

Кузьменко А.Г.Хмельницкий национальный университет,
г. Хмельницкий, Украина
E-mail: tribosensor@gmail.com**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ
КОНТАКТНОЙ МЕХАНИКИ СЖАТЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ. ЧАСТЬ 2**

УДК 621.891

При исследовании сдвига сжатых поверхностей установленная связь функции напряжений трения по процессу с распределением напряжений по поверхности. Описаны и объяснены два механизма скольжения при трении: синхронной и переползанием.

Ключевые слова: контактная механика, сжатые поверхности, трение, механизма скольжения.

1. Введение и постановка задачи

1. В результате решения [1, 2, 3] вариационно-экспериментальным методом ВЭМт. Задачи об определении функции изменения касательных напряжений $\tau(x)$ по функции диаграммы сдвига сжатых поверхностей было установлено, что при выпуклой растущей функции $F(x)$, напряжение трения $\tau(x)$ имеет падающий гиперболический характер. Подчеркнем, что это изменение напряжений трения по процессу т. е. изменение сдвига от нуля до x и суммарной силе трения от 0 до $F(x)$.

2. Решение фиксирует связь между функциями $F(x)$ и $\tau(x)$, однако не объясняет причину установленной закономерности процесса.

В данной работе ставится задача: связать функцию изменение напряжения $\tau(x)$ по процессу с функцией $\tau(x')$ распределения напряжений трения по поверхности контакта.

2. Решение задачи и его анализ**2.1. Обоснование формы решения**

1) при сдвиге плоского сжатого контакта выпуклая растущая функция $F(x)$ диаграммы сдвига аппроксимирована степенной функцией вида:

$$F = cx^n; \quad (2.1)$$

2) для этого случая изменение функции касательных напряжений по процессу $\tau(x)$ также получено [1] в степенной форме вида:

$$\tau(x) = \varepsilon x^{n-1}; \quad (2.2)$$

3) графическое представление решения при $n < 1$;

4) будем обозначать через x' координаты точек поверхности (площадки) контакта так, что $0 < x' < x_{\max}$; Величина сдвига x может быть меньше или равной координате площадки в направлении сдвига.

2.2. Допущения

1) в случае, если максимальное перемещение сдвига x_{\max} равно полному размеру площадки контакта $x_{\max} = a$ то выполняется равенство:

$$\tau(x) = \tau(x'); \quad (2.3)$$

2) в случае, если $x < a$, то выполняется равенство:

$$\tau(x') = \tau\left(\frac{a}{x_{\max}} x\right), \quad (2.4)$$

т. е.

$$x' = \frac{a}{x_{\max}} x; \quad (2.5)$$

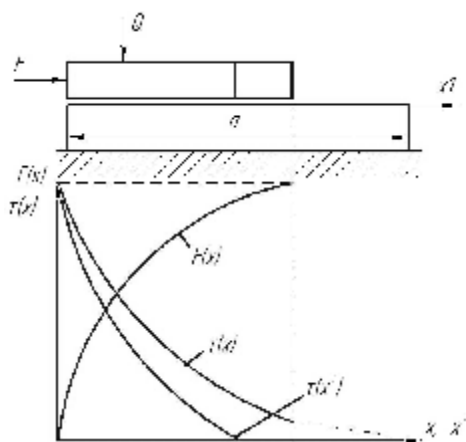


Рис. 1 – Схема контакта и график функции

3) таким образом полагаем, что при переходе от $\tau(x)$ к $\tau(x')$ соблюдается подобие с коэффициентом подобия k :

$$k = \frac{a}{x_{\max}}; \quad (2.6)$$

4) строгое обоснование используемого подобия следует из рассмотрения условия равновесия в контакте.

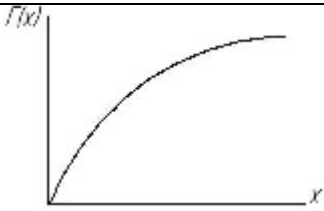

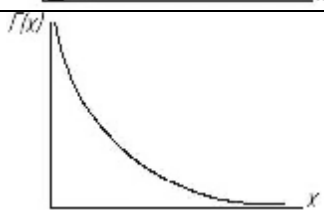
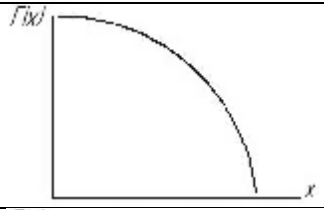
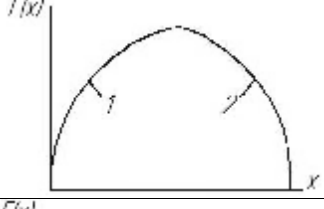
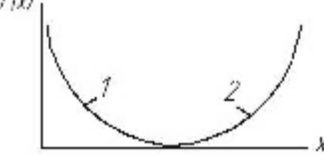
3. Влияние вида функции $F(x)$ на функции $\tau(x)$ и $\tau(x')$

3.1. Виды функций $F(x)$

В соответствии со систематизацией функции $F(x)$ по [3] имеет.

Таблица 1

Виды функции $F(x)$

№ вар-та	График функции $F(x)$	Виды функции $F(x)$	Значение параметра n
1		$F(x) = cx^n$	$n < 1$
2		$F(x) = cx^n$	$n > 1$
3		$F(x) = cx^{n-1}$	$n < 1$
4		$F(x) = cx^{n-1}$	$n \geq 1$
5		$F(x) = cx^n$	$n > 1$
		$F(x) = cx^{n-1}$	$n \geq 1$
6		$F(x) = cx^{n-1}$	$n < 1$
		$F(x) = cx^n$	$n > 1$

3.2. Виды функций $\tau(x)$

3.2.1. Решение в виде степенной функции при $n < 1$ табл. 1, вариант 1

1) при решении задачи определения функции $\tau(x)$ в степенной форме α :

$$\tau(x) = \xi x^\alpha, \quad (2.7)$$

при заданной функции $F(x) = cx^n, \quad (2.8)$

в работах [1, 2] установлено, что решение (2.7) имеет вид:

$$\tau(x) = \xi x^{n-1}; \quad (2.9)$$

2) при $n < 1$ решение (2.9) можно записать в виде:

$$\tau(x) = \frac{\xi}{x^{n-1}}, \quad (2.10)$$

при $x \rightarrow 0, \tau(x \rightarrow 0) \rightarrow \infty$.

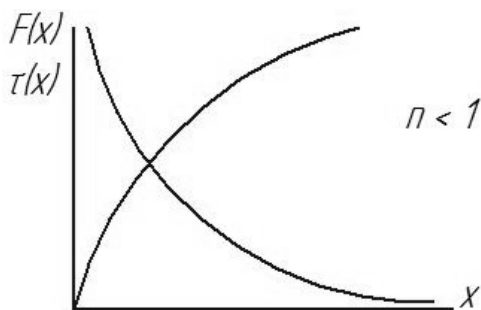


Рис. 2 – График функции (2.8) и (2.10)

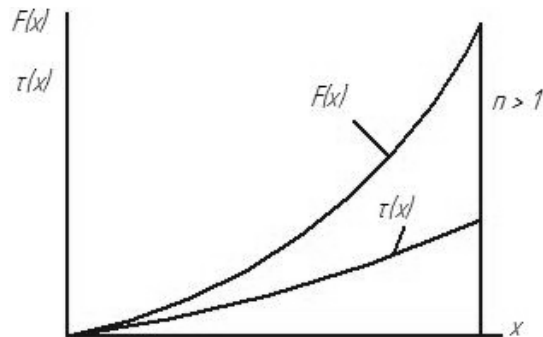


Рис. 3 – Графики функции $F(x)$ (2.8) и $\tau(x)$ по (2.9)

Решение в виде степенной функции при $n < 1$, табл. 1, вариант 2) форма решения сохраняется в виде (2.9):

$$\tau(x) = \xi x^{n-1};$$

2) но при $n < 1$ это функции вида рис. 3;

3) заметим, что максимум функции $\tau(x)$ при $n < 1$ имеет место в конце процесса сдвига.

3.2.3. Функция $\tau(x)$ для других вариантов видов функции диаграммы сдвига $F(x)$ по табл. 1

1. Для определения вида функции касательных напряжений $\tau(x)$ следует проводить специальные исследования с учетом начальных условий контакта.

2. Интересно заметить, что для случаев функции $F(x)$, содержащих экстремальную точку закономерность распределения $\tau(x)$ и $\tau(x')$ изменяется при переходе через эту точку.

3.3. Пример определения функции распределения напряжений трения $\tau(x')$ по координате x' площадки контакта

3.3.1. Эксперимент (раздел 2.1)

1) схема контакта: поступательный сдвиг в смазанном плоском контакте рис. 1.

2) из теоретического решения задачи установлена функция касательных напряжений $\tau(x)$ по процессу в виде степенной функции:

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

или в безразмерном виде:

$$\overline{\tau(x)} = Bnx^{-1}; \quad (2.12)$$

3) испытания были проведены при следующих исходных данных:

- площадь контакта $a \times B = 100 \times 100 \text{ мм} = 10^4 \text{ мм}^2$;
- нормальная нагрузка $Q = 3 \text{ кг}$;

4) после обработки результатов испытаний на сдвиг получена функция диаграммы сдвига в виде:

$$F = cx^n; \quad c = 2,1; \quad n = 0,17;$$

5) безразмерная функция изменения касательных напряжений по процессу при максимальном сдвиге $x_{\max} = 1 \text{ мм}$, рис. 4.

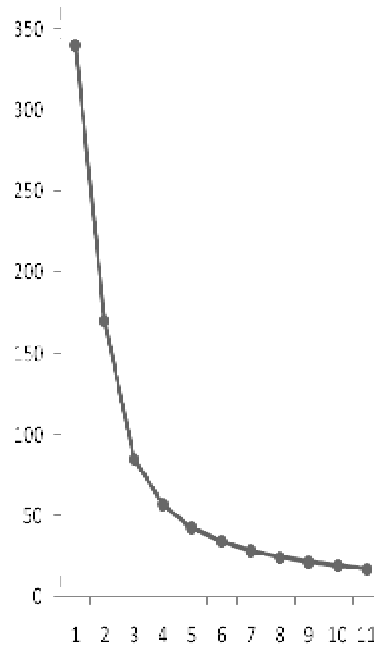


Рис. 4 – Распределение $\tau(x')$ по площадке контакта

$$\overline{\tau(x)} = 0,357 \cdot 10^{-2} \frac{1}{x^{0,83}}. \quad (2.13)$$

3.3.2. Результаты определения $\tau(x')$ касательных напряжений по поверхности представлены в табл. 2

Таблица 2

№	$x, \text{ мм}$	$x' = x \frac{a}{x_{\max}} = 100x,$ $a = 100, x_{\max} = 1 \text{ м}$	$\overline{\tau(x)}$
1	0,1	10	170
2	0,2	20	85
3	0,3	30	57
4	0,4	40	42,5
5	0,5	50	34
6	0,6	60	28
7	0,7	70	24
8	0,8	80	21
9	0,9	90	19
10	1,0	100	17

4. Механизм дискретного скольжения поверхностей переползанием при сдвиге

4.1. Явление скольжения поверхностей дискретным переползанием

- 1) при сдвиге сжатых поверхностей два механизма взаимного проскальзывания поверхностей;
- 2) одновременное перемещение всех точек одной поверхности по всем точкам другой поверхности как целого;
- 3) постепенное, последовательное перемещение точек одной поверхности по другой начиная с края, при этом дискретном скольжении на одном участке на других участках скольжение не происходит. Этот механизм скольжения будем называть переползанием;
- 4) механизм переползания до сих пор практически не имеет обоснованного описания; далее предлагаем такое описание и его объяснение.

4.2. Описание механизма постепенного дискретного скольжения переползанием

4.2.1. Основные предпосылки

- 1) при описании будем пользоваться иллюстрацией механизма по рис. 5.

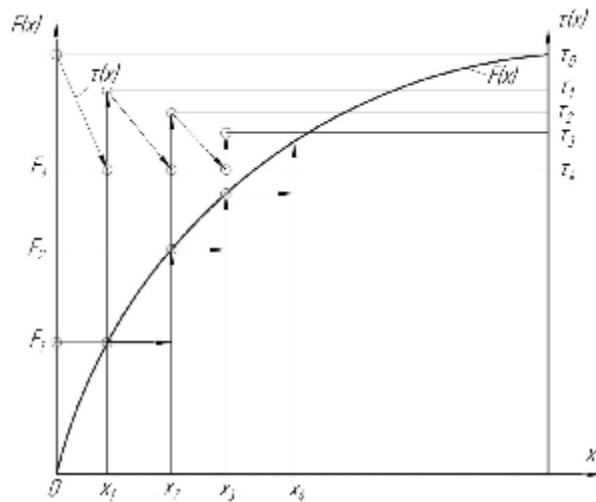


Рис. 5 – Схема дискретного изменения напряжений трения $\tau(x)$ при сдвиге в условиях скольжения по механизму переползания зоны проскальзывания

- 2) в основе описания механизма скольжения переползанием лежит решение контактной задачи о сдвиге сжатых поверхностей.

4.2.2. Основная идея объяснения явления переползания

- 1) из решения задачи о сдвиге следует, что на границе области контакта в зоне сдвига возникают самые большие касательные напряжения, при которых может произойти местное проскальзывание;
- 2) приложение силы сдвига после первого проскальзывания возникают самые большие напряжения трения, приводящие к следующему локальному проскальзыванию;
- 3) далее процесс повторяется до выхода зоны проскальзывания на противоположную границу площадки контакта;
- 4) таким образом основная идея объяснения эффекта переползания зоны проскальзывания состоит в периодическом перемещении по площадке локальной зоны повышенных напряжений трения.

4.2.3. Пошаговое описание процесса

Шаг 1. После приложения сдвигающей силы F_a :

- 1) возникает максимальное касательное напряжение трения τ_0 , такое что в соответствии с законом Амонтона:

$$\tau_0 > f\sigma, \quad (4.1)$$

где f – коэффициент трения;

σ – контактное давление; т. е. в начальный момент приложения сдвиговой нагрузки F в точке с максимальным напряжением трения τ_0 произойдет микро-проскальзывание на величину x_1 (по рис. 5);

2) после сдвига на величину x_1 максимальное касательное напряжение уменьшается до величины $\tau_1(x_1)$ в соответствии с решением задачи методом ВЭМт по [1].

Шаг 2. Увеличиваем нагрузку до величины F_1 , $F_1 > F_0$:

1) основное свойство системы состоит в том, что после реализованного микросмещения и падения напряжения трения от τ_0 до τ_1 при новом приложении нагрузки F_1 максимальное касательное напряжение вырастает до величины $\tau_2 > \tau_1$, хотя может быть $\tau_2 < \tau_0$;

2) высокое касательное напряжение $\tau_1(x_1)$ также, что $\tau_1 > f\sigma$, приводит к очередному второму микро проскальзыванию в контакте от величины x_1 до x_2 (рис. 5).

Шаг 3. Шаг n .

Далее шаги повторяются до последнего шага n , на котором контакт на величину проскальзывания Δx выходит за пределы контакта.

4.2.4. О скорости процесса переползания

1) скорость перемещения зоны проскальзывания $x = \frac{dx}{dt}$ до выхода на противоположный от начала край площадки контакта зависит от интенсивности скорости приложения сдвиговой нагрузки $\dot{F} = \frac{dF}{dt}$:

$$\dot{x} = \Phi(\dot{F}); \quad \frac{dx}{dt} = \Phi\left(\frac{dF}{dt}\right); \quad (4.2)$$

2) скорость переползания \dot{x} во многом определяются величиной начального значения силы F_0 ; чем больше начальное значение F_0 тем выше скорость переползания.

4.2.5. Связь синхронной (одновременной и всем точкам ползучести) с ползучестью переползанием

1) осле каждого акта микро проскальзывания переползанием происходит нарушение фрикционных связей между поверхностями;

2) если это нарушение произойдет на всей площадке контакта, то наступает стадия синхронного скольжения и нового вида и механизма ползучести;

3) переход от макро дислокационного механизма к механизму одновременного проскальзывания по всем контактными точкам носит характер потери устойчивости трибосистемы;

4) понять и наблюдать потерю устойчивости в контакте трибосистем, обладающих свойствами и механизмами касательной ползучести можно на примерах оползней, сходе снежных лавин, сдвигах земной коры при землетрясениях; вопрос построения математических модулей потери устойчивости при проскальзывании поверхностей в трибосистемах при использовании ВЭМт – метода является следующим этапом в развитии методов описания скольжения при сдвигах.

5. Выводы и обобщения

1. Исследована связь процессов по времени и по пространству в задаче сдвига сжатых поверхностей.

1) установлена связь между функциями силы трения $F(x)$ и напряжении трения $\tau(x)$ по процессу сдвига x с одной стороны и функцией распределения напряжений трения по площадке контакта по координате x' с другой стороны;

2) в основе логики установления связь функции по процессу $\tau(x)$ (по времени) с функцией по поверхности (по пространству) лежит допущение о подобии и причинной связи этих процессов: т. е. полагаем, что вид функции касательных напряжений по процессу $\tau(x)$ объясняется распределением напряжений трения по площадке контакта $\tau(x')$;

3) процедура определения функции $\tau(x')$ показана на примере сдвига плоского сжатого контакта смазанных поверхностей.

2. Введено понятие о двух разных видах механизмов скольжения во времени или касательной ползучести поверхностей при сдвиге.

1) в первом механизме все контактные точки сдвигаются друг относительно друга одновременно, или синхронно, это традиционный механизм скольжения при трении;

2) во втором механизме скольжение начинаясь от одного края распространяется образованием малых зон проскальзывания, которые затем последовательно перемещаются к противоположному краю площадки контакта; это механизм скольжения переползанием или макро дислокационный механизм;

3) механизм скольжения при сдвиге переползанием основан:

- с одной стороны на решении задачи о сдвиге ВЭМт методом;

- с другой стороны на допущении о том, что при малой скорости роста внешней силы $F(x)$

после каждого микро сдвига максимальные касательные напряжения падают, а затем снова возрастают до величины, вызывающей микро проскальзывание;

- последовательное повторение микроскольжения заканчивается выходом края тела за пределы контакта.

3. Известное явление контактной касательной ползучести или изменения во времени величина проскальзывания при действии постоянной касательной силы.

1) рассматривается как процесс на первом этапе последовательного микро переползания с нарушением структуры фрикционной связи;

2) начало сдвига с выполнением синхронного скольжения обычно используется для определения предела касательной прочности при сдвиге τ_T силой F_T ;

3) дальнейшее действие постоянной сдвиговой силы $F \geq T_T$ приводит к касательной ползучести по синхронному механизму скольжения.

4. Полученные результаты могут быть использованы при изучении механизмов и модулей.

1) оползней грунта;

2) схода снежных лавин;

3) сдвиговых процессов, приводящих к землетрясениям;

4) закономерность сдвига сжатых поверхностей в узлах трения машин и т. д.

Литература

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

2. Кузьменко А.Г. Контактная механика сдвига статичных поверхностей (методика и примеры расчётов) // Проблемы трибологии. – 2013. – № 2. – С. 89-98.

3. Кузьменко А.Г. Развитие методов контактной механики сдвига сжатых поверхностей. Часть 1. Систематизация задач методов направлений исследований и результатов // Проблемы трибологии. – 2013. – № 3. – С. 51-58.

4. Кузьменко А.Г. Пластический контакт. Вариационно-экспериментальный метод. – Хмельницкий: ХНУ, 2009. – 359 с.

5. Кузьменко А.Г., Поступательный сдвиг в плоском контакте, эксперименты и анализ // Проблемы трибологии. – 2014. – № 1. – С. 123-138.

Поступила в редакцию 25.04.2014

Kuzmenko A.G. Development of methods of contact mechanics shear concise surface. Part 2.

In the study of shear surfaces compressed established communication friction stress function to the process with the stress distribution on the surface. Described and explained the mechanism of two sliding Friction and climb of synchronous.

Key words: contact mechanics, compressed surface friction sliding mechanism.

References

1. Kuz'menko A.G. Variacionno-jeksperimental'nyj metod v kontaktnoj mehanike sdvigovyh peremeshhenij i naprjazhenij (VJeMτ). Problemy tribologii. 2013. № 1 S. 144-153.
2. Kuz'menko A.G. Kontaktnaja mehanika sdviga statichnyh poverhnostej (metodika i primery raschjotov). Problemy tribologii. 2013. № 2. S. 89-98.
3. Kuz'menko A.G. Razvitie metodov kontaktnoj mehaniki sdviga szhatyh poverhnostej. Chast' 1. Sistematizacija zadach metodov napravlenij issledovanij i rezul'tatov. Problemy tribologii. 2013. № 3. S. 51-58.
4. Kuz'menko A.G. Plasticheskij kontakt. Variacionno-jeksperimental'nyj metod. Hmel'-nic'kij: HNU, 2009. 359 s.
5. Kuz'menko A.G., Postupatel'nyj sdvig v ploskom kontakte, jeksperimenty i analiz. Problemy tribologii. 2014. № 1. S. 123-138.