в корпусе КТТ состоит (рис. 9) из корпуса; нижней и верхней крышек, спиц для формирования пароотводных каналов, крупнопористой вставки и центральной шпильки, с помощью которой осуществляется сборка оснастки. В верхней крышке расположены загрузочные отверстия. Формирование доньшка КС – функционально-капиллярного барьера – и заглушки пароотводных каналов с противоположной от доньшка



Рис. 8. Испарители КТТ с капиллярной структурой из порошков Ni, Cu, Ti, Al [1]

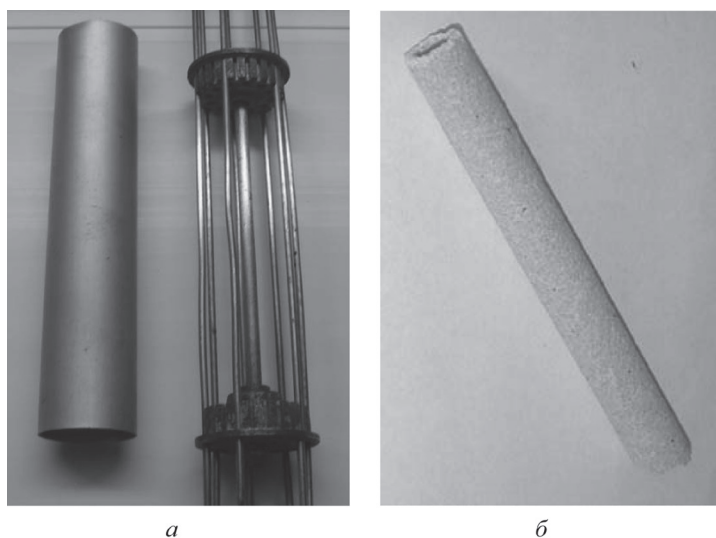


Рис. 9. Оснастка для формирования КС: а) корпус из АМг, крышки в сборе со спицами; б) крупнопористая вставка из порошка фарфора [16]

стороны осуществляется после завершения процесса гидратационного твердения и разборки оснастки. Методом гидратационного твердения были изготовлены КС испарителя КТТ (рис. 10) из порошков АСД-1 (ТУ-48-5-226-87) и АСД-4 (ТУ-48-5-1-77) производства СУАЛ-ПМ, РФ [16].

Авторы [18, 19] исследовали интенсивность теплопередачи в испарителе КТТ с разработанной в [16, 17] КС. В качестве рабочей жидкости применяли пропан и ацетон. Материал мелкопористой составляющей КС имел следующие характеристики: средний радиус пор – 1,5 мкм;

коэффициент проницаемости –  $1,2 \times 10^{-13} \text{ м}^2$ ; пористость – 45%; общий объем пор –  $0,234 \text{ см}^3/\text{г}$ ; коэффициент теплопроводности –  $0,1\text{--}0,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ . Было установлено, что испаритель с разработанной КС и ацетоном в качестве теплоносителя позволяет обеспечить передачу тепла до 350 Вт при термическом сопротивлении испарителя  $0,06\text{--}0,04 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$  при максимальной температуре испарителя  $\sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для присоединения испарителя КТТ цилиндрической формы к охлаждаемой поверхности обычно применяют специальный переходник, обеспечивающий плотный контакт испарителя с плоской поверхностью какого-либо радиоэлектронного устройства. Этот переходник создает дополнительное термическое сопротивление и увеличивает массу КТТ. Процесс миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры, в том числе и космического применения, требует создания и новых теплопередающих устройств с меньшими габаритами и более высокой эффективностью работы. Обзоры технической литературы [6, 20] демонстрируют высокую эффективность КТТ с плоским испарителем малой толщины, содержащим КС из порошка меди и других материалов. Так, авторы [21] разработали и испытали КТТ, испаритель которой содержал КС размером  $55 \times 50 \times 18 \text{ мм}$ , выполненную из медного волокна (рис. 11).

Испытания КТТ (хладагент – вода) показали, что при максимальной тепловой нагрузке 150 Вт минимальное термическое сопротивление соста-

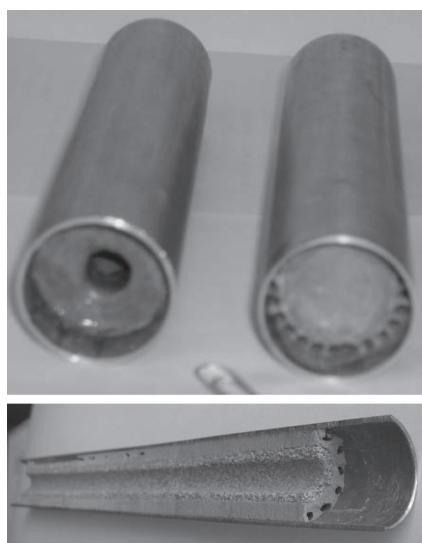


Рис. 10. Общий вид испарителя КТТ с 24 паровыми каналами диаметром 2 мм, разрез КС с крупнопористым керамическим элементом [19]

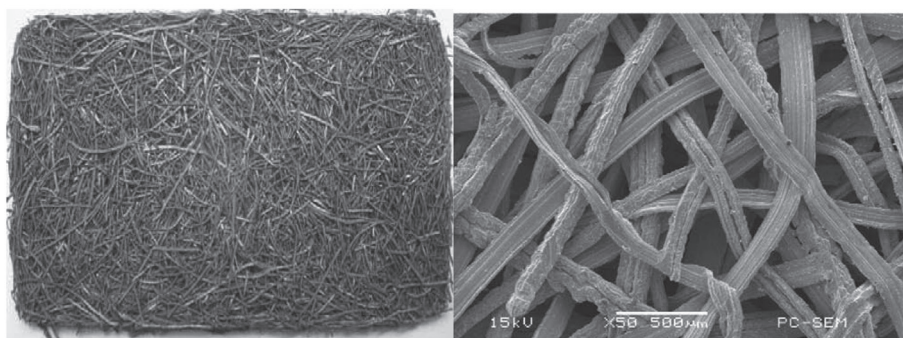


Рис. 11. Плоская КС из медного волокна [21]

вило 0,0315 К/Вт. В [22] исследованы теплофизические характеристики КТТ с плоским испарителем и структура КС, полученных спеканием медных и никелевых порошков. Коэффициент проницаемости КС (рис. 12) составляет  $10^{-14}$ – $10^{-13}$  м<sup>2</sup>, коэффициент теплопроводности 6,7–8,8 Вт/м·К. Разработанная в [22] КТТ с плоским испарителем обеспечивает передачу тепла до 27,8 Вт/см<sup>2</sup> на расстояние до 500 мм.

В [23] КС прямоугольной формы (рис. 13) испарителя КТТ также была получена в виде пластины размером 74×74×5 мм и пористостью 56–70% путем спекания порошка меди с размером частиц 66–265 мкм. КТТ с разработанной

КС показала низкое термической сопротивление – 0,12–0,1 К/Вт.

В [24] была разработана КС из порошка меди размером 30×30×15 мм с прямоугольными продольными каналами (рис. 14). Испытания КТТ показали возможность передачи тепла до 600 Вт при удельной теплопередаче свыше 100 Вт/см<sup>2</sup> без осушки испарителя.

Авторы [25] разработали элемент плоского испарителя КТТ на базе многоканального алюминиевого профиля АН014-01447-2 («АНКОР», Самара, РФ), предназначенный для изготовления радиаторов транспортных средств и полученный методом экструзии из сплава АД0 (рис. 15). В ка-

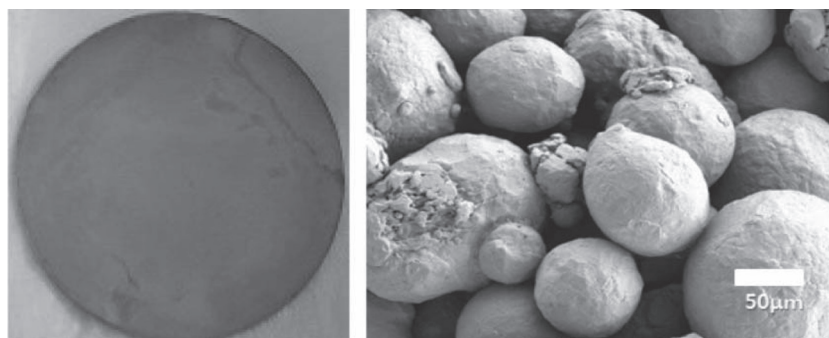


Рис. 12. Плоская КС из медного порошка [22]

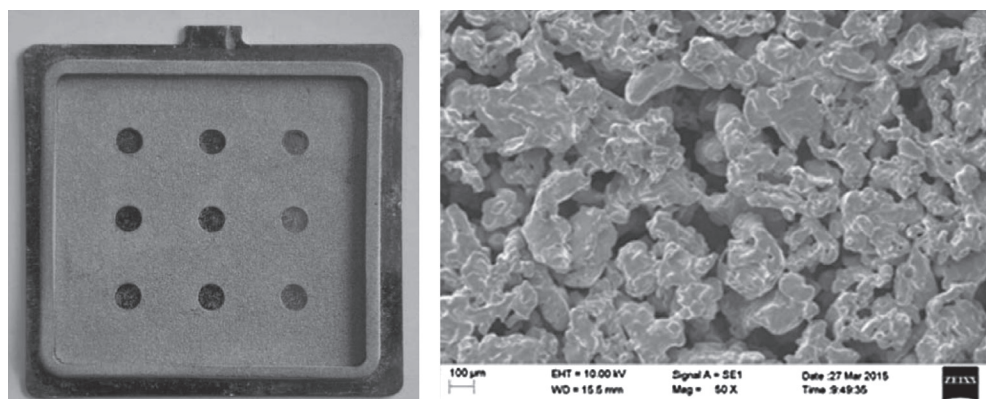


Рис. 13. Плоская КС из медного порошка [23]



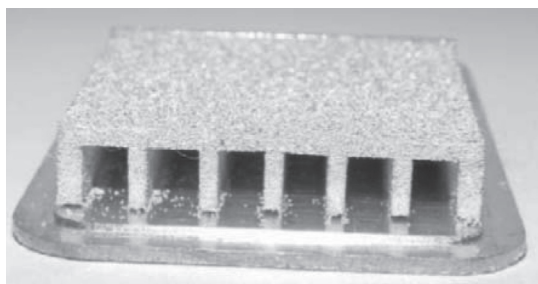


Рис. 14. Плоская КС с продольными каналами из медного порошка [24]

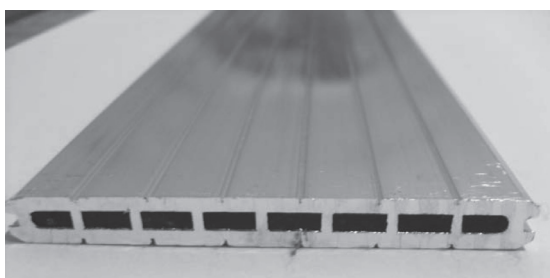


Рис. 15. Алюминиевый профиль АН014-01447-2 для радиаторов транспортных средств (размер каналов 3×7 мм, крайних каналов – 3×6 мм)

налах профиля сформирован наноструктурированный пористый материал (рис. 16, *а*), полученный методом гидратационного твердения порошка алюминия [16]. В результате гидрата-

ционного твердения порошка алюминия марки АСД-4 сформирован пористый проницаемый для жидкости и газа материал, включающий систему сообщающихся транспортных пор диаметром до 1 мкм и нанопор диаметром 4,5 нм.

Тепловой контакт пористого материала с алюминиевым корпусом обеспечивается за счет системы фазовых контактов между наночастицами гидроксида алюминия (рис. 16, *б*). Предел прочности пористого материала при сжатии составляет 65–70 МПа, пористость ~42%, коэффициент проницаемости  $0,43 \times 10^{-13} \text{ м}^2$ , коэффициент теплопроводности 0,4–0,6 Вт/(м×К), удельная поверхность 85 м<sup>2</sup>/г. КС содержит центральные паровые каналы (рис. 16, *а*), каналы профиля соединены между собой алюминиевыми трубками овальной формы (рис. 16, *в*). Одна трубка соединяет паровые каналы в общую систему, другая – содержит гидравлический затвор, полученный из того же материала и тем же методом, что и КС.

В [26] приведены результаты предварительных испытаний плоского испарителя ТТ (рис. 17), который является перспективным для охлаждения электронного оборудования. Установлено, что такая КТТ способна передавать тепло на большие расстояния независимо от ориентации относительно сил гравитации. КС такой КТТ в идеале

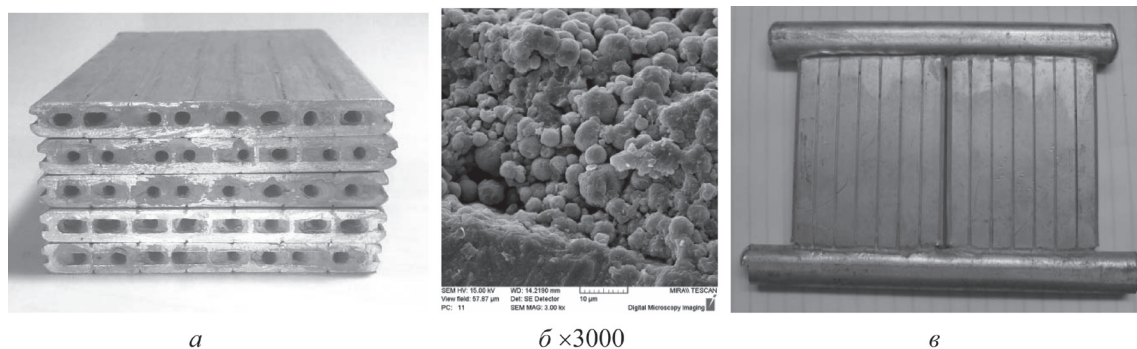


Рис. 16. Элемент испарителя контурной тепловой трубы: *а* – профиль с капиллярной структурой; *б* – микроструктура КС в профиле; *в* – испаритель в сборе [25]

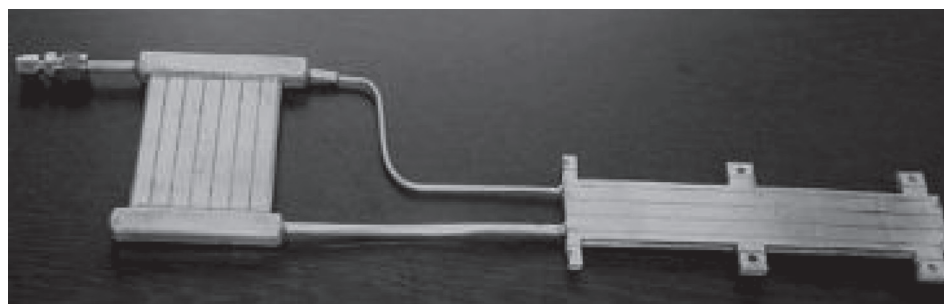


Рис. 17. КТТ с испарителем на основе алюминиевого профиля (теплоноситель-пропан) [26]

должна иметь анизотропную пористую структуру, обеспечивающую максимальный размер пор со стороны пара и минимальный – со стороны жидкости. Результаты теплофизических испытаний авторы [26] не приводят, однако перспективность алюминиевых КТТ для космического применения очевидна вследствие низкой плотности алюминия по сравнению с медью.

### Литература

1. **Агеенко, А. В.** Способ получения порошковых капиллярных структур контурных тепловых труб с перевернутым мениском / А. В. Агеенко, П. А. Витязь, В. В. Мазюк // Весці НАН Беларусі. – 2011. – № 2. – С. 5–9.
2. **Maydanik, Y. F.** Loop heat pipes / Y. F. Maydanik // Applied Thermal Engineering. – 2005. – Vol. 25. – P. 635–657.
3. **Launay, S.** Parametric analysis of loop heat pipe operation: a literature review / S. Launay, V. Sartre, J. Bonjour // International J. of Thermal Sciences. – 2007. – Vol. 46. – P. 621–636.
4. **Launay, S.** State-of-the-art experimental studies on loop heat pipes, *Frontiers in Heat Pipes* (2011) [Electronic resource]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.5098/fhp.v2.1.3003>.
5. **Loop Heat Pipes: A Review of Fundamentals, Operation, and Design** / A. Ambirajan // Heat Transfer Engineering. – 2012. – Vol. 33. – P. 387–405.
6. **Maydanik, Y. F.** Review: Loop heat pipes with flat evaporators / Y. F. Maydanik, M. A. Chernysheva, V. G. Pastukhov // Applied Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 67. – P. 294–307.
7. **Siedel, B.** Literature review: Steady-state modelling of loop heat pipes / B. Siedel, V. Sartre, F. Lefèvre // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 75. – P. 709–723.
8. **Майданик, Ю. Ф.** Титановые пористые материалы для капиллярных структур тепловых труб / Ю. Ф. Майданик, Г. В. Кусков // Порошковая металлургия. – 1983. – № 1. – С. 36–38.
9. **Майданик, Ю. Ф.** Контурные тепловые трубы и двухфазные теплопередающие контуры с капиллярной прокачкой: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 01.04.14 / Ю. Ф. Майданик; М.: МЭИ, 1993. – 47 с.
10. **Riehl, R. R.** Loop heat pipe performance enhancement using primary wick with circumferential grooves / R. R. Riehl, N. dos Santos // Applied Thermal Engineering. – 2008. – Vol. 28. – P. 1745–1755.
11. **Vlassov, V. V.** Design Optimization of Loop Heat Pipes With Cylindrical Evaporator and Integral Reservoir for Space Application / V. V. Vlassov, F. L. Souza, R. R. Riehl // Proc. of the Space Technology and Applications International Forum (STAIF). – 2008. – Vol. 969. – P. 138–145.
12. **Nagano, H.** Development of an experimental small loop heat pipe with polytetrafluoroethylene wicks / H. Nagano, H. Nagai // J. Thermophys. Heat Transfer 25 (2011). – P. 547–552.
13. **Loop heat pipe for cooling of high-power electronic components** / L. Vasiliev [et al.] // Int. J. Heat Mass Transfer 52. – 2009. – P. 301–308.
14. **Santos, P.** Thermal performance and capillary limit of a ceramic wick applied to LHP and CPL / P. Santos, E. Bazzo, A. Oliveira // Applied Thermal Engineering. – 2012. – Vol. 41. – P. 92–103.
15. **Samanta, S. K.** Study of physical characteristics of nickel wicks developed by metal injection moulding / S. K. Samanta, P. Das, A. K. Lohar // Powder Metallurgy 2013. – Vol. 56 (3). – P. 221–230.
16. **Романенков, В. Е.** Физико-химические основы гидратационного твердения порошковых сред / В. Е. Романенков, Е. Е. Петюшик. – Минск: Беларуская навука, 2012. – 197 с.
17. **Способ изготовления тепловой трубы:** пат. 11696 ВУ, МПК<sup>7</sup> F 28 D 15/00; В 22 F 3/10. / Романенков В. Е., Петюшик Е. Е., Васильев Л. Л., Васильев Л. Л. (мл.), Реут О. П., Конон А. Б., Петюшик Т. Е.; БНТУ, ГНУ ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Б. – № а20060437; заявл. 11.05.2006; Опубл. 30.04.2009 // Официальный бюллетень / Изобретения, полезные модели, промышленные образцы. – 2009. – № 2 (67). – С. 106.
18. **Jr. Heat Transfer with Propane Evaporation from a Porous Wick of Heat Pipe** / L. L. Vasiliev [et al.] // J. of Porous Media. – 2001. – Vol. 4, № 2. P. 103–111.
19. **Vasiliev, L. L.** Advanced Loop Heat Pipe Evaporator with Ceramic Nanostructured Composite of Alumina, Alumina-Silica Oxide as a Wick Structure / L. L. Vasiliev // SAE Paper. – 2007.
20. **Maydanik, Y. F.** Development and Investigation of a Miniature Copper-Acetone Loop Heat Pipe with a Flat Evaporator / Y. F. Maydanik, V. G. Pastukhov, M. A. Chernysheva // J. of Electronics Cooling and Thermal Control. – 2015. – № 5. – P. 77–88.
21. **A novel miniaturized loop heat pipe** / Y. Tang [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2010. – Vol. 30. – P. 1152–1158.
22. **Experimental investigation on sintered porous wicks for miniature loop heat pipe applications** / J. Choi [et al.] // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2013. – Vol. 51. – P. 271–278.
23. **Experimental investigation of vapor chambers with different wick structures at various parameters** / Y. Li [et al.] // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2016. – Vol. 77. – P. 132–143.
24. **Li, Ji.** Experimental studies on a high performance compact loop heat pipe with a square flat evaporator / Ji Li, D. Wang, G. P. Peterson // Applied Thermal Engineering. – 2010. – Vol. 30. – Is. 6–7. – P. 741–752.
25. **Capillary structure from aluminium powder in flat heat pipe** [Computer file] / Y. Y. Piatsiushyk [et al.] // Euro PM2014 Congress & Exhibition (21-24 September, 2014): Salzburg, Proceedings.
26. **Vasiliev, L. L.** Heat Pipes and Thermosyphons for Thermal Management of Solid Sorption Machines and Fuel Cells / L. L. Vasiliev and L. L. Vasiliev Jr. // Fundamentals and Practical Applications, Mechanical, Aerospace & Nuclear Engineering. Taylor & Francis/CRC Press, Ed.: L. L. Vasiliev, Sadik Kakaç. – 2013. – P. 213–258.