

УДК 677.024

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ  
НА СМАЧИВАЕМОСТЬ ЗАМАСЛИВАЮЩЕЙ ЭМУЛЬСИЕЙ**

**RESEARCH OF INFLUENCE OF ROUGHNESS OF STEEL SAMPLES  
ON WETTABILITY THE MAKING OILY EMULSION**

*А.В. МЕДВЕДЕВ, К.Э. РАЗУМЕЕВ*  
*A.V. MEDVEDEV, K.E. RAZUMEEV*

(АО "НПО Стеклопластик" филиал НПК "Терм", Москва,  
Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))  
(JSC "NPO Stekloplastik" affiliat NPK "Therm", Moscow,  
Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))  
E-mail: 24091955@mail.ru, k.razumeev@rambler.ru

*Проведены исследования по влиянию шероховатости стальных образцов на смачиваемость замасливающей эмульсией. Определена зависимость величины краевого угла смачивания замасливающей эмульсией на основе водного раствора препарата АВИБ-Б от параметров шероховатости Ra стальных образцов. Рассмотрены вопросы соотношения истинной и геометрической*

*поверхности образцов шероховатости с параметром шероховатости поверхности Ra от 1,600 до 0,0125 мкм. С учетом параметров шероховатости поверхности элементарных нитей оксида алюминия при проектировании диска замасливающего устройства назначается параметр шероховатости Ra, равный 0,100 мкм.*

*The results of determination of optimal roughness of the disk for oiling of the threads produced out of aluminium oxide. The function of the wetting angle of sizing emulsion was determined as based on an aqueous solution of the drug AVIV-B and the parameters of roughness Ra of the steel samples. As the samples for research were used samples with the levels of the parameter of surface roughness from 1.600 to 0.0125 micrometer. Given the parameters of surface roughness of filaments of aluminum oxide in the design of the sizing disk unit is assigned to the roughness parameter Ra equal 0,100 micrometer.*

**Ключевые слова:** параметры шероховатости, краевой угол смачивания, замасливающий диск, нити из оксида алюминия.

**Keywords:** the disk to oiling, the roughness parameters, the threads of the aluminum oxide.

С целью подготовки к текстильной переработке пряжа и нити подвергаются обработке текстильно-вспомогательными веществами (ТВВ). Для нанесения ТВВ используются замасливающие устройства различного типа. Основным требованием к замасливающим устройствам является нанесение заданного количества ТВВ на нить и равномерное распределение по сечению нити. Этим требованиям в наибольшей мере удовлетворяют замасливающие устройства дискового типа [1], [2].

При проектировании замасливающего диска одним из важных показателей служит параметр шероховатости механически обработанной поверхности Ra – среднее арифметическое из абсолютных отклонений профиля поверхности. Это объясняется существенным влиянием микрорельефа рабочей поверхности диска на смачиваемость, количественной мерой которой служит краевой угол.

Целью работы является исследование зависимости величины краевых углов смачивания замасливающей эмульсии на основе водного раствора препарата АВИБ-Б от параметров шероховатости стальных образцов.

В экспериментах использовали замасливающую эмульсию на основе водного рас-

твора препарата АВИБ-Б, UN 3082, ТУ 2484-054-17965-829–2005 8% (масс). Физико-химические характеристики замасливающей эмульсии:

- динамическая вязкость  $1,285 \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot 10^{-3}$ ;
- поверхностное натяжение  $36,02 \text{ мДж/м}^2$ .

Определение краевого угла смачивания осуществляли на стальных образцах шероховатости, шлифованных плоских, ГОСТ 9378–93 с параметрами шероховатости поверхности Ra от 1,600 до 0,0125 мкм. Климатические условия в лаборатории: относительная влажность воздуха  $60 \pm 5 \%$ , температура воздуха  $20^\circ \text{C}$ .

На приборе Tracker (Франция) измерены краевые углы натекания эмульсии на твердые поверхности стальных образцов. Параметры шероховатости Ra образцов и величина краевого угла смачивания представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Ra, мкм	Краевой угол смачивания, град
1,600	116,20
0,800	114,70
0,400	108,06
0,200	101,40
0,100	98,60
0,050	97,90
0,025	97,10
0,0125	96,90

Зависимость величины краевого угла смачивания эмульсией на основе водного раствора препарата АВИБ-Б от параметра шероховатости  $R_a$  стальных образцов представлена на рис. 1.

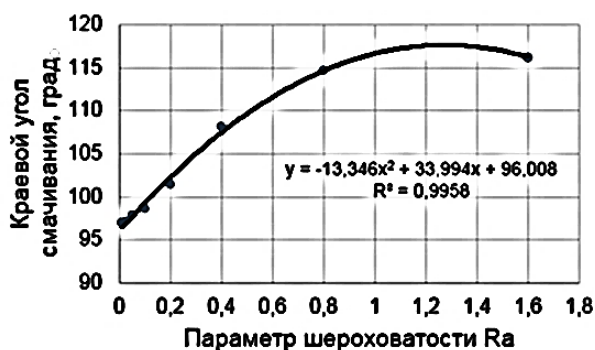


Рис. 1

При достижении равновесия растекание капли по твердой поверхности прекратится при достижении равновесия, которое без учета сил тяжести может быть описано уравнением Юнга:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{13} - \sigma_{12}}{\sigma_{23}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_{23}$  – удельные свободные поверхностные энергии на границах раздела твердое тело/газ, твердое тело/ жидкость и жидкость/газ.

Используя уравнение (1), рассчитали краевой угол смачивания идеально гладкой стальной поверхности эмульсией замасливателя АВИБ, величина которого составляла  $91,12^\circ$ .

$$S_{dr} = \frac{1}{A} \left[ \iint_A \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \right], \quad (2)$$

где  $A$  – область определения;  $x, y$  – координаты по осям  $X, Y$  правосторонней декартовой системы координат;  $z$  – координата по оси  $Z$ , направленной наружу (от материала к окружающей среде).

Государственный стандарт [7] для практического применения относится к работе [8], в которой авторы приводят общие правила вычисления приращения поверхности,

Поверхность твердых тел имеет микро-неровности с определенными параметрами шероховатости. Наличие шероховатой поверхности приводит к увеличению площади фактического контакта жидкости с твердым телом по сравнению с идеально гладкой поверхностью. Коэффициент, показывающий, во сколько раз увеличилась фактическая площадь контакта жидкости на шероховатой поверхности по сравнению с идеально гладкой поверхностью, иногда называют коэффициентом шероховатости. Коэффициент шероховатости исследователи обозначают следующим образом: Зимон А.А. –  $R_\Delta$  [3], Сумм Б.Д. –  $K$  [4], Черный А.А. –  $K_{Ra}$  [5].

В настоящее время не существует устоявшейся методики определения площади шероховатой поверхности. По всей видимости, это связано с тем, что в российской системе стандартов на шероховатость отсутствуют стандарты, регламентирующие трехмерную оценку топографии поверхности [6]. Государственный стандарт [7] устанавливает термины, определения и параметры для оценки структуры поверхности профильными методами. Стандарт вводит аналогичное коэффициенту шероховатости понятие – развернутое соотношение пограничной площади поверхности ограниченного масштаба  $S_{dr}$  (developed interfacial area ratio scale-limited surface): отношение прироста пограничной площади ограниченного масштаба в области определения к области определения:

условно разбив ее на ареальные элементы (наименьшие прямоугольники). Определение площади ареального элемента – четырехугольника  $ABCD$  с координатами  $(x_i, y_j)$  ( $i = 1, 2, \dots, M-1; j = 1, 2, \dots, N-1$ ) достаточно сложно само по себе. Задача усложняется тем, что четыре угла указанного четырехугольника могут находиться не в одной плоскости. В таком случае прямоугольник

считают состоящим из двух треугольников ABD и BCD (рис. 2 – принципиальная схема приращенной поверхности), площади которых должны определяться по отдельности. Методика определения площади ареальных элементов не приводится, кроме того, определение  $S_{dr}$  профильными методами осуществляется без учета субмикрощероховатости поверхности твердого тела.

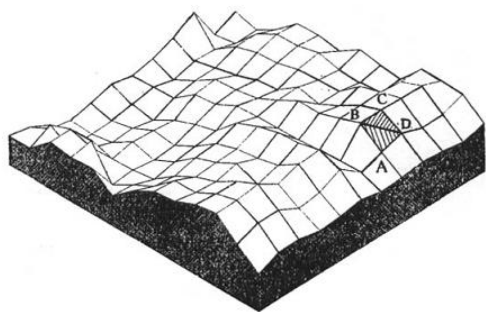


Рис. 2

Силы межатомного взаимодействия имеют электрическую природу в виде ионной, ковалентной, металлической или молекулярной связи. Физико-химические процессы, протекающие на границе раздела, достаточно хорошо исследованы и основаны на модели парного взаимодействия частиц, одной из составляющих которого является диполь-дипольное взаимодействие Ван-дер-Ваальса [9], [10].

Определение площади, на которой происходит взаимодействие ионов, атомов и молекул, с большой точностью возможно только в случаях адсорбции и образования мономолекулярного слоя газа на поверхности. В электрохимии истинную площадь поверхности, отнесенную к единице геометрической площади, принято называть фактором шероховатости [11]:

$$f_{ш} = \frac{A}{A_g},$$

где  $A$  – истинная площадь поверхности;  $A_g$  – геометрическая площадь поверхности.

Примерные значения фактора шероховатости приведены в табл. 2 [12].

Таблица 2

Металл	$f_{ш}$
Торий (спеченное покрытие, зерно 1...10 мкм)	8,8
Никель шлифованный	9,7
Тантал шлифованный	10
Барий (пленка, напыленная в вакууме)	12...17
Цирконий (покрытие, зерно 1-10 мкм)	33

Соотношение краевых углов смачивания гладкой и шероховатой поверхности связано уравнением Венцеля-Дерягина:

$$\cos \theta_{ш} = f_{ш} \cos \theta, \quad (3)$$

где  $\theta$ ,  $\theta_{ш}$  – краевые углы гладкой и шероховатой поверхности.

Исследования, проводимые в последнее время, показали, что для определения величины фактора шероховатости недостаточно профиля поверхности, необходимо иметь данные по геометрии всей поверхности, моделирование которой является сложным процессом [5], [13], [14].

В работе [14] фактор шероховатости определялся как отношение параметра  $R_a$  исследуемого образца, определенного с помощью профилометра-профилографа к параметру  $R_a$  полированной поверхности образца из того же материала.

Аппроксимация зависимости величины факторов шероховатости от параметра шероховатости  $R_a$  по данным литературных источников [5], [12], [15], [16] и [14] представлена на рис. 3 (ряд 1) и (ряд 2) соответственно.

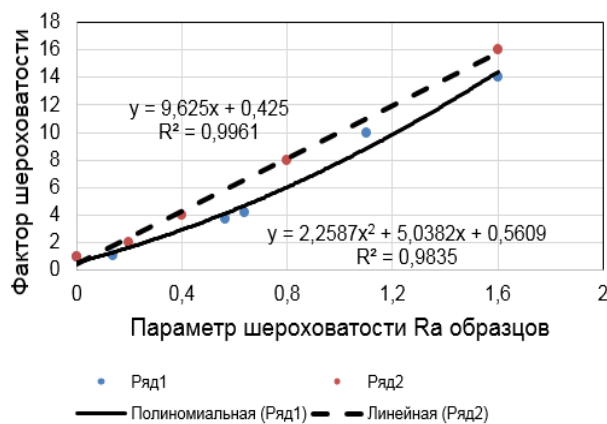


Рис. 3

Оценка точности приближения функции  $y=f(x)$  к экспериментальным данным проводилась по методу наименьших квадратов и наименьших модулей [17]. Коэффициенты достоверности аппроксимации  $R^2$  показывают высокую степень соответствия трендовой модели исходным данным.

По уравнению (2) рассчитаны значения краевых углов смачивания для образцов с параметром шероховатости  $R_a$  от 1,6 до 0,10 мкм. Значения измеренных и расчетных углов смачивания, полученные по уравнению (2), приведены в табл. 3.

Таблица 3

Ra, мкм	Краевой угол смачивания, град	
	измеренный	расчетный
1,600	116,2	104
0,800	114,7	96
0,400	108,06	93
0,200	101,4	92,5
0,100	98,6	91,5

На рис. 4 представлена зависимость измеренного (ряд 1) и расчетного (ряд 2) углов смачивания от параметра шероховатости образцов  $R_a$ . Сравнительно небольшая разница между измеренными и расчетными углами смачивания может объясняться тем, что капля на поверхности шероховатого тела может не полностью занимать промежутки между выступами. В некоторых случаях между жидкостью и твердым телом может находиться газ.

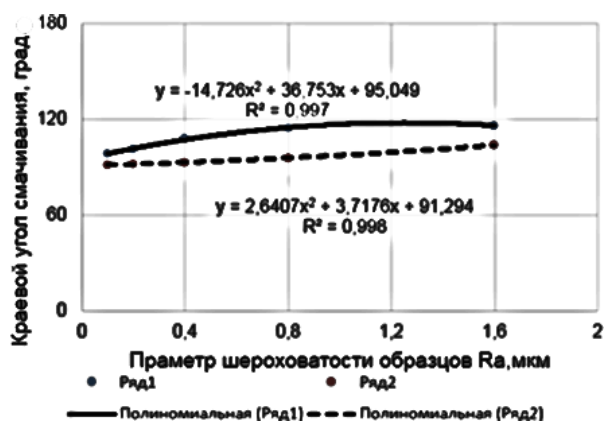


Рис. 4

Краевой угол, который образуется на шероховатой поверхности  $\theta_{ш}$ , определяется краевым углом и углом  $\phi$ , характери-

зующим наклон выступа шероховатости (рис. 5 – капля жидкости на шероховатой поверхности). Краевой угол на шероховатой поверхности равен:

$$\theta_{ш} = \theta + \phi. \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что краевой угол на шероховатой поверхности  $\theta_{ш}$  отличается от краевого угла  $\theta$ , который имеет место на гладкой поверхности, на угол  $\phi$ . Угол  $\phi$  в соответствии с рис. 4 равен:

$$\operatorname{tg}\phi = -\frac{dz}{dx},$$

где  $dz/dx$  – наклон оцениваемого профиля [18].

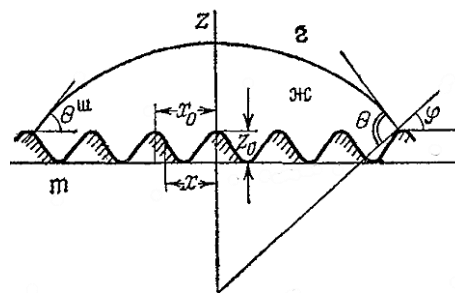


Рис. 5

Угол  $\phi$  является переменной величиной и зависит от высоты выступа шероховатости  $z_0$ , расстояния между выступами  $x_0$  и положением точки  $x$  (рис. 4) [4]:

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{2\pi z_0}{x_0} \sin \frac{2\pi x}{x_0}\right). \quad (5)$$

Очевидно, что прослеживается зависимость, хорошо описываемая теоретическими уравнениями (2) и (5). Для достижения лучшего растекания замазывающей эмульсии по поверхности стального диска, необходимо чтобы при данных параметрах шероховатости  $R_a$  этого диска угол смачивания был минимальным. Минимальный краевой угол смачивания, равный  $96,9^\circ$ , определен экспериментально для образца с параметром шероховатости  $R_a$ , равным

0,0125 мкм. Однако с учетом параметров шероховатости поверхности элементарных нитей оксида алюминия [19] необходимо применять по возможности больший параметр шероховатости поверхности. Исходя из этого, при проектировании диска замасливающего устройства должен назначаться параметр шероховатости Ra, равный 0,100 мкм. Тем более, что величина краевого угла смачивания образцов с параметрами шероховатости Ra, равным 0,0125 мкм, и Ra, равным 0,100 мкм, отличается менее чем на 2%.

## ВЫВОДЫ

1. Измерены краевые углы натекания жидкости на поверхности стальных образцов с различными параметрами шероховатости.

2. Рассчитан теоретический угол смачивания идеально гладкой стальной поверхности 8%-ной эмульсией замасливателя АВИБ-Б.

3. Определена зависимость краевых углов смачивания от параметров шероховатости Ra стальных образцов шероховатости.

4. Коэффициенты достоверности аппроксимации  $R^2$  показывают высокую степень соответствия трендовой модели исходным данным.

5. Наиболее полное смачивание поверхности имеет стальной образец с параметром шероховатости Ra, равным 0,0125 мкм.

6. Исходя из параметров шероховатости элементарных нитей из оксида алюминия при проектировании диска замасливающего устройства должен назначаться параметр шероховатости Ra, равный 0,100 мкм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шахова Н.В., Усенко В.А., Родионов В.А. Кручение и перемотка химических нитей. – М.: Высшая школа, 1975.
2. Прошков А.Ф. Расчет и проектирование машин для производства технических нитей и волокон. – М.: РИО МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2001.
3. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. – М.: Химия, 1974.
4. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976.
5. Черный А.А., Мащенко С.В., Гончаров В.В. Моделирование ион-атомных взаимодействий при

корпускулярной бомбардировке поверхности стальных образцов // Проблемы машиностроения. – 2014. Т. 17, №4. С. 59...64.

6. Давыдов М.В. Анализ международной практики профильной и трехмерной оценки шероховатости поверхности // Ученые заметки ТОГУ. – 2013. Том. 4, №4. С. 1061...1074.

7. ГОСТ Р ИСО 25178-2–2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Ареал. Часть 2. Термины, определения и параметры структуры поверхности.

8. Stout K.J. et. al. The Development of Methods for Characterisation of Roughness in Three Dimensions. – Penton Press Kogan Page Ltd, 2000.

9. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. – М.: Мир, 1979.

10. Моррисон С. Химическая физика поверхности твердого тела. – М.: Мир, 1980.

11. Трасатти С., Петрий О.А. Измерение истинной поверхности в электрохимии // Электрохимия. – 1993, том 29, №4. С. 557...575.

12. Глебов Г.Д. Поглощение газов активными металлами. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.

13. Киселев М.Г., Корзун П.О., Павич Т.П. Определение вида микрорельефа обработанной поверхности, обеспечивающего ее наибольшую площадь и объем при контактировании с жидкостью // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2009, №4. С 40...52.

14. Киселев М.Г., Савич В.В., Павич Т.П. Определение краевого угла смачивания на плоских поверхностях // Вестник БНТУ, №1, 2006. С.38...41.

15. Зайченко Н.А., Васильева В.И., Григорчук О.В., Гречкина М.В., Богатиков Е.В. Анализ микрорельефа и шероховатости поверхности ионообменных мембран методом атомно-силовой микроскопии // Вестник Воронежского гос. ун-та. – 2009, №1. С. 5...14.

16. Горбунов А.В. Совершенствование технологии производства холоднокатаной листовой стали с требуемыми характеристиками микротопографии поверхности для автомобильной промышленности: Дис...канд. техн. наук. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2011.

17. Авдюшев В.А., Мезенцева А.Д. Метод наименьших модулей и его эффективность при обработке измерений с ошибками различного распределения // Изв. вузов. Физика. – 2012. Т. 55, № 10/2. С.68...76.

18. ГОСТ Р ИСО 4287–2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности.

19. Medvedev A.V., Sertsova A.A., Razumeev K.É. Surface roughness of elementary aluminum oxide filaments // Glass and ceramics. – Vol. 69, № 5...6. P.197...199.

## REFERENCES

1. Shahova N.V., Usenko V.A., Rodionov V.A. Kruchenie i peremotka himicheskikh nitej. – M.: Vysshaya shkola, 1975.

2. Proshkov A.F. Raschet i proektirovanie mashin dlya proizvodstva tehnikeskikh nitej i volokon. – M.: RIO MGTU im. A.N. Kosygina, 2001.
3. Zimon A.D. Adgeziya zhidkosti i smachivanie. – M.: Himiya, 1974.
4. Summ B.D., Goryunov Yu.V. Fizicheskie osnovy smachivaniya i rastekaniya. – M.: Himiya, 1976.
5. Chernyj A.A., Mashenko S.V., Goncharov V.V. Modelirovanie ion-atomnyh vzaimodejstvij pri korpuskulyarnoj bombardirovke poverhnosti stalnyh obrazcov // Problemy mashinostroeniya. – 2014. T. 17, №4. S. 59...64.
6. Davydov M.V. Analiz mezhdunarodnoj praktiki profilnoj i trehmernoj ocenki sherohovatosti poverhnosti// Uchenye zametki TOGU. –2013. Tom. 4, №4. S. 1061...1074.
7. GOST R ISO 25178-2–2014. Geometricheskie harakteristiki izdelij (GPS). Struktura poverhnosti. Areal. Chast 2. Terminy, opredeleniya i parametry struktury poverhnosti.
8. Stout K.J. et. al. The Development of Methods for Charactrisation of Roughness in Three Dimensions. – Penton Press Kogan Page Ltd, 2000.
9. Adamson A. Fizicheskaya himiya poverhnostej. – M.: Mir, 1979.
10. Morrison S. Himicheskaya fizika poverhnosti tverdogo tela. – M.: Mir, 1980.
11. Trasatti S., Petrij O.A. Izmerenie istinnoj poverhnosti v elektrohimii // Elektrohimiya. – 1993, tom 29, №4. S. 557...575.
12. Glebov G.D. Pogloshenie gazov aktivnymi metallami. – M.-L.: Gosenergoizdat, 1961.
13. Kiselev M.G., Korzun P.O., Pavich T.P. Opredelenie vida mikrorelefa obrabotannoj poverhnosti, obespechivayushego ee naibolshuyu ploshad i obem pri kontaktirovanii s zhidkostyu // Vestnik GGTU im. P.O. Suhogo. – 2009, №4. S 40...52.
14. Kiselev M.G., Savich V.V., Pavich T.P. Opredelenie kraevogo ugla smachivaniya na ploskih poverhnostyah // Vestnik BNTU, №1, 2006. S.38...41.
15. Zajchenko N.A., Vasileva V.I., Grigorchuk O.V., Grechkina M.V., Bogatkov E.V. Analiz mikrorelefa i sherohovatosti poverhnosti ionoobmennyyh membran metodom atomno-silovoj mikroskopii // Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta. – 2009, №1. S. 5...14.
16. Gorbunov A.V. Sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva holodnokatanoj listovoj stali s trebuemyimi harakteristikami mikrotopografii poverhnosti dlya avtomobilnoj promyshlennosti: Dis...kand. tehn. nauk. – Magnitogorsk: MGTU im. G.I. Nosova, 2011.
17. Avdyushev V.A., Mezenceva A.D. Metod naimenshih modulej i ego effektivnost pri obrabotke izmenenij s oshibkami razlichnogo raspredeleniya // Izv. vuzov. Fizika. – 2012. T. 55, № 10/2. S.68...76.
18. GOST R ISO 4287–2014. Geometricheskie harakteristiki izdelij (GPS). Struktura poverhnosti. Profilnyj metod. Terminy, opredeleniya i parametry struktury poverhnosti.
19. Medvedev A.V., Sertsova A.A., Razumeev K.E. Surface roughness of elementary aluminum oxide filaments // Glass and ceramics. – Vol. 69, № 5...6. P.197...199.

Рекомендована кафедрой прядения РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 09.10.17.