

УДК 539.319:621.81+539.4

Д.Л. Семенов, канд. техн. наук, доц., Одес. нац. политехн. ун-т

ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТА ДЕТАЛЕЙ МАШИН СО СФЕРИЧЕСКИМИ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ПРИ ИХ СЖАТИИ

Д.Л. Семенов. Параметри контакту деталей машин зі сферичними та циліндричними поверхнями при їх стисканні. Наведено методику визначення розмірів контакту, контактних напружень та зближення окремих точок при взаємодії сферичних і циліндричних поверхонь. Порівняно результати розрахунків за відомими формулами та запропонованими.

Д.Л. Семенов. Параметры контакта деталей машин со сферическими и цилиндрическими поверхностями при сжатии. Описана методика определения размеров контакта, контактных напряжений и сближения отдельных точек при взаимодействии сферических и цилиндрических поверхностей. Сопоставлены результаты расчетов по известным формулам и предлагаемым.

D.L. Semenov. Parameters of machine parts contact with spherical and cylindrical surfaces at compression. The method of determining the size of contact, contact stresses and approach of separate points at interaction of spherical and cylindrical surfaces is described. The results of calculations by the known formulae are compared with the offered ones.

Расчетные модели (РМ) для оценки жесткости и прочности элементов деталей машин в местах их силового взаимодействия основаны на известных решениях классических задач теории упругости Буссинеска, Фламана и Герца при следующих допущениях: контакт плоский (ПК), совершенная упругость и однородность материалов, абсолютная гладкость контактирующих поверхностей, малость размеров контакта по сравнению с размерами взаимодействующих тел и др. При выводе основного уравнения контактной задачи поперечными смещениями точек сжимаемых тел пренебрегают [1].

Предлагаемые РМ предполагают выпукло-вогнутый контакт (ВВК) и основаны на результатах альтернативного решения задачи Митчела о действии силы, приложенной на вершине бесконечного конуса и направленной вдоль его оси [2].

При построении РМ ввиду малости размеров контакта его кривизна принята постоянной, а близлежащие участки взаимодействующих сферических поверхностей тел и единичных микровыступов (ЕМВ) заменены коническими.

Исходными для определения параметров контакта являются: E_1, E_2 — модули Юнга сжимаемых тел 1 и 2, МПа; ν_1 и ν_2 — коэффициенты Пуассона; R_1, R_2, R_{a2} и R_{b2} — радиусы взаимодействующих поверхностей, мм.

Параметры кривизны контакта в его центре получены на основе контактной жесткости, мерой которой принята объемная твердость $H_0 = F/V_0$, Н/мм³. Здесь F — сила, сжимающая тела, Н; V_0 — объем невозстановленного отпечатка, мм³. Этим устраняется необходимость вырезания полусферы на поверхности полупространства с целью избавления от особенности в центре контакта.

Для разных случаев контакта поверхностей его параметры вычисляются по формулам:

— сферических

$$u_{kc} = \frac{\rho_c}{R_1} = \frac{1 + u_E}{1 \pm u_E/u_R};$$

— цилиндрических с параллельными осями

$$u_{ku} = \frac{\rho_u}{R_1} = \frac{1 + u_E}{1 \pm u_E/\sqrt{u_R}};$$

— двойкой кривизны

$$u_{ka} = \frac{1 + u_E}{1 + u_E / \sqrt{u_{R_a} u_{R_b}}} \quad \text{и} \quad u_{kb} = \frac{1 + u_E}{1 - u_E / \sqrt{u_{R_a} u_{R_b}}},$$

где $\frac{I}{\rho_c}$ и $\frac{I}{\rho_c}$ — кривизна контакта сферических и цилиндрических поверхностей;

$\frac{I}{\rho_a}$ и $\frac{I}{\rho_b}$ — кривизны контакта в плоскостях, содержащих полуоси a и b , соответственно;

$$u_R = \frac{R_2}{R_1}, \quad u_{R_a} = \frac{R_a}{R_1} \quad \text{и} \quad u_{R_b} = \frac{R_b}{R_1}, \quad u_E = \frac{E_2}{E_1}.$$

Знаки “+” для внутреннего и “-” для внешнего касания.

Внешний угол при вершине РМ тела 1 $\Delta\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1$ является одним из основных и должен быть задан (рис. 1).

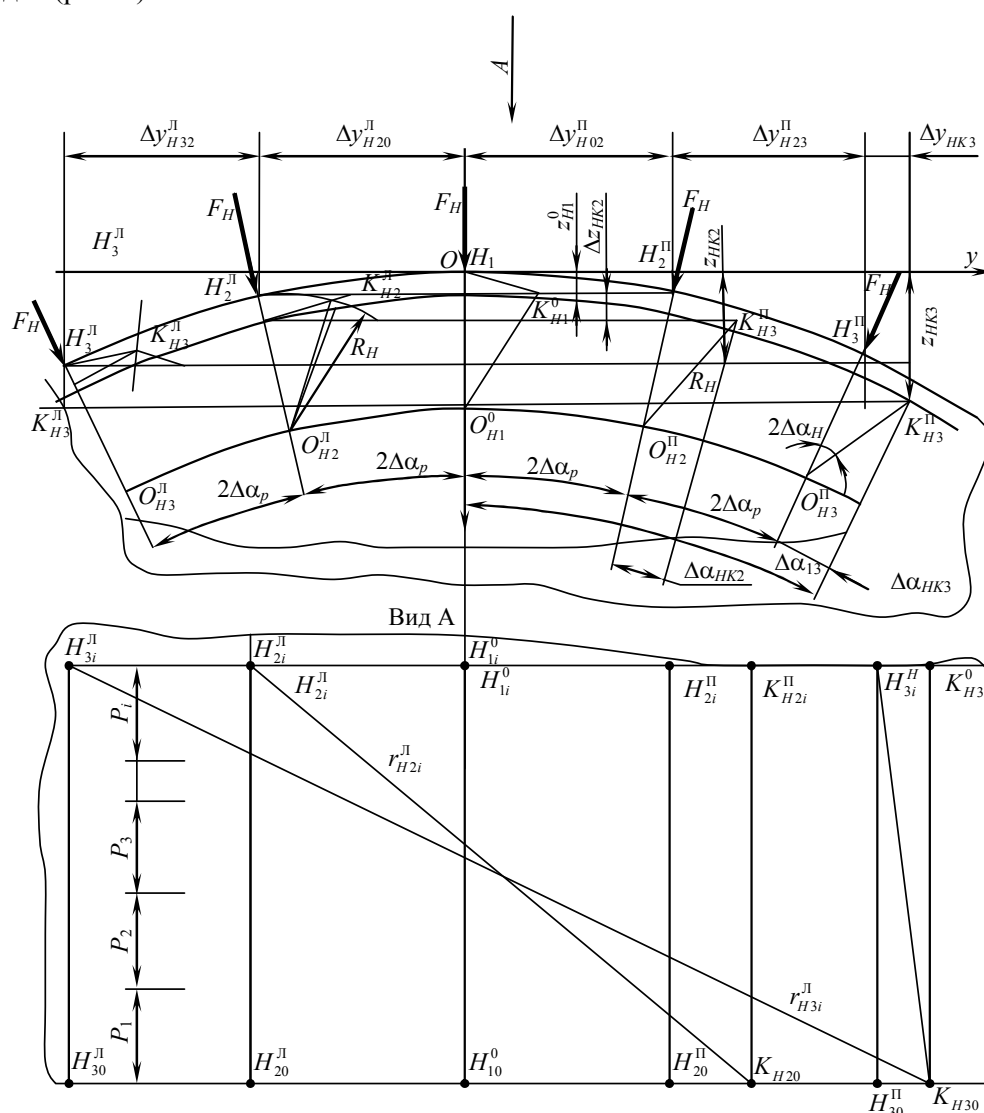


Рис. 1. Расстояния от точек приложения сил H_{ji} до точек K_{H20} и K_{H30} . Определение коэффициента влияния сил системы F_H на перемещение исследуемых точек K_{H20} и K_{H30}

Параметр нагрузки контакта сферических поверхностей, соответствующий заданному углу $\Delta\alpha_1$, определяется из равенства перемещений точки K_1 $\Delta Z_{K_1}^H$ в глобальной (неподвижной — ГСО) и полярной (подвижной — ПСО) системах отсчета (рис. 2)

$$\Delta Z_{K_1}^H = 2R_1 \cos \gamma_1 \frac{\sin \Delta\alpha_1 \sin(\Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_K)}{\cos(\Delta\alpha_{K_H} + \gamma_1)},$$

$$\Delta Z_{K_1}^П = R_1 \frac{1 + \nu_1}{2\pi\nu_1} \cos \gamma_1 Z_F Z_{K\alpha_1}.$$

Из равенства правых частей следует

$$Z_F = \frac{F/(2R_1)^2}{E_1} = \frac{4\pi\nu_1 \sin(\Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_K) \sin \Delta\alpha_1}{1 + \nu_1 Z_{K\alpha_1} \cos(\Delta\alpha_K + \gamma_1)}. \quad (1)$$

Здесь $\frac{F/(2R_1)^2}{E_1}$ — степень нагружения контакта, МПа; $\Delta\alpha_K$ — внешний угол при вершине тела 1 после приложения нагрузки, определяемый из выражения

$$\Delta\alpha_K = \frac{1}{2} \left[\arcsin \frac{\sin(2\Delta\alpha_1 + \gamma_1) + (u_K - 1) \sin \gamma_1}{u_K} - \gamma_1 \right];$$

$$Z_{K\alpha_1} = \frac{M_{\alpha_1} - \sin \Delta\alpha_1}{I_{\alpha_1} \sin \Delta\alpha_1 \cos(\Delta\alpha_1 + \gamma_1)} \quad \text{— параметр положения предполагаемой граничной точки}$$

контакта K_1 . Формулы для вычисления входящих в это выражение M_{α_1} , I_{α_1} и других коэффициентов, зависящих от $\Delta\alpha_1$, приведены [2].

Параметр радиуса контакта сжимаемых поверхностей

$$q_a = \frac{a}{R_1} = \sin 2\Delta\alpha_1 - \nu_1 q_{Z_{K_1}}^П. \quad (2)$$

где $q_{Z_{K_1}}^П$ — параметр перемещения точки K_1 в ПСО.

Параметр максимальных удельных давлений в центре контакта (контактных напряжений) определяется исходя из косинусоидального закона их распределения по диаметру $2a$

$$q_{\sigma_c} = \frac{\sigma_c}{E_1} = \frac{\pi Z_F}{(\pi - 2) q_a^2}. \quad (3)$$

При известном радиусе контакта a_H параметр контактных напряжений по Герцу можно определить по формуле

$$q_{\sigma_H} = \frac{\sigma_H}{E_1} = \frac{\pi Z_F}{\pi q_{a_H}^2}.$$

При одинаковых размерах u_R и нагрузке Z_F

$$\frac{q_{\sigma_H}}{q_{\sigma_c}} = \frac{6(\pi - 2)}{\pi^2} \left(\frac{q_a}{q_{a_H}} \right)^2.$$

Полученное соотношение важно, т.к. экспериментальные данные по исследованию контактной прочности реальных деталей и образцов обрабатывались по формуле Герца.

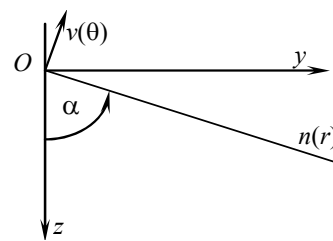


Рис. 2. Глобальная (неподвижная) и полярная (подвижная) системы отсчета

Результаты вычислений параметров и радиуса контакта для некоторых значений $\Delta\alpha_1$, u_R , u_E и u_K представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры нагрузки, радиуса контакта и сближения сферических поверхностей

$\Delta\alpha_1$, град.	Z_F при u_E/u_K			$\frac{q_{aH}}{q_a}$	$\frac{q_{H\delta_1}}{q_{\delta_1}}$
	1,0	0,5	0,1		
	4	2	22/19		
	5/2	5/3	55/49		
0,1	$\frac{2,0901 \cdot 10^{-8}}{1,6721 \cdot 10^{-8}}$	$\frac{1,3934 \cdot 10^{-8}}{1,1147 \cdot 10^{-8}}$	$\frac{3,8003 \cdot 10^{-9}}{2,0400 \cdot 10^{-9}}$	$\frac{6,1113 \cdot 10^{-3}}{3,4907 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{3,0975 \cdot 10^{-5}}{5,5536 \cdot 10^{-6}}$
	$\frac{9,5009 \cdot 10^{-8}}{8,6009 \cdot 10^{-8}}$	$\frac{3,4836 \cdot 10^{-7}}{2,7869 \cdot 10^{-7}}$	$\frac{5,2253 \cdot 10^{-7}}{4,1803 \cdot 10^{-7}}$	$\frac{1,7870 \cdot 10^{-2}}{1,7472 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{2,3885 \cdot 10^{-4}}{7,7494 \cdot 10^{-4}}$
1,0	$\frac{2,0901 \cdot 10^{-6}}{1,6721 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{1,3935 \cdot 10^{-6}}{1,1148 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{3,8009 \cdot 10^{-7}}{3,0408 \cdot 10^{-7}}$	$\frac{2,8367 \cdot 10^{-2}}{3,4899 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{1,0211 \cdot 10^{-3}}{1,0211 \cdot 10^{-3}}$
	$\frac{8,3599 \cdot 10^{-6}}{6,6892 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{5,5751 \cdot 10^{-6}}{4,4607 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{1,52122 \cdot 10^{-6}}{1,2170 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{4,5082 \cdot 10^{-2}}{6,9756 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{1,2444 \cdot 10^{-2}}{4,3545 \cdot 10^{-3}}$

Примечания:

1. Для параметров u_K и нагрузки контакта Z_F верхние значения для $u_R = 2,0$, нижние — $u_R = 5,0$;

2. Параметры радиуса контакта и сближения $q_{aH} = 2,0$ и $q_{H\delta_1} = 2,0$ даны для $u_R = 2,0$;

3. При вычислении параметра радиуса контакта формула Герца преобразована к виду

$$q_{aH} = \sqrt[3]{3(1-\nu^2) \frac{(u_E + 1)Z_F}{u_E(1 \pm 1/u_R)}};$$

4. Для вычисления параметра сближения формула Герца преобразована к виду

$$q_{H\delta_1} = \sqrt[3]{\left[3(1-\nu^2) \frac{1+u_E}{u_E} Z_F\right]^2 \frac{1+u_R}{u_R}}.$$

Анализ результатов вычислений показал, что параметр радиуса контакта по Герцу q_{aH} практически не зависит от соотношения модулей упругости ($u_E = 1,0 - q_{aH} = 6,111267 \cdot 10^{-3}$; $u_E = 0,5 - q_{aH} = 6,11128 \cdot 10^{-3}$ и $u_E = 0,1 - q_{aH} = 6,11132 \cdot 10^{-3}$). В таблице указано среднее значение $q_{aH} = 6,1113 \cdot 10^{-3}$. Увеличение отношения радиусов поверхностей с $u_R = 2,0$ до $u_R = 5,0$ ведет к уменьшению q_{aH} с $6,1113 \cdot 10^{-3}$ до $4,5080 \cdot 10^{-3}$. В таблице указано большее значение. Увеличение угла при вершине РМ с 0,1 до 2,0 град. приводит к увеличению параметра q_{aH} с $6,1113 \cdot 10^{-3}$ до $4,5031 \cdot 10^{-2}$. По предлагаемой методике параметр радиуса контакта определяется только величиной $\Delta\alpha_1$ и с его увеличением от 0,1 до 2,0 град. увеличивается с $3,4907 \cdot 10^{-3}$ до $6,9756 \cdot 10^{-2}$.

Изложенное свидетельствует о том, что при малых нагрузках $q_{\sigma H} < q_{\sigma C}$; при нагрузках, соответствующих $\Delta\alpha_1 = 0,5 \dots 1,0$ град. отношение контактных напряжений изменяется от $\frac{q_{\sigma H}}{q_{\sigma C}} = 0,728$ до 1,05; при значительных ($\Delta\alpha_1 = 2,0^\circ$) $\frac{q_{\sigma H}}{q_{\sigma C}} = 1,665$.

Сближение отдельных точек сжимаемых поверхностей определяется суммированием относительных перемещений граничных точек слоев K_{1p} и $K_{1(p-1)} \left| \Delta z_{1p} - \Delta z_{1(p-1)} \right|$, определяемых

относительно начала координат ПСО. При таком подходе параметр сближения центра сферы 1 с точкой O определяется из выражения

$$q_{\delta_H} = \frac{\delta_{1_0}}{R_1} = \frac{1 + \nu_1}{2\pi\nu_1} Z_F (Z_{K_{1_0}} - Z_{\delta_{1_p}}), \quad (4)$$

где $Z_{K_{1_0}} = \frac{M_{\alpha_{1_0}} - \sin \Delta\alpha_{1_0}}{I_{\alpha_{1_0}} \sin \Delta\alpha_{1_0} \cos(\Delta\alpha_{1_0} + \gamma_1)}$ — параметр положения точки K_{1_0} ;

$Z_{\delta_{1_p}} = \sum_{p=2}^{n_Z} |Z_{K_{\alpha_p}} - Z_{K_{\alpha_{(p-1)}}}|$ — параметр сближения граничных точек слоев, на которые тело 1

разделено;

$$n_Z = \frac{\pi}{4\Delta\alpha} \text{ — количество слоев между точками } O \text{ и } O_1.$$

Следует учесть то, что между образующей конуса PM и окружности сферы ниже точки K_2 материал отсутствует и жесткость PM уменьшается, что приводит к увеличению внешнего угла при ее вершине с $\Delta\alpha_1$ до $\Delta\alpha_1^*$. В первом приближении можно принять

$$\frac{\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2}{2} = \Delta\alpha_1^*.$$

При определении параметров сближения контртел 2 с выпуклыми поверхностями (внешнее касание) можно использовать формулу (4), заменив индексы “1” на “2” после определения $\Delta\alpha_K$. Для определения относительных перемещений контртел 2 при внутреннем касании можно применить такой прием: через точку O провести окружность радиуса $R_2^* = R_2$ и для точек $K_{2_p}^* = K_{2_{(p-1)}}^*$ вычислить относительные перемещения ΔZ_2^* и ΔZ_2 . Количество слоев зависит от толщины контртела 2. Результаты вычисления параметров сближения по Герцу и предлагаемой методике представлены в табл. 2. Как и для параметра радиуса контакта при малых нагрузках $q_{\delta_H} > q_{\delta_1}$; при нагрузках, соответствующих $\Delta\alpha_1 = 0,5 \dots 1,0^\circ$, $q_{\delta_H} < q_{\delta_1}$.

При сжатии цилиндрических поверхностей с параллельными осями, одна из которых I имеет неровности постоянного шага P и высоты R_z с единичными микронеровностями (ЕМВ), рассмотрен контакт гладкого цилиндра 2 с ЕМВ, вершины которых расположены на оси Ox .

Основными характеристиками ЕМВ являются: внешний угол при вершине $\Delta\alpha_H$, линейный P и угловой $\Delta\alpha_p$ шаги и радиус закругления вершины R_H , формулы для вычисления которых представлены в таблице 2.

Параметр нагрузки микроконтакта Z_{F_H} , соответствующий заданному углу $\Delta\alpha_{K_{H_1}} = \Delta\alpha_1$, определяется из условий равенства перемещений $\Delta Z_{K_{H_1}}^H$ в ГСО и $\Delta Z_{K_{H_1}}^H$ в ПСО.

$$\Delta Z_{K_{H_1}}^H = 2R_H \cos \gamma_H \frac{\sin(\Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_{K_H})}{\cos(\Delta\alpha_{K_H} + \gamma_H)} \text{ и } \Delta Z_{K_{H_1}}^I = R_H u_{H_r} \frac{1 + \nu_H}{2\pi\nu_H} \frac{\cos \gamma_H}{\sin \Delta\alpha_p} Z_{F_H} S_{p_{ji}}$$

из равенства правых частей которых следует

$$Z_{F_H} = 4\pi \frac{\nu_H}{1 + \nu_H} \frac{\sin \Delta\alpha_p \sin(\Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_{K_H}) \sin \Delta\alpha_1}{u_{H_r} \cos(\Delta\alpha_{K_H} + \gamma_H) S_{p_{ji}}}, \quad (5)$$

где $\Delta\alpha_{K_H} = \frac{1}{2} \left[\arcsin \frac{\sin \sin(2\Delta\alpha_1 + \gamma_H) + u_E \sin \gamma_H}{1 + u_E} - \gamma_H \right]$ — угол при вершине EMB после приложения нагрузки;

$$S_{p_{ji}} = \sum_{j=0}^{n_y} \cos 2j\Delta\alpha_p \left(\frac{Z_{\alpha_{j_0}}}{\sqrt{q_{y_{H_{j_0}}}^2 + q_{z_{H_{j_0}}}^2}} + p_{H_z} K_{p_{ji}} \right) \text{ — коэффициент, учитывающий перемещение}$$

точки $K_{H_{j_0}}$ в ПСО;

$$Z_{\alpha_{j_0}} = \frac{M_{\alpha_{j_0}} - \sin \Delta\alpha_{j_0}}{I_{\alpha_{j_0}} \sin \Delta\alpha_{j_0} \cos(\Delta\alpha_{j_0} + \gamma_H)} \text{ — параметр положения точки } K_{H_{j_0}};$$

$$K_{p_{ji}} = \sum_{i=1}^{n_x} \frac{Z_{\alpha_{ji}}}{I_{\alpha_{ji}} \sin \Delta\alpha_{ji} \cos(\Delta\alpha_{ji} + \gamma_H)} \text{ — коэффициент влияния всех сил системы на переме-}$$

щение исследуемой точки;

$$p_{H_z} \text{ — характеристика ЕМВ, определяемая из выражения } p_{H_z} = \frac{\operatorname{tg} \Delta\alpha_H \sin \Delta\alpha_p}{(R_z/R_1)};$$

$q_{y_{H_{j_0}}}$ и $q_{z_{H_{j_0}}}$ — параметры абсцисс и ординат точки $K_{H_{j_0}}$, определяемые в зависимости от размеров и количества ЕМВ в пределах радиуса контакта. Формулы для вычисления $M_{\alpha_{j_0}}$, $I_{\alpha_{j_0}}$ и других коэффициентов, зависящих от $\Delta\alpha_1$, приведены [2].

Таблица 2

Параметры ЕМВ, нагрузки и радиуса микроконтакта

Класс шероховатости	$\Delta\alpha_H$, град/град	$P/2$, мм	R_H , мм	$\Delta\alpha_p$, рад	Z_{F_H}	q_{α_M}
4	$\frac{5}{8,7277 \cdot 10^{-2}}$	$8,4290 \cdot 10^{-1}$	1,9747	$3,4380 \cdot 10^{-2}$	—	—
5	$\frac{6}{1,047 \cdot 10^{-1}}$	$1,3320 \cdot 10^{-1}$	$6,4066 \cdot 10^{-1}$	$1,3338 \cdot 10^{-2}$	—	—
6	$\frac{7}{1,2217 \cdot 10^{-1}}$	$8,1443 \cdot 10^{-2}$	$3,3665 \cdot 10^{-1}$	$8,1523 \cdot 10^{-3}$	$\frac{1,1717 \cdot 10^{-5}}{9,8657 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{2,0367 \cdot 10^{-2}}{3,6657 \cdot 10^{-2}}$
7	$\frac{8}{1,3963 \cdot 10^{-1}}$	$4,8866 \cdot 10^{-2}$	$1,5489 \cdot 10^{-1}$	$4,2718 \cdot 10^{-3}$	—	—
8	$\frac{9}{1,5708 \cdot 10^{-1}}$	$4,8941 \cdot 10^{-2}$	$6,1295 \cdot 10^{-2}$	$1,8947 \cdot 10^{-3}$	—	—

Примечания:

1. $\Delta\alpha_H = 6^\circ$ для 5-го класса шероховатости выбрано по характеру изменения из-за отсутствия данных в [3];

2. Основные размеры ЕМВ подсчитаны по формулам $R_H = \frac{R_z}{2 \sin^2 \Delta\alpha_H}$, $\Delta\alpha_p = \operatorname{arctg} \frac{u_{H_R} \sin 2\Delta\alpha_H}{1 - 2u_{H_R} \sin^2 \Delta\alpha_H}$,

$$u_{H_R} = \frac{R_H}{R_1} = 0,1R_1 (R = 10 \text{ мм}), P = \frac{2R_z}{\operatorname{tg} \Delta\alpha_H};$$

3. Z_{F_H} и q_{α_M} верхние значения для $\Delta\alpha_1 = 0,5^\circ$ — нижние $\Delta\alpha_1 = 1,0^\circ$.

Введение механических характеристик ЕМВ E_H и ν_H обосновывается тем, что перемещение $\Delta Z_{K_{H_1}}$ соизмеримы с толщиной слоев реальных поверхностей, для которых они отличаются от определяемых при испытаниях на растяжение-сжатие.

Параметр радиуса микроконтакта

$$q_{aM} = \frac{a_M}{R_1} = 2 \sin \Delta\alpha_p \sum_{j=0}^{n_x} \left[\cos 2j\Delta\alpha_p + u_{HR} \frac{\sin \Delta\alpha_H}{\sin \Delta\alpha_p} \cos(\Delta\alpha_H + 2j\Delta\alpha_p) \right]. \quad (6)$$

Параметр контактных напряжений определяется по формуле (3) с заменой Z_F и q_a на Z_{F_H} и q_{a_M} , соответственно.

Параметр сближения центра ЕМВ с точкой a можно вычислить по формуле (4) непосредственно.

Результаты вычисления основных размеров ЕМВ, параметров нагрузки и радиусов микроконтакта для некоторых классов шероховатости и углов $\Delta\alpha_1$ представлены в таблице 2.

Анализ полученных результатов показывает, что при $\Delta\alpha_1 = 0,5^\circ$ и $E_H = E_I = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, степень нагружения микроконтакта $\frac{F_H}{(2R_H)^2} = 2,46$ и $9,86$ МПа близки к таковым, при которых в первом случае появляются, а во втором преобладают остаточные деформации.

Площадка контакта представляет совокупность микроконтактов соответственно на трех и пяти линиях, проходящих через вершины ЕМВ для $\Delta\alpha_1 = 0,5^\circ$ и $1,0^\circ$. Сила, которую необходимо приложить к сжимаемым телам, составляет соответственно 3,35 и 13,41 кН. При этом средняя условная нагрузка, распределенная по длине, составит $\omega^* = \frac{F}{4R_1}$ 84 и 554 Н/мм.

В заключении можно отметить, что предлагаемые параметры контакта выгодно отличаются от применяемых [1], а сложности, возникающие при определении внешнего угла при вершине РМ, преодолимы благодаря наличию компьютеров. Кроме того зависимость $\Delta\alpha_1 = f(Z_F)$ может быть табулирована с достаточно мелким шагом с последующей разработкой номограмм.

Литература

1. Биргер, И.А. Расчеты на прочность деталей машин: Справ. / И.А. Биргер, В.Ф. Шорр, Г.Б. Иоселевич. — 3-е изд. перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1979. — 702 с.
2. Семенов, Д.Л. Решения задач упругости, используемые для оценки контактной прочности и жесткости деталей машин / Д.Л. Семенов // Тр. Одес. нац. политехн. ун-та. — Одесса. — Вып. 1(27). — С. 13 — 18.
3. Дьяченко, П.Е. Площадь фактического контакта сопряженных поверхностей / [П.Е. Дьяченко, Н.И. Толкачева, Г.А. Андреев, Т.И. Карпова.] — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 90 с.

Поступила в редакцию 13 октября 2008 г.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Дашенко А.Ф.