

Научная статья

УДК 62-45

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28409>



*А.В. Рыженков, А.В. Волков, Е.С. Трушин* ✉, *С.П. Черепанов*

Национальный исследовательский университет "МЭИ",  
Москва, Россия

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

## **ИЗМЕНЕНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО ТЕКСТУРИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА**

*Аннотация.* Использование гидрофобных металлических поверхностей в теплоэнергетическом оборудовании позволяет снизить гидравлическое сопротивление и скорость образования отложений при транспортировке жидких сред, интенсифицировать теплообменные процессы. Для достижения гидрофобного состояния на поверхности необходимо создать микрошероховатость в виде многомодального рельефа и снизить поверхностную энергию. Одним из наиболее перспективных способов создания структурированного рельефа является лазерная модификация поверхности (лазерная абляция). В работе представлены результаты исследования по определению влияния плотности энергии лазерного излучения на геометрические характеристики формируемого рельефа и свойства смачиваемости поверхности нержавеющей стали марки AISI 304. Выявлено, что за счет формирования структурированного рельефа с последующим снижением поверхностной энергии за счет использования поверхностно-активного вещества, возможно достижение угла смачивания  $149,6^\circ$  при плотности энергии лазерного излучения  $200 \text{ Дж/см}^2$ .

*Ключевые слова:* энергоэффективность, гидрофобность, угол смачивания, лазерное излучение, рельеф.

*Благодарности:* Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России по заданию № FSWF-2020-0021 «Разработка научно-технических основ интенсификации теплообмена при конденсации и повышения термодинамических характеристик и износостойкости энергетического оборудования на основе модификации функциональных поверхностей».

*Для цитирования:*

Рыженков А.В., Волков А.В., Трушин Е.С., Черепанов С.П. Изменение смачиваемости поверхности нержавеющей стали на основе лазерного текстурирования рельефа // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 4. С. 136–146. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28409>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28409>*A.V. Ryzhenkov, A.V. Volkov, E.S. Trushin* ✉, *S.P. Cherepanov*National Research University "Moscow Power Engineering Institute",  
Moscow, Russia✉ [TrushinYS@mpei.ru](mailto:TrushinYS@mpei.ru)

## CHANGE OF WETTABILITY OF STAINLESS STEEL SURFACE BASED ON LASER TEXTURING OF RELIEF

*Abstract.* The use of hydrophobic metal surfaces in heat and power equipment makes it possible to reduce hydraulic resistance and the rate of formation of deposits during transportation of liquid media, to intensify heat exchange processes. To achieve the hydrophobic state on the surface it is necessary to create a micro-roughness in the form of a multimodal relief and to reduce the surface energy. One of the most promising ways to create structured relief is laser modification of the surface (laser ablation). The paper presents the results of studies to determine the influence of laser energy density on the geometric characteristics of the formed relief and wettability properties of the surface of stainless steel grade AISI 304. It was found that by forming a structured relief with a subsequent decrease in surface energy using a surface-active substance, it is possible to achieve an angle of wetting of  $149.6^\circ$  at the energy density of laser radiation of  $200 \text{ J/cm}^2$ .

*Keywords:* energy efficiency, hydrophobicity, wetting angle, laser radiation, relief.

*Acknowledgements:* The results were obtained as part of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation Task No. FSWF-2020-0021 "Development of scientific and technical foundations for intensifying heat transfer during condensation and improving the thermos-hydrodynamic characteristics and wear resistance of power equipment based on the modification of functional surfaces".

*Citation:*

A.V. Ryzhenkov, A.V. Volkov, E.S. Trushin, S.P. Cherepanov, Change of wettability of stainless steel surface based on laser texturing of relief, *Global Energy*, 28 (04) (2022) 136–146, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28409>

**Введение.** Одним из наиболее распространенных материалов при изготовлении различного теплообменного оборудования являются коррозионностойкие стали. Например, нержавеющая сталь марки AISI 304 широко используется при изготовлении поверхностей теплообмена в пластинчатых теплообменных аппаратах, используемых в системах теплоснабжения, в трубчатых теплообменных аппаратах, применяемых в пищевой и химической промышленности, в качестве перспективного материала при модернизации или при изготовлении новых конденсаторов атомных электрических станций [1, 2].

В настоящее время активно развиваются способы модификации металлических поверхностей с целью достижения гидрофобного состояния. Данные поверхности обладают рядом уникальных свойств, такими как эффект самоочистки, повышенная коррозионная стойкость, а также снижение гидравлического сопротивления при транспортировке жидких сред и интенсификация теплообменных процессов при их использовании в различных областях энергетики и промышленности [3]. Так, применение гидрофобных теплообменных поверхностей может повысить эффективность различного теплообменного оборудования.

Известно, что для обеспечения гидрофобного режима смачивания на поверхности должна быть создана шероховатость с последующим снижением поверхностной энергии [4–6]. Суще-

ствуется множество способов создания на поверхности конструкционных материалов упорядоченного многомодального рельефа, среди которых наиболее распространены: плазменное нанесение покрытий [7], химическое и физическое осаждение покрытий [8], формирующее требуемую структуру поверхности, механическая модификация поверхности [9]. Однако, перечисленные способы достаточно сложно реализуемы, энергозатратны и дороги.

Одним из перспективных способов создания на металлической поверхности мультимодального рельефа является её модификация с использованием лазерного излучения. При лазерной модификации поверхности возможно с высокой точностью обеспечивать требуемые геометрические параметры создаваемого рельефа, что в свою очередь позволяет добиться высоких значений угла смачивания.

Целью исследования является оценка возможности достижения гидрофобных свойств поверхности нержавеющей стали марки AISI 304 путем создания мультимодального рельефа с использованием лазерного комплекса и последующим снижением поверхностной энергии с применением поверхностно-активного вещества.

### **Методы и материалы**

Существуют различные типы лазерного оборудования с различными длительностями импульсов, однако среди них можно выделить две основные группы, как наиболее распространенные и эффективные при обработке металлических поверхности с целью создания разномасштабного рельефа: фемтосекундные и наносекундные лазеры. Механизмы абляции аналогичны для нано- и фемтосекундных лазерных импульсов [10–12]:

- разрушение материала с последующим возникновением дефектов, вызванных напряжениями растяжения;
- фрагментация (распад гомогенного материала на части (фрагменты) под действием высоких сил напряжения);
- испарение или взрывное кипение (при высокой интенсивности лазерного излучения).

В результате воздействия лазерного излучения происходит быстрый нагрев приповерхностного слоя материала, после чего начинается процесс взрывного кипения, при котором перегретая метастабильная жидкость претерпевает взрывной фазовый переход в устойчивое двухфазное состояние из-за массивного гомогенного зарождения пузырьков пара.

После разрушения материала начинается процесс фрагментации, вследствие чего возникает пространственно-неоднородные деформации, вызванные уменьшением величины термоэластических напряжений. Из-за неоднородных деформаций гомогенная жидкость (расплавленный металл) превращается в скопление отдельных элементов.

Процесс испарения представляет собой не термический процесс перехода вещества в газообразное состояние, а скорее процесс разрушения твердого вещества вследствие поглощения энергии, значительно превышающей энергию межатомной связи [13]. Таким образом, происходит диссоциация поверхностного слоя материала: плотные макроскопические частицы разъединяются, формируя облако газообразных частиц [14].

Согласно экспериментальным исследованиям, результаты которых представлены в работе [15], порог абляции для нержавеющей стали составляет  $0,29 \text{ Дж/см}^2$  для начала разрушения материала и  $0,55 \text{ Дж/см}^2$  для механизма фрагментации. При этом значение порога абляции зависит не только от типа материала, но и от длительности лазерного импульса.

На рис. 1 представлено изображение металлической поверхности, обработанной наносекундным лазерным комплексом FMark NS-FB-20 при различной плотности энергии излучения: ниже порога абляции, при значениях, близких к порогу абляции, и выше порога абляции. При значениях плотности энергии излучения ниже порога абляции на обработанной поверхности присутствуют следы плавления, вызванного локальным нагревом верхнего слоя материала лазерными

импульсами, однако следы испарения и взрывного кипения отсутствуют (см. рис. 1а). В результате целевая поверхность подвергается плавлению и рекристаллизации без удаления верхнего слоя и разлёта разномасштабных частиц материала по поверхности. При увеличении плотности энергии до значения, близкого к порогу абляции, появляются характерные следы плавления металла и отдельные разномасштабные частицы в виде капель, расположенные по краям области воздействия лазерного импульса (см. рис. 1б). Дальнейшее увеличение плотности энергии излучения приводит к разбросу разномасштабных капель испарившегося металла и образованию характерных для процесса лазерной абляции структур из коалесцировавших полостей перегретого металла (см. рис. 1в).

Таким образом, используемый в настоящей работе наносекундный лазерный комплекс FMark-20 NS-FB позволяет формировать разномасштабный рельеф путем инициации механизмов лазерной абляции металлической поверхности. На основе вышесказанного, возможно сделать вывод, что характеристики рельефа, формируемого посредством лазерной абляции, зависят от свойств материала и плотности энергии лазерного излучения, значение которой должно быть выше порога абляции.

Экспериментальные образцы для проведения исследований по изменению степени смачиваемости изготавливались из нержавеющей стали марки AISI 304 (аналог 08X18H10) в виде пластин размером 2×3,5 см и толщиной 1 мм.

После изготовления поверхность пластин очищалась с использованием этилового спирта и последующей промывкой дистиллированной водой для удаления остатков растворителя.

На поверхности образцов (с использованием наносекундного лазера) формировался рельеф в виде параллельных канавок с межосевым расстоянием 100 мкм. Для определения влияния параметров лазерного излучения на степень смачиваемости, плотность энергии излучения варьировалась в диапазоне от 5 до 600 Дж/см<sup>2</sup>.

Формирование молекулярных слоев поверхностно-активного вещества на металлических поверхностях с текстурированным рельефом, созданным путем воздействия лазерного излучения, позволяет снизить величину поверхностной энергии на границе раздела фаз "твердое тело – газ" до значения меньшего, чем на границе раздела фаз "твердое тело – жидкость". Результатом достижения описанного неравенства поверхностных энергий является обеспечение устойчивого гидрофобного состояния поверхностей в условиях промышленного применения.

Одним из наиболее популярных поверхностно-активных веществ, используемого в различных сферах промышленности с целью формирования молекулярных слоев на поверхностях различных конструкционных материалов, является поверхностно-активное вещество из класса пленкообразующих алифатических аминов с длиной углеводородного радикала C<sub>16</sub>–C<sub>20</sub>, в частности, октадециламин (ОДА) [16]. При ориентированной сорбции молекул ОДА на металлической поверхности осуществляется формирование так называемого частокола Лэнгмюра, характеризующегося гидрофобными свойствами, в результате чего происходит снижение поверхностной энергии [17].

### Результаты и их обсуждение

После текстурирования на стальных поверхностях многомодального рельефа с использованием лазерного комплекса выполнено исследование топографии поверхностей и шлифов экспериментальных образцов. В табл. 1 представлены изображения модифицированных поверхностей при различной плотности энергии излучения, полученные с использованием электронного микроскопа.

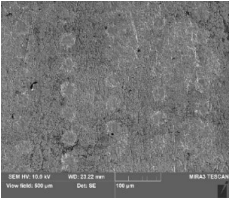
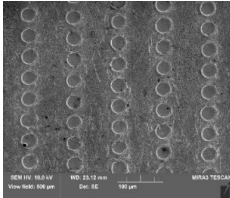
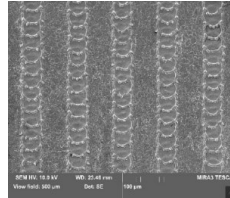
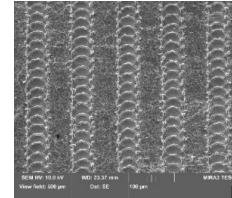
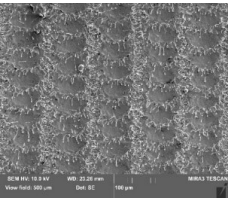
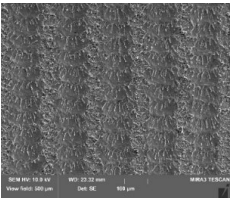
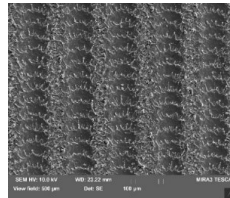
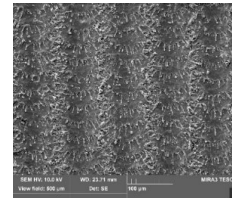
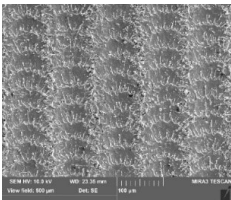
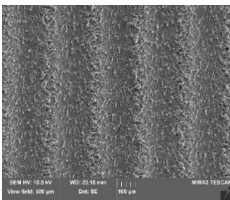
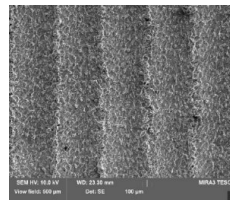
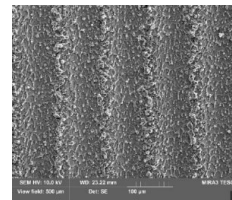
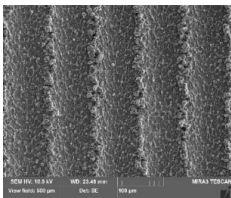
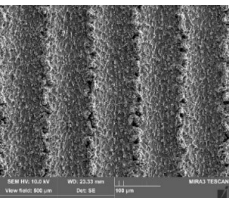
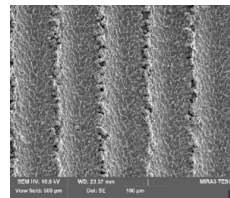
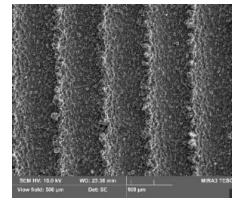
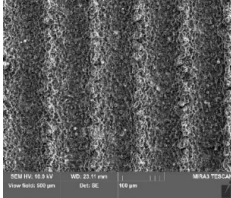
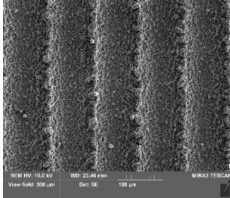
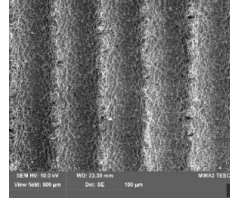
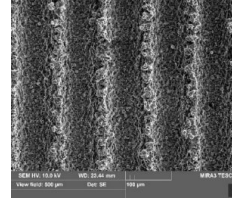
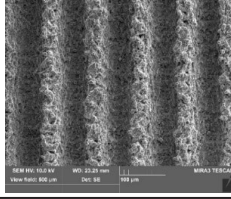
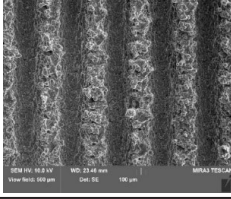
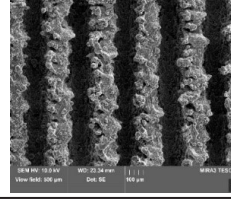
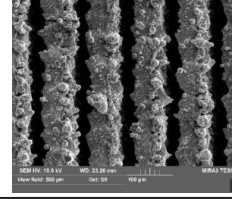
Из анализа изображений, представленных в табл. 1 видно, что изменение параметров лазерного излучения влияет на геометрические характеристики формируемого рельефа.

Таблица 1

**Изображения модифицированных стальных поверхностей  
при различной плотности энергии лазерного излучения**

Table 1

**Images of modified steel surfaces at different densities of laser energy**

Плотность энергии лазерного излучения, Дж/см <sup>2</sup>			
5	10	15	20
			
25	30	35	40
			
50	75	100	110
			
120	130	140	150
			
200	250	300	350
			
400	450	500	600
			

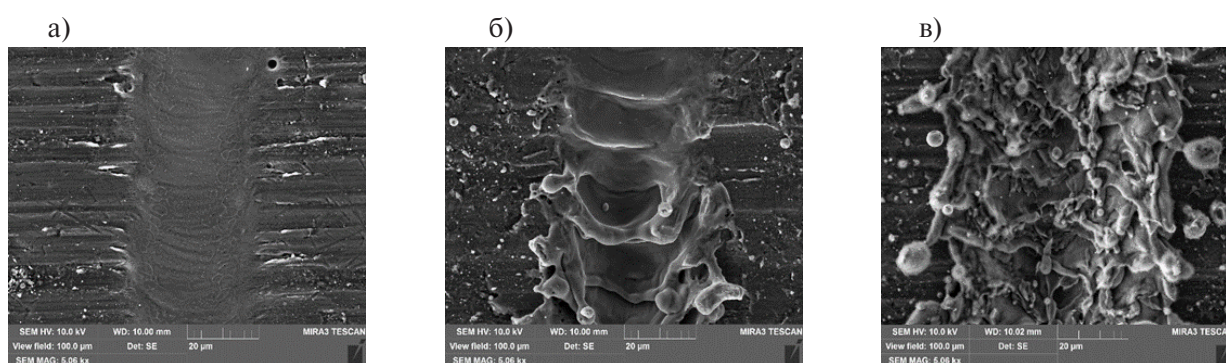


Рис. 1. Изображение металлической поверхности после обработки наносекундным лазером при плотности энергии излучения ниже порога абляции (а), близкой к порогу абляции (б) и выше порога абляции (в)

Fig. 1. Image of a metal surface after treatment with a nanosecond laser at energy densities below the ablation threshold (a), close to the ablation threshold (b), and above the ablation threshold (c)

При этом с повышением значения плотности энергии излучения рельеф становится более выразительный, вплоть до перекрытия канавок фрагментами металла, образовавшимися в результате абляции. На рис. 2 приведен характерный вид сформированного на поверхности нержавеющей стали рельефа, и упрощенная геометрическая модель полученного рельефа. Основными геометрическими характеристиками сформированного рельефа являются: ширина выступа, сформированного вследствие напыла расплавленного металла (*a*), ширина между выступами (*b*), глубина канавки, образованной в результате воздействия лазерного излучения (*h*). В табл. 2 приведены измеренные геометрические параметры рельефа и плотность энергии излучения, при которой рельеф был сформирован.

Определение значения угла смачивания поверхностей экспериментальных образцов осуществлялось с применением автоматического оптического анализатора ОСА 20 и проводилось следующим образом:

- на модифицированной поверхности экспериментального образца размещались три капли дистиллированной воды объемом 5 мкл;
- определялся угол смачивания для каждой капли;
- на основании проведенных измерений рассчитывалось среднее значение угла смачивания поверхности.

Необходимо отметить, что исходная стальная поверхность проявляет гидрофильные свойства, а значение угла смачивания составляет  $85,4^\circ$ .

В результате воздействия лазерного излучения и обработки стальных образцов поверхностно-активным веществом получены как гидрофобные, так и гидрофильные поверхности. При этом проявление гидрофильных свойств наблюдается для образцов, модифицированных при плотности энергии лазерного излучения до  $100 \text{ Дж/см}^2$ . Такой эффект объясняется тем, что при воздействии лазерного излучения при указанных значениях плотности энергии происходит изменение электрического потенциала обрабатываемой поверхности в «положительную» сторону. Вследствие этого молекулы поверхностно-активного вещества сорбируются на модифицированную поверхность экспериментальных образцов таким образом, что углеводородные радикалы, проявляющие гидрофобные свойства, обращены к поверхности металла, а гидрофильная полярная группа, имеющая положительный заряд, отталкивается от поверхности.

Для экспериментальных образцов, подвергнутым обработке при плотности энергии лазерного излучения более  $100 \text{ Дж/см}^2$ , наблюдается достижение гидрофобного состояния, при этом значения угла смачивания составляют более  $112,6^\circ$ , а максимальное значение  $149,6^\circ$  получено при плотности энергии  $200 \text{ Дж/см}^2$ . Внешний вид капли дистиллированной воды на модифи-



Рис. 2. Характерный внешний вид (а) и упрощенная геометрическая модель (б) сформированного на поверхности экспериментальных образцов из нержавеющей стали рельефа

Fig. 2. Characteristic appearance (a) and a simplified geometric model (b) of the relief formed on the surface of the experimental stainless steel samples

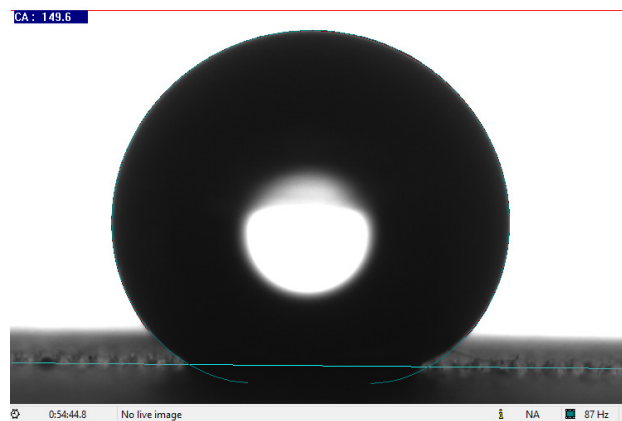


Рис. 3. Внешний капли дистиллированной воды, размещенной на гидрофобной поверхности экспериментального образца с углом смачивания 149,6°

Fig. 3. External drop of distilled water placed on the hydrophobic surface of the experimental sample with a wetting angle of 149,6°

Таблица 2

**Геометрические параметры текстурированного рельефа и плотность энергии лазерного излучения, при которой рельеф сформирован**

Table 2

**Geometric parameters of the textured relief and the density of laser curing energy at which the relief is formed**

<b>q, Дж/см<sup>2</sup></b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>100</b>	<b>110</b>
<i>a</i> , мкм	—	63,7	56,3	54,9	41,3	36,8	34,1	34,6	26,6	31,6	27,3	18,0
<i>b</i> , мкм	—	32,5	42,3	43,5	59,7	60,5	61,5	58,9	75,5	65,5	70,3	80,1
<i>h</i> , мкм	—	2,3	3,7	4,5	4,0	6,4	6,3	6,7	8,2	9,8	13,5	19,3
<b>q, Дж/см<sup>2</sup></b>	<b>120</b>	<b>130</b>	<b>140</b>	<b>150</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>300</b>	<b>350</b>	<b>400</b>	<b>450</b>	<b>500</b>	<b>600</b>
<i>a</i> , мкм	26,8	24,5	21,1	13,9	14,1	13,7	18,8	14,9	22,2	30,6	23,9	30,3
<i>b</i> , мкм	68,9	71,9	77,2	82,2	86,3	85,4	77,7	84,1	77,7	64,8	67,9	68,9
<i>h</i> , мкм	19,7	21,7	21,3	29,1	35,1	37,7	58,0	47,6	67,8	74,6	77,5	101,4

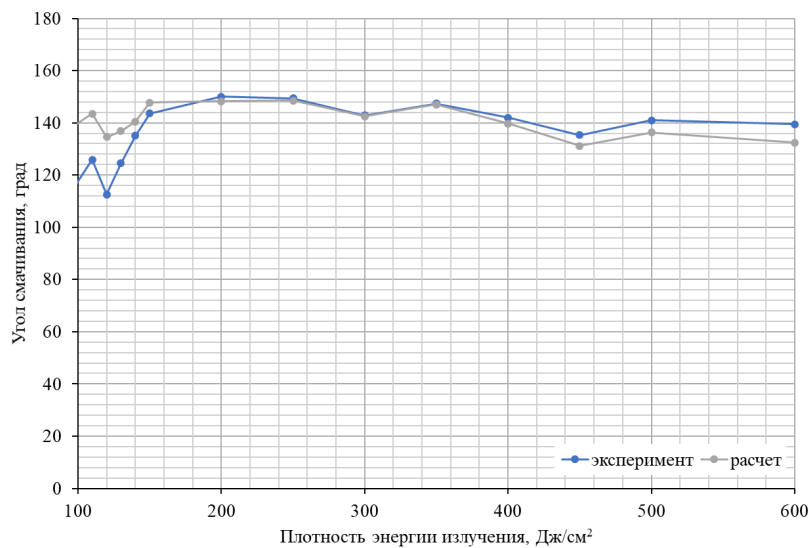


Рис. 4. Кривые значений угла смачивания, полученные расчетным и экспериментальным способом

Fig. 4. Wetting angle curves obtained by calculation and experiment

цированной при плотности энергии лазерного излучения 200 Дж/см<sup>2</sup> поверхности представлен на рис. 3.

Также определено, что на гидрофобных поверхностях наблюдается гетерогенный режим смачивания, при котором капля жидкости смачивает только вершины рельефа поверхности, а во впадинах и порах рельефа находится воздух. При таком режиме смачивания угол смачивания возможно определить расчётно по уравнению Касси-Бакстера (1):

$$\cos \theta = f \cos \theta_0 + f - 1, \quad (1)$$

где  $f = S_{\text{тж}}/S$  — доля смачиваемых участков поверхности, определяемая отношением смоченной  $S_{\text{тж}}$  к фактической  $S$  площади поверхности.

В соответствии с геометрической моделью сформированного рельефа (см. рис. 2б) для определения теоретического значения угла смачивания получено следующее соотношение (2):

$$\cos \theta = \frac{a}{a+b} (\cos \theta_0 + 1) - 1, \quad (2)$$

Используя уравнение (2), был осуществлен расчет значений угла смачивания с использованием геометрических характеристик текстурированного на гидрофобных поверхностях рельефа, представленных в табл. 2 На рис. 4 представлен график с теоретической и экспериментальной кривыми.

Из рис. 4 видно, что определенные экспериментально значения угла смачивания с достаточной точностью соответствуют рассчитанным по уравнению (2). Таким образом возможно использовать полученное соотношение для прогнозирования смачиваемости поверхности нержавеющей стали.

### Выводы

Показано, что использование ОДА для снижения поверхностной энергии модифицированной с использованием лазерного излучения поверхности обеспечивает устойчивое гидрофобное



состояние с высокими значениями угла смачивания. При этом стоит отметить, что для стальных образцов марки AISI 304 (аналог 08X18H10), модифицированных при плотности энергии лазерного излучения до 100 Дж/см<sup>2</sup>, характерно проявление гидрофильных свойств.

Для экспериментальных образцов, подвергнутым обработке при плотности энергии лазерного излучения более 100 Дж/см<sup>2</sup>, наблюдается достижение гидрофобного состояния, при этом значения угла смачивания составляют более 112,6°, а максимальное значение 149,6° получено при плотности энергии 200 Дж/см<sup>2</sup>.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Kumar A., Sharma R., Kumar S., Verma P.** A review on machining performance of AISI 304 steel // *Materials Today: Proceedings*, Vol. 56, 2022. Pp. 2945–2951.

[2] **Kant R., Mittal R., Kumar C., Rana B.S., Kumar M., Kumar R.** Fabrication and Characterization of Weldments AISI 304 and AISI 316 Used in Industrial Applications // *Materials Today: Proceedings*, 2018, Vol. 5, pp. 18475–18481.

[3] **Ryzenkov O.V., Kurshakov A.V., Ryzenkov A.V., Dasaev M.R., Grigoriev S.V.** On intensification of heat exchange in steam condensers made of stainless steel and brass. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019. Vol. 8. Pp. 2290–2294.

[4] **Balraj Krishnan Tudu, Aditya Kumar, Bharat Bhushan.** Facile approach to develop anti-corrosive superhydrophobic aluminium with high mechanical, chemical and thermal durability; *Philosophical transactions of the royal society a mathematical, physical and engineering sciences* 377, 2018.

[5] **Zhen Yang, Xianping Liu, Yanling Tian.** Novel metal-organic superhydrophobic surface fabricated by nanosecond laser irradiation in solution; *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 587, 2020.

[6] **Ganesh B. Shirsath, K. Muralidhar, Raj Ganesh S. Pala, J. Ramkumar.** Condensation of water vapor underneath an inclined hydrophobic textured surface machined by laser and electric discharge; *Applied Surface Science* 484, 2019, pp. 999–1009.

[7] **Matthew Wei-Jun Liu, Jia-Hong Huang.** Effect of coating architecture on stress and energy relief efficiency of TiZrN coating on Si substrate // *Thin Solid Films*, Vol. 751, 2022. P. 139219.

[8] **Siddiqui A., Maurya R., Katiyar P., Balani K.** Superhydrophobic, self-cleaning carbon nanofiber CVD coating for corrosion protection of AISI 1020 steel and AZ31 magnesium alloys // *Surface and Coatings Technology*, Vol. 404, 2020. P. 126421.

[9] **Wang N., Xiong D., Deng Y., Shi Y., Wang K.** Mechanically robust superhydrophobic steel surface with anti-icing, UV-durability, and corrosion resistance properties // *ACS Appl Mater Interfaces*, Vol. 7, 2015. P. 6260-72.

[10] **Van Vechten J.A.** Experimental tests for boson condensation and superconductivity in semiconductors during pulsed beam annealing // *Solid State Communications*, Vol. 39, 1981. pp. 1285–1291.

[11] **Reif J., Varlamova O., Varlamov S., Bestehorn M.** The role of asymmetric excitation in self-organized nanostructure formation upon femtosecond laser ablation // *AIP Conference Proceedings*. 2012. Vol. 1464. pp. 428–441.

[12] **Breitling D., Ruf A., Berger P.W., Dausinger F.H., Klimentov S.M., Pivovarov P.A., Kononenko T.V., Konov V.I.** Plasma effects during ablation and drilling using pulsed solid-state lasers // *Laser Processing of Advanced Materials and Laser Microtechnologies*. 2003. Vol. 5121. pp. 24–33.

[13] **Mazzi A., Miotello A.** Simulation of phase explosion in the nanosecond laser ablation of aluminum // *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 489, 2017. pp. 126–130.

[14] **Yan Z., Mei X., Wang W., Pan A., Lin Q., Huang C.** Numerical simulation on nanosecond laser ablation of titanium considering plasma shield and evaporation-affected surface thermocapillary convection // *Optics Communications*, Vol. 453, 2019. P. 124384.

[15] Saltuganov P., Ionin A.A., Kudryashov S., Rukhadze A., Gavrilov A., Makarov S., Rudenko A., Zayarnyi D. Fabrication of Superhydrophobic Coating on Stainless Steel Surface by Femtosecond Laser Texturing and Chemisorption of an Hydrophobic Agent // Journal of Russian Laser Research, Vol. 36, Jan 2015. pp. 81–85.

[16] Куршаков А.В., Рыженков А.В., Бодров А.А., Рыженков О.В., Патакин А.А., Чернов Е.Ф. Интенсификация теплообменных процессов в конденсаторах паровых турбин с использованием поверхностно активных веществ // Теплоэнергетика, № 11, 2014. С. 16–20.

[17] Рыженков В.А., Седлов А.С., Рыженков А.В. О возможности снижения гидравлического сопротивления трубопроводов систем теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка, № 5, 2007. С. 22–26.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**РЫЖЕНКОВ Артем Вячеславович** – ведущий научный сотрудник, Национальный исследовательский университет "МЭИ", д-р техн. наук.  
E-mail: RyzhenkovAV@mpei.ru

**ВОЛКОВ Александр Викторович** – главный научный сотрудник, Национальный исследовательский университет "МЭИ", д-р техн. наук.  
E-mail: VolkovAV@mpei.ru

**ТРУШИН Евгений Сергеевич** – инженер, Национальный исследовательский университет "МЭИ", без степени.  
E-mail: TrushinYS@mpei.ru

**ЧЕРЕПАНОВ Сергей Павлович** – аспирант, Национальный исследовательский университет "МЭИ", без степени.  
E-mail: CherepanovSP@mpei.ru

### REFERENCES

[1] A. Kumar, R. Sharma, S. Kumar, P. Verma, A review on machining performance of AISI 304 steel // Materials Today: Proceedings, Vol. 56, 2022. Pp. 2945–2951.

[2] R. Kant, R. Mittal, C. Kumar, B.S. Rana, M. Kumar, R. Kumar, Fabrication and Characterization of Weldments AISI 304 and AISI 316 Used in Industrial Applications // Materials Today: Proceedings, 2018, Vol. 5, p. 18475–18481.

[3] O.V. Ryzhenkov, A.V. Kurshakov, A.V. Ryzhenkov, M.R. Dasaev, S.V. Grigoriev, On intensification of heat exchange in steam condensers made of stainless steel and brass. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. Vol. 8. Pp. 2290–2294.

[4] Balraj Krishnan Tudu, Aditya Kumar, Bharat Bhushan, Facile approach to develop anti-corrosive superhydrophobic aluminium with high mechanical, chemical and thermal durability; Philosophical transactions of the royal society a mathematical, physical and engineering sciences 377, 2018.

[5] Zhen Yang, Xianping Liu, Yanling Tian, Novel metal-organic superhydrophobic surface fabricated by nanosecond laser irradiation in solution; Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 587, 2020.

[6] Ganesh B. Shirsath, K. Muralidhar, Raj Ganesh S. Pala, J. Ramkumar, Condensation of water vapor underneath an inclined hydrophobic textured surface machined by laser and electric discharge; Applied Surface Science 484, 2019, pp. 999–1009.

- [7] **Matthew Wei-Jun Liu, Jia-Hong Huang**, Effect of coating architecture on stress and energy relief efficiency of TiZrN coating on Si substrate // *Thin Solid Films*, Vol. 751, 2022. P. 139219.
- [8] **A. Siddiqui, R. Maurya, P. Katiyar, K. Balani**, Superhydrophobic, self-cleaning carbon nanofiber CVD coating for corrosion protection of AISI 1020 steel and AZ31 magnesium alloys // *Surface and Coatings Technology*, Vol. 404, 2020. P. 126421.
- [9] **N. Wang, D. Xiong, Y. Deng, Y. Shi, K. Wang**, Mechanically robust superhydrophobic steel surface with anti-icing, UV-durability, and corrosion resistance properties // *ACS Appl Mater Interfaces*, Vol. 7, 2015. P. 6260-72.
- [10] **J.A. Van Vechten**, Experimental tests for boson condensation and superconductivity in semiconductors during pulsed beam annealing // *Solid State Communications*, Vol. 39, 1981. pp. 1285–1291.
- [11] **J. Reif, O. Varlamova, S. Varlamov, M. Bestehorn**, The role of asymmetric excitation in self-organized nanostructure formation upon femtosecond laser ablation // *AIP Conference Proceedings*. 2012. Vol. 1464. pp. 428–441.
- [12] **D. Breittling, A. Ruf, P.W. Berger, F.H. Dausinger, S.M. Klimentov, P.A. Pivovarov, T.V. Kononenko, V.I. Konov**, Plasma effects during ablation and drilling using pulsed solid-state lasers // *Laser Processing of Advanced Materials and Laser Microtechnologies*. 2003. Vol. 5121. pp. 24–33.
- [13] **A. Mazzi, A. Miotello**, Simulation of phase explosion in the nanosecond laser ablation of aluminum // *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 489, 2017. pp. 126–130.
- [14] **Z. Yan, X. Mei, W. Wang, A. Pan, Q. Lin, C. Huang**, Numerical simulation on nanosecond laser ablation of titanium considering plasma shield and evaporation-affected surface thermocapillary convection // *Optics Communications*, Vol. 453, 2019. P. 124384.
- [15] **P. Saltuganov, A.A. Ionin, S. Kudryashov, A. Rukhadze, A. Gavrilov, S. Makarov, A. Rudenko, D. Zarynyi**, Fabrication of Superhydrophobic Coating on Stainless Steel Surface by Femtosecond Laser Texturing and Chemisorption of an Hydrophobic Agent // *Journal of Russian Laser Research*, Vol. 36, Jan 2015. pp. 81–85.
- [16] **A.V. Kurshakov, A.V. Ryzhenkov, A.A. Bodrov, O.V. Ryzhenkov, A.A. Patakin, Ye.F. Chernov**, Intensifikatsiya teploobmennyykh protsessov v kondensatorakh parovykh turbin s ispolzovaniyem poverkhnostno aktivnykh veshchestv // *Teploenergetika*, № 11, 2014. S. 16–20.
- [17] **V.A. Ryzhenkov, A.S. Sedlov, A.V. Ryzhenkov**, O vozmozhnosti snizheniya gidravlicheskogo soprotivleniya truboprovodov sistem teplosnabzheniya // *Energoberezheniye i vodopodgotovka*, №5, 2007. S. 22–26.

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Artem V. RYZHENKOV** – *National Research University "Moscow Power Engineering Institute"*.  
E-mail: RyzhenkovAV@mpei.ru

**Alexander V. VOLKOV** – *National Research University "Moscow Power Engineering Institute"*.  
E-mail: VolkovAV@mpei.ru

**Evgeniy S. TRUSHIN** – *National Research University "Moscow Power Engineering Institute"*.  
E-mail: TrushinYS@mpei.ru

**Sergey P. CHEREPANOV** – *National Research University "Moscow Power Engineering Institute"*.  
E-mail: CherepanovSP@mpei.ru

Поступила: 03.10.2022; Одобрена: 25.10.2022; Принята: 08.11.2022.  
Submitted: 03.10.2022; Approved: 25.10.2022; Accepted: 08.11.2022.