

Встроенными средствами параметрического моделирования задавали параметры взаимодействия фрезы и заготовки и накладывали ограничения на их перемещение. Определяли смещения Δ оси фрезы с момента контакта с заготовкой до соответствующей глубины t резания, задавая угол контакта $\psi \approx 0$. Одновременно с измерением смещения Δ измеряли угол ε .

Экспериментально были получены составляющие силы резания:

$$P_h = 3,64 \cdot 10^{-7} L^{0,35} S^{2,94} t^{2,13},$$

$$P_v = 2,14 \cdot 10^{-1} L^{0,47} S^{0,72} t^{0,58},$$

где $L \in [118, 130]$ — вылет фрезы относительно торца шпинделя, мм; $S \in [100, 125]$ — подача; $t \in [1, 4]$ — глубина резания, мм. Полученные данные обеспечивают адаптивное управление функциями, используемыми в качестве критериев процесса фрезерования путем их сравнения с текущими составляющими силы резания.

Программа обеспечивает поворот измеренных составляющих силы резания на произвольный

фиксированный угол в плоскости стола динамометра и инвертирование значений по осям для приведения системы координат динамометра к составляющим силы резания в зависимости от направления подачи. Кроме того, автоматически определяется граница рациональных данных и обеспечивается синхронизация во времени с моментами начала и окончания фрезерования всех граней детали. Программа позволяет задавать форму и ориентацию обрабатываемых поверхностей независимо от координатной системы динамометрической паллеты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Grigoriev S. N., Kutin A. A., Turkin M. V. Modelling complex production processes in aerospace industry based on dimensional analysis // *Proceedia CIRP*. 2013. N. 7. P. 473—478.
2. Пат. 113030 Рос. Федерации на полезную модель: МПК G01N 3/58, B23Q 17/09. Адаптивная система управления процессом резания на металлорежущем станке.
3. Козочкин М. П., Маслов А. Р., Порватов А. Н. Управление процессом резания посредством интеграции подсистемы диагностирования в

систему ЧПУ металлообрабатывающего станка // *Вестник МГТУ "Станкин"*. 2011. № 3. С. 110—111.

4. Маслов А. Р. Измерение параметров шероховатости обрабатываемой поверхности при точении деталей из жаропрочных сплавов // *Измерительная техника*. 2012. № 6. С. 37—40.

5. Козочкин М. П., Маслов А. Р., Порватов А. Н. Инновационный аппаратно-программный комплекс для диагностирования высокотехнологичных систем // *Инновации*. 2013. № 10 (180). С. 128—131.

6. Маслов А. Р., Леднев А. С., Созыкина А. И. Методика создания инновационной адаптивной системы телеметрического управления процессом микрообработки // *Вестник МГТУ "Станкин"*. 2012. № 4. С. 71, 72.

7. Борисов А. А., Маслов А. Р. Программа спектрального анализа динамометрической информации при диагностировании состояния микроинструмента // *Вестник МГТУ "Станкин"*. 2013. № 1. С. 87—88.

8. Григорьев С. Н., Борисов А. А., Маслов А. Р. Инструментальное обеспечение микрообработки // *Справочник. Инженерный журнал*. 2011. № 12. С. 32—37.

9. Борисов А. А., Маслов А. Р. Малогабаритный вспомогательный инструмент для фрезерования сложнопрофильных поверхностей изделий // *СТИН*. 2012. № 12. С. 31—35.

УДК 621.9.042:536.24.

Н. Н. ЗУБКОВ, д-р техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва), e-mail: zoubkovn@bmsu.ru

Получение подповерхностных полостей деформирующим резанием для интенсификации пузырькового кипения

Предложены новые способы получения подповерхностных полостей на деталях теплообменной аппаратуры на основе деформирующего резания для интенсификации пузырькового кипения.

Ключевые слова: деформирующее резание, пузырьковое кипение, интенсификация теплообмена, подповерхностные полости.

The new methods of obtaining of subsurface cavities on heat-transfer equipment parts on the base of deforming cutting for enhancement of bubble boiling are suggested.

Keywords: deforming cutting, bubble boiling, heat-transfer enhancement, subsurface cavities.

В химической, пищевой, нефтяной и других отраслях промышленности используют различные теплообменные аппараты, основанные на кипении

жидкостей. Данный процесс используется в паровых котлах, испарителях электростанций, в атомных реакторах, при испарительном охлаждении металлургических печей, в холодильных и криогенных аппаратах, кондиционерах и пр.

Для минимизации габаритных размеров и металлоемкости теплообменных аппаратов применяют интенсификацию теплообмена при кипении активными и пассивными способами. Из последних наибольшее распространение получили способы с использованием структурированных поверхностей, т. е. микро- и макроструктур на поверхностях деталей, контактирующих с теплоносителями. Для этого поверхности кипения выполняют с оребрением или применяют пористые поверхности и поверхности с полужамнутыми подповерхностными

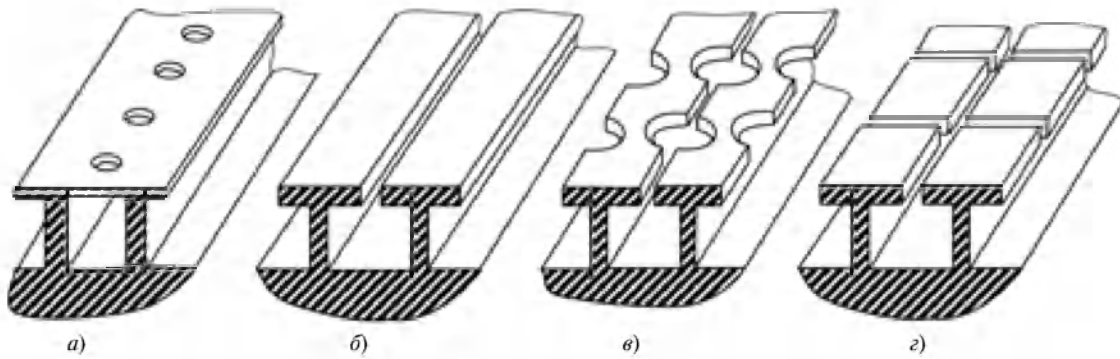


Рис. 1. Варианты структур подповерхностных паровых полостей

паровыми полостями [1]. Оребрение способствует интенсификации теплообмена, так как увеличивается площадь поверхности, а межреберные зазоры улучшают парообразование. Большую теплоотдачу при пузырьковом кипении обеспечивают пористые поверхности, получаемые напылением или спеканием порошковых материалов [2]. Однако данные материалы отличаются высокой стоимостью, что ограничивает их применение. В некоторых случаях такую же эффективность обеспечивают различные структуры с подповерхностными паровыми полостями (рис. 1) [1].

Превосходство по эффективности какой-либо структуры не выявлено. В работе [3] показано, что для разных жидкостей лучшими являются разные поверхности, кроме того, на их эффективность влияют условия кипения.

Как правило, для получения подповерхностных полостей на наружных поверхностях теплообменных труб применяют накатывание ребер роликами с последующим деформированием их вершин. Накатывание осуществляют блоком роликов, состоящим из тонких дисков, чаще используют внутренние оправки. Однако накатывание не обеспечивает шаг оребрения меньше 0,8 мм. Кроме того, нельзя получить такие поверхности внутри трубы, а также приходится использовать смазочные материалы и после накатывания выполнять трудоемкую очистку поверхностей.

Деформирующее резание (ДР), применяемое для оребрения, имеет технологические преимущества [4–7]. Суть данной технологии заключается в подрезании поверхностных слоев заготовки и их последующем деформировании, при этом подрезанный слой не отсоединяется от заготовки, образуя макрорельеф в виде оребрения (рис. 2).

Способы создания поверхностей с подповерхностными полостями методом ДР можно разделить на две группы: первая основывается на последующем пластическом деформировании сформированных ребер; вторая — на формировании подповерхностных полостей инструментом специальной геометрии.

Первую группу способов можно разделить на три подгруппы:

- 1) деформирование вершин ребер с изгибом (рис. 3, а);
- 2) деформирование вершин ребер с получением утолщения (рис. 3, б);
- 3) комбинированные — изгиб вершин и утолщение (рис. 3, в).

Вторая группа способов также делится на три подгруппы:

- 1) применяется разнонаправленный наклон парных ребер;
- 2) используется инструмент для ДР с деформирующей кромкой специальной конфигурации;
- 3) для получения ребер с утолщением на вершине используют инструмент с ломаной режущей кромкой.

При формировании подповерхностных полостей способами первой группы на плоской или цилиндрической (наружной или внутренней) поверхностях методом ДР формируется вертикальное оребрение без разрывов или с разрывами по вер-

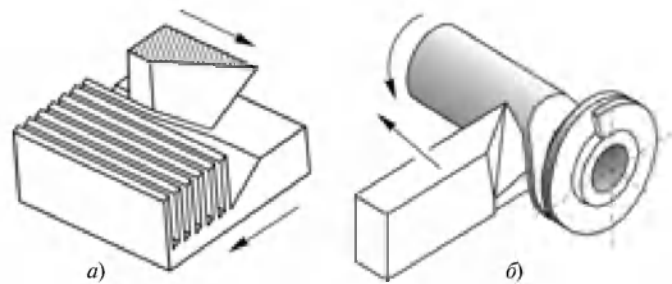


Рис. 2. Схемы деформирующего резания при формировании ребер на плоскости (а) и на трубе (б)

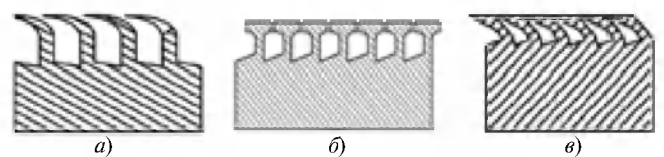


Рис. 3. Подповерхностные полости, полученные деформирующим резанием и последующей пластической деформацией

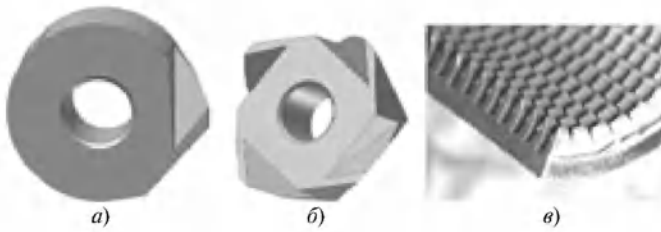


Рис. 4. Однозубый (а) и четырехвершинный (б) инструменты для оребрения труб и оребренная структура с разрывами вершин (в)

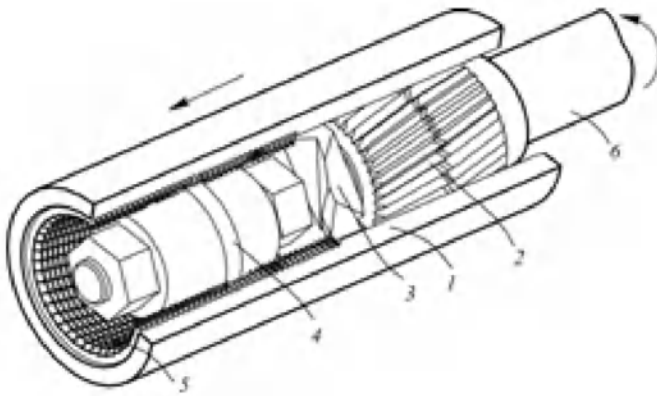


Рис. 5. Комбинированный инструмент для деформирующего резания и пластического деформирования

пинам ребер. Параметры ребер (шаг, ширина межреберного зазора, высота ребер) обеспечиваются соответствующими параметрами инструмента и режимами обработки [8]. Полученные параметры оребрения приведены в работе [9]. Разрывы по вершинам ребер можно обеспечить предварительным формированием насечек глубиной $0,1 \pm 0,2$ мм.

Рассмотрим наиболее сложный вариант формирования внутренней поверхности кипения в трубной заготовке. Предварительные насечки (рис. 4, а) глубиной 0,2 мм формировали дорнованием внутренней поверхности трубы деформирующей многозубой протяжкой, затем обрабатывали инструментом для ДР. Инструмент может иметь одну режуще-деформирующую вершину (рис. 4, а) или четыре (рис. 4, б), т. е. осуществлять четырехзаходное оребрение, что повышает производительность. Таким образом, формируется поверхность, показанная на рис. 4, в, которая подвергается пластической деформации, происходит выглаживание. Варьируя величину натяга между выглаживателем и поверхностью с оребренной структурой и число проходов инструмента, можно получить различные варианты подповерхностных полостей (см. рис. 1 и 3).

С помощью комбинированного инструмента можно совместить операции образования насечек, ДР и деформирования (рис. 5) [10]. В этом случае инструменты для насечек (2), ДР (3) и выглаживатель 4 монтируются на державке б, которая вра-

щается при поступательном движении трубной заготовки, например, от подающих роликов. Шаг получаемой структуры зависит от частоты вращения инструмента и подачи трубы l в осевом направлении.

Пластическое деформирование оребренных структур наружных цилиндрических и плоских поверхностей можно осуществлять обкатыванием. В этом случае поверхности инструмента и детали представляют собой не пару трения скольжения, а пару трения качения. Обкатывание выполняют роликом с линейной или радиусной образующей. При многопроходном обкатывании роликом можно получить полностью замкнутые подповерхностные полости.

Недостатком способа пластической деформации вершин ребер является сложность разделения процессов утолщения вершин, их изгиба и изгиба самого ребра. Экспериментальным подбором можно добиться заданных параметров поверхности кипения, но для других материалов и параметров оребрения потребуются новые исследования.

Устранить этот недостаток и повысить технологичность позволяют способы, основанные на одностадийном формировании подповерхностных полостей, т. е. с помощью инструмента специальной геометрии.

Для этого применяют многозаходное оребрение с четным числом заходов. При этом инструменты, формирующие соседние заходы, имеют разные вспомогательные углы φ_1 в плане (рис. 6, а), что обеспечивает разный угол наклона соседних ребер (рис. 6, б), образуя полузамкнутую подповерхностную паровую полость. Размер щели для выхода пара зависит от шага и угла наклона ребер, их толщины и высоты.

Целесообразно обеспечивать одинаковое отклонение от прямого угла деформирующих кромок, т. е. если у первого инструмента $\varphi_1 = 100^\circ$, то у второго инструмента $\varphi_1 = 80^\circ$. Остальные параметры инструментов и режимы резания должны совпадать, что обеспечит равные толщину и высоту смежных ребер.

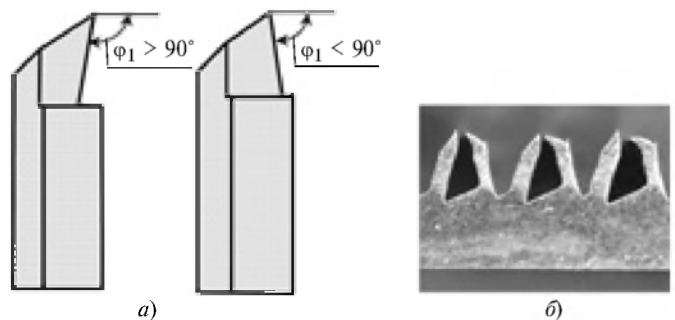


Рис. 6. Элементы инструмента для формирования разнонаклонных ребер при двухзаходном оребрении (а) и профиль полученных подповерхностных паровых полостей (б)

Инструмент для формирования внутреннего разнонаклонного оребрения с совмещенными двумя режуще-деформирующими вершинами, используемый для получения двухзаходных разнонаправленных ребер на внутренней стороне трубы, приведен на рис. 7.

Двух- или четырехзаходное оребрение на наружных цилиндрических поверхностях можно осуществлять путем вращения инструмента вокруг трубы, движущейся поступательно.

Ширина b зазора в верхней части ребер определяется по формуле

$$b = S_0[(1 - \sin\varphi) - \operatorname{tg}(90 - \varphi)] \times \left[\frac{2t \sin\varphi_1}{\sin\varphi} - S_0 \sin\varphi(1 - \sin\varphi) \right],$$

где S_0 — шаг ребер между соседними заходами; t — глубина резания; φ и φ_1 — главный и вспомогательный углы инструмента в плане.

Формирование полостей путем создания разнонаправленных ребер имеет существенный недостаток — только одна пара ребер формирует полузамкнутую паровую полость, вторая пара ребер образует открытую полость.

При получении подповерхностных полостей инструментом для ДР с деформирующей кромкой специальной конфигурации окончательный профиль ребра соответствует проекции деформирующей кромки на основную плоскость. Таким образом, изменяя конфигурацию деформирующей кромки, можно изменять положение ребра на за-

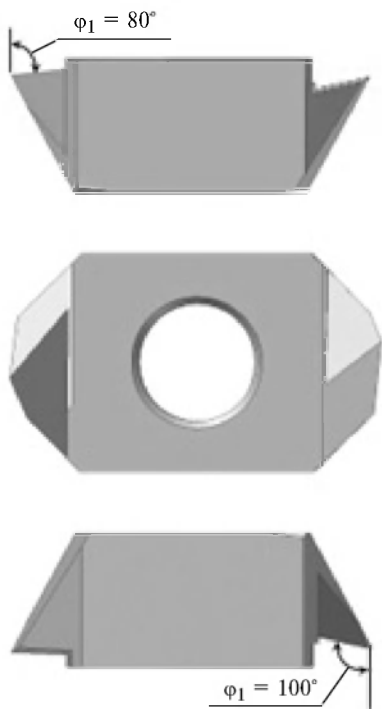


Рис. 7. Двухвершинный инструмент для ДР для внутреннего двухзаходного разнонаклонного оребрения

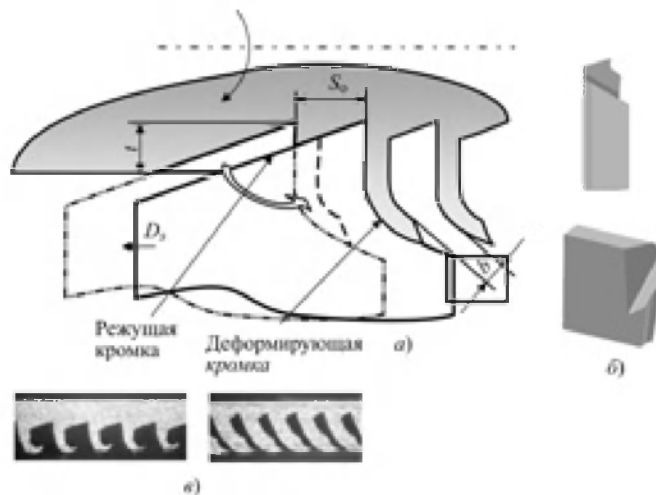


Рис. 8. Схема формирования подповерхностных полузамкнутых полостей инструментом с деформирующей кромкой специальной конфигурации (а), резцовая вставка (б) и варианты получаемых структур на трубах из меди М2 с шагом $S_0 = 0,56$ мм (в)

готовке, т. е. инструментом для ДР можно загибать вершины ребер, в результате чего формируется полузамкнутая полость (рис. 8). Подрезаемый главной режущей кромкой слой материала (заштрихован) перемещается по передней поверхности и занимает положение, определяемое деформирующей кромкой.

Существенный недостаток данной обработки — окончательное положение ребра не полностью повторяет контур деформирующей кромки резца, так как под действием сил ДР вершины изгибаются на больший угол. Вершины изгибаются в сторону заготовки под неконтролируемым углом (от 0 до 45° относительно базовой поверхности заготовки). Поэтому теоретический расчет щелевого зазора в верхней части ребер невозможен, т. е. требуется экспериментальный подбор параметров инструмента.

Для получения подповерхностных полузамкнутых или замкнутых полостей путем утолщения вершин ребер используют инструмент с ломаной главной режущей кромкой [11]. Схема формирования таких ребер показана на рис. 9. Так как толщина ребра пропорциональна синусу главного угла инструмента в плане, подрезанный слой на периферии имеет большую толщину. Подрезанный слой в результате отгибания инструментом для ДР формируется в ребро с утолщением вершины.

В зависимости от отношения подачи S_0 к глубине t резания для участка кромки с главным углом φ' в плане, получают ребра двух видов: при $\frac{S_0}{t''} < \frac{\sin(\varphi'' - \varphi') \sin\varphi''}{\cos\varphi'}$ формируемые полости будут иметь прямой выход для пара (рис. 9, а); при $\frac{S_0}{t''} \geq \frac{\sin(\varphi'' - \varphi') \sin\varphi''}{\cos\varphi'}$ выход будет наклонный (рис. 9, б).

Получены зависимости параметров формируемых полостей от режима обработки и параметров инструмента. Для подповерхностных полостей с прямым выходом:

$$b' = S_0 - S_0 \sin \varphi' - \frac{\sin(\varphi'' - \varphi') t''}{\sin \varphi''};$$

$$\text{ширина паровой полости } b'' = S_0(1 - \sin \varphi');$$

$$\text{высота паровой полости } h' = \frac{t'}{\sin \varphi'} - S_0 \cos \varphi';$$

$$\text{высота до щелевого зазора } h'' = \frac{t'}{\sin \varphi'} - S_0 \cos \varphi' + \frac{\cos(\varphi'' - \varphi') t''}{\sin \varphi''};$$

$$\text{полная высота ребер } h''' = \frac{t'}{\sin \varphi'} + \frac{\cos(\varphi'' - \varphi') t''}{\sin \varphi''}.$$

Для подповерхностных полостей с наклонным паровым выходом:

$$b' = S_0 \cos(\varphi''' - \varphi'')(1 - \sin \varphi'' - \cos \varphi'' \operatorname{tg}(\varphi''' - \varphi''));)$$

$$b'' = S_0(1 - \sin \varphi');)$$

$$h' = \frac{t'}{\sin \varphi'} - S_0 \cos \varphi';)$$

$$h''' = \frac{t'}{\sin \varphi'} + \frac{\cos(\varphi'' - \varphi') t''}{\sin \varphi''}.)$$

Данным способом можно выполнять подповерхностные паровые полости и на внутренней стороне теплообменных труб.

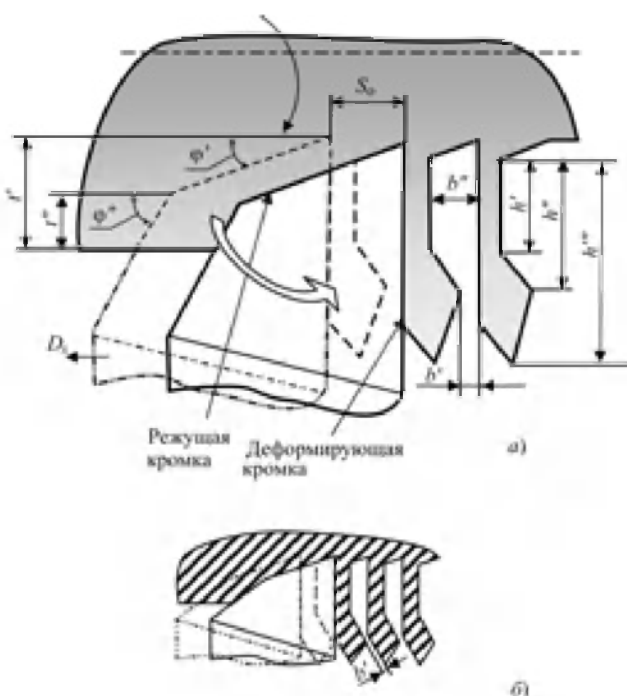


Рис. 9. Схема формирования подповерхностных полостей инструментом с ломаной режущей кромкой с прямым (а) и наклонным (б) выходом для пара

Наиболее технологичным является способ с использованием инструмента для ДР с ломаной главной режущей кромкой, так как применяется относительно простой инструмент и сам процесс обработки одностадийный. При этом применим аналитический метод определения параметров инструмента и режимов обработки для получения полостей с заданными параметрами.

Для улучшения теплообменных свойств поверхностей кипения, получаемых методом ДР, предложено нанесение двойного оребрения, двукратно увеличивающего площадь теплообменной поверхности (рис. 10, см. обложку).

При кипении воды теплоотдача структур с подповерхностными полостями, полученными методом ДР, в 9 раз выше, критическая плотность теплового потока увеличивается в 4÷6 раз по сравнению с поверхностью без оребрения [5, 6].

Таким образом, на основе метода деформирующего резания предложены новые способы получения поверхностей с подповерхностными паровыми полостями. Установлено, что наиболее технологичным способом является способ с использованием инструмента для ДР с ломаной главной режущей кромкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Kim N., Choi K. Nucleate pool boiling on structured enhanced tubes having pores with connecting gaps // Int. J. Heat Mass Transfer. 2001. N. 44. P. 17–28.
2. Нессис Е. И. Кипение жидкостей. М.: Наука, 1973. 279 с.
3. Pool boiling heat transfer of propane, isobutane and their mixtures on enhanced tubes with reentrant channels / Yu. Chen, M. Groll, R. Mertz et al. // International journal of heat and mass transfer. 2005. V. 48. N. 11. P. 2310–2322.
4. Кипение воды на микроструктурированных поверхностях / Ю. Ф. Гортышов, И. А. Попов, Н. Н. Зубков и др. // Тр. Академэнерго. 2012. № 1. С. 14–31.
5. Heat Transfer during the Boiling of Liquid on Microstructured Surfaces. P. 1: Heat Transfer during the Boiling of Water / I. A. Popov, N. N. Zubkov, S. I. Kas'kov et al. // Thermal Engineering. 2013. V. 60. N. 3. P. 157–165.
6. Heat Transfer during the Boiling of Liquid on Microstructured Surfaces. P. 2: Visualization of Boiling and Critical Heat Fluxes / I. A. Popov, N. N. Zubkov, S. I. Kas'kov et al. // Thermal Engineering. 2013. V. 60. N. 4. P. 285–294.
7. Investigation of Heat Transfer in Evaporator of Micro-Channel Loop Heat Pipe / A. Yakomaskin, V. Afanasiev, N. Zubkov et al. // Journal of Heat Transfer. 2013. V. 135. Is. 10. 7 с.
8. Зубков Н. Н. Разработка и исследование метода деформирующего резания как способа формообразования развитых макрорельефов: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2001. 478 с.
9. Зубков Н. Н. Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибкой поверхностных слоев // Новости теплоснабжения. 2005. № 4. С. 51–53.
10. Pat. 8573022 USA: B2 Int. B21D53/01. Method for making enhanced heat transfer surfaces.
11. Pat. 7311137 USA: Cl. Int. F28F1/40. Heat transfer tube including enhanced heat transfer surfaces.