

УДК 621.01:621.7:004

**В.М. Пашкевич, канд. техн. наук, доц., В.В. Афаневич****КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ  
МАСЛОЕМКОСТИ ПОВЕРХНОСТИ**

Статья посвящена методике определения величины маслоемкости поверхности. Методика позволяет как получать эмпирические оценки маслоемкости поверхности, так и прогнозировать величину маслоемкости поверхности на этапе проектирования технологического процесса ее обработки.

Известно, что маслоемкость поверхности – важный эксплуатационный параметр, который необходимо учитывать при анализе контакта поверхностей. Ее величина характеризуется объемом смазывающей жидкости, удерживаемой на поверхности детали, и описывается выражением

$$M = \frac{V_m}{S_{нов}}, \quad (1)$$

где  $V_m$  – объем смазывающей жидкости, удерживаемый на поверхности детали;  $S_{нов}$  – площадь поверхности.

В настоящий момент нет общепринятого подхода к определению маслоемкости. Существует способ определения маслоемкости не по собственно исходному профилю, а на основе анализа кривой Аббота. Однако на практике возникает необходимость определения маслоемкости поверхности не по усредненным характеристикам, а по реальному профилю. Это дало предпосылку для создания описанной ниже методики определения маслоемкости.

Разработанная нами математическая модель позволяет оценивать маслоемкость поверхности, характеризуемой реальным профилем. Модель реализована в компьютерной программе, использующей в качестве входных данных профилограммы реальных поверхностей или результаты их моделирования. Программа базируется на следующей методике.

Рассмотрим фрагмент профиля такой поверхности, представленный на рис. 1. Из рисунка видно, что объем смазки, удерживаемой поверхностью, пропорционален площади, ограниченной впадинами профиля и поверхностью смазывающей жидкости в этих впадинах. Для того чтобы найти эту площадь, необходимо найти сумму элементарных площадей  $\Delta S_i \approx \Delta x_i \cdot \Delta y_i$ , на которые она разбита. Полную площадь можно найти как сумму элементарных площадей

$$S \approx \sum_{i=1}^n \Delta S_i = \sum_{i=1}^n (\Delta x_i \cdot \Delta y_i), \quad (2)$$

где  $n$  – число отрезков разбиения.

Если выбрать единичную высоту отрезков  $\Delta y$ , на которые разбита высота профиля, то полная площадь будет описываться выражением

$$S \approx \sum_{i=1}^n (\Delta x_i \cdot 1) = \sum_{i=1}^n \Delta x_i. \quad (3)$$

Таким образом, площадь, ограниченная профилем, оказывается пропорциональной сумме длин отрезков, на которые она разбита. Аналогично, объем смазки, ограни-

ченный профилем впадин и поверхностью смазки, оказывается пропорциональным сумме длин отрезков, на которые разбита площадь, в направлении оси  $x$ . Очевидно, что этот объем равен

$$V = \int S dz = \iint S(x, y) dx dz . \quad (4)$$

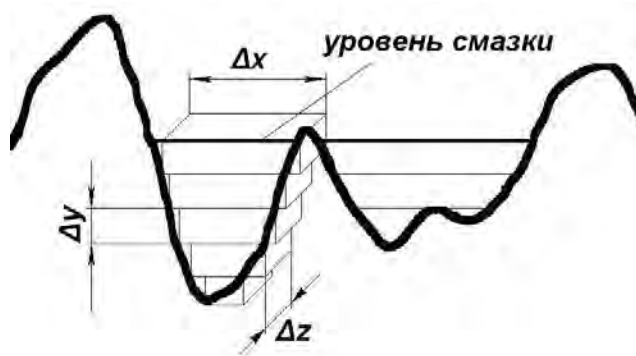


Рис. 1. Схема для определения объема смазки, удерживаемой поверхностью

Если принять  $\Delta y_i = 1$  и  $\Delta z_i = 1$ , то

$$V \approx \sum_{i=1}^n (\Delta S_i \cdot \Delta z_i) = \sum_{i=1}^n (\Delta x_i \cdot \Delta y_i \cdot \Delta z_i) = \sum_{i=1}^n (\Delta x_i \cdot 1 \cdot 1) = \sum_{i=1}^n \Delta x_i . \quad (5)$$

Для определения положения уровня смазывающей жидкости во впадинах будем учитывать капиллярный эффект, за счет которого смазка удерживается во впадинах. Из формулы Жюрена [1] можно определить уровень, на котором удерживается смазка при различных условиях.

$$(\rho_{жс} - \rho_г)gh = \frac{2\sigma_{жсг}}{\delta} , \quad (6)$$

где  $\rho_{жс}$  и  $\rho_г$  – плотность жидкости и газа соответственно,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $h$  – высота капиллярного поднятия жидкости,  $\text{м}$ ;  $\sigma_{жсг}$  – поверхностное натяжение на границе жидкость-газ,  $\text{Н/м}$ ;  $\delta$  – радиус капилляра или ширина узкой щели между плоскостями, ограничивающими капиллярное пространство [2],  $\text{м}$ .

Выразив из формулы (6) высоту  $h$ , рассчитаем ее величину при следующих условиях:  $\sigma_{жсг} = 0,03 \text{ Н/м}$  (на границе нефть/воздух);  $\rho_{жс} = 900 \dots 920 \text{ кг/м}^3$  (масло машинное);  $\rho_г = 1,205 \text{ кг/м}^3$  (воздух);  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  [3].

$$h = \frac{2\sigma_{жсг}}{(\rho_{жс} - \rho_г)g\delta} . \quad (7)$$

Зависимость высоты уровня смазки от ширины щели, которая в нашем случае имитирует пространство между впадинами, представим в табл. 1.

Результаты, представленные в табл. 1, показывают, что для реальных микронеровностей, вне зависимости от глубины и их раскрытия, впадины оказываются заполненными доверху. Таким образом, капиллярный эффект можно при этом не учитывать, а учитывать только соотношение высот соседних вершин микронеровностей (рис. 2). На рис. 2 приняты следующие обозначения:  $L_{\delta}$  – базовая длина микропрофиля;  $y_m$  –

глубина масляной пленки в направлении оси  $y$ ;  $y_{mat}$  – высота материала от базового отрезка до вершины профиля;  $y_{np_i}$  – координаты профиля;  $\Delta x$  – шаг отсчетов в пределах и в направлении базовой длины.

Табл. 1. Зависимость высоты подъёма жидкости от ширины щели

$\delta$ , мм	0,001	0,01	0,1	1
$h$ , мм	6737	674	67,4	6,74

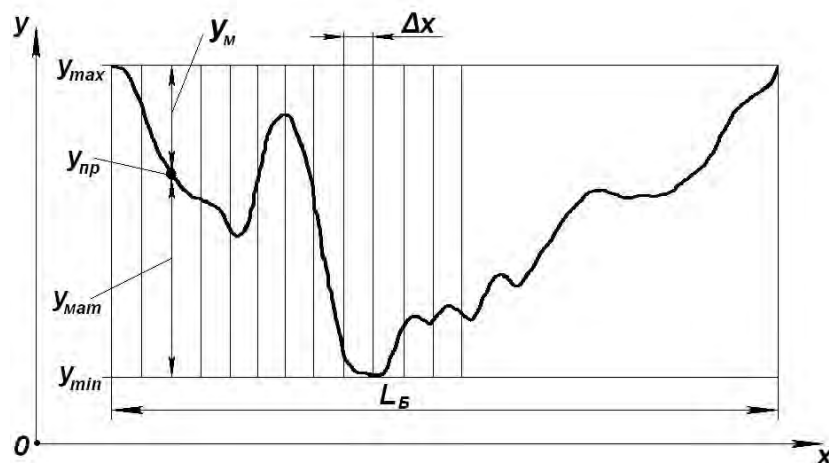


Рис. 2. Профиль поверхности, заполненный смазкой

По формуле прямоугольников площадь поверхности и объем смазки определяются выражениями:

$$S_{пов} \approx L_B \cdot \Delta z ; \quad (8)$$

$$V_M \approx \sum_{i=1}^n (y_{mi} \cdot \Delta x) \cdot \Delta z . \quad (9)$$

Подставив формулы (8) и (9) в формулу (1), получим

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{mi} \cdot \Delta x) \cdot \Delta z}{L_B \cdot \Delta z} = \frac{\Delta x \sum_{i=1}^n y_{mi}}{L_B} . \quad (10)$$

Так как число отсчетов профилограммы в пределах базовой длины  $L_B$  в направлении оси  $x$  равно

$$N_x = \frac{L_B}{\Delta x} , \quad (11)$$

а сумма глубин масляной пленки  $y_{mi}$  в направлении оси  $y$  равна

$$\sum_{i=1}^n y_{mi} = \sum_{i=1}^n (y_{max} - y_{np_i}) = \sum_{i=1}^n y_{max} - \sum_{i=1}^n y_{np_i} = N_x \cdot y_{max} - \sum_{i=1}^n y_{np_i} , \quad (12)$$

то формула (10) приобретает вид:

$$M = \frac{N_x \cdot y_{\max} - \sum_{i=1}^n y_{np_i}}{N_x} = y_{\max} - \bar{y}_{np}, \quad (13)$$

где  $\bar{y}_{np} = \frac{1}{N_x} \sum y_{np_i}$  – средняя высота профиля.

Рассмотрим понятие маслостойкости поверхности, применительно к понятиям «опорная длина профиля» и «относительная опорная длина профиля» [4].

Относительная опорная длина профиля  $t_p$  представляет собой отношение опорной длины профиля к базовой длине (рис. 3):

$$t_p = b_p / L_B, \quad (14)$$

где  $b_p$  – опорная длина профиля, равная сумме длин отрезков  $b_i$ , отсекаемых на заданном уровне  $p$  в материале профиля линией, эквидистантной средней линии  $m$  в пределах базовой длины  $L_B$ :

$$b_p = \sum_{i=1}^n b_i, \quad (15)$$

где  $p$  – уровень сечения профиля, т.е. расстояние между линией выступов и линией, пересекающей профиль эквидистантно линии выступов (или средней линии) профиля.

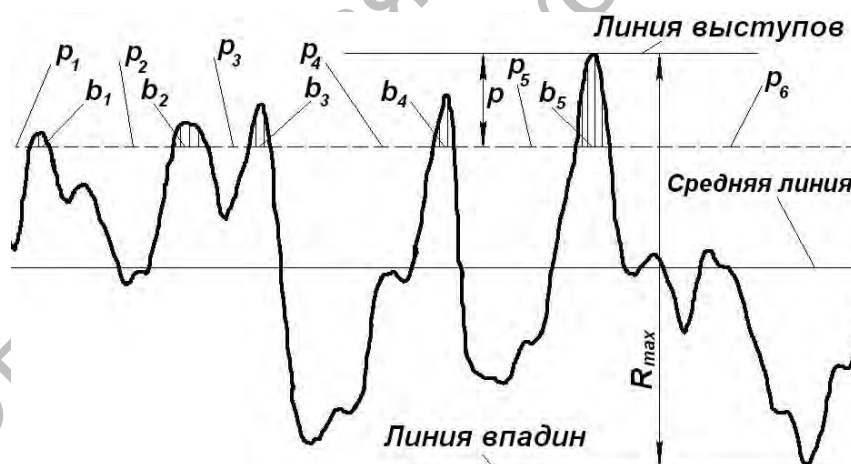


Рис. 3. Профилограмма и основные обозначения для определения параметров шероховатости  $t_p$  и  $b_p$

Определим относительную суммарную длину промежутков между выступами микронеровностей  $p_p$ , занимаемую смазочным материалом. Она равна сумме длин отрезков  $p_i$ , отсекаемых на заданном уровне  $p$  в смазке линией, эквидистантной средней линии в пределах базовой длины  $L_B$ :

$$p_p = \sum_{i=1}^n p_i. \quad (16)$$

Таким образом, объем смазки связан с величиной  $p_p$  соотношением

$$V \approx \sum_{i=1}^{N_h} dp_i \cdot dh \cdot dz. \quad (17)$$

Подставим (17) в формулу (1):

$$M \approx \frac{\sum_{i=1}^{N_h} dp_i \cdot dh \cdot dz}{L_B \cdot dz} = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} (L_B - db_i)}{L_B} dh = \sum_{i=1}^{N_h} (1 - t_{p_i}) \cdot dh. \quad (18)$$

Из формулы (18) можно сделать вывод, что при увеличении относительной опорной длины профиля маслосъемность поверхности уменьшается. Эту зависимость можно проиллюстрировать (рис. 4).

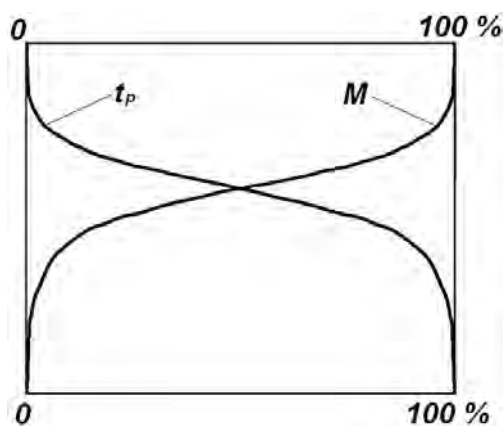


Рис. 4. Связь кривой Аббота и кривой относительной маслосъемности

Следует отметить, что нижняя часть кривой относительной маслосъемности может быть несколько смещена вправо, так как уровень масляной поверхности может находиться ниже максимального выступа микронеровностей.

Так как в выражении (18)

$$\sum_{i=1}^{N_h} (1 - t_{p_i}) \approx N_h \cdot (1 - \bar{t}_p), \quad (19)$$

где  $\bar{t}_p$  – средняя величина относительной опорной длины профиля, определяемая в средней части кривой Аббота, то маслосъемность поверхности равна

$$M \approx N_h \cdot (1 - \bar{t}_p) \cdot dh \approx R_{\max} \cdot (1 - \bar{t}_p), \quad (20)$$

где  $R_{\max}$  – наибольшая высота неровностей профиля, связанная со значением среднего отклонения профиля  $Ra$  эмпирической зависимостью

$$R_{\max} \approx 4Ra. \quad (21)$$

Следовательно, для определения величины маслосъемности поверхности можно использовать приближенную формулу

$$M \approx 4Ra(1 - \bar{t}_p). \quad (22)$$

Таким образом, из полученного соотношения следует, что маслоемкость поверхности выше у деталей:

- с более высокой шероховатостью;
- с более резким спадом кривой относительной опорной длины профиля  $t_p$  в средней части (рис. 5).

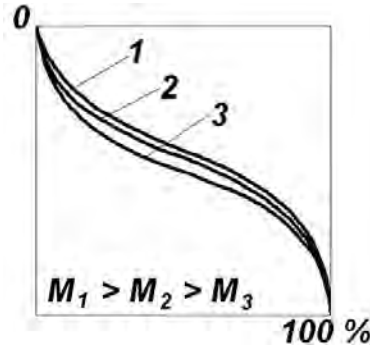


Рис. 5. Сравнение кривых Аббота применительно к маслоемкости

Описанная методика определения маслоёмкости поверхности была проверена на основе математического моделирования профилей реальных поверхностей и подтвердила правильность представленных в ней подходов. Ее использование позволяет как получать эмпирические оценки маслоемкости поверхности, так и вести их сравнение по величине этого важного эксплуатационного показателя. Другим достоинством описанной методики является возможность ее использования для прогнозирования величины маслоемкости поверхности на этапе проектирования технологического процесса ее обработки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А. М. Прохоров ; ред. кол. Д. М. Алексеев [и др.]. - М. : Сов. энцикл., 1983. - 928 с. : ил.
2. **Яворский, Б. М.** Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. - 6-е изд., испр. - М. : Наука, 1974. - 944 с.
3. **Енохович, А. С.** Справочник по физике и технике: учеб. пособие для учащихся / А. С. Енохович. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Просвещение, 1989. - 224 с. : ил.
4. **Соломахо, В. Л.** Основы стандартизации, допуски, посадки и технические измерения / В. Л. Соломахо, Б. В. Цитович. - Мн. : Дизайн ПРО, 2004. - 296 с. : ил.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 31.10.05

**V.M. Pashkevich, V.V. Afanevich**  
**Computer modelling and analysis of surface**  
**lubricant capacitance**  
Belarusian-Russian University

The paper is dedicated to the method of finding out surface lubricant capacitance. This method allows both to get empirical estimation of surface lubricant capacitance and to predict the degree of lubricant capacitance while designing the technological process of the surface treatment.