

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

УДК 621.9.042, 621.59

ПОЛУЧЕНИЕ ШТЫРЬКОВЫХ СТРУКТУР ДЛЯ КИПЕНИЯ АЗОТА

Н.Н. Зубков¹, А.С. Трофимович¹, А.И. Овчинников¹,
Г.Ю. Цфасман², В.В. Городников²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
e-mail: zoubkovn@bmstu.ru, alex-ai@yandex.ru

²ООО “Криотек”, Моск. обл., г. Люберцы

Предложены принципы получения штырьковой теплообменной структуры с шипами различной формы методом деформирующего резания. Изложены методика и результаты сравнительных испытаний при кипении азота на штырьковых поверхностях с шипами винтовой и игольчатой форм. Наилучшие результаты по минимально достигаемой температуре испарителя и скорости охлаждения показали теплообменные поверхности с наклонными шипами игольчатой формы.

Ключевые слова: деформирующее резание, кипение азота, штырьковые теплообменные структуры, криодеструктор.

MAKING OF PIN FIN STRUCTURES FOR BOILING OF NITROGEN

N.N. Zubkov¹, A.S. Trofimovich¹, A.I. Ovchinnikov¹,
G.Yu. Tsfasman², V.V. Gorodnikov²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
e-mail: zoubkovn@bmstu.ru, alex-ai@yandex.ru

²ООО Kriotek, Lyubertsy, Moscow region

Principles of making heat-exchange structures with pins of different form by the deformational cutting method are proposed. The technique and results of comparative tests with boiling of nitrogen on pin fin surfaces having pins of helical and straight inclined forms are set forth. The heat-exchange surfaces with inclined pins have demonstrated the best results in evaporator's minimum-reachable temperature and cooling rate.

Keywords: deformational cutting, boiling of nitrogen, pin fin heat-exchange structures, cryodestructor.

Создание эффективных испарителей с высоким уровнем теплопередачи, минимальной металлоемкости и трудоемкости изготовления является основным направлением совершенствования криогенной техники.

Испарители жидких газов широко используются в криогенной технике: в установках разделения воздуха, ожижителях водорода, установках сжижения природного газа, в газификаторах для получения

непрерывного потока газов из криогенных жидкостей и других устройствах. Такие устройства также используются для деструкции органических тканей по медицинским показаниям.

В общем случае эффективность испарительной поверхности оценивается интенсивностью теплопередачи и оптимальными гидродинамическими условиями (полным омыванием рабочей поверхности теплообмена кипящей жидкостью с минимальным уносом неиспарившегося хладагента).

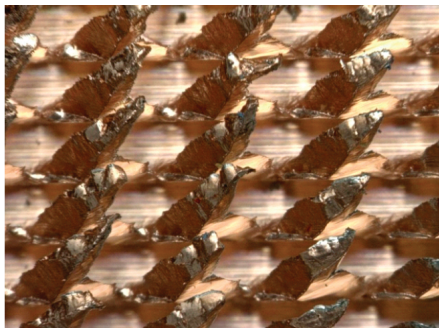
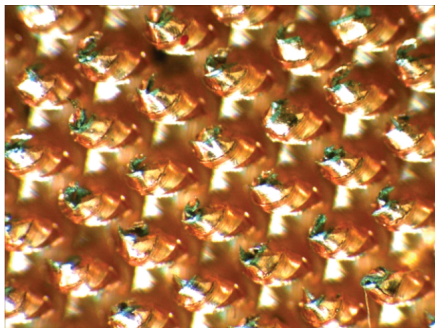
В целях решения задачи энергосбережения при эксплуатации теплотехнических установок, в состав которых входят испарительные теплообменники, возникает необходимость снижения температурного напора между циркулирующими в них теплоносителями. В свою очередь, снижение температурного напора, как правило, приводит к уменьшению плотности теплового потока, передаваемого в теплообменном аппарате. При этом возникают две задачи:

— обеспечить устойчивый режим кипения в области значений тепловых нагрузок, для которых невозможно обеспечить кипение при традиционной геометрии поверхности теплообмена;

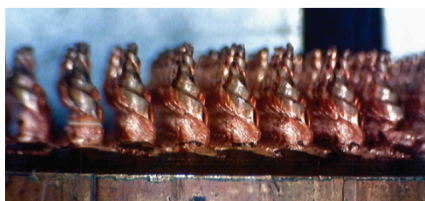
— обеспечить высокие значения коэффициента теплоотдачи в области низких значений плотности передаваемого теплового потока [1].

В конденсаторах-испарителях установок разделения воздуха хорошо зарекомендовали себя две конструкции: сборные пластинчато-ребристые теплообменники и поверхности кипения с капиллярно-пористым покрытием. Их общим и существенным недостатком является низкая технологичность изготовления. В качестве поверхностей кипения, причем не только в криогенной технике, также широко используются поверхности в виде ребер или штырьков (шипов). Сборные способы получения таких теплообменных поверхностей крайне не технологичны и имеют повышенное термическое сопротивление в месте сборки (пайка, завальцовка) с несущим основанием. Фрезерованные ребра или штырьки также сложны в изготовлении. Существующим методам присущи также значительные технологические ограничения по типоразмерам получаемых теплообменных поверхностей. Для указанных методов принципиально невозможен переход на микро размеры ребренных или штырьковых структур, в то время как основным правилом для интенсификации процесса кипения является создание большого числа центров парообразования или ловушек пузырьков пара на поверхности. Это приводит к более раннему началу кипения или кипению при более низких температурных напорах [2].

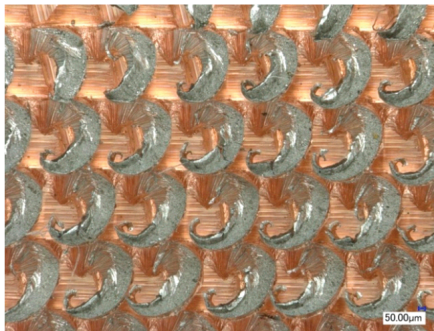
Для получения различных поверхностных структур применяется метод деформирующего резания (ДР) [3]. Он безотходен, технологичен, высокопроизводителен, имеет широкие технологические воз-



б



а



в

Рис. 1. Типы штырьковых структур, получаемых методом ДР:

а — винтовые шипы; *б* — наклонные шипы-иголки; *в* — шипы-крючки

возможности и может быть использован для получения теплообменных поверхностей в виде оребрения или шипов.

В настоящей статье приведены результаты исследований штырьковых поверхностей, полученных методом ДР, для интенсификации теплообмена при испарении на них жидкого азота. Выбор поверхностей этого типа был обусловлен их большей площадью поверхности теплообмена по сравнению с оребренными той же высоты.

Штырьковые структуры [4, 5] получают обработкой методом ДР ранее полученного оребрения в направлении, не совпадающем с направлением первого прохода инструмента, формирующего ребра. Метод ДР позволяет получать штырьковые поверхности трех принципиально разных типов: с винтовыми шипами, закрученными вдоль своей оси (рис. 1, *а*), с наклонными шипами игольчатого типа (рис. 1, *б*) и штырьковые поверхности с крючкообразными шипами (рис. 1, *в*).

Форма шипов помимо угловых параметров инструмента для ДР, подачи и глубин резания на первом и втором проходах в значительной степени определяется направлением второго прохода D_r^2 по отношению к первому проходу инструмента D_r^1 (рис. 2, *б*). При этом форма шипов также зависит от стороны ребра, в которую врезается инструмент на втором проходе. Поскольку ребро, получаемое ДР на первом

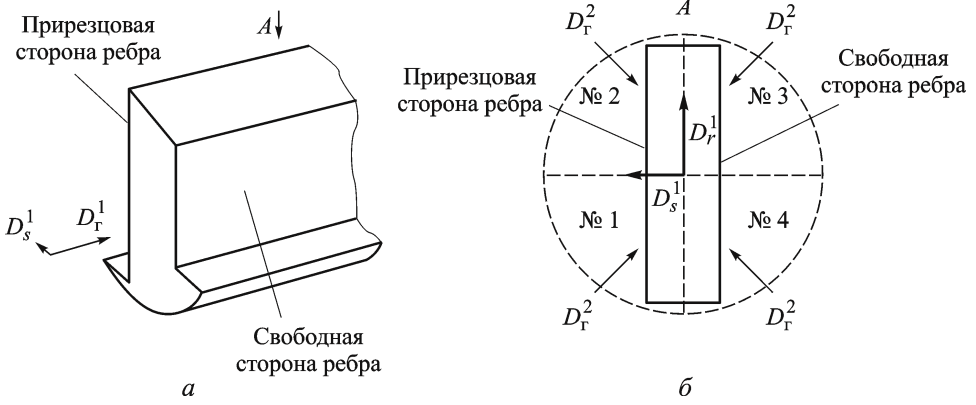


Рис. 2. Направления главного D_r^1 и вспомогательного D_s^1 движения резания на первом проходе при формировании ребра (а) и возможные направления главного движения инструмента D_r^2 на втором проходе (б)

проходе, это, по сути, не отделившаяся по своей узкой стороне стружка, то ребру так же, как и стружке, присуще различие свойств его боковых сторон. Прирезцовая сторона выглажена и нагартована, свободная сторона ребра имеет бóльшую шероховатость за счет выхода плоскостей сдвига. Различие в форме шипов при врезании с разных сторон ребра также получается из за несимметричности поперечного профиля ребра как в верхней части, так и в корневой зоне (рис. 2, а).

Для обозначения направления второго прохода инструмента при получении шипов угловой отсчет в дальнейшем будем проводить от направления первого прохода в направлении по ходу часовой стрелки. Характерными четвертями в этом случае будут диапазоны углов второго прохода $0 \dots 90^\circ$, $90^\circ \dots 180^\circ$, $180^\circ \dots 270^\circ$ и $270^\circ \dots 360^\circ$, условно обозначенные на рис. 2, б номерами от 1 до 4.

Эксперимент по определению влияния направления второго прохода на форму шипов проводился при следующих условиях. Главный угол инструмента для ДР в плане $\varphi = 30^\circ$, вспомогательный угол инструмента в плане $\varphi_1 = 90^\circ$. Обработывалась медь марки М1 на строгальном станке. Шаг (подача инструмента на двойной ход) первого и второго проходов составлял $p_1 = p_2 = 0,8$ мм, глубина резания первого и второго проходов $t_1 = t_2 = 0,4$ мм.

Принципиальная схема формирования шипов различного типа инструментом для ДР показана на рис. 3. При тупых углах встречи β инструмента и ребра на втором проходе независимо от входа в прирезцовую (соответствует первой четверти, см. рис. 2, б) или свободную сторону ребра (третья четверть) формируются шипы-иголки. При острых углах встречи β (см. рис. 3) при входе инструмента в прирезцовую сторону ребра (соответствует второй четверти, см. рис. 2, б) формируются винтовые шипы, а при входе в свободную сторону ребра (четвертая четверть) — шипы крючкообразной формы.

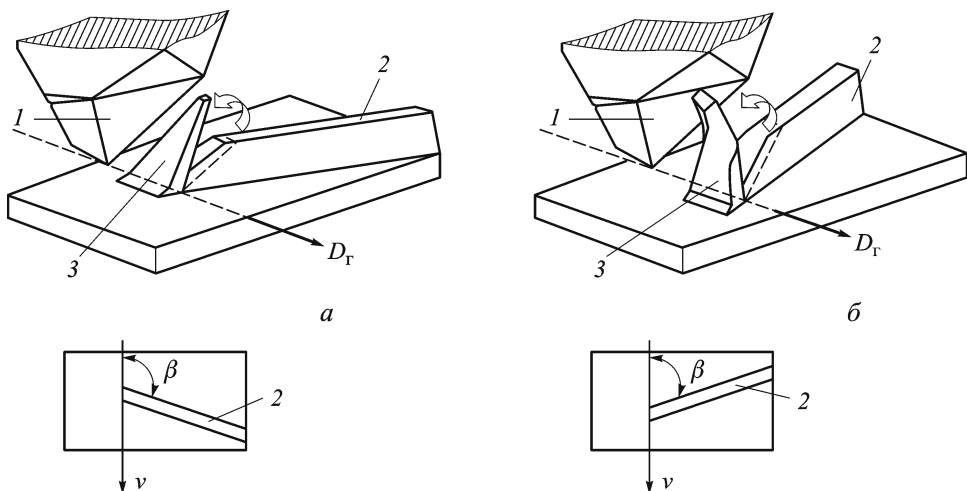


Рис. 3. Схема формирования шипов-иглолок (а), винтовых шипов и шипов-крючков (б):

1 – инструмент для деформирующего резания; 2 – ребро, сформированное на предыдущем проходе инструмента; 3 – шип, формируемый на втором проходе инструмента

Теоретически возможно определить увеличение площади поверхности на штырьковых структурах, получаемых методом ДР, по сравнению с плоскостью, несмотря на их сложную геометрическую форму. Общее увеличение площади поверхности складывается из двух составляющих: увеличение площади при образовании ребер на первом проходе инструмента и дополнительное увеличение площади поверхности на втором проходе (при формировании шипов). Учитывая, что при ДР подрезанный слой полностью остается на заготовке и только главная режущая кромка инструмента образует новые поверхности, приводим следующие рассуждения.

При оребрении на единицу ширины обработанной поверхности, равной шагу ребер, после обработки возникают две новые поверхности, длина каждой из которых в сечении, перпендикулярном скорости резания, составляет ширину подрезаемого слоя b , которая определяется глубиной резания t и главным углом инструмента в плане φ по зависимости $b = 2t / \sin \varphi$. Делением этой величины на шаг ребер с учетом того, что исходная поверхность заготовки осталась в вершинной части ребра, получим коэффициент увеличения площади после первого прохода инструмента (коэффициент оребрения) K_p :

$$K_p = 1 + \frac{2t_1}{p_1 \sin \varphi}, \quad (1)$$

где t_1 – глубина резания на первом проходе инструмента; p_1 – шаг ребер (подача инструмента) на первом проходе; φ – главный угол в плане инструмента для ДР на первом проходе.

Аналогично рассуждая, определим коэффициент увеличения площади поверхности $K_{ш}$ после второго прохода инструмента, который составит

$$K_{ш} = 1 + \frac{2t_1}{p_1 \sin \varphi} + \frac{2t_2 \sin \varphi}{p_2 \sin \varphi'}, \quad (2)$$

где t_2 , p_2 и φ' — то же на втором проходе инструмента.

В случае использования для первого и второго проходов инструмента с одинаковой геометрией (равенство главных углов в плане $\varphi = \varphi'$) формула примет вид

$$K_{ш} = 1 + \frac{2t_1}{p_1 \sin \varphi} + \frac{2t_2}{p_2}. \quad (3)$$

При равных режимных факторах обработки на первом и втором проходах инструмента (равенство глубины резания и подачи) увеличение площади штырьковой поверхности по сравнению с гладкой составит следующее число раз:

$$K_{ш} = 1 + \frac{4t}{p \sin \varphi}. \quad (4)$$

Сравнительные испытания на эффективность штырьковых теплообменных поверхностей с шипами двух разных типов были проведены в ООО “Криотек” (Москва), которое специализируется на изготовлении криогенного оборудования, в том числе в области медицинской техники. Данное решение было обусловлено двумя причинами. Во-первых, разработанный указанной фирмой криодеструктор биологических тканей “Криоиней” (рис. 4) нуждается в повышении эксплуатационных характеристик как по понижению температуры крионаконечников, охлаждаемых жидким азотом, и повышению скорости их охлаждения, так и по снижению уноса не испарившегося в крионаконечнике жидкого азота. Во-вторых, конструкция криодеструктора позволяет с минимальными затратами провести сравнительные испытания различных типов теплообменных поверхностей в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации широкого круга устройств, использующих охлаждение за счет испарения жидкого азота.

Для испытаний было подготовлено четыре штырьковые теплообменные структуры (табл. 1) — две с винтовыми шипами и две с шипами в виде иголок. Результаты для штырьковых теплообменных поверхностей сравнивались с результатами для гладкого образца. Испытуемые образцы крионаконечников были изготовлены из меди марки М1 и представляли собой диски диаметром 20 мм и высотой ~ 4 мм, которые впаивались в наконечник 3 (см. рис. 4). На одной из сторон диска методом деформирующего резания выполнена микроструктурированная штырьковая теплообменная поверхность. Отличие структур № 1

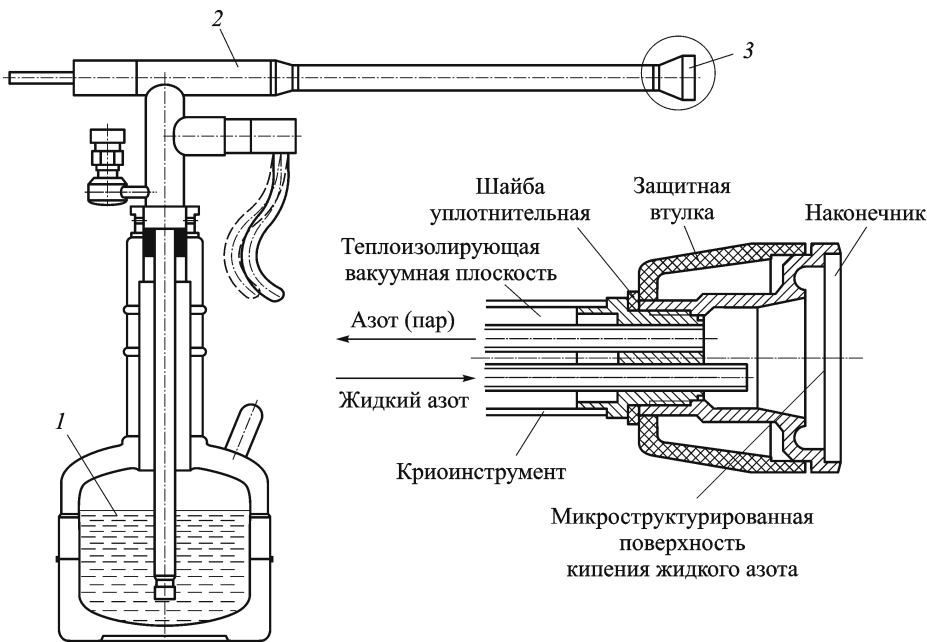


Рис. 4. Схема криодеструктора для испытаний микроструктурированных теплообменных поверхностей крионаконечников

Таблица 1

Параметры испытываемых штырьковых поверхностей

Параметры	Образец 1, шпиги винтовой структуры	Образец 2, шпиги игольчатой структуры	Образец 3, шпиги винтовой структуры	Образец 4, шпиги игольчатой структуры
Шаг структуры p , мм	0,8	0,8	0,4	0,4
Высота структуры H , мм	1,1	1,2	0,5	0,6
Угол направления второго прохода ин- струмента по отно- шению к первому	120°	255°	120°	255°

и № 3, а также № 2 и № 4 состояло только в масштабном параметре. Структуры № 2 и № 4 имели высоту и шаг в 2 раза меньше, чем структуры № 1 и № 4. Отметим 5-кратное увеличение площади поверхности всех образцов со штырьковой структурой по сравнению с гладким образцом для всех штырьковых структур вне зависимости от формы шпигов и их размера, поскольку увеличение площади (4) зависит только от соотношения глубины резания к шагу и главного угла инструмента в плане, которые для всех образцов были одинаковыми.

Критериями качества теплообменной поверхности при охлаждении жидким азотом являлись скорость охлаждения крионаконечника и минимально достигаемая температура модельной среды.

Испытания проводились при охлаждении модельного материала, когда к крионаконечнику прижималась ячейка с модельной средой (желеобразная масса на основе желатина), имитирующей замораживаемую биологическую ткань. Температура оценивалась по показанию термопары, закрепленной на краю поверхности образца крионаконечника, контактирующей с охлаждаемой средой.

Результаты испытаний представлены на рис. 5, 6 и в табл. 2. По результатам испытаний наиболее перспективными по минимально достигнутой температуре (см. рис. 5) и скорости охлаждения (см. рис. 6) оказались образцы с микроструктурированной теплообменной поверхностью, полученные методом ДР, в виде наклонных заостренных шипов (шипы игольчатой структуры).

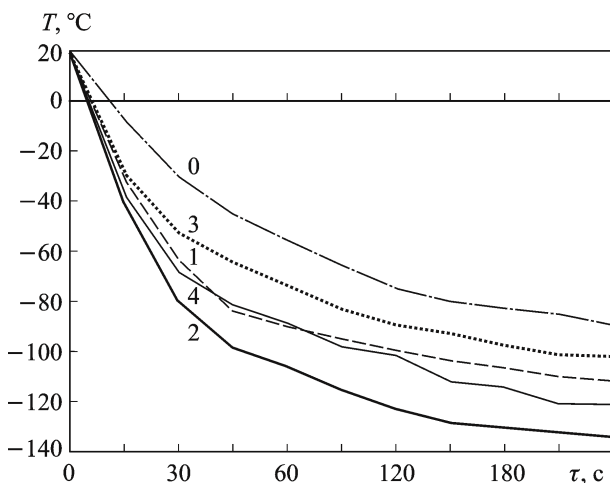


Рис. 5. Зависимость температуры образцов крионаконечников T от времени испытаний τ

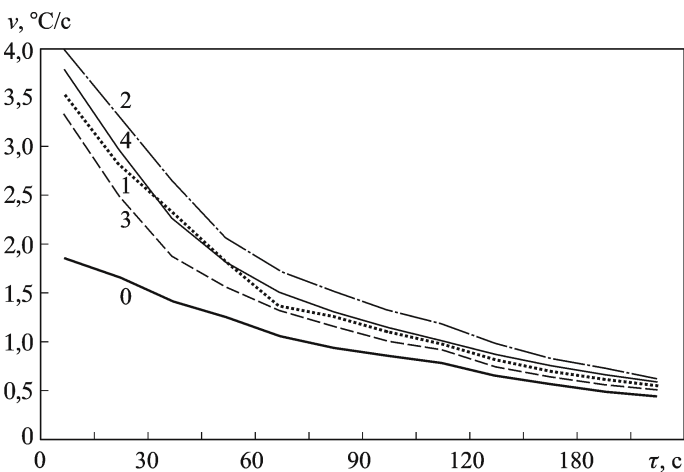


Рис. 6. Изменение скорости охлаждения образцов v крионаконечников за период τ с начала испытаний

**Результаты испытаний при охлаждении испытуемыми образцами
крионаконечников в модельной среде**

№ наконечника	Характеристика	Минимальная температура, °С	Время выхода на режим, с, при температуре	
			–70 °С	–100 °С
0	Гладкая поверхность	–92	105	–
1	Шипы винтовой структуры	–118	35	120
2	Шипы игольчатой структуры	–135	25	45
3	Шипы винтовой структуры	–106	55	200
4	Шипы игольчатой структуры	–134	35	105

При испытаниях в течение 6 мин минимально достигнутая температура образцов № 2 и № 4 составила минус 134–135 °С, в то время как для гладкого образца температура составила только –92 °С (см. табл. 2).

Скорость охлаждения на первой минуте испытания для образца № 2 составила приблизительно в 1,7 раза больше, чем для гладкого образца (2,08 °С/с и 1,25 °С/с) соответственно (см. рис. 6).

Поскольку различия в результатах испытаний для образцов № 2 и № 4 незначительны, то можно сделать вывод о несущественности влияния масштабного фактора на теплообменные характеристики (в данном диапазоне характерных размеров шипов).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кутателадзе С. С.* Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
2. *Кипение* воды на микроструктурированных поверхностях / Ю.Ф. Гортышов, А. Попов, Н.Н. Зубков и др. // Труды Академэнерго. 2012. № 1. С. 14–31.
3. *Зубков Н. Н.* Совмещение процессов резания и обработки давлением в новом методе формообразования развитых поверхностных структур // КШП. ОМД. 2002. № 10. С. 17–20; 29–34.
4. *Патент* 2044606 РФ В23 в1/110. Способ получения поверхностей с чередующимися выступами и впадинами и инструмент для его реализации; заявители: Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников // Изобретения. 1995. № 27.
5. *European Patent* EP1692447. Method and tool for making enhanced heat transfer surfaces / Thors P., Zoubkov N. // European Patent, Bulletin No. 34, 2006. 46 p.

REFERENCES

1. *Kutateladze S. S.* *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory of heat transfer]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979, 416 p.
2. *Gortyshev Yu. F., Popov A. A., Zubkov N. N., et. al.* *Kipenie vody na mikrostrukturirovannykh poverkhnostyakh* [Boiling of water on microstructured surfaces]. Trudy Akademenergo [Proc. of Akademenergo], 2012, no. 1, pp. 14–31.
3. *Zubkov N. N.* Combining cutting and plastic working processes in a new method for making enhanced surface structures. KSHP OMD – Forging and Stamping Industry. Materials Forming, 2002, no. 10, pp. 17–20; 29–34 (in Russian).

4. *Zubkov N. N., Ovchinnikov A. I.* Sposob polucheniya poverkhnostey s chereduyushchimisya 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 RF, no. 2044606, 1995.
5. *Thors P., Zoubkov N.* Method and tool for making enhanced heat transfer surfaces. European Patent, no. EP1692447, 2006.

Статья поступила в редакцию 22.06.2012

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 в области технологии машиностроения, резания материалов, разработки и исследования метода деформирующего резания.

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

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 in the field of technology of machine building, cutting of materials, development and investigation of method for deformational cutting. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

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

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

A.I. Ovchinnikov — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Instrumental Equipment and Technologies” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of cutting of materials, finishing methods of treatment, deformational cutting. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

Александр Сергеевич Трофимович — студент кафедры “Инструментальная техника и технологии” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор одной научной работы в области деформирующего резания.

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

A.S. Trofimovich — student of “Instrumental Equipment and Technologies” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of a publication in the field of deformational cutting. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

Георгий Юзикович Цфасман — сотрудник ООО “Криотек”. Автор пяти научных работ в области криогенной техники.

ООО “Криотек”, 119991, Моск. обл., г. Люберцы, ул. Волковская, д. 63.

G.Yu. Tsfasman — employee of ООО “Kriotek”. Author of five publications in the field of cryogenic technology. ООО “Kriotek”, ul. Volkvskaya 63, Lyubertsy, Moscow region, 119991 Russia.

Всеволод Владимирович Городников — сотрудник ООО “Криотек”. Специалист в области криогенной техники.

ООО “Криотек”, 119991, Моск. обл., г. Люберцы, ул. Волковская, д. 63.

V.V. Gorodnikov — employee of ООО “Kriotek”. Specialist in the field of cryogenic technology. ООО “Kriotek”, ul. Volkvskaya 63, Lyubertsy, Moscow region, 119991 Russia.