

УДК 536.248

Теплоотдача и критический тепловой поток на модифицированной поверхности при кипении в условиях естественной конвекции*

А.Н. Павленко, В.Е. Жуков, Н.Н. Мезенцева

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: zhukov@itp.nsc.ru

Проведены исследования теплоотдачи и критического теплового потока на плоских прямоугольных ($16 \times 24 \text{ мм}^2$) теплоотдающих поверхностях (ТП), изготовленных из алюминиевого сплава Д16 и модифицированных методом микродугового оксидирования (МДО). Исследованы два типа покрытия, приготовленные с использованием различных электролитов: КОН и фосфатов. Покрытия имеют хорошую адгезию к ТП и высокую диэлектрическую прочность. Толщина покрытий составляет 20 и 7 мкм соответственно. Исследования проведены на фреоне R21 в условиях естественной конвекции при горизонтальной ориентации ТП. Для сравнения проведены измерения на идентичных рабочих участках без модифицирующего покрытия: один участок полированный, второй — шлифованный с шероховатостью 20 мкм. Показано, что интенсивность теплоотдачи на модифицированных ТП не ниже, чем на шлифованной с шероховатостью 20 мкм ТП, и до двух раз выше в сравнении с полированной ТП. Величина критического теплового потока на исследованных поверхностях практически одинаковая. Применение данных типов покрытия обеспечивает электроизоляцию теплоотдающего элемента без ухудшения эффективности отвода тепла.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, модифицирующее покрытие, теплообмен, критический тепловой поток, фреон, большой объем, кипение, теплоотдача.

Влияние шероховатости теплообменной поверхности на интенсивность теплоотдачи в режиме пузырькового кипения было показано в 60-х годах прошлого столетия [1, 2]. В работе [3] авторы провели исследование влияния шероховатости теплоотдающей поверхности (ТП) в диапазоне шероховатости $0,3 < R_z < 58 \text{ мкм}$ на величину коэффициента теплоотдачи при кипении хладона R12. Было показано, что изменение шероховатости от 0,3 до 20 мкм приводит к двукратному повышению коэффициента теплоотдачи, дальнейшее увеличение шероховатости мало сказывается на интенсивности теплоотдачи. В работе [4] было продемонстрировано, что изменение шероховатости ТП от 3 – 5 мкм до 20 – 30 мкм при кипении фреона R21 на оребренных трубах привело к повышению коэффициента теплоотдачи в пределах 1,5.

В последние годы наблюдается значительный рост исследований интенсивности теплообмена и критических явлений на теплообменных поверхностях, модифицированных

* Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РФ в лице Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2020-770).

различными механическими, химическими, плазменными, аддитивными и другими технологиями [5]. Модифицирующие покрытия зачастую имеют микро- и наноразмерные масштабы. Одним из методов модификации поверхности является метод микродугового оксидирования (МДО). Подробное рассмотрение технологии упрочняющего покрытия методом МДО, физико-химических процессов в электролите, механизма формирования оксидных пленок, сравнения анодного покрытия и МДО, классификации методов МДО было выполнено в монографии [6]. В работе [7] на титановую фольгу методом МДО из кипящей наножидкости осаждались частицы Al_2O_3 . Были исследованы микрохарактеристики кипения в вертикальном прямоугольном канале и получена интенсификация теплоотдачи на 20–30 %. В работе [8] рассматривались химические процессы, протекающие при микродуговом оксидировании (МДО) алюминиевого сплава АМг-6 в силикатно-щелочном электролите. Были показаны возможные химические превращения в результате взаимодействия компонентов, входящих в состав электролитов; приведены результаты исследований по определению элементного состава получаемых покрытий; установлена зависимость от технологических режимов содержания в химическом составе покрытия таких оксидных элементных форм, как SiO_2 и Al_2O_3 . В работе [9] изучалась морфология поверхности покрытий, полученных микродуговым оксидированием в силикатнощелочном электролите при различных режимах обработки. Было выявлено, что режимные параметры протекающих в процессе МДО анодных и катодных токов, а также толщина покрытия влияют на морфологию поверхности. Также была исследована пористость получаемого МДО-покрытия и предложен ее расчет. В работе [10] проводились исследования интенсивности теплоотдачи в режиме пузырькового кипения при пленочном орошении горизонтальных труб с покрытием МДО. Орошение пакета труб осуществлялось фреоном R21. Было проведено исследование на трубах диаметром 10 мм из сплава алюминия Д16 без покрытия и с покрытиями, выполненными по технологии МДО. Исследовалось пять образцов с покрытиями МДО, созданными при различных технологических режимах. Показано, что отдельные образцы демонстрируют ухудшение теплоотдачи, другие — улучшение до более чем двукратного её повышения по сравнению с образцом без покрытия. Наилучшую теплоотдачу показал образец с МДО-покрытием толщиной 30 мкм, изготовленным в среде электролита с добавлением натриевого жидкого стекла.

Цель представленной работы состоит в исследовании теплоотдачи и критического теплового потока при кипении в условиях большого объема на модифицированных методом микродугового оксидирования плоских прямоугольных ($16 \times 24 \text{ мм}^2$) теплоотдающих поверхностях, изготовленных из алюминиевого сплава Д16. Исследования проводились с модифицирующими покрытиями, полученными в среде электролита КОН и в среде электролита фосфатных солей. Подробно характеристики покрытий описывались авторами [10].

Эксперименты проводились в условиях естественной конвекции на экспериментальном стенде, детальное описание которого приводилось в работах [11, 12]. Центральным элементом стенда является цилиндрический сосуд внутренним диаметром 250 мм и глубиной 230 мм, обеспечивающий условия свободной конвекции при работе с фреонами. Сосуд смонтирован на поворотной станине, что позволяет проводить экспериментальные исследования при различной ориентации рабочего участка относительно силы тяжести. Он оснащен четырьмя стеклянными окнами, позволяющими осуществлять визуальные наблюдения, фото- и высокоскоростную видеорегистрацию процессов теплообмена, подсветку объектов исследования. Для видеосъемки использовалась высокоскоростная

видеокамера Phantom VEO 410L (4) с разрешающей способностью 1280×800 при частоте съемки до 5200 кадр/с. Для поддержания постоянной температуры в сосуде имеется теплообменник, через который циркулирует термостатированная вода.

Схема рабочего участка приведена на рис. 1. Теплоотдающий блок с модифицирующим покрытием (1) изготовлен из алюминиевого сплава Д16. Полупроводниковые датчики температуры (2) диаметром 1,2 мм установлены в непосредственной близости от ТП (расстояние от ТП до оси датчика — 1,0 мм). Объемные тепловыделяющие элементы (3) установлены в блоке нагревателя (4), изготовленного из сплава Д16. Элементы корпуса (5) рабочего участка выполнены из стеклотекстолита. В экспериментах измерялась температура жидкости на уровне ТП, температура теплоотдающего блока на расстоянии 1 мм от ТП, напряжение и ток нагревателя, давление в сосуде. Тепловые потери нагревателя учитывались как постоянная величина, равная 20 % общего тепловыделения.

Эксперименты проводились в условиях насыщения при температуре окружающей среды и давлении 0,18 МПа (приведенное давление $P_r = 0,034$). Было изготовлено четыре экспериментальных участка с различными характеристиками ТП. Участок № 1 — шлифованная ТП с шероховатостью $R_z 20$ без модифицирующего покрытия; участок № 2 — модифицирующее покрытие МДО в среде электролита КОН толщиной 20 мкм; участок № 3 — полированная ТП без покрытия с шероховатостью $R_z 1,25$; участок № 4 — модифицирующее покрытие МДО в среде электролита фосфатных солей толщиной 7 мкм. На рис. 2 приведены опытные данные, полученные на указанных рабочих участках.

Как видно на диаграмме, область однофазной конвекции на полированном участке (№ 3) наиболее затянута по сравнению с остальными участками и распространяется до величины $q = 17900 \text{ Вт/м}^2$ при $\Delta T = 15,8 \text{ К}$. В области кипения данные, полученные на участке № 3, удовлетворительно согласуются с известной корреляцией $a = A \cdot q^{0,7} F(P_r)$ [13], в соответствии с которой построена кривая на рисунке.

На рабочем участке № 1 кипение начинается при меньшем температурном напоре ($\Delta T = 8 \text{ К}$) и меньшей плотности теплового потока ($q = 9400 \text{ Вт/м}^2$). На участке кипения практически во всем интервале температурный напор на шлифованном рабочем участке практически вдвое меньше, чем на полированном участке. Соответственно, коэффициент теплоотдачи на участке № 1 вдвое выше, чем на участке № 3. Данные по рабочим участкам с модифицирующим покрытием (№ 2 и № 4) в области развитого кипения практически совпадают с данными, полученными на шлифованном рабочем участке № 1 без покрытия. В области начала закипания поведение модифицированных ТП отличается от поведения шлифованной поверхности. На модифицированных ТП образуется 1–2 локальных очага с множеством центров парообразования, которые с повышением плотности теплового потока увеличивают производительность парогенерации, при этом незначительно увеличиваясь в размерах. На шлифованной поверхности с увеличением плотности теплового потока происходит быстрое расширение области парообразования на всю ТП и при дальнейшем увеличении плотности теплового потока происходит повышение производительности парогенерации.

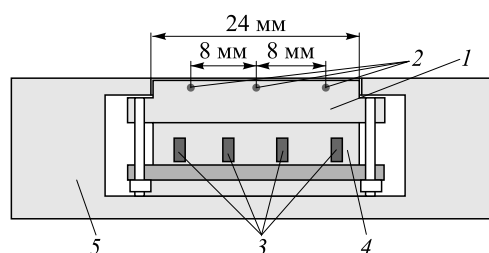


Рис. 1. Схема рабочего участка.

- 1 — теплоотдающий блок, 2 — термометры,
3 — тепловыделяющие элементы нагревателя,
4 — блок нагревателя,
5 — стеклотекстолитовый корпус.

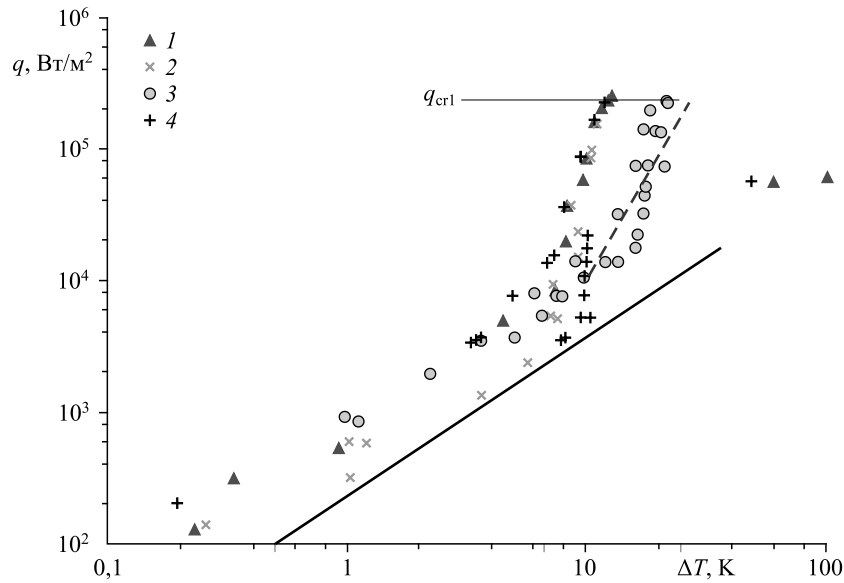


Рис. 2. Зависимость плотности теплового потока от температурного напора при кипении во фреоне R21.

q_{cr1} — критический тепловой поток; $P = 0,18$ МПа;
 1–4 — номера рабочих участков;
 сплошная линия соответствует зависимости $Nu = 0,135Ra^{1/3}$,
 штриховая линия — расчет по корреляции $\alpha = A \cdot q^{0,7} F(P_t)$ [13].

На величину критического теплового потока модифицирующее покрытие не оказало видимого влияния. На всех исследованных образцах эта величина практически одинакова. В области пленочного кипения также не наблюдалось различия для модифицированных и немодифицированных ТП. Пленочному кипению соответствует группа точек при $q = 60000$ Вт/м² и высоких (до 100 К) температурных напорах.

Проведенные эксперименты показали, что применение диэлектрически прочных модифицирующих покрытий на ТП, нанесенных методом МДО в электролите КОН и электролите фосфатных солей, не привело к ухудшению характеристик теплообмена и изменению критического теплового потока по сравнению с немодифицированной ТП, имеющей аналогичную шероховатость. Данные покрытия обладают высокими электроизоляционными характеристиками и могут использоваться для электроизоляции токонесущих элементов без ухудшения их теплоотдающих свойств при кипении в условиях большого объема.

Список литературы

1. Kurihara H.M., Myers J.E. The effects of superheat and surface roughness on boiling coefficients // AICHE J. 1960. Vol. 6, Iss. 1. P. 83–91.
2. Berenson P.J. Experiments on pool-boiling heat transfer // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 1962. Vol. 5, Iss. 10. P. 985–999.
3. Данилова Г.Н., Бельский В.К. Исследование теплоотдачи при кипении фреонов-113 и 12 на трубках различной шероховатости // Холодильная техника. 1965. № 4. С. 24–28.
4. Гогонин И.И. Влияние искусственных центров парообразования на теплообмен при кипении пленки, орошающей пучок горизонтальных оребренных труб // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28, № 5. С. 739–744.
5. Kim D.E., Yu D.I., Jerng D.W., Kim M.H., Ahn H.S. Review of boiling heat transfer enhancement on micro/nanostructured surfaces // Experimental Thermal and Fluid Sci. 2015. Vol. 66. P. 173–196.

6. **Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Люднн В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М.** Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). М: Экомет, 2005. 362 с.
7. **Васильев Н.В., Вараксин А.Ю., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Эпельфельд А.В.** Характеристики кипения воды, недогретой до температуры насыщения, на структурированных поверхностях // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55, № 6. С. 712–719.
8. **Михеев А.Е., Трушкина Т.В., Гирн А.В., Раводина Д.В., Ивасев С.С.** Химические процессы при микродуговом оксидировании // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. 2013. № 2. С. 212–215.
9. **Трушкина Т.В., Михеев А.Е., Гирн А.В., Алякрецкий Р.В., Раводина Д.В.** Морфология и пористость поверхности оксидных покрытий // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. 2014. № 2. С. 144–148.
10. **Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A., Kataev A.I., Mironova I.B.** Experimental study of heat transfer enhancement in a falling film of R21 on an array of horizontal tubes with MAO coating // Intern. Commun. in Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 129. P. 105743-1–105743-13.
11. **Zhukov V.E., Slesareva E.Y., Pavlenko A.N.** Effect of modification of heat-release surface on heat transfer in nucleate boiling at free convection of freon // J. Engng Thermophysics. 2021. Vol. 30, No. 1. P. 1–13.
12. **Жуков В.Е., Слесарева Е.Ю.** Распространение фронта испарения по неизотермической поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2020.Т. 27, № 6. С. 919–922.
13. **Spalding D.B., Taborek J.** Heat exchanger design handbook. I. Heat exchanger theory. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1983.

*Статья поступила в редакцию 28 февраля 2022 г.,
после доработки — 12 марта 2022 г.,
принята к публикации 22 марта 2022 г.*