

УДК 621.7, 621.1

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ СТРУКТУРИРОВАННЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ

© В. П. Бессмельцев¹, А. Н. Павленко², В. И. Жуков³

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

³Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: bessmelt@iae.nsk.su

Рассмотрено применение метода селективного послойного лазерного спекания металлического порошка для нанесения капиллярно-пористых покрытий с заданной пористостью на теплоотдающие поверхности. Реализация данного метода в экспериментальных исследованиях процесса кипения на модифицированных поверхностях позволяет широко варьировать основные параметры микроструктурированных капиллярно-пористых покрытий и других трёхмерных структур: материал, пористость, амплитуду (высоту), толщину остаточного слоя и длину волны капиллярно-пористых покрытий, размер и форму трёхмерных упорядоченных микротекстур. Показано, что использование такой технологии может увеличить коэффициент теплоотдачи при кипении на поверхности с капиллярно-пористым покрытием в несколько раз по сравнению с поверхностью без покрытия.

Ключевые слова: капиллярно-пористое покрытие, микротекстурированная поверхность, аддитивные технологии, SLM/SLS, интенсификация теплообмена при кипении.

DOI: 10.15372/AUT20190604

Введение. Производительность ряда технических устройств, их размеры и надёжность во многом зависят от систем охлаждения. Для сохранения работоспособности большинства электронных устройств необходимо отводить значительные тепловые потоки для поддержания температуры ниже определённого уровня. Наиболее эффективны в данный момент двухфазные системы охлаждения, в которых используется скрытая теплота фазового перехода. Более надёжными являются пассивные схемы охлаждения, в которых отсутствуют насосы для прокачивания рабочей жидкости и используется обычно пузырьковое кипение жидкостей в большом объёме [1, 2]. Для снижения разности температур между поверхностью нагрева и жидкостью, увеличения критических тепловых потоков в настоящее время широко применяются микро- и наномодифицированные поверхности и покрытия. Существует несколько различных методов микро- и наномодификации поверхностей [3, 4], такие как литография, механическая обработка и травление, осаждение из газовой фазы, плазменное напыление, молекулярно-лучевая эпитаксия, различные жидкофазные и коллоидные методы, электроосаждение, метод создания нанопокровтий, основанный на кипении наножидкости, и т. д. Для создания микроструктурированных покрытий используются следующие методы [5]:

- спекание металлических сферических частиц,
- газотермическое или плазменное напыление,
- спекание металловолокнистых структур,

— приваривание и припайка металлических сеток.

Для увеличения интенсивности теплоотдачи при кипении и испарении жидкостей применяются микропористые и микрооребрённые поверхности с характерными размерами пор, каналов и рёбер в диапазоне изменения от 1 до 1000 мкм. Способы изготовления пористых модифицированных поверхностей, используемых для интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении в большом объёме, описаны в [6, 7]. Пористые покрытия должны быть нерастворимыми в рабочей жидкости, а их свойства — неизменными с повышением температуры. Также пористые покрытия должны быть достаточно теплопроводными, чтобы обеспечить равномерный теплообмен по всей структуре. В [8] были исследованы пористые покрытия с 2D- и 3D-модуляцией, изготовленные методом горячего прессования металлического порошка. Установлено, что коэффициенты теплоотдачи принимают большие значения на модулированной 2D-поверхности, чем на 3D. В [9] выполнено систематическое исследование режимов испарения и кипения в тонком слое жидкости на гладкой поверхности при изменении в широких диапазонах высоты слоя и приведённого давления. Построены карты гидродинамических режимов, на которых для каждой высоты слоя в зависимости от приведённого давления и теплового потока указаны области, где существует или отсутствует пузырьковое кипение. В области, где отсутствует пузырьковое кипение, происходит изменение механизма теплоотдачи. В тонком слое жидкости формируются структуры в форме воронок и кратеров. В [10] показано, что формирование таких структур приводит к интенсификации теплообмена примерно на 70 % по сравнению с теплообменом при пузырьковом кипении. В [11] проанализированы данные [9, 12] по интенсификации теплообмена и механизмам процесса интенсификации для области теплоотдачи, где существует пузырьковое кипение и где оно отсутствует. Определено, что для 2D-поверхности необходимо при выборе расстояния между гребнями учитывать свойства кипящей жидкости с помощью постоянной Лапласа $l_\sigma = (\sigma/g(\rho_l - \rho_v))^{1/2}$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения (Н/м); ρ_l, ρ_v — плотность жидкости и пара соответственно (кг/м³); g — ускорение свободного падения (м/с²). Для расчёта формы поверхности капиллярно-пористого покрытия рекомендуется использовать уравнение

$$z = \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_m} x\right) + \frac{A}{2} + \delta_0,$$

где x и z — горизонтальная и вертикальная координаты; $A = \delta - \delta_0$ — амплитуда; δ — максимальная высота покрытия; δ_0 — минимальная высота покрытия (м); $\lambda_m = 2l_\sigma$ — длина волны модуляции пористого покрытия (м).

Проведённые в [11] оценки показали, что при создании покрытия, модулированно-го синусоидой с длиной волны модуляции $\lambda_m = 2l_\sigma$ из порошка стали на подложке из аналогичного металла, ожидается существенное увеличение коэффициента теплоотдачи. В данной работе предложено нанести покрытие с амплитудой $A = l_\sigma/3$ и минимальной высотой покрытия 50 мкм при пористости 40–50 % в целях увеличения коэффициента теплопередачи.

Для создания рассматриваемых микроструктурированных покрытий перспективным является метод формирования модулированного пористого покрытия аддитивным послойным лазерным плавлением/спеканием порошка (SLM (selective laser melting) / SLS (selective laser sintering)), что в первую очередь определяется его преимуществами при создании более упорядоченных капиллярно-пористых структур и возможность варьирования их характеристик в широких диапазонах в сравнении с методом плазменного нанесения покрытий [5, 12].

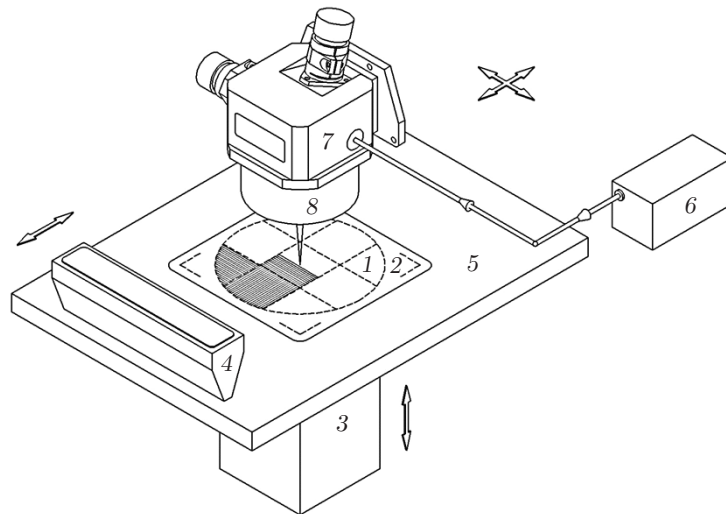


Рис. 1. Схема системы аддитивного формирования пористых покрытий с 2D- и 3D-модуляцией на плоских подложках

Формирование пористых покрытий методом SLM/SLS. В [13] описана техника создания покрытий методом послойного селективного лазерного плавления (SLM): на исследуемую подложку наносились упорядоченные трёхмерные структуры в виде решёток высотой 0,75 и 1,5 мм и шагом решётки от 0,4 до 1,1 мм. Стенки решёток имели малую пористость, поскольку формировались в режиме сплавления. Система формирования и позиционирования лазерного излучения реализована на основе двухкоординатного модуля быстрого сканирования и объектива плоского поля. Эксперименты по изучению процессов кипения на таких поверхностях показали, что применение SLM-технологии при формировании покрытий с заданной трёхмерной формой является эффективным методом для исследования зависимости теплоотдачи от геометрических параметров покрытия. Недостаток такой конструкции оборудования для задач нанесения покрытий — ограничение зоны формирования покрытия полем сканирования объектива. Особенно заметно такое ограничение при использовании мощных лазеров инфракрасного диапазона с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм, где отсутствуют объективы с диаметром сфокусированного пучка менее 0,3 мм для поля записи более 250×250 мм. Поэтому для нанесения покрытия с расчётной формой поверхности с помощью технологии аддитивного послойного формирования покрытия использовался разработанный в Институте автоматизации и электротехники СО РАН (ИАиЭ СО РАН) метод комплементарного сканирования слоя [14, 15], обеспечивающий возможность формирования 3D-покрытий на подложках практически любого размера, с пространственным разрешением положения лазерного пучка 1–10 мкм, при высокой скорости перемещения луча (1–3 м/с) и дифракционном размере пучка в плоскости обработки.

Схема системы аддитивного формирования микроструктурированной поверхности на различных подложках приведена на рис. 1.

Подложка 1 для формирования структурированного покрытия устанавливается на рабочую платформу 2 с приводом перемещения по вертикали 3. Для нанесения слоя порошка на подложку 1 система содержит бункер с порошком, сопряжённый с блоком подачи порошка и ракельным узлом разравнивания 4. При нанесении слоя блок 4 движется по горизонтали по базовой поверхности основания стола 5. Луч лазера 6 подаётся в сканирующую гальванометрическую головку 7 с объективом плоского поля 8. Сканирующая головка установлена на прецизионном портальном механизме, позволяющем перемещать головку по x, y координатам параллельно плоскости стола 5.

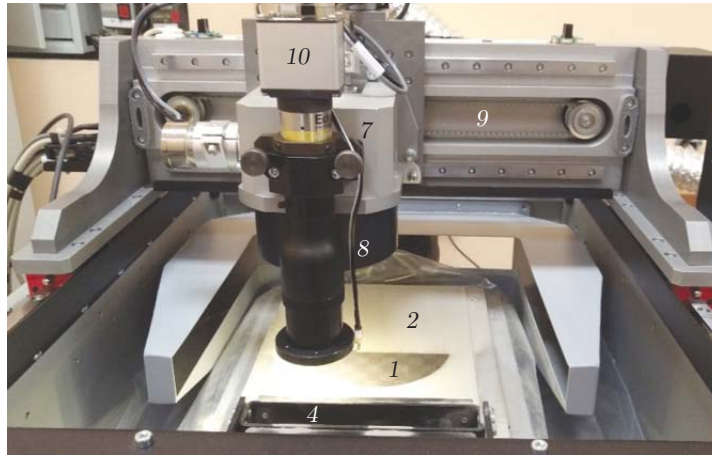


Рис. 2. Фотография экспериментальной системы для нанесения трёхмерных покрытий методом послойного синтеза (1 — тестовая подложка, 2 — подвижная рабочая платформа, 4 — ракель блока подачи порошка, 7 — сканирующая головка с X, Y гальванометрическими сканерами, 8 — объектив плоского поля, 9 — порталный механизм перемещения сканирующей головки по полю записи, 10 — модуль технического зрения). Обозначения блоков соответствуют рис. 1

Характеристики экспериментальной системы (рис. 2): полное поле при лазерном комплементарном формообразовании 400×400 мм; максимальное перемещение рабочей платформы по Z — 150 мм; поле сканирования сканерной системы 20×20 мм; координатное разрешение 10 мкм; размер сфокусированного лазерного луча 120 мкм; мощность CO₂-лазера с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм составляет 70 Вт; максимальная скорость перемещения лазерного луча 1 м/с.

Проектирование структуры проводилось в программе CAD Autodesk Inventor, входной формат данных системы STL. Разбиение на слои, подготовка данных для вывода и управление системой обеспечивались разработанной в ИАиЭ СО РАН программно-аппаратной платформой со встроенным контроллером на кристалле (SoC), совмещающем в себе процессор с архитектурой ARM A9 и ПЛИС, и специальным программным обеспечением.

Процесс формирования покрытия на используемой в дальнейших экспериментах подложке из стали 12X18H10T диаметром 120 мм и толщиной 12 мм проводился с помощью технологии SLS. Выбранная технология позволяет формировать структуры с заданной пористостью, при этом при послойном сплавлении средний размер пор зависит от размера и формы частиц порошка и может составлять единицы микрон, а максимальная пористость близка к насыпной плотности материала порошка. Причём в отличие от большинства задач, в которых применяется аддитивная технология для формирования изделий заданной формы, в данном случае требовалось обеспечить пористость изделий с порами размером в несколько микрон.

При формировании покрытия полная поверхность экспериментальной подложки программно разбивалась на зоны, размер которых был менее поля записи объектива (18 мм). После установки подложки на рабочую платформу они опускались на расстояние, равное толщине подложки и толщине первого слоя. Затем с помощью блока подачи порошка и ракельной системы наносился и разравнивался первый слой толщиной 60 мкм по всей поверхности тестового образца. Приплавление порошка к поверхности проводилось позонно при скорости движения лазерного пучка меньшей, чем для следующих слоёв, что обеспечивало устойчивое сплавление первого слоя с подложкой. На следующем этапе наносился слой порошка толщиной 50 мкм на всю поверхность тестовой подложки и осуществлялось



Рис. 3. Фотография процесса формирования слоя при нанесении покрытия на подложку

программно заданное сканирование слоя при мощности лазерного пучка 25 Вт и скорости сканирования 0,7 м/с. Далее цикл повторялся до полного формирования покрытия заданной толщины. Сканирование лазерного пучка проводилось по всей поверхности тестовой подложки поочередно при шахматной последовательности заполнения всего поля (рис. 3) и с заданным случайным смещением координат зон относительно их положения в предыдущем слое в режиме растровой штриховки с перекрытием линий 50 %. При этом обработка зон проводилась так, чтобы штриховка нижнего слоя была перпендикулярна штриховке следующего слоя.

Для исследования зависимости пористости от режимов лазерного сплавления проведён синтез тестовых изделий размером $10 \times 10 \times 1$ мм из порошка нержавеющей стали ПР-Х15Н5Д4Б (фракция 20–40 мкм, сферическая форма) в разных режимах. Изменялись средняя мощность лазера, длительность импульсов и скорость сканирования. Измерения пористости проводились путём измерения плотности тестовых образцов размером $10 \times 10 \times 5$ мм и сравнения с плотностью стали.

Экспериментальная установка для исследования теплообмена при кипении жидкости на капиллярно-пористой структуре. Схема рабочей камеры для экспериментального исследования процесса теплообмена при испарении и кипении жидкости приведена на рис. 4.

Конструктивно рабочая камера установки представляет собой цилиндрический сосуд из стали 12Х18Н10Т с внутренним диаметром 120 мм, высотой 300 мм и толщиной стенок 1 мм. Днище камеры с нанесённым капиллярно-пористым покрытием использовалось в качестве поверхности нагрева. Высокотеплопроводная латунная пластина толщиной 30 мм устанавливалась между электронагревателем и днищем для обеспечения равномерного распределения теплового потока по поверхности нагрева. Для уменьшения контактного термического сопротивления зазор между днищем камеры и пластиной заполнялся специальной высокотеплопроводной пастой. На наружной поверхности верхней части камеры расположен змеевик охлаждения. Расстояние от днища камеры до нижнего витка змеевика 100 мм. Для уменьшения тепловых потерь из-за перетечек по стенкам камеры от днища к змеевику охлаждения, а также для более равномерного распределения температуры по дну камеры ниже змеевика охлаждения находится дополнительный змеевик для нагрева боковой вертикальной стенки камеры, который соединён со змеевиком, предназначенным для прогрева крышки камеры. Для визуальных наблюдений сверху и сбоку рабочей камеры имелись смотровые окна. Днище рабочей камеры толщиной 12 мм с нанесённым

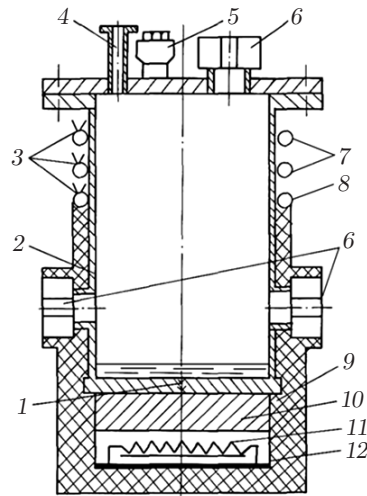


Рис. 4. Рабочая камера экспериментальной установки: 1 — днище с нанесённым капиллярно-пористым покрытием, 2 — корпус, 3 — термопары для измерения температуры охлаждающей воды, 4 — патрубок для присоединения системы откачки, 5 — вакуумный ввод, 6 — смотровые окна, 7 — змеевик охлаждения, 8 — змеевик нагрева, 9 — слой теплоизоляции, 10 — латунная пластина, 11 — электронагреватель, 12 — кожух электронагревателя



Рис. 5. Днище рабочей камеры экспериментальной установки: а — с нанесённым микроструктурированным капиллярно-пористым покрытием; б — увеличенный фрагмент поверхности микроструктурированного капиллярно-пористого покрытия с максимальной высотой 0,55 мм

капиллярно-пористым покрытием в соответствии с рассмотренными выше требованиями изображено на рис. 5. Для измерения температуры поверхности нагрева в днище на различной высоте имелось пять отверстий диаметром 1,6 мм, в которые вставлялись медь-константановые термопары в нержавеющей капиллярах. Днище приваривалось к нижней части рабочей камеры экспериментальной установки (см. рис. 4) с помощью сварки в среде инертных газов.

При установке дополнительного обогревательного змеевика по проведённым оценочным расчётам потери за счёт перетечек составляют не более 10 % от суммарного теплового потока, передающегося через днище рабочей камеры жидкости. Тепловой поток вычислялся по уравнению Фурье. Градиент температур по толщине днища вычислялся линейной аппроксимацией показаний пяти термопар. Погрешность измерения составляла около $\pm 16\%$ для теплового потока $q = 10^3 \text{ Вт/м}^2$, примерно $\pm 10\%$ при тепловом потоке

$q = 10^4$ Вт/м² и ± 4 %, когда тепловой поток $q = 10^5$ Вт/м². Большим тепловым потокам соответствует меньшая погрешность. Температура поверхности нагрева определялась по линейной экстраполяции измеренного профиля температуры. Максимальная погрешность измерения температуры составляла не более $\pm 0,3$ °С при 200 °С. Измерение давления в рабочей камере при проведении экспериментов осуществляется двумя датчиками давления. Ионизационно-деформационный датчик давления Setra-730 используется в диапазоне давлений 33–1333 Па. Погрешность измерения данного датчика $\pm 0,5$ % от текущего показания. Мембранный деформационный датчик давления ASG Edwards имеет диапазон измерений 133– $2 \cdot 10^5$ Па. Погрешность измерения составляет $\pm 0,2$ % от полной шкалы. Этот датчик применялся для измерения давления выше 1000 Па. Перед началом каждой серии измерений он калибровался по показаниям более точного датчика Setra-730 при низком давлении, и потом в результаты измерений давления вносились соответствующие поправки. В качестве рабочей жидкости использовался н-додекан, поэтому длина волны модуляции покрытия равнялась $\lambda_m = 2l_\sigma = 3,5$ мм. Для создания необходимой высоты слоя заливался необходимый объём рабочей жидкости.

Давление в процессе экспериментов поддерживалось постоянным. В ходе экспериментов реализовывался ряд стационарных режимов теплообмена, при которых регистрировались температура по толщине обогреваемой стенки и давление над слоем жидкости в объёме, а также одновременно проводилась видеосъёмка процесса высокоскоростной видеокамерой. Эксперименты по исследованию теплообмена при пониженных давлениях в слоях рабочей жидкости н-додекана на гладкой поверхности нагрева проводились в той же рабочей камере (см. рис. 4) [9, 10], на днище которой не наносилось капиллярно-пористое покрытие, поверхность имела шероховатость $R_z = 3,2$ мкм. В отличие от данной работы в [9, 10] поверхность считается гладкой.

Результаты экспериментов. В ходе экспериментальных исследований теплообмена на изготовленном по технологии SLS образце при заданной высоте горизонтального слоя жидкости над поверхностью нагрева определяли плотность теплового потока q , температуру поверхности нагрева T_w К при постоянном давлении в объёме над слоем. Температура насыщения паров в объёме T_s К вычислялась по давлению пара. Коэффициент теплоотдачи вычислялся по формуле $\alpha = q/(T_w - T_s)$ Вт/(м²·К). Результаты сравнивались с опытными данными по теплообмену [9, 10], полученными на установке при испарении/кипении н-додекана на гладкой поверхности. На рис. 6 показаны полученные результаты для режима пузырькового кипения жидкости. Опыты проводились сначала при повышении мощности, подаваемой на нагреватель (прямой ход), а затем при постепенном её снижении (обратный ход). На поверхностях с капиллярно-пористым покрытием пузырьковое кипение начинается при более низких тепловых потоках, чем на поверхностях без покрытия. Температурный напор на поверхностях с покрытием тоже примерно в 3-4 раза меньше (рис. 6, *a*). На рис. 6, *b* приводятся зависимости относительной площади поверхности, где происходит пузырьковое кипение на капиллярно-пористом покрытии, от плотности теплового потока. На кривой пузырькового кипения, полученной при прямом ходе для слоя высотой 1,4 мм (см. рис. 6, *a*) имеется отрицательный наклон кривой кипения. Подобный вид зависимости наблюдался во многих исследованиях. В [13] отрицательный наклон кривой кипения регистрировался при пузырьковом кипении жидкости в большом объёме на горизонтальной поверхности нагрева со структурой, полученной с помощью лазерного 3D-принтера методом неполного расплавления частиц. В [16] отрицательный наклон кривой кипения наблюдался в стекающих по вертикальной поверхности нагрева тонких плёнках жидкости при развитом пузырьковом кипении в момент, когда в плёнке образовывались регулярные структуры. Такое поведение кривой пузырькового кипения обсуждалось в [1]. В [17] проанализирована зависимость плотности теплового потока от температурного напора при кипении на капиллярно-пористом покрытии в большом объёме рабочей жидкости

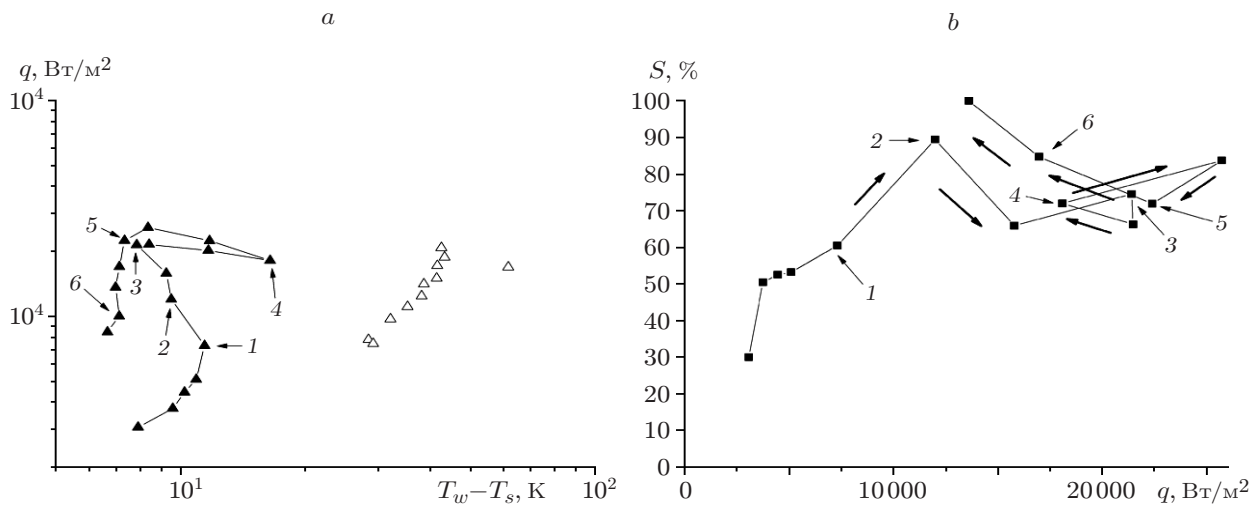


Рис. 6. Результаты экспериментов по изучению пузырькового кипения в тонком слое жидкости при условиях $h = 1,4$ мм, $h/l_\sigma = 0,81$, $P = 10$ КПа: *a* — зависимость плотности теплового потока от температурного напора (черные треугольники — данные для поверхности с покрытием, светлые треугольники — данные гладкой поверхности); *b* — зависимости относительной площади поверхности, на которой происходит пузырьковое кипение, от плотности теплового потока

и сделан вывод, что наклон в сторону меньших значений температурного напора (авторы назвали это явление инверсией) начинается при коалесценции пузырьков пара. По данным [17] коалесценция пузырьков пара начинается при значении теплового потока 30 % от критического. В данном исследовании отрицательный наклон кривой кипения возникал, когда в слое начиналось кипение жидкости в межрёберных впадинах (рис. 7, *a*). Пузырьки, которые образуются в межрёберных впадинах, имеют малые размеры по сравнению с размерами пузырьков на остальной части поверхности. Максимальный диаметр пузырьков, образующихся в межрёберных впадинах, равен примерно 1–1,5 мм, в то время как диаметр пузырьков на остальной части поверхности может достигать 10–15 мм. Точки, соответствующие началу этого процесса, показаны стрелками с цифрой 1 на рис. 6. Тепловой поток в этих точках соответствует величине 25 % от критического. Область, где происходит кипение в межрёберных впадинах, начинает расширяться при увеличении плотности теплового потока. На рис. 6 стрелками с цифрой 2 обозначены точки, где почти вся поверхность покрыта пузырьками, причём область кипения в межрёберных впадинах и область, где наблюдается обычное пузырьковое кипение, объединены. Этому режиму соответствует максимум площади, занятой пузырьковым кипением, при прямом ходе нагрева (см. рис. 6). Точки, соответствующие критическому тепловому потоку при прямом ходе нагрева, показаны стрелками с цифрой 3. При критическом тепловом потоке в центре образуется смоченное жидкостью пятно, с поверхности которого происходит испарение (рис. 7, *b*). В кольце вокруг него происходит процесс кипения с мелкими пузырьками в межрёберных впадинах и на гребнях покрытия. У стенок камеры наблюдается процесс обычного пузырькового кипения. При дальнейшем увеличении тепловой нагрузки температурный напор растёт, тепловой поток незначительно уменьшается, в центре камеры образуется сухое пятно. На рис. 6, *a* этот момент соответствует точке с максимальным температурным напором и обозначен стрелкой с цифрой 4. Далее снижали мощность, подаваемую на нагреватель. От точек, обозначенных стрелками с цифрой 4 на рис. 6, начинается обратный ход. Поверхность в центре камеры смачивается, сухое пятно исчезает в точках, обозначенных стрелками с цифрой 5 на рис. 6. Теплоотдача происходит в центре камеры

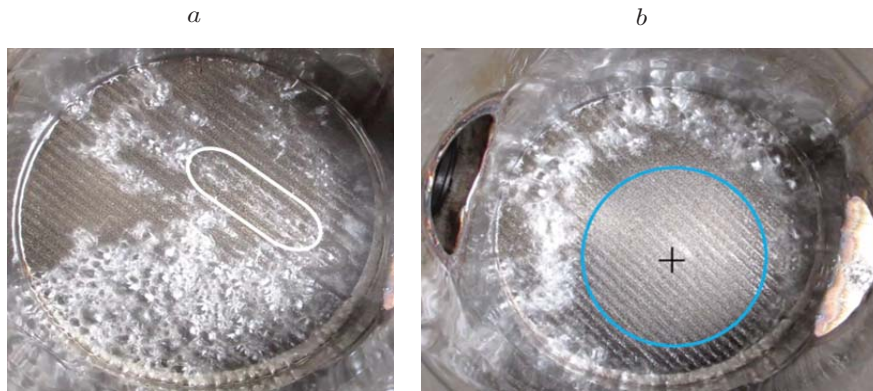


Рис. 7. Режимы пузырькового кипения жидкости в тонком слое на поверхности с капиллярно-пористым покрытием: *a* — кипение при толщине слоя 1,4 мм и давлении $P = 10$ КПа, $q = 11990$ Вт/м², $\Delta T = 9,5$ К, выделена область кипения жидкости в межрёберных впадинах; *b* — процесс кипения на поверхности при тепловом потоке, соответствующем критическому, выделена область в центре поверхности, где отсутствует пузырьковое кипение при толщине слоя рабочей жидкости 1,4 мм, $P = 10$ КПа, $q = 21400$ Вт/м², $\Delta T = 7,8$ К

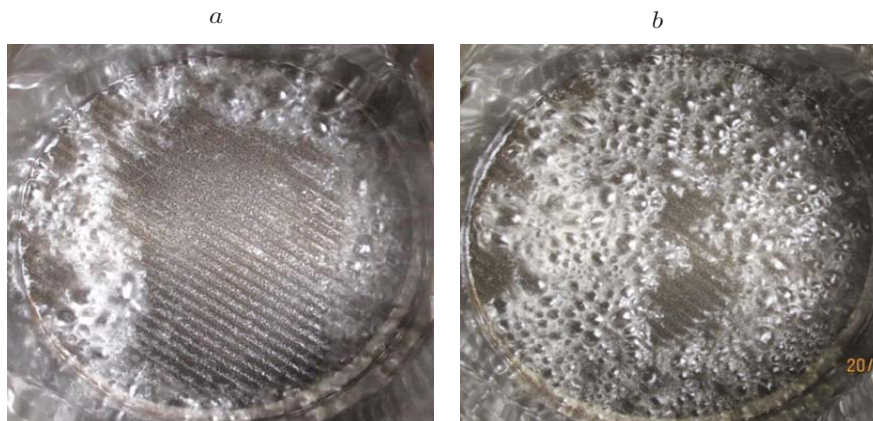


Рис. 8. Процесс распространения области пузырькового кипения при толщине слоя 1,4 мм и давлении $P = 10$ КПа по поверхности нагрева при снижении плотности теплового потока: *a* — тепловой поток $q = 22400$ Вт/м², $\Delta T = 7,3$ К; *b* — тепловой поток $q = 10000$ Вт/м², $\Delta T = 7,1$ К

в режиме испарения. Фотография этого режима приведена на рис. 8, *a*. При дальнейшем уменьшении нагрузки на нагреватель площадь области, где наблюдается пузырьковое кипение, постепенно увеличивается от стенок камеры к центру. Почти вся площадь поверхности нагрева заполняется обычным пузырьковым кипением (рис. 8, *b*). Толщина слоя жидкости в центре камеры увеличивается.

Плотность теплового потока снижается при практически постоянном температурном напоре (на рис. 6, *a* участок от точки со стрелкой 5 до точки со стрелкой 6). В центре поверхности, где находятся термодатчики для измерения теплового потока, происходит процесс испарительного охлаждения из плёнки жидкости. Согласно закону Фурье, записанному для нахождения плотности теплового потока через плоскую стенку,

$$q \approx (\lambda/\delta)\Delta T,$$

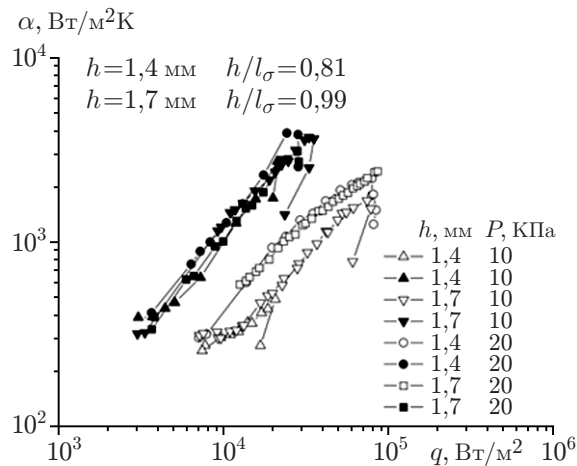


Рис. 9. Зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока в режиме пузырькового кипения: чёрными символами обозначены данные для поверхности с капиллярно-пористым покрытием; светлые символы — данные для гладкой поверхности

где ΔT — температурный напор; δ — толщина слоя (стенки), λ — эффективный коэффициент теплопроводности слоя. Температурный напор

$$\Delta T \approx q\delta/\lambda.$$

Так как значение температурного напора не изменяется, плотность теплового потока снижается, а эффективный коэффициент теплопроводности считаем постоянным, следовательно, толщина слоя должна увеличиваться, что и наблюдается в эксперименте.

На рис. 9 приводится сравнение данных по коэффициентам теплоотдачи на гладкой поверхности и на поверхности с капиллярно-пористым покрытием.

Коэффициенты теплоотдачи на поверхности с капиллярно-пористым покрытием примерно в 3–5 раз выше, чем на поверхности без покрытия.

Заключение. Для проведения экспериментов по теплообмену при испарении и пузырьковом кипении в горизонтальных слоях н-додекана различной высоты на микроструктурированной поверхности с заданными пористостью и шероховатостью на стальной подложке с помощью лазерного послойного синтеза из порошка нержавеющей стали со сферической формой частиц размером 20–40 мкм сформирована структура с заданным по высоте синусоидальным профилем. Параметры покрытия: диаметр подложки 120 мм, шаг структуры 3,5 мм, максимальная высота структуры 0,55 мм, пористость 44 %. Выполнено экспериментальное исследование теплообмена при кипении и испарении тонких слоёв рабочей жидкости на микроструктурированной капиллярно-пористой поверхности в условиях пониженных давлений. При высоте слоя жидкости 1,4 мм на зависимости плотности теплового потока от температурного напора наблюдалось явление инверсии, заключающееся в том, что с ростом теплового потока уменьшался температурный напор. По результатам визуальных наблюдений установлено, что в тонких слоях жидкости при кипении на профилированной капиллярно-пористой поверхности явление инверсии наблюдается при появлении мелких пузырьков пара в межрёберных впадинах. Коэффициенты теплоотдачи на поверхности с исследованным капиллярно-пористым покрытием примерно в 3–5 раз выше, чем на поверхности без покрытия.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00180).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Liang G., Mudawar I.** Review of pool boiling enhancement by surface modification // Intern. Journ. Heat Mass Transfer. 2019. **128**. P. 892–933.
2. **Lin L., Kedzierski M. A.** Review of low-GWP refrigerant pool boiling heat transfer on enhanced surfaces // Intern. Journ. Heat Mass Transfer. 2019. **131**. P. 1279–1303.
3. **Poniewski M. E., Thome J. R.** Nucleate boiling on micro-structured surfaces // Heat Transfer Research. College Station, TX, 2008. 376 p.
4. **Попов И. А., Махьянов Х. М., Гуреев В. М.** Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: Интенсификация теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 560 с.
5. **Суртаев А. С., Сердюков В. С., Павленко А. Н.** Нанотехнологии в теплофизике: теплообмен и кризисные явления при кипении // Российские нанотехнологии. 2016. **11**, № 11–12. С. 18–32.
6. **Patil C. M., Kandlikar S. G.** Review of the manufacturing techniques for porous surfaces used in enhanced pool boiling // Heat Transfer Eng. 2014. **35**, Iss. 10. P. 887–902.
7. **Kim D. E., Yu D. In., Jerng D. W. et al.** Review of boiling heat transfer enhancement on micro/nanostructured surfaces // Experimental Thermal Fluid Sci. 2015. **66**. P. 173–196.
8. **Min D. H., Hwang G. S., Usta Y. et al.** 2-D and 3-D modulated porous coatings for enhanced pool boiling // Intern. Journ. Heat Mass Transfer. 2009. **52**, N 11–12. P. 2607–2613.
9. **Zhukov V. I., Pavlenko A. N.** Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin horizontal liquid layer at low pressures // Intern. Journ. Heat Mass Transfer. 2018. **117**. P. 978–990.
10. **Zhukov V. I., Pavlenko A. N.** Regimes of intensified heat transfer during evaporation of thin horizontal liquid layers at reduced pressures // Techn. Phys. Lett. 2018. **44**, N 6. P. 508–510.
11. **Zhukov V. I., Pavlenko A. N., Bessmeltsev V. P.** Heat transfer at evaporation and boiling in thin horizontal liquid layers on smooth and micro-structured surfaces under low pressures // Journ. Phys.: Conf. Ser. 2018. **1105**. 012054.
12. **Surtaev A. S., Pavlenko A. N., Kuznetsov D. V. et al.** Heat transfer and crisis phenomena at pool boiling of liquid nitrogen on the surfaces with capillary-porous coatings // Intern. Journ. Heat Mass Transfer. 2017. **108**. P. 146–155.
13. **Zhang C., Zhang L., Xu H. et al.** Performance of pool boiling with 3D grid structure manufactured by selective laser melting technique // Intern. Journ. Heat Mass Transfer. 2019. **128**. P. 570–580.
14. **Бессмельцев В. П., Голошевский Н. В., Кастеров В. В. и др.** Метод калибровки лазерной гальванометрической сканирующей системы субмикронного разрешения // Автометрия. 2018. **54**, № 4. С. 84–92.
15. **Бессмельцев В. П., Голошевский Н. В., Смирнов К. К.** Особенности управления лазерными системами микрообработки движущихся носителей // Автометрия. 2010. № 1. С. 98–106.
16. **Pavlenko A. N., Lel V. V.** Heat transfer and crisis phenomena in falling films of cryogenic liquid // Russ. Journ. Eng. Thermophys. 1997. **7**, N 3–4. P. 177–210.
17. **Jaikumar A., Kandlikar S. G.** Pool boiling inversion through bubble induced macro-convection // Appl. Phys. Lett. 2017. **110**, 094107. P. 107–113.

Поступила в редакцию 17.07.2019

После доработки 07.10.2019

Принята к публикации 10.10.2019