

Анастасия Гомильевна ИСЛАМОВА<sup>1</sup>  
Дмитрий Владимирович ФЕОКТИСТОВ<sup>2</sup>  
Евгения Георгиевна ОРЛОВА<sup>3</sup>

УДК 532.64

## ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ПОВЕРХНОСТНУЮ ЭНЕРГИЮ И СМАЧИВАЕМОСТЬ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕДИ И СТАЛИ\*

<sup>1</sup> аспирант, Научно-образовательный центр И. Н. Бутакова,  
Инженерная школа энергетика,  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
agi2@tpu.ru; ORCID: 0000-0001-7350-8102

<sup>2</sup> кандидат технических наук, доцент,  
Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов,  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
fdv@tpu.ru

<sup>3</sup> кандидат физико-математических наук, старший преподаватель,  
Научно-образовательный центр И. Н. Бутакова, Инженерная школа энергетика,  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
lafleur@tpu.ru

### Аннотация

Работа направлена на решение фундаментальной проблемы теплофизики — управление малыми объемами жидкостей на поверхностях теплообмена специального типа аппаратов (например, термосифонов и тепловых труб), работающих по замкнутому испарительно-конденсационному циклу. Целью работы являлся анализ влияния шероховатости на поверхностную энергию и смачиваемость при варьировании текстур типичных поверхностей теплообмена, изготовленных из меди и стали, подготовленных к эксплуатации механической (абразивной) обработкой.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-38-90136).

**Цитирование:** Исламова А. Г. Влияние шероховатости на поверхностную энергию и смачиваемость поверхностей меди и стали / А. Г. Исламова, Д. В. Феоктистов, Е. Г. Орлова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Том 7. № 1 (25). С. 60-78.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-60-78

Сформировано по шесть текстур на поверхностях меди и стали с использованием шлифовально-полировального станка. Оценка шероховатости текстур выполнена по результатам анализа трехмерных характеристик шероховатости (высотных и гибридных). Экспериментальные исследования свойств смачиваемости поверхностей проведены на установке с использованием теневого метода. Свободная поверхностная энергия абразивно-обработанных поверхностей определена методом гармонического среднего Оунса — Вендта — Рабеля — Кьельбле.

Показано, что для оценки текстур необходимо использовать не менее одной трехмерной высотной и гибридной характеристики. Определены условия образования текстур гауссовой и синусоидальной формы. Установлено, что значительный прирост площади поверхности осуществляется при обработке меди (до 7%) и стали (до 2,7%) дисками со средним размером зерна до 100 мкм. Показано, что в результате абразивной обработки поверхностей меди и стали в их полной поверхностной энергии изменяется доля полярной составляющей. Последнее является следствием изменения дипольных взаимодействий и водородных связей между атомами.

#### **Ключевые слова**

Смачивание, капля, подложка, абразивная обработка, размер зерна, трехмерные характеристики шероховатости, поверхностная энергия.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-60-78**

#### **Введение**

Смачивание и процесс растекания малых объемов жидкости по молекулярно-гладким поверхностям с однородным химическим составом достаточно хорошо изучены [16, 18, 21]. Типичные технологические поверхности промышленного теплоэнергетического и химического оборудования, например, тепловые трубы, термосифоны, контактные устройства ректификационных колонн, скрубберы (устройства для механической и химической очистки газовоздушных сред) покрыты многочисленными углублениями и выступами различной формы и размеров. Такие углубления и выступы оказывают значительное влияние на смачивание и процесс растекания капель и пленок теплоносителей по металлическим поверхностям [5]. Оценка шероховатости поверхностей проводится на основе анализа двумерных или трехмерных характеристик шероховатости [3, 14], полученных методами контактной [3] или оптической профилометрии [14, 2].

Так, например, в [7] шероховатость поверхности полимерных материалов после обработки абразивной бумагой с размером зерна S1000, S180 и S80 аппроксимирована двумерной характеристикой среднего арифметического отклонения профиля (Ra). Установлено [7], что абразивная обработка поверхности слабо влияет на смачиваемость и адгезионные свойства полимеров. Но обработка таким методом материалов с высокой поверхностной энергией (например, металлов) значительно изменяет их свойства смачивания [9].

По результатам анализа двумерных характеристик Ra и Rmr (отношение материалов профиля) в условиях однонаправленной обработки абразивным потоком воды поверхностей стали (SS316L) и титана (Ti-6Al-4V) проведена оценка [12] влияния числа циклов обработки (от трех до девяти) и давления потока (от 40 до 60 бар) на шероховатость. Показано [12], что свойства смачивания и поверхностная энергия поверхностей стали и титана зависят от шероховатости и ее топографии. Например, шероховатость поверхности стали SS316L после девяти циклов абразивной обработки потоком при давлении 60 бар уменьшилась с 350 до 114 нм, свойства смачиваемости улучшились (контактные углы уменьшились с 103,6 до 89,5°) [12].

Исследовано [11] влияние абразивной обработки бумагой P80, P400, P600, P2500 на модификацию текстуры поверхностей алюминия, титана, стали, меди, керамики и полиметилметакрилата. Показано [11], что с увеличением K<sub>г</sub> (средний наклон шероховатости) контактный угол сначала уменьшается, а затем растет [11]. Сформулирована [11] гипотеза о том, что если расстояние между двумя соседними пиками рельефа шероховатости мало, а высота этих пиков намного больше этого расстояния, то элементы шероховатости формируют капилляр на поверхности, который из-за капиллярного явления лучше смачивается.

По результатам анализа [2, 3, 7, 14] установлено, что абразивная обработка изменяет текстуру приповерхностного слоя металлов и их сплавов, а также их поверхностную энергию и свойства смачиваемости. Для характеристики текстуры наиболее часто используются профильные двумерные характеристики (Ra [7, 12], Rmr [11, 12], K<sub>г</sub> [11]). Такая оценка шероховатости поверхности сопряжена с возможными ошибками, обусловленными тем, что двумерные характеристики шероховатости основаны на вычислении статистик профиля поверхности относительно средней линии, принимаемой в пределах базовой длины [6]. Особо грубые ошибки в определении шероховатости поверхности, например, средним арифметическим отклонением профиля (Ra), возникают при характеристике упорядоченных текстур в виде совокупности элементов текстуры правильной геометрической формы (например, кратеров, параллелепипедов). Характеристика среднего арифметического отклонения профиля чувствительна к появлению пиков и впадин, неустойчива и характеризуется большим разбросом, плохо подходит для оценки шероховатости поверхности [6]. Решением этой проблемы является использование группы трехмерных характеристик шероховатости из набора, предложенных в [11, 13]. Однако таких исследований недостаточно для разработки прогностической модели для оценки изменения текстуры, поверхностной энергии и свойств смачиваемости поверхностей металлов после абразивной обработки. Известно только [11, 12], что трехмерные характеристики шероховатости оценивают «энергетические барьеры» (высота пиков и расстояние между ними), которые преодолевает жидкость при смачивании и растекании.

Целью работы является определение свойств смачиваемости, поверхностной энергии и ее составляющих после механической (абразивной) обработки типичных технологических поверхностей промышленного теплоэнергетического и химического оборудования из меди и стали, на которых растекается жидкость.

## Методы

На поверхностях образцов из стали и меди сформировано по шесть текстур абразивной обработкой с использованием шлифовально-полировального станка FORCIPOL 1V с автоматическим головным устройством FORCIMAT.

Хромоникелетитановая аустенитная сталь 12X18H10T (Cr 17,0-19,0%, Ni 9,0-11,0%, Ti до 0,8%, Si до 0,8%, S до 0,02%, Mn до 2,0%, Cu до 0,3%, P до 0,035%, C до 0,12%, остальное Fe) широко используется в теплоэнергетической и химической отраслях. Характеризуется высокой коррозионной стойкостью в жидких агрессивных средах, устойчива против межкристаллитной коррозии после сварочного нагрева, мало охрупчивается в результате длительного воздействия высоких температур. Медь марки М1 (Cu — 99,9%, остальное — Fe, Ni, S, As, Pb, Zn, O, Sb, Bi, Sn) широко используется в качестве конструкционного материала систем охлаждения теплонагруженного оборудования на базе термосифонов и тепловых труб. В целом медь характеризуется высокой теплопроводностью, хорошей коррозионной стойкостью и антибактериальными свойствами.

Перед обработкой образцы полировались алмазными пастами в последовательности АСМ 40/28 НОМ — АСМ 14/10 НОМ — АСМ 5/3 НВОМ — АСМ 1/0 НВОМ и абразивным войлочным кругом до зеркального блеска. В таблице 1 приведены значения среднего размера зерна ( $\eta$ ) абразивных дисков. С помощью станка FORCIPOL 1V во время абразивной обработки контролировалось сила давления на образец 10 Н, скорость вращения 100 об/мин, время обработки 2 мин. Полученные образцы условно обозначены как М<sub>1...269</sub>, Ст<sub>1...269</sub>, где М — поверхность меди, Ст — поверхность стали, индекс 1...269 указывает на средний размер зерна абразивных дисков, использовавшихся при обработке поверхностей.

Текстура формировалась на подложках, изготовленных в форме прямоугольного параллелепипеда высотой 28 мм, шириной 28 мм и толщиной 3 мм.

Микрорельеф образцов регистрировался методом оптической профилометрии с помощью комплекса Micro Measure 3D Station. Сканирование поверхностей проводилось на трех различных участках одинаковой площади 450x300 мкм. Чувствительность датчика составляла 1 нм. Погрешность измерений не превышала 3%. Трехмерные изображения профилей поверхностей получены с применением фильтра Гаусса 0,008 мкм. Количественная оценка геометрических свойств приповерхностных слоев выполнена на базе трехмерных характеристик шероховатости: высоты (Sa, Sq, Sz, Sku, Ssk), гибридных характеристик (Sdq, Sdr).

Таблица 1

Средний размер зерна абразивных дисков

Table 1

Average grit size of abrasive discs

Маркировка материала	Паста АСМ 1/0 НВОМ	Диск P800	Диск P320	Диск P150	Диск P100	Диск P60
Средний размер зерна, мкм	меньше 1	22	46	100	160	269

Определение свойств смачиваемости поверхностей меди и стали с текстурой, образованной абразивной обработкой, проведены на установке (рис. 1) с использованием оборудования оптического теневого метода. Суть последнего заключается в определении геометрических характеристик капли (контактного угла ( $\theta$ ), контактного диаметра ( $d$ ), высоты ( $h$ ), объема ( $V$ )) по теневым изображениям, обработанным методами гониометрии.

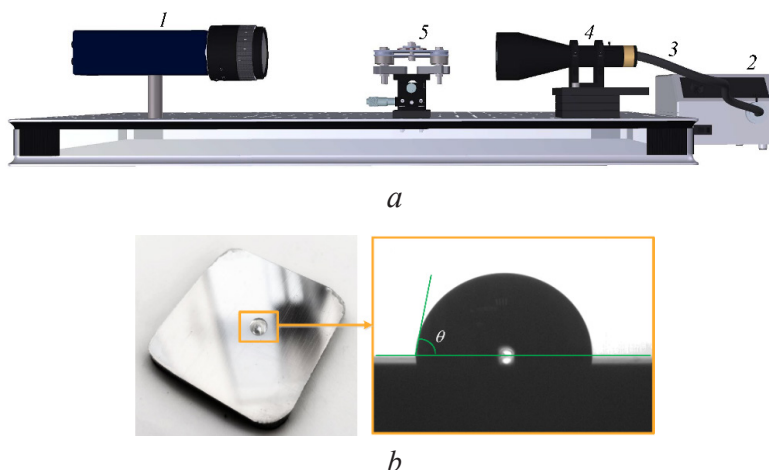


Рис. 1. Установка для определения свойств смачиваемости (а):  
1 — высокоскоростная камера,  
2 — источник света,  
3 — волоконно-оптический кабель,  
4 — телецентрическая труба,  
5 — образец; типичные фотоизображения подложки и капли (b)

Fig. 1. The experimental setup for determining the wettability properties (a): 1 — a high-speed camera, 2 — a light source, 3 — a fiberglass optical cable, 4 — a telecentric tube, 5 — a sample; typical photo images of a substrate and a droplet (b)

Принцип работы оптической теневой системы заключается в освещении капли жидкости, помещенной на поверхность образца, плоскопараллельным светом и получении ее фотоизображения высокоскоростной видеокамерой 1. Свет генерируется с помощью источника 2, проходит по волоконно-оптическому кабелю 3 и телецентрической трубе 4, освещает каплю на образце 5.

Смачиваемость поверхностей характеризовалась статическим контактным углом, который измерялся в условиях дозирования капли дистиллированной воды объемом 10 мкл на образец 5 в произвольно выбранную точку электронным одноканальным дозатором «Ленпипет Степпер». Статические контактные углы в равновесном состоянии измеряли через 20 с после дозирования, согласно рекомендациям [11]. Теневые изображения капель обрабатывались методом гониометрии Юнга — Лапласа [19]. Погрешность измерения контактных углов оценена по методике, приведенной в [15], и не превышала 5%.

Одной из основных характеристик поверхностных свойств материала является свободная поверхностная энергия (СПЭ) [20]. Для поверхностей меди и стали СПЭ определена методом гармонического среднего (Оунса — Вендта — Рабеля — Кьельбле (ОВРК)).

Метод ОВРК базируется на методе Фоукса, но учитывает эффекты полярных связей в выражении межфазного натяжения с применением правила среднего геометрического для всех членов (уравнение 1). Метод позволяет проводить анализ свойств смачиваемости поверхности в условиях растекания жидкости с неизвестным поверхностным натяжением по значению статического контактного угла.

Межфазное натяжение «твердое тело — жидкость» определяется как [17]:

$$\gamma_{SL} = \gamma_L + \gamma_S - 2 \cdot \left( \sqrt{\gamma_S^p \cdot \gamma_L^p} + \sqrt{\gamma_S^d \cdot \gamma_L^d} \right), \quad (1)$$

где  $\gamma_L, \gamma_S$  — поверхностное натяжение жидкости и поверхностная энергия твердого тела;  $\gamma_S^p, \gamma_S^d$  и  $\gamma_L^p, \gamma_L^d$  — полярные и дисперсные составляющие поверхностной энергии твердого тела и поверхностного натяжения жидкости соответственно.

Используя уравнение Юнга для поверхностной энергии тела  $\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L \cdot \cos\theta$ , уравнение (1) преобразовано [17] к виду:

$$(1 + \cos\theta) \cdot \gamma_L = 2 \cdot \left( \sqrt{\gamma_S^p \cdot \gamma_L^p} + \sqrt{\gamma_S^d \cdot \gamma_L^d} \right). \quad (2)$$

Уравнение (2) преобразовано к виду:

$$\frac{(1 + \cos\theta) \cdot \gamma_L}{2 \cdot \sqrt{\gamma_L^d}} = \frac{\sqrt{\gamma_S^p \cdot \gamma_L^p}}{\sqrt{\gamma_L^d}} + \sqrt{\gamma_S^d}. \quad (3)$$

В уравнении (3) две неизвестные величины ( $\gamma_S^p, \gamma_S^d$ ). Статические контактные углы  $\theta$  полярной (воды) и дисперсной (дийодметана) жидкостей определены экспериментально (таблица 2).

Используя жидкости (дийодметан и дистиллированную воду) с известными полярными и дисперсными компонентами поверхностного натяжения [17], определяются значения  $\sqrt{\gamma_L^p} / \sqrt{\gamma_L^d}$  и  $((1 + \cos\theta) \cdot \gamma_L) / (2 \cdot \sqrt{\gamma_L^d})$ . После этого строится зависимость  $\left( \frac{(1 + \cos\theta) \cdot \gamma_L}{2 \cdot \sqrt{\gamma_L^d}} \right) = f \left( \frac{\sqrt{\gamma_L^p}}{\sqrt{\gamma_L^d}} \right)$  (рис. 2).

На зависимости рис. 2 точка *A* соответствует дийодметану, точка *B* дистиллированной воде. Через точки *A* и *B* проводится прямая до пересечения с осью ординат. Дисперсная компонента СПЭ определяется как квадрат значения величины  $((1 + \cos\theta) \cdot \gamma_L) / (2 \cdot \sqrt{\gamma_L^d})$  в точке пресечения оси ординат с прямой *AB* (точка *C*, рис. 2). Полярная составляющая определяется как квадрат тангенса угла  $\alpha$  (рис. 2) наклона прямой *AB*.

Погрешность определения поверхностной энергии, оцененная по методике [17], не превышала 7%.

Таблица 2

Статические контактные углы дийодметана и дистиллированной воды на абразивно обработанных поверхностях меди и стали

Поверхность меди	$M_1$	$M_{22}$	$M_{46}$	$M_{100}$	$M_{160}$	$M_{269}$
Дийодметан $\theta_\theta, ^\circ$	61,6	62,5	61,6	55,0	61,2	56,1
Дистиллированная вода $\theta_\theta, ^\circ$	66,5	81,8	92,8	98,1	104,2	108,2
Поверхность стали	$C_{T_1}$	$C_{T_{22}}$	$C_{T_{46}}$	$C_{T_{100}}$	$C_{T_{160}}$	$C_{T_{269}}$
Дийодметан $\theta_\theta, ^\circ$	59,6	58,9	57,9	59,7	59,2	58,3
Дистиллированная вода $\theta_\theta, ^\circ$	89,1	73,1	71,6	82,8	85,1	89,5

Table 2

Static contact angles of diiodomethane and distilled water on abrasively processed copper and steel surfaces

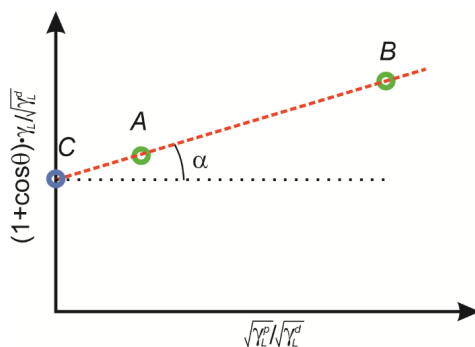


Рис. 2. Графическое определение полярной и дисперсной составляющих поверхностной энергии твердого тела [17]

Fig. 2. The graphical determination of polar and dispersive components of the surface energy of a solid [17]

### Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены определенные в экспериментах трехмерные характеристики высоты ( $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$ ) поверхностей меди и стали от среднего размера зерна типичных абразивных дисков (таблица 1).

Зависимости  $S_q = f(\eta)$ ,  $S_z = f(\eta)$  и  $S_a = f(\eta)$  (рис. 3) для поверхностей меди и стали имеют схожий вид — описываются зависимостью  $y = ax^b$ . В таблице 3 приведены значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , зависящих от механических свойств металла. Из таблицы 3 видно, что коэффициенты  $b$  для меди и стали отличаются более чем на 27%. Можно сделать вывод о том, что при абразивной обработке металлов с различными механическими свойствами, увеличение размера зерна абразивных дисков в условиях контроля нагрузки на диск, времени обработки и скорости вращения, приводит к разной степени деформации и среза металла. В результате на поверхности металлов образуется уникальная текстура для заданных условий абразивной обработки.



Характеристика Sa описывает только среднюю амплитуду шероховатости и не учитывает отличия между выступами и впадинами, а также их наибольшие значения. Но без учета дополнительных характеристик Sa не может быть использована для анализа функциональных свойств поверхностей, в частности, для оценки влияния шероховатости на свойства смачиваемости, характеристик растекания и испарения малых объемов жидкостей. Характеристика среднего квадратичного отклонения (Sq) является альтернативой Sa, которая описывает среднеквадратичное отклонение распределения высот выступов, но не содержит информации о впадинах и не учитывает пики выступов. По этой причине дополнительно проанализированы такие высотные характеристики, как Sz, Ssk и Sku.

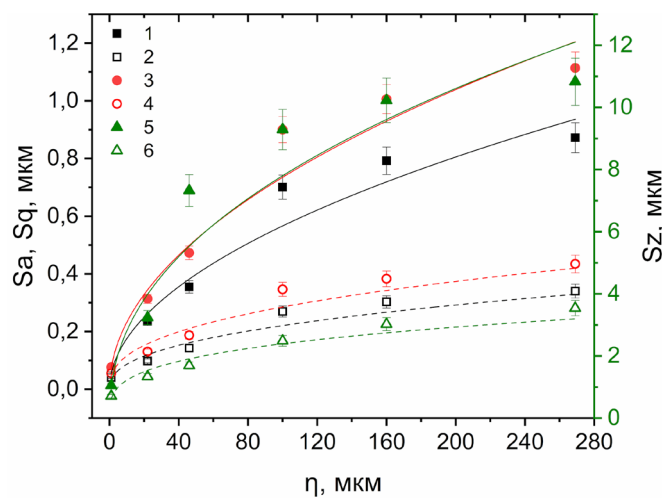


Рис. 3. Зависимости основных характеристик высоты (1, 2 — Sa; 3, 4 — Sq; 5, 6 — Sz) от среднего размера зерна абразивных дисков. Поверхности: 1, 3, 5 — медь; 2, 4, 6 — сталь

Fig. 3. The dependencies of the main amplitude characteristics (1, 2 — Sa; 3, 4 — Sq; 5, 6 — Sz) on the average grit size of the abrasive discs. Substrates: 1, 3, 5 — copper; 2, 4, 6 — steel

Таблица 3

Эмпирические коэффициенты уравнения  $y = ax^b$

Table 3

The empirical coefficients in the equation  $y = ax^b$

Трехмерные характеристики шероховатости	Поверхность меди		Поверхность стали	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Sa (μm)	0,051	0,522	0,032	0,410
Sq (μm)	0,069	0,514	0,044	0,398
Sz (μm)	0,949	0,462	0,579	0,307



Характеристика Sz дает возможность оценивать высоту выступов и глубину впадин, образующих шероховатости на поверхности. Из рис. 3 видно, что при одних и тех же условиях обработки на поверхности меди в сравнении с поверхностью стали образуется шероховатость, соответствующая большим значениям Sa, Sq, Sz. По результатам экспериментального определения твердости по методу Виккерса установлено, что образцы стали характеризуются числом твердости  $174,2 \pm 6,1$  HV, что в 1,7 раза больше твердости меди  $105,1 \pm 2,9$  HV. При абразивной обработке меди из-за низкой твердости увеличивается глубина внедрения абразивных зерен, а также высота вытесненного металла. По этой причине при обработке поверхностей меди дисками со средним размером зерна до 22 мкм величины Sa, Sq, Sz в 1,5-2,5 раза больше характеристик стали. При обработке со средним размером зерна от 22 мкм до 269 мкм Sa, Sq для меди в 2,5-3 раза больше характеристик стали, а величина Sz в 3-4,7 раза больше. Таким образом, значительный рост амплитуды шероховатости, высоты выступов и глубины впадин по сравнению полированной поверхностью (близкой по характеристикам к молекулярно-гладкой) происходит при абразивной обработке со средним размером зерна до 100 мкм. Увеличение среднего размера зерна от 100 до 269 мкм не приводит к образованию текстуры, значительно отличающейся от полученной при обработке с размером зерна 100 мкм.

Смачиваемость поверхности зависит не только от высоты выступов и глубины впадин, но и от их преобладания на поверхности и формы. Преобладание выступов или впадин на поверхности меди и стали оценено характеристикой асимметричности (Ssk) (рис. 4). Установлено, что после абразивной обработки меди и стали образуется текстура, характеризующаяся отрицательными значениями Ssk. Так как значения Ssk отрицательные, то можно сделать вывод о том, что образуется текстура с небольшим количеством выступов относительно глубоких впадин. Обработка с большим размером зерна абразивных дисков ( $\eta$ ) создает текстуру с более симметричной топографией (к равному количеству выступов и впадин), что подтверждается увеличением Ssk (рис. 4) и стремлением его значений к нулю. При обработке поверхности меди абразивными дисками с  $\eta = 22$  мкм характеристика Ssk достигает значений, близких к нулю (рис. 4). При обработке с большим  $\eta$  (от 22 до 269 мкм) Ssk не изменяется у поверхности меди (рис. 4). При обработке поверхностей стали дисками с  $\eta$  от 1 до 269 мкм зарегистрирован рост Ssk. При обработке зерном 269 мкм эта характеристика принимает значения близкие к нулю (рис. 4). Можно сделать вывод, что симметричная форма распределения высот неровностей образуется при обработке поверхностей меди абразивными дисками со средним зерном от 22 мкм, поверхностей стали от 269 мкм.

Форма выступов на поверхностях меди и стали оценена трехмерной характеристикой эксцесса Sku (рис. 4), который характеризует плосковершинность. Из рис. 4 видно, что при абразивной обработке поверхностей меди и стали с большим средним размером зерна Sku уменьшается и стремится к значению равному трем. При абразивной обработке поверхностей металлов контактные

взаимодействия (резание, адгезионной и абразивный износ, пластическая деформация и трещинообразование) накладываются друг на друга. Чем больше средний размер зерна абразивных дисков, тем значительно проявляются контактные взаимодействия. При значениях  $Sku \approx 3$  на поверхностях  $M_{100}$ ,  $M_{160}$ ,  $M_{269}$  и  $Ст_{160}$ ,  $Ст_{269}$  образуются выступы преимущественно с симметричной гауссовой формой, с редкими впадинами, оставляемыми единичными несточенными абразивными зёрнами. Абразивная обработка поверхностей меди и стали дисками со средним размером зерна до 100 и 160 мкм соответственно образуют островершинные выступы. При абразивной обработке поверхностей меди и стали не образуются плосковершинные выступы,  $Sku$  не принимает значений меньше 3 (рис. 4).

Установлено, что гибридные характеристики шероховатости зависят от шагов и высот неровностей. На рис. 5 приведены значения среднего квадратичного наклона неровностей  $Sdq$  и приращения относительной площади  $Sdr$ . Величина  $Sdq$  для полированной поверхности меди  $M_1$  не превышает 0,05%, для поверхности стали  $Ст_1$  — 0,2%. Эти поверхности близки к молекулярно-гладким с высокими отражательными способностями. Из рис. 5 видно, что увеличение среднего размера зерна привело к росту  $Sdq$  и  $Sdr$ , следовательно, растет пространственная неоднородность текстуры. Рост  $Sdq$  (рис. 5) характеризует улучшение адгезионных свойств поверхности в условиях растекания по ней малых объемов жидкостей. Адгезионные свойства поверхности влияют на характеристики растекания капель (длительность пиннинга, скорость перемещения контактной линии).

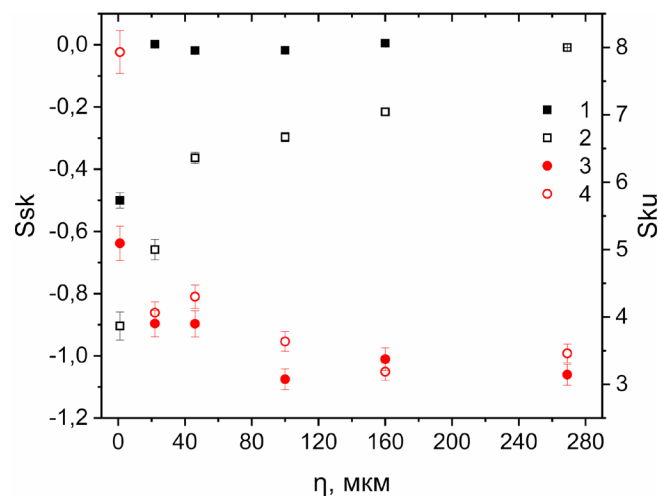


Рис. 4. Зависимости асимметричности  $Ssk$  (1,2) и эксцесса  $Sku$  (3, 4) от среднего размера зерна абразивных дисков. Поверхности: 1, 3 — медь; 2, 4 — сталь

Fig. 4. The dependencies of skewness  $Ssk$  (1,2) and kurtosis  $Sku$  (3, 4) on the average grit size of the abrasive discs. Substrates: 1, 3 — copper; 2, 4 — steel

Использование характеристики приращения площади  $Sdr$  относительно молекулярно-гладкой поверхности позволяет дополнительно дифференцировать поверхности с одинаковыми значениями  $Sa$ ,  $Sq$ ,  $Sz$ . Условно можно выделить два интервала роста площади поверхностей меди и стали по среднему размеру зерна при абразивной обработке (рис. 5). Первый интервал лежит в пределах  $\eta$  от 1 до 100 мкм, второй от 100 до 269 мкм. В первом интервале установлен интенсивный прирост площади поверхности меди до 7% на образце  $M_{100}$  и поверхности стали до 2,7% на образце  $Ст_{100}$ . Во втором интервале значительно снижается прирост площади. На образце меди  $M_{269}$  прирост площади в сравнении с образцом  $M_{100}$  составил не более 1%. На образце стали  $Ст_{269}$  прирост площади в сравнении с образцом  $Ст_{100}$  составил не более 0,4%. Можно сделать вывод о том, что при абразивной обработке поверхностей меди и стали значительный прирост площади поверхности происходит при обработке дисками с  $\eta$  до 100 мкм. Использование дисков с  $\eta$  более 100 мкм не приводит к значительному росту площади относительно поверхностей, обработанных дисками с  $\eta = 100$  мкм. Изменение площади поверхности после абразивной обработки оказывает влияние на свойства смачивания в состоянии Венцеля [14].

В условиях абразивной обработки и полировки поверхность металла окисляется. После обработки на поверхностях металлов адсорбируются неполярные

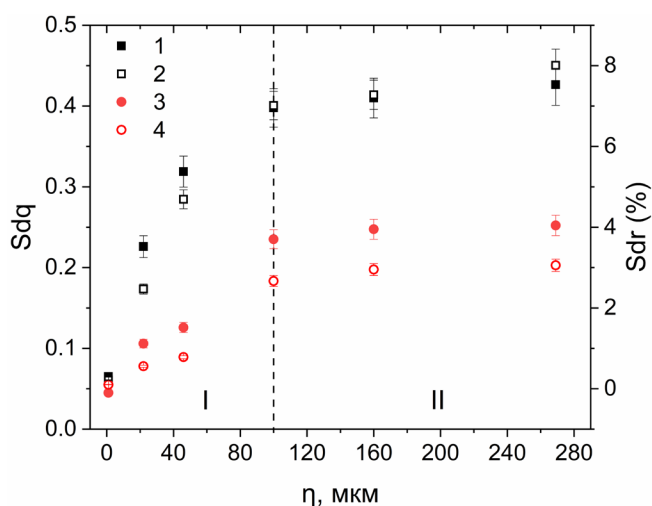


Рис. 5. Зависимости среднего квадратичного наклона неровностей  $Sdq$  (1, 2) и приращения относительной площади  $Sdr$  (3, 4) от среднего размера зерна абразивных дисков. Поверхности: 1, 3 — медь; 2, 4 — сталь. Условно выделены интервалы роста шероховатости в условиях абразивной обработки: I — интенсивный прирост поверхности, II — стабилизация роста поверхности

Fig. 5. The dependencies of the root mean square gradient  $Sdq$  (1, 2) and developed interfacial area ratio  $Sdr$  (3, 4) on the average grit size of the abrasive discs. Substrates: 1, 3 — copper; 2, 4 — steel. The intervals of roughness growth after abrasive processing: I — intensive growth of the surface, II — stabilization of surface growth

насыщенные молекулы углеводородов. Адсорбция в данном случае происходит под влиянием поляризации неактивных углеводородных молекул электрическим полем металлической поверхности [1].

На рис. 6 приведены зависимости поверхностной энергии и статических контактных углов от среднего арифметического отклонения поверхности  $Sa$ .

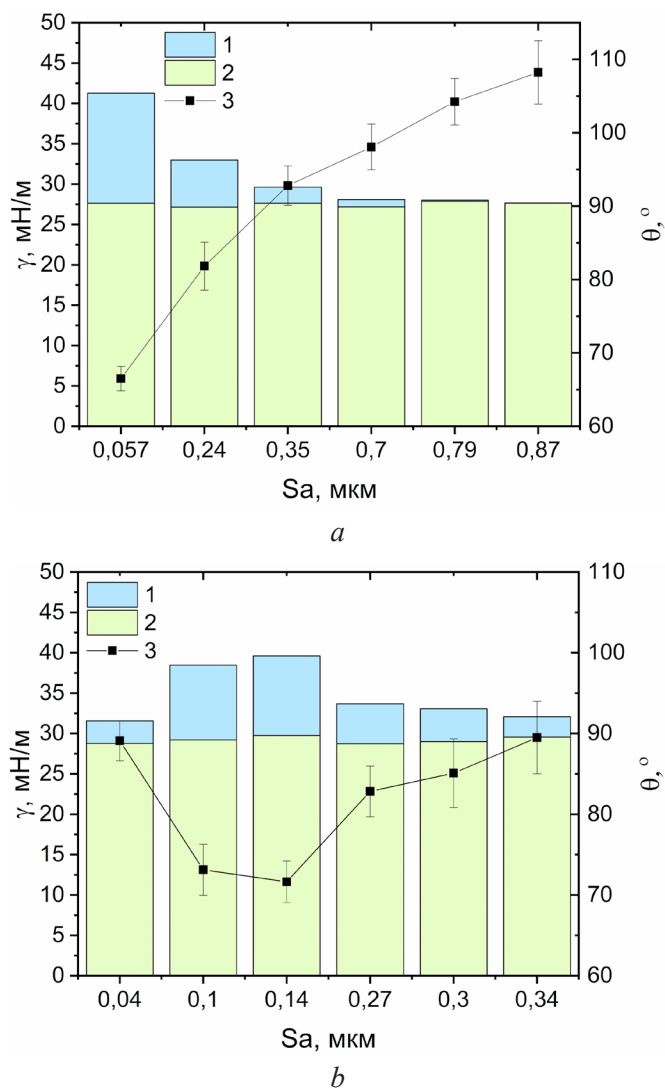


Рис. 6. Зависимости поверхностной энергии (полярной (1) и дисперсной (2) составляющих) и статического контактного угла (3) от среднего арифметического отклонения поверхности  $Sa$ : (а) медь, (б) сталь

Fig. 6. The dependences of the surface free energy (polar (1) and disperse (2) components) and static contact angle (3) on the arithmetical mean height: (a) copper, (b) steel

Из рис. 6а видно, что с увеличением шероховатости поверхности меди, поверхностная энергия подложек уменьшается (согласуется с [22]). С ростом шероховатости дисперсная составляющая поверхностной энергии меди и стали практически не изменяется, а изменяется только полярная составляющая. Полученные результаты для меди согласуются с данными, полученными при обработке титановых образцов [10, 12]. Установлено [12], что с уменьшением шероховатости поверхности, оцененной Ra, кислотная и основная части (входящие в полярную составляющую) поверхностной энергии уменьшаются. Предполагается [8], что на дисперсионный компонент поверхностной энергии не оказывает влияние структура зерна или механические напряжения. Шероховатость в большой степени влияет на адсорбционные и химические процессы, происходящие на поверхности металла. Выступы и пики, в отличие от известного их влияния на вещества с гетерополярной решеткой (например, соль NaCl), не дают увеличения потенциала физической адсорбции металлов [4]. На выступах и пиках наблюдается даже понижение адсорбции Ван-дер-Ваальса (адсорбции, вызванной дисперсионными силами) по сравнению с другими местами поверхности (впадины и ровные участки относительно базовой линии) [4]. По отношению к хемосорбции существует предположение [4] о ее большей интенсивности на выступах и пиках шероховатости металлов. На основании выше сказанного можно сделать вывод о том, что с ростом шероховатости поверхности (Sa) пленка оксидов на поверхности меди уменьшается, приводя к понижению полярной составляющей поверхностной энергии и ухудшению свойств смачиваемости (рис. 6а).

Установлено, что при увеличении шероховатости поверхности стали полярная составляющая поверхностной энергии сначала увеличивается (Sa лежит в диапазоне 0,04-0,14 мкм), достигает своего максимума на образце Ст<sub>46</sub>, а затем уменьшается (Sa = 0,26 ÷ 0,34). Кривая смачивания (рис. 6б) имеет вид параболы. Необходимо отметить, что значения трехмерных высотных характеристик шероховатости образцов Ст<sub>22</sub> и Ст<sub>46</sub> лежат в интервале M<sub>1</sub> и M<sub>13</sub> (рис. 3-5). Улучшение смачиваемости (рис. 6б) поверхности стали можно объяснить: когда расстояние между двумя соседними пиками невелико по сравнению с их высотой (Sz, рис. 3), пики и впадины на поверхности образуют капилляр, который за счет капиллярного явления смачивает материал [11]. При этом контактный угол уменьшается.

Определение поверхностной энергии в результате измерения контактных углов является приемлемым методом для сравнения эффективности модификации поверхности абразивной обработкой.

Полученные результаты дают основания для вывода, что в результате абразивной обработки поверхностей меди и стали в их полной поверхностной энергии изменяется доля полярной составляющей. Последнее является следствием изменения дипольных взаимодействий и водородных связей между атомами.

### Заключение

1. Рост амплитуды шероховатости, высоты выступов и глубины впадин от значений полированной поверхности (близкой по характеристикам

- к молекулярно-гладкой) происходит при абразивной обработке поверхностей меди и стали со средним размером зерна до 100 мкм. Применение абразивного материала со средним размером зерна от 100 до 269 мкм не приводит к образованию текстуры, значительно отличающейся от полученной при обработке с размером зерна 100 мкм.
2. Симметричная форма распределения высот неровностей образуется при обработке поверхностей меди абразивными дисками со средним зерном от 22 мкм, поверхностей стали от 269 мкм. При абразивной обработке поверхностей меди и стали не образуются плосковершинные выступы. Абразивная обработка меди со средним размером зерна до 100 мкм, а стали до 160 мкм образует на поверхности островершинные выступы с симметричной гауссовой формой, с редкими впадинами, оставляемыми единичными несточенными абразивными зёрнами. Форма выступов и впадин на поверхности влияют на ее свойства смачиваемости.
  3. При абразивной обработке поверхностей меди и стали значительный рост площади поверхности (меди до 7,0 %, стали до 2,7%) происходит при обработке дисками с размером зерна до 100 мкм. Использование дисков с размером зерна более 100 мкм не приводит к значительному росту площади относительно поверхностей, обработанных дисками с  $\eta = 100$  мкм (прирост площади поверхностей меди составил до 1%, стали до 0,4%). Изменение площади поверхности после абразивной обработки оказывает влияние на свойства смачивания в состоянии Венцеля.
  4. В результате абразивной обработки поверхностей меди и стали в их полной поверхностной энергии изменяется доля полярной составляющей. Последнее является следствием изменения дипольных взаимодействий и водородных связей между атомами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов А. Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости: Учебник для вузов / А. Ф. Аксенов. М.: Транспорт, 1970. 256 с.
2. Батищева К. А. Испарение капель воды в изолированной от внешней среды камере / К. А. Батищева, А. Е. Нурпейис // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Том 6. № 3 (23). С. 8-22. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-3-8-22
3. Дедкова А. А. Возможности и ограничения метода контактной профилометрии при определении перепада высот для контроля топологических элементов и толщины слоев / А. А. Дедкова, В. Ю. Киреев, М. А. Махиборода // Наноструктуры. Математическая физика и моделирование. 2020. Том 20. № 2. С. 23-40.
4. Карпенко Г. В. Прочность стали в коррозионной среде / Г. В. Карпенко. Харьков: Госгортехиздат, 1963. 188 с.

5. Кузнецов Г. В. Режимы растекания капли воды по подложкам с различной смачиваемостью / Г. В. Кузнецов, Д. В. Феоктистов, Е. Г. Орлова // Инженерно-физический журнал. 2016. Том 89. № 2. С. 310-315.
6. Лич Р. Инженерные основы измерений нанометровой точности: учебное издание / Р. Лич. Долгопрудный: Интеллект. 2012. 400 с.
7. Encinas N. Control of Wettability of Polymers by Surface Roughness Modification / N. Encinas, M. Pantoja, J. Abenojar, M. A. Martínez // Journal of Adhesion Science and Technology. 2010. Vol. 24. Pp. 1869-1883. DOI: 10.1163/016942410X511042
8. Fowkes F. M. Determination of Interfacial Tensions, Contact Angles, and Dispersion Forces in Surfaces by Assuming Additivity of Intermolecular Interactions in Surfaces / F. M. Fowkes // Journal of Physical Chemistry. 1962. Vol. 66. p. 382. DOI: 10.1021/j100808a524
9. Fu B.-Q. Calculation of the surface energy of bcc-metals with the empirical electron theory / B.-Q. Fu, W. Liu, Z.-L. Li // Applied Surface Science. 2009. Vol. 255. Pp. 8511-8519. DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.06.002
10. Kilpadi D. V. Surface energy characterization of unalloyed titanium implants. / D. V. Kilpadi, J. E. Lemons // Journal of Biomedical Materials Research. 1994. Vol. 28. Pp. 1419-1425. DOI: 10.1002/jbm.820281206
11. Kubiak K. J. Methodology for Metrology of Wettability Versus Roughness of Engineering Surfaces / K. J. Kubiak, T. G. Mathia, M. C. T. Wilson // Proceeding of 14<sup>th</sup> International Congress Of Metrology in Paris. 22-25 June 2009.
12. Kumar S. S. Effect of surface roughness and surface topography on wettability of machined biomaterials using flexible viscoelastic polymer abrasive media / S. S. Kumar, S.S. Hiremath // Surface Topography: Metrology and Properties. 2019. Vol. 7. DOI: 10.1088/2051-672x/aaf6f6
13. Kuznetsov G. V. Droplet Spreading and Wettability of Abrasive Processed Aluminum Alloy Surfaces / G. V. Kuznetsov, E. G. Orlova, D. V. Feoktistov, A. G. Islamova, A. V. Zhuikov // Metals and Materials International. 2020. Vol. 26. Pp. 46-55. DOI: 10.1007/s12540-019-00310-6
14. Kuznetsov G. V. Droplet state and mechanism of contact line movement on laser-textured aluminum alloy surfaces / G. V. Kuznetsov, D. V. Feoktistov, E. G. Orlova, I. Y. Zykov, A.G. Islamova // Journal of Colloid and Interface Science. 2019. vol. 553. pp. 557-566. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.06.059
15. Kuznetsov G. V. Evaporation modes of LiBr, CaCl<sub>2</sub>, LiCl, NaCl aqueous salt solution droplets on aluminum surface / G. V. Kuznetsov, D. V. Feoktistov, E. G. Orlova, S. Y. Misyura, V. S. Morozov, A. G. Islamova // International Journal of Heat and Mass Transfer 2018. Vol. 126. Pp. 161-168. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.040
16. Neogi P. Spreading kinetics of a drop on a smooth solid surface / P. Neogi, C. A. Miller // Journal of Colloid And Interface Science. 1982. Vol. 86. Pp. 525-538. DOI: 10.1016/0021-9797(82)90097-2
17. Owens D. K. Estimation of the surface free energy of polymers / D. K. Owens, R. C. Wendt // Journal of Applied Polymer Science. 1969. Vol. 13. Pp. 1741-1747. DOI: 10.1002/app.1969.070130815
18. Rioboo R. Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces / R. Rioboo, M. Marengo, C. Tropea // Experiments in Fluids. 2002. Vol. 33. Pp. 112-124. DOI: 10.1007/s00348-002-0431-x



19. Rotenberg Y. Determination of surface tension and contact angle from the shapes of axisymmetric fluid interfaces / Y. Rotenberg, L. Boruvka, A. W. Neumann // *Journal of Colloid And Interface Science*. 1983. Vol. 93. Pp. 169-183. DOI: 10.1016/0021-9797(83)90396-x
20. Shaker M. A combined criterion of surface free energy and roughness to predict the wettability of non-ideal low-energy surfaces / M. Shaker, E. Salahinejad // *Progress in Organic Coatings*. 2018. Vol. 119. Pp. 123-126. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.02.028
21. Šikalo Š. Analysis of Impact of Droplets on Horizontal Surfaces / Š. Šikalo, M. Marengo, C. Tropea, E. N. Ganić // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2002. vol. 25. pp. 503-510. DOI: 10.1016/S0894-1777(01)00109-1
22. Wang W. Correlation between dynamic wetting behavior and chemical components of thermally modified wood / W. Wang, Y. Zhu, J. Cao, W. Sun // *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 324. Pp. 332-338. 10.1016/j.apsusc.2014.10.139

Anastasia G. ISLAMOVA<sup>1</sup>  
Dmitriy V. FEOKTISTOV<sup>2</sup>  
Evgeniya G. ORLOVA<sup>3</sup>

UDC 662.5

## INFLUENCE OF THE COPPER AND STEEL SURFACES' ROUGHNESS ON SURFACE ENERGY AND WETTABILITY\*

<sup>1</sup> Postgraduate Student, Butakov Research Center,  
National Research Tomsk Polytechnic University  
agi2@tpu.ru; ORCID: 0000-0001-7350-8102

<sup>2</sup> Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Butakov Research Center,  
National Research Tomsk Polytechnic University  
fdv@tpu.ru

<sup>3</sup> Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Lecturer, Butakov Research Center,  
National Research Tomsk Polytechnic University  
lafleur@tpu.ru

### Abstract

This article aims at solving the fundamental problem of thermal physics. This problem includes controlling small volumes of liquids on the heat exchange surfaces of special devices (for example, thermosyphons and heat pipes) working in a closed evaporative-condensation cycle. The authors analyze the effect of roughness on surface energy and wettability of different textures on typical heat exchange surfaces made of copper and steel prepared for operation by mechanical (abrasive) processing.

Six textures were created on the copper and steel surfaces using a grinding and polishing machine. The roughness of the textures was evaluated based on the analysis of three-dimensional roughness characteristics (amplitude and hybrid). The surface wettability was studied

---

\* The reported study was funded by RFBR (grant No. 19-38-90136).

---

**Citation:** Islamova A. G., Feoktistov D. V., Orlova E. G. 2021. "Influence of the copper and steel surfaces' roughness on surface energy and wettability". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 7, no. 1 (25), pp. 60-78.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-60-78

on the experimental setup with the shadow method. The surface free energy of abrasively processed surfaces was determined by the Owens—Wendt—Rabel—Kaelble method.

The results show the necessity of using at least one three-dimensional amplitude and hybrid characteristics to evaluate the textures. The authors have determined the conditions for the formation of Gaussian and sinusoidal textures. A significant increase in surface area is achieved when copper and steel are processed with the abrasive discs with an average grit size of up to 100  $\mu\text{m}$ . This increase is up to 7% for copper and up to 2.7%. After abrasive processing of copper and steel surfaces, the proportion of the polar component in their total surface energy changes. This is a consequence of changes in dipole interactions and hydrogen bonds between atoms.

### **Keywords**

Wetting, droplet, substrate, abrasive processing, grit size, roughness characteristics, surface energy.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-60-78**

### **REFERENCES**

1. Aksenov A. F. 2015. Aviation Fuels, Lubricants and Special Fluids: Textbook for Universities. Moscow: Transport. 256 pp. [In Russian]
2. Batishcheva K. A., Nurpeiis A. E. 2020. "Water droplet evaporation in a chamber isolated from the external environment". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 6, no. 3, pp. 8-22. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-3-8-22 [In Russian]
3. Dedkova A. A., Kireev V. Yu., Makhboroda M. A. 2020. "Possibilities and limitations of the contact profilometry method for determining the height difference for monitoring topological elements and layer thickness". Nanostruktury. Matematicheskaya fizika i modelirovanie, vol. 20, no. 2, pp. 23-40. [In Russian]
4. Karpenko G. V. 1963. Strength of Steel in a Corrosive Environment. Kharkiv: Gosortekhnizdat. 188 pp. [In Russian]
5. Kuznetsov G. V., Feoktistov D. V., Orlova E. G. 2016. "Regimes of spreading of a water droplet over substrates with varying wettability". Journal of Engineering Physics and Thermophysics [Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal], vol. 89, no. 2, pp. 310-315 [In Russian]
6. Leach R. 2012. Fundamental Principles of Engineering Nanometrology. Dolgoprudnyy: Intellekt. 400 pp. [In Russian]
7. Encinas N., Pantoja M., Abenojar J., Martínez M. A. 2010. "Control of wettability of polymers by surface roughness modification". Journal of Adhesion Science and Technology, vol. 24, pp. 1869-1883. DOI: 10.1163/016942410X511042
8. Fowkes F. M. 1962. "Determination of interfacial tensions, contact angles, and dispersion forces in surfaces by assuming additivity of intermolecular interactions in surfaces". Journal of Physical Chemistry, vol. 66, p. 382. DOI: 10.1021/j100808a524

9. Fu B.Q., Liu W., Li Z.-L. 2009. "Calculation of the surface energy of bcc-metals with the empirical electron theory". *Applied Surface Science*, vol. 255, pp. 8511-8519. DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.06.002
10. Kilpadi D. V., Lemons J. E. "Surface energy characterization of unalloyed titanium implants". *Journal of Biomedical Materials Research*, vol. 28, pp. 1419-1425. DOI: 10.1002/jbm.820281206
11. Kubiak K. J., Mathia T. G., Wilson M. C. T. 2009. "Methodology for metrology of wettability versus roughness of engineering surfaces". *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Congress of Metrology in Paris (22-25 June 2009, Paris, France)*.
12. Kumar S. S., Hiremath S. S. 2019. "Effect of surface roughness and surface topography on wettability of machined biomaterials using flexible viscoelastic polymer abrasive media". *Surface Topography: Metrology and Properties*, vol. 7. DOI: 10.1088/2051-672x/aaf6f6
13. Kuznetsov G. V., Orlova E. G., Feoktistov D. V., Islamova A. G., Zhuikov A. V. 2020. "Droplet spreading and wettability of abrasive processed aluminum alloy surfaces". *Metals and Materials International*, no. 26, pp. 46-55. DOI: 10.1007/s12540-019-00310-6
14. Kuznetsov G. V., Feoktistov D. V., Orlova E. G., Zzykov I. Y., Islamova A. G. 2019. "Droplet state and mechanism of contact line movement on laser-textured aluminum alloy surfaces". *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 553, pp. 557-566. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.06.059
15. Kuznetsov G. V., Feoktistov D. V., Orlova E. G., Misyura S. Y., Morozov V. S., Islamova A.G. 2018. "Evaporation modes of LiBr, CaCl<sub>2</sub>, LiCl, NaCl aqueous salt solution droplets on aluminum surface". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 126, pp. 161-168. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.040
16. Neogi P., Miller C. A. 1982. "Spreading kinetics of a drop on a smooth solid surface". *Journal of Colloid And Interface Science*, vol. 86, pp. 525-538. DOI: 10.1016/0021-9797(82)90097-2
17. Owens D. K., Wendt R. C. 1969. "Estimation of the surface free energy of polymers". *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 13, pp. 1741-1747. DOI: 10.1002/app.1969.070130815
18. Rioboo R., Marengo M., Tropea C. 2002. "Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces". *Experiments in Fluids*, vol. 33, pp. 112-124. DOI: 10.1007/s00348-002-0431-x
19. Rotenberg Y., Boruvka L., Neumann A.W. 1983. "Determination of surface tension and contact angle from the shapes of axisymmetric fluid interfaces". *Journal of Colloid And Interface Science*, no 93, pp. 169-183. DOI: 10.1016/0021-9797(83)90396-x
20. Shaker M., Salahinejad E. 2018. "A combined criterion of surface free energy and roughness to predict the wettability of non-ideal low-energy surfaces". *Progress in Organic Coatings*, no 119, pp. 123-126. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.02.028
21. Šikalo Š., Marengo M., Tropea C., Ganić E.N. 2002. "Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces". *Experimental Thermal and Fluid Science*, no. 25, pp. 503-510. DOI: 10.1016/S0894-1777(01)00109-1
22. Wang W., Zhu Y., Cao J., Sun W. 2015. "Correlation between dynamic wetting behavior and chemical components of thermally modified wood". *Applied Surface Science*, no. 324, pp. 332-338. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.10.139