

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

© 2006 А.Л. Берсудский

Самарская государственная академия путей сообщений

В работе установлено, что триботехнические характеристики рабочих поверхностей с покрытием зависят от толщины покрытия, их физико-технических свойств, надежности сцепления покрытия с подложкой и действующей нагрузкой. Установлена оптимальная толщина покрытия, при которой наблюдается наименьший коэффициент трения.

Для повышения износостойкости и долговечности рабочих поверхностей деталей машин широко используются различные технологические методы, направленные на нивелирование процессов поверхностного разрушения при взаимодействии поверхностей в сторону усталостных повреждений. Локализация процессов разрушения при трении в тонких поверхностных слоях предопределяет создание поверхностей трения со специальными свойствами.

Существует ряд технологических процессов позволяющих значительно улучшить качественные показатели рабочих поверхностей. Одним из подобных способов обработки является метод упрочняющей обработки с одновременным нанесением композиционных покрытий из пластичных металлов [1, 2]. Рабочие поверхности с покрытиями обладают улучшенными физико-механическими и трибологическими свойствами. Соответствующим подбором компонентов покрытий можно обеспечить повышенную работоспособность контактирующих поверхностей. Варьируя составом покрытия, возможно в определенных пределах изменять физико-механические и триботехнические свойства поверхностей с покрытиями [3, 4, 5].

При взаимодействии поверхностей с покрытиями основными параметрами поверхностей трения являются толщина покрытия, физико-механические свойства покрытия и основы, величина напряжения среза возникающие в покрытии. Для решения этой задачи целесообразно рассмотреть вопросы взаимодействия контактирующих поверхностей при трении [6].

При условии прочного сцепления покрытия с основой минимальная толщина та-

кого покрытия определяется глубиной пластичной области h_{\max} . Толщина покрытия $\Delta = h_{\max}$ назовём критической $\Delta_{\text{кр}}$.

В случае $\Delta \geq \Delta_{\text{кр}}$ напряжённое состояние в зоне контакта не зависит от толщины покрытия, и коэффициента трения (толстые покрытия). При условии, когда $\Delta < \Delta_{\text{кр}}$ напряжённое состояние становится функцией толщины вследствие того, что жёсткая подложка накладывает дополнительные связи на пластическое течение металла покрытия.

Граничные условия к решению задачи:

1) Твёрдость контактирующих тел в 2...3 раза превышает твёрдость покрытия (твёрдость подложки значительно превышает твёрдость покрытия);

2) Контактное взаимодействие твёрдых тел при малых нагрузках определяются шероховатостью поверхностей. При решении задачи используется радиус выступов "r", и максимальная высота микронеровностей R_{\max} . Толщина покрытия "Δ", глубина внедрения отдельной микронеровности "h", при этом вводятся ограничения:

- относительное проникновение $h/\Delta < 1$;

- относительное внедрение $h/r \ll 1$; (1)

- относительный радиус микронеровностей $r/\Delta < 40$;

3) Физико-механические свойства и структура покрытия одинаковы по всей толщине, покрытие является сплошным и однородным

4) На контуре пластической области и подложки касательные напряжения $\tau_i = K$

5) Компонента скорости, нормальная к контуру подложки, равна нулю

6) Фактический контакт имеет и образуется большим количеством единичных контактов.

При перемещении жесткой микронеровности по поверхности последние входят

в контакт с микронеровностями покрытия, по мере их разрушения появляются новые очаги взаимодействия, при этом их число увеличивается. Величина коэффициента трения единичного контакта, определяемого отношением тангенциальной и нормальной равнодействующих сил, изменяется в процессе перемещения поверхностей. Силы, действующие на жёсткие микронеровности, также непрерывно изменяются.

Как указывалось выше, в процессе деформирования микронеровностей покрытия глубина пластической области h_{\max} , а следовательно, и критическая толщина покрытия $\Delta_{\text{кр}}$ являются стабильными величинами. Это позволяет оценить критическую толщину покрытия при трении твёрдых тел как функцию нагрузки, шероховатости поверхности, физико-механических свойств покрытия. В этом случае критическая глубина внедрения микронеровности $h_{\text{кр}}$ определяется зависимостью:

$$h_{\text{кр}} = \frac{\Delta^2}{r(1-2f_k)}, \quad (2)$$

где Δ - толщина покрытия;

r - радиус единичного микровыступа;

f_k - величина контактного трения, определяется зависимостью $f_k = \frac{\tau_i}{2K}$ [6].

Глубина внедрения статически наибольшей микронеровности с учётом определения номинальной нагрузки по зависимости (11) и введения коэффициента 0,5, учитывающего, что при трении только половина поверхности контакта воспринимает давление, получим:

$$h = \left(\frac{2PR_{\max}^v}{\sigma_T A_a b} \right)^{1/v}. \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), находим значение критической толщины покрытия:

$$\Delta_{\text{кр}} = \left[\left(\frac{2PR_{\max}^v}{1,5 + \sqrt{2(1-2f_k)} A_a K b} \right)^{1/v} r(1-2f_k) \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Это уравнение показывает, что критическая толщина покрытия зависит от микрогеометрии поверхности (r , b , v), механических свойств покрытия K , действующей нагрузки, размера поверхности кон-

такта A_a , и коэффициента контактного трения f_k .

Применение покрытий с толщиной, меньше критической, приведёт к снижению коэффициента трения. При толщине покрытия, больше критической, коэффициент трения может возрастать.

Для проверки адекватности предложенной методики расчёта был проведён эксперимент. Индентор радиусом 1мм, закрепленный на выносном элементе, вращаясь, перемещается по неподвижному образцу. Нагрузка при проведении эксперимента варьировалась от 20 до 120 Н, скорость перемещения индентора - 5,4 м/мин. Образец из закаленной стали 40X с покрытием устанавливался на основании в корпусе, который под действием сил трения имеет возможность перемещаться (поворачиваться на определённый угол). Величина перемещения градуированием переводилась в силу трения, а затем расчетом определялся коэффициент трения. Толщина покрытия изменялась в пределах от 0,8 до 2,0 мкм. Статическая нагрузка осуществлялась нагружением шпинделя сверлильного станка, в котором устанавливался индентор. Смазочная среда - масло И-20А.

На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость изменения коэффициента трения от толщины для различных видов покрытий. Характер зависимостей показывает, что при уменьшении толщины покрытия возрастает сдвиговое сопротивление. Зависимость имеет незначительный экстремум. Наименьший коэффициент трения наблюдался при толщинах покрытий от 1,0 до 2,0 мкм. Вследствие влияния твердой подложки, переход через минимум может быть объяснен на основе молекулярно-механической теории трения. С ростом толщины покрытия, давление на контактной поверхности уменьшается, а коэффициент трения возрастает. При толщине покрытия $\Delta \geq \left(\frac{P}{\pi HB_i} \rho_r \right)$ коэффициент трения стабилизуется и становится постоянным. С уменьшением толщины покрытия коэффициент трения не падает беспредельно, т.к. сдвиговое сопротивление возрастает.

Для тонких покрытий порядка 0,2 мкм зависимость сдвигового сопротивления от толщины выражается зависимостью [9]:

$$\tau = \tau_m + \frac{A}{\Delta_c^n}, \quad (5)$$

где τ_m - сдвиговое сопротивление в толстом покрытии;

A – опорная поверхность;

Δ_c – толщина покрытия;

n – показатель степени (в первом приближении ≈ 1).

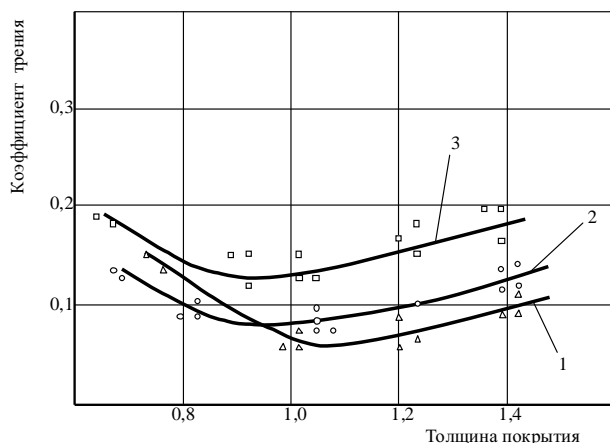


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от толщины покрытия при скольжении сферического индентора радиусом 1,0мм. 1 – по образцам из стали 40X с медьсодержащим покрытием, 2 – по образцам из стали 40X с медьсодержащим покрытием с добавлением ультрадисперсных частиц никеля и меди, 3 – по образцам из стали 40X с серебряным покрытием.

Для левой части зависимостей (см. рис.

1) коэффициент трения можно выразить:

$$f = \frac{\tau_m}{\rho_r} + \frac{A}{\Delta^n \rho_r}. \quad (6)$$

Вычисление коэффициента трения по зависимости (6) показало, что при значительном уменьшении толщины антифрикционного покрытия до 10^{-2} мкм сдвиговое сопротивление возрастает в 3...4 раза [9].

Выводы

1. На основе решения задачи о константном взаимодействии поверхностей разработана методика определения оптимальной толщины антифрикционного покрытия в зоне контакта с учетом влияния подложки.

2. Твердость материала подложки значительно превышает твердость покрытия, поэтому процесс пластического течения при трении локализуется в тонких поверхностных слоях покрытия, с ростом толщины покрытия давление уменьшается, а коэффициент трения возрастает, с уменьшением толщины покрытия при возрастании нагрузки коэффициент трения снижается.

3. Установлено, что триботехнические характеристики рабочих поверхностей с покрытием зависят от толщины покрытия, их физико-технических свойств, надежности сцепления покрытия с подложкой и действующей нагрузкой. В случае, когда давление в зоне контакта превышает допустимые величины, интенсивность изнашивания возрастает.

4. Установлена оптимальная толщина покрытия, при которой наблюдается наименьший коэффициент трения: 1,0...2,0 мкм.

5. Варьируя физико-механическими свойствами покрытия и толщиной можно в определенной степени реализовывать условия упругого контакта в зоне трения, что позволяет снизить износ поверхности и сократить время приработки поверхностей.

Список литературы

1. Патент №1838447. Способ нанесения защитных покрытий на рабочие поверхности деталей и устройства для его осуществления (Берсудский А.Л., Громаковский Д.Г., и др.). Бюл. №32 от 32 от 30.08.83
2. Патент №20531106. Способ нанесения защитных покрытий на рабочие поверхности деталей и устройства для его осуществления (Берсудский А.Л.). Бюл. №3 от 27.01.96
3. Патент №2103329. Смазочно-охлаждающая жидкость для процессов поверхностного деформирования (Г.Д., Берсудский А.Л., Мальчиков Г.Д. и др.) бюл. №3 от 27.01.98
4. Патент №21100609. Способ нанесения покрытий на стальные изделия (Берсудский А.Л., Малышева Н.С. и др.). Бюл. №13 от 10.05.98
5. Патент № 2235150 Способ упрочнения поверхностей деталей с одновременным нанесением композиционных покрытий.

(Берсудский А.Л., Малышева Н.С. и др.).
Бюл. №24 от 28.08.04.

6. Алексеев Н.М. Металлические покрытия. М.: Наука 1973 - 75с.

7. Сутягин О.В. Контактное взаимодействие твёрдых тел. Калинин, КГУ, 1986. - 35с.

8. Громаковский Д.Г. Система понятий и структура моделей изнашивания.// Трение и износ, Т.18, №1 1997. - с53...62.

9. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчётов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. - 526с

THE METHOD OF CALCULATION OF OPTIMUM THICKNESS OF ANTIFRICTIONAL COVERINGS

© 2006 A.L. Bersudskij

The method of definition of optimum thickness of antifrictional coverings on the basis of the decision of a problem of indentation of an individual edge in a surface is offered in the article. The tribotechnical characteristics of coverings of surfaces are determined providing the minimal wearing and reduction of time of running-in.