

Кузьменко А.Г.Хмельницкий национальный университет,
г. Хмельницкий, Украина
E-mail: tribosenator@gmail.com**ИСПЫТАНИЯ МАСЛЯНОГО СЛОЯ
ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ НА ОТРЫВ
ПО НОРМАЛИ**

УДК 621.891

Разработана математическая модель процесса отрыва поверхностей, смазанных пластической смазкой. Предложен и реализован метод испытаний на отрыв с определением удельной энергии отрыва, как новой характеристики смазок.

Ключевые слова: масляный слой, математическая модель процесса отрыва поверхностей, нагружение напряжения.

Введение и постановка задачи*Эффект прилипания смазанных поверхностей*

1. Если взять две плоских, гладких поверхности, смазать их пластической смазкой, (или жидкостью), ввести их в контакт и сжать некоторой силой N_c на некоторое время, а после этого попытаться растянуть, разделить по нормали эти поверхности, то при этом потребуется достаточно большая разрывная сила N_p .

2. Фактически это прилипание или адгезия поверхностей, а смазка играет роль клея. Разные виды смазки (жидкости) будут требовать приложения разных сил N_p для разрыва смазки и разделения поверхностей.

3. Взаимодействие поверхностей через смазку можно рассматривать, как сложное физико-механическое явление, при изучении которого можно получить полезную информацию и о физико-механических свойствах смазки.

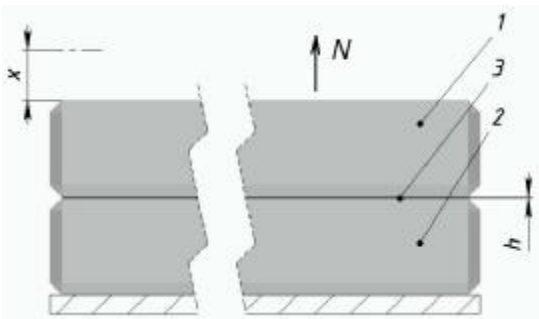
Постановка задач

Ставится задача: путём описания процесса отрыва смазанных поверхностей с помощью вариационно-экспериментального метода, разработать методы определения механических свойств граничной смазки, как:

1. Предел прочности σ_p на нормальный (по нормали), разрыв слоя граничной смазки.
2. Коэффициент поверхностного натяжения материала граничной смазки (пластической смазки).

1. Решение задачи о нормальном отрыве смазанных поверхностей вариационно-экспериментальным методом в форме экспоненты**1.1. Расчётная схема и функция диаграммы $N(x)$ растяжения граничного слоя по нормали****1.1.1. Схема опыта**

1. Две плоских смазанных поверхности, после введения в контакт, отдаляются друг от друга постепенно, увеличивающейся силой N .



2. Сила N по мере нагружения вызывает деформацию растяжения по нормали граничного слоя пластической смазки; деформация слоя вызывает перемещение тела 1 по нормали на величину x ;

3. По мере увеличения силы N перемещения x также увеличиваются; получаемую в результате функцию $N(x)$ будем называть диаграммой нормального отрыва поверхностей, или растяжения граничной смазки по нормали.

Рис. 1 – Схема испытания взаимодействия двух плоских поверхностей:

1 – тело 1; 2 – тело 2; 3 – граничный слой смазки, толщиной h размер площади: $a \times b$

1.1.2. Описание функции $N(x)$ диаграммы

растяжения экспоненциальной функцией

1) будем полагать, что функция диаграммы растяжения может быть представлена в форме экспоненты вида:

$$N(x) = N_{\infty} (1 - e^{-nx}), \quad (1.1)$$

где

$$N(x \rightarrow \infty) \approx N, \quad (1.2)$$

n – показатель степени экспоненты (1.1);

2) показатель степени можно [1] определить по соотношению:

$$n = \frac{1}{x_n}, \quad (1.3)$$

где x_n – определяется по графику диаграммы растяжения (рис. 2);

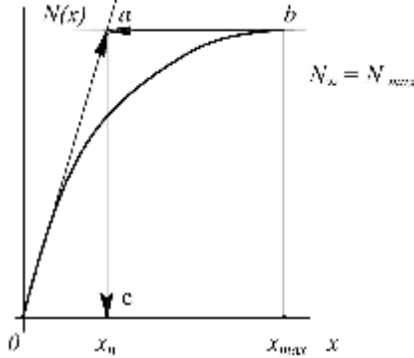


Рис. 2 – Схема определения величины x_n для зависимости (1.3)

3) Определение x_n :

Этап 1 – проводится касательная $0a$, к графику $N(x)$ в точке $x = 0$;

Этап 2 – проводится касательная ba к графику $N(x)$ в точке, в которой $N(x = x_{\max}) = N_{\max}$;

Этап 3 – из точки, a пересечения касательных ca и ba опускается перпендикуляр на ось x до пересечения в точке c , с координатами $x = x_n$;

4) Далее параметр экспоненты n определяется по соотношению (1.3).

1.2. Уравнение равенства контактной системы

1. Рассматривается равновесие контактной системы рис. 1 при растяжении граничного слоя (ГС) смазки с одной стороны силой $N(x)$, изменяющейся в процессе перемещения на величину x , а с другой нормальными напряжениями σ_p .

2. В дифференциальном виде:

$$dN(x) = A\sigma(x)dx, \quad (1.4)$$

где A – площадь по которой действует растягивающее напряжение $\sigma(x)$.

3. В интегральной форме уравнение равновесия имеет вид:

$$N(x) = A \int_0^x \sigma(x) dx. \quad (1.5)$$

Подставляя в (1.1) в (1.5), имеем:

$$N(x) = N_{\infty} (1 - e^{-nx}) = A \int_0^x \sigma(x) dx. \quad (1.6)$$

Это и есть основное уравнение равновесия контактной системы.

4. Задача состоит в определении функции растяжения $\sigma(x)$, удовлетворяющее уравнению равновесия (1.6); по определению это интегральное уравнение задачи, т.к. искомая функция стоит под знаком интеграла.

1.3. Решение уравнения равновесия в форме экспоненты

1) будем искать решения уравнения (1.6) в форме экспоненты вида:

$$\sigma(x) = \xi e^{-\alpha x}, \quad (1.7)$$

где ξ , α – параметры определяемой функции;

2) подставляя (1.7) в (1.6), получаем:

$$N_{\infty} (1 - e^{-nx}) = A \xi \int_0^x \alpha e^{-\alpha x} dx; \quad (1.8)$$

3) после интегрирования имеем:

$$\frac{N_{\infty}}{A\xi}(1-e^{-nx}) = (1-e^{-\alpha x}); \quad (1.9)$$

4) из условия выполнимости уравнения (1.9) при любых значениях переменной x следует решение:

$$\alpha = n, \quad (1.10)$$

$$\xi = \frac{N_{\infty}}{A}; \quad (1.11)$$

5) подставляя полученные значения параметров в (1.7) для функции напряжений получаем:

$$\sigma(x) = \frac{N_{\infty}}{A} e^{-nx}. \quad (1.12)$$

1.4. Анализ решения

1) представим решение (1.12) в безразмерном виде:

$$\frac{\sigma(x)A}{N_{\infty}} = e^{-nx}; \quad (1.13)$$

2) таким образом безразмерная функция растягивающих напряжений – классическая падающая экспонента:

$$\overline{\sigma(x)} = e^{-nx}; \quad (1.14)$$

3) главная особенность (1.14) заключается в том, что при $x = 0$ напряжения растяжения конечны:

$$\overline{\sigma(x=0)} = 1; \quad (1.15)$$

$$\sigma(x'=0) = \frac{N_{\infty}}{A}; \quad (1.16)$$

4) далее выполняется решение этой же задачи в форме степенной функции. Далее будет показано, что в этом случае: $\sigma(x=0) \rightarrow \infty$.

2. Решение задачи о нормальном отрыве смазанных поверхностей в форме степенной функции

2.1. Вид и параметры функции диаграммы сдвига

1) расчётная схема соответствует п. 1.1.1 и рис. 1;

2) будем на основе экспериментальных данных определять параметры степенной функции диаграммы растяжения:

$$N(x) = cx^n; \quad (2.1)$$

3) выбрав из экспериментальных данных две точки $(N_1, x_1); (N_2, x_2)$ находим параметры функции:

$$n = \frac{\lg \lg \frac{N_1}{N_2}}{\lg \lg \frac{x_1}{x_2}}; \quad (2.2)$$

$$c = \frac{N_1}{x_1^n}. \quad (2.3)$$

2.2. Уравнение равновесия контактной системы, подобно (1.5) принимаем в виде:

$$N(x) = A \int_0^x \sigma(x) dx. \quad (2.4)$$

2.3. Решение (2.4)

1) будем искать в форме степенной функции вида:

$$\sigma(x) = \xi x^\alpha; \quad (2.5)$$

2) после подстановки (2.1) и (2.5) в (2.4) получаем:

$$cx^n = A\xi \int x^\alpha dx; \quad (2.6)$$

3) после интегрирования (2.6) имеем:

$$\frac{cx^n}{A\xi} = \frac{x^{\alpha+1}}{\alpha+1}; \quad (2.7)$$

4) из условия выполнимости уравнения (2.7) при любых значениях x можно определить параметры ξ и α в виде:

$$n = \alpha + 1; \quad \alpha = n - 1, \quad (2.8)$$

$$\xi = \frac{cn}{A}. \quad (2.9)$$

5) подставляя (2.8) и (2.9) в (2.5), имеем функцию изменения напряжений растяжения граничного слоя в виде:

$$\sigma(x) = \frac{cn}{A} x^{n-1}. \quad (2.10)$$

2.4. Анализ решения

1) при $n < 1$ т.е. при выпуклом графике функции диаграммы растяжения $N(x)$ (2.10), имеет вид:

$$\sigma(x) = \frac{cn}{A} \frac{1}{x^{n-1}}, \quad (2.11)$$

в итоге, при $x \rightarrow 0$,

$$\sigma(x \rightarrow 0) \rightarrow \infty \quad (2.12)$$

т.е. в начальный момент сдвига функция напряжений растяжения стремится к бесконечности;

2) при $x > 0$ функция (2.11) ведет себя как гиперболическая;

3) в более удобном виде:

$$\sigma(x) \frac{A}{cnx^n} = \frac{\sigma x A}{n N(x)} = \frac{1}{x}. \quad (2.13)$$

3. Механические характеристики смазки, определённые при разрыве плёнки

3.1. Средняя удельная энергия разрушения граничного слоя смазки на разрыв

$$1) \quad \mathfrak{E}_{y0}^p = \frac{\mathfrak{E}^p}{A} = \frac{N_{\max} X_{ep}}{A}; \quad (3.1)$$

2) так как, по размерности $\mathfrak{E}_{y0}^p$ совпадает с *поверхностным натяжением* α_{nn} , можно полагать,

что: $\mathfrak{E}_{y0}^p = \alpha_{nn}$.

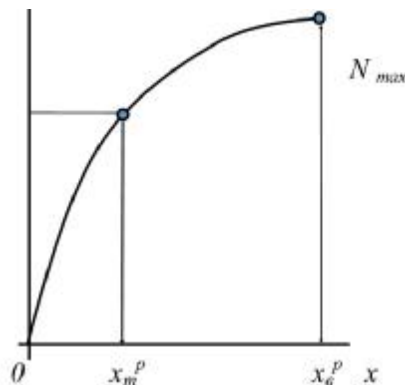


Рис. 3 – Схема диаграммы растяжения слоя смазки при отрыве

3.2. Средний предел прочности смазки σ_{ϵ}^p при растяжении отрывом

$$\sigma_{\epsilon}^p = \frac{N_{\max}}{A}, [\text{кг/мм}^2]. \quad (3.2)$$

3.3. Средний предел текучести смазки σ_m^p при растяжении отрывом

$$\sigma_m^p = \frac{N_m}{A}, [\text{кг/мм}^2]. \quad (3.3)$$

3.4. Жесткость граничной смазки при растяжении отрывом C_{ϵ}^p :

$$C_{\epsilon}^p = \frac{N_m}{X_m^p}, [\text{кг/мм}]. \quad (3.4)$$

4. Эксперименты**4.1. Методика испытаний на отрыв**

1) установка и условия испытаний, УМ-22, лаборатории ТЭТ-лаб. Установка состоит из: деревянного корпуса 9; два стеклянных образца 1 и 2, смазанных смазкой 3 и закрепленных в корпусе; сила отрыва создается с помощью вороткового привода, состоящего из тонкой стальной проволоки 4, диаметром 0,5 мм; воротка 5, ручки 6, сила N измеряется с помощью электронного динамометра 7; перемещение x измеряется индикатором часового типа 8;

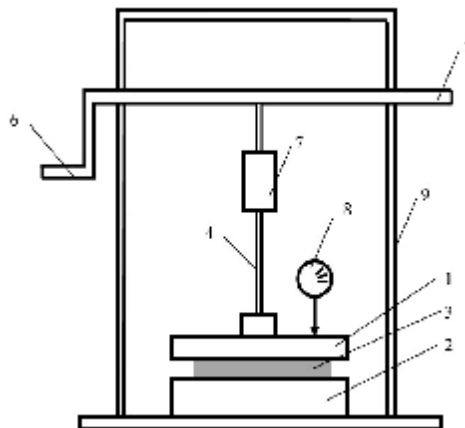


Рис. 4 – Схема установки

2) результаты измерений заносятся в таблицу типа табл. 1 и представляется в виде графика;

3) условия испытаний:

- поверхность тел 1 и 2 – стекло;
- смазки: вода, Литол-24, Мобил, Солидол;
- нагрузка N до 16 кг.

4.2. Результаты испытаний

Таблица 1

Среда	Вода		Литол-24		Мобил		Солидол	
№	N , кг	x , мм	N , кг	x , мм	N , кг	x , мм	N , кг	x , мм
1	1,25	0,02	3,47	0,02	11,2	0,4	11,8	0,3
2	1,3	0,025	5,24	0,04	11,27	0,45	12,3	0,35
3	1,4	0,035	6,73	0,06	11,4	0,47	13,3	0,4
4	1,47	0,04	7,15	0,1	11,45	0,5	13,8	0,47
5	1,53	0,045	8,76	0,15	11,7	0,55	14,5*	0,5*
6	1,53*	*	9,25	0,2	11,7*	*		

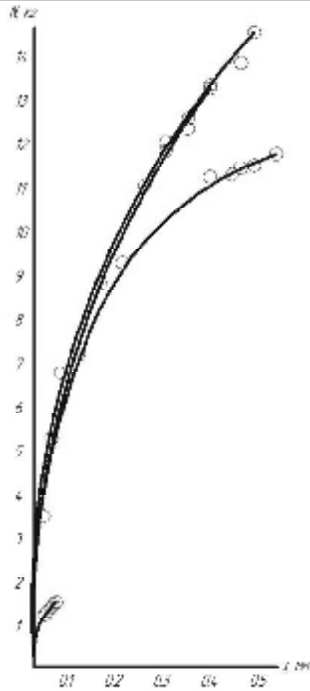


Рис. 5 – График функции $N(x)$ для Литол-24, Мобил, Солидол

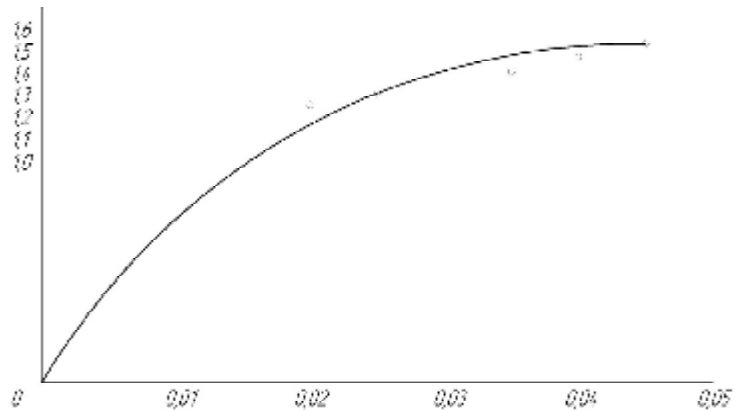


Рис. 6 – График функции $N(x)$ для воды

4.3. Обработка результатов для воды

1. Энергия разрушения слоя воды при растяжении, при нормальной энергии разрушения:

$$N_{\max} = 1,53 \text{ кг}, x_{\text{ер}} = 0,045 \text{ мм.}$$

$$\mathcal{E}^p = N_{\max} x_{\text{ер}} = 1,53 \cdot 0,045 = 0,069 \text{ кг. мм.}$$

2. Удельная энергия разрушения:

$$\mathcal{E}_{\text{уд}}^p = \frac{\mathcal{E}^p}{A} = \frac{0,069 \text{ кг.мм.}}{10^4 \text{ мм}^2} = 0,069 \cdot 10^{-4} \text{ кг/мм.}$$

Или $\mathcal{E}_{\text{уд}}^p = 6,9 \text{ г/мм}$, что соответствует поверхностному натяжению воды.

3. $\mathcal{E}_{\text{уд}}^p = \alpha_{\text{nn}} = 6,9 \text{ г/мм.}$

4.3.2. Предел прочности граничного слоя воды при растяжении отрывом по (3.2)

$$\sigma_{\text{с}}^p = \frac{N_{\max}}{A} = \frac{1,53 \text{ кг}}{10^4 \text{ мм}^2} = 1,53 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 1,53 \cdot 10^{-3} \text{ МПа.}$$

4.3.3. Средний предел текучести ГС воды при отрыве рис. 6 по (2.3) $N_m = 1 \text{ кг}$

$$\sigma_{\text{с}}^p = \frac{N_m}{A} = \frac{1}{10^4} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ мм.}$$

4.4. Обработка результатов для смазки Литол-24

4.4.1. Полная и удельная энергия разрушения по (3.1)

- 1) при $N_{\max} = 13,2 \text{ кг}$ по табл. 1, $x_{\text{ер}} = 0,4$:

$$\mathcal{E}^p = N_{\max} x_{\text{ер}} = 13,2 \cdot 0,4 = 5,28 \text{ кг. мм.}$$

- 2) удельная энергия разрушения ГС смазки Мобил при растяжении:

$$\mathcal{E}_{\text{уд}}^p = \frac{\mathcal{E}^p}{A} = \frac{5,28 \text{ кг.мм.}}{10^4 \text{ мм}^2} = 5,28 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{мм}};$$

т.е. в ≈ 100 раз более, чем α_{nn} воды.

4) очевидно, это не поверхностное натяжение, в традиционном понимании, а удельная сила адгезии на единицу длины линии натяжения.

4.4.2. *редел прочности при разрыве по 3.2 при $N_{\max} = 13,2$ кг:*

$$\sigma_{\epsilon}^p = \frac{13,2}{10^4} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 13,2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 13,2 \cdot 10^{-3} \text{ Мпа.}$$

4.5. Смазка солидол

1) удельная энергия разрушения ГС смазки Солидол при растяжении:

$$\mathfrak{E}_{y\partial}^p = \frac{14,5 \cdot 0,5}{10^4} = 7,25 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2};$$

2) $\alpha_{nn} = 7,25$ г/м;

3) $\sigma_{\epsilon}^p = \frac{14,5}{10^4} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 14,5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 14,5 \cdot 10^{-3} \text{ Мпа.}$

4.6. Мобил

1) удельная энергия разрушения ГС смазки Мобил при растяжении:

$$\mathfrak{E}_{y\partial}^p = \frac{11,7 \cdot 0,55}{10^4} = 6,44 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2};$$

2) $\alpha_{nn} = 644$ г/м;

3) $\sigma_{\epsilon}^p = \frac{11,7}{10^4} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 11,7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 11,7 \cdot 10^{-3} \text{ Мпа.}$

5. Выводы

Выполнено исследование растяжения и отрыва поверхностей, смазанных тонким слоем пластической смазки, при этом получаем следующие научные результаты:

1. Из решения задачи о процессе отрыва поверхностей вариационно-экспериментальным способом, следует, что в начале процесса напряжения растяжения наибольшие. При последующем нагружении напряжение быстро увеличивается по зависимости, близкой к параболе.

2. Разработана и реализована методика испытаний плоских смазанных поверхностей на отрыв.

3. По результатам испытаний установлено, что удельная работа граничного слоя на разрыв для воды практически совпадают с коэффициентом поверхностного натяжения.

4. Предложено считать удельную энергию разрыва граничной пленки при отрыве смазанных поверхностей считать новой характеристикой пластической смазки, близкой к понятию поверхностного натяжения и к адгезионной прочности.

Литература

1. Кузьменко А. Г. Вариационно-экспериментальный метод в контактной механике сдвиговых перемещений и напряжений // Проблемы трибологии. – 2013. – № 1. – С. 144-153.

Поступила в редакцію 05.05.2014

Kuzmenko A.G. **Test the oil layer boundary lubrication at normal takeoff.**

A mathematical model of the process of separation surfaces lubricated plastic lubricant. Proposed and implemented Test Method for takeoff with the definition of specific energy separation as new characteristics of lubricants.

Key words: oil layer, the mathematical model of the separation surfaces, loading stress.

References

1. Kuz'menko A. G. Variacionno-jeksperimental'nyj metod v kontaktnoj mehanike sdvigovyh peremeshhenij i naprjazhenij. Problemy tribologii. 2013. № 1. S. 144-153.