

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ ШТЫРЬКОВЫХ СТРУКТУР НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Н.Н. Зубков

zoubkovn@bmstu.ru

Ю.Л. Битюцкая

jil_j@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Формирование на поверхности теплосъемных пластин развитых структур штырькового типа — перспективный способ повышения их эффективности. Актуальной задачей является выбор оптимальных параметров штырьков и их взаимного расположения. Рассмотрен метод деформирующего резания для получения штырьковых структур. Приведена методика и результаты сравнительных испытаний на конвективный теплообмен на стенде, имитирующем работу системы жидкостного охлаждения. Рассмотрено влияние плотности расположения штырьков в структуре, формы штырьков, их вертикальности и направления течения теплоносителя на температуру охлаждаемого элемента и гидравлическое сопротивление структуры. Установлено, что наилучшие эксплуатационные характеристики имеет структура с плотностью расположения порядка 70 штырьков на каждом квадратном сантиметре. Наилучшие показатели получены для вертикальных игольчатых штырьков

Ключевые слова

Штырьковые структуры, теплосъемная пластина, конвективный теплообмен, деформирующее резание, жидкостное охлаждение

Поступила в редакцию 27.04.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-08-00489), а также Министерства образования и науки Российской Федерации.

Эффективный способ повышения производительности систем жидкостного охлаждения (СЖО) — применение развитых штырьковых поверхностей для оснований водоблоков. Теплосъемники штырькового типа являются наиболее перспективными и получили широкое распространение для охлаждения электронной, сильноточной аппаратуры и др. [1, 2].

Среди многочисленных методов формирования массива штырьков метод деформирующего резания (ДР) обеспечивает возможность высокопроизводительного получения структур с площадью поверхности, превышающей исходную в 7–10 раз [3]. Для формирования штырьковой структуры плоскость заготовки обрабатывают методом ДР за два прохода (рис. 1): на первом проходе ($D_{Г1}$) формируется оребренная поверхность, а на втором ($D_{Г2}$) полученные ребра перерезаются под некоторым углом [4].

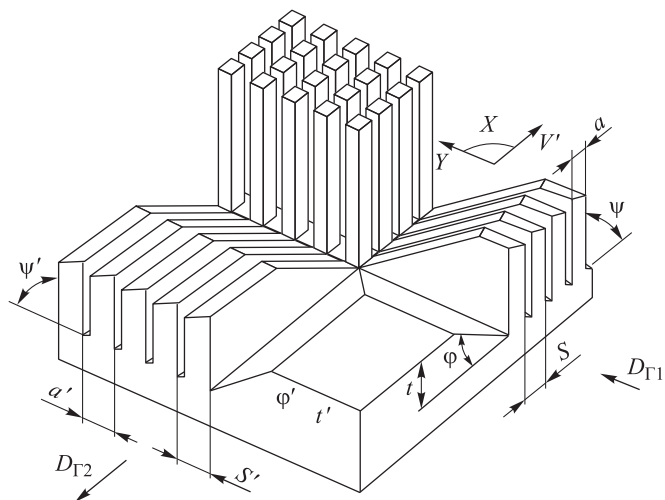


Рис. 1. Теоретическая схема формирования штырьков методом ДР [4]

Параметры штырьковой структуры такие, как шаг расположения штырьков, их высота, форма, наклон и другие, определяют ее эксплуатационные характеристики. Многие параметры зависят от режимов процесса ДР и могут быть изменены в некоторых диапазонах. На практике при перерезании ребер, полученных на первом проходе, форма штырька не совпадает с теоретической (см. рис. 1). Штырьки изгибаются или закручиваются вокруг своей оси. В связи с многообразием форм и геометрических параметров штырьков, получаемых методом ДР, возникает необходимость выбора структуры, выполняющей функции охлаждения наилучшим образом. Основным требованием к структуре является обеспечение наиболее эффективного отвода теплоты от охлаждаемого элемента. Другая важная характеристика — низкое гидравлическое сопротивление для снижения потерь на прокачку теплоносителя. Цель настоящей работы — определение параметров развитой структуры штырькового типа теплосъемной пластины, обеспечивающих наибольший коэффициент теплоотдачи при невысоком гидравлическом сопротивлении.

Методика проведения испытаний. Выбор оптимального сочетания параметров структуры осуществлялся путем проведения сравнительных испытаний образцов. Первые испытания на конвективный теплообмен штырьковых структур, полученных методом ДР, приведены в работе [3], где доказана их эффективность и обоснована возможность применения для охлаждения электронной аппаратуры.

Основные методические особенности проведения испытаний штырьковых структур, представленные в настоящей статье, рассмотрены в работе [5]. Испытания проводились в условиях, приближенных к реальным условиям работы водоблока с постоянными техническими характеристиками СЖО и мощностью охлаждаемого элемента. В качестве основных оптимизируемых параметров были выбраны плотность расположения и вертикальность штырьков в структуре и их форма. Оптимальные значения требуемых параметров находили за несколько серий испытаний в соответствии со следующим планом.

1. Определение структуры с оптимальной плотностью расположения штырьков.
2. Определение структуры с оптимальной формой штырьков.
3. Уточнение угла встречи для оптимальной формы штырьков.
4. Определение влияния вертикальности структуры.
5. Определение влияния направления течения теплоносителя.

Образцы с требуемыми характеристиками получали путем перебора режимных параметров первого и второго проходов (глубины резания $t_{1,2}$, подачи $S_{1,2}$) и угла встречи θ при их изготовлении. В рамках одной серии испытаний все образцы изготавливались с одинаковым коэффициентом увеличения площади поверхности, что позволило исключить этот параметр из рассмотрения.

Испытания проводились на дисках из меди М1 диаметром 40 мм толщиной 6...10 мм с развитой поверхностью штырькового типа, полученной методом ДР, на одной из сторон образца. Параметры образцов и угол ϕ в плане инструмента, которым были получены штырьки, приведены в табл. 1–4.

Для проведения сравнительных испытаний по оценке эффективности штырьковых структур различных типов на стенде имитировалась работа системы водяного охлаждения. Схема стенда представлена на рис. 2. Испытываемый образец устанавливался в отверстие корпуса рабочего участка 1 и ориентировался относительно входного и выходного отверстий. Гладкая сторона образца прижималась к охлаждаемому элементу, в качестве которого использовали нагреватель 2 мощностью 100 Вт. Через структуру образца пропускался поток воды. Движение воды в системе осуществлялось по незамкнутому контуру и обеспечивалось насосом 3.

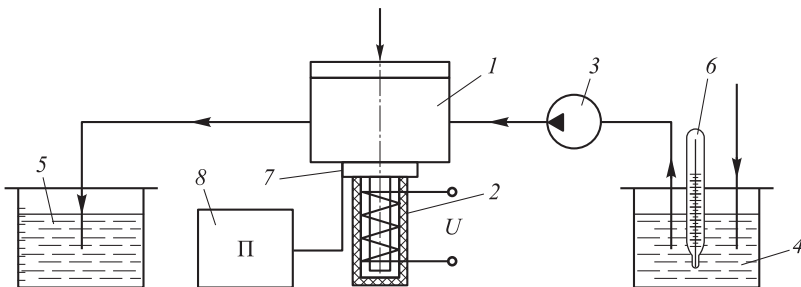


Рис. 2. Схема испытательного стенда:

1 — рабочий участок; 2 — нагреватель; 3 — насос; 4 — бак с водой; 5 — мерная емкость; 6 — ртутный термометр; 7 — термопара; 8 — потенциометр

Схема рабочего участка стенда приведена на рис. 3, а. Рабочий участок выполняет функцию водоблока в СЖО с возможностью замены теплосъемной пластины. Регулируемая пробка обеспечивает плотное прилегание ее торца к вершинам штырьков различной высоты. Таким образом, во всех случаях зазор для прохождения жидкости соответствовал высоте структуры конкретного образца. На пробке вблизи входного и выходного отверстий выполнены пазы, которые служат для равномерного распределения потока по штырьковой поверхности.

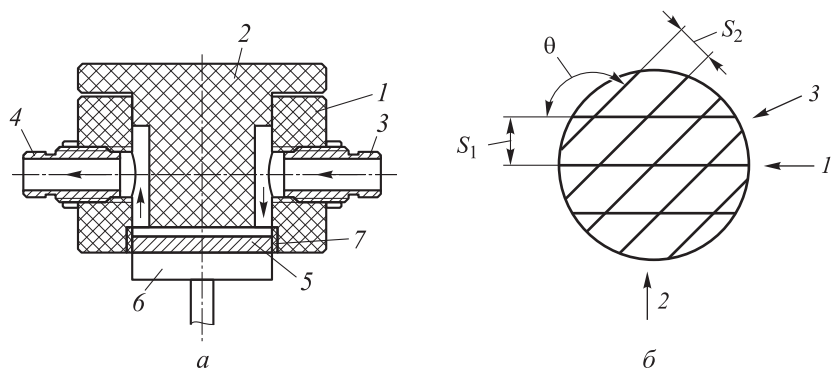


Рис. 3. Схема:

a — рабочего участка стенда (1 — корпус; 2 — крышка; 3 — входной штуцер; 4 — выходной штуцер; 5 — образец; 6 — нагреватель; 7 — уплотнитель); *б* — варианты направления потока теплоносителя (1 — вдоль направления первого прохода; 2 — перпендикулярно направлению первого прохода; 3 — шахматный порядок)

Эффективность охлаждения оценивали по разности температур нагревателя и воды на входе в систему. Чем меньше разность температуры нагревателя и температуры охлаждающей воды, тем эффективность штырьковой структуры выше. Температуру нагревателя измеряли с помощью термопары хромель–копель 7 (см. рис. 2), температуру воды — ртутным термометром 6 с ценой деления 0,5 °С. Гидравлические потери оценивали по расходу воды на выходе из системы, который определялся по времени заполнения мерной емкости 5.

В ряде случаев изменение порядка расположения элементов структуры относительно направления движения теплоносителя способствует повышению эффективности охлаждения [6]. Так, расположение штырьков в шахматном порядке обеспечивает более сложную траекторию движения потока, вынуждая его огибать каждый отдельный штырек, находящийся на его пути [7]. Таким образом, возможна дополнительная турбулизация потока жидкости, и, как следствие, повышение коэффициента теплоотдачи. В связи с этим возникает необходимость исследовать возможности изменения порядка штырьков в структуре, полученной методом ДР, и его влияние на основные показатели эффективности структуры.

Изменение порядка расположения штырьков достигали за счет различной ориентации образца относительно входного отверстия в корпусе установки. Рассматривали три варианта ориентации структуры относительно направления потока теплоносителя: направление потока совпадало с направлением первого прохода ДР, было ему перпендикулярно или совпадало с большей диагональю параллелограмма, образованного направлениями первого и второго проходов (рис. 3, б). Последний вариант является аналогом шахматного порядка и призван увеличивать число штырьков, которые огибаются потоком.

Определение оптимальной плотности расположения штырьков в структуре. Под плотностью расположения штырьков в структуре (размерность см⁻²)

понимали число штырьков, расположенных на каждом квадратном сантиметре площади структуры. Данный параметр зависит от подачи S_1 на первом и S_2 втором проходах обработки ДР и угла θ между направлениями этих проходов и может быть определен по формулам:

$$P = \frac{100 \sin \theta}{S_1 S_2} \text{ для } \theta < 180^\circ;$$

$$P = \frac{100 \sin(\theta - 180^\circ)}{S_1 S_2} \text{ для } \theta > 180^\circ.$$

Испытания проводились на шести образцах с различной плотностью расположения штырьков (рис. 4), параметры их структур представлены в табл. 1.

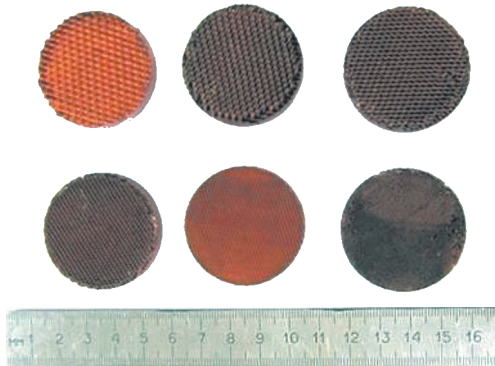


Рис. 4. Образцы для испытаний по определению оптимальной плотности расположения штырьков в структуре

Штырьки всех образцов имели винтовую форму. Коэффициент увеличения площади поверхности рассчитывался по формуле [8]:

$$K_{\text{ш}} = 1 + \frac{2t_1}{S_1 \sin \varphi} + \frac{2t_2}{S_2}.$$

Таблица 1

Параметры образцов для испытаний по определению оптимальной плотности расположения штырьков в структуре

Номер образца	$S_1 = S_2$, мм/дв. ход	t_1 , мм	t_2 , мм	φ , град	Высота структуры, мм	θ , град	$K_{\text{ш}}$	P , см ⁻²
1	2	2	3,3	27	4,1	135	8,7	18
2	1,6	1,6	2,6		5,1			28
3	1,4	1,4	2,3		4,5			36
4	1	1	1,7		3,7			71
5	0,8	0,8	1,3		1,9			111
6	0,6	0,6	1		2			196

Результаты испытаний (рис. 5) показывают, что структуры с плотностью расположения штырьков до 111 см^{-2} обеспечивают наименьшую температуру нагревателя, причем минимальное значение температуры показали испытания образца № 4 с плотностью 71 см^{-2} . Наименьшее гидравлическое сопротивление было зафиксировано при испытании образцов с плотностью расположения штырьков до 71 см^{-2} . Это позволило определить оптимальную плотность штырьковой структуры (71 см^{-2}), получаемую при шагах ДР на первом и втором проходах $S_1 = S_2 = 1 \text{ мм/дв. ход}$, поэтому дальнейшие испытания проводили на штырьковых структурах, полученных именно с такими шагами.

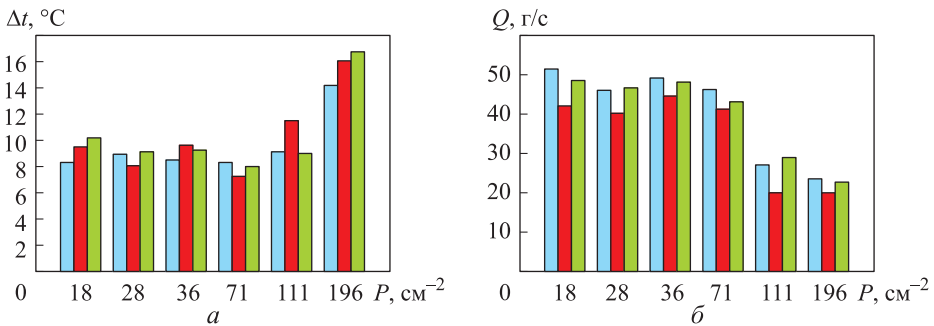


Рис. 5. Результаты испытаний по определению влияния плотности расположения штырьков в структуре на разность температур нагревателя и воды на входе в систему (а) и расход воды (б):

- — вдоль направления первого прохода; ■ — перпендикулярно направлению первого прохода; ■ — шахматный

Определение оптимальной формы штырьков структуры. Существуют три принципиально отличные по форме разновидности штырьков: винтовые штырьки (рис. 6, а), штырьки-иглы (рис. 6, б) и штырьки-крючки (рис. 6, в) [8]. Были проведены испытания трех образцов со штырьками различной формы (рис. 6). При этом единственным изменяемым параметром при формировании структуры был угол встречи θ . Величина плотности расположения штырьков в структуре изменялась в зависимости от θ , однако для всех образцов оставалась в диапазоне значений, близких к оптимальному. Параметры структур указаны в табл. 2.

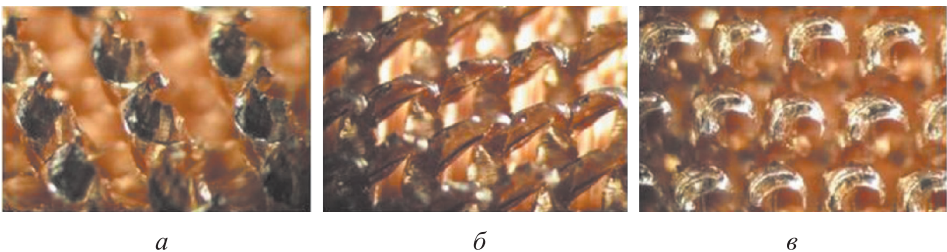


Рис. 6. Штырьковые структуры образцов для испытаний по определению оптимальной формы штырька:

- а — винтовые штырьки; б — штырьки-иглы; в — штырьки-крючки

**Параметры образцов для испытаний по определению
оптимальной формы штырьков**

Номер образца	$S_1 = S_2$, мм/дв. ход	t_1 , мм	t_2 , мм	φ , град	Высота структуры, мм	θ , град	Форма штырьков	$K_{ш}$	P , см ⁻²
1	1	1	1,7	27	3	135	Винтовые	8,7	71
2					2,3	255	Иглы		97
3					2,4	285	Крючки		97

Испытания показали (рис. 7), что штырьки в форме игл и крючков обеспечивают лучшее охлаждение нагревателя, чем штырьки винтовой формы. Температура нагревателя при испытании игл и крючков отличается незначительно, однако иглы имеют некоторое преимущество. Минимальное гидравлическое сопротивление показал образец с винтовыми штырьками. Дальнейшие испытания проводились на образцах со штырьками игольчатой формы.

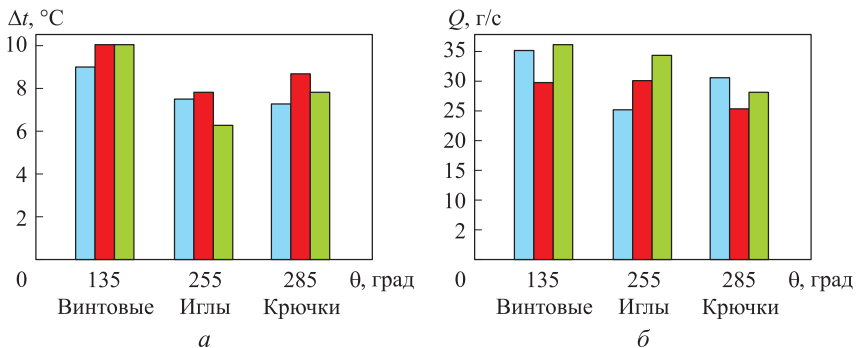


Рис. 7. Результаты испытаний по определению влияния формы штырьков:

a — на разность температуры нагревателя и температуры воды на входе в систему; *б* — на расход воды (■ — вдоль направления первого прохода; ■ — перпендикулярно направлению первого прохода; ■ — шахматный)

Уточнение угла встречи для оптимальной формы штырьков. Известно [8], что штырьки в форме игл могут быть получены в двух диапазонах углов встречи, а именно при $\theta = 0...90^\circ$ (первая четверть) и $\theta = 180...270^\circ$ (третья четверть). Основным отличием в процессе формирования штырьков при углах встречи из первой и третьей четвертей является то, что в первом случае инструмент врезается в прирезцовую сторону ребра, полученного на первом проходе инструмента, а во втором — в свободную сторону. Сравнивали вертикальность четырех образцов из первой четверти с вертикальностью четырех соответствующих им образцов из третьей четверти, их параметры приведены в табл. 3. Чтобы иметь возможность получать стабильные штырьковые структуры в более широком диапазоне углов встречи,

главный угол в плане φ инструмента был увеличен до 30° . Вертикальность штырьковых структуры ε определяли как отношение высоты штырьковой структуры $h_{ш}$ к длине единичного штырька $l_{ш}$:

$$\varepsilon = \frac{h_{ш}}{l_{ш}}$$

Таблица 3

Параметры образцов из первой и третьей четвертей углов встречи

Номер образца	$S_1 = S_2$, мм/дв. ход	t_1 , мм	t_2 , мм	φ , град	Первая четверть		Третья четверть		$K_{ш}$	P , см ⁻²
					Высота штырьков, мм	θ , град	Высота штырьков, мм	θ , град		
1	1	1	1,4	30	2	30	1,8	210	7,8	50
2					1,8	45	1,4	225		71
3					1,7	60	1,3	240		87
4					1,7	75	1,5	255		97

При углах встречи из первой четверти штырьки имеют большую высоту и, следовательно, большую вертикальность, чем соответствующие им штырьки из третьей четверти (рис. 8). При этом значение вертикальности увеличивается при приближении к верхней границе диапазонов, что согласуется с результатами, полученными в работе [9].

Для проведения сравнительных испытаний штырьков из первой и третьей четвертей было выбрано по одному образцу: с углами встречи 75° и 255° . Штырьки этих образцов имеют одинаковую расчетную длину, а значения их вертикальности отличаются незначительно. Параметры образцов приведены в табл. 4. Результаты сравнительных испытаний показаны на рис. 9.

Расчетная длина штырьков из первой и третьей четвертей одинакова для соответствующих углов встречи. Длина штырьков из первой четверти определялась по формулам [9]:

$$l_{ш} = \frac{t_2}{\sin \varphi_d} + \frac{S_2 \cos \varphi_d}{2 \sin \theta} - \frac{S_2(1 - \sin \varphi_d)^2}{2 \sin \theta \cos \varphi_d};$$

$$\varphi_d = \arctg(\tg \varphi \sin \theta),$$

где φ_d — угол подрезания.

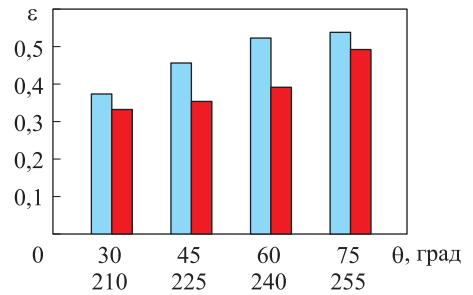


Рис. 8. Вертикальность штырьков первой (□) и третьей (■) четвертей углов встречи

**Параметры образцов для испытаний по уточнению угла встречи
и определению влияния вертикальности штырьков**

Номер образца	$S_1 = S_2$, мм/дв. ход	t_1 , мм	t_2 , мм	φ , град	Высота структуры, мм	ε	θ , град	$K_{ш}$	P , см ⁻²
1	1	1	1,4	30	2,8	0,54	75	7,8	97
2					2,6 (до прессования)	0,49	255		
					2,2	0,35			
					1,9	0,26			

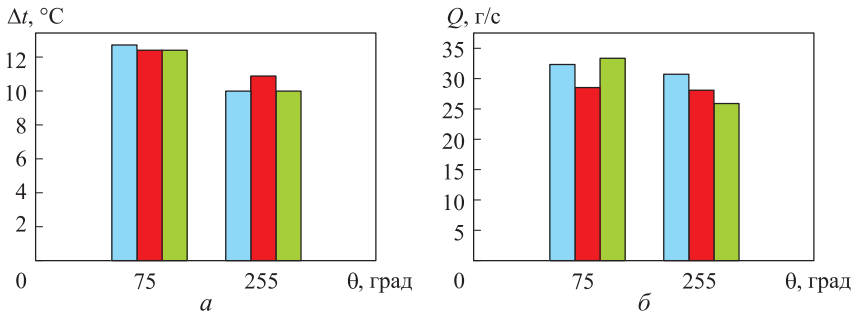


Рис. 9. Результаты испытаний по уточнению влияния угла встречи на разность температур нагревателя и воды на входе в систему (а) и на расход воды (б) (■ — вдоль направления первого прохода; ■ — перпендикулярно направлению первого прохода; ■ — шахматный)

С точки зрения минимальной температуры нагревателя наилучший результат показал образец с углом встречи 255° (третья четверть). При этом отличие образцов по гидравлическому сопротивлению незначительно.

Определение влияния вертикальности структуры. Уменьшение вертикальности штырьковой структуры влечет за собой увеличение гидравлического сопротивления при ее эксплуатации. Однако неочевидным остается характер влияния вертикальности на коэффициент теплоотдачи, который является основным критерием эффективности структуры. В проведенных испытаниях был использован один образец с углом встречи 255° (см. табл. 4, образец № 2). Вертикальность его структуры изменялась искусственно за счет двукратного уменьшения высоты штырьковой структуры прессованием на величину 0,4 мм и 0,3 мм. Результаты испытаний приведены на рис. 10.

Уменьшение вертикальности штырьковой структуры способствует снижению температуры охлаждаемого элемента, однако приводит к значительному (порядка 20 %) повышению гидравлического сопротивления. В связи с этим

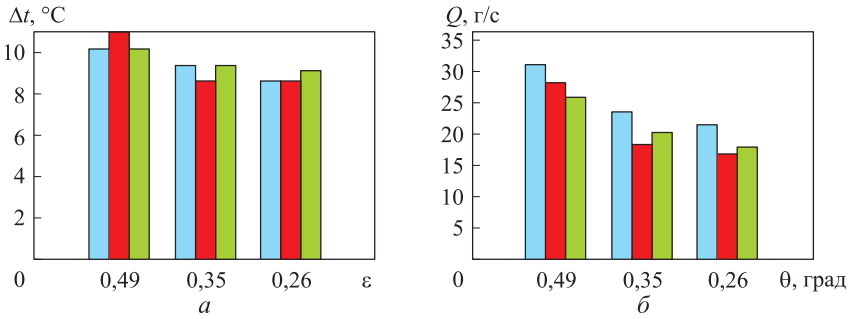


Рис. 10. Результаты испытаний по определению влияния вертикальности структуры на разность температур нагревателя и воды на входе в систему (а) и на расход воды (б) (□ — вдоль направления первого прохода; ■ — перпендикулярно направлению первого прохода; ■ — шахматный)

уменьшение высоты структуры нецелесообразно, угол встречи 255° является оптимальным, поскольку обеспечивает наибольшую вертикальность среди структур третьей четверти.

При анализе данных гистограмм на рис. 5, 7, 9, 10, на которых разными цветами обозначалась различная ориентация штырьковой структуры относительно направления потока теплоносителя, значительного влияния данного параметра на эффективность охлаждения и гидравлическое сопротивление не выявлено. Наименьшее гидравлическое сопротивление в большинстве случаев наблюдалось при ориентации структуры вдоль первого прохода инструмента. Наибольшее гидравлическое сопротивление имеет место при ориентации образца перпендикулярно направлению первого прохода инструмента. Это может быть связано с тем, что в основании структуры имеются участки ребер, которые не перерезались на втором проходе обработки при ее изготовлении.

Выводы. 1. Плотность расположения штырьков в структуре, обеспечивающая наименьшую температуру нагревателя, находится в диапазоне $18 \dots 111 \text{ см}^{-2}$, причем минимальное значение температуры достигается на образце с плотностью 71 см^{-2} . Наименьшее гидравлическое сопротивление наблюдается при плотности структуры в диапазоне $18 \dots 71 \text{ см}^{-2}$.

2. Наилучшее охлаждение нагревателя обеспечивает структура с игольчатыми штырьками. Штырьки винтовой формы обеспечивают наименьшее гидравлическое сопротивление.

3. Штырьки в форме игл из третьей четверти диапазона углов встречи обеспечивают меньшую температуру на нагревателе, чем штырьки из первой четверти, при незначительной разности гидравлических сопротивлений.

4. Уменьшение вертикальности штырьковой структуры приводит к некоторому уменьшению температуры нагревателя, однако вызывает значительное повышение гидравлического сопротивления.

5. Выбор оптимальной плотности расположения штырьков в структуре имеет наибольшее значение, поскольку изменение этого параметра в исследованном диа-

пазоне приводит к более значительным перепадам температуры нагревателя и изменению гидравлического сопротивления в сравнении с остальными рассмотренными параметрами.

Авторы выражают благодарность коллективу кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана за поддержку проводимых исследований, а также дипломнику кафедры С.А. Войнову за помощь в проведении испытаний

ЛИТЕРАТУРА

1. Hitachi T., Gohara H., Nagaune F. Direct liquid cooling IGBT module for automotive applications // Fuji Electric Review. 2012. Vol. 58. No. 2. P. 55–59.
URL: <http://www.fujielectric.com/company/tech/pdf/58-02/FER-58-2-055-2012.pdf>
2. Колпаков А. Охлаждение силовых модулей: проблемы и решения. Часть 1 // Силовая электроника. 2012. № 3. С. 12–18. URL: http://power-e.ru/2012_3_72.php
3. Использование штырьковых структур нового типа для охлаждения электронной аппаратуры / Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников, А.С. Трофимович, А.С. Черкасов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 2. С. 70–79.
4. Зубков Н.Н., Овчинников А.И. Способ получения поверхностей с чередующимися выступами и впадинами и инструмент для его реализации. Патент 2044606 РФ. Опубл. 1995.
5. Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. Исследование теплообменных характеристик штырьковых структур // News of science. Proceedings of materials the international scientific conference. 2015. С. 54–58.
6. Subramanian S., Sridhar K.S., Umesh C.K. Comparative study for improving the thermal and fluid flow performance of micro channel fin geometries using numerical simulation // American Journal of Engineering Research. 2015. Vol. 4. No. 7. P. 73–82.
URL: [http://www.ajer.org/papers/v4\(07\)/J047073082.pdf](http://www.ajer.org/papers/v4(07)/J047073082.pdf)
7. Loong S.-J., Smith D.L. United States patent application publication US 2011/0079376 A1. Cold plate with pins. Publ. 2011.
8. Получение штырьковых структур для кипения азота / Н.Н. Зубков, А.С. Трофимович, А.И. Овчинников, Г.Ю. Цфасман, В.В. Городников // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2013. № 1. С. 100–109.
9. Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л., Войнов С.А. Моделирование процесса формирования штырьков при деформирующем резании пластины // Вестник машиностроения. 2015. № 11. С. 18–22.

Зубков Николай Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Битюцкая Юлия Леонидовна — аспирантка кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. Влияние параметров теплообменных штырьковых структур на их эксплуатационные характеристики // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 2. С. 108–120. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-2-108-120

EFFECT OF HEAT-EXCHANGE PIN-FIN STRUCTURE PARAMETERS ON ITS PERFORMANCE CHARACTERISTICS

N.N. Zubkov

zoubkovn@bmstu.ru

Yu.L. Bityutskaya

jil_j@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Creating pin-fins on heat exchanger's cold plates is a promising way of improving their efficiency. Pin-fin heat exchangers are widely used in liquid cooling systems for electronic, high-current equipment, etc. Deformational cutting technology (DC) is a proven method for productive fabrication of high-density pin-fin structures. The pin-fins are produced by additional machining of the previously finned surface with a DC tool. Pin-fin structure's surface area, obtained by DC, can exceed 7-10 times its original surface area. DC provides a variety of different pin-fin shapes and structure's geometrical parameters. Finding an optimal relative position and pin-fin parameters is an acute problem. The article gives the technique and the results of comparative experiments on convective heat exchange of pin-fin structures. We conducted the experiments on a test bench that simulated liquid cooling system operation taking into consideration the effect of structure's density, pin-fin shape and verticality and the coolant flow direction on cooled element temperature and structure's pressure drop. In our work we tested pin-fin structures, obtained by DC, with spiral, needle-shaped and hook-shaped pins, height of 1,9–5,1 mm and pitch of 0,6–2 mm. Findings of the research show that the structure with 71 more vertical needle-shaped pin-fin per square centimeter presents better performance characteristics. No significant effect of coolant flow direction on cooled element temperature and structure's pressure drop was detected

Keywords

Pin-fin structures, cold plate, convective heat exchange, deforming cutting, liquid cooling

REFERENCES

- [1] Hitachi T., Gohara H., Nagaune F. Direct liquid cooling IGBT module for automotive applications. *Fuji Electric Review*, 2012, vol. 58, no. 2, pp. 55–59. Available at: <http://www.fujielectric.com/company/tech/pdf/58-02/FER-58-2-055-2012.pdf>
- [2] Kolpakov A. Power module cooling: problems and solutions. P. 1. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2012, no. 3, pp. 12–18 (in Russ.). Available at: http://power-e.ru/2012_3_72.php
- [3] Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Trofimovich A.S., Cherkasov A.S. Using pin fin structures of a new type for liquid cooling of electronic equipment. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2014, no. 2, pp. 70–79 (in Russ.).

- [4] Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I. Sposob polucheniya poverkhnostey s chereduyushchimi-sya vystupami i vpadinami i instrument dlya ego realizatsii [A method for making surfaces with alternating ridges and valleys and a tool for its implementation]. Patent 2044606 RF. Publ. 1995 (in Russ.).
- [5] Zubkov N.N., Bityutskaya Yu.L. Issledovanie teploobmennyykh kharakteristik shtyr'kovykh struktur [Research on heat exchange characteristics of pin structures]. *News of science. Proceedings of materials the international scientific conference*. 2015, pp. 54–58 (in Russ.).
- [6] Subramanian S., Sridhar K.S., Umesh C.K. Comparative study for improving the thermal and fluid flow performance of micro channel fin geometries using numerical simulation. *American Journal of Engineering Research*, 2015, vol. 4, no. 7, pp. 73–82. Available at: [http://www.ajer.org/papers/v4\(07\)/J047073082.pdf](http://www.ajer.org/papers/v4(07)/J047073082.pdf)
- [7] Loong S.-J., Smith D.L. United States patent application publication US 2011/0079376 A1. Cold plate with pins. Publ. 2011.
- [8] Zubkov N.N., Trofimovich A.S., Ovchinnikov A.I., Tsfasman G.Yu., Gorodnikov V.V. Making of pin fin structures for boiling of nitrogen. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2013, no. 1, pp. 100–109 (in Russ.).
- [9] Zubkov N.N., Bityutskaya Yu.L., Voynov S.A. Modelling of process of formation of pins in deforming the cutting plate. *Vestnik mashinostroeniya*, 2015, no. 11, pp. 18–22 (in Russ.). (Eng. version of journal: Shaping of heat-exchanger pins by deformational cutting. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 2, pp. 81–85. DOI: 10.3103/S1068798X16020258]. Available at: <http://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X16020258?noaccess=true>

Zubkov N.N. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of Instrumental Equipment and Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Bityutskaya Yu.L. — post-graduate student of Instrumental Equipment and Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Zubkov N.N., Bityutskaya Yu.L. Effect of Heat-Exchange Pin-Fin Structure Parameters on its Performance Characteristics. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 2, pp. 108–120. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-2-108-120