

## ENVIRONMENT SAFETY TECHNOLOGY OF CREATING OF A WEAR-RESISTANT COATING ON ALUMINUM ALLOY SUBSTRATES

L.V. KOZYREVA<sup>1</sup>, Dr. Sc., V.V. KOZYREV<sup>2</sup>, Dr. Sc., A.V. SMIRNOV<sup>1</sup>, Postgraduate

<sup>1</sup>Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: kozerevalara16@mail.ru

<sup>2</sup>Tver State Agricultural Academy  
7, Marshal Vasilevskij sr. (Saharovo), Tver, 170904

The results of research work on the creation of a method of applying wear-resistant cobalt-chromium coating on aluminium alloy substrate by thermal decomposition of organometallic compound vapours are presented. It is stated that the method is characterised by sequential application of an adhesive layer of a mixture of nitrosyltricarbonyl cobalt and argon carrier gas and a surface layer of chromium hexacarbonyl at the temperature of thermal decomposition of organometallic compounds. It is noted that metallisation is carried out in a closed cycle, excluding the contact of workers with toxic substances and emissions of pollutants into the atmosphere, thus ensuring the safety of the production process. Coatings with necessary physical and mechanical properties are obtained, which proves the effectiveness of the applied approaches, contributes to the increase of wear resistance of parts and the increase of the service life of machinery.

*Keywords:* CVD-method, aluminum alloy, wear-resistant cobalt-chromium coating, hardening.

Поступила в редакцию/received: 02.10.2023; после рецензирования/revised: 16.10.2023;  
принята/accepted: 23.10.2023

УДК 539.3

## ВЛИЯНИЕ ВОЛНИСТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, А.Ф. ГУСЕВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Гусев А.Ф., 2024

Исследовано влияние волнистости технических поверхностей на контактное взаимодействие деталей машин. Приведены параметры шероховатости и волнистости поверхностей экспериментальных образцов по ГОСТ Р ИСО 4287-2014, механические свойства материалов образцов, дано описание методики эксперимента. Предложены теоретические зависимости контурной площади контакта от номинального давления, параметров шероховатости и волнистости контактирующих поверхностей и механических свойств материалов контактирующих деталей. Теоретически и экспериментально показано, что волнистость существенно влияет на величину площади контакта деталей машин. Отмечено, что в зависимости от величины номинального контактного давления контурная площадь, образовавшаяся в результате упругой

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 1 (21), 2024*

деформации волн, составляет от нескольких единиц до нескольких десятков процентов от номинальной площади контакта.

*Ключевые слова:* контактное взаимодействие, шероховатость, волнистость, контурная площадь контакта.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-14-20**

## ВВЕДЕНИЕ

Вследствие шероховатости и волнистости поверхностей деталей машин их контакт является дискретным и осуществляется на малых площадках, которые образуются в результате деформации отдельных неровностей под действием приложенной к контакту сжимающей нагрузки.

В механике контактного взаимодействия технических поверхностей плодотворной оказалась концепция трех площадей контакта: номинальной, контурной и фактической.

Номинальная площадь контакта  $A_n$  соответствует геометрическим размерам детали и задается чертежом. Площадки фактического контакта неровностей шероховатости  $\Delta A_{ri}$  в сумме составляют фактическую площадь контакта (ФПК)  $A_r = \sum \Delta A_{ri}$ . Они группируются на контурных площадках контакта отдельных волн  $\Delta A_{ci}$ , которые в сумме образуют контурную площадь контакта (КПК)  $A_c = \sum \Delta A_{ci}$ . Фактическая площадь контакта обычно составляет от номинальной десятые и сотые доли процента, при больших контактных нагрузках может достигать до нескольких процентов. Контурная площадь от номинальной составляет десятые или сотые доли в зависимости от нагрузки на контакт, однако при малых размерах контактирующих тел может стремиться к номинальной.

Понятие КПК впервые было введено в работах Н.Б. Демкина [1]. Оно позволило уточнить расчеты таких характеристик контактного взаимодействия, как контактная жесткость, контактная электро- и теплопроводность и др. Однако использование понятия КПК в расчетных методиках осложнялось отсутствием нормативных документов на характеристики волнистости, а также соответствующего метрологического обеспечения их измерения. ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 25142-82 нормируют только параметры шероховатости. Лишь с появлением ГОСТ Р ИСО 4287-2014 параметры волнистости были включены в число нормированных параметров рельефа технических поверхностей. Современные приборы для измерения этих параметров, в том числе профильным методом, позволяют путем фильтрации первичного профиля разделять его на профилограмму и волнограмму и рассчитывать нормируемые и нестандартные параметры шероховатости и волнистости.

Цели настоящей работы заключаются в экспериментальной оценке влияния волнистости технических поверхностей на площадь контакта деталей машин и теоретическом описании зависимости КПК от параметров микрогеометрии поверхностей и механических свойств материалов контактирующих деталей.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

В том случае, когда шероховатость и волнистость имеют высоту одного порядка, необходимо в расчетах характеристик контакта учитывать их совместную деформацию. Эта задача решается на основании следующих предпосылок [2]. Волны считаются сферическими (по крайней мере, выше средней плоскости), поэтому КПК имеют форму круга (в общем случае эллипса). Наличие шероховатости трансформирует эпюру давления на КПК (рис. 1). При этом радиус площадки контакта увеличивается по сравнению с герцевским радиусом, следовательно, КПК двух шероховатых волн  $\Delta A_c$  пре-

восходит значение площади контакта двух гладких  $\Delta A_{cH}$  по Герцу:

$$\Delta A_c = \Delta A_{cH}(1 + 2\Phi)(1 + \Phi)^{-\frac{1}{2\nu+5}}, \quad (1)$$

где  $\Delta A_{cH} = \pi \left( \frac{3}{4} \frac{Nr}{E^*} \right)^{\frac{2}{3}}$ ;  $\Phi$  – безразмерный комплекс физико-механических и геометрических параметров:

$$\Phi = \frac{1}{2} \left( \frac{R_p}{r} \right) \cdot \left( \frac{R_p}{\rho} \right)^{-\frac{1}{2\nu+1}} \left( \frac{4}{3} \frac{E^* r^2}{N} \right)^{\frac{4\nu}{3(2\nu+1)}} \quad (2)$$

( $R_p$  – максимальная высота пика (выступа) профиля шероховатости;  $\rho$  – средний радиус кривизны вершин выступов профиля шероховатости;  $r$  – радиус сферической поверхности;  $\nu$  – параметр, характеризующий функцию распределения высот выступов шероховатости;  $E^*$  – эквивалентный модуль упругости). Параметр  $\nu$  входит в качестве показателя степени в аппроксимацию опорной кривой [3] и определяется по формуле  $\nu = 2t_m \frac{R_p}{R_a} - 1$ , где  $t_m$  – относительная опорная длина профиля шероховатости на уровне средней линии,  $R_a$  – арифметическое среднее отклонение профиля шероховатости.

В формуле (2) безразмерный комплекс  $(R_p/r)$  характеризует относительную толщину шероховатого слоя; безразмерный комплекс  $(R_p/\rho)$  характеризует форму выступов; безразмерный комплекс  $\left( \frac{4}{3} \frac{E^* r^2}{N} \right)$  характеризует степень нагруженности контакта.

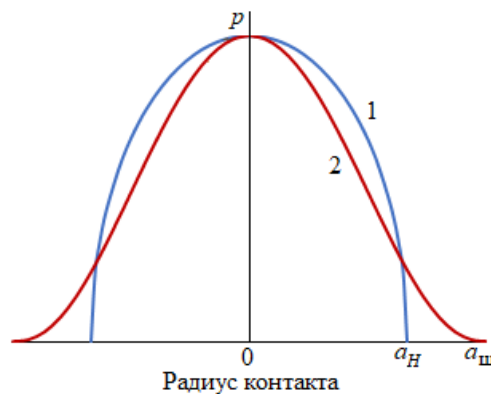


Рис. 1. Распределение нормального давления  $p$  по радиусу контакта сферических тел: 1 – гладких; 2 – шероховатых;  $a_H$  – радиус контакта по Герцу;  $a_{ш}$  – радиус контакта с учетом шероховатости

Обобщение зависимости (1) на случай контакта волнистых поверхностей с учетом распределения волн по высоте связано с рядом аппроксимаций, поэтому приведем окончательное выражение для расчета КПК  $A_c$  шероховатых волнистых поверхностей:

$$A_c = A_n K_w v_w \left( \frac{t_m v_w}{2\pi} \right)^{\frac{v_w}{2(v_w+\delta)}} \left( \frac{W_{Sm}}{W_p} \right)^{\frac{v_w}{v_w+\delta}} \left( \frac{p_n}{E^*} \right)^{\frac{v_w}{v_w+\delta}}, \quad (3)$$

где коэффициент  $K_w = 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{R_p}{W_p}$ , параметр  $\delta = \frac{1}{2} + 0,8 \left( \frac{R_p}{W_p} \right)^{\frac{2}{3}}$ ;  $A_n$  – номинальная площадь контакта;  $v_w$  – параметр, характеризующий функцию распределения волн по

высоте (аналогичен параметру  $v$  для шероховатости);  $t_{mw}$  – относительная опорная длина профиля волнистости на уровне средней линии (аналогично  $t_m$  для шероховатости);  $W_p$  – максимальная высота пика (выступа) профиля волнистости;  $W_{Sm}$  – средняя ширина элементов профиля волнистости (средний шаг волн).

Параметры  $Ra$ ,  $Rp$ ,  $Wp$ ,  $WSm$  стандартные<sup>1</sup> (ГОСТ Р ИСО 4287-2014), а параметры  $v$ ,  $v_w$ ,  $t_m$ ,  $t_{mw}$  – нестандартные, однако последние часто используются в механике контактного взаимодействия и трибологии.

## ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТУРНОЙ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА

Для исследования КПК номинально плоских волнистых поверхностей были изготовлены образцы цилиндрической формы диаметром 20 мм и высотой 25 мм. Торцевая поверхность образцов была обработана цилиндрической фрезой на горизонтально-фрезерном станке. Образцы обрабатывали при различных режимах, в результате чего были получены поверхности с различной микрогеометрией.

Для расчета КПК шероховатых волнистых поверхностей необходимо знать механические характеристики материалов контактирующих деталей и параметры шероховатости и волнистости. Механические характеристики материалов исследованных образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Механические характеристики волнистых образцов

№ образца	Материал	Микротвердость $H$ , МПа	Модуль Юнга $E$ , ГПа
1, 2	Сталь У8	9 000	209
3–6	Сталь 45	4 460	209
7, 8	Сталь 12Х18Н9Т	4 600	195
9, 10	Бронза БрБ2	3 320	127
11, 12	Алюминий АД1	420	70

Микротвердость определялась с помощью прибора ПМТ-3 по стандартной методике ГОСТ 9450-76, значения модуля упругости были приняты на основании справочных данных.

Для установления КПК был использован метод тонких угольных пленок – один из вариантов метода определения площадок контакта с помощью информаторов [3]. Этот метод в оригинале предназначен для определения ФПК и предполагает достаточно жесткие требования к качеству подготовки образцов и нанесению слоя информатора на их поверхность. Слой угольной пленки и подслоя – тонкая пленка смазки – должны наноситься испарением в вакууме. В настоящее время способ является отработанным, хотя и может давать значительную погрешность, так как с увеличением толщины пленки отдельные отпечатки пятен фактического контакта

<sup>1</sup> Параметры, нормируемые ГОСТ Р ИСО 4287-2014, обозначаются двумя и более символами ( $Rp$ ,  $RSm$  и т.п.). Такие обозначения неудобны для использования в математических выражениях, особенно в научных публикациях, так как составное обозначение из нескольких символов может быть ошибочно интерпретировано как произведение нескольких количественных величин. Эта проблема решена в российском стандарте ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014. В данном нормативном документе за каждым термином следует его параметр (сокращенный термин), а затем его символ, состоящий из одной буквы с индексом (при необходимости), например  $Sq$ ,  $S_q$  или  $Smr(c)$ ,  $S_{mr}(c)$ . В настоящей статье мы придерживаемся такого же принципа: в тексте для обозначения параметра используется сокращенный термин, а в уравнениях – соответствующий символ.

могут сливаться друг с другом. Поскольку для определения КПК это обстоятельство не влияет на конечный результат измерения, то способ угольных пленок можно перенести на измерения КПК, значительно упростив методику.

Образцы промывали в бензине, исследуемую поверхность очищали ацетоном и спиртом и протирали насухо. На поверхность наносили тонкий слой технического вазелина. Затем поверхность протирали хлопчатобумажной тканью и на нее наносили тонкий слой ламповой копоти (пламенной сажи). Толщину полученной угольной пленки контролировали визуально и по цвету пленки.

Контакт образца, на поверхность которого был нанесен слой информатора, и образца, имеющего чистую поверхность, осуществляли на приборе для измерения контактных деформаций [3]. Нормальная сжимающая нагрузка прикладывалась при помощи ходового винта и контролировалась по образцовому динамометру сжатия. Номинальное давление в экспериментах составляло от 1 до 15 МПа. Контурную площадь контакта определяли планиметрированием увеличенного изображения поверхности образцов. Параметры микрогеометрии поверхностей исследованных образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры микрогеометрии образцов

№ образца	Шероховатость			Волнистость		
	$R_p$ , мкм	$RSm$ , мм	$tm$	$W_p$ , мкм	$WSm$ , мм	$tmw$
1	2,5	0,25	0,55	5,1	3,3	0,54
2	0,8	0,07	0,56	0,9	4,8	0,61
3	13	0,23	0,44	32	3,5	0,39
4	20	0,29	0,50	19	2,1	0,48
5	10	0,21	0,50	12	1,5	0,43
6	14	0,17	0,41	13	1,4	0,47
7	5,0	0,32	0,59	15	2,3	0,43
8	6,5	0,25	0,37	15	2,3	0,45
9	6,1	0,25	0,53	14	3,0	0,45
10	7,5	0,28	0,51	12	2,7	0,53
11	8,0	0,35	0,50	31	3,4	0,38
12	8,0	0,28	0,53	24	3,0	0,39

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные значения относительной КПК приведены на рис. 2 в сравнении с теоретическими зависимостями по формуле (3). Расчетные зависимости КПК от номинального давления в основном разумно согласуются с характером экспериментальных зависимостей (пунктирные линии на рис. 2), при этом отклоняются от последних как в большую, так и в меньшую сторону. Это свидетельствует о случайном характере данных отклонений.

Оценивая расхождения теоретических и экспериментальных зависимостей КПК от номинального давления, следует учитывать следующее. Контурная площадь оказывает сравнительно небольшое влияние на основные характеристики контакта шероховатых поверхностей – ФПК, число и размер пятен фактического контакта. Например, ФПК шероховатых поверхностей зависит от контурной площади в степени  $1/5$  и менее, так что 50%-я погрешность в величине КПК дает ошибку в величине ФПК менее 10 %.

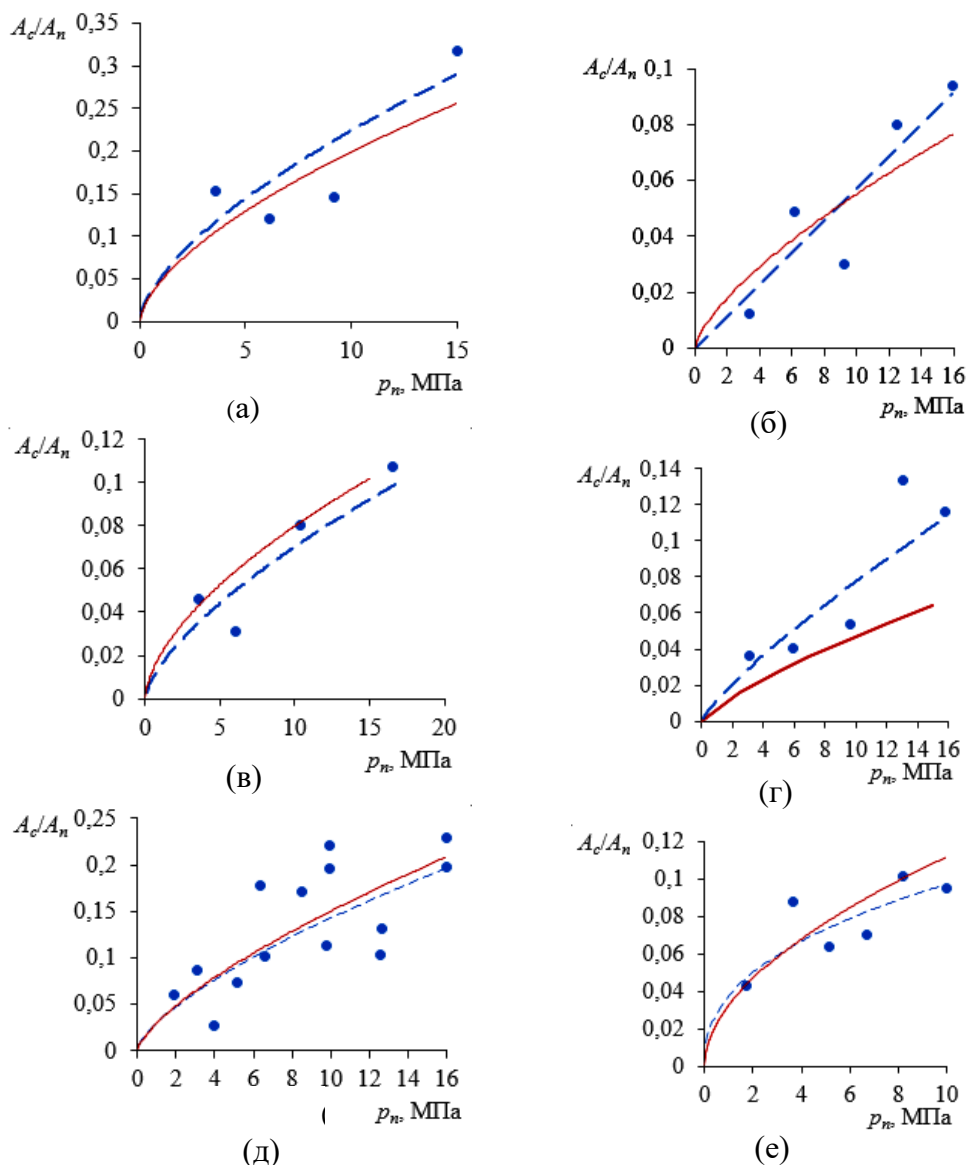


Рис. 2. Зависимость относительной КПК от номинального давления для контактных пар (см. табл. 2): 1, 2 (а); 3, 4 (б); 5, 6 (в); 7, 8 (г); 9, 10 (д); 11, 12 (е); точки – экспериментальные данные; сплошная линия – расчет по формуле (3); пунктир – степенная аппроксимация экспериментальных данных по методу наименьших квадратов

Эксперименты подтверждают теоретические оценки величины КПК от нескольких сотых до нескольких десятых долей номинальной площади в зависимости от контактного давления. С ростом номинального давления величина КПК увеличивается, и данное увеличение можно описать степенной зависимостью. Согласно экспериментальным результатам, показатель степени в этой зависимости изменяется в пределах 0,4–1 и равен в среднем 0,7. Теоретические значения показателя степени в зависимости КПК от номинального давления лежат в пределах 0,54–0,77 при среднем значении 0,66, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе эксперимента показано, что площадь контакта деталей машин, рельеф поверхности которых включает шероховатость и волнистость, существенно меньше

площади контакта деталей, рельеф поверхности которых содержит только шероховатость. Контурная площадь контакта, образовавшаяся в результате деформации волн под действием приложенного к контакту нормального давления, составляет от нескольких единиц до нескольких десятков процентов от номинальной площади контакта. Предложенные теоретические зависимости позволяют оценить величину КПК по известным параметрам микрогеометрии контактирующих поверхностей и механическим характеристикам материалов деталей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М.: Наука. 1970. 227 с.
2. Болотов А.Н., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах: монография. Тверь: ТвГТУ. 2019. 164 с.
3. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография. Тверь: ТГТУ. 2010. 116 с.

**Для цитирования:** Измайлов В.В., Гусев А.Ф. Влияние волнистости поверхностей на характеристики контактного взаимодействия деталей машин // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 1 (21). С. 14–20.

#### INFLUENCE OF SURFACE WAVINESS ON CHARACTERISTICS OF CONTACT INTERACTION OF MACHINE PARTS

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., A.F. GUSEV, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

The influence of waviness of technical surfaces on the contact interaction of machine parts has been studied. The parameters of roughness and waviness of the surfaces of experimental samples according to GOST R ISO 4287-2014, the mechanical properties of the sample materials and a description of the experimental methodology are given. Theoretical dependences of the contour contact area on the nominal pressure, the parameters of roughness and waviness of the contacting surfaces and the mechanical properties of the materials of the contacting parts are proposed. It has been shown theoretically and experimentally that waviness significantly affects the size of the contact area of machine parts. It is observed that, depending on the magnitude of the nominal contact pressure, the contour area formed by elastic wave deformation ranges from a few units to several tens of per cent of the nominal contact area.

*Keywords:* contact interaction, roughness, waviness, contour contact area.

Поступила в редакцию/received: 27.11.2023; после рецензирования/revised: 12.12.2023;  
принята/accepted: 15.12.2023