

К. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО,
к. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ

Дата поступления в редакцию
25.10 1999 г.

Оппонент к. т. н. А. А. ШАПОВАЛ

Украина, г. Киев, Министерство промышленной
политики Украины, НТУУ «Киевский политехнический ин-т»

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ МЕДНЫХ ОБОЛОЧЕК ТЕПЛОВЫХ МИКРОТРУБ

Получены зависимости толщины слоя окисла капиллярной структуры внутри тепловых микротруб от определяющих режимных и геометрических параметров.

Снижение массогабаритных характеристик элементов радиоэлектронной аппаратуры при одновременном увеличении их функциональных возможностей делает актуальной задачу обеспечения заданного температурного режима их работы. В свою очередь применяемые теплопередающие элементы систем охлаждения и термостабилизации должны обладать как можно меньшими массогабаритными характеристиками. С этой целью в последнее время бурно развиваются исследования в области разработки тепловых труб малого размера, так называемых тепловых микротруб [1–3].

Большинство авторов [1–5] относят к тепловым микротрубам те, эквивалентный диаметр корпуса которых не более 6 мм. Однако было бы более корректным в качестве критерия отнесения тепловых труб к микротрубам использовать локальные геометрические характеристики физических процессов, протекающих в них при передаче тепловой энергии из зоны испарения в зону конденсации. Поскольку в зоне испарения происходит процесс кипения, то такой локальной геометрической характеристикой этого процесса может быть капиллярная постоянная [6, с. 144]

$$l_k = \sqrt{s / g(r' - r'')},$$

где s — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;
 g — ускорение свободного падения, м/с²;
 r', r'' — плотность жидкости и пара, соответственно, кг/м³.

В зависимости от свойств теплоносителя и температуры насыщения внутри тепловой трубы значение капиллярной постоянной может находиться в широких пределах (от 0,2 до 10 мм). В связи с этим одна и та же тепловая труба, но заправленная различными теплоносителями и находящаяся при различных температурах окружающей среды, будет в одном случае отнесена к тепловым микротрубам, в другом — к тепловым трубам большого размера.

Если изготовление тепловых труб верхнего диапазона размеров не представляет особых трудностей, то использовать известные технологические приемы при изготовлении тепловых микротруб практически невозможно. Одна из проблем — создание внутри микротруб капиллярной структуры для обеспечения возврата жидкости из зоны конденсации в зону испарения. Существуют различные способы достижения этой цели.

Авторы [1] специальным профилированием внутренней поверхности трубки обеспечивают создание капиллярных канавок по углам квадрата (рис. 1, а). В этих канавках теплоноситель удерживается и капиллярными силами транспортируется в зону испарения. Получение такого внутреннего профиля микротрубок требует соответствующего сложного технологического оборудования.

Разработаны также конструкции тепловых микротруб, где жидкость располагается в канавках либо по углам треугольника (рис. 1, б) [2], либо в углублениях между корпусом трубы и проложенной внутри проволокой (рис. 1, в) [3].

На рис. 1, г показано сечение тепловой микротрубки, корпус которой выполнен из тонкого алюминиевого сплава штамповкой-вытяжкой [7, с. 164; 8, с. 89–90]. Размеры поперечного сечения корпуса составляют 1,5×6 мм. Внутри корпуса, вдоль его широкой стенки, проложен слой капиллярной структуры, который может быть выполнен

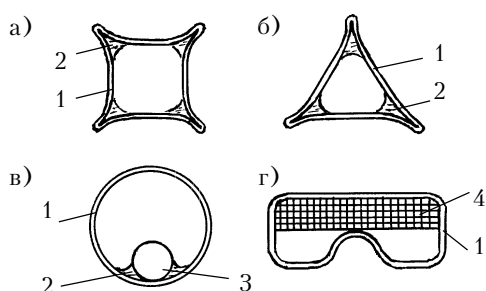


Рис. 1. Виды капиллярной структуры тепловых микротруб: а — капиллярные канавки в углах профилированного квадратного сечения; б — капиллярные канавки в углах профилированного треугольного сечения; в — капиллярные зазоры между внутренней стенкой корпуса круглого сечения и проложенной в нем проволокой; г — слой капиллярно-пористого материала, проложенный вдоль широкой стенки корпуса прямоугольного сечения
1 — корпус, 2 — жидкий теплоноситель, 3 — проволока, 4 — слой капиллярно-пористого материала

из различных капиллярно-пористых материалов (сетки, металлических или стеклянных волокон, спеченных порошков и др.) и пропитан жидким теплоносителем.

В связи с тем, что изготовление рассмотренных капиллярных структур связано со значительными технологическими трудностями, особый интерес представляет поиск новых технологических решений по созданию капиллярных структур в тепловых трубах малого диаметра.

Одним из перспективных представляется способ создания капиллярной структуры на внутренней поверхности медного корпуса тепловой микротрубки путем формирования на ней окисного капиллярно-пористого слоя и последующего его восстановления до основного металла.

При соответствующих режимах термической обработки медная поверхность в окислительной среде покрывается окисным слоем, состоящим из окиси (CuO) и закиси (Cu₂O) меди, обладающих различными температурными коэффициентами расширения [9, с. 29, 31, 53]. Благодаря этому путем создания значительного термического градиента между металлом корпуса и окисным слоем удалось получить соответственно значительные механические напряжения в нем, приводящие к растрескиванию окисного слоя и образованию сети сообщающихся капилляров и пор.

Полученный таким образом окисный слой восстанавливается в восстановительной среде и получается капиллярно-пористая структура определенной толщины, идеально соединенная с корпусом трубы. Толщина такой капиллярно-пористой структуры зависит от толщины окисного слоя, полученного в результате термической обработки.

В [10] проводились технологические исследования по определению влияния температуры и времени на рост медной окисной пленки. Эти эксперименты проводились с целью выявления диапазона режимных параметров, в котором окисная пленка прочно соединяется с основным металлом капиллярной структуры. В выбранных авторами диапазонах времени и температуры максимальное значение толщины окисла достигает чуть более 10 мкм, что недостаточно для формирования капиллярной структуры в тепловых микротрубках.

Целью настоящей работы является определение закономерности роста толщины окисного слоя в медных оболочках тепловых микротруб для создания в дальнейшем на его основе капиллярно-пористой структуры по предложенной технологии.

Изучение кинетики окисления проводилось на медных трубках в диапазоне внутренних диаметров от 3 до 8 мм с толщиной стенки 0,5 мм.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем.

Муфельная печь разогревалась до определенной температуры, которая поддерживалась постоянной в течение всего эксперимента. Далее в печь загружались образцы медных труб, где они окислялись в течение определенного времени (от 15 до 180 мин), после чего охлаждались на воздухе (для сравнения некоторые образцы охлаждались вместе с печью). Остывшие образцы шлифовались с торцов так, что-

бы можно было определить границу между медью и окислом.

Толщину окисла измеряли с помощью инструментального микроскопа БМИ-1 с пятидесятикратным увеличением. Измерения проводились в шести разных местах по периметру трубы с точностью до 5 мкм. Затем находилось среднее арифметическое значение толщины окисного слоя для каждого образца труб. (Все измерения проводились для внутренней поверхности труб.)

Исследования показали, что толщина окисного слоя зависит от многих факторов. К числу определяющих можно отнести время окисления, температуру и геометрические размеры тепловых микротруб. В процессе проведенных исследований не обнаружено влияние длины испытываемых образцов на толщину слоя окисла. Толщина окисла у образцов, охлаждавшихся вместе с печью, была несколько выше, чем у образцов, охлаждавшихся на воздухе. В дальнейшем эти данные не учитывались.

В общем случае зависимость толщины окисла (h) имеет вид

$$h=f(t, \tau, d), \quad (1)$$

где t — температура, °С;

τ — время, с;

d — диаметр, м.

Наиболее значительным фактором оказалась температура окисления: с увеличением ее от 800 до 1000°С толщина окисного слоя увеличивалась в 5—6 раз. Из **рис. 2** видно, что характер зависимости близок к линейному. При этом резкое увеличение толщины окисного слоя с повышением температуры говорит о включении в процесс окисления большего количества металла. Выбранный диапазон температур близок к температуре плавления меди (1083°С), поэтому диффузия кислорода по мере приближения к этой температуре увеличивается. В основном в этом диапазоне образуется окисел Cu₂O. Однако чем дальше от границы металла, тем концентрация металла в окисле снижается, и на внешней границе может существовать слой окисла CuO, который подвержен пористости.

Сопоставляя **рис. 2, а** и **2, б**, можно заметить, что на трубах диаметром 6 мм толщина окисла несколько выше, чем на трубах диаметром 3 мм. Это объясняется тем, что процентное содержание кислорода в трубке с меньшим диаметром меньше из-за большего гидравлического сопротивления.

Время окисления существенно влияет на процесс образования окисла — с его увеличением толщина окисла растет (**рис. 3**). Время окисления равноценно влияет на образование окисла при температуре 900 и 1000°С, что хорошо видно по приблизительно одинаковому углу наклона зависимостей; для температуры 800°С характер зависимости $h=f(\tau)$ имеет другой вид. Прирост толщины окисла в этом случае несколько ниже. Это можно объяснить тем, что по мере приближения к температуре плавления меди постепенно меняется механизм окисления в сторону большего проникновения в ее кристаллическую решетку атомов кислорода.

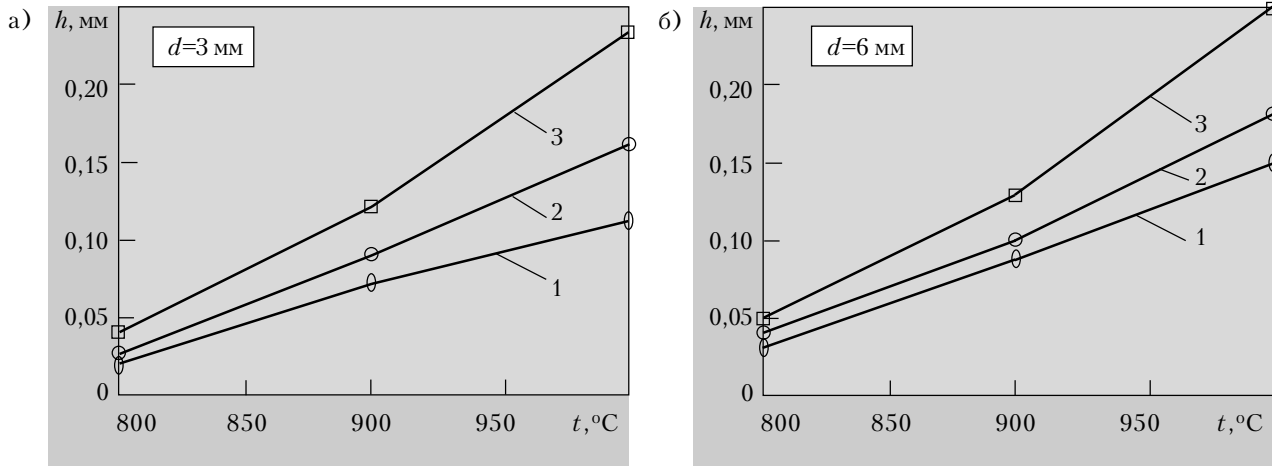


Рис. 2. Зависимость толщины окисного слоя от температуры окисления при различном времени окисления: 1 – 60 мин; 2 – 90 мин; 3 – 180 мин

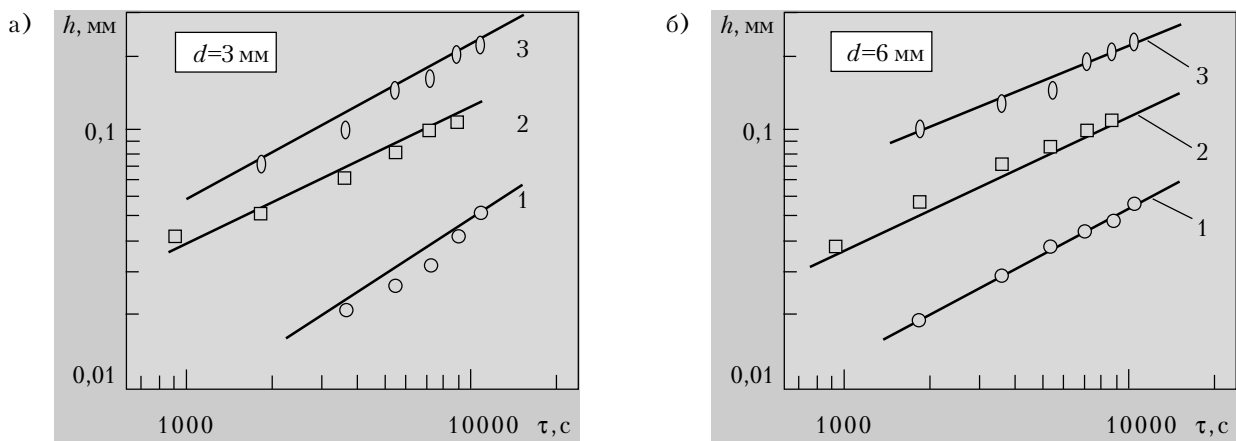


Рис. 3. Зависимость толщины окисного слоя от времени окисления при различной температуре окисления: 1 – 800°C; 2 – 900°C; 3 – 1000°C

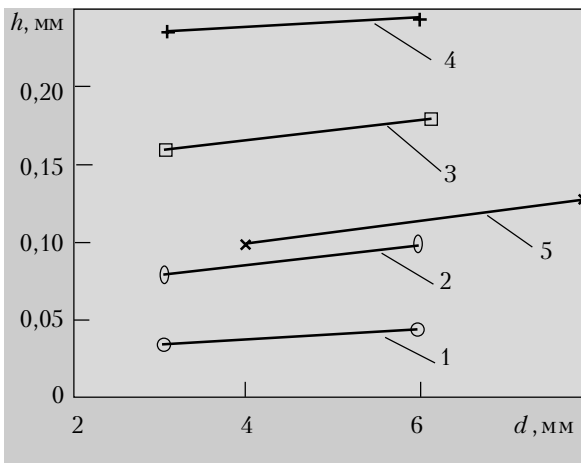


Рис. 4. Влияние диаметра оболочки на толщину окисного слоя при различной температуре окисления:
1, 2 – 800°C; 3, 4 – 1000°C; 5 – 950°C
Время окисления:
1, 3 – 60 мин; 2, 4 – 120 мин; 5 – 30 мин

Обобщая экспериментальные данные и учитывая влияние каждого из определяющих факторов, можно найти зависимость, по которой вычисляется толщина окисла. Толщина окисла на внутренней поверхности труб малого диаметра подчиняется закономерности

$$h = Ct^n \tau^m d^p, \quad (2)$$

где C — постоянный коэффициент.

Из рис. 2 можно определить, что показатель степени при t равен $n=7,4$ и примерно одинаков для всего исследуемого диапазона параметров. Учитывая влияние на толщину окисла диаметров труб (рис. 4), характеризующее показателем степени $p=0,45$, закономерность (2) приводится к виду

$$h = 1,27 \cdot 10^{-27} t^{7,4} \tau^{0,55} d^{0,45}. \quad (3)$$

Эта зависимость обобщает (с разбросом $\pm 20\%$) опытные данные для образцов диаметром 3, 6, 8 и 14 мм и справедлива в диапазоне температур от 800 до 1000°C.

Таким образом, зависимость (3) позволяет рассчитывать толщину окисного слоя на внутренней поверхности медных оболочек тепловых микротруб в зависимости от режимных и геометрических параметров. Дальнейшее получение сети капилляров и пор в окисном слое в результате термического удара и последующее восстановление окислов в чистую медь приводит к образованию капиллярной структуры, соединенной идеальным тепловым контактом с корпусом тепловой трубы.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Zhang Ji., Wang C., Yang X. and Zhou Z. Experimental investigation of the heat transfer characteristics of the micro heat pipes // 8-th International heat pipe conference. — Beijing, China. — 1992. — P. c-p 11, 1—5.
2. Peterson G. P. Investigation of micro heat pipes fabricated as an integral part of silicon wafers // Ibid. — P. c-1, 1—11.
3. Chen H., Groll H. and Rosler S. Micro heat pipes: experimental investigation and theoretical modelling // Ibid. — P. c-3, 1—5.
4. Li T., Cao L., Xiang L. Research and application for the heat transfer performance of small heat pipes // Ibid. — P. b-p 26, 1—3.
5. Cotter T. P. Principles and prospects of micro heat pipes // Proc. 5-th, int. heat pipe conf. — Tsukuba, Japan. — 1984. — P. 328—335.
6. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении. — Киев: Наукова думка, 1980.
7. Борисов В. Ф., Боченков Ю. И., Высоцкий Б. Ф. и др. Конструирование аппаратуры на БИС и СБИС // М.: Радио и связь, 1989.
8. Яшин А. А. Конструирование микроблоков с общей герметизацией. — М.: Радио и связь, 1985.
9. Эванс Ю. Р. Коррозия и окисление металлов. — М.: Машгиз, 1962.
10. Руденко А. И., Нищик А. П. Влияние температурно-временных режимов термообработки на эксплуатационные характеристики окисных пленок применительно к медным капиллярно-пористым структурам // ИФЖ. — 1997. — Т. 70, № 3. — С. 386—389.

ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ В 2000 ГОДУ

1 марта	80 лет назад (1920) в Москве сдана в эксплуатацию Шаболовская радиостанция мощностью в 100 киловатт.
15 марта	70 лет со дня рождения (1930) Ж. И. Алферова, ученого в области физики полупроводников и квантовой электроники.
20 марта	200 лет назад (1800) итальянский ученый А. Вольта в письме президенту Лондонского Королевского общества Д. Бэнкоу сделал сообщение о своем изобретении батареи электрических элементов (вольтов столб) — первого источника постоянного электрического тока, открывшего новую эру в исследовании электричества.
10 апреля	120 лет назад (1880) военный связист Г. Г. Игнатъев продемонстрировал в Киевском университете систему связи с одновременным использованием провода как для телефонной, так и для телеграфной передачи текста.
10 апреля	60 лет со дня рождения (1940) Б. М. Ковальчука, ученого в области сильноточной электроники.
23 мая	175 лет назад (1825) английский изобретатель У. Стёрджен на за-

седании Общества ремесел сделал первое сообщение о созданном им электромагните со стержнем из мягкого железа, обмотанным изолированной медной проволокой.

75 лет назад (1925) открылась первая Всесоюзная радиовыставка в Политехническом музее в Москве, ставшая смотром достижений отечественной радиотехники.

120 лет со времени выхода из печати (1880) первого номера журнала «Электричество».

90 лет со дня рождения (1910) Б. В. Брауде, ученого в области радиотехники, создателя научной школы антенных систем и распространения радиоволн.

125 лет со дня рождения А. И. Тудоровского (1875—1963), ученого в области геометрической оптики и оптической техники, одного из основателей отечественной школы вычислительной оптики и опто-техники.

90 лет со дня рождения (1910) С. В. Вонсовского, ученого в области физики твердого тела, основателя школы по теории магнетизма.

ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ В 2000 ГОДУ