УДК 621.81: 621.891

П.М. Огар, О.В. Максимова, В.А. Тарасов*

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ПЛОЩАДЬ КОНТАКТА СОПРЯЖЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Представлены аналитические зависимости, позволяющие создать инженерную методику определения относительной площади при контактировании жесткой шероховатой поверхности через полимерный слой в зависимости от параметров шероховатости, свойств материала и толщины полимерного слоя.

Ключевые слова полимерные покрытия, тонкослойные пленки, слоистое полупространство, шероховатая поверхность, контактные характеристики, относительная площадь контакта.

Одним из перспективных направлений, обеспечивающих повышение эксплуатационных показателей уплотнений и узлов трения, является нанесение на их рабочие поверхности полимерных покрытий или использование тонких полимерных пленок. Опыт эксплуатации узлов трения уплотнений с такими покрытиями показывает, что их уплотнительная способность и антифрикционные свойства определяется не только свойствами материала покрытия, но и его толщиной.

Известные рекомендации по выбору толщины полимерного слоя основаны на экспериментальных данных, нередко противоречивых. Отсутствие теории контактного взаимодействия шероховатых поверхностей через полимерный слой не позволяет разработать надежные методы прогнозировании характеристик трения и герметичности сопряжений и уплотнений на стадии проектирования, что требует проведения дорогостоящих и трудоемких испытаний по определению работоспособности узлов трения и уплотнений. Это и обусловило выбор темы.

Рассмотрим слоистое упругое полупространство, которое состоит из покрытия толщиной δ_1 с упругими характеристиками μ_1 и E_1 и основного материала с упругими характеристиками μ_0 и E_0. Точное решение задачи определения напряжений и деформаций при осесимметричном нагружении приведено в [1], однако оно трудоемко для инженерных расчетов. В работе [2] для этой цели предложено использовать теорию Герца и двухточечную аппроксимацию Паде для крайних значений толщины покрытия $\delta_1 = 0$ и $\delta_1 = \infty$. Авторами работы [3] на основании жесткостной модели разработана инженерная методика определения упругой характеристики θ_{01} в зависимости от толщины покрытия

$$\theta_{01} = \theta_1 F_1, \tag{1}$$

$$F_1 = \frac{1}{K_1(0)}\left[\frac{\left(K_1(0) - K_1(\bar{\delta}_1)\right)^2}{K_{01}(0) - K_{01}(\bar{\delta}_1)} + K_1(\bar{\delta}_1)\frac{K_0(\bar{\delta}_1)}{K_{01}(\bar{\delta}_1)}\frac{\theta_0}{\theta_i}\right]; \tag{2}$$

$$\theta_i = \frac{1-\mu_i^2}{E_i}; \quad \bar{\delta}_1 = \frac{\delta_1}{a}; \quad K_i(\bar{\delta}_1) = K_i(\bar{\delta}_1, \mu_i);$$

$$K_i(\bar{z}, \mu_i) = \operatorname{arcctg}\bar{z} - \frac{\mu_i}{1-\mu_i}\bar{z}(1 - \bar{z}\operatorname{arcctg}\bar{z}); \tag{3}$$

$\bar{z} = z/a$ — относительная координата; a – радиус площадки нагружения полупространства герцевской нагрузкой (при $a = a_r$ — радиус площадки контакта при внедрении сферического индентора).

Так как значения функции (3) для $\mu_i = 0{,}3\ldots0{,}5$ изменяются незначительно, то с погрешностью менее 1% можно принять

$$\mu_{01} = \mu_1 - \frac{\mu_1 - \mu_0}{\left|1 - \theta_0/\theta_1\right|}F_1. \tag{4}$$

Для случая контакта гладкой жесткой сферы со слоистым полупространством сближение тел определяется выражением

$$\omega_{01} = \omega_1 \cdot F_1^{\frac{2}{3}}.$$

Для радиуса контакта и максимального давления имеем

$$a_{01} = a_1 F_1^{\frac{1}{3}}, \qquad p_{01} = p_0 F_1^{-\frac{2}{3}}. \tag{5}$$

При контактировании шероховатой поверхности с упругим слоистым полупространством для отдельной неровности параметр $\bar{\delta}_{1i}$ можно представить в виде

$$\bar{\delta}_{1i} = \frac{\delta_1}{a_r} = \frac{\delta_1}{a_c}\cdot\frac{a_c}{a_r} = \gamma\cdot\eta_i^{-0.5},$$

где $\gamma = \dfrac{\delta_1}{a_c}$ — относительная толщина покрытия;

$\eta_i = \dfrac{a_r^2}{a_c^2}$ — относительная площадь контакта для отдельной неровности; a_c — радиус площадки, приходящийся на одну неровность.

Таким образом, для каждой контактирующей неровности согласно выражению (1) имеем

$$\theta_{01i}(\gamma, \eta_i) = \theta_1 F_{1i}(\gamma, \eta_i), \tag{6}$$

где $F_{1i}(\gamma_1 \eta_i)$ определяется выражением (2) с учетом (4).

Зависимости $F_{1i}(\gamma, \eta_i)$ и $\mu_{01}(\gamma, \eta_i)$, определенные в среде Mathcad для $E_0 = 2{,}01$ ГПа, $\mu_0 = 0{,}3$ (сталь) и $E_1 = 2{,}39$ ГПа, $\mu_1 = 0{,}38$ (фторопласт Ф4), представлены на рис.1.

* – автор, с которым следует вести переписку.

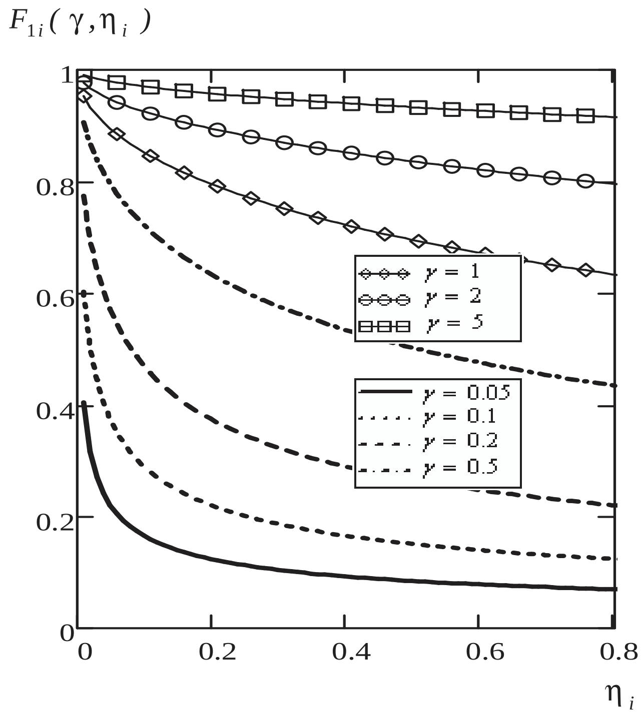

Рис.1. Зависимости параметров $F_{1i}(\gamma, \eta_i)$ относительной площади контакта отдельной неровности при разных значениях относительных толщин покрытия

Как следует из рис. 1 при изменении относительной толщины покрытия γ в пределах 0,05…0,5 и относительной площади контакта η_i в пределах 0…0,8 величина параметра $F_{1i}(\gamma, \eta_i)$ может измениться на порядок. В соответствии с принятым допущением (4) величина $\mu_{01}(\gamma, \eta_i)$ для этих же пределов γ η_i изменяется в пределах 0,3…0,38 (рис.1*б*).

При использовании дискретной модели шероховатости распределение микронеровностей по высоте должно определяться исходя из опорной кривой профиля. Если опорную кривую профиля описывать отношением неполной бета-функции, то плотность распределения неровностей по высоте описывается выражением [4,5]

$$\varphi_n'(u) = \frac{u^{\alpha-2}(1-u)^{\beta-2}\left[(\alpha-1)(1-u)-(\beta-1)u\right]}{\varepsilon_s^{\alpha-1}(1-\varepsilon_s)^{\beta-1}}, \quad (7)$$

где
$$\alpha = \left(\frac{R_p}{R_q}\right)^2\left(\frac{R_{\max}-R_p}{R_{\max}}\right) - \frac{R_p}{R_{\max}},$$

$$\beta = \alpha\left(\frac{R_{\max}}{R_q}-1\right), \qquad \varepsilon_s = \frac{\alpha-1}{\alpha+\beta-2},$$

Rp, *Rq*, $R_{\max}$ — параметры шероховатости по стандарту ISO 4281/1-1997.

Приведем вначале выражения, необходимые для определения зависимости относительной площади контакта η_{1i} от безразмерного силового упругогеометрического параметра при контактировании жесткой шероховатой поверхности с упругим полупространством из материала покрытия.

Относительная площадь контакта η_{1i} для отдельной неровности с учетом влияния остальных неровностей при нагружении шероховатой поверхности контурным давлением q_c равна

$$\eta_{1i}(\varepsilon,u) = \frac{\varepsilon-u}{2\omega} - F_q\left[(1+0{,}5F_q)\left(1-\sqrt{1-\frac{\varepsilon-u}{2\omega(1+0{,}5F_q)^2}}\right)\right], \quad (8)$$

где ε — параметр, определяющий относительную высоту неровности, для которой контакт происходит в точке касания; F_q — безразмерный силовой упругогеометрический параметр

$$F_q = \frac{q_c\theta_1 a_c}{\omega R_{\max}}. \quad (9)$$

Контурное давление q_{ci}, приходящееся на отдельную неровность, с учетом влияния остальных неровностей определяется выражением

$$q_{ci}(\varepsilon,u) = \frac{8\eta_{1i}^{1,5}(\varepsilon,u)\,\omega R_{\max}}{3\pi\theta_1 a_c} + q_c\psi_\eta(\varepsilon,u),$$

где

$$\psi_\eta(\varepsilon,u) = \frac{2}{\pi}\left[\arcsin\eta_{1i}^{0,5}(\varepsilon,u) - \sqrt{\eta_{1i}(\varepsilon,u)(1-\eta_{1i}(\varepsilon,u))}\right], \quad (10)$$

Суммируя нагрузку по всем контактирующим неровностям, получим

$$q_c(\varepsilon) = \frac{8\omega R_{\max}}{3\pi\theta_1 a_c}\cdot\frac{\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\eta_{1i}^{1,5}(\varepsilon,u)\varphi_n'(u)\,du}{1-\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\psi_\eta(\varepsilon,u)\varphi_n'(u)\,du},$$

или с учетом выражения (9) в безразмерном виде

$$F_q(\varepsilon) = \frac{8}{3\pi}\cdot\frac{\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\eta_{1i}^{1,5}(\varepsilon,u)\varphi_n'(u)\,du}{1-\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\varphi_n(\varepsilon,u)\varphi_n'(u)\,du}. \quad (11)$$

Относительная площадь контакта для шероховатой поверхности

$$\eta_1(\varepsilon) = \int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\eta_{1i}(\varepsilon,u)\varphi_n'(u)\,du. \quad (12).$$

При заданном ε выражения (7), (8), (10), (11) и (12) представляют собой замкнутую систему трансцендентных уравнений, позволяющих определить зависимость относительной площади η_1 контакта от комплексного параметра F_q.

При контактировании жесткой шероховатой поверхности со слоистым пространством следует учитывать, что согласно выражениям (5), (6) и (8) имеем

$$\eta_i(\varepsilon,u) = \eta_{1i}(\varepsilon,u)\cdot F_{1i}^{\frac{2}{3}}(\gamma,\varepsilon,u) \quad (13a)$$

$$\theta_{01i}(\gamma,\varepsilon,u) = \theta_1\cdot F_{1i}(\gamma,\varepsilon,u) \quad (13б)$$

Тогда аналогично выражениям (11) и (12) с учетом (10) получим

$$F_q(\gamma,\varepsilon) = \frac{8}{3\pi}\cdot\frac{\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\eta_{1i}^{1,5}(\varepsilon,u)\varphi'_n(u)\,du}{1-\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\varphi_\eta(\gamma,\varepsilon,u)\varphi_n'(u)\,du}, \quad (14)$$

где

$$\varphi_\eta(\gamma,\varepsilon,u)=\frac{2}{\pi}\left[\arcsin\left(\eta_{1i}^{0,5}(\varepsilon,u)\cdot F_{1i}^{\frac{1}{3}}(\gamma,\varepsilon,u)\right)-\right.$$
$$\left.-\sqrt{\eta_{1i}(\varepsilon,u)F_{1i}^{\frac{2}{3}}(\gamma,\varepsilon,u)\cdot\left(1-\eta_{1i}(\varepsilon,u)F_{1i}^{\frac{2}{3}}(\gamma,\varepsilon,u)\right)}\right]; \quad (15)$$

$$\eta(\gamma,\varepsilon)=\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\eta_{1i}(\varepsilon,u)\cdot F_{1i}^{\frac{2}{3}}(\gamma,\varepsilon,u)\varphi'_n(u)du\cdot \quad (16)$$

Для заданных значений γ и ε выражения (13а,б), (14), (15), (16) совместно с (7) и (8) представляют собой замкнутую систему трансцендентных уравнений позволяющих определить зависимость относительной площади контакта η от комплексного параметра F_q. Для указанных выше материалов на рис. 2 приведены зависимости η(γ, F_q), определенные в среде Mathcad.

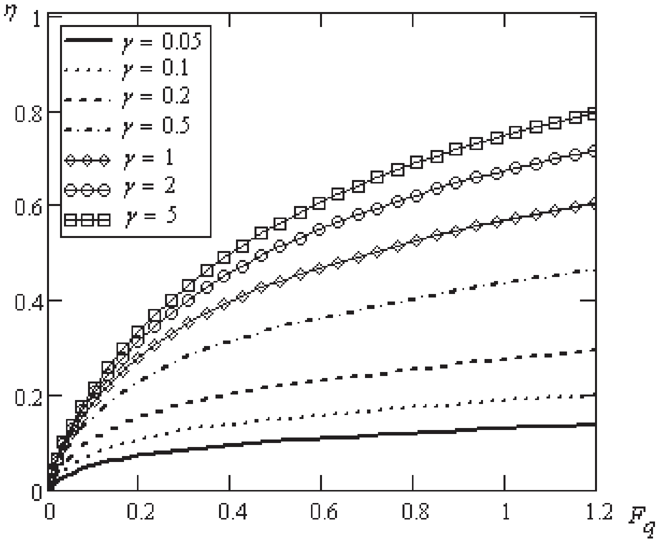

Рис. 2. Зависимость относительной площади контакта η от комплексного параметра F_q.при разных значениях относительной толщины покрытия γ

Таким образом, при прочих равных условиях появляется возможность управлять толщиной покрытия с помощью триботехнических характеристик (коэффициентом трения, интенсивностью изнашивания) сопряжений деталей машин).

Литература

1. Макушкин, А. П. Полимеры в узлах трения и уплотнениях при низких температурах / А. П. Макушкин. — М. : Машиностроение, 1993. — 228 с.
2. Воронин, Н. А. Применение теории упругого контакта Герца к расчету напряженно-деформированного состояния слоистого упругого тела / Н. А. Воронин // Трение и износ.-1993. — Т.14, № 5. — С. 250 — 258.
3. К расчету напряженно-деформированного состояния слоистого упругого тела / П. М. Огар, О. В. Максимова, А. Н. Автушко, Е. В. Устюжанин // Тр. ун-та : в 2 т. / Брат. гос. ун-т. — 2006.- Т. 2.- С. 297- 302.
4. Огар, П. М. Герметичность металлополимерных стыков уплотнительных шероховатых поверхностей : моногр. / П. М. Огар, Р. Н. Шеремета, Д. Лонг. — Братск : Изд-во БрГУ, 2006. — 159 с.
5. Огар, П. М. Контактирование шероховатых поверхностей : фрактальный подход : [моногр.] / П. М. Огар, Д. Б. Горохов. — Братск : Изд-во БрГУ, 2007. — 171 с.