

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШТЫРЬКОВЫХ СТРУКТУР НОВОГО ТИПА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Н.Н. Зубков<sup>1</sup>, А.И. Овчинников<sup>1</sup>, А.С. Трофимович<sup>2</sup>, А.С. Черкасов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: zoubkovn@bmstu.ru; alex-ai@yandex.ru

<sup>2</sup>ОАО “Центромашпроект”, Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>ООО “Профессиональные модификации”, Москва, Российская Федерация

*Рассмотрено применение новой технологии деформирующего резания для получения поверхностей теплообмена штырькового типа. Применение технологии деформирующего резания — это актуальный и перспективный путь для создания устройств охлаждения силовой электроники и микропроцессорной техники с улучшенными теплотехническими характеристиками. Приведены методика, конструкция экспериментального стенда и результаты испытаний теплообменных штырьковых структур нового типа, полученных методом деформирующего резания. При конвективном охлаждении водой были испытаны теплообменные структуры двух типов: со штырьками в виде наклонных пирамидальных шипов (игл) и винтовых шипов. Доказана высокая эффективность таких штырьковых структур для их использования в системах водяного охлаждения электронной аппаратуры. В результате сравнительных испытаний выявлено, что поверхности шипов-игл по сравнению с винтовыми шипами имеют лучшие показатели теплообмена как по тепловой эффективности, так и по гидравлическому сопротивлению. Проведенное моделирование в среде Solid Works Flow Simulation показало хорошую сходимость результатов расчетов и экспериментальных исследований.*

**Ключевые слова:** конвективный теплообмен, штырьковые структуры, деформирующее резание, охлаждение процессоров.

## USING PIN FIN STRUCTURES OF A NEW TYPE FOR LIQUID COOLING OF ELECTRONIC EQUIPMENT

N.N. Zubkov<sup>1</sup>, A.I. Ovchinnikov<sup>1</sup>, A.S. Trofimovich<sup>2</sup>, A.S. Cherkasov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: zoubkovn@bmstu.ru; alex-ai@yandex.ru

<sup>2</sup>ОАО “Tsentrromashproekt”, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>ООО “Professional Modifications”, Moscow, Russian Federation

*A new technology of deformational cutting (DC) for manufacturing the pin fin heat transfer surfaces is presented. The use of DC technology is a relevant and promising way to create a cooling device for power electronics and microprocessor technology with improved heat transfer parameters. The technique, test bench design, and results of the tests of heat transfer surfaces having pin fin structures of a new type, obtained by DC, are given. Pin fin structures having spiral and angled needle-shaped pins were tested with water convective cooling. A high efficiency of the pin fin structures obtained by DC for use in systems of water cooling of electronic equipment is proved. Comparative tests have revealed that the heat transfer surfaces with angled needle-shaped pins demonstrate the better heat transfer performance both in thermal efficiency and hydraulic resistance as compared to those with spiral pins. The heat*

*transfer and liquid flow computer modeling performed using the SolidWorks Flow Simulation program showed a good agreement between computation results and experimental data.*

**Keywords:** convective heat transfer, pin fin surfaces, deformational cutting, microchip cooling.

Тепловой режим, требуемый для изделий электронной техники, определяет ее работоспособность, надежность и стабильность выходных параметров. Ожидается, что плотность энерговыделения электронных узлов, процессоров высокопроизводительных компьютеров, научных приборов, приборов военной и космической техники будет составлять до  $25 \text{ Вт/см}^2$ . По этой причине необходимы новые технологии управления тепловыми режимами, удовлетворяющие требованиям силовой электроники и микропроцессорной техники с высокой плотностью тепловыделения. В гражданских областях — это, прежде всего, охлаждение тепловыделяющих элементов серверов и рабочих станций, охлаждение IGBT (в инверторах больших токов), охлаждение блейд-серверов дата-центров.

Наиболее перспективным решением проблемы охлаждения электронной техники является технология управления тепловыми режимами с помощью охлаждения рабочей жидкостью, циркулирующей по теплообменникам – водоблокам, прикрепленным к тепловыделяющим элементам [1]. Нагретая в водоблоках жидкость насосом передается к устройству для сброса теплоты, расположенному на удалении от электроники, откуда система терморегулирования может осуществлять сброс теплоты через внешний радиатор с низкооборотным (малощумящим) вентилятором, или в систему охлаждения на основе компрессионного цикла. Водяное охлаждение обеспечивает снятие больших тепловых потоков, оптимальное соотношение массогабаритных параметров, надежность, модульность конструкции, резкое снижение шума.

Ключевым элементом повышения эффективности жидкостных систем охлаждения является водоблок, т.е. теплообменник с развитой поверхностью для омывания жидким теплоносителем. По данным зарубежных исследователей [2–4] использование штырьковых структур позволяет обеспечить передачу высоких тепловых потоков от тепловыделяющих элементов в жидкость за счет существенной интенсификации конвективного теплообмена.

Выпускаемые ведущими зарубежными фирмами водоблоки в большинстве случаев основаны на ребрах или штырьках (шипах), полученных фрезерованием. Минимальный шаг для шипов составляет 3 мм, в то время как при уменьшении шага при прочих равных условиях пропорционально увеличивается площадь получаемой теплообменной поверхности. Следует также учитывать низкую производительность

фрезерной операции получения штырьков на водоблоке, при которой время обработки на станке с ЧПУ составляет более часа.

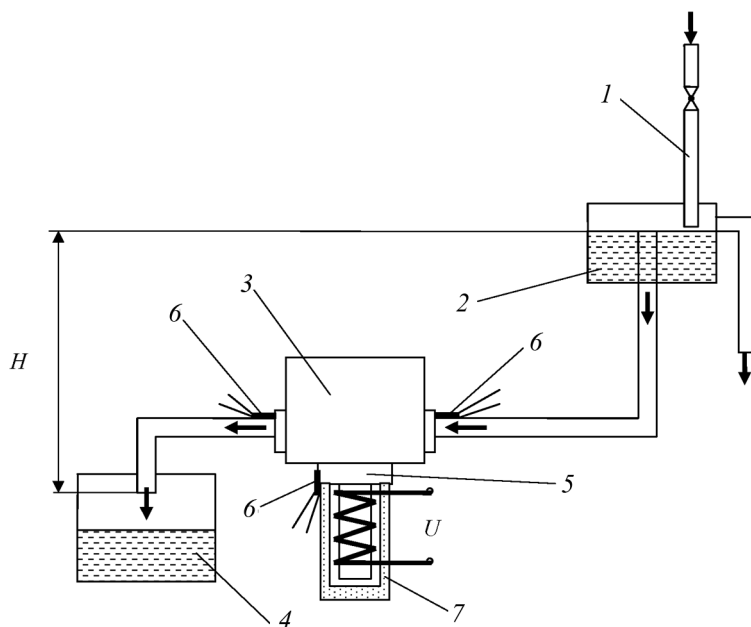
Применение новой технологии деформирующего резания (ДР) [5] для получения поверхностей конвективного теплообмена штырькового типа является одним из перспективных путей создания устройств охлаждения силовой электроники и микропроцессорной техники с улучшенными на принципиально новом уровне теплотехническими характеристиками.

Штырьковые структуры предлагается формировать путем повторной обработки методом ДР под углом к ранее полученным ребрам. Принципы их получения, управления их формой и фотографии структур различного типа приведены в работах [6, 7]. Для исследования выбраны два типа структур: в виде наклонных заостренных пирамид (шпы-иглы) и в виде вертикальных шипов, сужающихся кверху и закрученных на один-три оборота вокруг своей оси (винтовые шпы). Основание шипов имеет характерный размер десятые доли миллиметра при высоте шипов до единиц миллиметров. Сложная трехмерная структура шипов способствует непрерывному разрушению ламинарного пограничного слоя, дополнительно интенсифицируя теплообмен, по сравнению с гладкими каналами простого оребрения и представляют особый интерес, поскольку способна турбулизовать поток теплоносителя с опережающим увеличением коэффициента теплоотдачи по сравнению с ростом гидравлического сопротивления. Для поверхностей с шпыми, получаемыми ДР, площадь теплообмена после обработки возрастает до 7 раз.

Штырьковые структуры, полученные методом ДР, ранее испытывались при теплообмене на основе фазовых переходов и позволили существенно повысить теплоотдачу и критические тепловые потоки при кипении жидкостей [6, 7]. Для конвективного водяного охлаждения такие структуры не испытывались, поэтому возникла потребность проведения соответствующих исследований, методика и результаты которых приведены далее.

Гидравлические и тепловые испытания полученных штырьковых поверхностей теплообмена проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1.

Вода из водопровода 1 поступает в напорный бак 2, который создает постоянное давление водяного столба  $H$  между входом и выходом измерительного блока 3, после чего вода сливается в мерную емкость 4. Электрический нагреватель 5 мощностью 95 Вт являлся имитатором теплонагруженного элемента, предназначенного для охлаждения. При проведении экспериментов измеряли температуру нагревателя 5, температуру воды на входе и выходе измерительного блока 3, а также расход охлаждающей воды. Температуру определяли с



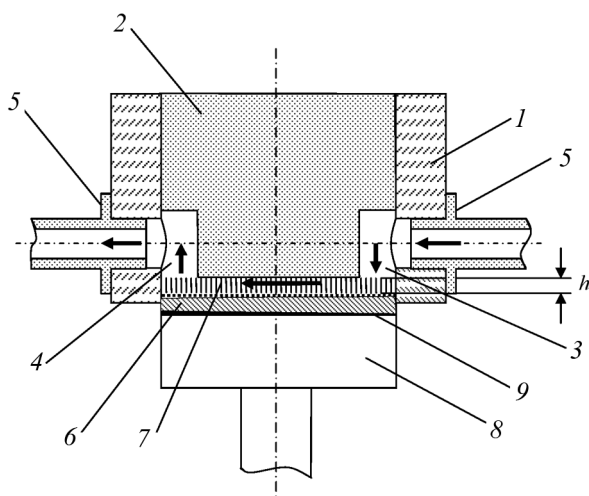
**Рис. 1. Схема экспериментальной установки:**

1 – входная магистраль, 2 – напорный бак, 3 – измерительный блок, 4 – мерная емкость, 5 – нагреватель, 6 – датчики температуры (термисторы), 7 – теплоизоляция

помощью термисторов 6 путем измерения их электрического сопротивления. Высота водяного столба в испытаниях постоянная,  $H = 1,0$  м (9,8 кПа). Расход воды определяли по сливной мерной емкости.

Конструкция измерительного блока приведена на рис. 2.

Блок состоит из корпуса 1, вставленного в цилиндрический сердечник 2 с фрезерованными лысками, которые образуют коллекторные



**Рис. 2. Конструкция измерительного блока:**

1 – корпус, 2 – сердечник, 3 и 4 – входной и выходной коллекторы, 5 – штуцеры, 6 – образец, 7 – шипы, 8 – нагреватель, 9 – термопаста

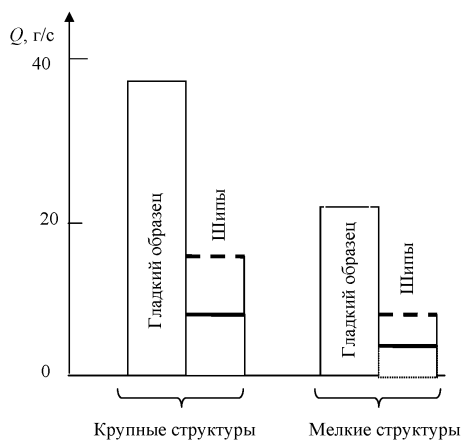
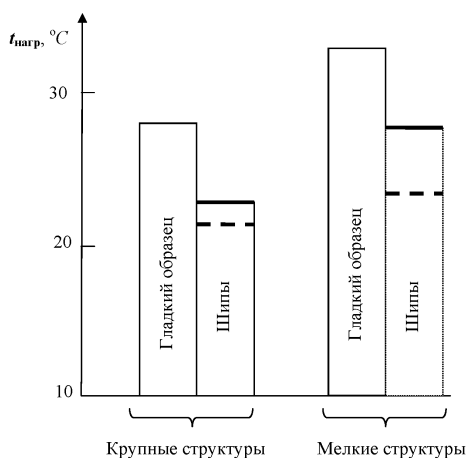
полости 3 и 4. Исследуемый образец 6 с обработанной поверхностью в виде шипов 7 вставляется герметично в отверстие корпуса 1 и поджимается сердечником 2 к торцовой поверхности нагревателя 8 через слой терморасты 9.

Испытуемые образцы изготовлены из меди марки М1 и представляют собой диски диаметром 40 мм и высотой 4 мм со штырьковой структурой на одной из сторон диска. Для испытаний методом ДР изготовлены четыре штырьковых теплообменных структуры — две с винтовыми шипами (образцы 1 и 2) и две с шипами в виде игл (образцы 3 и 4), а также (для сравнения) – гладкий образец 5. В таблице указаны соответствующие номера образцов и параметры структур.

**Параметры образцов и результаты измерений**

Параметры	Образцы					
	Крупные структуры		Мелкие структуры		Гладкий образец (5)	
	Винтовые шипы (1)	Шипы-иглы (3)	Винтовые шипы (2)	Шипы-иглы (4)		
Высота шипов $h$ , мм	1,1	1,2	0,5	0,6	1,2 (зазор)	0,6 (зазор)
Шаг структуры $S$ , мм	0,8	0,8	0,4	0,4	–	–
Расход воды $Q$ , г/с	8	15	4	8	38	22
Температура нагревателя $t_{нагр}$ , °С	22,52	21,20	27,50	23,05	27,89	32,96
Температура воды на входе $t_{вх}$ , °С	12					
Температура воды на выходе $t_{вых}$ , °С	14,7	13,5	15,0	14,5	13,0	14,0

Отличие крупных и мелких структур состояло только в масштабном параметре, мелкие структуры имели высоту и шаг приблизительно в 2 раза меньше, чем крупные. Для гладких образцов высота структуры  $h$  заменялась зазором того же размера. Площадь поверхности всех образцов со штырьковой структурой по сравнению с гладким образцом увеличилась в 4 раза для всех структур независимо от их формы и размера. Как отмечено в работе [4], увеличение площади штырьковой структуры, получаемой ДР, зависит только от главного угла инструмента в плане (угла подрезания) и соотношения глубины резания к шагу штырьков, которые для всех испытуемых образцов были одинаковыми.



**Рис. 3. Результаты испытаний по температуре нагревателя  $t_{нагр}$ :**

— — винтовые шипы; --- — шипы-иглы

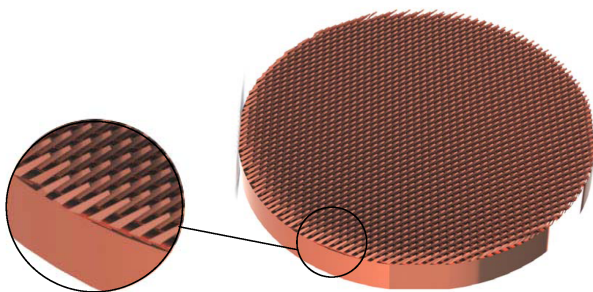
**Рис. 4. Результаты испытаний по расходу воды  $Q$  (обозначения см. рис. 3)**

Нагреватель имитирует теплонагруженный элемент охлаждаемой системы, поэтому его температура  $t_{нагр}$  является наиболее важным параметром. Испытания показали, что по сравнению с гладкими образцами, структуры в виде шипов снижают температуру нагревателя в среднем на 30 %, при этом крупные структуры в среднем на 16 % более эффективны, чем мелкие (рис. 3). Охлаждающая способность образцов с шипами-иглами в среднем на 13 % лучше, чем у образцов с винтовыми шипами. Среди исследованных образцов наименьшую температуру нагревателя ( $21,2^{\circ}\text{C}$ ) показал образец с шагом  $S = 0,8$  мм и высотой структуры  $h = 1,1$  мм.

Расход  $Q$  охлаждающей воды определяет гидравлические характеристики исследуемых структур (рис. 4). Естественно, наибольший расход воды наблюдается у гладкого образца, однако по сравнению со структурой с шипами у него худшая охлаждающая способность. Гидравлическое сопротивление образцов с шипами-иглами в 2 раза меньше, чем у структур с винтовыми шипами. Лучшие результаты (расход  $Q = 15$  г/с) показала та же крупная структура с шипами-иглами, что и при испытаниях по температуре нагревателя.

Анализируя результаты испытаний, следует отметить перспективность использования штырьковых структур в виде шипов-игл, однако оптимизация шага и высоты структуры по гидравлическим и тепловым характеристикам требует дополнительных исследований.

Большое разнообразие возможных типоразмеров штырьковых структур, получаемых ДР, требует необходимости найти способ быстрого и достаточно точного анализа их эффективности. САЕ-анализ, в отличие от натуральных экспериментов, может значительно сократить



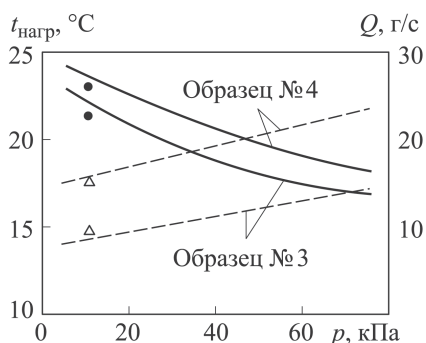
**Рис. 5.** Модель теплообменной структуры шпоров-игл; высота структуры — 1,2 мм

трудоёмкость оптимизации геометрических параметров штырьковых структур.

В среде SolidWorks Flow Simulation было проведено CAE-моделирование перспективных структур в виде шпоров-игл, полученных методом ДР. Для анализа была создана модель измерительного блока испытательного стенда (см. рис. 2) а также двух образцов (в соответствии с таблицей образцы 3 и 4). Трёхмерная модель наклонных шпоров-игл приведена на рис. 5. Входные параметры расчётной модели соответствовали условиям приведенного эксперимента. Изменяемым параметром при моделировании было давление на входе в измерительный блок в пределах от 5 до 75 кПа.

Программа позволяла определять температуру в любой точке модели, а также расход теплоносителя. Результаты расчёта по модели приведены на рис. 6. В результате анализа полученных данных, выявили хорошую сходимость расчётных и экспериментальных значений (погрешность не более 6%).

Натурные испытания медного водяного теплообменника, изготовленного в МГТУ им. Н.Э. Баумана с теплосъёмной пластиной, имеющей штырьковую структуру, были проведены в ФГУП НИИ “Квант”. Теплообменник предназначен для охлаждения восьми программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) платы опытной рабочей станции с суммарной мощностью тепловыделения 1 кВт. Теплообмен-



**Рис. 6.** Зависимость температуры нагревателя  $t_{нагр}$  и расхода охлаждающей воды  $Q$  от давления  $p$ :

— — температура нагревателя  $t_{нагр}$  (расчет); - - - - расход  $Q$  (расчет); ● — экспериментальные данные по температуре нагревателя; Δ — экспериментальные данные по расходу теплоносителя

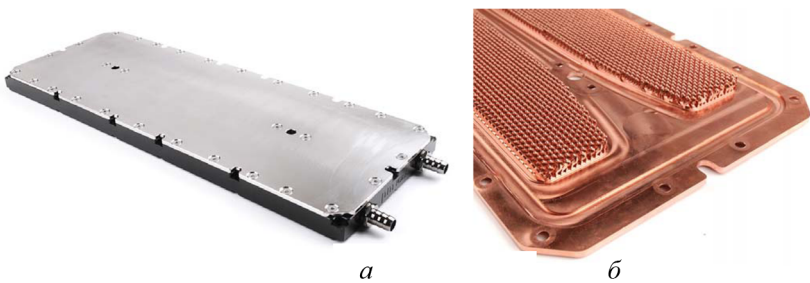


Рис. 7. Теплообменник платы ПЛИС опытной рабочей станции (а) и участок его теплосъемной пластины (б)

ник имел габаритные размеры  $420 \times 160 \times 22$  мм. Общий вид теплообменника и теплосъемной пластины показан на рис. 7. На основе приведенной методики была выполнена модель реального теплообменника и рассчитаны температура тепловыделяющих элементов, температура воды, ее давление и скорость потока. Расчет проводился с помощью рабочей станции на базе четырех процессоров Intel Xeon E5 2690 с 32 Гб оперативной памяти.

Для удобства эксперимента реальные ПЛИС были заменены семью имитаторами теплоты с мощностью тепловыделения до 125 Вт каждый. По результатам испытаний измерялись температуры имитаторов, которые имели разное значение по мере нагрева воды при ее прохождении через штырьковую структуру теплосъемной пластины. Максимальная температура наиболее нагретого имитатора теплоты, расположенного у выходного штуцера теплообменника, составила  $28,2^\circ\text{C}$ , минимальная температура составила  $22,5^\circ\text{C}$  для теплоимитатора, расположенного на входе в теплообменник. Указанный режим работы обеспечивался расходом воды через теплообменник 2,5 л/мин. Допустимая температура для ПЛИС данной рабочей станции составляет  $75^\circ\text{C}$ , что доказывает работоспособность предложенного теплообменника с гарантированным запасом по его охлаждающей способности. Расхождение температур имитаторов теплоты по расчетной модели и по результатам испытаний составило  $1,8 \dots 2,1^\circ\text{C}$ , что указывает на адекватность разработанной модели.

**Выводы.** 1. Доказана работоспособность образцов со штырьковыми структурами, получаемыми методом ДР, для их использования в системах водяного охлаждения электронной аппаратуры.

2. Разработана методика, создан экспериментальный стенд и впервые проведены сравнительные испытания штырьковых структур нового типа — шипов-игл и винтовых шипов.

3. Сравнительные испытания показали более высокую тепловую эффективность и меньшее гидравлическое сопротивление образцов с шипами-иглами по сравнению с образцами с винтовыми шипами,



а также лучшие аналогичные характеристики крупных структур по сравнению с мелкими.

4. Хорошая сходимость результатов САЕ-моделирования и экспериментов при конвективном жидкостном теплообмене доказывают адекватность моделей штырьковых структур новых типов и перспективность компьютерного моделирования для оптимизации геометрических параметров структур, получаемых методом ДР.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бройдо В.Л., Ильина О.П. Архитектура ЭВМ и систем. СПб.: Питер, 2009. 720 с.
2. Kandlikar Satish G., Grande William J. Evaluation of Single Phase Flow in Microchannels for High Heat Flux Chip Cooling – Thermohydrolic Performance Enhancement and Fabrication Technology // *Heat Transfer Engineering*. Taylor Francis Inc. 2004. Vol. 25 (8). P. 5–16.
3. Jung J.Y., Kwak H.Y. Fluid flow and heat transfer in microchannels with rectangular cross section // *Heat Mass Transfer*. 2008. No. 44. P. 1041–1049.
4. Kakaz S., Kosoy B., Li D., Pramuanjaroenkij A. Microfluidics Based Microsystems: Fundamentals and Applications // Springer. 2010. 618 p.
5. Зубков Н.Н. Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибкой поверхностных слоев // *Новости теплоснабжения*. 2005. № 4. С. 51–53.
6. Получение штырьковых структур для кипения азота. Зубков Н.Н., Трофимович А.С., Овчинников А.И. и др. // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2013. № 1. С. 100–109.
7. Теплообмен при кипении жидкости на микроструктурированных поверхностях. Ч. 1. Теплоотдача при кипении воды / И.А. Попов, Н.Н. Зубков, С.И. Каськов, А.В. Щелчков // *Теплоэнергетика*. 2013. № 3. С. 3–11.

## REFERENCES

- [1] Broydo V.L., Il'ina O.P. Arkhitektura EVM i sistem [Computer architecture and systems]. St. Petersburg, Piter Publ., 2009. 720 p.
- [2] Kandlikar Satish G., Grande William J. Evaluation of Single Phase Flow in Microchannels for High Heat Flux Chip Cooling – Thermohydrolic Performance Enhancement and Fabrication Technology. *Heat Transfer Engineering*. Taylor Francis Inc., 2004, vol. 25, no. 8, pp. 5–16.
- [3] Jung J.Y., Kwak H.Y., Fluid flow and heat transfer in microchannels with rectangular cross section. *Heat Mass Transfer*, 2008, no. 44, pp. 1041–1049.
- [4] Kakaç S., Kosoy B., Li D., Pramuanjaroenkij A. Microfluidics based microsystems: fundamentals and applications. Springer Publ., 2010. 618 p.
- [5] Zubkov N.N. Pipe fins of heat exchangers by cropping and folding of surface layers. *Novosti teplosnabzheniya* [News of heat supply], 2005, no. 4, pp. 51–53.
- [6] 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. Bauman, Mashinotr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2013, no. 1, pp. 100–109 (in Russ.).
- [7] Popov I.A., Zubkov N.N., Kas'kov S.I., Shchelchikov A.V. Boiling heat transfer fluid on microstructured surfaces. Part I. Heat transfer boiling water. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2013, no. 3, pp. 3–11 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 9.07.2013

Николай Николаевич Зубков — д-р техн. наук, профессор, начальник лаборатории НИИ КМ и ТП МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ, в том числе 25 изобретений и 5 международных патентов в области технологии машиностроения, резания материалов, разработки и исследования метода деформирующего резания.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я, Бауманская ул, д. 5.

N.N. Zubkov — Dr. Sci. (Eng.), professor, head of laboratory of the Research Institute of Structural Materials and Technological Processes of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications including 25 inventions and 5 international patents in the field of technology of mechanical engineering, cutting of materials, development and investigation of the method of deformational cutting.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Александр Иванович Овчинников — канд. техн. наук, доцент кафедры “Инструментальная техника и технологии” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в том числе 13 изобретений в области резания материалов, финишных методов обработки, деформирующего резания.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я, Бауманская ул, д. 5.

A.I. Ovchinnikov — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Tooling Engineering and Technologies” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications including 13 inventions in the field of cutting of materials, finishing methods of treatment, deformational cutting.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Александр Сергеевич Трофимович — ведущий специалист ОАО “Центромашпроект”. Автор ряда научных работ в области деформирующего резания.

ОАО “Центромашпроект”, Российская Федерация, 129626, Москва, пр-т Мира, д. 102, корп. Б.

A.S. Trofimovich — leading specialist engineer of ОАО “Tsentrromashproekt”. Author of a number of publications in the field of deformational cutting.

ОАО “Tsentrromashproekt”, pr-t Mira 102, korpus B, Moscow, 129626 Russian Federation.

Александр Сергеевич Черкасов — инженер-технолог ООО “Профессиональные модификации”. Специалист в области систем охлаждения компьютеров, моделирования технических систем, деформирующего резания.

ООО “Профессиональные модификации”, Российская Федерация, 119049, Москва, Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1 А.

A.S. Cherkasov — processing engineer of ООО “Professional Modifications”. Specializes in the field of computer cooling systems, simulation of technical systems, deformational cutting.

ООО “Professional Modifications”, Leninskii pr-t 4, stroenie 1 A, Moscow, 119049 Russian Federation.