

А.А. Березовский, В.М. Тонконогий, д-р техн. наук,
Ю.М. Хомяк, канд. техн. наук, Одесса, Украина

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Важливим фактором надійності робочих елементів деталей апаратів є адгезійна міцність покриттів, які наносяться на ці деталі. Існуючі методи вимірювань цієї міцності методом штифтів не забезпечують необхідну при проектуванні точність. Результати дослідження показують, що традиційний спосіб розрахунків має деякий сенс лише для порівняльного аналізу механічних властивостей покриттів. Запропоновано метод, що дозволяє встановити дійсну величину опору відриву покриття, необхідну при проведенні проектних робіт.

Важным фактором надежности рабочих элементов деталей аппаратов является адгезионная прочность покрытий, наносимых на эти детали. Существующие методы измерений этой прочности методом штифтов не обеспечивают необходимую при проектировании точность. Результаты исследования показывают, что традиционный способ расчета имеет некоторый смысл лишь для сравнительного анализа механических свойств покрытий. Предложен метод, позволяющий установить истинную величину сопротивления отрыву покрытия, необходимую при проведении проектных работ.

The important factor of devices details working elements reliability is adhesive strength of the coverings put on these details. Existing methods of this strength measurements do not provide with a method of pins necessary accuracy at designing. Results of probe show that the traditional mode of calculation has some sense only for the comparative analysis of the coverings mechanical properties. The method, allowing to establish true size of resistance the covering separation, necessary at carrying out of design works is offered.

Надежность многих деталей машин, использующихся в переработке различных абразивных материалов, зависит, в основном, от надежности их рабочих элементов, непосредственно осуществляющих силовой контакт с обрабатываемым материалом. Для резкого увеличения стойкости этих элементов их защищают прочными износостойкими покрытиями. Такие композиционные детали работают до износа покрытия или его отрыва (скола). Последнее определяется, в основном, адгезионной прочностью покрытия – прочностью его связи с основой детали.

Адгезионная прочность покрытий зависит от множества факторов: конструкции и материала детали, материала покрытия и способа его нанесения, технологических режимов нанесения и культуры производства – уровня автоматизации, точности соблюдения режимов операций и составов веществ, чистоты рабочего места и внимательности персонала и многого другого. Единственным средством контроля эффективности оптимизации перечисленных факторов является непосредственное измерение адгезионной прочности таких покрытий. От быстроты и точности таких измерений во многом зависят как итоги проектирования оборудования, так и технико-экономические результаты его эксплуатации.

Адгезионная прочность системы «адгезив – субстрат» наиболее часто исследуется экспериментально методом отрыва штифтов [1]. По результатам эксперимента напряжения сцепления определяют как отношение силы, зафиксированной в момент начала отрыва штифта от покрытия, к площади торца штифта.

К сожалению, такой расчет устанавливает среднюю величину адгезионной прочности, т.к. напряжения по торцу штифта распределены существенно неравномерно. Учет этой неравномерности позволит в значительной степени приблизить модели, используемые при проектировании деталей с покрытиями, к реальным напряжениям и деформациям, возникающим в ней, а значит получить адекватные модели разрушения.

Целью настоящей работы является создание расчетно-экспериментального метода измерения напряжений, возникающих в системе «деталь – покрытие» при отрыве последнего, путем теоретических и экспериментальных исследований факторов, влияющих на эти напряжения.

Для исследования напряжений, возникающих в системе «деталь – покрытие» при отрыве последнего, была создана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1. Покрытие 4 нанесено на общую торцевую поверхность конического штифта 1 и матрицы 3, установленной в кольцевую опору 2. Поверхность покрытия при извлечении штифта силой P деформируется неравномерно и по его торцу возникают отрывающие напряжения, величина которых подлежит определению.

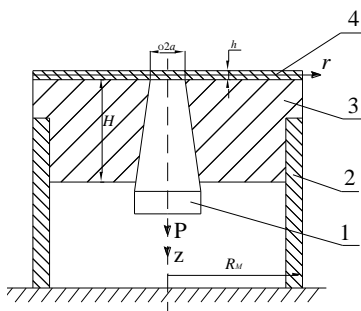


Рисунок 1 – Схема устройства для определения адгезионной прочности покрытия

Для построения математической модели экспериментального устройства будем считать штифт и матрицу упругим основанием, а покрытие – тонкой пластинкой, сцепленной с этим основанием. Под воздействием силы P покрытие изгибается симметрично относительно центральной оси, следовательно, его вертикальные перемещения – прогибы $w(r)$ – будут зависеть только от радиальной координаты r [2]:

$$L^2 \left[\left(\frac{q(r)}{D} \right) \right], \quad (1)$$

где $L = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}$ – дифференциальный оператор; $q(r)$ – внешняя нагрузка;

$p_1(r)$ – контактные напряжения; $D = \frac{1}{12} E h^3 / (1 - \mu^2)$ – цилиндрическая жесткость покрытия с толщиной h ; E , μ – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала покрытия.

Покрытие нагружается штифтом контактными напряжениями $p_1(r)$ в круге $r < a$ (внутренняя область) и эта нагрузка вызывает реакцию поверхности матрицы, $p_2(r)$, во внешней области $r > a$. Следовательно, особенностью рассматриваемой задачи является отсутствие внешней (известной) нагрузки, т.е. в уравнении (1) функция $q(r) = 0$. Примем, что контактные напряжения пропорциональны прогибам (модель основания Винклера),

$$p_j(r) = k_j w_j(r), \quad j = 1, 2, \quad (2)$$

где k_j – коэффициент пропорциональности, называемый модулем основания.

Модуль основания можно найти по формуле [2]

$$k_i = E_i / H_i, \quad (3)$$

где E_i , H_i – модуль упругости штифта ($i = 1$) либо матрицы ($i = 2$) и их длина (толщина).

Учитывая описанные особенности предложенной модели и подставив (2) в (1), получим

$$L^2 w_j(r) - \frac{k_j w_j(r)}{D} = 0. \quad (4)$$

Для внутренней и внешней областей вводим безразмерные аргументы $x_i = r/l_i$ и прогибы $z_i = w_i/l_i$, в которых:

$$l_i = \sqrt[4]{k_i/D}, \quad (5)$$

в результате уравнение (4) получит вид (индексы $i = 1, 2$ опускаем)

$$L^2 z + z = 0. \quad (6)$$

Решение этого уравнения известно [3]:

$$z(x) = \sum_{n=1}^4 A_n \psi_n, \quad (7)$$

где ψ_n – выражается через функции Томсона:

$$\psi_1(x) = \operatorname{ber} x, \quad \psi_2(x) = -\operatorname{bei} x, \quad \psi_3(x) = -\frac{2}{\pi} \operatorname{kei} x, \quad \psi_4(x) = -\frac{2}{\pi} \operatorname{ker} x. \quad (8)$$

Для внутренней зоны должны удовлетворяться условия ограниченности прогибов z_1 и поперечной силы Q_1 при $r \rightarrow 0$. Поскольку функции $\operatorname{kei}(x)$ и

$\ker(x)$ неограниченно возрастают при $x \rightarrow 0$, данные условия будут выполнены при $A_3 = 0$ и $A_4 = 0$ [4]. Следовательно, решение для внутренней области имеет вид

$$z_1 \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix} = A_1 \psi_1 \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix} + A_2 \psi_2 \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Радиус внешней области, т.е. матрицы, $R_M \gg a$, поэтому примем, что для этой зоны $a \leq r < \infty$. Здесь угол поворота $w_2(r)$, изгибающий момент $M_2(r)$ и поперечная сила $Q_2(r)$ должны затухать при $r \rightarrow \infty$, что выполняется при $A_1 = 0$ и $A_2 = 0$, поэтому

$$z_2 \begin{pmatrix} \psi_3 \\ \psi_4 \end{pmatrix} = A_3 \psi_3 \begin{pmatrix} \psi_3 \\ \psi_4 \end{pmatrix} + A_4 \psi_4 \begin{pmatrix} \psi_3 \\ \psi_4 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Константы A_n формул (9) и (10) определяются из условий непрерывности для покрытия на границе "штифт – матрица" $r = a$

$$M_1|_{r=a^-} = M_2|_{r=a^+}; \quad \left. \frac{dw_1}{dr} \right|_{r=a^-} = \left. \frac{dw_2}{dr} \right|_{r=a^+} \quad (11)$$

Здесь минус и плюс обозначают, что берутся выражения (9) или (10), соответственно.

Для формулировки второй пары уравнений используем условия равновесия, записанные через перемещения в соответствии с (2):

$$2\pi k_1 \int_0^a \psi_1(r) r dr = P; \quad 2\pi k_2 \int_a^\infty \psi_2(r) r dr = P \quad (12)$$

По условиям (11) и (12) определяются искомые постоянные A_1, A_2, A_3 и A_4 . В выражениях для c_1, c_2, \dots, c_6 функции ψ_1, ψ_2 и их производные в качестве аргумента имеют выражение $a/11$, а функции ψ_3, ψ_4 и их производные – выражение $a/12$. По результатам вычислений контактных напряжений построены графики соответствующих зависимостей (рис. 2), позволяющие судить о характере распределения этих напряжений вдоль радиальных координат защищенного покрытием торца штифта.

Окончательный результат носит характер расчетно-экспериментальной зависимости. Вычисления проводились при следующих значениях характеристик основания и покрытия: $k_1 = k_2 = 2500$ Н/мм³; $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,28$; $h = 0,25$ мм. Величина внешней нагрузки $P = 500$ Н.

Неравномерность в распределении контактных напряжений увеличивается с ростом радиуса торца штифта a (рис. 2). Последнее обстоятельство может приводить к значительной погрешности при расчете адгезионной прочности покрытий (рис. 3) и должно быть обязательно учтено как при постановке эксперимента, так и на этапе расчета.

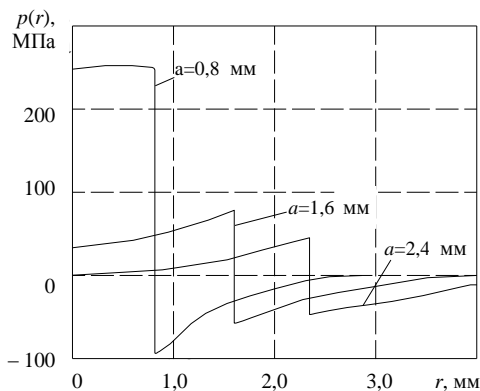


Рисунок 2 – Зависимость контактных напряжений от радиальной координаты

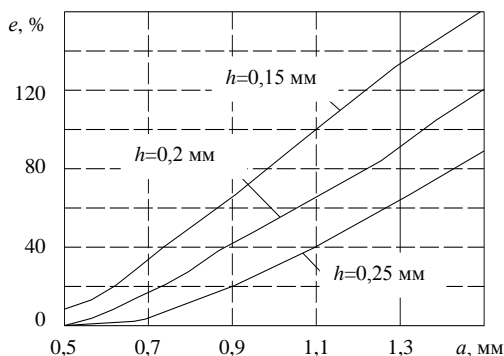


Рисунок 3 – Зависимость величины относительной погрешности расчета от радиуса торца штифта

Важным фактором надежности рабочих элементов деталей аппаратов является адгезионная прочность покрытий, наносимых на эти детали. Существующие методы измерений этой прочности методом штифтов не обеспечивают необходимую при проектировании точность.

Результаты исследования показывают, что традиционный способ расчета имеет некоторый смысл лишь для сравнительного анализа механических свойств покрытий, тогда как предложенный метод позволяет установить истинную величину сопротивления отрыву покрытия, необходимую при проведении проектных работ.

Список использованных источников: 1. Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. – М.: Химия, 1977. – 275 с. 2. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Физматгиз, 1963. – 308 с. 3. Григолюк Э.И. Контактные задачи теории пластин и оболочек / Э.И. Григолюк, В.М. Толкачев. – М.: Машиностроение, 1980. – 264 с. 4. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М.; Наука, 1969. – 228 с.

Поступила в редколлегию 07.06.2010