

УДК 621.91.01+536.248.2

Исследование капиллярного давления медных фитильных структур тепловых труб, получаемых деформирующим резанием

Зубков Николай Николаевич

zoubkovn@mail.ru

SPIN-код: 7830-7179

Гроссман Мария Фадеевна

ffomacha@gmail.com

SPIN-код: 8569-2387

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрен метод деформирующего резания для формирования капиллярно-пористых структур из меди марки М2. Приведены технологические параметры получения микрооребранных поверхностей. Разработана методика и проведено экспериментальное исследование развиваемого капиллярного давления дистиллированной воды и этилового спирта на изготовленных образцах. Анализ литературных источниками показал, что структуры, полученные методом деформирующего резания, демонстрируют сопоставимые и превосходящие характеристики по развиваемому капиллярному давлению в сравнении с капиллярно-пористыми фитильными структурами из сеток, спеченных порошков и волокон.

Ключевые слова: тепловая труба, деформирующее резание, капиллярно-пористая структура, фитиль, капиллярное давление

The research of capillary pressure of copper wick structures of heat pipes obtained by deforming cutting

Zubkov Nikolai Nikolaevich

zoubkovn@mail.ru

SPIN-code: 7830-7179

Grossman Maria Fadeevna

ffomacha@gmail.com

SPIN-code: 8569-2387

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The method of deformation cutting for the formation of capillary-porous structures made of copper grade M2 is considered. The technological parameters of obtaining micro-finned surfaces are given. A technique has been developed and an experimental study of the capillary pressure of distilled water and ethanol on the manufactured samples has been carried out. An analysis of the literature sources has shown that the structures obtained by deformational cutting demonstrate comparable and superior characteristics in terms of capillary pressure in comparison with capillary-porous wick structures made of meshes, sintered powders and fibers.

Keywords: heat pipe, deformational cutting, capillary-porous structure, wick, capillary pressure

Введение. Для современных теплотехнических систем в области электроники и вычислительной техники, растет потребность в эффективном отводе тепла от высокоинтенсивных источников энергии. В условиях повышения тепловых нагрузок, миниатюризации устройств и ограниченного пространства традиционные методы охлаждения, такие как принудительное конвективное воздушное охлаждение и водоблоки жидкостного охлаждения имеют недостаточную эффективность, а также сложность технической реализации при пространственном удалении источника тепла и радиатора для его сброса. Данная проблема решается устройствами передачи тепловых потоков на основе тепловых труб (ТТ), работающих на принципе фазовых переходов (испарение-конденсация). Наиболее наглядным примером использования таких устройств, являются тепловые трубы, которые входят неотъемлемой частью в конструкцию любого ноутбука, когда невозможно разместить кулер охлаждения непосредственно рядом с процессором компьютера.

Современные ТТ (рис. 1) представляют собой герметичный корпус (металлическую оболочку) 4 с капиллярной структурой (КС) 5, рабочей жидкостью, испаряемой в зоне нагрева 1 и конденсируемой в зоне охлаждения 7. Это позволяет эффективно передавать тепловые потоки на значительные расстояния практически без потерь. При превышении зоны нагрева над зоной сброса тепла необходим возврат конденсата против сил гравитации. Для этого используется капиллярный эффект фитильных структур. Чем выше капиллярное давление, развиваемое фитильной структурой, тем больше может быть превышение зоны нагрева над зоной сброса тепла.

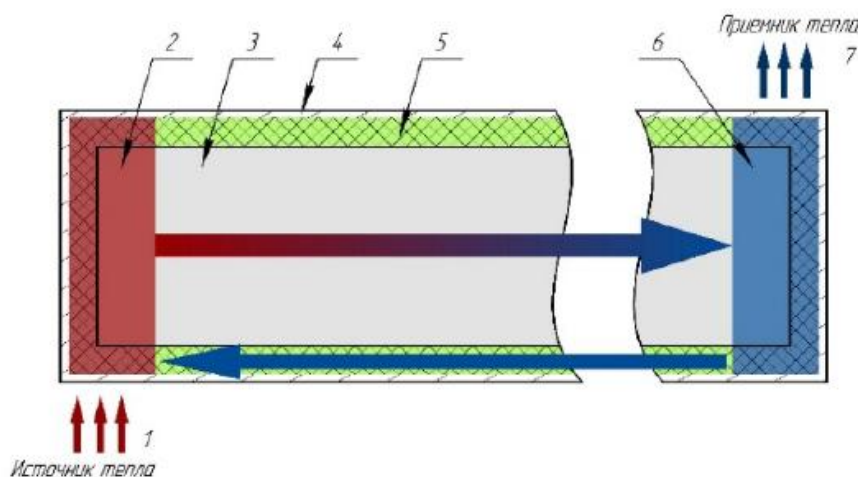


Рис. 1. Принцип работы тепловой трубы

КС играет ключевую роль в обеспечении эффективной и стабильной работе ТТ, поскольку именно КС определяет эффективность транспорта рабочей жидкости из зоны конденсации к зоне нагрева. Эффективность КС определяется рядом параметров, наиболее важными из которых являются жидкостная проницаемость и высота капиллярного поднятия (давления). Крупные поры обеспечивают высокую проницаемость, но не обеспечивают

достаточного капиллярного давления, мелкие поры дают высокое капиллярное давление, но при этом значительно ограничивают расходы потока жидкости. Необходимо достижение оптимального значения между рассматриваемыми характеристиками. Таким образом, исследование новых методов получения КС с управлением их транспортных характеристик является актуальной задачей для повышения эффективности ТТ.

Традиционно КС используют одно- и многослойные сетки, а также изготавливаются методами спекания металлических порошков и волокон. Альтернативным методом является метод деформирующего резания (ДР), разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана, позволяющий формировать микрорельеф в виде оребрения с управляемыми геометрическими параметрами. Метод ДР основан на подрезании слоев обрабатываемой заготовки и целенаправленном пластическом деформировании подрезанного слоя (рис. 2) [1]. Совокупность частично отделенных от заготовки 2 слоев образует микрорельеф в виде оребрения 3. В отличие от сеток и спеченных структур, прямолинейность каналов межреберного пространства обеспечивает низкое гидравлическое сопротивление.

Фактором, определяющим развиваемое фитильной структурой капиллярное давление, является ширина межреберного зазора b , которая при обработке методом ДР может составлять от 5 мкм, при высоте структуры h до одного миллиметра.

Для металлов, применяемых в качестве корпуса ТТ, площадь поверхности после обработки ДР увеличивается до 12 раз [2], что также является важным для интенсификации испарения теплоносителя в зоне нагрева и конденсации его паров в зоне сброса тепловых потоков.

В отличие от сборных сетчатых конструкций КС или КС из спеченных порошков и волокон, капиллярные структуры могут быть выполнены непосредственно на внутренней поверхности корпуса ТТ, т. е. формировать так называемый конструкционный тип КС.

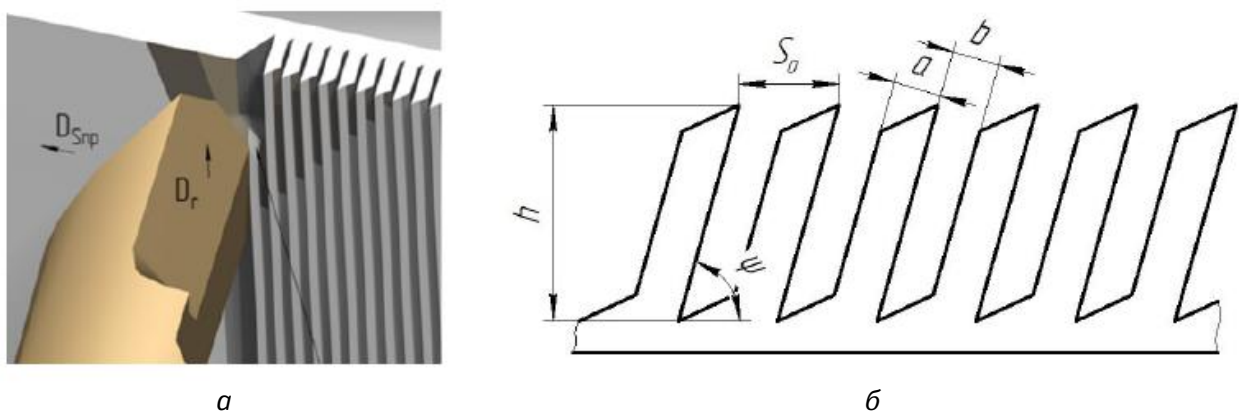


Рис. 2. *а* — схема получения оребрения методом деформирующего резания: 1 — резец; 2 — обрабатываемый материал; 3 — полученное оребрение; *б* — профиль получаемого оребрения: h — высота структуры; S_0 — шаг ребер; φ — угол наклона ребра; a — ширина ребра; b — ширина межреберного зазора

Метод ДР позволяет формировать капиллярное оребрение на тонколистовых материалах и лентах. В дальнейшем, лента формуется в трубу (рис. 3), края ленты свариваются или спаиваются, торцы герметизируются, образуя тепловую трубу при заполнении межреберного зазора рабочей жидкостью [3].

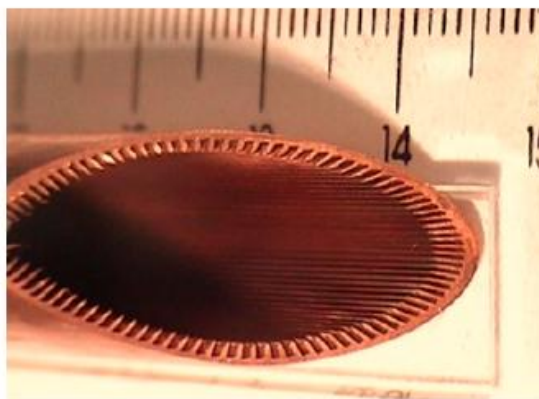


Рис. 3. Косой срез капиллярной структуры тепловой трубы конструкционного типа, изготовленной методом деформирующего резания

Цель исследования — экспериментально оценить капиллярные характеристики по величине капиллярного давления медных КС, получаемых методом ДР для определения оптимальных геометрических параметров оребрения.

Материалы и методы. В качестве исследуемого материала была выбрана медь как материал для формирования КС ТТ, обладающий высокой теплопроводностью (390 Вт/мК) и широко используемый в тепловых трубах, при этом совместимый с большинством теплоносителей [4].

Образцы, представляющие собой оребренные пластины из меди М2, были получены методом ДР на полосах толщиной 0,35 мм, длиной 450 мм и шириной 60 мм. Полосы закреплялись на токарно-винторезном станке 1Е61МТ с помощью специального приспособления в виде барабана (рис. 3).

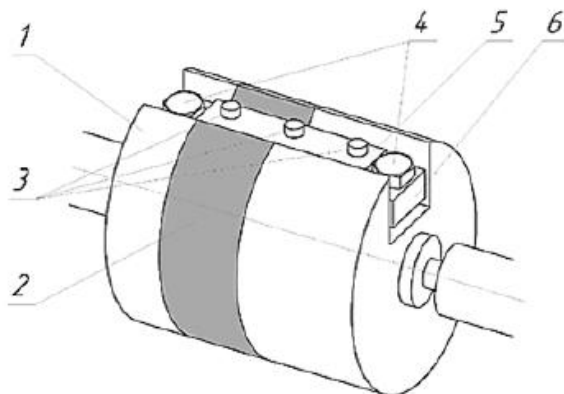


Рис. 3. Приспособление для обработки лент методом ДР

После установки на токарный станок барабан 1 протачивался для устранения биений базовой поверхности. Обрабатываемая полоса 2 зажималась винтами 3 между зажимной 5 и натяжной 6 планками. После этого винтами 4 производилось натяжение обрабатываемой полосы на барабан. Глубина резания t устанавливалась от касания вершины резца поверхности ленты, натянутой на барабан.

Микрооребрение формировалось при постоянной скорости резания $V = 1$ м/с, глубине резания $t = 0,24$ мм, варьировании подачи S_0 от 0,12 до 0,2 мм/об.

Углы инструмента после его заточки представлены в табл. 1.

После обработки ДР из полученной полосы вырезались образцы шириной 10 мм и длиной 50 мм. Фотографии поперечных срезов полученных капиллярных структур в виде микрооребрения и их геометрические параметры представлены в табл. 2.

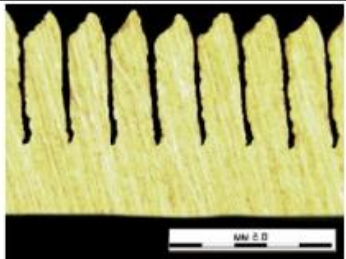
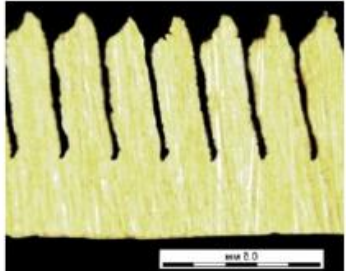
Таблица 1

Затачиваемые угловые параметры инструмента для ДР

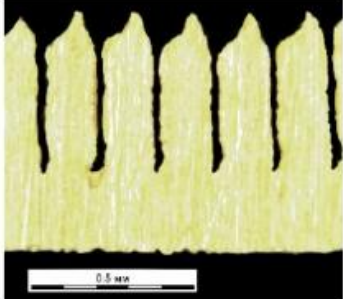
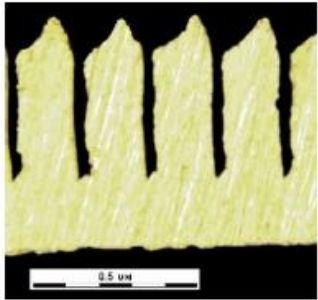
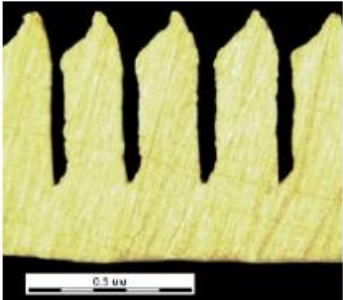
Параметр	Градус, °
Передний угол γ	46,8
Главный задний угол α	3,0
Главный угол инструмента в плане (угол подрезания) ϕ	37,9
Угол наклона главной режущей кромки λ	53,8
Передний угол на вспомогательной (деформирующей кромке) γ_1	–60,0
Вспомогательный задний угол α_1	3,0
Вспомогательный угол инструмента в плане (угол отгибки) ϕ_1	90,0

Таблица 2

Геометрические параметры капиллярных структур

№	Шаг структуры, мм	Высота структуры, мм	Ширина межреберного зазора, мкм	Фотография структуры
1	0,12	0,83	38	
2	0,14	0,91	48	

Окончание табл. 2

№	Шаг структуры, мм	Высота структуры, мм	Ширина межреберного зазора, мкм	Фотография структуры
3	0,16	0,99	53	
4	0,18	0,97	71	
5	0,20	1,0	80	

Испытания проводились для двух жидкостей: дистиллированной воды и этанола. Данные теплоносители широко используются для среднетемпературных ТТ [3].

Для обеспечения герметичности и однородности проведения испытаний образцы собирались в рабочий участок. Рабочий участок (рис. 5) для проведения гидравлических испытаний состоял из испытуемого образца 1, сжатого двумя половинами фторопластового стержня, разрезанного вдоль 3. Сжатие проводилось термоусадочной трубкой с дополнительной обжатием тремя хомутами 5. Для соединения рабочего участка с элементами установки использовались подводящие и отводящие силиконовые трубки 2.

При проведении испытаний на капиллярное давление (рис. 6), образец 2 равномерно поднимался вертикально из исходного положения 3, находящегося на одной высоте с уровнем жидкости в емкости до визуального обнаружения (проскока) пузырька воздуха 4, после чего производился замер высоты поднятия образца над уровнем жидкости в емкости. Разность высот соответствовала капиллярному давлению, развиваемому структурой испытуемого

образца. Каждый образец проверялся на величину капиллярного давления трижды для каждого типа рабочей жидкости, порядок испытаний рандомизировался.

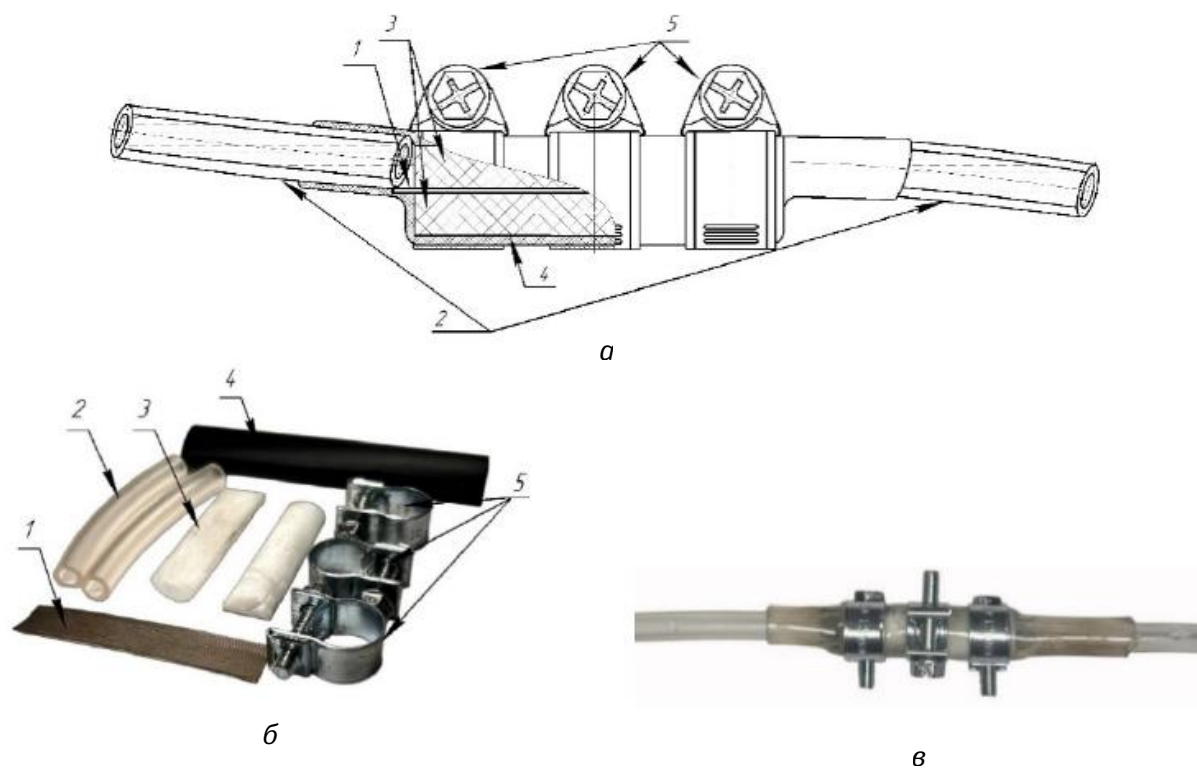


Рис. 5. Рабочий участок в сборе для проведения испытаний:
 а — схема рабочего участка в сборе; б — компоненты рабочего участка; в — рабочий участок в сборе

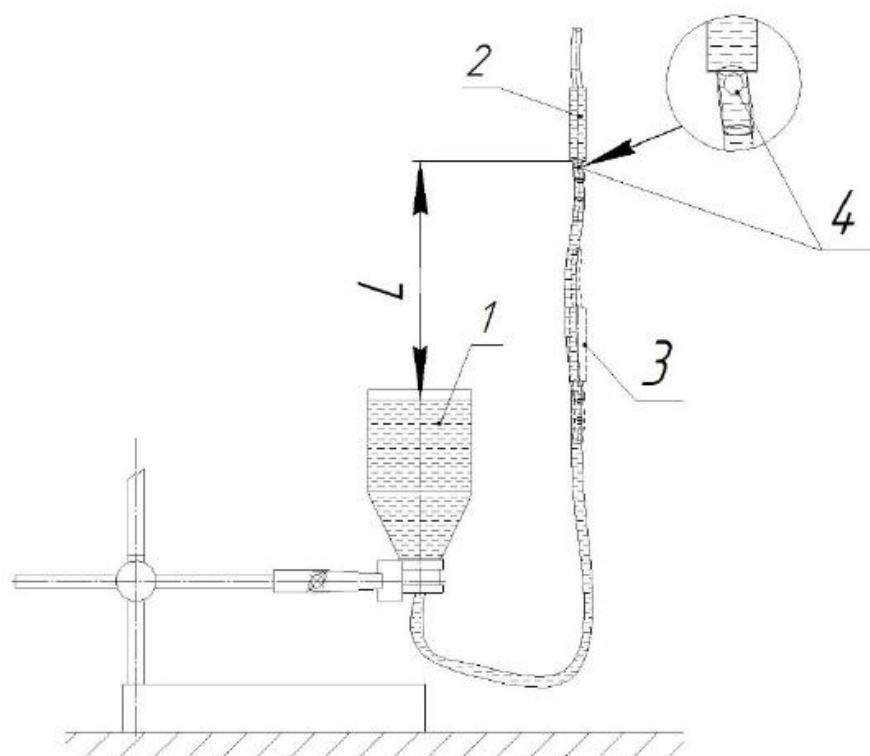


Рис. 6. Определение величины капиллярного давления по проскоку пузырька воздуха:
 1 — емкость; 2 — рабочий участок; 3 — исходное положение образца; 4 — пузырек воздуха

Результаты и обсуждение. Результаты испытаний в виде графиков зависимости капиллярного давления от ширины межреберного зазора для дистиллированной воды и этанола представлены на рис. 7.

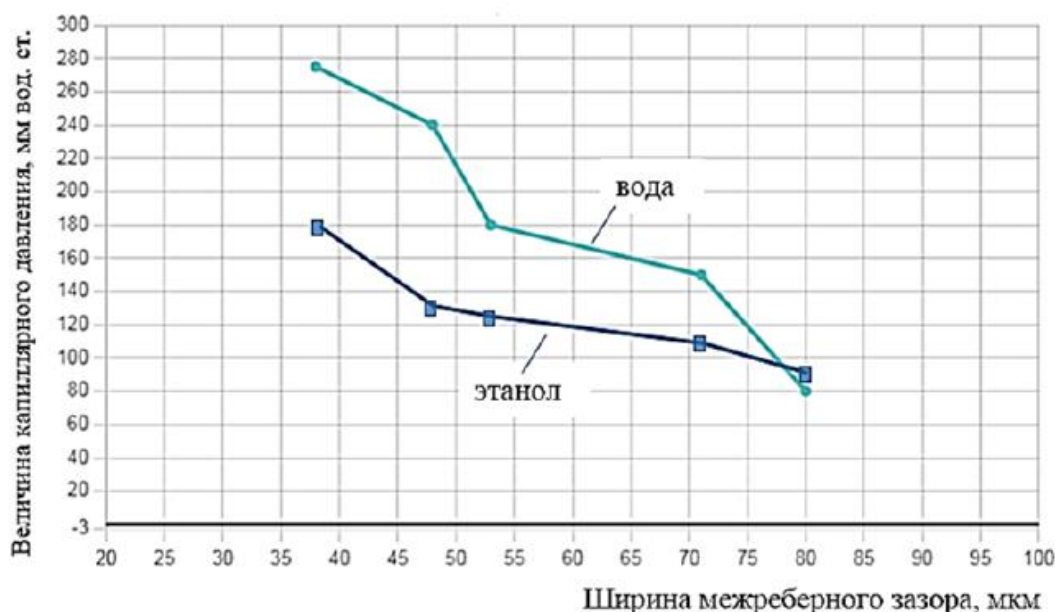


Рис. 7. Зависимость капиллярного давления от ширины межреберного зазора для дистиллированной воды и этанола

С целью оценки эффективности полученных КС методом ДР был проведен анализ высоты капиллярного поднятия, представленного в литературных источниках (табл. 3), по КС различных типов.

Таблица 3

Сравнение развиваемого капиллярного давления по воде с литературными источниками

Тип пористой структуры	Материал структуры	Пористость, %	H , мм	Источник
Спеченные волокна	Никель	82,5	405	5
	Сталь 12X18H10T	91,6	155	
		80,8	226	
		82,2	135	
Сетчатая	Никель	67,6	234	6
Спеченый порошок	Никель	69,6	175	
Спеченные волокна	Медь	80,0	362	
Сетчатая	Сталь 12X18H10T	—	79	

Окончание табл. 3

Тип пористой структуры		Материал структуры	Пористость, %	H, мм	Источник
Спеченные волокна		Медь	59,0	311	7
Сетчатая		Сталь 12X18H10T	69,0	199	
Спеченные волокна		Никель	85,0 80,0	226 305	8
Спеченные волокна		Медь	80,0	163	
Сетчатая		Никель	60,0	127	
Микрооребренная, полученная деформирующим резанием	№ 1	Медь	31,6	275	—
	№ 2		34,3	240	
	№ 3		33,1	180	
	№ 4		39,4	150	
	№ 5		40,0	80	

Анализ данных, приведенных в табл. 3, позволяет отметить, что полученные методом ДР медные структуры демонстрируют сопоставимые и превосходящие характеристики в сравнении с КС полученными традиционными методами. Максимальный коэффициент капиллярного давления у образцов, полученных методом ДР, достигает 275 мм вод. ст.

Заключение. Проведенные эксперименты подтвердили, что структуры, формируемые методом ДР, обеспечивают стабильное формирование оребрения с заданной геометрией и позволяют получать капиллярные зазоры в диапазоне от 22 до 80 мкм, что критически важно для управления капиллярным давлением и проницаемостью. С уменьшением ширины межреберного зазора капиллярное давление возрастает, достигая максимальных значений при минимальных зазорах (до 275 мм вод. ст.). Сравнительный анализ с литературными данными показал, что конструкционный тип капиллярной структуры, полученный методом ДР, по капиллярному давлению не уступает, а в ряде случаев превосходит традиционные пористые фитильные структуры (волокнистые, порошковые и сетчатые). Метод ДР, благодаря своей технологичности, управляемости геометрических параметров микрорельефа, повторяемости результатов и отсутствию термической обработки (как при спекании порошковых и волокнистых структур), может быть рекомендован как перспективный способ получения капиллярно-пористых структур конструкционного типа для использования в тепловых трубах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Зубков Н.Н. Совмещение процессов резания и обработки давлением в новом методе формообразования развитых поверхностных структур. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2002, № 10, с. 17–20.
- [2] Thors P., Zoubkov N. *Heat transfer tube including enhanced heat transfer surfaces*. Patent № 7311137 USA, 2004.
- [3] Zubkov N., Yakomaskin A. Microgrooved Wicks for heat pipes made by edge cutting machining. *Heat pipes for space application. Proceedings of Second International Conference*. Wiyhout a publisher, 2014, no. 5.8.
- [4] Zhang Y. *Heat pipes: design, applications and technology*. Nova Science Pub., 2018, 492 p.