

УДК 681.2.082:531.45

## ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ НА СТАЛИ С АКРИЛОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

Ризноокая Н.Н., Пантелеев К.В., Микитевич В.А., Касьмин В.Ю., Красневский Д.Ю.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Проведены измерения моментов трения качения стальных шариков по стальной поверхности и по поверхности из стали с акриловым покрытием. Полученные результаты показали существенные отличия формы кривых моментов трения качения для разных пар трения.

**Ключевые слова:** трение качения, сталь с акриловым покрытием, момент трения качения, предварительное смещение.

## ROLLING FRICTION ON ACRYLIC COATED STEEL

Riznookaya N., Pansialeu K., Mikitsevich U., Kasmin V., Krasnevskiy D.

Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The rolling friction moments of pairs steel-steel and steel- steel with an acrylic coating were measured. The results showed significant differences in the shape of the rolling friction moments curves for different friction pairs.

**Key words:** rolling friction, steel with an acrylic coating, rolling moment, pre-displacement.

Адрес для переписки: Н.Н. Ризноокая, пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: Riznookaya@bntu.by

Одной из величин, характеризующих физико-механические свойства поверхности материалов является коэффициент трения качения. Данный коэффициент носит интегральный характер и в режиме предварительных смещений мало информативен. Ранее авторами были разработаны оригинальные средства и методики измерения моментов трения качения шариков на плоской поверхности в условиях, когда смещение шариков существенно меньше диаметра пятна контакта [1, 2]. Принцип действия устройства основан на измерениях амплитуд свободных затухающих колебаний маятника, опирающегося шариком на плоскую поверхность.

**Целью данного исследования** являлось исследование моментов трения пар трения с разными показателями твердости.

**Момент сил сопротивления качению.** В соответствии с [2], было высказано предположение, что момент сил сопротивления качению можно представить, как результирующее воздействие двух моментов:  $M_{fr}(\varphi)$  – «диссипативного» связанного с силами адгезии при разрыве и внутреннем трении в материале и  $M_{el}(\varphi)$  – адгезионного, при котором силы адгезии «не рвутся».

$$M(\varphi) = M_{fr} + M_{el}(\varphi) \approx$$

$$\approx \left[ -mgR(c + b\varphi^p) \operatorname{sign}\left(\frac{d\varphi}{dt}\right) \right] +$$

$$+ \left[ 2\gamma a^2 R |\varphi|^{n+1} \left( \frac{\pi}{2} - \frac{R}{a} \varphi \right) \cdot \operatorname{sign}(\varphi) \right] \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол отклонения маятника от положения равновесия,  $m$  – масса маятника;  $g$  – ускорение свободного падения;  $R$  – радиус шарика;  $c, b, p$  – параметры аппроксимации, определяемые из экс-

периментальной зависимости амплитуды от времени,  $a$  – радиус пятна контакта;  $\gamma, n$  – параметры аппроксимации, определяемые из экспериментальной зависимости периода от амплитуды, причем параметр  $\gamma$  характеризует давление сил адгезии, действующее между поверхностью шарика и исследуемой поверхностью [3].

Используя эти уравнения в качестве уравнений регрессии для аппроксимации соответствующих зависимостей, полученных на эксперименте, можно определить численное значение параметров аппроксимации.

Зависимость  $M_{el}(\varphi)$  позволяет построить скелетную кривую и зависимость  $M_{fr}(\varphi)$  – построить петлю гистерезиса вокруг скелетной кривой.

**Результаты измерений и расчетов.** В экспериментах использовался маятник массой 0,4 кг, в котором в качестве опоры использовался шарик радиусом  $R = 6,05$  мм, выполненный из стали ШХ15 ( $Ra = 63$  нм,  $E_{st} = 2,11 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\nu_{st} \approx 0,28$ ).

Исследовались 2 образца. Первый образец представляет собой плоскую полированную пластину из стали 08ПС. Физико-механические свойства стали 08ПС указаны в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические свойства стали 08ПС

HB	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$E \cdot 10^{-5}$ , МПа	$G \cdot 10^{-5}$ , МПа
98	365	175	2,03	0,74

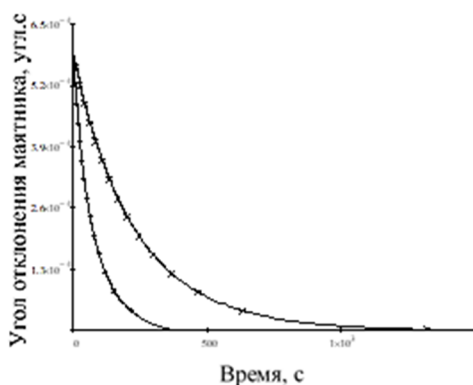
Второй образец представлял собой плоскую полированную пластину из стали 08ПС покрытую акриловым лаком КУ-9010. Состав: модифицированная акриловая смола, функциональные добавки, бутиловый спирт, метилацетат, ксилол, пропан, бутан, диметилловый эфир.

Физико-механические свойства акрилового лака указаны в табл. 2.

Таблица 2. Физико-механические свойства акрилового лака

Твердость пленки по маятниковому прибору М-3, по ГОСТ 5233-89, усл. ед., не менее	0,3
Прочность покрытия при прямом ударе на приборе У-1, ГОСТ 4765-73, см, не менее	40

На каждом из представленных образцов проводили по 3 измерения в трех точках. Зависимости амплитуды колебаний маятника от угла отклонения маятника для пары сталь-сталь с акриловым покрытием, представлена на рис. 1.



xxx – для пары сталь – сталь;  
+++ – для пары сталь – сталь с акриловым покрытием

Рисунок 1 – Зависимость амплитуды колебаний маятника от угла отклонения маятника (усредненное значение по 3 точкам)

В табл. 3 представлены результаты измерений.

Таблица 3. Результаты измерений

Параметр трения качения	Пара сталь – сталь	Пара сталь – сталь с акриловым покрытием
$c, 10^{-9}$	9	136
$p$	0,012	0,176
$b$	1,071	1,247
$T_0, с$	3,39	2,20
$\gamma, 10^6 Н/м^2$	58,2	15,6
$n$	0,3126	0,3021
Радиус пятна контакта (расчетный), мкм	53	155
Коэффициент трения качения, $10^{-6}$	1,06	3,45
Поверхностная плотность сил адгезии на отрыв, $10^{-3} Дж/м^2$	37,2	68,4
$M_{fr}(10 \text{ угл. с}), нН \cdot м$	6,11	21,44
$M_{el}(10 \text{ угл. с}), нН \cdot м$	5,26	17,72
$M(10 \text{ угл. с}), нН \cdot м$	11,37	39,16

На рис. 2 и 3 представлены графики зависимости моментов сил сопротивления качения от угла

отклонения маятника в пределах одного цикла качения с амплитудой 10 угл. с, построенные по формуле (1).

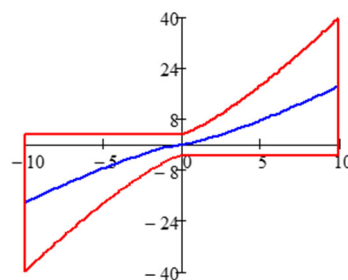


Рисунок 2 – График зависимости момента сопротивления качения (в единицах нН·м) от угла отклонения маятника (в единицах угл. с) для пары сталь – сталь с акриловым покрытием

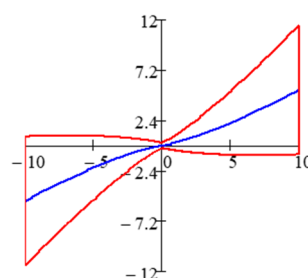


Рисунок 3 – График зависимости момента сопротивления качения (в единицах нН·м) от угла отклонения маятника (в единицах угл. с) для пары сталь – сталь

**Заключение.** Представленные результаты подтверждают универсальность маятникового метода. Однако приведенные числовые значения для коэффициентов аппроксимации, определяемые для акрилового покрытия являются весьма приблизительными, так как при расчете следует учитывать модули Юнга и сдвига материалов, а стандартные сведения для акрилового лака отсутствуют. Наиболее информативными в данном случае являются поверхностная плотность сил адгезии на отрыв и параметр  $\gamma$  характеризует давление сил адгезии, действующее между поверхностью шарика и исследуемой поверхностью.

**Литература**

1. Джилавдари, И. З. Устройство и методика измерения моментов сил сопротивления качению на пятне контакта / И. З. Джилавдари, С. Мекид, Н. Н. Ризноокая // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, №. 4. – С. 308–321.
2. Gilavdary, I. A new theory on pure pre-rolling resistance through pendulum oscillations / I. Gilavdary [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2013. – Vol. 227, №. 6. – P. 618–628.
3. Popov, V. L. Contact mechanics and friction: Physical Principles and Applications / V.L. Popov. – Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg, 2017. – P. 231–253.