

УДК 621.762.8

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛА ЕСТЕСТВЕННОГО ОТКОСА НЕРЕГУЛЯРНЫХ МЕДНЫХ ПОРИСТЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

В. В. ДОКТОРОВ

*Государственное предприятие «ЦСОТ НАН Беларуси»,
г. Минск*

В. В. МАЗЮК

*Государственное научное учреждение «Институт
порошковой металлургии», г. Минск, Республика Беларусь*

Введение

Максимально допустимая температура эксплуатации многих электронных приборов составляет около 60–80 °С [1]. При этом с развитием электроники и тенденции к миниатюризации приборов повышается плотность теплового потока, выделяющегося при работе полупроводниковых кристаллов. К примеру, процессоры ноутбуков, изготовленных в 1999 г., выделяли в среднем 20 Вт при площади теплоотводящей поверхности около 3 см² [2], [3]. Процессоры, изготовленные в 2000 и 2001 гг., выделяли 27 и 30 Вт, соответственно [4]. При этом наблюдается рост данного показателя до величины около 100 Вт [5]–[7]. В качестве другого примера можно привести плотность теплового потока приборов силовой электроники, непрерывно возрастающую и для некоторых видов тиристоров достигающую уже 300 Вт/см² [8].

Для охлаждения электронных приборов с учетом требований миниатюризации все более широкое применение находят миниатюрные тепловые трубы с наружным диаметром 3–7 мм [9], [10]. Порошковые капиллярные структуры (ПКС) миниатюрных тепловых труб способны обеспечить передачу теплового потока ~ 30 Вт при тепловом сопротивлении 0,2–0,25 К/Вт.

Цель работы – выявить основные закономерности в формировании угла естественного откоса нерегулярных медных пористых капиллярных структур тепловых труб.

Регулярные и нерегулярные пористые структуры

Понятие нерегулярности пористой структуры было введено А. Г. Косторновым по отношению к тонким слоям фильтрующих пористых материалов [11]–[14]. Использование данной характеристики для пористых материалов связано с тем, что измерение структурных свойств (пористость, средний и максимальный размеры пор) тонкого слоя пористого материала дает результаты, отличные от аналогичных для большого объема пористого материала, изготовленного из того же исходного порошка при тех же технологических параметрах. Схематичное представление регулярной и нерегулярной пористых структур приведено на рис. 1 [12].

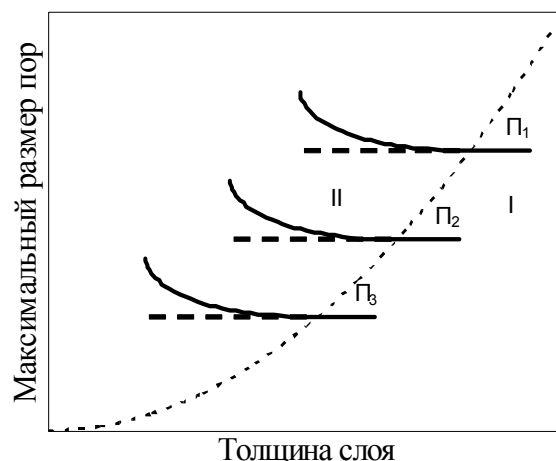


Рис. 1. Схема областей регулярности (I) и нерегулярности (II) пористой структуры порошкового материала при различных значениях пористости Π ($\Pi_1 > \Pi_2 > \Pi_3$)

В области регулярной структуры I (достаточно большие толщины) пористый материал характеризуется вполне определенным («равновесным») максимальным размером пор. При уменьшении толщины слоя пористого материала происходит смещение в область нерегулярной структуры, где измеренный максимальный размер пор (а также средний размер пор и пористость) оказываются большими по сравнению с регулярной областью.

Для количественной характеристики нерегулярности пористой структуры используется коэффициент регулярности [11]:

$$C = \frac{D_{\max}^{\text{равн}}}{D_{\max}}$$

где $D_{\max}^{\text{равн}}$ – равновесный максимальный размер пор в материале при толщине слоя больше критической, м; D_{\max} – измеренное значение максимального размера пор тонкого слоя пористого материала, м.

Максимальное значение коэффициента регулярности равно единице при структуре материалов, соответствующей области I. В области II значение коэффициента регулярности C меньше единицы, и чем оно меньше, тем более нерегулярной является пористая структура.

В работе [13] отмечается, что регулярность является важной количественной характеристикой пористой структуры. Она во многом определяет такие требования, предъявляемые к пористым материалам, как высокая проницаемость при необходимой тонкости очистки и равномерность распределения пор по всей фильтрующей поверхности. В этой же работе исследовано влияние толщины пористого порошкового материала на регулярность пористой структуры. Сделан вывод о том, что регулярность пористой структуры всецело зависит от гранулометрического состава порошка и толщины слоя. При этом, чем крупнее порошок, тем при большей толщине достигается полная регулярность. Установлено, что для капиллярного порошкового материала регулярность пористой структуры, характеризуемая параметром C , близким к единице, достигается при толщине образца, состоящего из 20–24 частиц порошка.

Одной из важных характеристик, используемых в технологии порошковой металлургии свободнонасыпанных материалов, является угол естественного откоса.

Он определяет максимально возможный угол наклона свободнонасыпанных заготовок. Для регулярных структур этот параметр исследован достаточно полно. Однако в процессе изготовления тонких ПКС тепловых труб методом свободной насыпки нередко наблюдается ситуация, когда малая толщина ПКС не позволяет ее рассматривать как регулярную. В связи с этим представляет интерес исследование зависимости угла естественного откоса свободнонасыпанного медного порошка от степени неоднородности навески.

Методика эксперимента

Угол естественного откоса тонких слоев свободнонасыпанного порошка определялся следующим образом. На фрезерном станке на медном бруске были выточены параллельные каналы полукруглого сечения радиусом 2, 2,5, 4, 8, 12 мм. Предполагается, что, чем меньше диаметр канала, тем больше неоднородность порошка внутри.

На торцах каналов были установлены медные пластины для предотвращения преждевременного высыпания порошка из торца канала при углах наклона, меньших, чем угол естественного откоса. Действительно, если торцевые пластины не установлены, то при наклоне бруска порошок в нижнем торце канала находится под большим углом к горизонту, чем порошок, расположенный по длине канала. В результате на нижнем торце осыпание порошка начнется при углах наклона, меньших, чем угол естественного откоса.

В каналы полукруглого сечения засыпался медный порошок ПМС-К различных фракций. Далее изменялся угол наклона бруска по отношению к горизонту. Значение угла определялось транспортиром с ценой деления 1°. Значение угла естественного откоса фиксировалось по началу «сползания» находящегося в каналах порошка.

Результаты эксперимента

Результаты эксперимента по исследованию зависимости угла естественного откоса от радиуса канала для различных порошков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость угла естественного откоса от радиуса канала

Радиус, мм	Угол естественного откоса, град		
	ПМС-К, 50–100 мкм	ПМС-К, 100–200 мкм	Кварцевый песок, 100–200 мкм
2	64 ± 1	56 ± 1	50 ± 1
2,5	61 ± 1	52 ± 1	48 ± 1
4	55 ± 1	50 ± 1	46 ± 1
8	54 ± 1	49 ± 1	45 ± 1
12	53 ± 1	47 ± 1	45 ± 1

Из результатов эксперимента следует, что с уменьшением толщины канала угол естественного откоса возрастает. Причем этот эффект начинает проявляться при толщине канала от 10 до 40 средних диаметров частиц, когда свободнонасыпанная структура сохраняет регулярность. Следовательно, для нерегулярных структур в каналах угол естественного откоса превышает этот показатель для регулярных структур. Однако этот эффект возникает, по-видимому, не благодаря регулярности, а вопреки ей. Так, наличие регулярной упаковки частиц порошка является следствием минимизации энергии навески. Регулярная структура является более устойчивой, чем нерегулярная. Следовательно, чтобы частица на поверхности регулярной структуры пришла в движение, требуется больший угол наклона, чем в случае нерегуляр-

ной структуры. Поэтому наблюдаемое на опыте увеличение угла естественного откоса в тонких каналах следует, по-видимому, связать с возрастанием силы трения покоя, действующей на частицы порошка в канале, а влияния нерегулярности недостаточно, чтобы компенсировать это возрастание.

Здесь обратим внимание, что наблюдаемые свойства «тонких» навесок могут отличаться от свойств навесок «больших объемов» не только из-за нерегулярности, но и под воздействием других факторов.

Из результатов проведенных исследований можно сделать важный для практики вывод, что при формировании капиллярных структур миниатюрных тепловых труб допустим наклон неспеченных заготовок нерегулярных ПКС на угол, равный углу естественного откоса регулярных порошковых навесок (более того, наблюдается не большое превышение допустимых значений угла наклона).

Заключение

В тонких каналах радиуса 2–4 мм угол естественного откоса свободнасыпанных порошков возрастает на 1–10° по сравнению с углами естественного откоса «больших объемов» свободнасыпанного порошка. Этот эффект объясняется, по-видимому, увеличением влияния силы трения на частицы порошка, а не нерегулярностью структуры, которая возникает при уменьшении размеров навески.

Литература

1. Fantozzi, F. Miniature pulsated loop thermosyphon for desktop computer cooling: feasibility study and first experimental tests / F. Fantozzi, S Fillipeshi, E. Laftoza // Heat pipes, heat pumps, refrigerators : proc. of 5-th int. seminar, Minsk, Sept., 8–11, 2003 / Heat and mass transfer institute ; editors: L. Vasiliev [et al.]. – Minsk, 2003. – P. 54–62.
2. Chang, C. S. Feasibility study of a mini LHP for CPU cooling of a notebook PC / C. S. Chang, B. J. Huang, Yu. F. Maidanik // Heat pipes. Science. Technology. Application : proc. of 12-th int. heat pipe conference, Moscow – Kostroma – Moscow, May, 19–24, 2002 / Russian Academy of sciences, Institute of thermal physics ; editors: Yu. F. Maidanik [et al.]. – Moscow – Kostroma – Moscow, 2002. – P. 390–393.
3. Kim, K–S. Heat pipe cooling technology for desktop PC CPU / K–S. Kim, M–H. Won, J–W. Kim // Heat pipes. Science. Technology. Application : proc. of 12-th int. heat pipe conference, Moscow – Kostroma – Moscow, May, 19–24, 2002 / Russian Academy of sciences, Institute of thermal physics ; editors: Yu. F. Maidanik [et al.]. – Moscow – Kostroma – Moscow, 2002. – P. 398–401.
4. Thermal performance of heat sink with screen wick heat pipe at top heating mode / K.–W. Lee [et al.] // Heat pipes. Science. Technology. Application : proc. of 12-th int. heat pipe conference, Moscow – Kostroma – Moscow, May, 19–24, 2002 / Russian Academy of sciences, Institute of thermal physics ; editors: Yu. F. Maidanik [et al.]. – Moscow – Kostroma – Moscow, 2002. – P. 402–406.
5. Development of folder fin heat sink with solid base and vapor chamber / M. Mochizuki [et al.] // Heat pipes. Science. Technology. Application : proc. of 12-th int. heat pipe conference, Moscow – Kostroma – Moscow, May, 19–24, 2002 / Russian Academy of sciences, Institute of thermal physics ; editors: Yu. F. Maidanik [et al.]. – Moscow – Kostroma – Moscow, 2002. – P. 369–372.
6. Advanced cooling system in personal computer using heat pipes / M. Mochizuki [et al.] // Proc. of 3-rd heat pipe workshop, Daehong, Korea, April, 20–21, 2001 / Korea institute of energy research ; editors: K.–W. Lee [et al.]. – Daehong, 2001. – P. 11–16.

7. Shyu, R.–J. Heat pipe experiences at energy and resources laboratories / R.–J. Shyu // Proc. of 3-rd heat pipe workshop, Daehong, Korea, April, 20–21, 2001 / Korea institute of energy research ; editors: K.–W. Lee [et al.]. – Daehong, 2001. – P. 63–73.
8. Maziuk, V. V. Arterial Miniature Heat Pipes / V. V. Maziuk // Heat pipes, heat pumps, refrigerators : proc. of 5-th int. seminar, Minsk, Sept., 8–11, 2003 / Heat and mass transfer institute ; editors: L. L. Vasiliev [et al.]. – Minsk, 2003. – P. 399–404.
9. Baturkin, V. Elaboration of thermal control systems on the base of heat pipes for micro satellites Magion 4,5 and BIRD / V. Baturkin, S. Zhuk // Heat pipes. Science. Technology. Application : proc. of 12-th int. heat pipe conference, Moscow – Kostroma – Moscow, May, 19–24, 2002 / Russian Academy of sciences, Institute of thermal physics ; editors: Yu. F. Maidanik [et al.]. – Moscow – Kostroma – Moscow, 2002. – P. 264–269.
10. Chen, Y. M. Thermal performance of sintered miniature heat pipes / Y. M. Chen, C. I. Wu, C. I. Chi // Heat and mass transfer. – 2001. – № 37. – P. 613–616.
11. Косторнов, А. Г. Количественные критерии пористой структуры проницаемых волоконных материалов / А. Г. Косторнов // Порошковая металлургия. – 1977. – № 4. – С. 80–87.
12. Косторнов, А. Г. Параметры пористой структуры проницаемых волоконных материалов. 1. Теоретические предпосылки и модельные исследования / А. Г. Косторнов // Порошковая металлургия. – 1978. – № 4. – С. 34–40.
13. Косторнов, А. Г. Параметры пористой структуры проницаемых волоконных материалов. 2. Материалы из металлических волокон / А. Г. Косторнов // Порошковая металлургия. – 1978. – № 5. – С. 63–68.
14. Регулярность структуры пористых материалов из порошка бронзы / Р. П. Тодоров [и др.] // Порошковая металлургия. – 1986. – № 3. – С. 31–33.

Получено 18.10.2016 г.