

УДК 621.891

ДЕФОРМАЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ ТВЕРДОСТИ ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**А.В. Дыха, профессор, д.т.н., Хмельницкий национальный университет,
В.Г. Писаренко, доцент, к.т.н., начальник КНПО «Форт», г. Винница,
Т.В. Гедзюк, аспирант, Хмельницкий национальный университет**

Аннотация. Предложена характеристика деформационных свойств пластичных материалов – функция твердости, показывающая зависимость давлений сопротивления внедрению индентора от времени деформирования.

Ключевые слова: пластичные материалы, смазки, ползучесть, контактная задача, функция твердости.

ДЕФОРМАЦІЙНА ФУНКЦІЯ ТВЕРДОСТІ ПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

**О.В. Дыха, професор, д.т.н., Хмельницький національний університет,
В.Г. Писаренко, доцент, к.т.н., начальник КНВО «Форт», м. Вінниця,
Т.В. Гедзюк, аспірант, Хмельницький національний університет**

Анотація. Запропоновано характеристику деформаційних властивостей пластичних матеріалів – функцію твердості, що встановлює залежність тисків опору втиснення індентора від часу деформування.

Ключові слова: пластичні матеріали, мастила, повзучість, контактна задача, функція твердості.

DEFORMATION HARDNESS FUNCTION OF PLASTIC MATERIALS

**A. Dykha, Professor, Doctor of Technical Science, Khmel'nitsk National University,
V. Pisarenko, Associate Professor, Candidate of Technical Science, Chief of KNVO
«Fort»Vinnitsa, T. Hedziuk, post-graduate, Khmel'nitsk National University**

Abstract. The description of deformation properties of plastic materials – function of hardness, showing the dependence of resistance pressures of indener introduction on deformation time is offered.

Key words: plastic materials, grease, creep, contact problem, hardness function is offered.

Введение

Повышение долговечности изделий машиностроения достигается не только применением новых материалов, покрытий, удачным конструированием узлов трения, но и, в значительной степени, правильным выбором смазочного материала. При выборе смазки наиболее достоверные данные дают эксплуатационные испытания, однако они являются длительными и дорогими. Поэтому распространены также рациональные лабораторные

и стендовые испытания. Лабораторные испытания смазочных материалов проводят для определения физико-механических или служебных свойств.

Анализ публикаций

Пластичные смазки в номенклатуре применяемых смазочных материалов получили наибольшее распространение. Пластичные смазки – это густые мазеобразные продукты, в состав которых входят: масло – основа,

загуститель – мыла, твердые углероды и различные добавки (присадки). Отличительной особенностью пластичных смазок является то, что они способны, в зависимости от условий работы, обладать свойствами как твердых, так и жидких веществ. Под действием небольших нагрузок смазки ведут себя как твердое тело – могут удерживаться на вертикальных и наклонных поверхностях. При воздействии больших нагрузок смазки работают как жидкость – обладают текучестью.

Эффективность работы пластичной смазки определяется длительностью ее удержания на поверхности. Для оценивания эффективности пластичных смазок важно знать их механические свойства. Среди множества возможных характеристик механических свойств одной из наиболее важных является предел прочности смазки на сдвиг.

Сопротивление течения пластичной смазки характеризуется вязкостью. Вязкость – свойство пластичной смазки, зависящее от скорости ее течения (деформации). В материаловедении твердых тел одной из базовых механических характеристик принята величина твердости материала. Твердость – это величина средних давлений под индентором (шаром, конусом, пирамидой), при которых стабилизируются пластичные деформации.

В механике пластичных смазок аналогом твердости смазки является число пенетрации, определяемое по ГОСТ 5346-78 [1]. Число пенетрации определяется при вдавливании конуса в плоскую поверхность пластичной смазки и измеряется глубиной внедрения индентора. С помощью числа пенетрации удастся оценивать влияние деформации смазки при различных температурах на ее твердость (мягкость).

Отметим основные недостатки определения твердости пластичной смазки методом пенетрации.

1. Число пенетрации определяется в одной временной точке (5 с) процесса, который развивается во времени. При других временных точках длительности процесса пенетрации могут быть получены данные о твердости смазок, противоположные тем, что получены при выдержке 5 с.

2. Твердость (или число пенетрации) смазки определяется глубиной вдавливания конуса. При оценке твердости металлов она определяется как предельное давление, реально отображая явление сопротивления вдавливания индентора в материал.

3. Твердость смазки определяется при вдавливании конуса со специальным заостренным концом, расположенным по оси конуса. Это осложняет определение силовых характеристик (например, давления) для пластичной смазки.

Цель и постановка задачи

В данной работе рассматриваются новые аспекты исследования физико-механических свойств пластичных смазочных материалов. Предложено в качестве одной из базовых характеристик механических свойств пластичных материалов (смазок) применять зависимость (функцию) твердости от времени, определяя ее при вдавливании сферического индентора (шара). Метод определения функции твердости смазки основывается на разрабатываемой далее механике контактного взаимодействия твердого шара и плоскости, которая имеет свойство ползучести.

Контактные задачи для взаимодействия сферы и вязкопластичной поверхности

Прямая задача

1⁰. Расчетная схема взаимодействия твердого шара с вязкоползучей деформируемой плоскостью представлена на рис. 1.

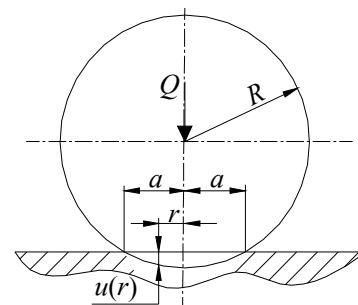


Рис. 1. Схема контакта шара и плоскости

Постановка задачи о взаимодействии твердого шара R с плоскостью в состоянии ползучести [2] включает три соотношения:

1) модель установившейся ползучести материала смазки

$$\frac{du_c}{dt} = k_c \sigma^{m_c}; \quad (1)$$

2) условие неразрывности в контакте можно представить в виде

$$u_c(t) = \frac{a^2(t) - r^2}{2R}; \quad (2)$$

3) условие равновесия в контакте

$$Q = 2\pi \int_0^a \sigma(t, r) r dr, \quad (3)$$

где $\sigma(t, r)$ – распределение контактного давления, зависящее от времени t ;
 $a(t)$ – радиус круговой площадки контакта;
 r – радиальная координата.

2⁰. Решение задачи.

Дифференцируя условие (2) и приравнявая (1), имеем

$$k_c \sigma^{m_c} = \frac{a da}{R dt}; \quad (4)$$

отсюда

$$\sigma(t) = \left(\frac{1}{k_c} \frac{a da}{R dt} \right)^{\frac{1}{m_c}}. \quad (5)$$

Очевидно, что давление равномерно распределено по площадке.

Подставляя далее это выражение в условие (3), получаем

$$Q = 2\pi \int_0^a \left(\frac{1}{k_c} \frac{a da}{R dt} \right)^{\frac{1}{m_c}} r dr. \quad (6)$$

После интегрирования получаем дифференциальное уравнение относительно функции $a(t)$

$$\left(\frac{Q}{\pi} \right)^{m_c} = a^{2m_c} \frac{a da}{k_c R dt}. \quad (7)$$

Решая это уравнение, имеем

$$a(t) = \left[(2m_c + 2) \left(k_c R \left(\frac{Q}{\pi} \right)^{m_c} t + c \right) \right]^{\frac{1}{2m_c + 2}}. \quad (8)$$

При $a(t=0) = 0$, имеем $c = 0$

$$a(t) = \left[(2m_c + 2) k_c R \left(\frac{Q}{\pi} \right)^{m_c} t \right]^{\frac{1}{2m_c + 2}}. \quad (9)$$

При равномерном распределении контактных давлений имеем

$$\sigma(t) = \sigma_0(t) = \frac{Q}{\pi a^2(t)}. \quad (10)$$

Максимальное перемещение от ползучести получаем при $r = 0$

$$u_{c0}(t) = \frac{a^2(t)}{2R}. \quad (11)$$

При $m_c = 1$ (линейная ползучесть) имеем при $a_0 = 0$

$$a(t) = \left(4k_c R \left(\frac{Q}{\pi} \right) t \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (12)$$

Ниже представлен пример расчета размеров площадки контакта $a(t)$ при внедрении сферического индентора по зависимости (9).

Исходные данные:

1. Параметры контактной ползучести: $m_c = 1,82$; $k_c = 0,302$ МПа^{-m_c}.
2. Радиус сферического индентора $R = 6,35$ мм.
3. Вес индентора $Q = 1,9$ Н.

Ниже в табл. 1 представлены результаты расчета, полученные с помощью программы MathCad.

Таблица 1 Результаты расчета

t , мин	2	3	7	17	37	67
$a(t)$, мм	1,47	1,58	1,83	2,14	2,46	2,73

Обратная задача

Пусть из эксперимента известна зависимость радиуса площадки контакта $a(t)$ от времени. Необходимо, используя решение прямой задачи, определить параметры k_c, m_c модели установившейся ползучести.

Рассмотрим случай начальной нулевой площадки контакта и представим экспериментальные данные в виде степенной аппроксимирующей функции

$$a(t) = c_c t^{\beta_c}. \quad (13)$$

Подставляя (15) в (9), получим

$$c_c^{2m_c+2} t^{\beta_c(2m_c+2)} = (2m_c + 2) k_c R \left(\frac{Q}{\pi} \right)^{m_c} t. \quad (14)$$

Из условия выполнения этого уравнения при любых значениях аргумента t следует

$$m_c = \frac{1 - 2\beta_c}{2\beta_c}. \quad (15)$$

Для второго параметра из (14)

$$k_c = \frac{c_c^{\frac{1}{\beta_c}} \beta_c}{R \left(\frac{Q}{\pi} \right)^{m_c}}. \quad (16)$$

В случае ненулевой начальной площадки контакта ($a_0 \neq 0$) необходимо определить параметры модели ползучести k_c , m_c при заданной экспериментальной функции $a(t) = a_0 + a(t)$. Решение задачи выполняется при условии, что известными являются две экспериментальные точки: (a_1, t_1) .

Запишем по аналогии с решениями для нулевой площадки контакта уравнение для двух этих точек

$$\left. \begin{aligned} a_1^{2m_c+2} - a_0^{2m_c+2} &= (2m_c + 2) k_c R \left(\frac{Q}{\pi} \right)^{m_c} t_1, \\ a_2^{2m_c+2} - a_0^{2m_c+2} &= (2m_c + 2) k_c R \left(\frac{Q}{\pi} \right)^{m_c} t_2. \end{aligned} \right\}$$

Взяв отношение уравнений, получим

$$\frac{a_1^{2m_c+2} - a_0^{2m_c+2}}{a_2^{2m_c+2} - a_0^{2m_c+2}} = \frac{t_1}{t_2}$$

или

$$\frac{\alpha_1^{2m_c+2} - 1}{\alpha_2^{2m_c+2} - 1} = \frac{t_1}{t_2}.$$

Это нелинейное уравнение можно решить численным методом.

Таким образом, по результатам испытаний поверхности смазки на ползучесть можно определить параметры модели контактной ползучести.

Методика определения функции твердости смазки

Порядок определения параметров функции ползучести смазки следующий.

1. Выбираются исходные параметры процесса вдавливания шара в поверхность пластичной смазки:

R – радиус шара;

Q – нагрузка, действующая на шар.

2. Проводится вдавливание шара в поверхность смазки с измерением максимальной глубины вдавливания шара u_{c_0} .

Используя формулу (13), определяется радиус площадки контакта шара и поверхности смазки

$$a(t) = [2Ru_{c_0}(t)]^{\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

3. Экспериментальная зависимость радиуса площадки контакта от времени представляется в виде степенной функции

$$a(t) = c_c t^{\beta_c}. \quad (18)$$

Параметры аппроксимации c_c , β_c определяются методом наименьших квадратов или приближенно по двум точкам (a_1, t_1) ; (a_2, t_2) по формулам

$$\beta_c = \frac{\lg(a_1/a_2)}{\lg(t_1/t_2)}, \quad (19)$$

$$c_c = a_1 / t_1^{\beta_c}. \quad (20)$$

4. Параметры m_c , k_c модели (1) ползучести смазки определяются по формулам (15) и (16).

Порядок определения параметров функции твердости смазки следующий.

1. Твердость смазки H_L или среднее давление на шар со стороны смазки определяется соотношением типа (10)

$$H_L(t) = \frac{Q}{\pi a^2(t)}. \quad (21)$$

Если из эксперимента известна величина радиуса площадки, то твердость определяется сразу по формуле (21).

2. Если для смазки известны параметры m_c , k_c модели контактной ползучести, то функция твердости определяется

$$H_L(t) = \frac{Q}{\pi \left[(2m_c + 2)k_c R \left(\frac{Q}{\pi} \right)^{m_c} t \right]^{\frac{1}{m_c + 1}}}. \quad (22)$$

3. В случае необходимости сравнения твердости смазок строятся функции $H_L(t)$.

4. Преобразовывая (22), можно установить зависимость между параметрами модели контактной ползучести и степенной функцией твердости вида $H_L = c_L t^{\beta_L}$

$$H_L(t) = \frac{Q}{\pi \left[(2m_c + 2)k_c R \left(\frac{Q}{\pi} \right)^{m_c} t \right]^{\frac{1}{m_c + 1}}} t^{-1/(m_c + 1)},$$

$$\beta_L = -\frac{1}{m_c + 1},$$

$$c_L = \frac{Q}{\pi \left[(2m_c + 2)k_c R \left(\frac{Q}{\pi} \right)^{m_c} \right]^{\frac{1}{m_c + 1}}}.$$

В качестве примера определения параметров контактной ползучести пластичных материалов были проведены исследования битума и пластилина при внедрении сферического стального индентора диаметром 12,7 мм и массой 190 г. Результаты испытаний и расчетов параметров модели контактной ползучести приведены на рис. 2 и в табл. 2.

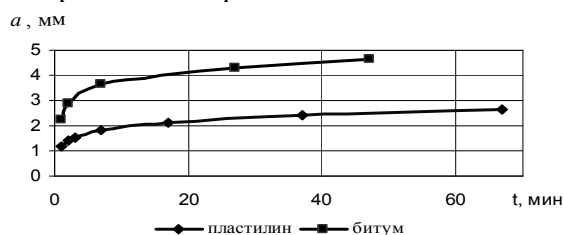


Рис. 2. Результаты испытаний на контактную ползучесть

Таблица 2 Результаты испытаний на контактную ползучесть и определение функции твердости пластичных материалов

Материал	Параметр степенной аппроксимации		Параметр модели контактной ползучести		Функция твердости, МПа
	c_c	β_c	m_c	k_c	
Пластилин	1,297	0,177	1,82	0,302	$H_L = 0,361t^{-0,35}$
Битум	2,403	1,803	1,77	8,943	$H_L = 0,106t^{-0,36}$

Выводы

1. Предложена характеристика деформационных свойств пластичных материалов – функция твердости, показывающая зависимость давлений сопротивления внедрению индентора от времени деформирования.
2. Для случая равномерного распределения давлений под сферическим индентором определена методика построения функции твердости пластичных материалов.
3. Предложенная характеристика функции твердости и методика ее определения позволяет оценивать и сравнивать деформационные свойства различных пластичных материалов при сертификационном контроле, эксплуатации и создании новых типов материалов.

Литература

1. ГОСТ 5346-78. Смазки пластичные. Методы определения пенетрации пенетрометром с конусом. – Введен впервые 01.01.79 г. – М.: Изд-во стандартов, 1987.
2. Кузьменко А.Г. Износ и контактная ползучесть шара на плоскости / А.Г. Кузьменко, А.В. Дыха // Проблемы трибологии. – 2004. – № 1. – С. 54–66.

Рецензент: В.И. Мощенок, профессор, к.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 8 июня 2011 г.