

03

## Исследование теплообмена при кипении воды на модифицированной поверхности, полученной методом микродугового оксидирования

© Н.В. Васильев<sup>1,2</sup>, В.А. Ленков<sup>1</sup>, Ю.А. Зейгарник<sup>1</sup><sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: nikvikvas@mail.ru

Поступило в Редакцию 21 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2024 г.

Принято к публикации 17 апреля 2024 г.

Представлено экспериментальное исследование теплообмена при кипении воды в большом объеме на гладкой и модифицированной поверхностях. Модификация поверхности из сплава Д16Т осуществлялась с помощью нанесения пористого химически стабильного покрытия методом микродугового оксидирования, обеспечивающего высокую степень адгезии с подложкой. Эксперименты показали интенсификацию теплоотдачи при кипении на поверхности с покрытием по сравнению с теплоотдачей для гладкой поверхности в среднем на 30–50%.

**Ключевые слова:** кипение, модификация поверхности, микродуговое оксидирование, интенсификация теплоотдачи.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.15.58438.19900

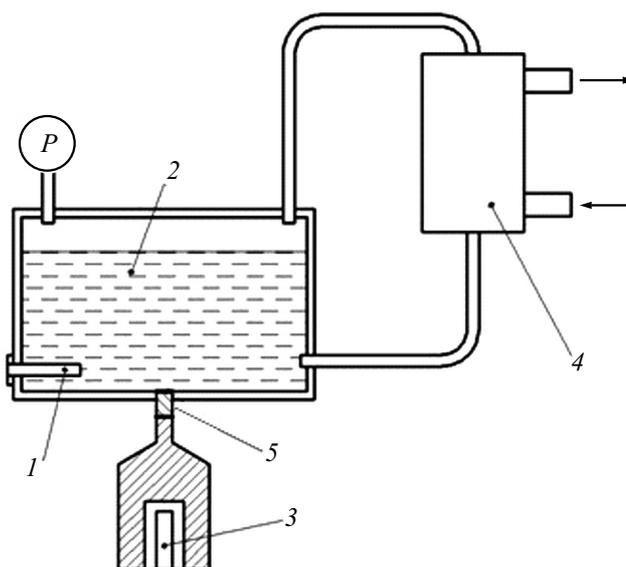
В настоящее время подавляющее большинство работ в области теплообмена при кипении посвящено исследованиям интенсификации процесса с помощью модификации греющей поверхности [1–5]. Разработано довольно много разнообразных способов модификации поверхности, имеющих свои достоинства и недостатки. Среди широко распространенных методов следует отметить обработку деформирующим резанием, сеточные и пористые покрытия, плазменное напыление, спекание частиц с подложкой, травление и др.

Одним из перспективных и малоисследованных методов модификации поверхности кипения является микродуговое оксидирование (МДО). Технология МДО применительно к задачам интенсификации теплообмена при кипении позволяет наносить тонкие пористые покрытия с толщиной и размерами пор от единиц до нескольких десятков микрометров на поверхности вентильных металлов (алюминий, титан, цирконий и др.). К плюсам данного метода относятся высокая степень адгезии с подложкой, химическая стабильность, технологичность и относительная дешевизна, возможность наносить покрытие на поверхности сложной геометрии (например, на внутреннюю поверхность труб или в труднодоступных полостях). Однако на данный момент имеется очень мало работ по исследованию теплообмена при кипении на поверхностях, модифицированных с помощью технологии МДО. Была получена интенсификация теплоотдачи на поверхностях с МДО-покрытием по сравнению с теплоотдачей на гладкой поверхности подложки при кипении недогретой воды [6] и азота [7].

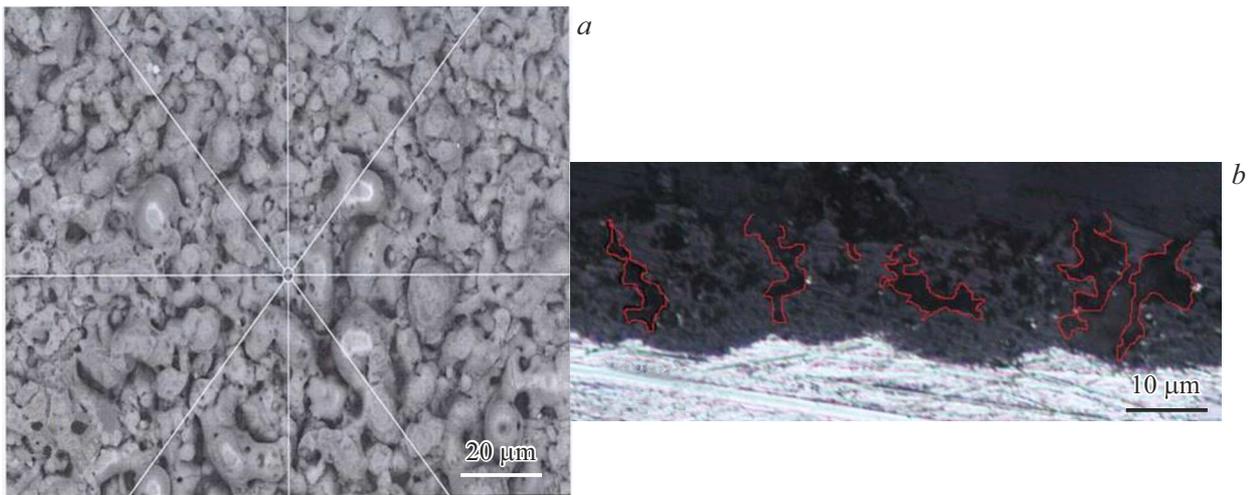
Целью настоящей работы является исследование влияния модификации поверхности методом МДО на теп-

лоотдачу при кипении насыщенной воды в большом объеме.

Основные элементы экспериментальной установки, на которой проводилось исследование, изображены на схеме (рис. 1). Нагрев поверхности кипения производился методом теплового клина. Медный блок обогревался патронным нагревателем 3 с максимальной мощностью 350 Вт, регулируемой с помощью лабораторного авто-



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки. 1 — вспомогательный подогреватель воды, 2 — емкость с водой, 3 — патронный нагреватель, 4 — конденсатор пара, 5 — исследуемый образец.



**Рис. 2.** Изображения покрытия, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа. *a* — поверхность покрытия, *b* — поперечный срез, обведены поры.

трансформатора. Для минимизации утечек теплоты из медного нагревательного блока в окружающую среду он был обернут высокотемпературным теплоизолятором — асбестовой термостойкой лентой. Исследуемые образцы 5 из алюминиевого сплава Д16Т диаметром 18 mm и высотой 20 mm крепились на поверхности нагревательного блока с помощью термопасты. Для измерения плотности теплового потока ( $q$ ) и температуры теплоотдающей поверхности в исследуемый образец были заделаны четыре предварительно протарированные хромель-копелевые термопары диаметром 0.2 mm (с точностью измерения  $0.5^\circ\text{C}$ ), расположенные на расстоянии 5 mm друг от друга на его оси. Верхняя термопара, с помощью показаний которой рассчитывалась температура поверхности кипения, располагалась на расстоянии 0.5 mm от нее. Сигналы с термопар обрабатывались с помощью прибора Термодат-25М5, имеющего функцию автоматической компенсации температуры холодного спая и работающего в режиме электронного самописца. Полученные графики изменения во времени температуры, регистрируемой каждой термопарой, записывались на персональный компьютер. Фиксация параметров каждого теплового режима (экспериментальной точки) производилась после стабилизации значений температур на всех термопарах. Среднее время выдержки после изменения тепловой нагрузки составляло примерно 30 min.

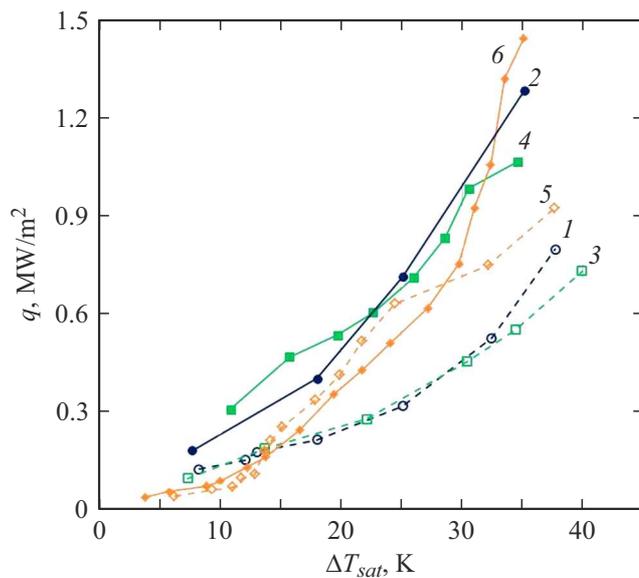
Эксперименты проводились на дистиллированной воде при атмосферном давлении. Жидкость заливалась в специальную емкость из нержавеющей стали размером  $100 \times 90 \times 70$  mm. Емкость имела сообщение с атмосферой. С помощью подогревателя 1 патронного типа (рис. 1) производился нагрев воды до температуры насыщения, а также ее поддержание. Получаемый в результате кипения пар конденсировался в специальном теплообменном аппарате 4 змеевикового типа с холодным теплоносителем — водопроводной водой.

Нанесение покрытия на исследуемый образец из сплава Д16Т производилось методом МДО в РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина по технологии, описанной в [8]. На рис. 2 представлены сделанные с помощью электронного микроскопа микрофотографии покрытия. Толщина покрытия составляла в среднем  $20 \mu\text{m}$ . На срезе покрытия (рис. 2, *b*) видны вертикально расположенные каналы (поры), которые образуются при формировании слоя в специально подобранных режимах процесса МДО. Поры таких формы и размеров (от нескольких единиц до десятков микрометров) могут служить потенциальными центрами парообразования, а также улучшать смачиваемость поверхности.

На рис. 3 полученные в результате проведенных экспериментов данные представлены в виде кривых кипения — зависимостей  $q$  от перегрева поверхности относительно температуры насыщения ( $\Delta T_{sat}$ ). Видно, что нанесение МДО-покрытия на гладкую поверхность из сплава Д16Т привело к интенсификации теплоотдачи в среднем на 30–50%. Для сравнения на рис. 3 представлены данные по интенсификации теплоотдачи, полученные посредством модификации поверхности с помощью микроканалов [9] и нанесения покрытия с высокой пористостью [10], показавшие близкие результаты.

Полученные результаты, по всей видимости, связаны с особой формой, размерами и плотностью расположения пор на модифицированной поверхности. За счет наличия таких пор возникают дополнительные центры парообразования, растет площадь теплоотдающей поверхности, а также создаются капиллярные силы, увеличивающие интенсивность подсоса жидкости.

Таким образом, экспериментальным путем установлено увеличение теплоотдачи при кипении насыщенной воды в большом объеме на поверхности с покрытием, образованным методом МДО, по сравнению с теплоотдачей для гладкой поверхности из сплава Д16Т в



**Рис. 3.** Кривые кипения воды при атмосферном давлении. 1 — на гладкой поверхности Д16Т; 2 — на поверхности Д16Т с МДО-покрытием; 3 — на гладкой поверхности Si; 4 — на поверхности Si с микроканалами сечением  $100 \times 100 \mu\text{m}$ ; 5 — на гладкой медной поверхности; 6 — на медной поверхности с пористым покрытием (пористость 94.4%). 1, 2 — данные, полученные в настоящей работе; 3, 4 — данные [9]; 5, 6 — данные [10].

среднем на 30–50%. Это наряду с другими преимуществами данного способа модификации поверхности (высокая степень адгезии с подложкой, химическая стабильность, относительная дешевизна и др.) указывает на перспективность его применения для интенсификации процесса в системах охлаждения различных аппаратов, использующих кипение жидкости.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание № 075-00270-24-00).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] G. Liang, I. Mudawar, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **128**, 892 (2019). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.026
- [2] А.В. Дедов, *Теплоэнергетика*, № 12, 18 (2019). [A.V. Dedov, *Therm. Eng.*, **66** (12), 881 (2019). DOI: 10.1134/S0040601519120012].
- [3] О.А. Володин, Н.И. Печеркин, А.Н. Павленко, *ТВТ*, **59** (2), 280 (2021). DOI: 10.31857/S0040364421020149 [O.A. Volodin, N.I. Pecherkin, A.N. Pavlenko, *High Temp.*, **59** (2), 405 (2021). DOI: 10.1134/S0018151X21020140].
- [4] X. Yuan, Y. Du, J. Su, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **156**, 111974 (2022). DOI: 10.1016/j.rser.2021.111974
- [5] Y. Sun, Y. Tang, S. Zhang, W. Yuan, H. Tang, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **162**, 112437 (2022). DOI: 10.1016/j.rser.2022.112437
- [6] Н.В. Васильев, А.Ю. Вараксин, Ю.А. Зейгарник, К.А. Ходаков, А.В. Эпельфельд, *ТВТ*, **55** (6), 712 (2017). DOI: 10.7868/S0040364417060060 [N.V. Vasil'ev, A.Yu. Varaksin, Yu.A. Zeigarnik, K.A. Khodakov, A.V. Epel'fel'd, *High Temp.*, **55** (6), 880 (2017). DOI: 10.1134/S0018151X17060189].
- [7] D. Kuznetsov, A. Pavlenko, *Energies*, **15** (16), 5792 (2022). DOI: 10.3390/en15165792
- [8] О.Ю. Елагина, В.А. Ленков, Б.А. Слободяников, А.В. Шикин, *Способ формирования теплообменной поверхности с комбинированным пористым покрытием и теплообменная способность, полученная таким способом*, патент на изобретение RU 2018 108 563 А (заявл. 12.03.2018, публ. 12.09.2019). [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_56008309\\_90951058.PDF](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_56008309_90951058.PDF)
- [9] Z. Yao, Y.W. Lu, S.G. Kandlikar, *J. Micromech. Microeng.*, **22** (11), 115005 (2012). DOI: 10.1088/0960-1317/22/11/115005
- [10] P. Xu, Q. Li, Y. Xuan, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **80**, 107 (2015). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.048