

03.1;03.2

## Влияние модификации поверхности селективным лазерным плавлением на теплоотдачу при кипении в большом объеме и микроструйном охлаждении водой

© А.С. Шамирзаев<sup>1</sup>, А.С. Мордовской<sup>1</sup>, С.Г. Баев<sup>2</sup>, Д.Н. Катасонов<sup>2,3</sup>, В.П. Бессмельцев<sup>2</sup>, В.В. Кузнецов<sup>1,4</sup>

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

<sup>2</sup> Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 1 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 26 января 2024 г.

Принято к публикации 26 января 2024 г.

Экспериментально изучен теплообмен на поверхности с рельефом, полученным селективным лазерным наплавлением порошка меди, в условиях насыщенного кипения воды в большом объеме и при микроструйном охлаждении водой, недогретой до температуры насыщения. Микроструйное охлаждение проводилось распределенной системой импактных микроструй воды при недогреве до температуры насыщения, равном 80°C. Использовано 36 затопленных микроструй, сопла которых (диаметром 174 μm) расположены на расстоянии 1 mm от модифицированной поверхности. Установлено, что в условиях насыщенного кипения коэффициенты теплоотдачи на модифицированной поверхности в 3.5 раза выше, а критический тепловой поток — в 2.8 раза выше, чем для плоской поверхности. В условиях микроструйного охлаждения при скорости струй 1 m/s интенсификация теплоотдачи для модифицированной поверхности составляла 35%, достигалось увеличение максимального теплового потока с 493 до 770.3 W/cm<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** селективное лазерное плавление, теплоотдача, критический тепловой поток, насыщенное кипение, микроструйное охлаждение.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.09.57562.19786

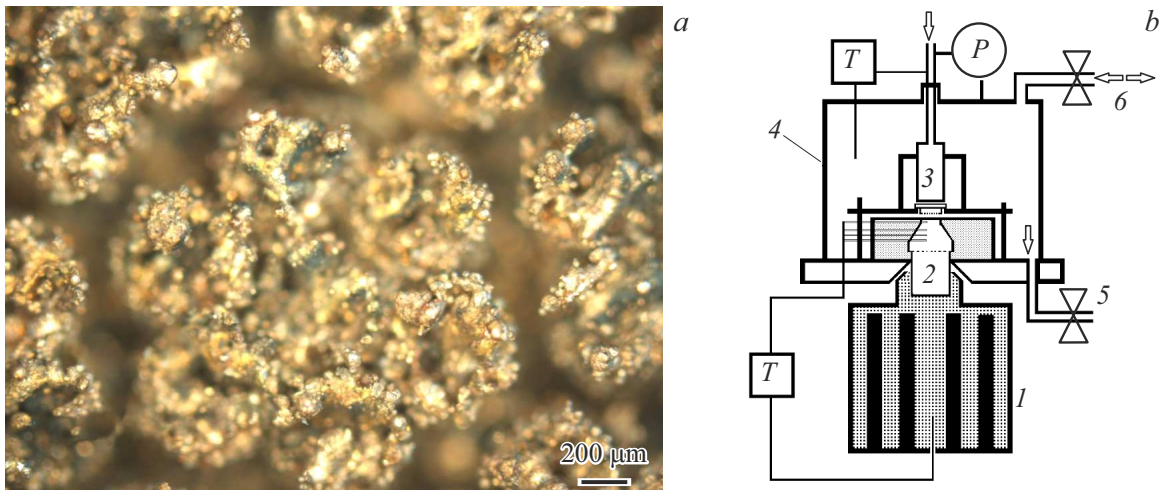
Для обеспечения работоспособности перспективных микропроцессоров, силовой электроники гибридных автомобилей, рентгеновского медицинского оборудования необходим отвод тепловых потоков, превышающих 1000 W/cm<sup>2</sup> [1], что позволит поддерживать температуру теплонапряженных устройств ниже определенного предела, так как перегрев приводит к снижению производительности устройств и их разрушению. Активные методы отвода тепла от теплонапряженных устройств, основанные на применении микроканалов, импактных струй и спреев, в том числе вскипающих струй [2], способны обеспечить отвод высоких тепловых потоков и снизить неоднородность температуры при низких массовых скоростях [3–5]. Преимуществом импактных струй является возможность применения большого недогрева до температуры насыщения, что значительно повышает критический тепловой поток (КТП) при кипении [6].

Перспективной технологией для рассеивания тепла от малоразмерных источников являются двухфазные импактные струи, позволяющие поддерживать необходимую температуру при высокой тепловой нагрузке за счет скрытой теплоты парообразования. При охлаждении плоской поверхности импактными струями диэлектрической жидкости HFE 7100 в [7] получено, что КТП не пре-

вышает 25 W/cm<sup>2</sup>, что существенно меньше значения, необходимого для обеспечения работоспособности перспективных теплонапряженных устройств (1000 W/cm<sup>2</sup>). Перспективным теплоносителем для отвода больших тепловых потоков является вода. В [8] для системы 2 × 2 струй воды диаметром 1 mm и недогрева 8°C КТП достигал 450 W/cm<sup>2</sup> при скорости жидкости в струях 3.54 m/s.

В условиях высоких тепловых нагрузок кипение определяет теплоотдачу, и методы интенсификации теплоотдачи при кипении можно применить для интенсификации теплообмена при охлаждении импактными струями. Так, в [9] исследована интенсификация теплообмена при кипении воды на поверхности с пористыми медными столбиками, полученными спеканием порошка в печи.

Получены значения КТП 435 W/cm<sup>2</sup> и коэффициента теплоотдачи 200 kW/(m<sup>2</sup> · K). Это показывает перспективность применения пористых поверхностей с модулированной структурой для увеличения КТП. Анализ литературных источников [10] показывает, что задача увеличения КТП для теплонапряженных устройств по-прежнему является актуальной и для ее решения необходимо применение современных методов модификации охлаждаемой поверхности.



**Рис. 1.** Экспериментальный участок. *a* — фотография элемента структуры. *b* — схема экспериментального участка. 1 — система нагрева, 2 — измерительный блок, 3 — формирователь струй, 4 — внешний кожух, 5 — сливной вентиль, 6 — подвод азота — стравливание пара (в экспериментах по кипению в большом объеме).

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния модификации поверхности с использованием методов аддитивного послойного плавления/спекания медных порошковых материалов (SLS/SLM-метод) на критический тепловой поток и коэффициенты теплоотдачи для насыщенного кипения в условиях большого объема и при охлаждении распределенной системой микроструй воды. Особенности выполненных работ являются применение аддитивной 3D-технологии для металла [11] с целью получения модулированной пористой структуры на поверхности, малое расстояние от сопел до охлаждаемой поверхности, равное 1 мм, скорость струи 1 м/с и недогрев жидкости до температуры насыщения 80°C.

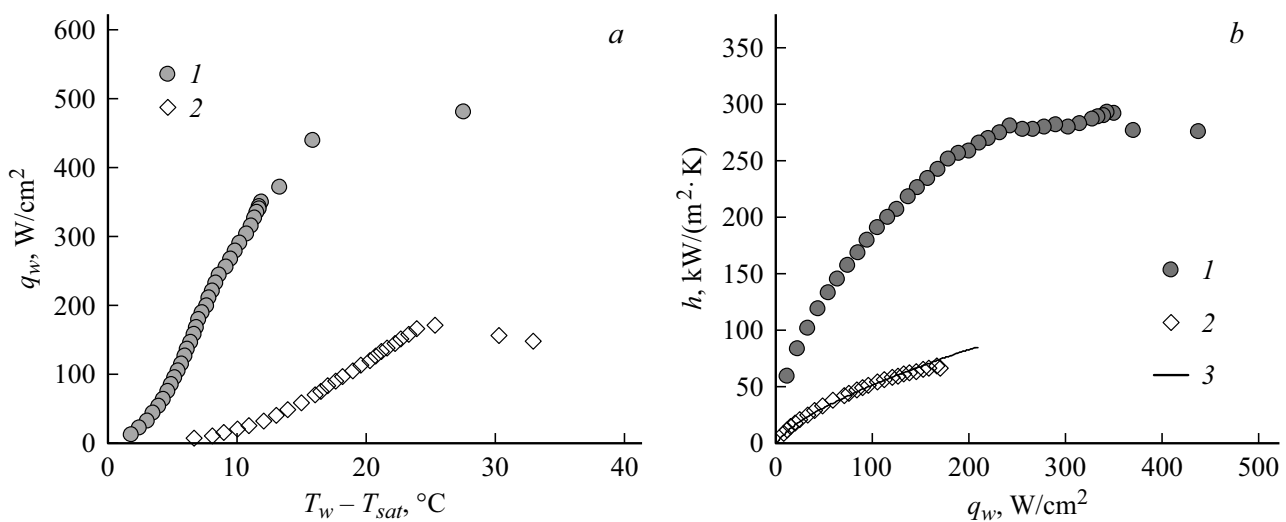
Структура модифицированной поверхности представляет собой гексагональный ансамбль из семи близкорасположенных выступов, изготовленных SLS/SLM-методом, расположенных на пористой подложке. Цилиндрические выступы высотой 250 μm расположены на подложке толщиной 250 μm. Диаметр зоны спекания одиночного выступа равен 0.5 мм, расстояние между центрами соседних выступов в одиночной ячейке 0.6 мм, расстояние между центральными выступами в соседних ячейках 1.8 мм. Фотография поверхности показана на рис. 1, *a*. Данная структура сформирована на поверхности измерительного блока, используемого для измерения теплоотдачи. Для формирования структуры использовался порошок АО „Полема“ из сплава ПР-БрХ с содержанием меди более 99% и дисперсностью 30–60 μm. Параметры обработки были следующими: растр построения 50 μm, толщина слоя 100 μm, скорость сканирования 0.5 м/с, размер сфокусированного лазерного пятна в плоскости обработки 70 μm, мощность лазерного излучения 150 W. Измерение характеристик поверхности на оптическом интерферометре

показало, что перепад высот на вершинах выступов равен 70 μm.

Экспериментальный стенд представляет собой замкнутый контур, содержащий плунжерный насос, демпфер пульсаций давления, фильтр, турбинный датчик расхода, теплообменник, задающий температуру охлаждающей жидкости, рабочий участок и охладитель жидкости. Рабочий участок представляет собой фланец, закрытый кожухом, к которому снизу через паронитовую прокладку подключена система подвода тепла с измерительным блоком, над которым расположен формирователь микроструй (рис. 1, *b*).

Кожух диаметром 100 мм и высотой 100 мм образует рабочую камеру, в которой измеряются температура и давление. Для предотвращения контактов горячей рабочей поверхности с атмосферным кислородом в рабочем участке поддерживается азотная атмосфера с давлением, близким к атмосферному. Поверх кожуха помещаются нагреватели и дополнительная теплоизоляция. На верхнем торце кожуха расположены отверстия для измерения давления и температуры и для подвода жидкости и азота.

Система подвода тепла представляет собой медный цилиндр, в который запрессованы восемь нагревательных картриджей с максимальной мощностью тепловыделения 220 W каждый и максимальной рабочей температурой 700°C. В верхнем торце системы расположено посадочное отверстие для сменных измерительных блоков с модифицированной поверхностью. Измерительный блок теплоизолируется фторопластовой шайбой диаметром 40 мм и герметизируется высокотемпературным герметиком. Измерительные блоки выполнены в виде медного цилиндра марки М1 с конической верхней частью. Внешний диаметр цилиндра 19 мм, диаметр охлаждаемой поверхности 8 мм. По оси конической



**Рис. 2.** Теплообмен при кипении в большом объеме. *a* — зависимость теплового потока от перегрева стенки. *b* — зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока. Точки 1 — поверхность со структурой, точки 2 — плоская поверхность, линия 3 — расчет по [12].

части расположены четыре измерительные изолированные термопары диаметром 0.5 mm. Средняя температура  $T_w$  и тепловой поток  $q_w$  на поверхности теплообмена определяются по измеренному градиенту температуры на основе решения уравнения теплопроводности для заданной геометрии.

Характеристики теплообмена получены для двух измерительных блоков. Первый блок с плоской поверхностью дополнительно покрывался никелевым защитным покрытием толщиной 5  $\mu m$ . Второй блок имел модифицированную теплообменную поверхность. Температура и тепловой поток на блоке с модифицированной поверхностью определялись на базовой поверхности, на которую нанесена структура.

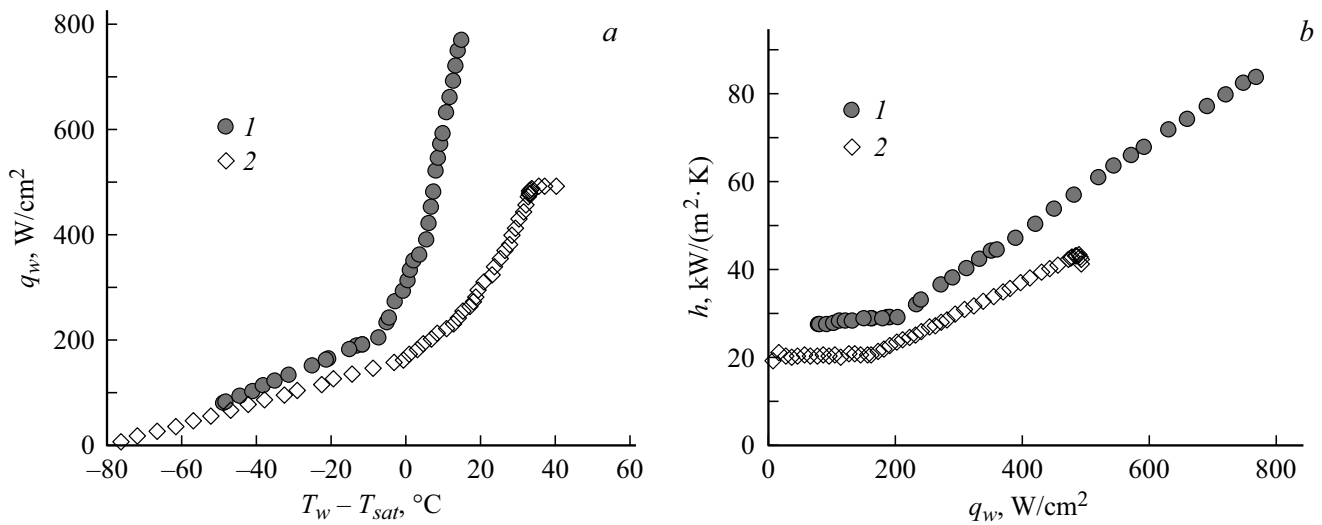
Формирователь микроструй имеет 36 равномерно распределенных сопел с диаметром  $174 \pm 3 \mu m$ , расположенных на расстоянии 1 mm друг от друга, он подробно описан в [4]. Зазор между формирователем микроструй и охлаждаемой поверхностью равен 1 mm. Перед началом экспериментов измерительная система вакуумируется и заполняется азотом, после чего заправляется дистиллированной водой, предварительно дегазированной вакуумированием. При проведении измерений теплоотдачи для насыщенного кипения в большом объеме из участка удалялся формирователь микроструй, объем измерительного участка полностью заполнялся жидкостью и нагревался до температуры насыщения.

Кривые кипения, полученные для модифицированной и плоской поверхностей, представлены на рис. 2, *a*. КТП для плоской поверхности равен  $170 W/cm^2$ , а КТП для модифицированной поверхности равен  $480 W/cm^2$ , что в 2.8 раза больше, чем для плоской поверхности. Зависимость коэффициента теплоотдачи  $h$ , определенного как

$h = q_w / (T_w - T_{sat})$  (где  $T_{sat}$  — температура насыщения при измеренном давлении), от теплового потока представлена на рис. 2, *b*. Как видно, коэффициенты теплоотдачи при кипении на модифицированной поверхности значительно превышают коэффициенты теплоотдачи для плоской поверхности.

Зависимости плотности теплового потока от перегрева стенки для плоской и модифицированной поверхностей при охлаждении импактными микроструями показаны на рис. 3, *a*. Начальная скорость жидкости в струях равна 1 m/s, температура охлаждающей жидкости равна  $23 \pm 1^{\circ}C$ . Как видно, кипение на модифицированной поверхности возникает при существенно меньших перегревах поверхности, чем в случае плоской поверхности. КТП при охлаждении импактными микроструями плоской поверхности равен  $493 W/cm^2$  при перегреве стенки относительно температуры насыщения  $35^{\circ}C$ . В случае охлаждения модифицированной поверхности КТП не достигался из-за ограничения температуры нагревательной системы, максимальный тепловой поток составил  $\sim 770 W/cm^2$  при перегреве стенки  $14.7^{\circ}C$ . Зависимость коэффициентов теплоотдачи, определенных как  $h = q_w / (T_w - T_0)$  (где  $T_0$  — температура поступающей в формирователь струи жидкости), от плотности теплового потока представлена на рис. 3, *b* для плоской и модифицированной поверхностей. Как видно, коэффициент теплоотдачи для модифицированной поверхности до 40% выше, чем для плоской поверхности.

Приведенные данные показывают, что разработанная структура из гексагональных пористых выступов, изготовленная SLS/SLM-методом, существенно понижает перегрев стенки и в 3.5 раза повышает коэффициенты теплоотдачи для насыщенного кипения воды в большом



**Рис. 3.** Теплообмен при охлаждении затопленными импактными микроструями при скорости 1 м/с. *a* — зависимость теплового потока от перегрева стенки. *b* — зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока. Точки 1 — модифицированная поверхность, точки 2 — плоская поверхность.

объеме. Достигнутая плотность теплового потока при кипении на 10% выше, а коэффициенты теплоотдачи в 1.5 раза выше, чем максимальные значения, полученные в [9] для модулированной поверхности с пористыми медными столбиками. Гексагональные пористые выступы показали также высокую эффективность при охлаждении модифицированной поверхности распределенной системой импактных микроструй. Достигнутое значение плотности теплового потока для скорости жидкости в струях 1 м/с превышает 770  $W/cm^2$ . Для плоской поверхности такой тепловой поток достигается при существенно большей скорости струй, что вызывает повышение затрат энергии на формирование струй и увеличение динамического воздействия на охлаждаемое устройство. Это показывает перспективность предложенного метода модификации поверхности для интенсификации теплообмена и увеличения предельных тепловых потоков, необходимых для обеспечения работоспособности перспективных теплонапряженных устройств, в том числе микроэлектронных устройств.

### Финансирование работы

Исследование проведено в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00626 (<https://rscf.ru/project/21-19-00626/>). Формирование покрытия выполнено на оригинальном оборудовании ЦКП ИАиЭ СО РАН в рамках госзадания № 121051700156-9.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] S.G. Kandlikar, S. Colin, Y. Peles, S. Garimella, R.F. Pease, J.J. Brandner, D.B. Tuckerman, *J. Heat Transfer*, **135** (9), 091001 (2013). DOI: 10.1115/1.4024354
- [2] К.А. Бусов, Н.А. Мажейко, *Письма в ЖТФ*, **49** (21), 18 (2023). DOI: 10.61011/PJTF.2023.21.56458.19698 [К.А. Бусов, Н.А. Мажейко, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (11), 15 (2023)].
- [3] S. Fan, F. Duan, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **150**, 119324 (2020). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119324
- [4] В.В. Кузнецов, А.С. Шамирзаев, А.С. Мордовской, *Письма в ЖТФ*, **49** (2), 30 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.02.54283.19405 [V.V. Kuznetsov, A.S. Shamirzaev, A.S. Mordovskoy, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (1), 71 (2023). DOI: 10.21883/TPL.2023.01.55354.19405].
- [5] S. Jones-Jackson, R. Rodriguez, A. Emadi, *IEEE Trans. Power Electron.*, **36** (9), 10420 (2021). DOI: 10.1109/TPEL.2021.3059558
- [6] Ю.А. Зейгарник, Н.П. Привалов, А.И. Климов, *Теплоэнергетика*, № 1, 48 (1981). [Yu.A. Zeigarnik, N.P. Privalov, A.I. Klimov, *Therm. Eng.*, N 1, 28 (1981). <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/5346088>].
- [7] M.J. Rau, S.V. Garimella, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **67**, 487 (2013). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.08.041
- [8] C. de Brún, R. Jenkins, T.L. Lupton, R. Lupoi, R. Kempers, A.J. Robinson, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **86**, 224 (2017). DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.04.002
- [9] C.H. Li, T. Li, P. Hodgins, C.N. Hunter, A.A. Voevodin, J.G. Jones, G.P. Peterson, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **54** (15-16), 3146 (2011). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.03.062
- [10] S. Sarkar, R. Gupta, T. Roy, R. Ganguly, C.M. Megaridis, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **206**, 123888 (2023). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.123888

- [11] В.П. Бессмельцев, А.Н. Павленко, В.И. Жуков, Автометрия, **55** (6), 25 (2019). DOI: 10.15372/AUT20190604 [V.P. Bessmeltsev, A.N. Pavlenko, V.I. Zhukov, Optoelectron. Instrument. Proc., **55** (6), 554 (2019). DOI: 10.3103/S8756699019060049].
- [12] M.G. Cooper, Adv. Heat Transfer, **16**, 157 (1984). DOI: 10.1016/S0065-2717(08)70205-3