

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА

Кафедра «Материаловедение и технология материалов»

П.Н. БОГДАНОВИЧ

ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ

Рабочая программа, задание по контрольной работе и методические
указания по ее выполнению для студентов ФБО Бел ГУТа.

Одобрено методическими комиссиями механического факультета и ФБО

Гомель 2007

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Объектом изучения дисциплины «Трение и износ в машинах» является природа трения, закономерности физических явлений, связанных с ним, и методы управления процессами трения с целью снижения их отрицательного влияния на эксплуатационные свойства трибосистем. Знание этих вопросов необходимо студентам для успешного формирования технического кругозора инженера-механика. В результате изучения дисциплины «Трение и износ в машинах» студент получает конкретные знания о механизмах и закономерностях трения, умение решать насущные производственные вопросы, связанные со снижением энергопотерь на трение, износа трибосопряжений, а также умение проектировать и рассчитывать узлы трения с учетом триботехнических аспектов.

Задания на контрольные работы составлены в 30 вариантах. Каждый студент выполняет свой вариант задания, выбор которого производится в соответствии с двумя последними цифрами своего шифра согласно таблице вариантов. При оформлении контрольных работ текст вопросов нужно приводить полностью, ответы иллюстрировать эскизами, схемами, графиками и таблицами и давать краткие пояснения к ним. Эскизы нужно выполнять аккуратно, как правило, в большем масштабе, чем в книге. Не допускается копирование графического материала.

Схемы, эскизы, рисунки и графики следует оформлять в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-68 и 2.106-68. Пояснительный текст нужно писать четко и разборчиво на бумаге формата А4 (210x297 мм). На странице необходимо оставлять поля для замечаний. В конце текста следует привести ссылки на использованную литературу, поставить дату и подписать работу.

На титульном листе указывается название кафедры, фамилия студента и его учебный шифр.

Контрольную работу рекомендуется выполнять в такой последовательности:

- ознакомиться с рабочей программой по данному разделу и методическими указаниями;

– изучить рекомендуемую учебную литературу, сосредоточив внимание на физико-механических аспектах трибологических процессов и способах наиболее экономичного и эффективного решения триботехических задач;

– составить конспект по изучаемому разделу;

– ответить письменно на вопросы контрольной работы.

Составление ответов на вопросы закрепляет знания по отдельным разделам, но не заменяет изучения материала по всей программе.

Все разделы программы освещаются в указанной ниже литературе.

В случае затруднений при выполнении контрольной работы следует обращаться за письменной или устной консультацией на кафедру «Материаловедение и технология материалов». Лабораторные работы выполняются во время сессии, и их успешная защита является одним из необходимых условий допуска к зачету по дисциплине в целом.

При оформлении контрольных работ текст нужно приводить полностью, сокращения терминов не допускаются. Расчеты приводятся полностью.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ «ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ»

1. Введение. Задачи и содержание курса. История развития трибологии.

2. Геометрические характеристики поверхностей деталей машин.

Топография поверхности деталей машин. Макрогеометрические отклонения поверхности детали, волнистость, шероховатость. Параметры волнистости и шероховатости. Номинальная, контурная и фактическая площади контакта.

3. Трение скольжения при отсутствии смазочного материала.

Виды трения в узлах машин. Теории трения твердых тел (адгезионная, молекулярная, молекулярно-механическая, энергетическая, адгезионно-деформационная). Факторы, влияющие на трение деталей машин: нормальная нагрузка, скорость скольжения и температура. Зависимости коэффициента трения от параметров микрогеометрии поверхности и свойств материалов трущихся тел.

4. Трение качения.

Основные понятия и определения. Природа трения качения. Адгезионная и гистерезисная теории сопротивления качению, теория проскальзывания. Современные представления о природе трения качения. Влияние смазки, нагрузки, скорости, температуры и размеров тел качения на потери при качении. Виды разрушения поверхностей качения: усталостное, фреттинг, отслаивание, коррозия

5. Трение при граничной и жидкостной смазке.

Механизм смазочного действия граничных слоев. Влияние режимов нагружения на граничное трение. Жидкостное трение. Трение при гидростатической и гидродинамической смазке. Диаграмма Герси-Штрибека. Способы смазывания узлов трения (направляющие, подшипники скольжения и качения, зубчатые зацепления, цепные передачи и кулачковые механизмы). Циркуляционные системы смазки. Конструкции гидродинамических и гидростатических подшипников скольжения

6. Жидкие смазочные материалы.

Жиры животного и растительного происхождения, минеральные и синтетические смазочные масла, смазочные материалы на водной основе. Присадки к маслам. Основные свойства смазочных масел. Моторные, трансмиссионные и промышленные масла: назначение, требования к ним, основные свойства и области применения, классификации и маркировка.

Пластичные смазочные материалы и их свойства. Твердые смазочные материалы.

7. Изнашивание деталей машин.

Основные характеристики процесса изнашивания. Классификация видов изнашивания.

Закономерности и характеристики основных видов изнашивания: абразивного, контактно-абразивного, изнашивания в массе абразивных частиц, гидроабразивного, газоабразивного, эрозионного, кавитационного, адгезионного, окислительного и фреттинг-коррозии. Усталостное изнашивание деталей узлов трения.

Кинетика износа трибосистем, приработка и равновесная шероховатость. Изнашивание деталей машин. Методы повышения износостойкости деталей машин.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задание 1

При ответе на теоретический вопрос необходимо в полном объеме раскрыть суть поставленной проблемы, а также показать возможности ее решения на современном этапе. Студент должен проработать не менее 3-4 источников из предложенного списка литературы и обязательно дать ссылки на источники с указанием страниц. Ответы желательно иллюстрировать эскизами, схемами, графиками и таблицами.

Задание 2

При выполнении задания № 2 следует ознакомиться с разделом «Геометрические характеристики поверхностей деталей машин» по рекомендуемой литературе. Затем провести обработку профилограммы (профилограмма выдается преподавателем) и определить параметры шероховатости поверхности детали в следующем порядке:

- выбрать базовую длину l на профилограмме;
- рассчитать координаты и провести среднюю линию;
- построить линию выступов и линию впадин;
- последовательно рассчитать стандартные параметры шероховатости: среднее арифметическое отклонение неровностей профиля R_a , высоту неровностей профиля по десяти точкам R_z , максимальную высоту неровностей R_{max} , средний шаг неровностей профиля S_m , средний шаг местных выступов S ;
- определить относительную опорную длину профиля t_p на различных уровнях сближения a_i и построить кривую опорной поверхности;
- определить коэффициенты b и v уравнения, аппроксимирующего начальный участок кривой опорной поверхности;
- определить, какому классу шероховатости соответствует поверхность детали.

Задание 3

При выполнении задания № 3 следует ознакомиться с разделом «Изнашивание деталей машин» по рекомендуемой литературе. Затем произвести расчет линейной I_h и массовой I_m интенсивности изнашивания вкладыша 1 (по данным трех опытов) после трения по цилиндрической поверхности вращающегося вала 2 (рисунок 1). Данные, необходимые для расчета приведены в таблице 2. Определить средние значения I_h , I_m и указать, какому классу износостойкости соответствует материал вкладыша. В расчетах принять площадь поверхности трения вкладыша равной $A_a = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, а плотность изнашиваемого материала вкладыша $\rho = 1,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

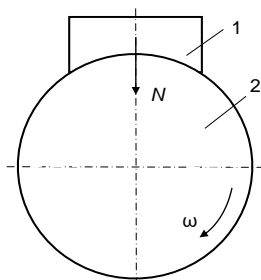


Рисунок 1 – Схема контакта вал – вкладыш

Номера вариантов 1 и 3 заданий контрольной работы студент должен выбрать в соответствии со своим шифром по таблице 1.

Таблица 1

Номера вариантов первого и третьего заданий контрольной работы, соответствующие шифру студента.

Две последние цифры шифра	Вариант		Две последние цифры шифра	Вариант	
	Задание 1	Задание 3		Задание 1	Задание 3
30, 60, 90	15	1	15, 45, 75	12	7
29, 59, 89	2	8	14, 44, 74	24	11
28, 58, 88	23	14	13, 43, 73	3	20
27, 57, 87	29	2	12, 42, 72	17	3
26, 56, 86	8	28	11, 41, 71	28	16
25, 55, 85	18	21	10, 40, 70, 00	6	27
24, 54, 84	7	10	09, 39, 69, 99	14	18
23, 53, 83	19	26	08, 38, 68, 98	25	24
22, 52, 82	21	19	07, 37, 67, 97	7	30
21, 51, 81	4	4	06, 36, 66, 96	20	9
20, 50, 80	11	22	05, 35, 65, 95	26	15
19, 49, 79	30	13	04, 34, 64, 94	10	29
18, 48, 78	5	25	03, 33, 63, 93	16	5
17, 47, 77	13	17	02, 32, 62, 92	27	23
16, 46, 76	22	6	01, 31, 61, 91		12

ЗАДАНИЯ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

ЗАДАНИЕ 1

Ответить письменно на вопросы контрольной работы.

1. Опишите топографию поверхности детали. Какие параметры характеризуют шероховатость поверхности, какие из них наиболее часто применяются на практике?
2. Площади контакта шероховатых тел. На какой из них протекают процессы, приводящие к изнашиванию деталей машин?
3. От каких факторов зависит сопротивление трущихся тел перемещению? Приведите зависимости коэффициента трения от трех из них (по выбору студента) и поясните их.
4. Трение при граничной смазке, составляющие силы трения. В каких устройствах реализуется граничное трение?
5. Влияние режимов нагружения на граничное трение. Приведите примеры узлов трения, эксплуатирующихся при граничном трении и температуре, превышающей 100 °С.
6. Гидростатическая смазка. Назовите узлы, в которых реализуется гидростатическая смазка. Приведите конструкции гидростатических подшипников.
7. Гидродинамическая смазка. Назовите узлы, в которых реализуется гидродинамическая смазка. Приведите конструкции гидродинамических подшипников.
8. Опишите способы смазывания направляющих прямолинейного и кругового движения. Приведите примеры устройств, содержащих направляющие.
9. Способы смазывания подшипников скольжения и устройства, в которых они работают.
10. Способы смазывания подшипников качения и устройства, в которых они работают.
11. Смазывание зубчатых передач: способы подачи смазочного материала и устройства для их реализации.
12. Циркуляционные смазочные системы. Централизованные смазочные системы в транспортных средствах.
13. Смазочные масла, применяемые в узлах трения транспортных средств. Классификации масел по происхождению и химическому составу.
14. Сравните минеральные и синтетические смазочные масла, опишите их преимущества и недостатки.
15. Приведите сведения об основных характеристиках смазочных масел. Кратко опишите методы их определения.
16. Опишите присадки к маслам: виды и принцип действия. Ремонтно-восстановительные составы.

17. Моторные масла: требования к ним, допустимые режимы эксплуатации, маркировка и классификации масел по ГОСТ 17479.1-85 и SAE.
18. Трансмиссионные масла: требования к ним, маркировка и классификации. Приведите примеры их применения.
19. Индустриальные масла: требования к ним, маркировка и классификация. Приведите примеры их применения.
20. Пластичные и твердые смазочные материалы: структура, виды и области применения.
21. Трение качения, характеристики этого процесса. Разрушение деталей узлов трения качения.
22. Трение качения в узлах машин. Качение колеса по рельсу и дорожному покрытию. Кинетика изнашивания трибосопряжений.
23. Основные характеристики процесса изнашивания. Классификация процессов изнашивания.
24. Абразивное изнашивание трущихся деталей: основные виды и закономерности. Узлы трения, подвергаемые абразивному изнашиванию.
25. Эрозионное, усталостное и кавитационное изнашивание: механизмы и закономерности. Узлы трения, подвергаемые этим видам изнашивания.
26. Адгезионное и окислительное изнашивание, фреттинг-коррозия. Узлы трения, подвергаемые этим видам изнашивания.
27. Приведите формы изношенных поверхностей и опишите, каким видам изнашивания подвергаются направляющие, и детали цилиндропоршневой группы.
28. Приведите формы изношенных поверхностей и опишите, каким видам изнашивания подвергаются зубья шестерен, подшипники скольжения и качения.
29. Приведите формы изношенных поверхностей и опишите, каким видам изнашивания подвергаются детали конвейеров (барабаны, ролики, транспортирующая лента), и сопряжения колесо – рельс.
30. Опишите технологические и эксплуатационные методы повышения износостойкости деталей узлов трения.

2.1 Реальная топография поверхности

Поверхности твердых тел не являются идеально гладкими. Поэтому их контакт не бывает сплошным, а реализуется на отдельных участках, суммарная площадь которых незначительна по сравнению с теоретически возможной. В результате даже при малых внешних нагрузках на этих участках развиваются высокие давления, интенсивно протекают тепловые и физико-химические процессы, изменяется структура материалов в локальных объемах сопрягаемых тел. Это определяет процессы трения и изнашивания твердых тел. Поэтому важно иметь представление о топографии поверхностей деталей машин и ее геометрических характеристиках.

Поверхность реальных тел всегда имеет отклонения от идеальной. Существуют отклонения макро-, микро- и субмикроразмерного порядка.

Под термином макрогеометрические отклонения понимают отклонения поверхности всей детали или больших ее участков от идеальной. К ним относятся овальность, бочкообразность, конусность, корсетность, характерные для деталей цилиндрической формы, а также неплоскостность, вогнутость, свойственные деталям, имеющим плоские поверхности. Величина этих отклонений определяется при измерении линейных размеров детали в различных сечениях. Образуются она из-за неточностей обрабатывающего оборудования, погрешностей установки деталей при обработке, температурной и механической деформациями. Согласно ГОСТ 24642-81, ГОСТ 25069-81, макрогеометрическое отклонение Δ определяется как наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до идеальной прилегающей поверхности, измеряемое по нормали к последней. Прилегающая поверхность контактирует с реальной как минимум в одной точке и располагается вне материала детали так, чтобы расстояние между наиболее удаленными точками этих поверхностей было минимальным.

Волнистость представляет собой совокупность чередующихся возвышений и впадин, образующих волну, шаг которой S_w , значительно превышает высоту H_w (рисунок 2). Шаг волны – это расстояние между вершинами двух соседних волн, измеренное на профиле поверхности. Высота волны – расстояние между вершиной и впадиной. Как правило, $S_w / H_w > 40$. Различают продольную (вдоль

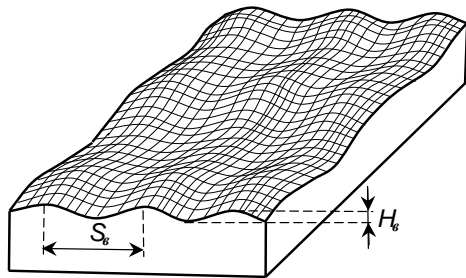


Рисунок 2 – Схема волнистой поверхности

направления обработки) и поперечную волнистость. Шаг волны S_B поверхности реальной детали соответствует ориентировочно интервалу 80 – 104 мкм, а $H_B = 0,03 – 500$ мкм. Возникает волнистость вследствие низкочастотных вибраций станка, приспособлений, инструмента или детали, вызванных неравномерностью износа инструмента, наличием неуравновешенных масс, неоднородностью свойств детали.

Совокупность выступов и впадин, высота (глубина) которых попадает в интервал размеров $10^{-2} – 10^2$ мкм, образует шероховатость поверхности. Геометрические отклонения такого порядка называют микронеровностями. Сечение реальной детали плоскостью представлено на рисунке 3. Здесь волнистость представлена штриховой линией, а сплошная линия – профиль шероховатой поверхности реальной детали.

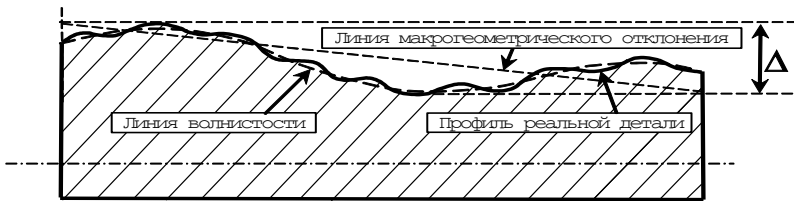


Рисунок 3 – Сечение реальной детали плоскостью

Видно, что деталь имеет макрогеометрическое отклонение – конусность, а микронеровности, образующие шероховатость поверхности, по своим размерам на несколько порядков отличаются от неровностей волнистости. Контур сечения реальной поверхности плоскостью, перпендикулярной соответствующей идеальной поверхности, образует профиль, характеризующий микрогеометрию поверхности детали. Графическое изображение реального профиля по данным измерений шероховатости называют профилограммой шероховатой поверхности. Различают продольную (вдоль направления обработки) и поперечную шероховатость.

Шероховатость образуется при изготовлении и эксплуатации деталей и вызвана наличием неровностей на поверхности сопрягаемых с этой деталью инструмента или контртела, изменением усадки стружки и свойств детали.

Субмикрошероховатость поверхностей обусловлена структурным строением твердого тела. Она представляет собой отклонения нанометрического масштаба. Проявляется она как случайное расположение выходящих на поверхность твердого тела кристаллографических плоскостей, зерен, ультрамикротрещин, дислокаций, а также адсорбированных пленок островкового характера. Размеры субмикрошероховатостей на 2 – 3 порядка меньше размеров микронеровностей и соответствуют $1 – 10^3$ нм.

О наличии субмикрощероховатости косвенно свидетельствуют эксперименты по оценке количества адсорбированного на поверхности твердого тела вещества и удельной энергии разрушения. Так, расчет истинной площади поверхности тел с учетом шероховатости показывает, что она отличается от номинальной на 10 – 20%. Экспериментальные данные о количестве адсорбированного вещества свидетельствует о том, что в действительности это различие составляет сотни процентов. Прямые доказательства существования неровностей нанометрического масштаба получены в 80-х гг. в результате применения сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов.

2.2 Параметры шероховатости

Для оценки качества поверхности шероховатых тел используют профилограммы (рисунок 3), полученные шуповым методом с участка поверхности детали, называемого базовой длиной l . Ее выбирают таким образом, чтобы на профилограмме не проявились другие виды отклонений, например волнистость. В тоже время, базовая длина должна быть достаточно большой для того, чтобы точно оценить параметры, характеризующие шероховатость поверхности. Снимают профилограмму под углом 45° к направлению следов обработки. С улучшением качества поверхности l уменьшается. Базовая длина регламентируется ГОСТ 25142-82 (таблица 2).

Таблица 2

Базовая длина, класс и параметры шероховатости поверхностей деталей машин

Класс шероховатости	Параметры шероховатости		Базовая длина l , мм	Вид обработки
	R_a , мкм	R_z , мкм		
1	320 – 160		8,0	Обдирочное фрезерование, точение, строгание
2	160 – 80			
3	80 – 40			
4	40 – 20			
5	20 – 10		2,5	Строгание, фрезерование, точение
6		2,5 – 1,25	0,8	Точение, шлифование, ротягивание, развертывание
7		1,25 – 0,63		
8		0,63 – 0,32		
9		0,32 – 0,16	0,25	Шлифование, хонингование
10		0,16 – 0,08		

11		0,08 – 0,04		Хонингование, полирование
12		0,04 – 0,02		
13	0,10 – 0,05		0,08	Выглаживание, доводка, суперфинишная обработка
14	0,05 – 0,025			

Для оценки параметров шероховатости выбирают участок профилограммы, равный l . Он определяется как произведение базовой длины l , выбранной по таблице 2, на горизонтальное увеличение γ_z профилографа. Затем проводят среднюю линию CC' таким образом, что бы среднее квадратическое отклонение профиля от этой линии было минимальным.

Для этого на профилограмме выбирают участок, равный l_{np} , и проводят среднюю линию CC' таким образом, что бы среднее квадратическое отклонение профиля от этой линии было минимальным (рисунок 4).

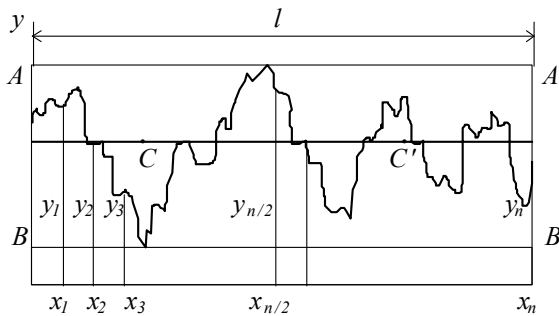


Рисунок 4 – Профилограмма шероховатой поверхности

С этой целью ниже самой нижней точки профиля проводят линию ориентировочно параллельно номинальному профилю. Через равные отрезки на этой линии определяют ординаты профиля y_1, y_2, \dots, y_n . Полученные значения разбивают на две равные группы: для левой и правой частей профилограммы, т.е. $y_1, y_2, \dots, y_{n/2}$ и $y_{n/2+1}, y_{n/2+2}, \dots, y_n$. Определяют координаты двух точек $C = (\bar{x}_1, \bar{y}_1)$ и $C' = (\bar{x}_2, \bar{y}_2)$ по формулам:

$$\bar{x}_1 = \frac{x_1 + x_{n/2}}{2}; \quad \bar{y}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n/2} y_i}{n/2};$$

$$\bar{x}_2 = \frac{x_{n/2+1} + x_n}{2}; \quad \bar{y}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n/2}.$$

Через точки Си С' проводят среднюю линию.

Линия АА', эквидистантная средней линии и проходящая через наивысшую точку профиля, называется *линией выступов*. Линия ВВ', эквидистантная средней линии и проходящая через низшую точку профиля, называется *линией впадин*.

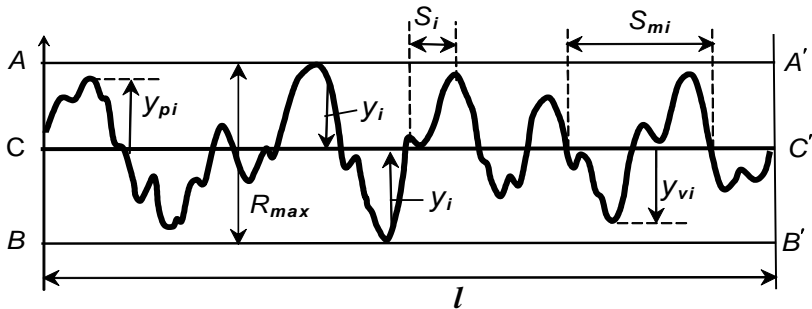


Рисунок 5 – Профилограмма шероховатой поверхности

Стандартом предусмотрено шесть параметров (три высотных, два шаговых и относительная опорная длина профиля), характеризующих шероховатость поверхности.

1. *Среднее арифметическое отклонение профиля R_a* определяется как среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля от средней линии в пределах базовой длины

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (1)$$

где n – число участков базовой длины, на которых определяется отклонение профиля y_i от средней линии (рисунок 5). Чем больше n, тем более точно определяется R_a. Для реальных поверхностей R_a принимает значения в интервале 0,008 – 100 мкм.

Для определения R_a среднюю линию CC' разбивают на n участков и из точек разбиения восстанавливают перпендикуляры до пересечения с профилем (рисунок 5). Измеряют отклонение профиля y_i от средней линии до точки пересечения и рассчитывают среднее арифметическое отклонение профиля по формуле 1. Чем больше n , тем более точно определяется R_a .

2. *Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z* представляет собой сумму средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов y_{pi} и глубин пяти наибольших впадин y_{vi} профиля в пределах базовой длины:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_1^5 |y_{pi}| + \sum_1^5 |y_{vi}| \right) \quad (2)$$

Величина R_z изменяется в интервале от 0,025 до 1600 мкм.

3. *Наибольшая высота неровностей профиля R_{max}* – это расстояние между линией выступов и линией впадин профиля.

4. *Средний шаг неровностей профиля S_m* – среднее арифметическое значение шага S_{mi} неровностей профиля по средней линии. Определяется S_{mi} как отрезок средней линии между двумя нечетными (четными) точками ее пересечения с профилем.

5. *Средний шаг местных выступов профиля S* – это среднее значение длин отрезков S_i средней линии, отсекаемых проекциями на нее наивысших точек соседних выступов.

6. *Относительная опорная длина профиля t_p* – это отношение опорной длины профиля η_p , равной сумме длин l_i отрезков, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантной средней линии, к базовой длине:

$$t_p = \frac{\sum_1^n l_i}{l} = \frac{\eta_p}{l} \quad (3)$$

Параметр t_p характеризует форму неровностей профиля, дает представление о распределении высот неровностей по уровням сечения профиля.

Все перечисленные характеристики определяются с учетом вертикального и горизонтального увеличения профилографа.

2.3 Кривая опорной поверхности

Для построения кривой опорной (несущей) поверхности выберем профиль, полученный при сечении поверхности плоскостью, расположенной под углом 45° к направлению обработки (рисунок 6, а). Проведем среднюю линию CC' и линии выступов AA' и впадин BB' . Параллельно средней линии проведем произвольное число сечений.

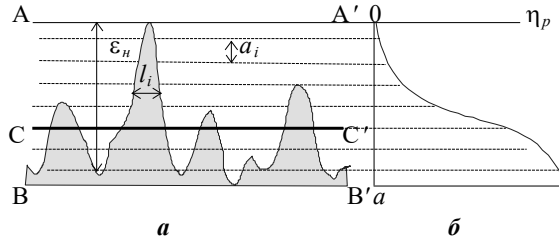


Рисунок 6 – Профиль шероховатой поверхности (а) и кривая опорной поверхности (б)

Сумму длин сечений выступов $\eta_p = \sum_1^n l_i$ на каждом выбранном

расстоянии a_i от линии выступов будем откладывать на оси абсцисс, а расстояние a_i – на оси ординат (рисунок 6,б). На практике a_i означает сближение сопрягаемых тел в результате упругопластической деформации контактирующих выступов под действием нормальной нагрузки. Соединив полученные точки, получим кривую опорной поверхности, позволяющую судить о распределении материала в шероховатом слое.

Более удобно строить кривую опорной поверхности в относительных координатах, когда по оси абсцисс откладывается относительная опорная

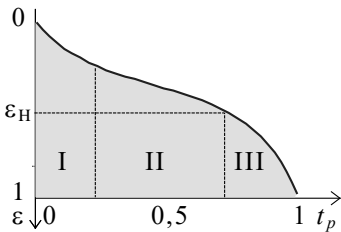


Рисунок 7 – Кривая опорной поверхности в относительных координатах

координатах, когда по оси абсцисс откладывается относительная опорная длина профиля $t_p = \frac{\sum_1^n l_i}{l}$, а по оси

ординат – деформация выступов

$\varepsilon = \frac{a_i}{R_{\max}}$ (рисунок 7). В этом случае t_p

и ε изменяются от 0 до 1. Начальный участок кривой на рисунке 5 описывается уравнением $t_p = b\varepsilon^\nu$, где b ,

ν – параметры, зависящие от вида обработки. Для наиболее часто применяемых в машиностроении деталей $b = 1 - 10$; $\nu = 1,6 - 3$.

На первом участке прирост t_p идет не только за счет увеличения деформации выступов, но и за счет попадания в сечение новых выступов. На втором участке t_p возрастает только за счет увеличения l_i . Начало третьего участка

соответствует попаданию в сечение самой высокой впадины. Этот участок кривой описывается формулой

$$t_p = b\varepsilon_H^v (v\varepsilon / \varepsilon_H + 1 - v),$$

где ε_H – значение ε для сечения, проходящего через самую неглубокую впадину.

Задание 3

ИЗНАШИВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Снижение износа деталей подвижных сопряжений является одной из главных задач в современном машиностроении. Так, ежегодные затраты на ремонт составляют 20 – 25 % стоимости машин, а 5 % объема их промышленного выпуска идет на замену изношенной продукции. Основная часть деталей выходит из строя не из-за потери прочности и объемного разрушения, а вследствие износа. Кроме того, износ зачастую является первопричиной поломки деталей, поскольку способствует насыщению поверхностного слоя дефектами и снижению прочности. Есть ряд областей техники, в которых нерешенные проблемы износа тормозят развитие производства.

С каждым годом эти проблемы становятся все более острыми потому, что ужесточаются режимы эксплуатации технических средств, повышаются требования к их надежности, долговечности и точности функционирования, появляются новые области применения подвижных сопряжений. Их решение требует комплексного подхода, включающего создание методологии конструирования узлов трения; разработку научных основ получения новых смазочных материалов и композитов триботехнического назначения, технологии их формования и упрочнения; развитие методов расчета и прогнозирования долговечности трибосопряжений, а также систему мер организационного характера. Центральное место в перечне этих мер должны занимать совершенствование теорий трения и изнашивания твердых тел и изучение закономерностей протекания этих процессов.

3.1 Основные характеристики процесса изнашивания

Трение твердых тел либо их контакт с движущейся газообразной или жидкой средой сопровождается изменением их линейных размеров. Последовательность явлений, имеющих место в зоне контакта и приводящих к такому результату, называют изнашиванием. Изменение линейных размеров сопрягаемых тел в процессе трения может происходить как

вследствие отделения с их поверхностей небольших объемов материала, так и в результате пластического деформирования наиболее нагруженных выступов поверхности трения. Следовательно, изнашивание – это процесс отделения материала с поверхности твердого тела при трении и (или) увеличения остаточной деформации, сопровождающийся постепенным изменением размеров этого тела. В машинах и механизмах изнашивание является причиной снижения их кинематической точности, возникновения динамических нагрузок, потери прочности и разрушения отдельных элементов.

Результатом изнашивания является износ трущихся тел. Износ – это изменение размеров и формы твердого тела в результате изнашивания. О величине износа можно судить по уменьшению размеров трущегося тела в направлении, перпендикулярном к его поверхности трения.

Количественными характеристиками процесса изнашивания являются скорость i и интенсивность I изнашивания.

Скорость изнашивания представляет собой износ трущегося тела в единицу времени. Определяется скорость изнашивания как отношение толщины изношенного слоя Δh , изменения объема ΔV или массы Δm твердого тела к интервалу времени Δt , в течение которого это тело подвергалось изнашиванию. Различают линейную i_h , объемную i_v и массовую i_m скорости изнашивания:

$$i_h = \frac{\Delta h}{\Delta t}, \quad i_v = \frac{\Delta V}{\Delta t}; \quad i_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}.$$

Более распространенными являются характеристики процесса изнашивания, которые учитывают путь трения L , равный, при постоянной силе трения и скорости скольжения v , произведению v на время истирания Δt . Различают линейную I_h , массовую I_m , объемную I_v и энергетическую I_w *интенсивности изнашивания*.

Линейная интенсивность изнашивания представляет собой толщину изношенного слоя Δh , приходящуюся на единицу пути трения:

$$I_h = \Delta h / L.$$

Эта величина может быть определена по изменению объема ΔV или массы Δm изношенного слоя:

$$I_h = \Delta V / (A_a L); \quad I_h = \Delta m / (\rho A_a L),$$

где ρ – плотность истираемого материала; A_a – площадь поверхности трения истираемого элемента (номинальная площадь контакта, если

поверхности трения сопрягаемых тел одинаковы). Очевидно, что I_h является безразмерной величиной. В большинстве случаев интенсивность изнашивания реальных тел $I_h = 10^{-3} - 10^{-13}$.

Массовая интенсивность изнашивания – это масса вещества, которая удаляется с поверхности изнашиваемого тела за единицу пути трения:

$$I_m = \Delta m / L$$

Объемная интенсивность изнашивания – это объем материала, изношенного за единицу пути трения:

$$I_V = \Delta V / L$$

Различают мгновенную и среднюю скорости и интенсивности изнашивания. Приведенные выше характеристики представляют собой средние скорость и интенсивность изнашивания. Мгновенные значения этих характеристик являются производными износа по времени или пути трения.

Энергетическая интенсивность изнашивания определяет объем изношенного материала, приходящийся на единицу работы силы трения:

$$I_W = \Delta V / (FL)$$

где F – сила трения.

Эта характеристика применяется в основном при изучении работы тормозных устройств и муфт сцепления.

Износостойкость трущихся тел определяют величиной, обратной интенсивности изнашивания. Она характеризует сопротивление материала изнашиванию при заданных режимах трения. Износостойкость ε_i различных реальных узлов трения может принимать значения, принадлежащие широкому интервалу: от 10^3 до 10^{13} . Различают десять классов износостойкости (от 3-го до 12-го), каждый из которых отличается по величине ε_i от следующего за ним в 10 раз. Номер класса соответствует минимальному показателю степени при ε_i . Так, если износостойкость колодочного тормоза соответствует шестому классу, это означает, что $\varepsilon_i = 10^6 - 10^7$, если седьмому классу, то $\varepsilon_i = 10^7 - 10^8$. При изучении сопротивления материалов абразивному изнашиванию чаще всего в лабораторных испытаниях используют понятие относительная износостойкость ε_o

$$\varepsilon_o = \frac{\Delta h_o}{\Delta h}$$

где Δh_0 – высота изношенного слоя эталона; Δh – высота изношенного слоя исследуемого материала. Величины Δh_0 и Δh определяются при одинаковых режимах нагружения.

Приведенные характеристики процесса изнашивания являются интегральными для выбранной пары трения и режимов ее нагружения. Они не связывают износ с процессами взаимодействия и разрушения в зоне контакта.

3.2 Классификации видов изнашивания

Изнашивание трущихся тел следует рассматривать как суммарный результат одновременного протекания элементарных актов разрушения и изменений свойств материала, природа которых разнообразна. Это определяет многообразие видов изнашивания, имеющих место на одной и той же контактной площадке в любой заданный момент времени. Однако для каждой конкретной пары трения и выбранных режимов нагружения характерен ведущий (доминирующий) вид изнашивания, определяющий интенсивность изнашивания трущихся тел. Наряду с ведущим имеют место сопутствующие виды изнашивания. Так, при усталостном изнашивании, преобладающем по своему качественному и количественному проявлению, возможно существование абразивного и окислительного видов изнашивания. С изменением режимов нагружения ведущим видом может быть абразивное изнашивание, а сопутствующими – усталостное и окислительное.

Таким образом, при трении реальных тел в зоне контакта могут реализовываться одновременно несколько приводящих к образованию частиц износа явлений, имеющих различную природу и подчиняющихся различным закономерностям. Математическое описание процесса изнашивания базируется, как правило, на одном явлении. Это явление может быть основным, однако в реальных узлах оно не определяет полностью сопротивление сопрягаемых материалов изнашиванию. Поэтому не следует ожидать полного совпадения расчетных значений интенсивности изнашивания с данными, которые получены экспериментально для реальных узлов трения. Многообразие причин износа трущихся тел привело к разработке большого числа классификаций видов изнашивания, каждая из которых различается принципом, положенным в ее основу. Рассмотрим некоторые из них.

В основу первой классификации, предложенной Бринеллем в 1921 г., был положен кинематический признак и наличие прослойки между поверхностями трения. Согласно этой классификации, существуют следующие виды изнашивания: при трении качения со смазочным материалом; при трении качения без смазочного материала; при трении

скольжения со смазочным материалом; при трении скольжения без смазочного материала; при трении тел, разделенных твердыми частицами.

Ф.Т. Барвелл и К. Стронг предложили классификацию видов изнашивания, основанную на физико-механических и химических явлениях в контакте. Они различают семь видов изнашивания: 1) задиры или заедание, обусловленные сильным адгезионным взаимодействием на пятнах контакта; 2) пластическое течение поверхности; 3) выкрошивание; 4) истирание твердыми частицами; 5) непрерывное изнашивание, приводящее к образованию мелких частиц износа и выглаживанию поверхности трения (в результате воздействия слабых механических нагрузок и адгезии); 6) изнашивание в результате химической коррозии; 7) фреттинг-коррозии.

В основу классификации Б.И. Костецкого положены физико-химические и механические процессы, протекающие в зоне трения. В этом случае выделяют следующие виды изнашивания: схватывание твердых тел; окислительное изнашивание; коррозию и фреттинг, а также смятие; эрозионное, кавитационное и усталостное изнашивание.

Классификация И.В. Крагельского, основанная на характере нарушения фрикционных связей и разрушения поверхностей трения, включает: усталостное изнашивание, наблюдаемое при упругом отеснении материала внедрившимися неровностями контртела; малоцикловую усталость при пластическом отеснении материала; микрорезание с образованием стружки при больших значениях глубины относительно внедрения неровностей поверхности контртела в объем поверхностного слоя изнашиваемого материала; адгезионное нарушение фрикционных связей, наблюдаемое при схватывании пленок; когезионное разрушение поверхностных слоев при схватывании трущихся тел на ювенильных участках контакта.

Д.Н. Гаркунов предложил подразделять изнашивание на следующие виды: при схватывании и заедании поверхностей; избирательный перенос; водородное; окислительное; коррозионное; коррозионно-механическое; фреттинг-коррозия; вследствие диспергирования, вследствие пластической деформации, в результате выкрошивания вновь образуемых структур; трещинообразование на поверхностях трения; абразивное и эрозионное. Эта классификация построена с учетом физико-механических и химических явлений, протекающих в зоне контакта, и топографии поверхности трения после изнашивания.

Согласно ГОСТ 16429-70, все виды изнашивания можно разделить на три группы: механическое; молекулярно-механическое и коррозионно-механическое (рисунок 8).

1	200	2	6900	94	7200	106	7800	132
2	140	1,5	7200	34	3600	18	7800	40
3	150	2,5	5400	58	7200	70	3600	38
4	100	2,0	5400	20	7200	33	5400	18
5	120	2,2	7200	58	5400	32	6300	59
6	140	1,8	7200	88	7800	102	6300	68
7	180	2,0	7200	65	3600	34	7800	75
8	160	2,4	7200	77	4800	62	7800	89
9	110	2,8	7800	52	7200	40	4800	34
10	200	1,5	7200	99	7800	115	3600	53
11	150	2,1	4800	50	7200	67	7800	79
12	120	2,2	7200	28	3600	13	4800	18
13	140	2,0	3600	24	7200	44	7800	52
14	200	1,8	7200	55	4800	36	3600	27
15	140	2,0	7200	76	5400	62	7800	80
16	180	2,4	7200	61	3600	35	4800	43
17	110	2,1	7800	79	7200	74	9600	99
18	150	2,0	7200	92	4800	55	3600	49
19	140	2,2	3600	43	7200	79	5400	60
20	120	2,0	7200	64	7800	70	5400	54
21	160	2,1	9600	48	7200	34	4800	25
22	130	2,0	7200	90	7800	105	3600	42
23	150	2,4	14400	137	7200	64	4800	46
24	100	1,9	7200	45	9600	59	3600	22
25	170	1,6	3600	15	7200	34	14400	66
26	150	2,0	7200	78	9600	9845	4800	45
27	160	2,4	4800	69	7200	65	9600	142
28	130	2,2	14400	78	7200	34	9600	64
29	120	1,8	7200	93	3600	45	4800	69
30	150	2,0	9600	55	7200	45	14400	90

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданович П.Н., Прушак В.Я. Трение и износ в машинах: Учебник для вузов. Мн.: Вышэйшая школа, 1999.– 374с.
2. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов/И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Под ред. Д.Г. Громаковского; Самара: Самарский гос. техн. ун-т., 2000. – 268 с.
3. Bharat Bhushan Учебник «Principles and applications of tribology». New York: A Wiley-Interscience Publication, 1999. – 1019 с.
4. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 2003. – в 2-х томах.
5. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – Киев; Наукова думка, 1970. – 396 с.
6. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
7. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 528 с.
8. Пинчук Л.С. Основы трибологии. – Гомель, 1996. – 78 с.
9. Справочник по триботехнике: В 3 т. / Под общ. Ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1989.
10. Трение и износ материалов на основе полимеров / В.А. Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петроковец, В.Г. Савкин. – Мн.: Наука и техника, 1976. – 452 с.
11. Ящерицын П.И., Скорынин Ю.В. Работоспособность узлов трения машин. – Мн.: Наука и техника, 1984. – 288 с.