

Кузьменко А.Г.Хмельницкий национальный университет,
г. Хмельницкий, Украина
E-mail: tribosenator@gmail.com**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КОНТАКТНОЙ
МЕХАНИКИ СДВИГА СЖАТЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ.
ЧАСТЬ 1. СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ЗАДАЧ,
МЕТОДОВ, НАПРАВЛЕНИЙ
ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ**

УДК 621.891

Предложена систематизация задач, методов, направлений исследований и результатов работы по контактной механике сдвига сжатых поверхностей. Систематизация выполнена по критериям: геометрия контакта, свойства материалов, постановка контактных задач сдвига, методы решений задач; результаты решений задач; области применения задач и решений.

Ключевые слова: контактная механика сдвига, систематизация видов задач, методы решения задач сдвига, области применения решений.

Введение

Трение контактирующих тел является основным физическим эффектом в механике взаимодействия поверхностей. Трение приводит к износу и выходу из строя узлов трения машин и приборов. Решение общей задачи повышения износостойкости требует детального изучения закономерностей трения.

Решению задач по распределению напряжений трения в контактной механике уделяется непропорционально мало работ в сравнении с задачами о распределении нормальных напряжений или давлений.

В работе [1] предложен вариационно-экспериментальный метод ВЭМ_т решения сдвиговых контактных задач с определением функций распределения напряжений трения.

Далее в работе [2] показана методика и примеры практического применения предложенного метода и его реализация на практике.

В данной работе ВЭМ_т и анализ его применения используется для построения некоторых принципиальных основ механики трения таких как:

- 1) трибодислокационный механизм трения;
- 2) введение понятия вязкого сухого трения и его приложений.

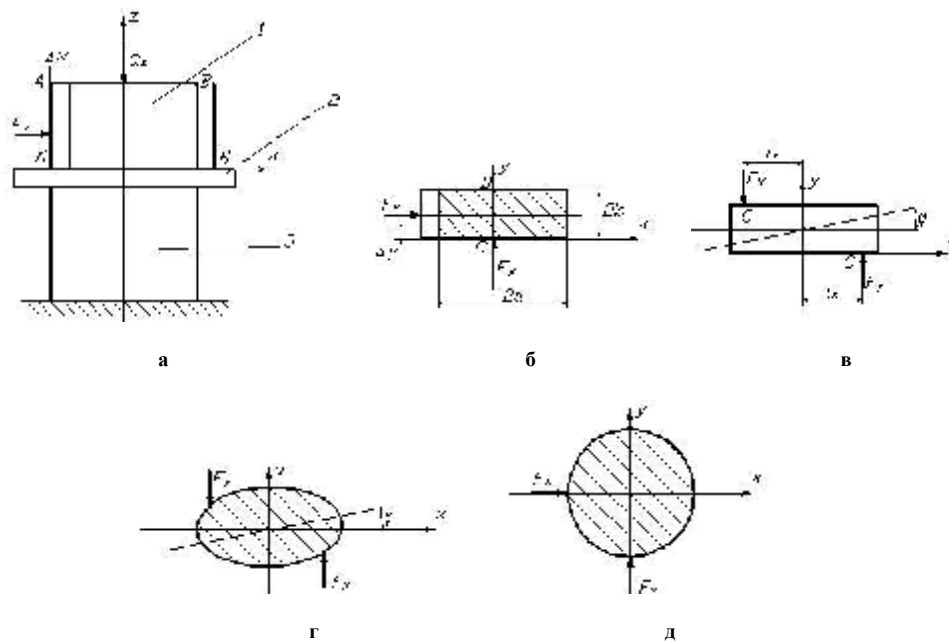
1. Расчетные схемы, понятия, обозначения**1.1. Обобщенная расчетная схема контакта при сдвиге**

Рис. 1.1 – Схемы обобщенного контакта при сдвиге

1.1.1. Объекты взаимодействия

Рассматривается контактное взаимодействие поверхностей двух тел 1 и 2, разделенных слоем “третьего тела” (смазка, абразив, частицы износа, шероховатости и т.д.).

Условия взаимодействия разделяются на:

- 1) силовые; 2) кинематические; 3) скоростные; 4) температурные; 5) смазочные и т.д.

1.1.2 Силовые и кинематические условия:

- 1) нормальная к рабочей поверхности сила Q , действующая на оси z ;

касательная к рабочей поверхности сила F_x , действующая по оси x , по центру площадки контакта;

касательная к рабочей поверхности сила F_y , действующая по оси y , по центру площадки контакта;

осевое касательное смещение;

3) касательная сила F_x по оси x при одновременном действии момента сил $M = 2F_y l_x$ от действия двух эксцентрично приложенных сил F_y на плечо l_x ; трение верчения.

1.1.3 Напряжения, деформация, перемещение, скорость

- 1) контактное давление σ_z ;

- 2) касательные напряжения или напряжения трения τ_x, τ_y ;

- 3) момент верчения M_ϕ ;

- 4) угол верчения ϕ ;

- 5) касательные перемещения точек A и B на границах тела 1: x_A, x_B, y_C, y_D ;

6) условие касательных перемещений как целого для тела 1: $x_A = x_B, y_C = y_D$; это условие синхронного скольжения всех точек;

7) условие проскальзывания переползанием $x_A \neq x_B, y_C \neq y_D$ в режиме предварительного смещения;

- 8) деформации касательного смещения $\epsilon_x = \frac{\Delta x}{\Delta l}$; $\epsilon_y = \frac{\Delta y}{\Delta l}$;

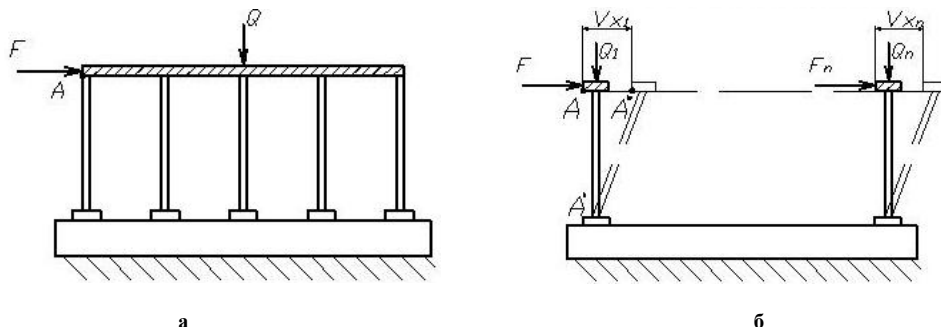
- 9) скорости синхронных касательных перемещений $x = \frac{dx}{dt}$; $y = \frac{dy}{dt}$;

- 10) скорости касательных перемещений проскальзывания $x_s = \frac{dx_s}{dt}$; $y_s = \frac{dy_s}{dt}$.

1.2 Модельная расчетная схема элемента сопряжения**1.2.1 Составные части и виды сдвиговых перемещений:**

- 1) $v_{x_1}^y$ – касательные перемещения от упругой касательной деформации тел 1 и 2 в точке x_1 ;

2) $v_{x_1}^P$ – касательные перемещения от пластической касательной деформации тел 1 и 2 в точке X (одновременные пластические деформации);



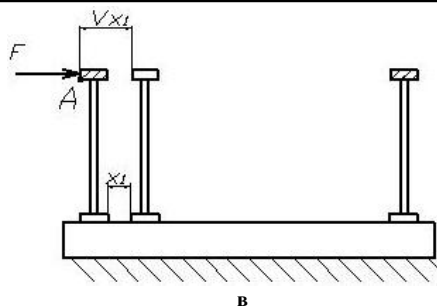


Рис. 1.2 – Схема модельного контакта при сдвиге

- 3) $u_{x_1}^S$ – касательные перемещения от синхронного одновременного скольжения всех точек контакта;
- 4) $u_{x_1} = V_{x_1}^P + V_{x_1}^S$ – суммарное касательное перемещение в т. A от пластических деформаций и скольжения в точке контакта.

1.2.2 Распределение нормальных и сдвиговых напряжений или напряжений трения:

- 1) $\tau_{x_1}, \dots, \tau_{x_i}$ – сдвиговые напряжения трения;
- 2) $\sigma_{z_1}, \dots, \sigma_{z_i}$ – нормаль.

1.3 Сдвиг тела 1 при подвижном теле 2

1.3.1. Тело 2 вращающийся диск

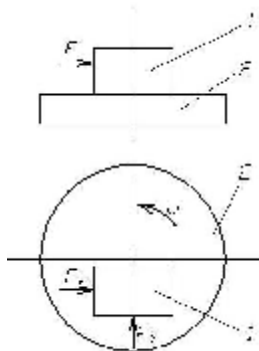


Рис. 1.3 – Схема сдвига тела 1 на вращающемся диске 2

1.3.2 Тело 2 вращающийся цилиндр

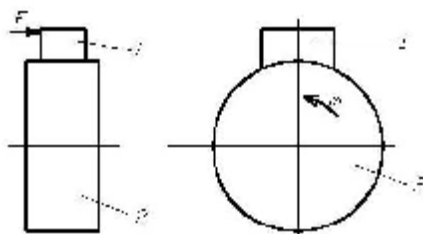


Рис. 1.4 – Схема сдвига тела 1 на вращающемся цилиндре 2


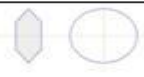







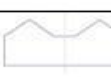
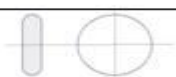



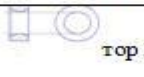






2. Геометрия сопряжений разных поверхностей

2.1 Матрица базовых поверхностей

Матрица базовых поверхностей (табл. 2.1).

Количество возможных контактных задач прежде всего определяется количеством возможных сопряжений разных поверхностей. Для определения возможных видов сопряжений составлена матрица из 22 базовых поверхностей табл. 2.1.

Таблица 2.1

Возможные сопряжения сжатых поверхностей					
1	F	 Плоскость	12	ТОС1	 тор 1 острый
2	SP	 сфера	13	ТОСЕ	 тор 1 острый полый
3	SPE	 сфера полая	14	ТОС2	 тор 2 острый
4	R	 цилиндр	15	ТОС2Е	 тор 2 острый полый
5	RE	 цилиндр полый	16	ТОС3	 тор 3 острый
6	TR1	 Тор 1 выпуклый	17	ТОС3Е	 Тор 3 острый полый
7	TR1E	 тор 1 полый	18	CN	 конус
8	TR2	 тор 2 выпуклый	19	CNE	 конус полый
9	TR2E	 тор 2 полый	20	KL	 клин
10	TR3	 тор 3 выпуклый	21	KLE	 клин полый
11	TR3E	 тор 3 полый	22		

2.2 Таблица возможных сопряжений

Путем составления пар сопрягаемых поверхностей из табл. 2.1 получена табл. 2.2 возможных сопряжений сжатых поверхностей, которые могут быть объектами контактных задач.

Таблица 2.2

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	F	1,1	1,2	-	1,4	-	1,6	-	-	-	1,10	-	1,12	-	-	-	1,16	-	1,18	-	1,20	1,21
2	SP	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	2,10	2,11	2,12	2,13	2,14	2,15	2,16	2,17	2,18	2,19	2,20	2,21
3	SPE	-	3,2	-	-	-	-	-	3,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,18	-	3,20	-
4	R	1,4	4,2	-	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	-	4,10	-	4,12	4,13	4,14	-	4,16	-	4,18	-	4,20	4,21
5	RE	-	5,2	-	5,4	-	5,6	-	5,8	-	-	-	5,12	-	-	-	5,16	-	5,18	-	5,20	-
6	TR1	1,6	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	6,10	6,11	6,12	6,13	6,14	6,15	6,16	6,17	6,18	-	6,20	6,21
7	TR1E	-	7,2	-	7,4	-	7,6	-	-	-	7,10	-	7,12	7,13	-	-	7,16	7,17	7,18	-	7,20	7,21
8	TR2	-	8,2	-	8,4	8,5	8,6	8,7	-	-	-	-	8,12	8,13	8,14	-	-	-	8,18	-	8,20	8,21

Продолжение таблицы 2.2

9	TR2E	-	9,2	-	-	-	9,6	-	9,8	-	-	-	9,12	9,13	-	-	-	9,18	-	9,20	-	
10	TR3	1,10	10,2	-	10,4	10,5	10,6	10,7	10,8	-	10,10	10,11	10,12	10,13	-	-	-	10,18	-	10,20	10,21	
11	TR3E		11,2	-	-	-	11,6	-	11,8	-		-	-								-	
12	TOC1	1,12	12,2	-	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8	12,9			12,12	12,12							12,21	
13	TOC1E	-	12,2	-	-	-	13,6	-	13,8	-			-								13,21	
14	TOC2	-	14,2	-	14,4	14,5	14,6	14,7	14,8	-											-	
15	TOC2E	-	15,2	-	-	-	15,6	-	15,8	-											-	
16	TOC3	1,6	16,2	-	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8	-							16,16				16,21	
17	TOC3E	-	17,2	-	-	-	17,6	-	17,8	-											-	
18	CN	1,18	18,2	18,3	18,4	18,5	18,6	18,7	18,8	18,9								18,18			18,21	
19	CNE	-	19,2	-	19,4	-	19,6	-	-	-											-	
20	KL	1,20	20,2	-	20,4	20,5	20,6	20,7	20,8	20,9											20,20	20,21
21	KLE	-	21,2	-	21,4	-	21,6	-	21,8	-												21,21

2.3. О решении задач для сжатых тел

Заметим, что систематизация возможных сопряжений может быть использована также при выборе метода решения контактной задачи с определением функции давления соответствующей заданной сдвиговой контактной задаче.

3. Механические свойства материалов контактирующих тел

3.1. Тела 1 и 2 обладают свойствами сплошной среды:

- 1) упругий;
- 2) пластический;
- 3) с ползучестью;
- 4) резины, пластмассы.

3.2. Тело 3 обладает свойствами среды:

- 1) твердый (шероховатость);
- 2) жидкий (смазка);
- 3) зернистый (песок);
- 4) сложный (влажный песок).

4. Задачи контактной механики сдвига

4.1. Основная одномерная задача T-1

По заданной функции $F(x)$ диаграммы сдвига определить функцию распределения напряжений трения по поверхности сдвига при неподвижном теле 2.

4.2. Двумерная задача T-2

По двум заданным функциям $F(x)$ и $F(y)$ определить функцию распределения напряжений трения $\tau(x, y)$ при неподвижном теле 2.

4.3. Сдвиг тела 1 на вращающемся теле 2; диске; задача T-3

4.4. Сдвиг тела 1 на вращающемся теле 2; цилиндре; задача T-4

4.5. Задача T-5, о разделении касательных напряжений трения и пластичности

4.6. Задача T-6, о скоростях скольжения при фрикционном и пластическом сдвиге

Каждая из названных задач определения функции распределения напряжений трения $\tau(x)$ по функции сил трения $F(x)$ имеет столько вариантов, сколько видов функции $F(x)$.

4.7. Виды функций $F(x)$

Таблица 4.1

Виды функций					
№	Название функции $F(x)$	График функции	№	Название функции $F(x)$	График функции
1	Растущая, выпуклая		4	Падающая, вогнутая	
2	Растущая, вогнутая		5	Экстремальная №1 рост, падение	
3	Падающая, выпуклая		6	Экстремальная №2 падение, рост	

5. Методы решений задач контактной механики сдвига: подлежит разработать в этой серии публикаций по теме «Контактная механика сдвига»

5.1. Первая публикация [1] по применению вариационно-экспериментально метода ВЭМ_τ в решении контактных задач при сдвиге сжатых поверхностей вышла в первом номере журнала Проблемы трибологии за 2013 г. (статья поступила 22.02.2013).

В соответствии с публикациями [1] и [2] к настоящему времени предложены три модификации метода ВЭМ_t:

5.2. ВЭМ_t строго вариационно-экспериментальный метод при решении задач сдвига с использованием решения в форме степенного ряда;

5.3. ВЭМ_t степенная функция $\tau(x)$ приближенный вариант ВЭМ_τ, в котором в качестве разрешающего уравнения используется уравнение равновесия; решение задачи по отысканию функции $\tau(x)$ отыскивается в форме степенной функции с двумя параметрами;

5.4. ВЭМ_τ экспоненциальная функция в другом варианте использования уравнения равновесия решение $\tau(x)$ отыскивается в форме экспоненциальной функции с двумя параметрами; другие направления развития методов решения задачи сдвига будут указаны в конце статьи.

6. Основной результат решений [1], [2]:

6.1. Для случая выпуклой возрастающей функции $F(x)$ диаграмма сдвига при использовании степенной функции $\tau(x)$ получено распределений $\tau(x)$ с $\tau_{\max} = \tau(x=0)$, то есть с максимумом значения касательного напряжения или напряжения трения в точке $x=0$.

6.2 Неустойчивость распределения $\tau(x)$, механизм переползания

Из неравномерности и экстремальности в точке $x=0$ распределения напряжений трения $\tau(x)$ следует неустойчивость этого состояния в момент $t=0$.

При $\tau_{\max}(x=0) > \tau_T$ начинается процесс скольжения переползанием; процесс продолжается при $\tau(x=x_1 > 0) > \tau_T$; $\tau(x=x_2 > x_1) > \tau_T$ и так далее; при $\tau(x=x_n) > \tau_T$ процесс заканчивается выходом элемента d_x тела 1 за пределы тела 2 то есть завершением процесса сдвига точек тела 1 относительно контактных точек тела 2.

6.3 Макродислокация трения

По аналогии с терминологией микроперемещений в кристаллах, называемых дислокациями, описанный процесс скольжения переползанием при трении логично назвать макродислокацией трения скольжения при сдвиге.

7. Перспективы использования решения контактной задачи о сдвиге, механизма переползания и макродислокаций трения и деформации в разных областях знаний

I Проблемы сдвига грунтов и участков земной коры

1. Проблемы сдвига грунтов насыщенных водой, оползни
2. Проблемы схода снежных лавин
3. Проблемы сдвига геологических слоев перед землетрясением
4. Проблемы сдвига участков земной коры перед извержением вулканов

II Обработка металлов давлением

1. Осадка
2. Штамповка
3. Высадка
4. Протяжка

III Проектирование и расчет систем и деталей машин

1. Распределение нагрузок по виткам резьбового соединения
2. Распределение нагрузок по зубьям зубчатой муфты или элементам упругой втулочной муфты
3. Распределение нагрузок и напряжений по швам сварочных соединений
4. Распределение нагрузок и сил трения по листам листовой рессоры
5. Распределение нагрузок по сцепным устройствам ж.д. состава при трогании
6. Распределение сил трения по элементам тормозных устройств
7. Распределение сил трения по элементам соединений с натягом

IV Испытания по определению механических свойств материалов

1. Испытания материалов на чистый сдвиг и кручение;
2. Испытания на растяжение и сжатие
3. Механизм контактной ползучести материалов

V Механизм скольжения при качении со скольжением

1. Механизм скольжения резиновой шины по дороге
2. Механизм поперечных колебаний шины, механизм шимми
3. Механизм поперечного проскальзывания ж.д. колеса по рельсу, механизм крипа
4. Механизм окружного проскальзывания при качении с проскальзыванием: шара, цилиндра; подшипники качения
5. Цилиндрические соединения с качением; колеса транспортных машин.

Всего насчитывается $N = 4 + 4 + 7 + 3 + 3 + 5 = 26$ областей науки и техники, в которых может быть полезна информация о закономерностях механизма скольжения с переползанием.

Выводы

С целью более полного представления о контактной механике сдвига сжатых поверхностей предложено расширенная систематизация задач, методов, направлений и результатов исследований по проблеме: "Контактная механика сдвига".

1. Установлено значительное множество задач контактной механики сдвига, различающихся: расчетными схемами; геометрией контакта; механическими свойствами материалов контактирующих тел; формулировкой и постановкой задач; методами решения задач; основными результатами реализации некоторых задач; областями науки и техники и перспективой исследований и использованием решений.

2. Знакомство с разными областями науки и техники, в которых решения проблем сдвига могут оказаться полезными, указывает на перспективность исследований в этой области.

3. Введение понятия и механизма работы макродислокаций трения и деформаций может оказаться новым эффективным инструментом исследования контактной механики твердых деформируемых тел.

Литература

1. Кузьменко А.Г. Вариационно-экспериментальный метод в контактной механике сдвиговых перемещений и напряжений // Проблемы трибологии. – 2013. – №1. – С.144-155.
2. Кузьменко А.Г. Контактная механика сдвига сжатых поверхностей (методика и примеры расчетов) // Проблемы трибологии. – 2013. – № 2. – С. 89-98.
3. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 208с.
4. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744с.
5. Кузьменко А.Г. Развитие методов контактной трибомеханики. - Хмельницкий: ХНУ, 2010.

Поступила в редакцию 03.09.2013

Kuzmenko A.G. Development of methods of contact mechanics shear concise surface. Part 1. Systematize tasks, methods, and research directions results.

Systematization of the proposed tasks, methods, fields of research and the results of work on the mechanics of the contact shift compressed surfaces. Systematization made by criteria: contact geometry, material properties, formulation of contact problems shift method for solving problems, the results of the solutions, the areas of application problems and solutions.

Keywords: contact mechanics shift, organize types of problems, problem-solving methods shift, application solutions.

References

1. Kuzmenko A.G. Variacionno-jeksperimental'nyj metod v kontaktnoj mehanike sdvigovyh peremeshhenij i naprjazhenij. Problemy tribologii. 2013. №1. S.144-155.
2. Kuzmenko A.G. Kontaktnaja mehanika sdviga szhatyh poverhnostej (metodika i primery ras-chetov). Problemy tribologii. 2013. №2. S. 89-98.
3. Novikov I.I. Defekty kristallicheskogo stroenija metallov. M.: Metallurgija, 1975. 208s.
4. Rabotnov Ju.N. Mehanika deformiruemogo tverdogo tela. M.: Nauka, 1979. 744s.
5. Ku'menko A.G. Razvitie metodov kontaktnoj tribomehaniki. Hmel'nickij: HNU, 2010.