

$$k_r \geq \frac{\Delta_s}{k_\varphi [\Delta_s]}, \quad (5)$$

где  $\Delta_s$  — погрешность измерения длины записи сечения, мм;  $[\Delta_s]$  — составляющая допускаемой абсолютной погрешности измерения длины сечения, мм.

Выражения (3), (4), (5) являются исходными для нахождения коэффициентов преобразования координат, по которым определяются параметры и проектируется кинематика бездифференциальных и дифференциальных регистрирующих приборов.

УДК 669.018.25:532.635

С.И.МОИСЕЕНКО, С.А.ИВАЩЕНКО (БПИ)

### О КОНТАКТИРОВАНИИ СФЕРЫ С ПОКРЫТИЕМ ИЗ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ СПЛАВОВ

При изготовлении узлов прецизионных приборов, например направляющих качения, удовлетворяющих ряду специальных требований (немагнитность, вакуумная плотность, коррозионная стойкость, высокая износостойкость и точность), применено плазменное упрочнение рабочих поверхностей самофлюсующимися твердыми сплавами на основе Ni—Cr—B—Si.

С целью выбора марки сплава для обеспечения необходимой точности перемещения деталей при действии контактных нагрузок проведено исследование жесткости пары плоскость—сфера. Для проведения исследований были изготовлены стальные образцы, упрочненные плазменным напылением самофлюсующимися твердыми сплавами. Для уменьшения влияния на проведение эксперимента контактных перемещений за счет смятия микронеровностей плоских поверхностей образцов они были обработаны до шероховатости Ra 0,045...0,073 на плоскошлифовальном станке 3701 кругом ПП 200x20x40 63 С 16Б М37К3 35 м/с со следующими режимами резания: глубина 0,006 мм, поперечная подача 0,2 мм/дв. ход с охлаждением 5%-ной эмульсией. Для сравнения также использованы образцы из закаленной стали ШХ15 и стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки, обработанные аналогичным образом. Данные о твердости и шероховатости исследуемых материалов приведены в табл. 1.

Оценка жесткости проводилась путем измерения величины внедрения трех сферических инденторов ( $r_{\text{сф}} = 17$  мм, твердость HRC<sub>3</sub> 64...66) в плоскую поверхность образцов под действием нагружающей силы Р на модернизированном варианте специальной установки в Брянском институте транспортного машиностроения. Обработанные результаты испытаний приведены на рис. 1 (нагрузочная ветвь).

Из представленных зависимостей можно сделать лишь качественные выводы о сравнительной жесткости упрочненных поверхностей, так как они описывают частный случай внедрения сферических инденторов определенного диаметра.

## Твердость и шероховатость исследуемых материалов

Параметр	Материал поверхностного слоя					
	12Х18Н10Т	ШХ-15	ПГ-СР2	ПГ-СР3	ПГ-СР4	СНГН
Твердость	НВ1500...1550	HRC <sub>3</sub> 60...61	HRC <sub>3</sub> 40...41	HRC <sub>3</sub> 54...55	HRC <sub>3</sub> 55...56	HRC <sub>3</sub> 55...56
Шероховатость Ra, мкм	0,067...0,073	0,064...0,067	0,056...0,063	0,062...0,073	0,051...0,060	0,046...0,049

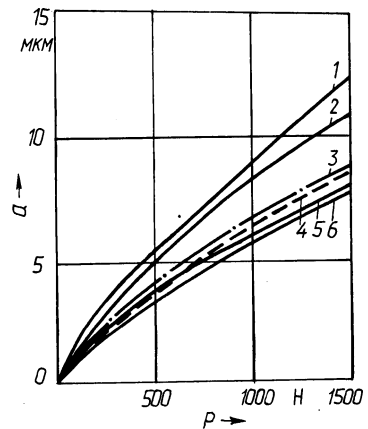


Рис. 1. Зависимость величины внедрения сферических инденторов от нагрузки:  
 1 — сталь 12Х18Н10Т; 2, 3, 4, 5 — сплав ПГ-СР2; ПГ-СР4; ПГ-СР3; сталь ШХ15; 6 — сплав СНГН

Поэтому представляется необходимым вывести универсальные зависимости внедрения сферы в плоскость от удельной нагрузки или нагружающей силы и радиуса сферы с целью их практического применения для решения задач контактирования поверхностей, упрочненных самофлюсующимися сплавами со сферой.

Известно, что внедрение сферы в плоскость подчиняется степенной зависимости и может быть выражено формулой

$$a = Cq^m, \quad (1)$$

где  $a$  — внедрение сферы в плоскость, мм;  $q$  — удельная нагрузка, Н/мм<sup>2</sup>;  $C$  и  $m$  — параметры внедрения.

Логарифмируя выражение (1), можно получить зависимость внедрения от удельной нагрузки в виде линейной функции

$$\lg a = \lg C + m \lg q,$$

где  $m$  — тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс ( $\lg q$ );  $\lg C$  — отрезок, отсекаемый этой прямой на оси ординат ( $\lg a$ ).

Значение коэффициентов  $C$  и  $m$  можно определить по двум точкам, т.е. определить внедрение индентора  $a_1$  и  $a_2$  для двух значений нагрузок  $P_1$  и  $P_2$ .

Тогда

$$m = \frac{\lg a_2 - \lg a_1}{\lg q_{P_2} - \lg q_{P_1}} ; \quad (2)$$

$$\lg C = \frac{\lg a_1 \cdot \lg q_{P_2} - \lg a_2 \cdot \lg q_{P_1}}{\lg q_{P_2} - \lg q_{P_1}} . \quad (3)$$

Здесь  $q_{P_1}$  и  $q_{P_2}$  — удельная нагрузка, соответствующая нагрузкам

$P_1$  и  $P_2$  соответственно.

Удельная нагрузка определяется как отношение силы  $P$  к площади контакта. Площадь контакта  $F$  может быть определена из схемы внедрения (рис. 2) по формуле

$$F = \pi \rho^2 = \pi (r_{\text{сф}}^2 - (r_{\text{сф}} - a)^2) = \pi (2r_{\text{сф}} a - a^2) = 2\pi r_{\text{сф}} a - \pi a^2 . \quad (4)$$

Величину  $\pi a^2$  в формуле (4) можно не учитывать как пренебрежимо малую (погрешность менее 4 %).

Тогда удельная нагрузка в случае внедрения одного индентора может быть рассчитана по формуле

$$q = \frac{P}{F} = \frac{P}{2\pi r_{\text{сф}} a} . \quad (5)$$

Подставим выражение (5) в формулу (1)

$$a = c \left( \frac{P}{2\pi r_{\text{сф}}} \right)^m \quad (6)$$

и после преобразований получим

$$a = C \frac{1}{m+1} \left( \frac{P}{2\pi r_{\text{сф}}} \right)^{\frac{m}{m+1}} = C' \left( \frac{P}{2\pi r_{\text{сф}}} \right)^k , \quad (7)$$

где  $P$  — нагрузка, Н;  $r_{\text{сф}}$  — радиус сферы индентора, мм;  $C, m, C', k = \frac{m}{m+1}$  — параметры внедрения.

В результате обработки данных (см. рис. 1) по формулам (2) и (3) получены следующие значения параметров внедрения (табл. 2).

На основании вычисленных для различных материалов параметров  $C$  и  $m$  построен график внедрения сферы в плоскость в зависимости от удельной нагрузки  $q$  (рис. 3), характеризующий физико-механические свойства исследуемых материалов.

В результате проделанной работы определена жесткость покрытий из самофлюсующихся сплавов. Показано, что жесткость покрытия из сплава СНГН выше, чем у закаленной стали ШХ15 и других марок самофлюсующихся сплавов. При удельных нагрузках свыше 500 МПа сплавы ПГ-СР3 и ПГ-СР4 обла-

## Параметры внедрения

Материал поверхностного слоя	m	k	C	C'
12X18H10T	3,52	0,779	$1,024 \cdot 10^{-11}$	$3,716 \cdot 10^{-3}$
ПГ-СР2	3,15	0,759	$4,817 \cdot 10^{-11}$	$3,287 \cdot 10^{-3}$
ПГ-СР3	4,43	0,816	$5,649 \cdot 10^{-15}$	$2,374 \cdot 10^{-3}$
ПГ-СР4	2,62	0,724	$6,101 \cdot 10^{-10}$	$2,864 \cdot 10^{-3}$
СНГН	4,63	0,822	$9,569 \cdot 10^{-16}$	$2,151 \cdot 10^{-3}$
ШХ15	2,96	0,747	$5,568 \cdot 10^{-11}$	$2,584 \cdot 10^{-3}$

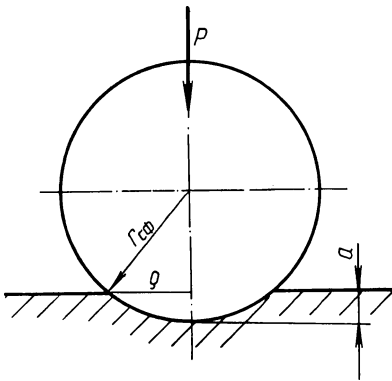
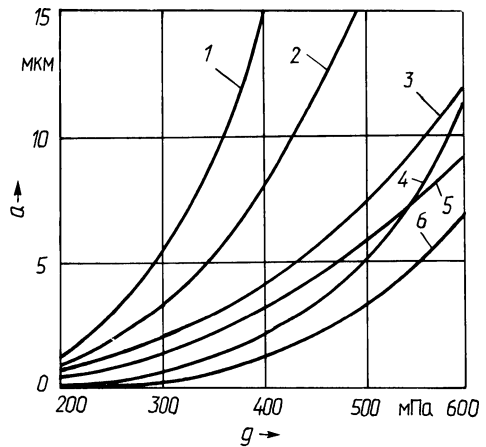


Рис. 2. Схема внедрения сферы в плоскость

Рис. 3. Зависимость величины внедрения индентора от удельной нагрузки:  
1 — сталь 12X18H10T; 2, 3, 4, 5 — сплав ПГ-СР2; ПГ-СР4; ПГ-СР3; сталь ШХ15;  
6 — сплав СНГН

дают примерно одинаковой жесткостью, меньшей, чем у ШХ15, однако при удельных нагрузках менее 500 МПа предпочтительнее использовать ПГ-СР3. Приведена формула и рассчитаны коэффициенты для определения величины внедрения сферы в плоскую поверхность из закаленной стали ШХ15, самофлюсующихся твердых сплавов и нержавеющей стали 12X18H10T в зависимости от нагрузки, радиуса сферы, а также удельной нагрузки.

Полученные результаты могут быть использованы в инженерных расчетах для определения жесткости сопрягаемых деталей типа плоскость—сфера.