

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 8. С. 347–352  
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 8, pp. 347–352

Научная статья  
УДК 532.6  
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=183181>  
EDN: <https://www.elibrary.ru/YQZJAU>

## Исследование смачивания поверхности с впадинами

Ю.А. Кузма-Кичта<sup>1</sup>, М.М. Аляутдинова<sup>1</sup>, Н.С. Иванов<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», Москва, Россия

✉ [ivanovniks@mpei.ru](mailto:ivanovniks@mpei.ru)

**Аннотация.** В работе исследовано смачивание поверхностей с впадинами, измерены распределения их диаметров на пластинах и краевые углы. Впадины получены продавливанием гидравлическим прессом на алюминиевых пластинах абразивного зерна размером от 70 до 500 мкм. Проведено сравнение краевых углов для поверхности, полученной путем продавливания с поверхностью, сформированной ударным воздействием.

**Ключевые слова:** смачивание, краевой угол, гидрофобные покрытия, микро- и наноструктуры, впадины на поверхности

**Для цитирования.** Кузма-Кичта Ю.А., Аляутдинова М.М., Иванов Н.С. Исследование смачивания поверхности с впадинами // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 8. С. 347–352. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=183181>

Original article

## Study of wetting of surfaces with depressions

Yu.A. Kuzma-Kichta<sup>1</sup>, M.M. Alyautdinova<sup>1</sup>, N.S. Ivanov<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>NRU "MPEI", Moscow, Russia

✉ [ivanovniks@mpei.ru](mailto:ivanovniks@mpei.ru)

**Abstract.** The paper studies wetting of a surface with depressions formed in different ways. Distributions of the diameters of abrasive particles and depressions formed by forcing by these particles are obtained. It is established that forcing allows obtaining a surface with a normal distribution of depression diameters. The contact angle was determined using software (HiView) for a microscope, which allows determining the contact angle with an uncertainty of  $\pm 1^\circ$ . Using a microscope, a photograph of the surface and a macrophotography of a drop were taken, then the photographs were processed in the software, the depression diameters were determined, the contact angles on the surface with depressions were measured, and the distribution of depression diameters was plotted. The surface with depressions was formed by forcing with a Nordberg N3612 hydraulic press. A sheet with an abrasive was fixed between an aluminum substrate and a press, after which forcing was carried out with a force of 5 tons. For comparison, reliefs formed by impact action on a plate with fixed abrasive paper were obtained. The same abrasive paper was used. The method consisted of applying mechanical blows with a hammer to the abrasive paper.

© Кузма-Кичта Ю.А., Аляутдинова М.М., Иванов Н.С., 2024

The contact angles for the studied surfaces were measured, and it was found that the wetting process occurs with the displacement of air. At the initial stage, the surface with depressions has maximum hydrophobic properties, due to the presence of air in the depressions, however, over time, the liquid displaces it and the wetting angle decreases to stable values. When the drop stabilizes for 5 minutes, the angle decreases by 10 degrees. The contact angle for the studied cases decreases with an increase in the diameter of the depression, which is consistent with the known data. The method of forming depressions on the surface does not affect wetting.

**Keywords:** wetting, contact angle, hydrophobic coatings, micro- and nanostructures, depressions on the surface

**For citation.** Kuzma-Kichta Yu.A., Alyautdinova M.M., Ivanov N.S. Study of wetting of surfaces with depressions. *Thermal processes in engineering*. 2024, vol. 16, no. 8, pp. 347–352. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=183181>

## 1. Введение

Исследование смачивания поверхности является крайне актуальной задачей. Изменяя смачивание поверхности путем формирования на ней микро- и наноструктур, можно увеличить теплоотдачу при кипении, испарении и конденсации [1]. В работе исследовано влияние рельефа поверхности на краевой угол.

В работе [2–5] исследовано смачивание поверхности с микро- и нанорельефом. Измерены краевые углы для рельефов поверхности, полученных пескоструйной обработкой, прокаткой, химической полировкой, микродуговым оксидированием и формированием с помощью частиц углерода. Показано, что разработанное комбинированное покрытие из наночастиц и микроструктуры увеличивает краевой угол до 160 градусов и КТО в два раза в следующих условиях: температурный напор от 10 до 40 градусов, газосодержание от 20 до 80 %, давление от 0,009 до 0,1 МПа. Повышение теплоотдачи при конденсации на трубе с разработанным покрытием воспроизводилось в течении одного месяца в исследованных условиях.

Нанесение покрытия из графена на поверхности медных труб позволяет достигнуть сверхгидрофобности и режима прыгающих капель, увеличить теплоотдачу при конденсации до 3-х раз [6]. Однако, опыты проведены при отсутствии неконденсирующихся газов. В работе [7] изучено влияние структур в виде микростолбиков, микроиглол и наноразмерных цилиндров на смачивание поверхности и обнаружено, что они увеличивают краевой угол до 178 градусов.

Исследование свойств поверхности на смачивание, сформированной воздействием лазе-

ром, проведено в докторской диссертации Старинского С.В. [8]. Целью работы являлось установление закономерностей теплообменных процессов при наносекундном лазерном синтезе функциональных материалов в вакууме, фоновом газе и жидкости. Показана перспективность использования стойких супергидрофильных поверхностей, полученных при лазерной обработке, для интенсификации теплообмена. Созданы бифильные материалы для управления обтеканием в докавитационных режимах. Установлено, что изменение свойств смачиваемости обусловлено обратным осаждением продуктов абляции на поверхность мишени.

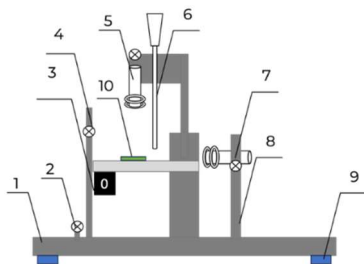
Способ гидрофобизации самоочищающихся поверхностей описан в работе Волмер Д. [9]. Методика формирования поверхности заключается в получении тонкого слоя наночастиц углерода с помощью осаждения на подложку из стекла. Для закрепления покрытия проводился обжиг образца в муфельной печи в атмосфере аммиака. На поверхности получен краевой угол 154 градуса.

Настоящая работа посвящена изучению смачивания поверхности и зависимости краевого угла от распределения впадин на ней.

## 2. Методика исследования

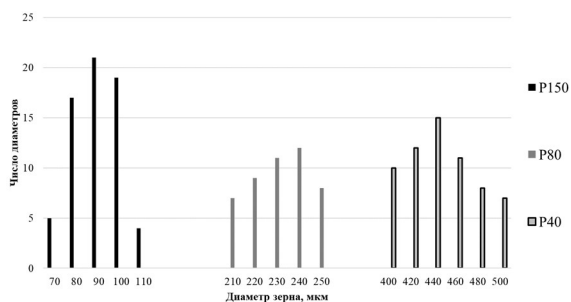
Краевой угол измерялся методом неподвижной капли. Капля помещается на исследуемую поверхность, в течении 5 минут стабилизируется, после чего определяется краевой угол. Для измерения краевого угла разработана установка, включающая в себя цифровые микроскопы, систему микролифтов, цифровой угломер. Определение краевого угла проводилось при помощи

программного обеспечения (HiView) для микроскопа, которое позволяет определять краевой угол с неопределенностью  $\pm 1^\circ$ . С помощью микроскопа проводилась фотография поверхности и макросъемка капли, затем фотографии обрабатывались в программном обеспечении, определялись диаметры впадины, измерялись краевые углы на поверхности с впадинами, строилось распределение диаметров впадин. Схемы установки показана на рис. 1.



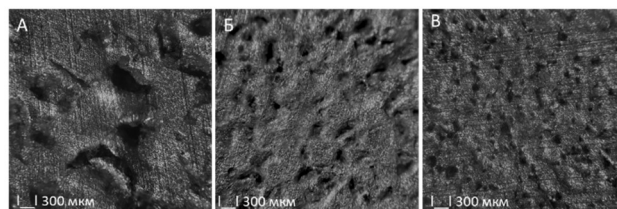
**Рис. 1.** Схема установки для изучения смачивания поверхности: 1 – массивная основа, 2 – микролифт приближения каретки с образцом, 3 – цифровой угломер, 4 – микролифт изменения высоты каретки с образцом, 5 – цифровой микроскоп для изучения структуры, 6 – дозатор жидкости, 7 – микроскоп макро- и микросъемки поверхности, 8 – микролифт фокусировки, 9 – антивибрационные подставки

В работе для определения диаметров впадин использован цифровой микроскоп. Калибровка микроскопа выполнена в программном обеспечении (HiView) и эталона с известным размером. По размерной сетке определены диаметры впадин. Фотографии поверхностей получены при увеличении 1000х. Образцы изготовлены из алюминиевой пластины, предварительно очищенной с помощью раствора щелочи. Согласно известным данным толщина пленки оксида алюминия на пластине 1 нм [10]. Размер алюминиевой пластины  $50 \times 50 \times 1,5$  мм. Для формирования рельефа на поверхности пластин использованы абразивы с зерном от 70 до 500 мкм. Распределения размеров зерна абразива показаны на рис. 2.



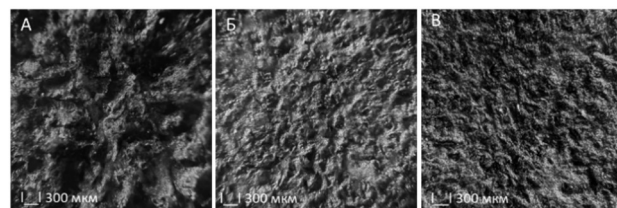
**Рис. 2.** Распределение диаметров абразивного зерна наждачной бумаги P150, P80 и P40

Поверхность с впадинами формировалась с помощью продавливания гидравлическим прессом марки Nordberg N3612. Лист с абразивом закреплялся между алюминиевой подложкой и прессом, после чего осуществлялось продавливание с усилием 5 тонн. Таким методом получены рельефы, показанные на рис. 3.



**Рис. 3.** Поверхности, полученные путем продавливания гидравлическим прессом: А – P 40, Б – P 80, В – P 150

Для сравнения получены рельефы, сформированные ударным воздействием на пластину с закрепленной абразивной бумагой. Использована та же абразивная бумага. Метод заключался в нанесении механических ударов с помощью молота на абразивную бумагу. Полученные рельефы показаны на рис. 4.



**Рис. 4.** Поверхности, полученные ударным воздействием молота на абразивную бумагу: А – P 40, Б – P 80, В – P 150

Полученные рельефы были исследованы с помощью разработанной установки. На микроскопе определены распределения диаметров впадин, измерены краевые углы.

### 3. Результаты исследования: распределения диаметров впадин и краевые углы

Установлено, что при продавливании прессом абразивной бумаги на поверхности алюминия формируется структура с впадинами, распределение диаметров которых подобно распределению диаметров абразивного зерна  $\pm 10$  мкм, рис. 4. На рис. 5 показано распределение диаметров впадин на поверхности алюминия в случае абразивной бумаги P150, P80 и P40. Наиболее вероятный диаметр впадины равен 90 мкм

для абразивной бумаги P150, 220 мкм для P80. Для абразивной бумаги P40, наиболее вероятный диаметр равен 460 мкм.

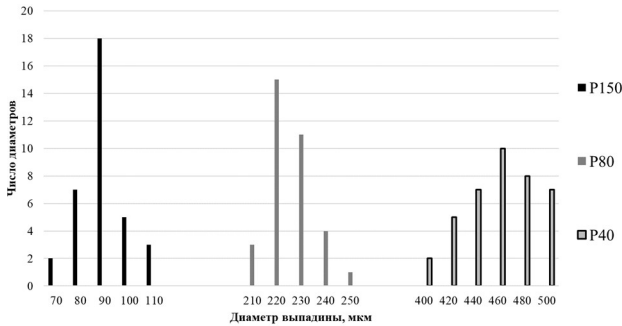


Рис. 5. Распределение диаметров впадин на поверхности алюминия, с структурой, полученной продавливание абразивной бумагой: P150, P80 и P40

На рис. 6 показано распределение диаметров впадин, полученных ударным воздействием молота. На поверхности формируется распределение диаметров впадин, которое можно оценить, как хаотическую структуру. Средний размер впадин определен как полусумма максимального и минимального диаметра на распределении.

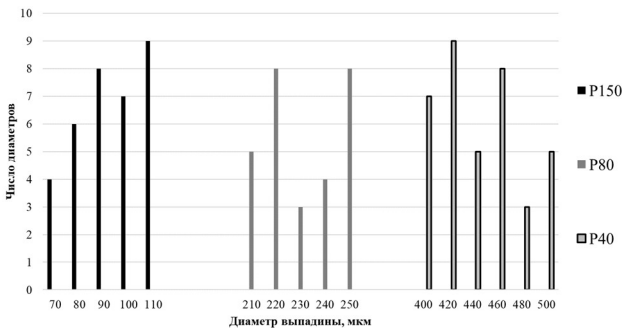


Рис. 6. Распределение диаметров впадин на поверхности алюминия, с структурой, полученной ударным воздействием молота: P150, P80 и P40

Таким образом, средний диаметр впадины для абразивной бумаги P150 равен 85 мкм, для P80 равен 245 мкм и для P40 равен 475 мкм.

На полученных поверхностях с известным распределением диаметров впадин определен краевой угол. Измерение краевого угла проводилось до момента его стабилизации во времени. Установлено, что в момент нанесения капли дистиллированной воды на поверхность с впадинами краевой угол имеет максимальной значение, что объясняется наличием в структуре воздуха, который выступает в качестве гидрофо-

бизатора. Однако, с течением времени вода вытесняет его, и краевой угол уменьшается. Эффект снижения краевого угла наблюдается для поверхностей, полученных по различным технологиям. На рис. 7 показано изменение краевого угла с течением времени на поверхности с впадинами, полученными продавливание и ударным воздействием. На рис. 8 показана макрофотография процесса смачивания поверхности с продавленной абразивной бумагой P40. В момент нанесения капли на поверхность она занимала положение А на рис. 8. За период стабилизации воздух из впадин вытесняется жидкостью, что приводит к положению Б капли на рис. 8. Угол смачивания изменялся от 112 до 94 градусов.

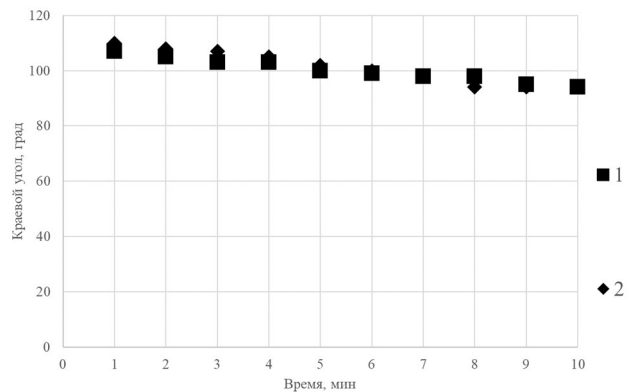


Рис. 7. Изменение краевого угла для дистиллированной воды на поверхности с впадинами, полученными с абразивной бумагой P40: 1 – продавливанием прессом, 2 – ударным воздействием молота

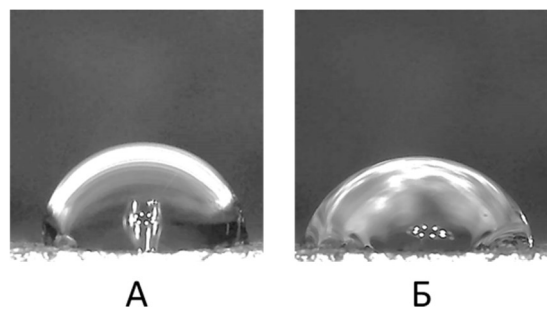
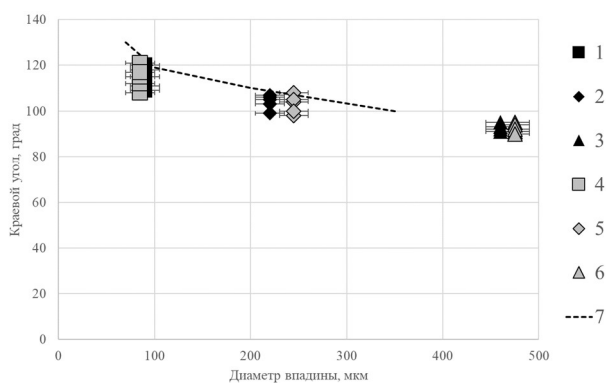


Рис. 8. Капля дистиллированной воды на поверхности с впадинами, полученными продавливанием абразива с распределением 400–500 мкм: А – в начальном момент времени, Б – в стабильном состоянии, через 5 минут

На рис. 9 показана зависимость краевого угла от диаметра впадины для поверхностей, полученных продавливанием прессом и ударным воздействием на абразивную бумагу P40, P80 и P150. Проведено сравнение с известными дан-

ными для микроструктуры [2–5]. Краевой угол измерялся в 5 точках на поверхности с известным распределением диаметров впадин, при установившемся равновесии, когда значение угла не изменяется во времени. Как видно, краевой угол для исследованных случаев с ростом диаметра впадины снижается, что согласуется с известными данными. Способ формирования впадин на поверхности не влияет на смачивание.



**Рис. 9.** Зависимость краевого угла от диаметра впадины: 1 – продавливание прессом абразива Р150; 2 – продавливание прессом абразива Р80; 3 – продавливание прессом абразива Р40; 4 – ударное воздействие молотом, абразив Р 150; 5 – ударное воздействие молотом, абразив Р 80; 6 – ударное воздействие молотом, абразив Р 40; 7 – микроструктура [2–5]

#### 4. Выводы

В работе исследовано смачивание поверхности с впадинами, сформированными различными способами. Получены распределения диаметров абразивных частиц и впадин, образованных продавливанием этими частицами. Установлено, что продавливание позволяет получить поверхность с нормальным распределением диаметров впадин.

Измерены краевые углы для исследованных поверхностей, и обнаружено, что процесс смачивания протекает с вытеснением воздуха. В начальной стадии поверхность с впадинами обладает максимальными гидрофобными свойствами, за счет наличия воздуха в впадинах, однако, с течением времени жидкость вытесняет его и угол смачивания снижается до стабильных значений. При стабилизации капли в течении 5 минут угол снижается на 10 градусов. краевой угол для исследованных случаев с ростом диаметра впадины снижается, что согласуется с известными данными. Способ формирования впадин на поверхности не влияет на смачивание.

#### Список источников

1. Intensification of Heat and Mass Transfer on Macro-, Micro-, and Nanoscale / Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Ya.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P.: monograph. New York.: Begell House, 2016. 530 p.
2. Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Чугунков Д.В. Исследование смачивания и конденсации на горизонтальной трубе с покрытием // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15, № 2. С. 72–78. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-2-72-78
3. Исследование смачивания гидрофобных и гидрофильных покрытий / Ю.А. Кузма-Кичта, Н.С. Иванов, Д.В. Чугунков, А.В. Лавриков // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94, № 6. С. 1583–1590.
4. Интенсификация теплообмена при кипении и конденсации с помощью покрытий из микро- и наночастиц / Ю.А. Кузма-Кичта, Н.С. Иванов, А.В. Лавриков, Д.В. Чугунков // Инженерно-физический журнал. 2023. Т. 96, № 2. С. 344–348.
5. Интенсификация теплоотдачи при конденсации на горизонтальной трубе с помощью комбинированного гидрофобного покрытия / Ю.А. Кузма-Кичта, Д.В. Чугунков, А.В. Лавриков, Н.С. Иванов // Инженерно-физический журнал. 2023. Т. 96, № 2. С. 337–343.
6. Daniel J. Preston. Scalable graphene coatings for enhanced condensation heat transfer // Nano Letters. 2015. V. 15, № 5. pp. 2902–2909.
7. Kim D., Kim J., Hwang W. Prediction of contact angle on a microline patterned surface // Surface Science Letters. 2006. V. 600, № 22, pp. 301–304.
8. Старинский С.В. Теплообмен при синтезе функциональных материалов наносекундными лазерными импульсами // дис. ... докт. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2022.
9. Candle soot as a template for a transparent robust superamphiphobic coating / Deng X., Mammen L., Butt H.J., Vollmer D. // Science. 2012. V. 335. № 6064. pp. 67–70.
10. Electrochemical Behavior and Thickness of Aluminium Oxide Films Studied by EIS: Laboratory and Field Studies / Khaled Habib, K. Al-Muhanna, F. Al-Sabti, A. Al-Arbeed // Defect and Diffusion Forum. V. 326–328. № 2012. pp 35–42.

#### References

1. Dzyubenko BV, Kuzma-Kichta YaA, Leontiev AI, Fedik II, Kholpanov LP. Intensification of Heat and Mass Transfer on Macro-, Micro-, and Nanoscale. New York: Begell House; 2016. 530 p.
2. Kuzma-Kichta YaA, Ivanov NS, Chugunkov DV. Study of Wetting and Condensation on a Coated Horizontal Pipe // Thermal Processes in Engineering. 2023;15(2):72-78. DOI 10.34759/tpt-2023-15-2-72-78 (In Russ.)
3. Kuzma-Kichta YaA, Ivanov NS, Chugunkov DV, Lavrikov AV. Study of wetting of hydrophobic and hydrophilic coatings // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. 2021; 94(6):1583-1590. (In Russ.)

4. Kuzma-Kichta YaA, Ivanov NS, Lavrikov AV, Chugunkov DV. Intensification of heat transfer during boiling and condensation using coatings of micro- and nanoparticles // *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2023;96(2): 344-348. (In Russ.)
5. Kuzma-Kichta YaA, Chugunkov DV, Lavrikov AV, Ivanov NS. Intensification of heat transfer during condensation on a horizontal pipe using a combined hydrophobic coating // *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2023; 96(2):337-343. (In Russ.)
6. Daniel J. Preston. Scalable graphene coatings for enhanced condensation heat transfer // *Nano Letters*. 2015;15(5): 2902-2909.
7. Kim D, Kim J, Hwang W. Prediction of contact angle on a microline patterned surface // *Surface Science Letters*. 2006;600(22):301-304.
8. Starinsky SV. Heat and mass transfer in the synthesis of functional materials by nanosecond laser pulses. [doctor's dissertation]. [Novosibirsk]: Kutateladze Institute of Thermophysics; 2022. (In Russ.)
9. Deng X, Mammen L, Butt HJ, Vollmer D. Candle soot as a template for a transparent robust superamphiphobic coating // *Science*. 2012;335(6064):67-70.
10. Khaled Habib, Al-Muhanna K, Al-Sabti F, Al-Arbeed A. Electrochemical Behavior and Thickness of Aluminum Oxide Films Studied by EIS: Laboratory and Field Studies // *Defect and Diffusion Forum*. 326-328(2012):35-42.