ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.81

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-6-253-32-36

М. М. Матлин, В. А. Казанкин, Е. Н. Казанкина, Е. В. Капиносва

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ТВЕРДОСТЕЙ МАТЕРИАЛОВ, СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ФАКТИЧЕСКУЮ ПЛОЩАДЬ КОНТАКТА СОПРЯГАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: detmash@vstu.ru, matlin@vstu.ru

В работе описано влияние различных факторов, в том числе соотношение твердостей, среднее давление, радиус микровыступов поверхности, влияющих на величину фактической площади контакта шероховатых поверхностей плоских деталей, сопряженных в неподвижных соединениях. Исследование проводилось с использованием полученных авторами зависимостей, описывающих упругопластическое контактное взаимодействие шероховатых поверхностей.

Ключевые слова: упругопластический контакт, пластическая твердость, приведенная твердость, фактическая площадь контакта.

M. M. Matlin, V. A. Kazankin, E. N. Kazankina, E. V. Kapinosova

EFFECT OF RATIO OF MATERIAL HARDNESSES, AVERAGE PRESSURE AND ROUGHNESS PARAMETERS ON ACTUAL CONTACT AREA OF ASSEMBLED SURFACES

Volgograd State Technical University

The paper describes the influence of various factors, including the ratio of hardness, average pressure, radius of microasperities of the surface, affecting the value of the actual contact area of rough surfaces of flat parts mated in fixed joints. The study was carried out using the dependences obtained by the authors describing the elastic-plastic contact of rough surfaces.

Keywords: elastic-plastic contact, plastic hardness, reduced hardness, actual contact area.

Величина фактической площади контакта во многом характеризует такие параметры неподвижных соединений деталей как прочность, теплопроводность, электрическое сопротивление и т. д. В частности, учет параметров упругопластического взаимодействия сопряженных деталей позволяет уменьшить погрешность определения нагрузочной способности неподвижного соединения. Кроме того, передача тепловой и электрической энергии в соединениях деталей происходит в пятнах контакта, что свидетельствует о том, что энергоэффективность соединений напрямую зависит от параметров контакта шероховатых поверхностей сопрягаемых деталей.

Следует отметить, что в большинстве работ для определения параметров контакта используются зависимости, справедливые только для случая, когда твердости материалов контактирующих поверхностей отличаются более чем в 2 раза. При этом происходит внедрение микровыступов более твердой поверхности в более мягкую. Однако на практике наиболее распространенным случаем является контакт деталей, твердости материалов близки (то есть отличаются менее чем в 2 раза) или вообще равны. При этом происходит одновременное внедрение и сплющивание микровыступов, а зависимости, справедливые для случая внедрения, дают значительную погрешность. В связи с этим,

© Матлин М. М., Казанкин В. А., Казанкина Е. Н., Капиносва Е. В., 2021.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00049, а также в рамках конкурса МК-2021 (грант Президента РФ № МК-84.2021.4)

были проведены исследования контакта деталей, твердости материалов которых отличаются менее чем в 2 раза.

При проведении исследования контакт двух деталей с шероховатыми поверхностями был смоделирован контактом деталей с шероховатой и номинально плоской гладкой поверхностью путем введения понятия «эквивалентная шероховатая поверхность», предложенная в работе [1].

Отметим, что для случаев внедрения и сплющивания микровыступов при расчетах следует использовать твердость материала той детали, которая деформируется упругопластически. В случае, когда твердости материалов близки, обе детали деформируются упругопластически, поэтому для расчетов следует использовать новую характеристику контактного взаимодействия – приведенную пластическую твердость, учитывающую соотношение твердостей обеих деталей [2]:

$$H_{Д_{пр}} = \frac{1,5 \cdot H_{Д_{ш}} \cdot H_{Д}}{H_{Д_{ш}} + H_{Д}}, \quad (1)$$

где $H_{Д_{ш}}$ – твердость материала детали с шероховатой поверхностью; $H_{Д}$ – твердость материала детали с гладкой поверхностью. При этом в случаях внедрения и сплющивания приведенная твердость принимает значение твердости материала той детали, которая деформируется упругопластически (для внедрения – $H_{Д}$, для сплющивания – $H_{Д_{ш}}$).

Зависимость для определения фактической площади контакта была получена из известных зависимостей для определения относительной фактической площади контакта η_r [1, 3] и сближения в контакте шероховатых поверхностей α [2]:

$$\eta_r = \frac{A_r}{A_a} = A \cdot b_k \cdot \varepsilon^v, \quad (2)$$

$$\alpha = \left(\frac{2\pi F R_{\max}^v \cdot a^{\frac{1}{b}}}{k A_a b_k H_{Д_{пр}} R^{1-\frac{1}{b}} \cdot h^{\frac{1}{b}}} \right)^{\frac{1}{v-1}} \quad (3)$$

где A_r – фактическая площадь контакта; A_a – номинальная площадь контакта; A – коэффициент, зависящий от соотношения упругой и остаточной деформации в контакте; $\varepsilon = \alpha/R_{\max}$ – относительное сближение; F – сила, сжимающая поверхности деталей; $R_{\max}$ – наибольшая высота неровностей профиля; R – радиус кривизны микровыступов; b_k и v – параметры кри-

вой опорной поверхности; k – коэффициент силового подобия, показывающий соотношение сил в реальном контакте и в модели; α_y – упругое сближение; h – остаточное сближение; a и b – коэффициенты, зависящие от соотношения твердостей сферической и плоской деталей $H_{Д_{ш}}/H_{Д}$.

Таким образом, зависимость для определения фактической площади упругопластического контакта шероховатых поверхностей имеет вид

$$A_r = (h + 0,5\alpha_y) \cdot \frac{2\pi F \cdot a^{\frac{1}{b}}}{k \cdot H_{Д_{пр}} \cdot R^{1-\frac{1}{b}} \cdot h^{\frac{1}{b}}}, \quad (4)$$

Коэффициенты a и b были определены на основе экспериментальных исследований. Анализ экспериментальных данных позволил описать зависимость этих коэффициентов от соотношения твердостей шероховатой и гладкой деталей $H_{Д_{ш}}/H_{Д}$ следующими формулами [2]:

$$a = \frac{0,057}{(H_{Д_{ш}}/H_{Д})^{1,72}} + 0,142, \quad (5)$$

$$b = 1,306 - 0,153 \cdot \left(\frac{H_{Д_{ш}}}{H_{Д}} \right).$$

Следует отметить, что для случаев внедрения или сплющивания (твердости отличаются более чем в 2 раза) формула (4) превращается в известные формулы для этих случаев, представленные в работах [4] и [5]:

для внедрения:

$$A_r = \frac{F}{H_{Д} \cdot K_{yn}} \left(1 + \frac{\alpha_y}{h} \right); \quad (6)$$

для сплющивания

$$A_{r,c} = \frac{2,56 \cdot F}{K_{пл} \cdot H_{Д}} \cdot \left(\frac{h_c}{R} \right)^{0,188} \left(1 + \frac{\alpha_{y,c}}{h_c} \right). \quad (7)$$

Приведенная зависимость для определения фактической площади контакта может быть использована при любом соотношении твердостей материалов контактирующих поверхностей, то есть для любых явлений, протекающих в контакте (внедрение, сплющивание, одновременное внедрение и сплющивание).

Для проведения анализа влияния различных факторов на величину фактической площади контакта были использованы следующие неварьируемые параметры контактирующих поверхностей: $b = 2$, $v = 2$; $R = 20$ мкм; $R_{\max} = 40$ мкм; $q = 25$ МПа; $H_{Д} = 1500$ МПа; $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$; $E_1 = E_2 = 2,06 \cdot 10^5$ МПа. Теоретиче-

ское исследование проводили с помощью разработанной программы для ЭВМ, реализующей

приведенные зависимости. Интерфейс программы показан на рис. 1.

Исходные данные

Площадь контакта, мм²:

Приложенная нагрузка, Н:

Материал деталей:

Твёрдость НД, МПа:

Модуль упругости, МПа:

Коэффициент Пуассона:

Параметры шероховатости: b v

Температура деталей, °C:

R_{max} , мкм: R , мкм:

Ok

Вывод

Фактическая площадь контакт, мм²:

Рис. 1. Интерфейс программы для определения фактической площади контакта шероховатых поверхностей

На рис. 2 показано влияние соотношения твердостей материала контактирующих поверхностей в диапазоне $0,5 \leq H_{D_{ш}}/H_D \leq 2$ на величину ФПК. Границы этого диапазона соответствуют случаям сплющивания или внедрения микровыступов соответственно. Как видно из рис. 2, при переходе от сплющивания к вне-

дрению наблюдается уменьшение величины ФПК. Это объясняется тем, что при внедрении микровыступа в поверхность детали образующийся упругопластический отпечаток окружен упруго деформированным материалом детали, а при сплющивании поверхность микровыступа деформируется свободно.

Рис. 2. График зависимости фактической площади контакта шероховатой и гладкой поверхностей деталей от соотношения твердостей $H_{D_{ш}}/H_D$ материалов деталей

Как видно из рис. 3, с увеличением радиуса кривизны микровыступов линии (соответствующие различным соотношениям твердостей) сближаются, то есть происходит уменьшение

разницы величин ФПК для различных соотношений твердостей. Это объясняется уменьшением доли остаточной деформации в контакте с ростом радиуса. Дальнейшее увеличение ра-

диуса кривизны микровыступов R ведет к постепенному переходу к чисто упругому контакту, в условиях которого контактное сближение и фактическая площадь контакта шероховатых поверхностей, очевидно, не зависит от соотношения твердостей.

Как видно из рис. 4, с увеличением среднего

давления q в контакте происходит как увеличение абсолютной величины фактической площади контакта, так и увеличивается разница абсолютных величин ФПК для различных соотношений твердостей контактирующих поверхностей. Это обусловлено увеличением доли остаточного сближения в полном сближении.

Рис. 3. Графики зависимости фактической площади контакта шероховатой и гладкой поверхностей деталей от радиуса R кривизны микровыступов при различном соотношении твердостей:
1 – $H_{Dш}/H_D=0,5$; 2 – $H_{Dш}/H_D=1$; 3 – $H_{Dш}/H_D=1,5$; 4 – $H_{Dш}/H_D=2$

Рис. 4. Графики зависимости фактической площади контакта A_r шероховатой и гладкой поверхностей деталей от среднего давления q при различном соотношении твердостей:
1 – $H_{Dш}/H_D=0,5$; 2 – $H_{Dш}/H_D=1$; 3 – $H_{Dш}/H_D=1,5$; 4 – $H_{Dш}/H_D=2$

Как видно из представленных рисунков, при увеличении величины отношения $H_{Dш}/H_D$, то есть при переходе от случая сплющивания микровыступов к случаю близких твердостей и последующему переходу к случаю внедрения, происходит уменьшение величины фактической

площади контакта. Необходимо отметить, что разница между величинами ФПК при внедрении и при соотношении твердостей $H_{Dш}/H_D=1,5$ и не превышает 8 %. Однако для случая, когда соотношение твердостей равно $H_{Dш}/H_D=1$, разница может составлять более 30 %.

Таким образом, в работе показано, что традиционная практика использования закономерностей, соответствующих внедрению микровыступов шероховатых поверхностей, применительно к случаям силового взаимодействия деталей с близкой твердостью материалов может приводить к значительной погрешности определения величины фактической площади контакта. Указанная погрешность при определении ФПК очевидно ведет к ошибке как при определении нагрузочной способности соединения, так и при определении других параметров соединения, например, теплопроводности стыка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демкин, Н. Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – М. : Наука, 1970. – 227 с.
2. Матлин, М. М. Жесткость упругопластического контакта деталей машин : монография / М. М. Матлин, А. И. Мозгунова, Е. Н. Казанкина, В. А. Казанкин. – М. : Машиностроение, 2015. – 217 с.
3. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 383 с.
4. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
5. Матлин, М. М. Расчет нагрузочной способности неподвижных соединений с экспрессной оценкой физико-механических свойств материалов деталей : автореферат дис. д-ра техн. наук : 05.02.04 / Матлин М. М. – М., 1997. – 35 с.