

## ПОРОШКОВЫЕ КАПИЛЛЯРНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

В. Е. Романенков<sup>1</sup>, В. В. Мазюк<sup>2</sup>, Е. Е. Петюшик<sup>2</sup>, Т. Е. Евтухова<sup>1</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,  
e-mail: maziuk@tut.by

Поступила 19.09.2017 г.

*Выполнен аналитический обзор теплофизических характеристик алюминиевых тепловых труб различной конструкции, в том числе и с капиллярной структурой из порошка алюминия. Показано, что применение в испарительной части тепловой трубы капиллярной структуры с наноструктурной составляющей позволяет увеличить площадь испарения и повысить теплопередающие характеристики тепловой трубы.*

В течение последних двух десятилетий в ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» (Россия) с целью термической стабилизации радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) ракетных двигателей и разгонных блоков были проведены испытания ряда тепловых труб (ТТ) с капиллярной структурой (КС) различных видов – конструкционной КС (с аксиальными канавками различной конфигурации), сетчатой и спеченной медной КС, в том числе изготовленной в Институте порошковой металлургии (Минск, Беларусь) [1].

В процессе испытаний было установлено, что наиболее эффективными являются алюминиевые ТТ с аксиальными канавками (ТТАК), разработанными в НТУУ «Киевский политехнический институт» (Украина) и ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» (Россия) совместно с другими российскими организациями. Сегодня наиболее распространены ТТАК с трапециевидными, прямоугольными и  $\Omega$ -образными канавками и аммиаком в качестве теплоносителя. Расчеты, проведенные авторами [2, 3], показали, что повышение эффективности ТТАК возможно как за счет увеличения количества канавок при максимально возможном диаметре ТТАК, так и путем изготовления системы канавок оптимальной конфигурации, поскольку аксиальные канавки обеспечивают транспорт жидкости-теплоносителя в зону испарения, а их конфигурация определяет интенсивность теплообмена при испарении

и конденсации. Результаты испытаний в «ОКБ-Планета» (Россия) разработанных авторами [2, 3] ТТ, предназначенных для обеспечения тепловых режимов радиопередающих блоков метрового диапазона, показали, что малое термическое сопротивление алюминиевых ТТ (не более 0,08 К/Вт) позволило обеспечить тепловой режим радиопередающих блоков с выделяемой тепловой мощностью 200 Вт.

Проведенные ранее детальные аналитические и экспериментальные исследования процесса испарения теплоносителя в ТТАК [4] позволили установить, что термическое сопротивление низкотемпературной ТТАК в основном зависит от толщины пленки жидкости в зоне конденсации и испарения. Наиболее интенсивная теплопередача происходит в области испарителя с наименьшей толщиной пленки жидкости, в свою очередь толщина пленки зависит от формы аксиальных канавок и в значительной степени определяется микронеровностями на их поверхности. Теплофизические расчеты и испытания, проведенные в работах [5, 6], показали, что плоские миниатюрные ТТ способны передавать тепловой поток до 100 Вт/см<sup>2</sup>, что может обеспечить охлаждение электронных узлов, работающих при температурах ниже 100 °С. При этом шероховатость поверхности канавок в зоне испарения существенно снижает термическое сопротивление испарителя и повышает его теп-

лопередающую способность за счет интенсификации процесса испарения. Максимальную теплопередачу обеспечивают миниатюрные ТТ с шероховатостью, нанесенной механическим путем, в форме глубоких и узких прямоугольных канавок.

В работах [7–9] показано, что теплообмен при испарении жидкости из капиллярных канавок существенно ограничен, поскольку, согласно схеме испарения (рис. 1, *а*), практически весь испарительный теплообмен происходит в очень ограниченной области боковой поверхности ребра канавки в районе мениска жидкости. Мениск жидкости в капиллярной канавке у поверхности ребра имеет вытянутую форму и условно разделен на три зоны: 1 – зона основного мениска, 2 – переходная зона тонкой пленки, 3 – зона равновесной тонкой пленки.

Как установлено в работах [4–6], в зоне 2 находится практически весь подводимый к испарителю тепловой поток. При этом с уменьшением толщины пленки интенсивность испарения возрастает. При определенной толщине пленки увеличивается влияние сил поверхностного взаимодействия между молекулами в микропленке жидкости и на твердой поверхности. При этом интенсивность испарения резко уменьшается. В этой части (зона 3) жидкость практически не испаряется. В области основного мениска (зона 1) из-за большой толщины слоя жидкости и ее низкой теплопроводности интенсивность испарения также невысока. Поскольку протяженность и, соответственно, площадь зоны тонкой пленки мала, несмотря на очень высокую интенсивность теплообмена в ней, величина среднего коэффициента теплообмена в канавке ограничена.

Увеличение средней интенсивности испарения в капиллярной канавке может быть достигнуто за счет увеличения площади поверхности ребра, на котором постоянно поддерживается

тонкая пленка жидкости. Равномерно смоченная поверхность достаточно большой площади может быть создана с помощью тонкого (толщиной до 100 мкм) капиллярно-пористого покрытия поверхности ребра канавки и его вершины. Толщина покрытия должна быть существенно меньше характерных размеров капиллярных канавок, чтобы не ограничивать капиллярный транспорт жидкости вдоль канавки. Толщина пористого покрытия и его проницаемость должны обеспечивать необходимый расход испаряющейся из него жидкости. Механизм испарения из канавки с капиллярно-пористым покрытием представлен на рис. 1, *б*. Вся поверхность ребра канавки, находящаяся вне зоны основного мениска, оказывается равномерно смоченной и площадь эффективного испарения увеличивается во много раз.

В работах [7–9] экспериментально установлено, что глубокие и узкие прямоугольные канавки обеспечивают наибольшую скорость циркуляции жидкости, наименьшее термическое сопротивление в испарителе и конденсаторе и обеспечивают максимальную теплопередающую способность в зоне испарения до  $145 \text{ Вт/см}^2$ . Во всем исследованном диапазоне температур ( $-30...+80 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и плотности теплового потока  $(10-35) \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$  коэффициенты теплообмена испарителей ТТАК всех типов с нанесенным пористым покрытием в 1,5–2 раза выше, чем у аналогичных испарителей с гладкой поверхностью аксиальных канавок. Поэтому перспективным направлением повышения эффективности работы алюминиевых ТТАК является нанесение на поверхность канавок капиллярной пористой структуры. В период 2007–2012 гг. в ГНУ «Институт порошковой металлургии» и Белорусском национальном техническом университете авторами работ [10–12] разработана технология и проведены исследования процесса формирования структуры и свойств КС в виде пористого

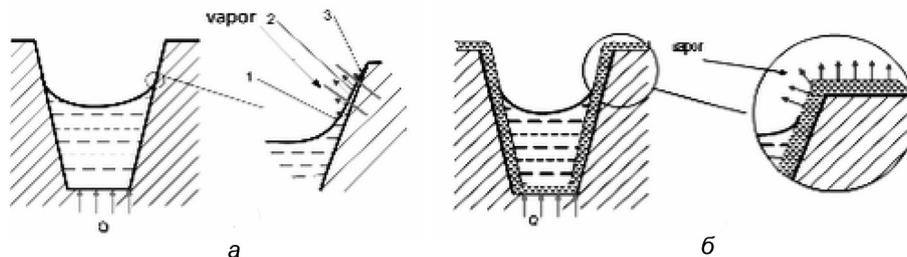


Рис. 1. Схема испарения теплоносителя в трапецевидной канавке: *а* – без пористого слоя; *б* – с пористым слоем [8]

наноструктурированного слоя на внутренней поверхности алюминиевых профилей с канавками различной конфигурации. Для нанесения КС применяли промышленные порошки алюминия, например, АСД-4, толщина слоя составила 40–150 мкм (рис. 2). Формирование КС и его присоединение к компактной алюминиевой подложке осуществляли методом гидратационного твердения дисперсного алюминия, механизм которого подробно изложен в работе [10].

Быстрое развитие космической техники выдвигает новые требования по обеспечению тепловых режимов, прежде всего по расстоянию теплопереноса, которым системы охлаждения на основе тепловых труб традиционной конструкции удовлетворить уже не могут. Поэтому другим перспективным видом тепловых труб для термической стабилизации космической радиоэлектронной аппаратуры являются алюминиевые контурные тепловые трубы (КТТ). Теплопередающая способность последних в значительной степени определяется как их конструктивными особенностями, так и свойствами КС, которая является одним из основных элементов испарителя КТТ. КС обеспечивает тепловой контакт между внутренней стенкой корпуса испарителя КТТ и поверхностью раздела фаз пар–жидкость, требуемую объемную скорость переноса и испарения теплоносителя.

Метод гидратационного твердения порошка алюминия позволяет не только формировать КС непосредственно в корпусе испарителя КТТ, но

и обеспечивать лиофильность КС за счет наноструктурной составляющей материала. Разработанные теоретические и технологические основы процесса были использованы при изготовлении КС испарителей КТТ различной конструкции, которые прошли испытания в АНК ИТМО НАН Беларуси. В результате была показана перспективность применения этого материала для интенсификации теплообмена при кипении пропана и других углеводородов при прямом погружении испарителя в объем жидкости [13–17]. Интерес к изучению кипения углеводородов, в частности пропана, вызван потребностями промышленности в совершенствовании теплообменных устройств. С целью повышения компактности и надежности таких устройств ведется активный поиск интенсификации теплопередачи при низких температурах.

Авторы работ [13–17] исследовали работу испарителя КТТ с КС в виде пористого материала состава  $Al-Al_2O_3$ , полученной методом гидратационного твердения порошка алюминия непосредственно в корпусе испарителя. Две КС содержит 4 и 8 паровых каналов, удельная поверхность КС составляет до  $150 \text{ м}^2/\text{г}$ , пористость – 50 % при наличии транспортных пор диаметром 7–12 мкм. Суммарный объем макропор составляет  $0,25\text{--}0,35 \text{ см}^3/\text{г}$ , объем микропор –  $0,1\text{--}0,15 \text{ см}^3/\text{г}$ . В качестве теплоносителя использовали диэлектрическую жидкость – пропан. Было установлено, что такая конструкция испарителя позволяет обеспечить прямой тепловой контакт тепловыделяющего элемента с системой его

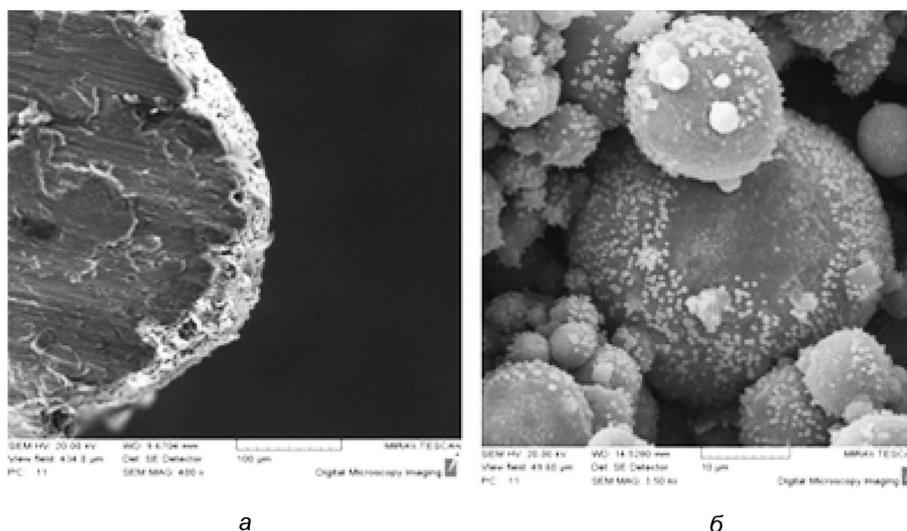


Рис. 2. КС на многоканальном алюминиевом профиле АТ-КРА 8.0 – Р1 с прямоугольными канавками: а –  $\times 400$ ; б –  $\times 3500$  [11]

охлаждения (охлаждаемый полупроводниковый элемент непосредственно контактирует с теплоносителем без промежуточной стенки, поскольку располагается внутри КС). Кроме того, испаритель включает несколько цилиндрических компенсационных полостей для жидкости, расположенных непосредственно в КС на ее периферии вблизи наружной стенки испарителя. Исследования проводились при плотности теплового потока  $q = 0,1-100$  кВт/м<sup>2</sup> и давлении насыщения  $P = 3,45-13,8$  МПа. В качестве имитатора полупроводникового элемента был использован резистивный нагреватель цилиндрической формы. Применяемый в качестве КС пористый материал Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обладает хорошими сорбционными свойствами. Оптимальный режим работы испарителя наблюдается при плотности теплового потока  $q = 10-12$  кВт/м<sup>2</sup>, когда коэффициент теплообмена достигает величины 1500–1600 Вт/(К·м<sup>2</sup>). Проведенные исследования показали перспективность применения таких испарителей в КТТ для охлаждения компонентов радиоэлектронной аппаратуры.

Испытания испарителей КТТ с разработанной КС на основе порошка алюминия были проведены в АНК ИТМО НАН Беларуси на специально разработанном стенде [13, 14, 17, 18]. Элемент испарителя КТТ с КС, содержащей паровые каналы (рис. 3), помещали в объем пропана, транспорт жидкости в зону парообразования осуществлялся капиллярными силами. Тепловой поток подводился от нагревателя, расположенного внутри коаксиального цилиндра. Таким образом, испаритель функционировал в режиме перевернутого мениска (жидкость испарялась из нагретой за счет теплопроводности пористой структуры в паровой канал).

С помощью медь-константановых термопар проводили контроль температуры пара в канале, пористого тела в точках, имеющих разные координаты по глубине и длине структуры, а также на внутренней и наружной поверхностях образца. При низких тепловых нагрузках тепло отводилось конвекцией, затем наблюдался выход из каналов отдельных редких пузырьков пара. По мере увеличения плотности теплового потока частота образования пузырей возрастала, далее они группировались в цепочки. При достижении некоторой величины  $q$ , различная для каждого из образцов, пропускная способность каналов оказывалась недостаточной для своевременной эвакуации всего образующегося пара, в результате коэффициенты теплоотдачи, достигнув максимума, начинали снижаться. При смене направления изменения теплового потока наблюдался гистерезис кривой кипения.

Были исследованы образцы испарителей КТТ, в которых КС в виде оксидно-металлического материала Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> была заключена между наружной (Ø 40 мм) и внутренней (Ø 16 мм) трубками из коррозионно-стойкой стали. В образце испарителя № 1 выполнено 4 паровыводящих канала Ø 2 мм, равномерно расположенных вдоль внутренней трубки, внутри паровых каналов помещены спай термопар, источник нагрева расположен во внутренней трубке (рис. 3, а). В образце № 2 выполнено 8 паровых каналов Ø 2 мм, расположенных вблизи нагревателя, и 8 жидкостных каналов, прилегающих к внешней трубке (рис. 4) [15]. Эксперименты проводили при температурах насыщения до  $T_H = 30$  °С, в диапазонах давления насыщения  $p = 3,45-13,8$  Бар и тепловых нагрузок  $q = 0,02-30$  кВт/м<sup>2</sup>. На рис. 3, б показана визуальная картина процесса

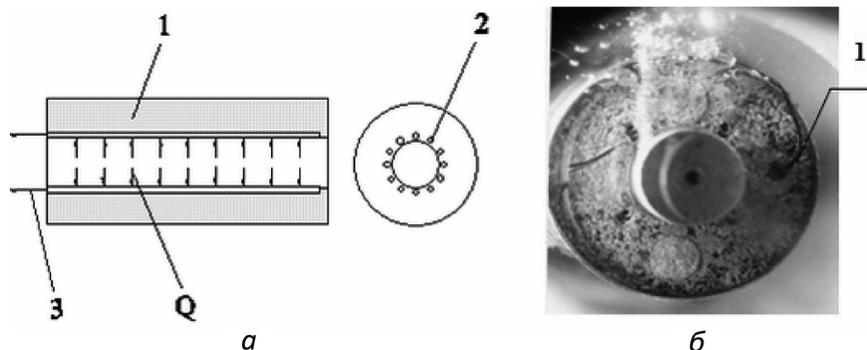


Рис. 3. Схема испарителя КТТ с КС состава Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Al, содержащей 4 паровых канала (а): 1 – КС; 2 – каналы для отвода пара из испарителя; 3 – поток пара из испарителя в конденсатор тепловой трубы. Испаритель КТТ, погруженный в жидкий пропан (б): 1 – термопары; 2 – паровые каналы для отвода пропана

испарения пропана (вид на торец через боковой иллюминатор). На фотографии можно наблюдать пузырьки газа, которые при повышении тепловой нагрузки после выхода из каналов объединяются в общий поток. Видны также термопары 1 и 2, введенные в паровой канал и вглубь пористой структуры. На рис. 4 представлена схема и торцевая часть испарителя КТТ с КС состава  $Al-Al_2O_3$ , содержащей 8 паровых и 8 жидкостных каналов, источник нагрева  $Q$  также расположен во внутренней трубке.

На рис. 5 представлены результаты исследования образцов из керамического материала  $Al-Al_2O_3$  с паровыми каналами при разных температурах и, соответственно, давлениях насыщения [14]. В начале кипения влияние давления было существенным, однако с повышением тепловой нагрузки устанавливалась автотель-

ность процесса относительно давления, кривые кипения практически сливаются.

Из экспериментальных данных видно, что за счет снижения гидравлического сопротивления выходящему пару путем увеличения количества паровых каналов и их проходного сечения в итоге можно повысить отводимые тепловые потоки. Для оптимизации такой структуры необходимы дальнейшие исследования, однако полученные результаты позволяют сделать вывод, что пористые структуры, выполненные из металлокерамического материала  $Al-Al_2O_3$  методом гидротермального синтеза, могут рассматриваться как альтернатива другим видам КС КТТ.

Результаты теплотехнических экспериментов с двумя видами испарителей КТТ, погруженных в жидкий пропан [13, 17] приведены на рис. 6. Как видно из графиков, лучшими тепло-

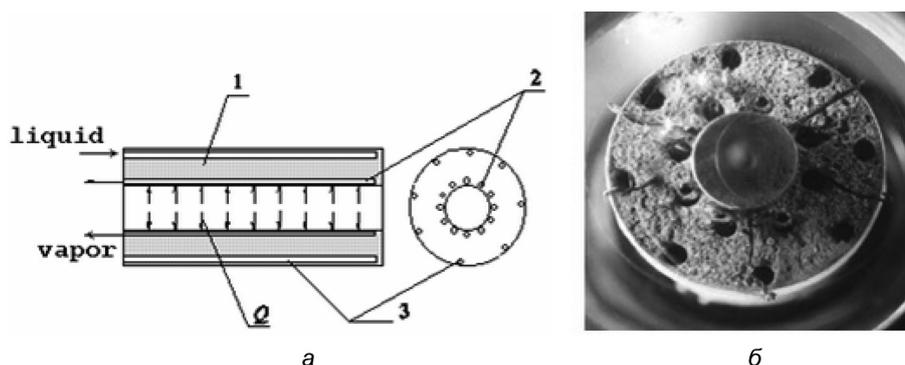


Рис. 4. Схема испарителя КТТ с КС состава  $Al_2O_3-Al$ , содержащей 8 паровых и 8 жидкостных каналов (а): 1 – КС, 2 – каналы для отвода пара из испарителя, 3 – каналы для подвода жидкого пропана. Испаритель КТТ, погруженный в жидкий пропан (б) [15]

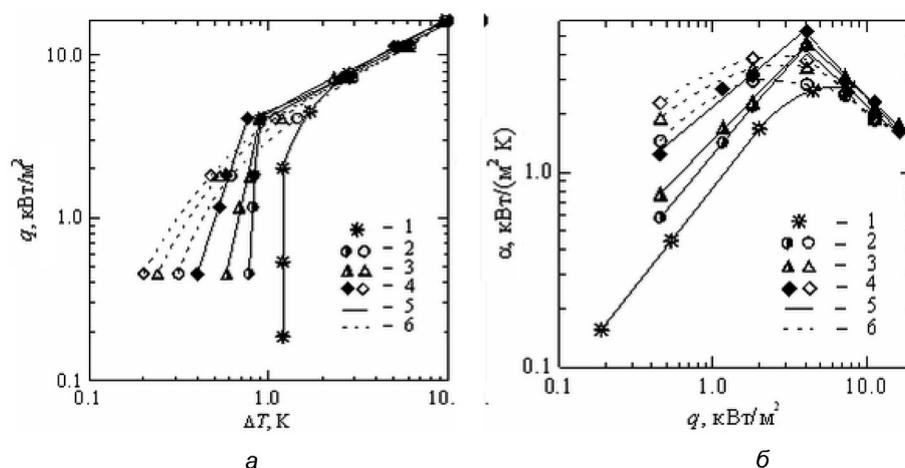


Рис. 5. Результаты исследования тепловой нагрузки в испарителе как функции температуры (а), коэффициента теплопередачи как функции тепловой нагрузки (б): 1 – испаритель с 4 паровыми каналами; 2 – испаритель с 8 паровыми и 8 жидкостными каналами [14]

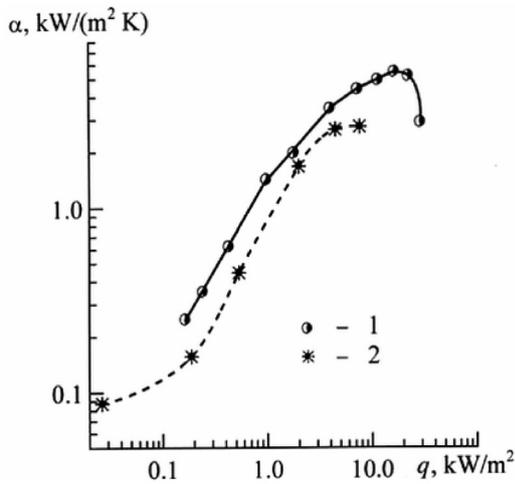


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплообмена при испарении пропана внутри КС испарителя КТТ от плотности теплового потока на внутренней стенке испарителя: 1 – испаритель с 8 паровыми каналами; 2 – испаритель с 4 паровыми каналами [17]

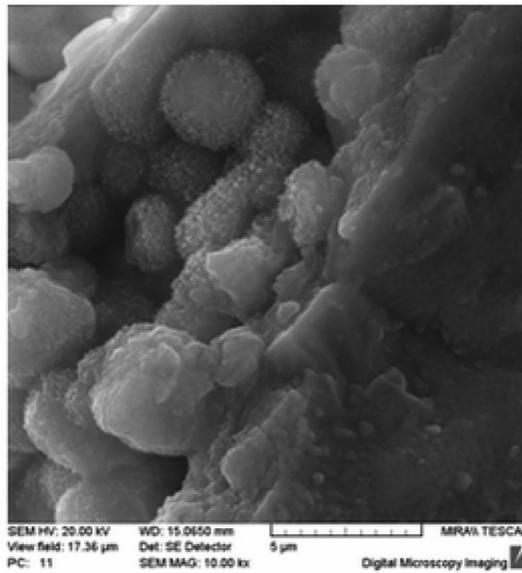
техническими характеристиками обладает испаритель с 8 паровыми каналами. Оптимальный режим работы испарителей наблюдается при плотности теплового потока  $q = 10\text{--}12$  кВт/м<sup>2</sup>, когда коэффициент теплообмена достигает значений  $\alpha = 1,5\text{--}1,6$  кВт/(м<sup>2</sup>·К). Испаритель с 8 паровыми каналами при плотности теплового потока  $q = 10$  кВт/м<sup>2</sup> имеет в 1,5 раза меньшее термическое сопротивление по сравнению с испарителем, который содержит 4 паровых канала.

Авторы исследования [18] разработали способ формирования КС с анизотропной пористой структурой непосредственно в корпусе испарителя КТТ. Конструкция оснастки и основные технологические приемы формирования КС приведены в работе [19]. В качестве материала корпуса испарителя КТТ использовали трубу бесшовную ст.12Х18Н10Т (ГОСТ 9940-81) с толщиной стенки 0,5–1 мм или трубу из сплавов Д16, АМг2, АМг3 с толщиной стенки 1,5 мм по ОСТ 192096 (Россия). Для формирования паропроводных каналов в КС использовали формообразующие элементы – спицы медицинские с хвостовиком  $\varnothing 2$  и длиной 340 мм, изготовитель – Республиканское инновационное унитарное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ («Политехник»).

На рис. 7, а представлена испарительная камера КТТ с КС, помещенной в корпус из коррозионностойкой стали. КС содержит 12 периферийных паропроводных каналов, расположенных по периметру корпуса, и один центральный паропроводный канал. Каналы сформированы соответствующими элементами оснастки. Преимущества гидратационного твердения заключаются в том, что метод позволяет получать КС любой формы и закрывать каналы на необходимую глубину. Другим важным преимуществом гидратационного твердения является возможность получения КС с анизотропной пористой



а



б

Рис. 7. Испаритель КТТ с бипористой КС: а – испаритель в разрезе, б – СЭМ-фото излома КС ( $\times 10\,000$ )

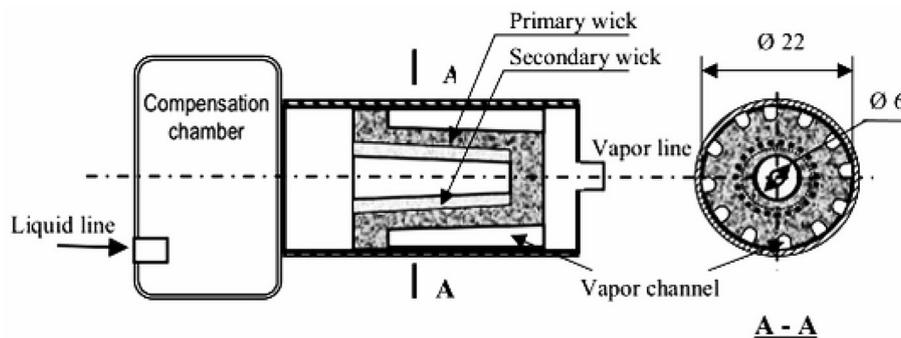


Рис. 8. Схема испарителя КТТ с бипористой КС [20]

структурой, обеспечивающей одновременно высокое капиллярное давление и низкое гидравлическое сопротивление. Испарительная камера КТТ содержит КС с крупнопористой вставкой из порошкообразного фарфора или титана марки ПТК, полученной методом радиального обжигания и последующего спекания. Микроструктура такого материала на границе крупнопористой вставки и оксидно-металлического материала  $Al-Al_2O_3$  приведена на рис. 8, б. Внутренний объем фарфоровой вставки является основным пароотводным каналом, который заглушен со стороны выхода периферийных каналов, сформированных соответствующими элементами технологической оснастки.

Материал мелкопористой составляющей КС имел следующие характеристики: средний радиус пор – 1,5 мкм; коэффициент проницаемости –  $1,2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ ; пористость – 45 %; общий объем пор –  $0,234 \text{ см}^3/\text{г}$ ; коэффициент теплопроводности –  $0,1-0,3 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ . Крупнопористая вставка содержала систему сообщающихся пор размером 160 мкм, коэффициент проницаемости материала вставки  $9,7 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ .

Мелкопористая составляющая КС обеспечивает необходимое капиллярное давление для циркуляции жидкости в системе. Крупнопористая вставка вызывает интенсивное перемеще-

ние теплоносителя с центральной части КС в мелкопористую часть КС, что требует значительно более низкого капиллярного давления, чем для перемещения теплоносителя в мелкопористой части КС. В процессе гидратационного твердения между КС из порошка алюминия и крупнопористой вставкой формируются фазовые контакты (рис. 7, б), что обеспечивает механическую прочность КС и тепловой контакт между элементами КС с различными свойствами.

Авторы работы [20] исследовали интенсивность теплопередачи в испарителе КТТ с изученной в работе [19] КС с 12 паровыми каналами. В качестве рабочей жидкости применяли пропан и ацетон. Схема испарителя КТТ представлена на рис. 8. Испаритель содержит компенсационную камеру цилиндрической формы с конденсатором и трубками для подвода жидкости и отвода пара. КС содержит 12 продольных паровых каналов диаметром 2 мм на границе с корпусом испарителя.

В результате проведенных исследований было установлено, что испаритель с разработанной КС и ацетоном в качестве теплоносителя позволяет обеспечить передачу тепла до 350 Вт при термическом сопротивлении испарителя  $0,04-0,06 \text{ К/Вт}$  при максимальной температуре испарителя  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## Литература

1. Бирюк, В. В. Применение тепловых труб для охлаждения РЭА / В. В. Бирюк, А. И. Китаев // Вестник Самарского гос. аэрокосм. ун-та. – 2009. – № 3 (19). – С. 342–345.
2. Письменный, Е. Н. Теплообмен в зоне испарения аммиачных алюминиевых тепловых труб / Е. Н. Письменный, С. М. Хайрнасов, Б. М. Рассамкин // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2017. – № 1. – С. 14–23.
3. Хайрнасов, С. М. Научно-технологические основы создания алюминиевых тепловых труб для ресурсосберегающих систем (укр.): автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.06 / С. М. Хайрнасов; Нац. техн. ун-т. – Киев, 2017. – 41 с.
4. Васильев, Л. Л. Тепловые трубы в системах с возобновляемыми источниками энергии / Л. Л. Васильев, Д. К. Хрусталев, Л. П. Гракович. – Минск: Наука и техника, 1988. – 159 с.
5. Faghri, A. Advances in modeling of enhanced flat miniature heat pipes with capillary grooves / A. Faghri, D. Khrustalev // J. of Enhanced Heat Transfer. – 1997. – Vol. 4, № 2. – P. 99–109.

6. **Faghri, A.** Micro/Miniature Heat Pipe Technology for Electronic Cooling, R-97-2083 / A. Faghri, D. Khrustalev. – 127 p.
7. **Advance** grooved heat pipe for space satellite thermal control system / L. Jr. Vasiliev [et al.] // 39 th Intern. conf. on Envir. Systems, USA, Georgia, Savannah, Hyatt Regency Savannah, Juli 12–16, 2009, SAE TECHNICAL PAPER 2009-01-2501.
8. **Grooved** Heat Pipes with a Nanoporous Deposit in an Evaporator / L. Vasiliev [et. al] // Heat Pipe Science and Technology. – 2010. – Vol. 1(3). – P. 219–236.
9. **Исследование** теплообмена при испарении в капиллярных канавках с пористым покрытием / Л. Л. Васильев [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 85, № 2. – С. 378–384.
10. **Романенков, В. Е.** Физико-химические основы гидратационного твердения порошковых сред / В. Е. Романенков, Е. Е. Петюшик. – Минск: Беларус. наука, 2012. – 197 с.
11. **Nanotechnologies** as an Effective Direction for the Improvement of Heat Pipes of Space Application / Y. Y. Piatsiushik [et al.] // Euro PM-2013 International Powder Metallurgy Congress & Exhibition, 15–18 September 2013. – Gothenburg, Sweden, 2013. – P. 35–40.
12. **Капиллярная** структура тепловой трубы с аксиальными канавками / Е. Е. Петюшик [и др.] // Тепловые трубы для космического применения: материалы 2-й Междунар. конф. (Москва, 15 – 19 сент. 2014 г.)
13. **Thermal** control system with heat pipes and solid sorption coolers / L. L. Vasiliev [et al.] // Proceedings of The IV Minsk International Seminar «Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators», Minsk, Belarus, 2000 September 4–7. – P. 176–184.
14. **Experimental** Investigation of Propane Boiling in Porous Structures / L. L. Vasiliev [et al.] // Proceedings of The IV Minsk International Seminar «Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators». – Minsk, 2000, sept. 4–7. – P. 245–255.
15. **Heat** transfer with propane evaporation from a porous wick of heat pipe / L. Vasiliev [et al.] // J. Porous Media. – 2001. – Vol. 4, № 2. – P. 103–111.
16. **Теплоотдача** при кипении сжиженного пропана в капиллярно-пористых структурах / Л. Л. Васильев [и др.] // Известия Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2002. – №. 4. – С. 114–119.
17. **Васильев, Л. Л.** Система охлаждения полупроводниковых элементов на базе сорбционной тепловой трубы: автореф. дис. ... канд. техн. наук, 01.04.14 / Л. Л. Васильев; ИТМО Нац. акад. наук Беларуси. – Минск, 2003. – 24 с.
18. **Капиллярные** структуры контурной тепловой трубы: тенденция развития / В. Е. Романенков [и др.] // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. / Нац акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – Вып. 39. – С. 62–69.
19. **Способ** изготовления тепловой трубы: пат. 11696 ВУ, МПК7 F 28 D 15/00; В 22 F 3/10. / В. Е. Романенков [и др.]; заявитель БНТУ, ГНУ ИТМО им. А. В. Лыкова Нац. акад. наук Беларуси. – № а 20060437; заявл. 11.05.2006; опубл. 30.04.2009 // Официальный бюллетень «Изобретения, полезные модели, промышленные образцы». – 2009. – № 2 (67). – С. 106.
20. **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 Technical Paper [Electronic resource]. – 2007. – Mode of acces: <http://papers.sae.org/2007-01-3192/>. – Date of access: 18.09.2017.

## POWDER CAPILLARY STRUCTURES FOR ALUMINUM HEAT PIPES

V. E. Romanenkov<sup>1</sup>, V. V. Mazyuk<sup>2</sup>, Ya. Ya. Petushik<sup>2</sup>, T. E. Eutukhova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: rom52@mail.ru

<sup>2</sup>Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus, e-mail: mazyuk@tut.by

*An analytical review of the thermophysical characteristics of aluminum heat pipes of various designs, including a capillary structure of aluminum powder, has been performed. It has been shown that the use of a capillary structure in the evaporative part of a heat pipe with a nanostructured component makes it possible to increase the evaporation area and increase the heat transfer characteristics of a heat pipe.*