

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КАЧЕНИЮ КОЛЕСА ПО РЕЛЬСУ

И. Р. КОНЯХИН

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

### Смещение неподвижного колеса

Для исследования износа поверхностей колес и рельсов от усталости, необходимо знать величину предварительного смещения их относительно друг друга.

По опытам Н. А. Карпова [1] значение указанного микросдвига в зависимости от нормальной нагрузки выражено формулой

$$\delta = \sqrt{\frac{N}{K}}, \quad ($$

где  $\delta$  — величина предварительного смещения,  $N$  — нормальная нагрузка,  $K$  — некоторый коэффициент, равный для стали  $8,3 \cdot 10^8 \text{ кг/см}^2$ .

В приведенной формуле статический коэффициент трения не содержится, он входит в величину  $K$ . Нами проводились опыты с микросмещением образцов на приборе, который является некоторым усовершенствованием прибора А. В. Верховского [2], результаты экспериментов подтвердили зависимость, данную Н. А. Карповым. Кроме того, нами исследовалась связь величины предварительного смещения также с коэффициентом статического трения  $\mu_s$  путем повторения тех же опытов при разных значениях **последней**.

Ниже приведены результаты в виде таблицы.

$\sqrt{K}$	$18,4 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$	$9,3 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^4$
$\frac{1}{\mu_s}$	5,6	2,8	2,5	1,6	1,33

Если по этим данным построить график в координатах  $\sqrt{K}$ ;  $\frac{1}{\mu_s}$ , то усматривается линейная зависимость

$$\sqrt{K} = \sqrt{R \cdot \frac{1}{\mu_s}},$$

где  $\sqrt{R}$  — коэффициент пропорциональности.  
Отсюда

$$K = \frac{R}{\mu_s^2}.$$

Подставив это в выражение 1, получим

$$S_k = \mu_s \sqrt{\frac{N}{R}}, \quad (2)$$

$S_k$  — величина упругого предварительного смещения,  
 $R$  — коэффициент, зависящий от материала и характеризующий собой жесткость контакта в тангенциальном направлении.

Так как микросмещение в данном случае является упругой деформацией сдвига материалов в контакте, а шероховатость поверхностей во всех опытах была примерно одинаковой (7 мк), то следовало сделать попытку связать коэффициент  $R$  с модулем сдвига  $G$ , исследовав для этого несколько материалов.

Во всех последующих опытах верхний образец применялся один и тот же, изготовленный из закаленной стали, нижние образцы были сделаны из разных материалов; их контактные площадки обрабатывались одной и той же наждачной шкуркой. В опытах замерялась величина предварительного смещения  $S_k$ ; определялся коэффициент трения „ $\mu_s$ “ и затем по формуле 2 находилась величина  $R$ .

В таблице ниже проведены значения  $R$  и модулей сдвига для некоторых материалов.

Материал	Зак. сталь	Сталь 3	Чугун	Медь	Бронза	Цинк	Латунь
$R \cdot 10^{-8} \text{ кг/см}^2$	23	19,7	14	11	8,8	7,5	6,25
$G \cdot 10^{-6} \text{ кг/см}^2$	0,9	0,8	0,55	0,40	0,38	0,37	0,30

По этим данным построен график рис. 1.

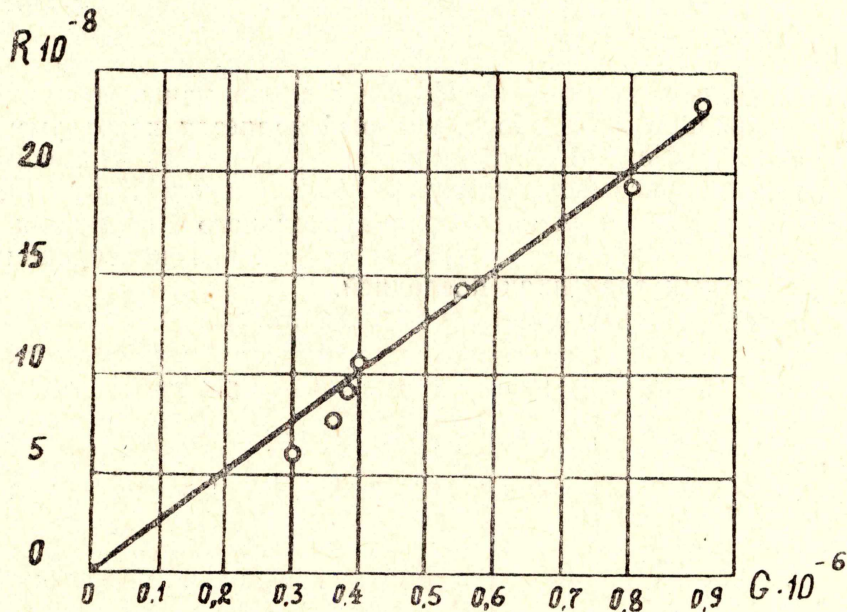


Рис. 1. Некоторая корреляция между коэффициентом  $R$  и модулем сдвига  $G$ .

С некоторым приближением будем считать, что на графике рис. 1 наблюдается линейная зависимость между  $G$  и  $R$ , тогда

$$G = \Psi^2 \cdot R. \quad (3)$$

Здесь  $\Psi$  — коэффициент пропорциональности.

Как выяснилось экспериментами с поверхностями, имеющими микронеровности от 1 до 12 микронов, величина  $\Psi$  от шероховатости не зависит.

Для всех испытанных материалов он имеет в среднем значение  $\Psi = 0,02$ , отклоняясь от опыта к опыту иногда до 12% в обе стороны, причем неопределенным образом.

Из совместного решения (2) и (3) получается

$$S_k = \Psi \mu_s \sqrt{\frac{N}{G}}$$

### Предварительное смещение при качении колеса по рельсу

При нажатии колеса на рельс силой  $N$  в местах их касания образуется контактная площадка в виде эллипса, расположенного большей осью поперек пути. Эта площадка во время движения перемещается вдоль рельса.

Ввиду различия в нормальном давлении на разных точках контакта, обусловленного разностью высот микровыступов и кривизной соприкасающихся поверхностей, давление по микровыступам распределяется неравномерно. Так как микроэлементы контакта нажаты по-разному, то и сила статического трения на них различна [3].

Возьмем на рельсе неподвижную площадку, равную контактной, и пусть по ней перемещается колесо. Движущийся контактный эллипс сначала коснется выбранного нами неподвижного эллипса, потом совпадет с ним и затем сойдет с него. Вступая на данное место, колесо постепенно нагружает его до максимума силой  $N$ , так как наибольшее давление имеет место в центре движущейся контактной площадки, колесо разгружает ее до нуля. В это же время касательно на площадку рельса действует тяговое усилие, направленное относительно головки рельса в сторону, противоположную движению.

Так как сила трения прямо пропорциональна нормальной силе, то на данной неподвижной площадке она вместе с нормальной нагрузкой сначала возрастает, затем убывает, оставаясь пропорциональной нормальной нагрузке. Ввиду действительности закона трения Кулона для каждого микровыступа шероховатой поверхности трение на них исчезает вместе с нажатием, и во время прохода движущейся контактной площадки через неподвижную постепенно возрастают и затем убывают как количество действующих микровыступов, так и сила статического трения вместе с нормальной нагрузкой.

Аналогично этому нами проводились опыты на образцах сталь по стали. При их смещении одновременно прикладывались нормальная нагрузка и смещающее усилие таким образом, чтобы они возрастали и убывали, оставаясь пропорциональными друг другу.

Один из опытов был проведен при постоянной нагрузке  $N = 45$  кг и для сравнения — другой при меняющемся давлении, при этом отношении сил  $\mu_c = \frac{P}{N} = 0,6$ . Результаты этих опытов показаны в двух следующих таблицах:

Первый опыт

$N$ кг	45	45	45	45	45	45
$P$ кг	0	5	10	15	20	25
$S_k$ мк	0	0,076	0,184	0,304	0,448	0,620

Второй опыт

$N$ кг	0	5	15	25	35	45
$P$ кг	0	3	9	15	21	27
$S_k$ мк	0	0,132	0,324	0,448	0,572	0,712

Если по данным таблиц построить графики в координатах  $P; S_k$ , то в первом случае получается кривая, расположенная выпуклостью вверх, во втором же случае — наоборот. Во втором случае, при постепенном уменьшении обеих нагрузок, оставляя их пропорциональными друг другу, т. е. при  $\mu_c = \frac{P}{N} = 0,6$ , предварительное смещение не происходит, верхний образец относительно нижнего неподвижен. Микровыступы, упруго сдвинутые предварительным смещением, в процессе указанной разгрузки постепенно один за другим проскальзывают и благодаря микротрению превращают свою упруго-потенциальную энергию в теплоту. Благодаря этому и происходит потеря энергии в контакте при качении колеса по рельсу. Площади графиков соответствуют величине потерь энергии в контакте.

**Зависимость величины предварительного смещения от соотношения смещающей силы и нормальной нагрузки  $\mu_c = \frac{P}{N}$**

Для выявления величины упругого микротрения от соотношения смещающей силы и нормальной нагрузки проводились опыты на тех же образцах. Нагружение нормальным усилием и силой смещения делалось одновременно при постоянном их соотношении  $\mu_c = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$ , при коэффициенте статического трения  $\mu_s = 0,67$ . Смещение каждый раз производилось до тех пор, пока сила не достигала значения  $N = 45$  кг.

Результаты опытов показаны в таблице.

$\mu_c = \frac{P}{N}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$S$ мк	0,086	0,20	0,32	0,42	0,60	0,71

Таблица показывает, что чем больше отношение  $\frac{P}{N}$ , тем больше величины упругого смещения материала контакта. Эти опыты, как было сказано, проходили при постоянном коэффициенте трения  $\mu_s$ , поэтому влияние его не выяснено. Чтобы выяснить это, мы в качестве меры смещения выбрали величину  $\alpha = \frac{\mu_s}{\mu_c}$ , это было сделано на основании некоторых дополнительных опытов.

Ранее нами был найден коэффициент  $R$  — как постоянная величина для смещения при постоянном  $N$ . В настоящем же случае, когда мы имеем дело с переменной нагрузкой  $N$ , величина  $R$  не остается постоянной.

На графике получается примерно линейная зависимость между жесткостью  $R$  и коэффициентом смещения  $\alpha = \frac{\mu_s}{\mu_c}$  при этом независимо от  $\mu_s$  точки ложатся на одну и ту же прямую, например, точки, отмеченные цифрами 0,2; 0,4 и 0,58.

По наклону прямой графика примем

$$\sqrt{R} = \sqrt{b\alpha},$$

где  $\sqrt{b}$  — коэффициент пропорциональности, иначе  $R = b \cdot \alpha^2$ .

В опытах со сталью было получено при постоянном  $N$   $R = 19,7 \cdot 10^8 \text{ кг/см}^2$  из последнего графика тоже для стали

$b = 10,5 \cdot 10^8 \text{ кг/см}^2$  их отношение  $\frac{R}{b} = 1,8$ .

Приблизительно возьмем  $\frac{R}{b} = 2$ . Предполагаем, что отличие  $\frac{R}{b}$  от 2 получилось из-за различия в шероховатостях площадок в опытах первой и второй серий.

Таким образом, принимаем

$$R = 2b.$$

Ранее мы имели

$$S_k = \mu_s \sqrt{\frac{N}{R_c}};$$

из последнего графика

$$R = \alpha^2 \cdot b,$$

подставляя последнее выражение в предыдущее, получим

$$S_n = \mu_s \sqrt{\frac{N}{\alpha^2 b}};$$

ранее коэффициент был представлен как

$$\Psi = \frac{G}{R},$$

следовательно

$$\Psi = \frac{G_c}{2b},$$

откуда

$$b = \frac{G}{2\Psi}.$$

Заменив для  $S_n$  величину  $b = \frac{G}{2\Psi}$ , найдем

$$S_n = \mu_s \sqrt{\frac{2N\Psi}{G\alpha^2}}.$$

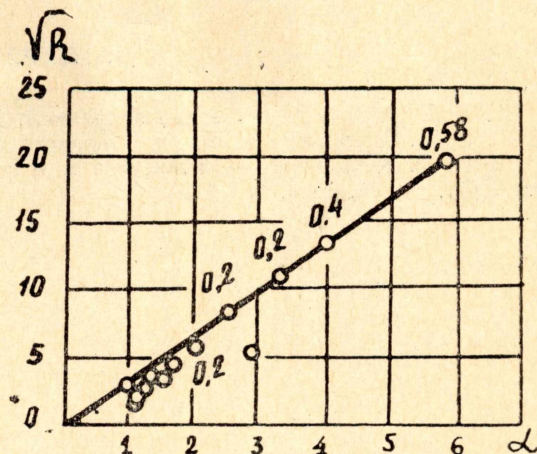


Рис. 2. Примерная линейность зависимости  $\sqrt{R}$  и  $\alpha$ .

В последнем выражении заменим  $\alpha = \frac{\mu_s}{\mu_c}$ , как было принято ранее, тогда

$$S_{\Pi} = \nu_s \sqrt{\frac{2N\psi^2\mu_c^2}{G\mu_s^2}}$$

или окончательно

$$S_{\Pi} = \Psi\nu_c \sqrt{\frac{2N}{G}}, \quad (5)$$

По этой формуле можно подсчитывать величину предварительного смещения качения колеса по рельсу при наличии тягового усилия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Андреев. Передача трением. Машгиз, 1963.
  2. В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела. т. IV, Томск, 1947.
  3. И. Р. Коняхин. Статическое микросмещение одного тела по другому. Известия ТПИ, т. 114, 1964.
-