

03

## **Влияние трехмерных капиллярно-пористых покрытий на теплообмен при кипении жидкости**

© А.С. Суртаев<sup>1</sup>, А.Н. Павленко<sup>1</sup>, В.И. Калита<sup>2</sup>, Д.В. Кузнецов<sup>1</sup>,  
Д.И. Комлев<sup>2</sup>, А.А. Радюк<sup>2</sup>, А.Ю. Иванников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup> Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,  
Москва

E-mail: surtaevas@gmail.com

Поступило в Редакцию 30 июня 2015 г.

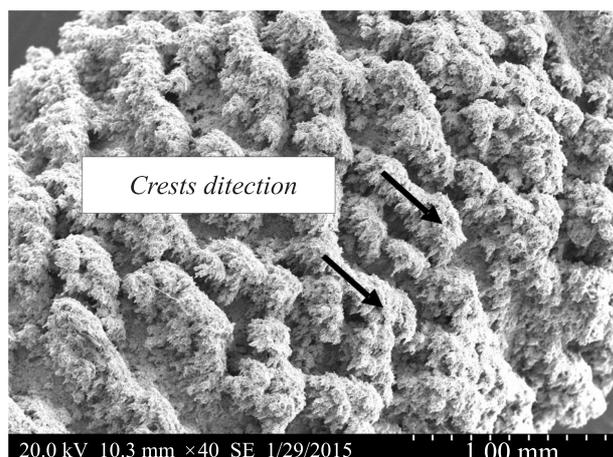
Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении фреона R21 на трехмерных капиллярно-пористых покрытиях в условиях большого объема. В опытах были использованы покрытия различной толщины, полученные методом плазменного напыления. На основе сравнения опытных данных показано, что коэффициенты теплоотдачи для трубки с пористым покрытием толщиной  $500\ \mu\text{m}$  более чем в 2 раза превышают соответствующие значения для кипения жидкости на трубке без покрытия. Для покрытия с толщиной  $100\ \mu\text{m}$  интенсификация теплообмена в режиме пузырькового кипения не наблюдается.

Кипение является наиболее эффективным способом отвода тепла от теплоотдающей поверхности. Тем не менее возрастающие требования по снижению массогабаритных характеристик теплообменных аппаратов, улучшению условий охлаждения и термостатирования теплонапряженных устройств различного назначения стимулируют развитие методов интенсификации теплообмена при кипении. Широко используемым способом интенсификации теплообмена при кипении жидкости

является использование оребренных поверхностей, поверхностей типа Thermoxcel, различных пористых покрытий и т.д. [1]. В последнее время активно обсуждается возможность использования наножидкостей, которые являются коллоидными жидкостями с небольшими добавками наночастиц из металлов (Cu, Ag), окислов ( $Al_2O_3$ , CuO,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ) или углерода (алмазы, нанотрубки) размером 10–500 nm, для повышения теплоотдачи и величины критического теплового потока при кипении [2–4]. Как отмечено во многих работах, например в [4–6], основное влияние на критический тепловой поток (увеличение более чем в 1.5–2 раза) при использовании наножидкостей оказывают осаждение наночастиц в процессе кипения на теплоотдающей поверхности и формирование на ней пористого слоя. В то же время исследователи отмечают, что добавление наночастиц практически не влияет на теплоотдачу при кипении [4,7]. Более того, в ряде работ [5,8] было показано снижение интенсивности теплообмена при использовании наножидкостей. Поэтому в настоящий момент остается открытым вопросом об использовании наножидкостей для интенсификации теплоотдачи при кипении. Наиболее перспективным и актуальным направлением, которому отводится наибольшее внимание исследователей в настоящее время, является разработка методов создания микро- и наноструктурированных поверхностей с контролируемыми свойствами и их использование для интенсификации теплообмена и повышения критических тепловых потоков при кипении различных жидкостей [9,10].

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния трехмерных капиллярно-пористых покрытий, полученных с использованием метода плазменного напыления, на теплообмен при пузырьковом кипении жидкости.

Экспериментальные исследования теплообмена при кипении жидкости в условиях большого объема были проведены с использованием экспериментальной установки, детальное описание которой представлено в работе [11]. В качестве рабочей жидкости был использован фреон R21 ( $CHCl_2F$ ), находящийся на линии насыщения при приведенном давлении 0.04 (0.193 МПа). Давление в рабочей камере измерялось электронным преобразователем давления Метран-55. В экспериментах использовались три рабочих участка: трубка без покрытия, трубки с покрытиями толщиной  $\delta = 100$  и  $500 \mu m$ . В качестве теплообменной поверхности была использована цилиндрическая трубка из нержавеющей стали длиной 47 mm, внешним диаметром 3 mm и толщиной



**Рис. 1.** СЭМ-изображение поверхности нагревателя с напыленным покрытием из бронзы. Толщина покрытия  $500\ \mu\text{m}$ .

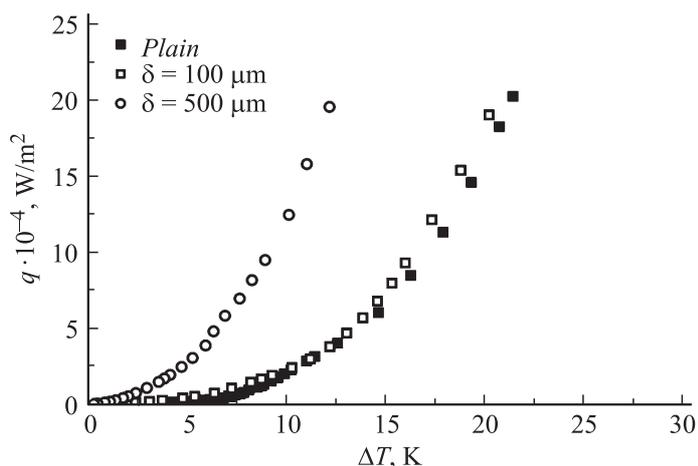
стенки  $0.5\ \text{mm}$ . Характеристики трехмерных капиллярно-пористых покрытий, использованных в опытах, представлены в таблице. Покрытия на исходную рабочую поверхность наносились методом плазменного напыления [12,13]. Суть данного метода заключается в том, что в высокотемпературную плазменную струю подается порошок распыляемого материала, который нагревается, плавится и в виде двухфазного потока направляется на подложку под некоторым углом наклона оси конуса напыляемых частиц к поверхности подложки. Преимущество данного метода по сравнению с традиционными заключается в том, что он позволяет получать покрытия с максимальной открытой пористостью, высокими адгезией и степенью однородности. Для напыления использовался порошок бронзы, содержащей 9% Al и 2% Mn. Размер частиц порошка  $20\text{--}32\ \mu\text{m}$ . На рис. 1 представлена фотография рабочего участка с покрытием толщиной  $500\ \mu\text{m}$ , полученная с использованием сканирующего электронного микроскопа. Видно, что покрытие представляет собой практически равномерно распределенные и ориентированные по поверхности трубки преимущественно в одном направлении (указано на рисунке) гребни и впадины. Следует отметить, что в поперечном на-

Характеристики покрытий, изготовленных методом плазменного напыления

№ образца	Диаметр с покрытием, mm	Толщина покрытия, $\mu\text{m}$	Масса покрытия, g	Объем покрытия, расчет по размерам, $\text{mm}^3$	Объем покрытия, расчет по массе, $\text{mm}^3$	Пористость покрытия, %
1	3.2	100	0.11	45.5	14.5	68
2	4	500	0.41	225.3	53.9	77

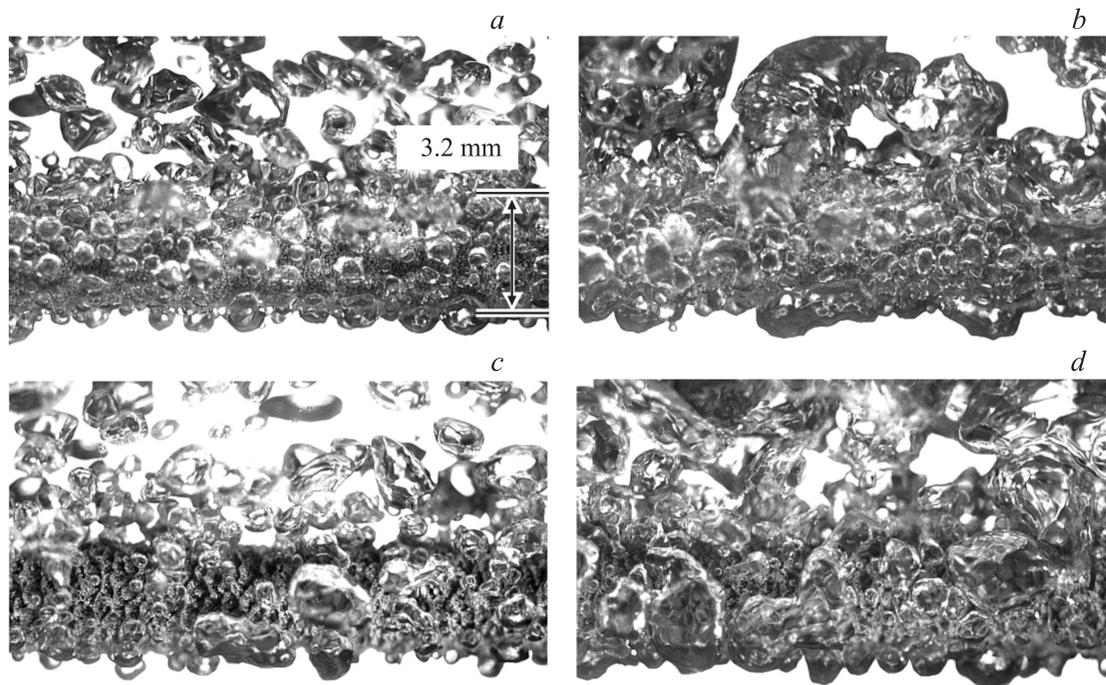
правлении гребни имеют пологую поверхность с одной стороны и более крутую с отрицательным углом наклона с другой стороны. Для данного покрытия ширина образующихся каналов между гребнями, так же как и ширина гребней, варьируются в диапазоне 100–300  $\mu\text{m}$ , а минимальный диаметр пор на структурированной поверхности составляет несколько микрон. Для трубки с толщиной покрытия 100  $\mu\text{m}$  ширина каналов и гребней составляет 50–120  $\mu\text{m}$ .

Тепловыделение на рабочем участке осуществлялось пропусканием постоянного электрического тока с использованием управляемого источника питания. Плотность теплового потока определялась по показаниям величины тока, пропускаемого через нагреватель, и разности потенциалов между клеммами, расположенными на концах рабочего участка. Температура рабочего участка измерялась с использованием малоинерционного платинового датчика температуры, установленного внутри трубки. С помощью идентичного датчика измерялась температура в объеме жидкости. Коэффициент теплоотдачи в исследовании определялся по формуле  $\alpha = q/\Delta T$ , где  $q$  — плотность теплового потока,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\Delta T = T_h - T_{sat}$ , где  $T_h$  — температура нагревателя, К;  $T_{sat}$  — температура насыщения, К. Управление источником тока и измерение сигналов датчиков осуществлялись с использованием платы АЦП/ЦАП и программы управления экспериментом, разработанной в среде LabView. Высокоскоростная видеосъемка процесса осуществлялась через оптические окна экспериментальной установки, расположенные напротив рабочих участков, с использованием цифровой камеры Phantom v7.0. Частота высокоскоростной видеосъемки в опытах варьировалась в диапазоне от 4 до 7 kHz с максимальным разрешением 800–600 pix (1 pix  $\approx$  0.03 mm).



**Рис. 2.** Кривые кипения для поверхностей без покрытия и с покрытиями различной толщины.

На рис. 2 представлены кривые кипения фреона R21, полученные для нагревателей без покрытия и с покрытиями. Измерения проводились как при пошаговом увеличении, так и при понижении тепловой нагрузки. Анализ результатов показал, что явление гистерезиса, которое отмечалось многими экспериментаторами, при использовании нагревателя без покрытия и нагревателя с малой толщиной покрытия ( $100 \mu\text{m}$ ) практически отсутствует даже в условиях проведения опытов без предварительного длительного кипения. При этом результаты опытов по теплоотдаче для данных типов нагревателей практически совпадают во всей исследованной области тепловых нагрузок. При использовании трехмерного капиллярно-пористого покрытия толщиной  $500 \mu\text{m}$  наблюдается ярко выраженный гистерезис теплообмена. Измерения для данного типа нагревателя проводились после 3–4 h непрерывного кипения жидкости для уменьшения влияния гистерезиса. Из рис. 2 видно, что значения коэффициента теплоотдачи при использовании нагревателя с толщиной покрытия  $500 \mu\text{m}$  (опытные данные соответствуют режиму при снижении плотности теплового потока) более чем в 2 раза превышают соответствующие значения для трубок без покрытия и с покрытием  $100 \mu\text{m}$ .



**Рис. 3.** Визуализация кипения на нагревателях с покрытиями толщиной  $100\ \mu\text{m}$  (*a, b*) и толщиной  $500\ \mu\text{m}$  (*c, d*):  
*a* —  $q = 6.7 \cdot 10^4$ , *b* —  $20.2 \cdot 10^4$ , *c* —  $6.9 \cdot 10^4$ , *d* —  $19.5 \cdot 10^4\ \text{W/m}^2$ .

Анализ высокоскоростной визуализации процессов показывает, что характеры кипения различаются при заданных плотностях теплового потока для покрытий с разной толщиной. Из рис. 3 видно, что при близких значениях теплового потока плотность центров парообразования существенно ниже для нагревателя с покрытием большей толщины. Величина критического зародыша пара при наблюдающихся в экспериментах перегревах жидкости варьируется в диапазоне  $1-5 \mu\text{m}$ . Так как толщина покрытия главным образом влияет на характерные размеры каналов и гребней, составляющие сотни микрон, и слабо влияет на микрошероховатость поверхности, она не оказывает прямого влияния на плотность активных центров парообразования. Поэтому уменьшение количества активных центров с увеличением толщины покрытия напрямую связано с перегревом поверхности, который, как видно из рис. 2, меньше для покрытий большей толщины при одинаковых плотностях теплового потока.

Как показал анализ данных высокоскоростной видеосъемки динамических характеристик роста и отрыва паровых пузырей, средний отрывной диаметр пузыря при кипении фреона R21 на гладкой поверхности равен примерно  $250 \mu\text{m}$ . Для покрытий с толщиной  $500 \mu\text{m}$  глубина каналов в 2 раза превышает значение отрывного диаметра пузыря, а ширина каналов становится соизмеримой с данной величиной. Поэтому для покрытия с большей толщиной наблюдается задержка перемещения растущих паровых образований в каналах покрытия между гребнями. Это связано со слиянием мелких пузырей, образующихся в микропорах покрытия, и формированием более крупных паровых конгломератов у теплообменной поверхности. Наблюдаемое резкое увеличение времени роста крупных паровых образований до их отрыва от теплоотдающей поверхности приводит к формированию зон „макрослоя“. Увеличение областей тонких менисков жидкости между паровой и твердой фазами в зонах „макрослоя“ приводит к значительному увеличению доли тепла, передаваемого за счет интенсивного испарения. Наличие таких зон „макрослоя“ и обеспечивает выявленную интенсификацию теплообмена при кипении на структурированной поверхности с покрытием  $500 \mu\text{m}$ . Более высокая теплоотдача в зонах „макрослоя“ сопровождается снижением локальной температуры теплоотдающей поверхности. Это приводит к подавлению действующих центров парообразования в окрестности зон макрослоя вследствие механизма продольной теплопроводности в теплоотдающей стенке. Этим можно объяснить отмеченное выше сни-

жение плотности центров парообразования на нагревателе с большей толщиной капиллярно-пористого покрытия.

Указанный средний отрывной диаметр пузыря при кипении фреона R21 на гладкой поверхности в несколько раз превышает характерную высоту и ширину каналов между гребнями для покрытий с толщиной  $100\ \mu\text{m}$ . Поэтому процессы слияния пузырей в процессе их роста, формирующие зоны „макрослоя“ с высокоинтенсивным теплообменом, в этом случае проявляются значительно слабее. Вследствие этого при кипении фреона R21 на поверхности с покрытием при высоте каналов  $100\ \mu\text{m}$  не наблюдается задержки паровых конгломератов в каналах покрытия и динамические характеристики роста и отрыва паровых пузырей такие же, как и при кипении на поверхности без покрытия, что подтверждается анализом результатов высокоскоростной видеосъемки. Именно этим можно объяснить отсутствие интенсификации теплообмена при кипении фреона R21 на поверхности нагревателя с малой толщиной капиллярно-пористого покрытия.

Таким образом, в работе показано влияние трехмерных капиллярно-пористых покрытий различной толщины, полученных методом плазменного напыления, на теплообмен при кипении фреона R21. Обнаружено, что значения коэффициента теплоотдачи при кипении при использовании покрытий с толщиной  $500\ \mu\text{m}$  более чем в 2 раза превышают аналогичные значения, полученные для неструктурированной поверхности. Покрытие с толщиной  $100\ \mu\text{m}$  практически не оказывает влияния на теплообмен по сравнению с поверхностью без покрытия. Результаты исследования показывают перспективность использования данного метода плазменного напыления для создания покрытий с целью интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении. В то же время для определения степени влияния других характеристик подобных покрытий на теплообмен необходимо проведение дальнейших исследований на различных жидкостях и для разных приведенных давлений при варьировании материала покрытия, размера исходных при напылении частиц, условий напыления. Конечной целью является разработка рекомендаций по использованию метода плазменного напыления для создания покрытий с оптимальными параметрами для различных режимов теплосъема и систем стенка–покрытие–жидкость. Данные результаты будут полезны при проектировании новых высокоэффективных элементов теплообменного оборудования, систем термостабилизации и т. д., в которых реализуется режим пузырькового кипения жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-38-20982 мол\_a\_вед).

## Список литературы

- [1] *Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М.* Интенсификация теплообмена. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Казань: Центр инновац. технологий, 2009. 559 с.
- [2] *Kim H.* // *Nanoscale Res. Lett.* 2011. V. 6. P. 1–18.
- [3] *Бондаренко Б.И., Морару В.Н., Сидоренко С.В., Комыш Д.В., Ховавко А.И.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 18. С. 68–78.
- [4] *Минаков А.В., Лобасов А.С., Рудяк В.Я., Гузей Д.В., Пряжников М.И.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 13. С. 44–51.
- [5] *Gerardi C., Buongiorno J., Hu L., McKrell T.* // *Nanoscale Res. Lett.* 2011. V. 6. P. 1–17.
- [6] *Kim H., Kim E., Kim M.H.* // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2014. V. 69. P. 164–172.
- [7] *You S.M., Kim J.H., Kim K.H.* // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 83. P. 3374–3376.
- [8] *Bang I.C., Chang S.H.* // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2005. V. 48. P. 2407–2419.
- [9] *Ahn H.S., Kim M.H.* // *J. Heat Transfer.* 2012. V. 134. P. 024 001.
- [10] *Kim J.H., Gurung A., Amaya M., Kwark S.M., You S.M.* // *J. Heat Transfer.* 2015. V. 137. P. 081 501.
- [11] *Pavlenko A.N., Tairov E.A., Zhukov V.E., Levin A.A., Moiseev M.I.* // *J. Eng. Therm.* 2014. V. 23. N 3. P. 173–193.
- [12] *Калита В.И., Гнедовец А.Г., Комлев Д.М.* // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 6. С. 26–31.
- [13] *Kalita V.I., Trushnikova A.S., Bocharova M.A., Shaternikov B.N.* // *Russian metallurgy (Metally).* 2005. N 3. P. 282–288.