

О МОДЕЛИРОВАНИИ ИЗМЕНЕНИЯ СМАЧИВАЕМОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ТЕКСТУРИРОВАНИИ РЕЛЬЕФА

А.В. Рыженков, М.Р. Дасаев, С.В. Григорьев, Е.С. Трушин

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

В последние годы со стороны исследователей возрос интерес к управлению смачиваемостью металлических поверхностей различными жидкостями в связи с широким спектром областей применения. В частности, применение гидрофобных функциональных поверхностей в теплоэнергетических установках и системах способствует повышению их эффективности и надежности. Несмотря на огромное количество существующих способов гидрофобизации металлических поверхностей, мировым научным сообществом был предложен и интенсивно развивается способ, основанный на текстурировании микро-/наномасштабного рельефа с использованием лазерного оборудования (лазерная абляция). В данной работе было проведено исследование по определению влияния модификации латунных поверхностей с использованием лазерного оборудования на геометрические параметры текстурируемого рельефа и свойства смачиваемости, на основе результатов которого была предложена математическая модель прогнозирования смачиваемости.

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

Введение

В течение последних нескольких десятилетий мировым научным сообществом активно развивалось направление, связанное с исследованиями свойств смачиваемости твердой поверхности и влияния степени смачиваемости на функциональные свойства поверхностей различных материалов.

Анализ научных публикаций в данной области показал, что интерес вызван тем, что гидрофобные поверхности обладают рядом уникальных характеристик, имеющих широкий спектр областей применения. Так, например, использование гидрофобных поверхностей способствует снижению гидравлического сопротивления при транспортировке жидких сред, снижению скорости льдообразования, интенсификации теплообменных процессов и другим положительным эффектам, в частности, гидрофобные функциональные поверхности обладают повышенной коррозионной стойкостью [1–10].

Для разработки технологических основ формирования текстурированного микро-/наномасштабного рельефа на функциональных поверхностях элементов теплоэнергетического оборудования требуется проведение исследований, включающих численное моделирование значений угла смачивания на примере лазерной поверхностной обработки латунных поверхностей.

Основные принципы и способы создания гидрофобных поверхностей

Согласно современной классификации по степени смачиваемости поверхностей принято

различать гидрофильные и гидрофобные поверхности. В качестве количественной меры степени смачиваемости поверхности принято использовать значение угла смачивания θ_0 (рис. 1). Так, если значение угла смачивания твердой поверхности находится в диапазоне от 0 до 90°, то для нее свойственно смачивание жидкостью, а сама поверхность называется гидрофильной. В противном случае, когда твердая поверхность не смачивается жидкостью, а значение угла смачивания определяется диапазоном от 90 до 180°, поверхность будет являться гидрофобной.

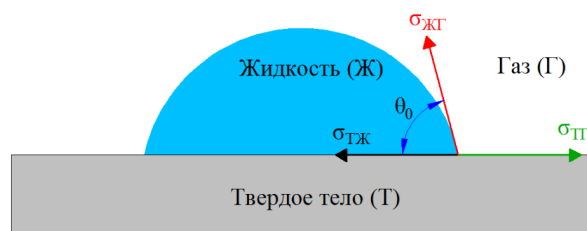


Рис. 1. Угол смачивания и силы поверхностного натяжения на границах раздела фаз:

σ_{TG} – удельная свободная поверхностная энергия твердого тела; σ_{JG} – поверхностное натяжение жидкости; σ_{TJ} – межфазное натяжение на границе «твердая поверхность – жидкость»; θ_0 – угол смачивания

Величина угла смачивания может быть оценена исходя из термодинамического положения о том, что в состоянии равновесия свободная энергия системы минимальна. Впервые такая система была рассмотрена Т. Юнгом в работе [11]. В ре-

зультате описания сил, действующих на каплю жидкости (см. рис. 1), было получено соотношение, именуемое уравнением Т. Юнга, использование которого позволяет рассчитать значение равновесного угла смачивания θ_0 твердой поверхности:

$$\cos \theta_0 = \frac{\sigma_{тг} - \sigma_{тж}}{\sigma_{жг}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{тг}$, $\sigma_{тж}$ и $\sigma_{жг}$ – соответственно поверхностные энергии на границе раздела фаз «твердое тело – газ», «твердое тело – жидкость» и «жидкость – газ».

Анализ соотношения (1) показывает, что увеличение значения угла смачивания может быть достигнуто посредством уменьшения значения поверхностной энергии $\sigma_{тг}$ на границе раздела фаз «твердое тело – газ». При этом достижение гидрофобного состояния поверхности возможно только в том случае, если значение поверхностной энергии $\sigma_{тг}$ будет меньшим по сравнению со значением $\sigma_{тж}$ на границе «твердое тело – жидкость». Следовательно, выполнение данного условия является ключевым для получения гидрофобной поверхности.

В результате проведения экспериментальных исследований, представленных в работах [12–14], было показано, что выполнение условия, выявленного ранее из уравнения Т. Юнга, не гарантирует получение высоких значений угла смачивания. Так, для гидрофобных поверхностей, созданных на основе изменения химического состава поверхностного слоя, максимальные значения угла смачивания принимали значения 118–120°. Это связано с тем, что уравнение Т. Юнга было получено при описании сил, действующих на каплю жидкости, в условиях идеальной поверхности (однородная, гладкая и химически инертная по отношению к жидкости), вследствие чего применение полученного соотношения затруднительно к неидеальной (реальной) поверхности.

В реальных условиях применяются материалы, поверхности которых обладают шероховатостью и являются неоднородными. Согласно результатам исследований, представленных в работах [15–17], было показано, что шероховатость поверхности оказывает существенное влияние на значение угла смачивания.

В настоящее время для достижения гидрофобных свойств поверхности используют множество методов, в том числе: электроосаждение наночастиц с последующей обработкой гидрофобными материалами [18], текстурирование поверхности с целью получения упорядоченного разномасштабного рельефа [19, 20], плазмохимическое осаждение из паровой фазы [21] и другие.

Наиболее перспективным методом формирования рельефа на металлической поверхности является текстурирование с применением лазерного оборудования, то есть лазерная абляция. Такой метод за счет гибкого варьирования параметров лазерного излучения позволяет с достаточной точностью контролировать геометрические характеристики формируемого рельефа.

Лазерная абляция – оптико-термический процесс воздействия лазерного излучения на поверхность, применимый к любому материалу, поглощающему свет. Процесс лазерной абляции с использованием ультракороткого импульсного лазера при определенной частоте импульсов позволяет достигнуть высокой точности обработки поверхностей. Вместе с тем применение короткоимпульсного лазера с нано- или микросекундной частотой пульсации обеспечивает высокую скорость процесса [22, 23].

Так, анализ исследований [24–27] показал, что с целью достижения гидрофобного состояния путем модификации металлических поверхностей за счет воздействия лазерного излучения угол смачивания на поверхностях достигал значений от 120 до 171°.

Изготовление и модификация поверхности экспериментальных образцов с использованием лазерного оборудования

В качестве исследуемого материала в настоящей работе использовалась латунь марки Л63 в виде плоских пластин размерами 20×35 и толщиной 1 мм. Перед лазерной обработкой поверхности всех экспериментальных образцов очищали с использованием ультразвуковой ванны в деионизированной воде и ацетоне в течение 30 мин.

Текстурирование различных структур рельефа на поверхности латуни производилось с использованием лазерного комплекса FMark-20 NS-FB. Данный лазерный комплекс основан на инфракрасном иттербиевом волоконном лазере с длиной волны 1064 нм. Мощность лазерного излучения при обработке поверхностей образцов варьировалась в диапазоне от 10 до 20 Вт с шагом 5 Вт, а скорость сканирования – в диапазоне от 100 до 500 мм/с с шагом 100 мм/с. Частота импульсов для всех образцов была постоянной и составляла 20 кГц. Все экспериментальные исследования проводились в помещении при комнатной температуре.

С целью достижения гидрофобного состояния латунных поверхностей была произведена их модификация с использованием лазерного оборудования путем текстурирования рельефа в виде равноудаленных на 100 мкм канавок (рис. 2).

В работах [25, 26] исследовали смачиваемость медных поверхностей, текстурированных с помощью лазерного оборудования. Модифицированные образцы в первый день проявляют гидрофильность, однако со временем угол смачивания увеличивается и через 10–15 дней достигает максимального значения. Такая конверсия смачиваемости объясняется сорбцией на обработанную поверхность органических соединений, вследствие чего происходит снижение поверхностной энергии.

В связи с этим в данной работе после модификации с использованием лазерного оборудования все образцы хранились на воздухе в течение 14 дней при стандартных атмосферных условиях.

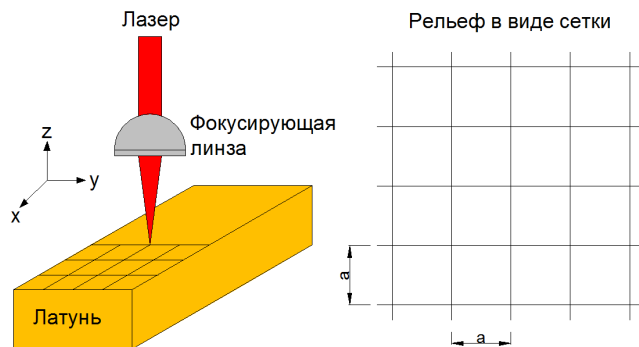


Рис. 2. Схематичное изображение траектории движения лазерного луча по поверхности

**Влияние лазерной обработки
на геометрические параметры
формируемого рельефа и степень
смачиваемости поверхности**

Топографию поверхности и шлифы экспериментальных образцов исследовали с использованием

сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3. В табл. 1 представлены изображения шлифов, из анализа которых следует, что варьирование параметров лазерного излучения оказывает влияние на геометрические параметры текстурируемого рельефа и, как следствие, на смачиваемость поверхности.

Таблица 1

Изображения шлифов модифицированных экспериментальных образцов

		Мощность лазерного излучения, Вт		
		11,2	16,8	22,4
Скорость сканирования, мм/с	100			
	200			
	300			
	400			
	500			

Значения угла смачивания латунных поверхностей, модифицированных с использованием лазерного оборудования, были измерены с использованием прибора ОСА 20, при этом на модифицированную поверхность были помещены капли дистиллированной воды объемом 5 мкл. С целью повышения точности результатов значения угла смачивания были измерены на трех различных модифицированных участках поверхности каждого экспериментального образца, при этом определялось среднее значение угла смачивания.

Базовая поверхность, в качестве которой использовалась латунная поверхность в исходном состоянии, проявляет гидрофильные свойства, а значение угла смачивания составляет $81,8^\circ$. В результате лазерного текстурирования латунных образцов все поверхности стали гидрофобными, а значение угла смачивания для всех модифицированных поверхностей составляло более 140° .

При этом максимальное значение угла смачивания, полученного при текстурировании рельефа в виде равноудаленных на 100 мкм канавок, составляет $149,2^\circ$ при скорости прохождения лазерного луча по поверхности 100 мм/с и мощности лазерного излучения 16,8 Вт.

Построение математической модели прогнозирования смачиваемости после лазерного текстурирования латунной поверхности

С целью изучения влияния рельефа, сформированного на металлических поверхностях конструктивных материалов с использованием лазерного оборудования, на свойства смачиваемости была создана модель в виде равноудаленных канавок с боковыми выступами над исходной поверхностью (рис. 3).

На рис. 3 отображены основные геометрические параметры рельефа разработанной модели,

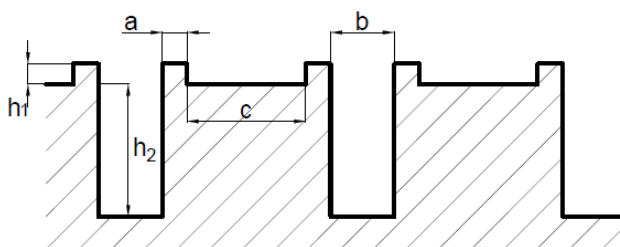


Рис. 3. Схематическое изображение модели текстурированного рельефа

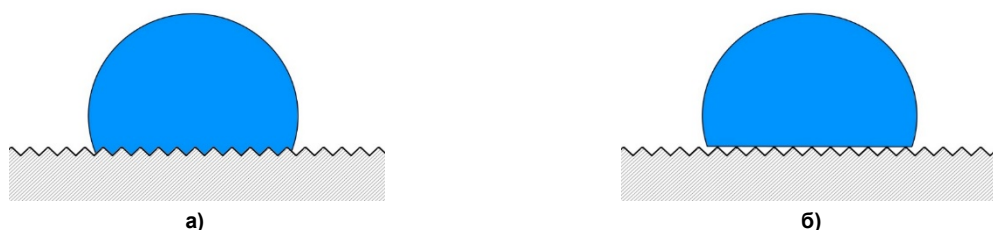


Рис. 4. Схематическое изображение гомогенного (а) и гетерогенного (б) режима смачивания на гидрофобной шероховатой поверхности

где a и h_1 – ширина и высота выступа, полученного вследствие напыла расплавленного металла, b и h_2 – ширина и высота канавки, образованной в результате воздействия лазерного излучения, c – ширина канала, образованного между боковыми выступами двух ближайших канавок.

В действительности на шероховатых поверхностях возможно становление следующих режимов смачивания:

- гомогенное смачивание (рис. 4а), при котором жидкость имеет контакт со всей поверхностью, в том числе заполняя все шероховатости на ней;

- гетерогенное смачивание (рис. 4б), когда жидкость контактирует только с выступами на поверхности, а в шероховатостях в виде пор и впадин остается воздух и нет контакта с жидкостью.

С целью определения количественной меры степени смачиваемости шероховатых поверхностей при гомогенном режиме применяется значение эффективного угла смачивания, для определения которого используется соотношение Венцеля, описанное в работе [17]:

$$\cos \theta = \frac{S}{S_0} \cos \theta_0 = r \cos \theta_0, \quad (2)$$

где $r = \frac{S}{S_0}$ – коэффициент шероховатости, равный отношению истинной площади поверхности S к кажущейся S_0 .

В противном случае, когда на поверхности реализуется гетерогенный режим смачивания, эффективный угол определяется из соотношения Касси – Бакстера, описанного в работе [16]:

$$\cos \theta = f \cos \theta_0 + f - 1, \quad (3)$$

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

Применение соотношений (2) и (3) для твердых поверхностей при различных режимах смачивания с целью определения значений углов воз-

можно лишь в том случае, если характерные геометрические параметры шероховатости значительно меньше диаметра контакта капли с поверхностью.

В соответствии с фактическим смачиванием модифицированной латунной поверхности в данной работе была создана модель смачивания, приведенная на рис. 5. Угол между линией раздела фаз «твердое тело – жидкость» и линией раздела фаз «жидкость – газ» является углом смачивания θ . Вместе с тем в модели отображены радиус r поверхности контакта капли с твердым телом и радиус R сферы капли, помещенной на поверхность.

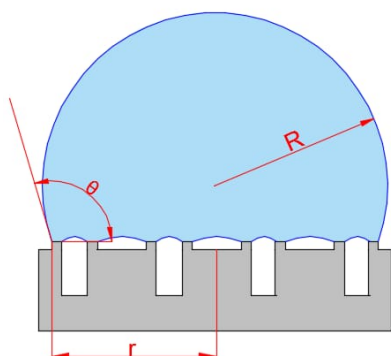


Рис. 5. Модель смачивания на текстурированном рельефе

Очевидно, что объем капли, помещенной на модифицированную латунную поверхность, остается неизменным и капля будет находиться в равновесии. Тогда состояние капли на поверхности можно описать следующими уравнениями:

$$dV = 0, \quad (4)$$

$$dG = \gamma_{тж} dS_{тж} + \gamma_{жг} dS_{жг} + \gamma_{тг} dS_{тг} = 0, \quad (5)$$

где dV – изменение объема капли, dG – измене-

ние поверхностной свободной энергии капли, $\gamma_{тж}$, $\gamma_{жг}$ и $\gamma_{тг}$ являются межфазной свободной энергией границ раздела «твердое тело – жидкость», «жидкость – газ» и «твердое тело – газ», соответственно. $S_{тж}$, $S_{жг}$ и $S_{тг}$ являются контактными площадями указанных трех фаз.

Анализ соотношений (1) и (5) показывает, что значения поверхностного напряжения и свободной энергии одинаковы:

$$\sigma = \gamma. \quad (6)$$

Как было указано ранее, когда капля располагается на поверхности материала, она находится в равновесии. Тогда в соответствии с рис. 5 и параметрами текстуры рельефа на рис. 3 площадь поверхности контакта капли жидкости с твердым телом $S_{тж}$ составляет:

$$S_{тж} = \frac{\pi r^2}{(2r)^2} \cdot \frac{2r}{a} \cdot \frac{2 \cdot 2r}{2a+b+c} \cdot a^2 = \frac{2a\pi r^2}{2a+b+c}. \quad (7)$$

Фактическая площадь текстурированной поверхности определяется следующим выражением:

$$S = \frac{2a\pi r^2}{2a+b+c} + \frac{b\pi r^2}{2a+b+c} + \frac{c\pi r^2}{2a+b+c} + \frac{4h_1\pi r^2}{2a+b+c} + \frac{2h_2\pi r^2}{2a+b+c} = \frac{\pi r^2 \cdot (2a+b+c+4h_1+2h_2)}{2a+b+c}. \quad (8)$$

Тогда, подставив выражения (7) и (8), определяющие смоченную и фактическую площадь текстурированной с использованием лазерного оборудования поверхности, в уравнение Касси – Бакстера (3), получим следующее соотношение:

$$\cos \theta = \frac{2a}{2a+b+c+4h_1+2h_2} (\cos \theta_0 + 1) - 1. \quad (9)$$

Таким образом, использование уравнения (9) позволяет вычислить значение угла смачивания для разработанной модели текстурированного лазерным излучением рельефа.

Как было указано ранее, варьирование параметров лазерного излучения при модификации латунной поверхности оказывает влияние на раз-

Таблица 2

Геометрические параметры текстурированного рельефа

№ п/п	Мощность лазерного излучения, Вт	Частота лазерного излучения, Гц	Скорость сканирования, мм/с	Геометрический параметр, мкм				
				a	b	c	h ₁	h ₂
1	11,2	20000	100	13,6	31,2	37,6	6,5	18,7
2			200	7,2	37,7	50,9	2,0	9,2
3			300	4,6	39,5	48,7	2,4	6,6
4			400	5,7	42,3	49,4	2,4	5,8
5			500	5,6	31,3	56,5	2,9	5,4
6	16,8	20000	100	21,2	43,8	16,4	10,9	30,0
7			200	8,1	46,0	36,5	2,9	14,8
8			300	9,7	45,4	30,7	2,6	9,6
9			400	9,2	46,7	34,6	2,9	7,2
10			500	11,3	42,6	38,8	2,0	6,8
11	22,4	20000	100	27,8	44,7	8,4	10,6	35,9
12			200	13,6	52,0	19,9	4,7	17,7
13			300	11,8	54,2	21,1	3,1	13,8
14			400	8,4	56,9	33,6	2,0	10,0
15			500	7,5	52,5	27,1	2,3	8,0

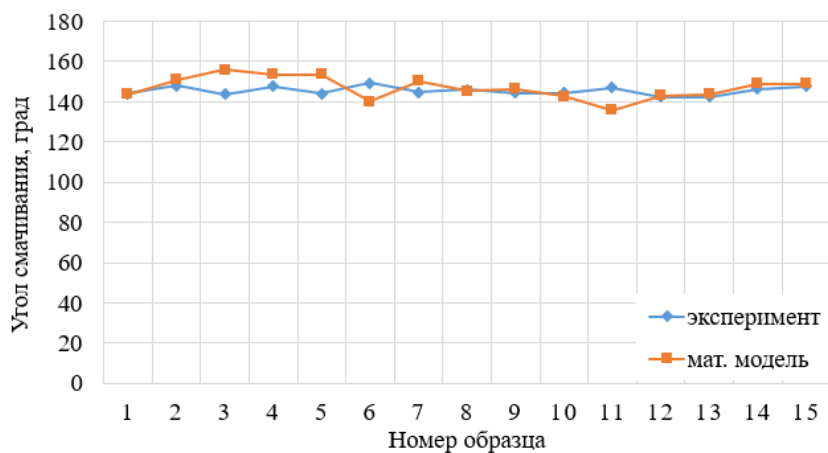


Рис. 6. Кривые значений угла смачивания, полученные путем измерений на экспериментальных образцах и расчета математической модели

мер геометрических параметров формируемого рельефа и, как следствие, на степень смачиваемости. С целью верификации разработанной модели, с использованием которой появляется возможность прогнозировать значение угла смачивания или, наоборот, определять необходимые геометрические параметры для достижения максимального значения угла смачивания поверхности, были измерены основные геометрические параметры текстурированного рельефа на поверхностях экспериментальных образцов, представленных в табл. 1 (табл. 2).

С использованием уравнения (9) был произведен расчет значений угла смачивания по геометрическим параметрам, представленным в табл. 2.

На рис. 6 представлен график с теоретической и экспериментальной кривыми, построенными по значениям, полученным в результате расчета разработанной математической модели, и значениям, измеренным на модифицированных с использованием лазерного оборудования латунных поверхностях, соответственно.

Таким образом, из рис. 6 видно, что разработанная математическая модель прогнозирования смачиваемости латунных поверхностей с текстурированным лазерным излучением рельефом в виде равноудаленных на 100 мкм канавок с достаточной точностью совпадает со значениями, полученными в результате измерений на модифицированных поверхностях.

Выводы

Определены параметры лазерного излучения, при которых на латунной поверхности достигается максимальное значение угла смачивания $149,2^\circ$, получаемого при текстурировании рельефа в виде равноудаленных на 100 мкм канавок: мощность лазерного излучения – 16,8 Вт, скорость прохождения лазерного луча по поверхности – 100 мм/с и частота импульсов – 20 кГц.

Разработана модель изменения смачиваемости поверхности на основе текстурирования разномасштабного рельефа в виде сетки с равноудаленными на 100 мкм канавками с использованием лазерного излучения, которая позволяет прогнозировать значения угла смачивания при известных значениях основных геометрических параметров рельефа или, наоборот, определять значения геометрических параметров с целью достижения требуемого значения угла смачиваемости.

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

Литература/References

1. Rizhenkov A.V. About reducing the hydraulic resistance of pipeline during the oil flow. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2015, vol. 11, pp. 136–139.
2. Pakzad H., Liravi M., Moosavi A., Nouri-Borujerdi A., Najafkhani H. Fabrication of durable superhydrophobic surfaces using PDMS and beeswax for drag reduction of internal turbulent flow. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 513, p. 145754. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.145754
3. Piccolo A., Jaworski A.J. Experimental study of heat transfer characteristics of finned-tube and circular-pore heat exchangers in oscillatory flow. *Applied Thermal Engineering*, 2020, p. 116022. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116022
4. Ryzhenkov O.V., Kurshakov A.V., Ryzhenkov 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.

5. Bertsche D., Knipper P., Kapfer K., Wetzel T. Experimental investigation on heat transfer in laminar, transitional and turbulent circular pipe flow with respect to flow regime boundaries. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 145, p. 118746. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118746
6. Peng Q., Jia L., Ding Y., Dang C., Yin L., Yan X. Influence of groove orientation on dropwise condensation on hydrophobic and hierarchical superhydrophobic surfaces with microgroove arrays. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 112, p. 104492. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104492
7. Misyura S.Y. Heat Transfer and Convection of Evaporating Sessile Droplets in Transition from Superhydrophilic to Superhydrophobic Structured Wall: Optimization of Functional Properties. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 112, p. 104474.
8. Samanta A., Wang Q., Shaw Scott K., Ding H. Roles of chemistry modification for laser textured metal alloys to achieve extreme surface wetting behaviors. *Materials and Design*, 2020, p. 108744. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108744
9. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Modestov A.D., Domantovsky A.G., Shiryayev A.A., Emelyanenko K.A., Dvoretzkaya O.V., Ganne A.A. Corrosion Behavior of Superhydrophobic Aluminum Alloy in Concentrated Potassium Halide Solutions: When the Specific Anion Effect Is Manifested. *Corrosion Science*, 2016, vol. 112, pp. 517–527. DOI: 10.1016/j.corsci.2016.08.019
10. Kotenko M., Oskarsson H., Bojesen C., Nielsen M.P. An experimental study of the drag reducing surfactant for district heating and cooling. *Energy*, 2019, vol. 178, pp. 72–78. DOI: 10.1016/j.energy.2019.03.134
11. Young T. An Essay on the Cohesion of Fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1805, vol. 95, pp. 65–87. DOI: 10.1098/rstl.1805.0005
12. Chen W., Fadeev A., Hsieh M., Oner D., Youngblood J., McCarthy T.J. Ultrahydrophobic and ultralyophobic surfaces: some comments and examples. *Langmuir*, 1999, vol. 15, pp. 3395–3399.
13. Woodward I., Schofield W.C.E., Roucoules V., Badyal J.P.S. Super-hydrophobic Surfaces Produced by Plasma Fluorination of Polybutadiene Films. *Langmuir*, 2003, vol. 19, pp. 3432–3438.
14. Tserepi A., Gogolides E., Tsougeni K., Constantoudis V., Valamontes E. Tailoring the surface topography and wetting properties of oxygen-plasma treated polydimethylsiloxane. *J. Appl. Phys*, 2005, vol. 98, p. 113502. DOI: /10.1063/1.2136421
15. Cassie A.B.D. Contact angle. *Discussions of the Faraday Society*, 1948, vol. 3, p. 11.
16. Cassie A.B.D., Baxter S. Wettability of porous surfaces. *Trans. Faraday Soc.*, 1944, vol. 40, pp. 546–551.
17. Wenzel R. Resistance of Solid Surfaces To Wetting By Water. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1936, vol. 28, pp. 988–994.
18. Li S., Liu Y., Tian Z., Liu X., Han Z., Ren L. Biomimetic superhydrophobic and antibacterial stainless-steel mesh via double-potentiostatic electrodeposition and modification. *Surface and Coatings Technology*, 2020, p. 126355. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126355
19. Liu B., Wang W., Jiang G., Mei X., Wang Z., Wang K., Cui J. Study on hierarchical structured PDMS for surface super-hydrophobicity using imprinting with ultrafast laser structured models. *Applied Surface Science*, 2016, vol. 364, pp. 528–538. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.12.190
20. Ryzhenkov A.V., Dasaev M.R., Grigoriev S.V., Kurshakov A.V., Ryzhenkov O.V., Lukin M.V. Hydrophobic brass surfaces created by means of multi-scale relief. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, vol. 9, pp. 58–70.
21. Kuzminova A., Shelemin A., Kylián O., Petr M., Kratochvíl J., Solař P., Biederman H. From superhydrophilic to super-hydrophobic surfaces using plasma polymerization combined with gas aggregation source of nanoparticles. *Vacuum*, 2014, vol. 110, pp. 58–61. DOI: 10.1016/j.vacuum.2014.08.014
22. Rafieezad M., Jaffer J.A., Cui C., Duan X., Nasiri A. Nanosecond Laser Fabrication of Hydrophobic Stainless Steel Surfaces: The Impact on Microstructure and Corrosion Resistance. *Materials* (Basel, Switzerland), Sep. 2018, vol. 11, pp. 1577–1591.
23. Yang Z., Liu X., Tian Y. Novel Metal-organic Super-hydrophobic Surface Fabricated by Nanosecond Laser Irradiation in Solution. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, vol. 587, p. 124343. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.124343
24. Yang Z., Liu X., Tian Y. Novel metal-organic superhydrophobic surface fabricated by nanosecond laser irradiation in solution. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, vol. 587. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.124343
25. Won S.J., Kim H.S. Effects of laser parameters on morphological change and surface properties of aluminum alloy in masked laser surface texturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 48, pp. 260–269.
26. Shirsath G.B., Muralidhar K., Pala R.G.S., Ramkumar J. Condensation of water vapor underneath an inclined hydrophobic textured surface machined by laser and electric discharge. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 484, pp. 999–1009.
27. Ngo C.-V., Chun D.-M. Fast wettability transition from hydrophobic to superhydrophobic laser-textured stainless steel surfaces under low-temperature annealing. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 409, pp. 232–240. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.03.038

Рыженков Артем Вячеславович, д-р техн. наук, директор центра, НИО «Научный центр повышения износостойкости энергетического оборудования электрических станций», Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва; RyzhenkovAV@mpei.ru.

Дасаев Марат Равилевич, младший научный сотрудник, НИО «Научный центр повышения износостойкости энергетического оборудования электрических станций», Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва; DasayevMR@mpei.ru.

Григорьев Сергей Владимирович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НИО «Научный центр повышения износостойкости энергетического оборудования электрических станций», Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва; GrigoryevSVI@mpei.ru.

Трушин Евгений Сергеевич, инженер, НИО «Научный центр повышения износостойкости энергетического оборудования электрических станций», Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва; TrushinYS@mpei.ru.

Поступила в редакцию 22 сентября 2021 г.

DOI: 10.14529/power210402

ON MODELING THE CHANGE IN WETTABILITY OF A METAL SURFACE DURING LASER TEXTURING OF THE RELIEF

A.V. Ryzhenkov, RyzhenkovAV@mpei.ru,

M.R. Dasaev, DasayevMR@mpei.ru,

S.V. Grigorev, GrigoryevSVI@mpei.ru,

E.S. Trushin, TrushinYS@mpei.ru

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

Over the recent years the researchers' interest in the control of the wettability of metal surfaces with various liquids has increased due to a wide range of applications. In particular, the use of hydrophobic functional surfaces in thermal power plants and systems contributes to an increase in their efficiency and reliability. Despite the huge number of existing methods of hydrophobization of metal surfaces, the world scientific community has proposed and is intensively developing a method based on texturing micro-/nano-scale relief using laser equipment (laser ablation). The paper presents a study carried out to determine the effect of modification of brass surfaces using laser equipment on the geometric parameters of the textured relief and the properties of wettability, based on the results of which a mathematical model for predicting wettability was proposed.

Keywords: energy efficiency, hydrophobicity, contact angle, laser radiation, relief.

The research was conducted at the National Research University “Moscow Power Engineering Institute” with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the state assignment No. FSWF-2020-0021 on the topic of “Development of scientific and technical bases for the heat transfer enhancement at condensation, and improvement of thermo-hydrodynamic characteristics and wear resistance of power equipment based on a modification of functional surfaces”.

Received 22 September 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

О моделировании изменения смачиваемости металлической поверхности при лазерном текстуровании рельефа / А.В. Рыженков, М.Р. Дасаев, С.В. Григорьев, Е.С. Трушин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 13–20. DOI: 10.14529/power210402

FOR CITATION

Ryzhenkov A.V., Dasaev M.R., Grigorev S.V., Trushin E.S. On Modeling the Change in Wettability of a Metal Surface during Laser Texturing of the Relief. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 13–20. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210402
