

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
“БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТРАНСПОРТА”

Кафедра «Материаловедение и технология материалов»

ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ. ПРАКТИКУМ

Практикум для студентов технических специальностей

Одобрено методической комиссией механического факультета

Гомель 2015

УДК 621.891(075.8)
ББК 34.41
Т66

А в т о р ы: П. Н. Богданович, С. П. Богданович, А. А. Кривенков.

Р е ц е н з е н т – д-р техн. наук, профессор *О. В. Холодилов*
(УО “БелГУТ”).

Трение и износ в машинах: практикум для студентов технических специальностей / П. Н. Богданович [и др.] ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2014. – с.

ISBN 978-985-468-639-4

Излагается теоретический материал по основным разделам курса «Трение и износ в машинах. Приводятся сведения о параметрах шероховатости поверхностей деталей узлов трения, рассматриваются теории и закономерности трения, механизмы, виды и закономерности изнашивания деталей машин и механизмов. Описана методика выполнения рекомендуемых по данной дисциплине лабораторных работ.

Предназначен для студентов технических специальностей.

УДК 621.891(075.8)
ББК 34.41

ISBN 978-985-468-639-4

© Оформление. УО “БелГУТ”, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | | | |
|---|----|--|--|
| ПРЕДИСЛОВИЕ..... | 5 | | |
| 1 ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН | 7 | | |
| 1.1 Краткие сведения из теории | 7 | | |
| 1.1.1 Реальная топография поверхности | 7 | | |
| 1.1.2 Параметры шероховатости..... | 9 | | |
| 1.1.3 Площади контакта шероховатых тел..... | 9 | | |
| 1.1.4 Кривая опорной поверхности | 10 | | |
| 1.2 Лабораторная работа №1 | 10 | | |
| 1.3 Лабораторная работа № 2 | 11 | | |
| Контрольные вопросы | 11 | | |
| 2 ТРЕНИЕ БЕЗ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА..... | 11 | | |
| 2.1 Краткие сведения из теории ... | 12 | | |
| 2.1.1 Виды трения в узлах машин..... | 15 | | |
| 2.1.2 Теории внешнего трения твердых тел..... | 16 | | |
| 2.1.3 Молекулярно-механическая теория трения | 19 | | |
| 2.1.4 Факторы, влияющие на коэффициент трения скольжения | 19 | | |
| 2.2 Лабораторная работа №3..... | 21 | | |
| Контрольные вопросы | 21 | | |
| 3 ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ | 22 | | |
| 3.1 Краткие сведения из теории | 25 | | |
| 3.1.1 Основные понятия и определения..... | 26 | | |
| 3.1.2 Природа трения качения | 29 | | |
| 3.1.3 Современные представления о природе трения качения | 33 | | |
| 3.1.4 Факторы, влияющие на сопротивление качению..... | 33 | | |
| 3.2 Лабораторная работа №4..... | 35 | | |
| 3.2 Лабораторная работа №5..... | 36 | | |
| Контрольные вопросы | 36 | | |
| 4 ИЗНАШИВАНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ | 37 | | |
| 4.1 Краткие сведения из теории | 37 | | |
| 4.1.1 Основные понятия и определения..... | 38 | | |
| 4.1.2 Классификация видов изнашивания..... | 42 | | |
| 4.1.3 Абразивное изнашивание..... | 44 | | |
| 4.1.4 Гидроабразивное изнашивание..... | 44 | | |
| 4.1.5 Газоабразивное изнашивание..... | 57 | | |
| 4.1.6 Эрозионное изнашивание..... | 61 | | |
| 4.1.7 Кавитационное изнашивание | 67 | | |
| 4.1.8 Усталостное изнашивание..... | 73 | | |
| 4.1.9 Адгезионное изнашивание..... | 74 | | |
| 4.1.10 Окислительное изнашивание..... | 75 | | |
| 4.1.11 Изнашивание при фреттинг-коррозии..... | 76 | | |
| 4.1.12 Лабораторная работа №6..... | 78 | | |
| 4.1.13 Лабораторная работа №7..... | 79 | | |
| 4.1.14 Лабораторная работа №8..... | 80 | | |
| Контрольные вопросы | 80 | | |

1 ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

1.1 Краткие сведения из теории

1.1.1 Реальная топография поверхности

Поверхности твердых тел не являются идеально гладкими, они всегда имеют отклонения от соответствующей идеальной поверхности. Существуют отклонения макро-, микро- и субмикроскопического порядка.

Под термином **макрогеометрические** отклонения понимают отклонения поверхности всей детали или больших ее участков от идеальной. К ним относятся овальность, огранка, бочкообразность, конусность, корсетность, непрямолинейность, характерные для деталей цилиндрической формы, а также неплоскостность, непрямолинейность, выпуклость, 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 деформаций. 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 ми-

нимум 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_v , значительно превышает высоту H_v . *Шаг волны* – это расстояние между вершинами двух соседних волн, измеренное на профиле поверхности. *Высота волны* – расстояние между вершиной и впадиной. Как правило, для деталей машиностроительного назначения характерно соотношение $S_v/H_v > 40$. Различают продольную (вдоль направления обработки) и поперечную волнистость. Шаг волны S_v поверхности реальной детали



Рисунок 1.1 – Сечение реальной детали плоскостью

соответствует ориентировочно интервалу $80 \div 104$ мкм, а $H_v = 0,03 \div 500$ 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 $10^{-2} \div 10^2$ мкм, образует **шероховатость** поверхности. Геометрические отклонения такого порядка называют микронеровностями. Сечение реальной детали плоскостью представлено на рисунке 1.1. Здесь волнистость представлена штрихо-

вой линией, а сплошная линия – профиль шероховатой поверхности реальной детали. 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.

Субмикрощероховатость 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 субмикрощероховатостей на 2 ÷ 3 порядка меньше размеров микронеровностей и соответствуют ~ 1 – 10² нм.

Прямые доказательства существования неровностей нанометрического масштаба получены в результате применения сканирующего туннельного (СТМ) и атомно-силового (АСМ) микроскопов. Заметный вклад в эти отклонения вносят границы зерен (показаны стрелками).

1.1.2 Параметры шероховатости

Для оценки качества поверхности шероховатых тел используют профилограммы (рисунок 1.4), полученные щуповым методом с участка поверхности детали, называемого **базовой длиной** l . Ее выбирают настолько малой, чтобы на профилограмме не проявились другие виды отклонений, например волнистость. В тоже время, базовая длина должна быть настолько большой, чтобы можно было достаточно точно оценить параметры, характеризующие шероховатость поверхности. С улучшением качества поверхности l уменьшается. Базовая длина регламентируется ГОСТ 25142-82 (таблица 1.1).

Для определения параметров шероховатости выбирают участок профилограммы, равный l , и проводят **среднюю линию** C_1C_2 таким образом, что бы среднее квадратическое отклонение профиля от этой линии было минимальным (рисунок 1.2). Для этого ниже самой нижней точки профилограммы проводят линию, ориентировочно параллельно номинальному профилю и разбивают ее на n участков одинаковой длины. Из точек разбиения восстанавливают перпендикуляры до пересечения с профилограммой и определяют ординаты профиля y_1, y_2, \dots, y_n .

Полученные значения y_i разбивают на две равные группы: для левой и правой частей профилограммы, т.е. $y_1, y_2, \dots, y_{n/2}$ и $y_{n/2+1}, y_{n/2+2}, \dots, y_n$. Далее определяют координаты двух точек по формулам:

$$\bar{x}_1 = \frac{x_1 + x_{n/2}}{2}; \quad \bar{y}_1 = \frac{\sum_1^{n/2} y_i}{n/2};$$

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

Таблица 1.1 – Параметры шероховатости и вид обработки деталей

| Класс шероховатости | Параметры шероховатости | | Базовая длина, l_0 , 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 | 2,5 | Строгание, фрезерование, точение |
| 5 | | 20 ÷ 10 | | |
| 6 | 2,5 ÷ 1,25 | | 0,8 | Точение, шлифование, протягивание, разворачивание |
| 7 | 1,25 ÷ 0,63 | | | |
| 8 | 0,63 ÷ 0,32 | | | |
| 9 | 0,32 ÷ 0,16 | | 0,25 | Шлифование, хонингование |
| 10 | 0,16 ÷ 0,08 | | | Хонингование, полирование |
| 11 | 0,08 ÷ 0,04 | | | |
| 12 | 0,04 ÷ 0,02 | | | |
| 13 | | 0,10 ÷ 0,05 | 0,08 | Доводка, суперфинишная обработка |
| 14 | | 0,05 ÷ 0,025 | | |

Через точки $C = (\bar{x}_1, \bar{y}_1)$ и $C'(\bar{x}_2, \bar{y}_2)$ проводят **среднюю линию** CC' . Среднее квадратическое отклонение профиля от этой линии должно быть минимальным.

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

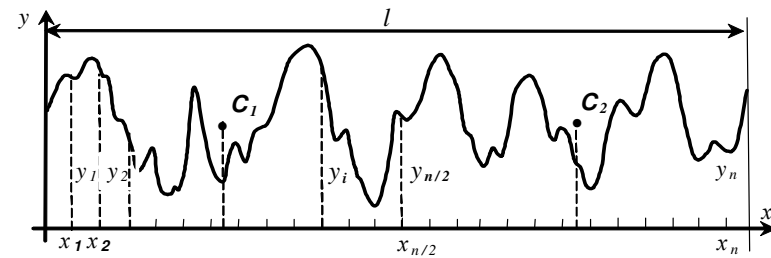


Рисунок 1.2 – Профилограмма шероховатой поверхности

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. Для определения R_a среднюю линию разбивают на n участков одинаковой длины, из точек разбиения восстанавливают перпендикуляры до пересечения с профилограммой и измеряют значения отклонений y_i . Величину R_a определяют по формуле

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

где n – число участков базовой длины, на которых определяется отклонение профиля y_i от средней линии (рисунок 1.3). 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 наиболее высоких выступов y_{pi} и глубин пяти наиболее глубоких впадин y_{vi} профиля в пределах базовой длины.

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

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

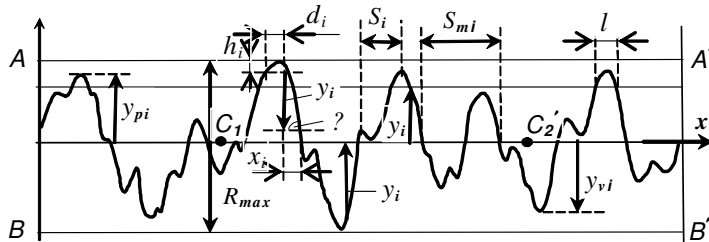


Рисунок 1.3 – Схема расчета параметров шероховатости поверхности

3. Наибольшая высота неровностей профиля R_{max} – это расстояние между линией выступов и линией впадин профиля, измеряемое в перпендикулярном к средней линии направлении. Очевидно, что для одной и той же детали $R_{max} > R_z > R_a$.

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 p в материале профиля линией, эквидистантной средней линии, к базовой длине:

$$t_p = \frac{\sum_1^n l_i}{l} = \frac{\eta_p}{l}$$

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

Высотные параметры шероховатости поверхности детали R_a , R_z , R_{max} определяются с учетом вертикального увеличения γ_1 профилографа, а шаговые S_m и S – с учетом горизонтального увеличения γ_2 .

В исследовательской практике часто применяются и другие характеристики шероховатости, например **радиус кривизны в вершине неровности:**

$$R_i = \frac{d_i^2}{8h_i} \frac{\gamma_1}{\gamma_2^2},$$

где d_i – ширина сечения выступа на расстоянии $h_i = 0,06 R_{max}$ или $h_i = 0,3 R_a$ от вершины выступа.

Средний радиус кривизны вычисляют по пяти наиболее высоким выступам. Приведенный радиус кривизны определяется как среднее геометрическое продольного (вдоль следов обработки) и поперечного радиусов:

$$R_i = \sqrt{R_{ni} R_{mpi}}.$$

Радиус кривизны всей неровности находят по формуле

$$R_j = \frac{S_{mi}^2}{8R_a} \frac{\gamma_1}{\gamma_2^2}.$$

Угол наклона φ_l элементов профиля к средней линии определяют по формуле

$$\text{tg } \varphi_1 = \frac{y_i}{x_i} \frac{\gamma_2}{\gamma_1},$$

где y_i' – отрезок прямой, опущенный из точки, отстоящей от вершины выступа на расстоянии $0,06R_{\max}$ или $0,3R_a$, перпендикулярно к средней линии до прямой x_i , параллельной средней линии и отстоящей на таком же расстоянии от впадины (см. рисунок 1.3).

При записи профилограммы вертикальное увеличение задается значительно большим, чем горизонтальное. Вследствие этого профилограмма имеет вид пилы с острыми вершинами выступов. В действительности неровности реальной поверхности имеют относительно пологую форму. Это подтверждается результатами расчета φ_l при обработке профилограмм поверхностей деталей машин: как правило, φ_l редко превышает 10° .

1.1.3 Площади контакта шероховатых тел

Вследствие того, что реальные тела имеют волнистую, шероховатую поверхность, их контакт является дискретным. Это привело к необходимости введения понятий номинальной, контурной и фактической площадей контакта.

Под **номинальной** площадью контакта A_a понимают такую площадь, по которой соприкасались бы тела, если бы их поверхности имели идеально гладкую геометрическую форму. При контакте плоских тел A_a определяется их геометрическими размерами. В случае контакта тел с криволинейными поверхностями A_a зависит не только от размеров, но и от приложенной нагрузки и механических свойств этих тел.

При наличии волнистости контакт твердых тел осуществляется по вершинам волн соприкасающихся по-

верхностей. Их деформация будет определять размеры площадок контакта. Суммарная площадь пятен касания, обусловленная деформацией вершин волн, называется **контурной** площадью контакта A_c . Единичные контурные площадки A_{ci} удалены друг от друга на расстоянии шага волны. Контурная площадь контакта определяется геометрическими размерами и формой контактирующих деталей, параметрами волнистости их поверхностей, нагрузкой и механическими свойствами контактирующих тел.

Две приведенные в контакт детали взаимодействуют первоначально в тех точках, в которых наблюдается соприкосновение противостоящих друг другу выступов, имеющих наибольшую суммарную высоту. С увеличением нагрузки поверхности этих тел сближаются и выступы более твердого тела внедряются в материал более мягкого. При этом в контакт вступают новые микронеровности. В итоге образуется множество расположенных на различных высотах площадок контакта, средний размер которых составляет $3 \div 50$ мкм. Суммарная площадь, на которой осуществляется контакт микронеровностей, образующих шероховатость поверхностей, представляет собой **фактическую площадь контакта** A_f (ФПК).

ФПК составляет около $0,01 \div 0,1$ % номинальной площади. Даже при высоких нагрузках, обеспечивающих преимущественно пластический контакт, она не превышает 40 %. ФПК монотонно увеличивается с ростом нормальной нагрузки, радиуса закругления вершин неровностей и с уменьшением R_a , а также с увеличением длительности t воздействия нагрузки. Влияние t на ФПК особенно характерно для контакта металл – полимер и полимер – полимер. С увеличением упругих характери-

стик и предела текучести материала A_r убывает. При контактировании тел из разнородных материалов A_r определяется физико-механическими свойствами более мягкого материала и геометрией поверхности более твердого.

1.1.4 Кривая опорной поверхности

Вначале контакт двух тел осуществляется по трем точкам. При этом в контакте находятся наиболее высокие выступы (рисунок 1.4,а). По мере увеличения нагрузки выступы более мягкого тела деформируются, а более твердого внедряются в сопрягаемый материал, эти тела сближаются на величину a , зависящую от величины нагрузки. В итоге увеличиваются размеры пятен контакта, в контакт вступают новые выступы, и площадь фактического контакта возрастает.

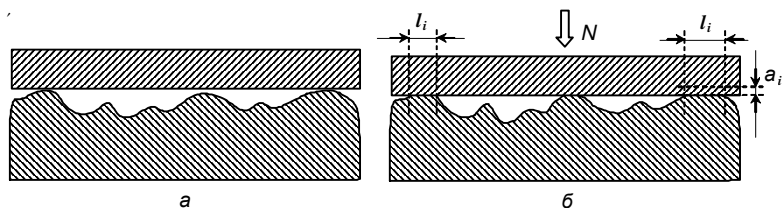


Рисунок 1.4 – Контакт двух твердых тел при различном уровне нормальной нагрузки

Если выполнить сечение этих тел плоскостью, перпендикулярной поверхности их контакта, то можно увидеть, что верхнее тело будет опираться на нижнее на участках длиной l_i (рисунок 1.4,б). Для удобства воспри-

ятия поверхность верхнего тела на рисунке 1.4 представлена идеальной плоскостью.

Суммарная длина этих участков представляет собой опорную длину профиля η_p . Аналогично этому на профилеграмме каждому сечению профиля линией, эквидистантной средней линии, соответствует своя η_p . Таким образом, l_i характеризует размер пятен контакта, а опорная длина профиля – площадь фактического контакта. Поэтому изменение площади A_r с повышением нагрузки (ростом сближения тел) можно проследить с помощью кривой опорной (несущей) поверхности.

Для построения кривой опорной поверхности выбирается профиль детали, полученный при сечении поверхности плоскостью, расположенной под углом 45° к направлению обработки (рисунок 1.5, а). Проводится средняя линия CC' и линии выступов AA' и впадин BB' . Параллельно средней линии проводится произвольное число линий, пересекающих вершины выступов. Сумму длин сечений выступов $\eta_p = \sum_1^n l_i$ на каждом выбранном

расстоянии a_i от линии выступов откладывают на оси абсцисс, а расстояние a_i – на оси ординат (рисунок 1.5,б). На практике a_i означает сближение сопрягаемых тел в результате упругопластической деформации контактирующих выступов под действием нормальной нагрузки. Соединение полученных точек линией дает 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 длина профиля

$t_p = \frac{1}{l} \sum_1^n l_i$, а по оси ординат – деформация выступов

$\varepsilon = \frac{a_i}{R_{max}}$. В этом случае t_p и ε изменяются от 0 до 1.

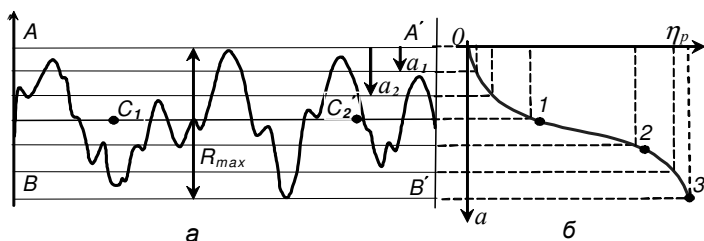


Рисунок 1.5 – Профиль шероховатой поверхности (а) и кривая опорной поверхности (б)

Начальный участок кривой (0 – 1) на рисунке 1.8,б в относительных координатах описывается уравнением $t_p = b\varepsilon^v$, где b, v – параметры, зависящие от вида обработки. Для наиболее часто применяемых в машиностроении деталей $b = 1 - 10$; $v = 1,6 - 3$.

На первом участке (0 – 1) прирост t_p идет не только за счет увеличения деформации выступов, но и за счет попадания в сечение новых выступов. На втором участке (1 – 2) относительная опорная длина профиля возрастает только за счет увеличения l_i . Начало третьего участка (2 – 3) соответствует попаданию в сечение самой высокой впадины.

Этот участок кривой описывается формулой

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

где ε_H – значение деформации материала выступов для сечения, проходящего через самую неглубокую впадину профиля.

1.2 Лабораторная работа №1

«Определение высотных параметров микрогеометрии деталей машин»

Цель работы: определение высотных параметров шероховатости, построение средней линии, линии выступов и линии впадин.

Оборудование и материалы: профилограф, измерительный инструмент, профилограмма, исследуемая деталь или эталонный образец.

Порядок выполнения работы.

1. Установить деталь (эталон) на столик профилографа. Оценив класс шероховатости поверхности детали, задать вертикальное γ_v и горизонтальное γ_z увеличения профилографа и по таблице 1.1 выбрать базовую длину l_0 . При этом γ_v значительно выше γ_z . Записать профилограмму с поверхности детали, сканируя поверхность иглой под углом $\alpha=45^\circ$ к направлению следов обработки.

2. Рассчитать базовую длину l на профилограмме, учитывая горизонтальное γ_z увеличение профилографа: $l = l_0 \cdot \gamma_z$. Отметить вертикальными линиями участок профилограммы длиной l , на котором не сказывается влияние волнистости.

3. Провести среднюю линию. Для этого ниже самой нижней точки профилограммы провести линию ориентировочно параллельно профилю идеальной соответствующей поверхности. Разбить эту линию на n участков. Из точек разбиения восстановить перпендикуляры до пересечения с профилограммой. Измерить значения x_i и y_i , и разделить полученные значения на две группы: левую и правую. Найти координаты левой C_1 и правой C_2

точек, через которые провести среднюю линию. Координаты рассчитать по формулам:

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

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

Через точки $C_1 (x_1; y_1)$ и $C_2 (x_2; y_2)$ провести среднюю линию.

4. Через самую высокую и самую низкую точки профилограммы параллельно средней линии провести соответственно *линию выступов* A_1A_2 и *линию впадин* B_1B_2 .

5. Определить *среднее арифметическое отклонение профиля* R_a . Для этого разбить среднюю линию на n участков и из точек разбиений восстановить перпендикуляры до пересечения с профилограммой. Измерить расстояния между точками разбиения и пересечения (значения y_i) и рассчитать $R_{a\ np}$ по формуле

$$R_{a\ np} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

Реальное значение R_a , детали найти, учитывая вертикальное увеличение профилографа: $R_a = R_{a\ np} \gamma_в$.

6. Определить *высоту неровностей профиля по десяти точкам* R_z . Для этого измерить высоты пяти наиболее высоких выступов y_{pi} и глубины пяти наиболее глубоких впадин y_{vi} в пределах базовой длины. Значение $R_{z\ np}$ рассчитать по формуле

$$R_{z\ np} = \frac{1}{5} \cdot \left(\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| \right),$$

Реальное значение R_z , детали найти, учитывая вертикальное увеличение профилографа: $R_z = R_{z\ np} \gamma_в$.

7. Определить *наибольшую высоту неровностей профиля* R_{max} . Для этого измерить расстояние между линией выступов и впадин по нормали к средней линии и учесть вертикальное увеличение профилографа.

8. Сделать вывод о полученных при обработке профилограммы значениях высотных параметров шероховатости поверхности детали: R_a , R_z , R_{max} и классе ее точности.

Контрольные вопросы

1. Опишите топографию поверхности детали. Назовите виды отклонений поверхности деталей от идеальной формы.

2. Макрогеометрические отклонения поверхности детали. Причины их возникновения. Назовите виды этих отклонений.

3. Охарактеризуйте субмикрогеометрические отклонения поверхности детали.

4. Какие параметры характеризуют волнистость поверхности детали?

5. Какие параметры характеризуют шероховатость поверхности, какие из них наиболее часто применяются на практике?

6. Исходя из каких условий выбирается базовая длина?

7. Охарактеризуйте высотные параметры шероховатости поверхности.

8. Как определяется среднее арифметическое отклонение неровностей профиля?

1.3 Лабораторная работа № 2

«Определение шаговых параметров шероховатости и построение кривой опорной поверхности»

Цель работы: определение шаговых параметров шероховатости, угла наклона неровностей к средней линии, относительной опорной длины и построение кривой опорной поверхности.

Оборудование и материалы: профилограф, измерительный инструмент, профилограмма, исследуемая деталь или эталонный образец.

Порядок выполнения работы.

1. Определить *средний шаг неровностей профиля* S_m . Для этого в пределах базовой длины измерить отрезки S_{mi} средней линии между двумя чётными или нечётными точками её пересечения с профилограммой и рассчитать $S_{m\ np}$ как среднее значение величин S_{mi} по формуле

$$S_{m\ np} = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n S_{mi}.$$

Для оценки действительного значения S_m поверхности детали $S_{m\ np}$ умножают на горизонтальное увеличение профилографа γ_z .

2. Определить *средний шаг местных выступов* S . Для этого с вершины каждого выступа опустить перпендикуляр на среднюю линию и измерить длину отрезков S_i средней линии между точками пересечения ее с перпендикулярами соседних выступов. Рассчитать средний шаг местных выступов как среднее арифметическое значений S_i , полученных в пределах базовой длины

$$S_{np} = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n S_i.$$

Для оценки действительного значения S поверхности детали S_{np} умножить на горизонтальное увеличение профилографа γ_z .

3. Вычислить *угол наклона неровностей профиля к средней линии* φ . Для этого на расстоянии $h_i = 0,3R_a$ от вершины выбранного выступа провести линию параллельно средней, и из одной из точек ее пересечения с профилограммой опустить перпендикуляр на среднюю линию. Затем на любом расстоянии от этой точки, провести линию параллельно средней и измерить длины отрезков x_i и y_i . Угол φ рассчитать по формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{y_i \gamma_2}{x_i \gamma_1}$$

Аналогичным образом определить углы наклона трех выступов. На основе анализа полученных значений углов сделать вывод о том, насколько профиль профилограммы соответствует профилю поверхности реальной детали. Нарисуйте профиль реальной поверхности детали, учитывая полученные значения φ .

4. Построить *кривую опорной поверхности*. Наиболее удобно строить и анализировать кривую опорной поверхности в относительных координатах: "относительной опорной длиной профиля" – "деформация". Под относительной опорной длиной профиля t_p будем понимать отношение опорной длины профиля η_p , равной сумме длин l_i отрезков, отсекаемых на заданном уровне p в материале профиля линией, эквидистантной средней линии, к базовой длине l . Под деформацией выступов ε будем понимать отношение сближения a_i к наибольшей высоте неровностей профиля R_{max} .

$$t_p = \frac{\sum l_i}{l}, \quad \varepsilon = \frac{a}{R_{\max}}$$

В этом случае t_p и ε изменяются от 0 до 1.

Для построения кривой $t_p(\varepsilon)$ разбить расстояние между линией выступов и впадин на 7 – 10 участков и провести линии, параллельные средней линии. Зная l и R_{\max} и измеряя значение a_i и соответствующие ему суммы l_i , рассчитать t_i и ε_i . По этим координатам построить точку в системе координат $t_p - \varepsilon$. Аналогично определить значения t_p и ε для каждого из 7 – 10 сближений a_i . Полученные точки соединить кривой $t_p(\varepsilon)$.

5. Кривую разделить на три участка. Точки разбиения А и В являются точками перегиба кривой опорной поверхности. Первый ее участок на рисунке 1.6 описывается уравнением $t_p = b\varepsilon^v$, где b, v – параметры, зависящие от вида обработки. Для наиболее часто применяемых в машиностроении деталей $b = 1 - 10$; $v = 1,6 - 3$

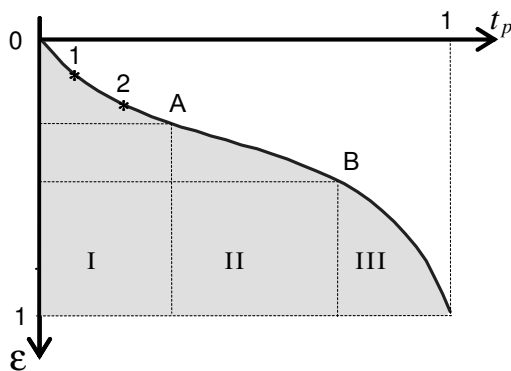


Рисунок 1.6 – Кривая опорной поверхности в относительных координатах

Выбрать две точки (1 и 2) на первом участке кривой $t_p(\varepsilon)$ и определить их координаты. Для точки 1 – ε_1 и t_{p1} , а для точки 2: – ε_2 и t_{p2} .

$$\begin{aligned} t_{p1} &= b\varepsilon_1^v \\ t_{p2} &= b\varepsilon_2^v \end{aligned}$$

Решая полученную систему уравнений с двумя неизвестными, получить численные значения коэффициентов b и v . Эти значения подставить в уравнение $t_p = b\varepsilon^v$, которое описывает первый участок кривой. Для проверки адекватности уравнения между точками 1 и 2 выбрать точку, координаты которой подставить в полученное уравнение.

6. Сделать вывод о шаговых параметрах, полученных при обработке профилограммы, реальном профиле детали, привести формулу, описывающую первый участок кривой опорной поверхности.

Контрольные вопросы

1. Что характеризуют понятия "средний шаг неровностей профиля" и "шаг местных выступов"?
2. Как определить средний шаг местных выступов, не измеряя каждое из его значений в отдельности?
3. Что такое "опорная длина профиля", в чем ее физический смысл?
4. Что характеризует кривая опорной поверхности?
5. Какая из площадей контакта шероховатых тел меньше: номинальная, контурная или фактическая?
6. На какой из площадей реализуется непосредственный контакт деталей машин?
7. Назовите факторы, оказывающие влияние на площади контакта деталей.

8. Как изменится форма кривой опорной поверхности при переходе от "острой" профилограммы к более "пологой".

2 ТРЕНИЕ БЕЗ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

2.1 Краткие сведения из теории

2.1.1 Виды трения в узлах машин

Трение – это явление сопротивления относительно перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения их поверхностей по касательному к ним направлению. Усилие F , необходимое для преодоления этого сопротивления, называется *силой трения*. Отношение силы трения между двумя телами к нормальной силе N , прижимающей эти тела друг к другу, называется *коэффициентом трения f* .

Существует несколько классификации видов трения. По *кинематическому* признаку различают трение покоя, скольжения, верчения и качения.

Трение покоя представляет собой сопротивление контактирующих тел их относительно перемещению, наблюдаемое при приложении нормальной и касательной нагрузок, не вызывающих изменения координат и разрушения пятен фактического контакта (рисунок 2.1, а). В этом случае вершины контактирующих выступов не смещаются одна относительно другой. При трении покоя возможно относительное смещение контактирующих тел, вызванное деформацией контактирующих неровностей и в меньшей степени объемной деформацией этих тел. Этот вид трения имеет место в муфтах сцепления, фрикционных устройствах, ременных передачах, резьбовых соединениях.

Трение скольжения наблюдается при относительном перемещении контактирующих тел и сопровождается постоянной сменой выступов поверхности трения, всту-

пающих в контакт. При трении скольжения сопрягаемые тела перемещаются так, что векторы скоростей на каждом общем участке контакта различны по модулю или направлению (рисунок 2.1, б). Реализуется этот вид трения в парах направляющая – суппорт, вал – вкладыш, поршень – втулка.

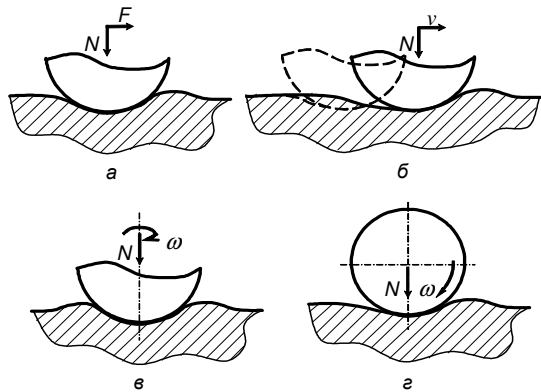


Рисунок 2.1 – Схемы контакта тел при трении покоя (а), скольжения (б), верчения (в), качения (г)

Трение верчения (рисунок 2.1, в) имеет место в опорах часовых механизмов, приборов, ограничных дисков, веретен. Отличается тем, что площадь поверхностей трения обоих сопрягаемых тел одинакова, а скорости относительного перемещения различных точек этих поверхностей различны, зависят от их удаления от центра контактной.

Трение качения – это сопротивление взаимному перемещению сопрягаемых тел, при повороте одного из которых относительно мгновенной или постоянной оси в контакт вступают новые участки поверхностей трения, а относительная скорость различных точек этого тела оп-

ределяется их удалением от контактной площадки (рисунок 2.1, г). Этот вид трения реализуется в подшипниках качения, парах колесо – рельс железнодорожного транспорта, ролик – транспортирующая лента конвейерных систем, винтовых парах качения. Вследствие упругости реальных тел их контакт представляет собой не точку или линию, а площадку конечных размеров. Поэтому качение сопровождается, как правило, проскальзыванием.

В зависимости от *наличия и природы слоя, разделяющего трущиеся тела*, различают: трение без смазочного материала, граничное трение, жидкостное и газодинамическое.

Трение без смазочного материала реализуется в том случае, когда сопрягаемые поверхности покрыты только оксидными пленками или адсорбированными пленками воды и газа. Этот вид трения имеет место в тормозах, фрикционных передачах и узлах трения, где недопустимо использование смазочных материалов (машины текстильной, пищевой, химической промышленности) либо их применение невозможно вследствие высокой температуры сопрягаемых деталей (прокатные станы, литейное оборудование). Обычно для узлов трения, работающих без смазочных материалов, одно из тел трения изготавливают из композита, содержащего твердое смазывающее вещество (дисульфид молибдена, диселенид вольфрама, графит, пластичные металлы). Твердые смазочные материалы, обладая низким сопротивлением сдвигу, снижают силу трения и интенсивность изнашивания трущихся тел.

Граничное трение возникает тогда, когда поверхности трущихся тел разделены граничным слоем толщиной $0,01 \div 0,1$ мкм. Граничный слой состоит из оксидов, во-

ды, адсорбированных газов, загрязнений и смазочных веществ. Смазочный материал образует на поверхности трения квазикристаллическую структуру и благодаря этому может выдерживать без разрушения высокие давления. Наличие граничного слоя на поверхностях трущихся тел может привести к снижению коэффициента трения почти на порядок. Реализуется этот вид трения в низкоскоростных узлах трения, узлах с разовой или обедненной подачей смазочного материала в зону трения, а также при пусках и остановках машин.

Жидкостное трение характеризуется тем, что трущиеся поверхности полностью разделены слоем смазочной жидкости, находящейся под давлением, которое уравнивает внешнюю нагрузку. Сопротивление перемещению трущихся тел определяется внутренним трением (вязкостью) жидкости и складывается из сопротивления скольжению слоев смазочного материала относительно друг друга. Сила трения не зависит от природы сопрягаемых тел. Различают два вида жидкостного трения: гидродинамическое и гидростатическое. При *гидростатическом* трении давление в смазочном слое, разделяющем трущиеся тела, создается за счет подачи смазочного материала в зону трения под давлением извне, например насосом или под действием столба жидкости. *Гидродинамическое* трение имеет место при высоких скоростях скольжения, когда смазывающая жидкость вовлекается в сужающийся зазор между трущимися телами и создает подъемную силу, уравнивающую приложенную нагрузку и вес движущегося тела. В противном случае наблюдается переход от жидкостного к граничному трению. Жидкостное трение реализуется в парах трения вал – втулка подшипника скольжения,

плунжер – втулка, цилиндр – поршень гидравлических устройств и т.д.

При *трении с газовой смазкой* поверхности разделены слоем газа. Различают газостатическое и газодинамическое трение. При трении с *газостатической* смазкой внешняя нагрузка, прижимающая сопрягаемые тела друг к другу, уравнивается давлением в слое газа, непрерывно подаваемого в зону контакта насосом. При трении с *газодинамической* смазкой полное разделение сопрягаемых поверхностей осуществляется в результате давления, возникающего в слое газа при относительном движении трущихся тел. Реализуется данный вид трения в высокоскоростных узлах с высокой точностью перемещения элементов пары трения, применяемых в ультрацентрифугах, турбокомпрессорах, станках, точных приборах.

В зависимости от *области, в которой происходит сдвиг одного тела относительно другого*, различают внешнее и внутреннее трение.

Внешнее трение имеет место в том случае, когда прочность адгезионных связей меньше когезионной прочности поверхностных слоев обоих трущихся тел, т.е. когда механические характеристики этих тел возрастают по мере удаления от поверхности трения. В этом случае сдвиг будет происходить по границе контактирующих выступов. Внешнее трение характеризуется сравнительно низким коэффициентом трения, дискретным характером разрушения и перемещением материала в направлении, перпендикулярном поверхности трения. Наблюдается в большинстве применяемых в технике кинематических пар.

Внутреннее трение наблюдается между слоями жидкости при жидкостном трении, а также при отсутствии

смазки, если прочность адгезионных связей больше когезионной прочности одного из трущихся тел. В этом случае сдвиг происходит в объеме поверхностного слоя одного или обоих контактирующих тел и реализуется послойное смещение материала в направлении скольжения. Внутреннее трение имеет место при обработке металлов давлением, волочении проволоки, фрикционном нагреве элементов пары трения до температуры, близкой к температуре плавления, и т.д.

2.1.2 Теории внешнего трения твердых тел

Геометрическая модель трения основана на наиболее ранних и простых представлениях о трении твердых тел (А. Паран, Л. Эйлер, Ш. Кулон). Трение рассматривается как результат подъема одного тела по неровностям поверхности другого. Работа, совершаемая по преодолению силы трения F на пути $L = AB$, принимается численно равной энергии, необходимой для подъема одного тела, прижимаемого нормальной нагрузкой N к другому, по неровностям их поверхностей на высоту h этих неровностей (рисунок 2.2). Отсюда следует, что $f N_o L = N h$. Учитывая, что $N = N_o / \cos \alpha$ и $h = L \sin \alpha$, выражение для расчета коэффициента трения можно записать в виде:

$$f = \operatorname{tg} \alpha,$$

где α – угол наклона неровностей к номинальной поверхности.

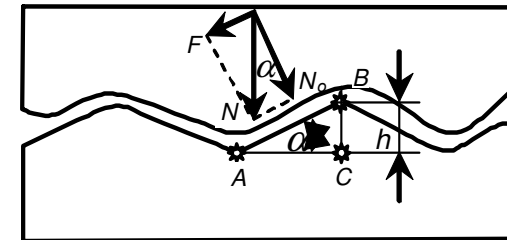


Рисунок 2.2 – Геометрическая модель трения

Несостоятельность этих представлений подтверждается, например, экспериментами И.В. Крагельского: коэффициент трения шарика из стали ШХ–15 по пластине из стали ХКМ не повышался, а снижался с увеличением шероховатости поверхностей этих тел (с ростом $\operatorname{tg} \alpha$ до 0,1). Кроме того, угол наклона неровностей поверхностей даже грубо обработанных деталей редко превышает 10° . Следовательно, коэффициент трения должен принимать значения меньше 0,2. В действительности, при отсутствии смазочного материала он изменяется в интервале $0,1 \div 1,0$.

Молекулярная теория трения. Впервые была предложена И. Деагюлье в 1734 г., а развитие получила в XX в. в трудах В. Гарди, Г. Томлинсона, Б.В. Дерягина. В ее основе лежит положение о том, что трение обусловлено силами межмолекулярного или межатомного взаимодействия приведенных в контакт тел. При трении молекулы вершин вступающих в контакт неровностей сближаются настолько, что возникают силы взаимного отталкивания. По мере их удаления, вызванного смещением тел при трении, возникают силы притяжения, препятствующие разрыву образовавшихся связей. Такое взаимодействие между парами молекул контактирующих выступов обуславливает сопротивление взаимному

перемещению трущихся тел. Таким образом, при скольжении поверхностей происходит непрерывная смена пар молекул, уравнивающих нормальное давление, что сопровождается рассеянием энергии. Формула для расчета силы трения с позиций молекулярной теории трения, предложена Б.В. Дерягиным. Она получена из анализа равновесного состояния атома поверхности твердого тела.

$$F = f(N + p_o A_r) ,$$

где p_o – равнодействующая молекулярного притяжения на единицу ФПК.

В молекулярной теории трения недооценивается вклад механической составляющей, обусловленной сопротивлением более мягкого материала перемещению внедрившихся в его объем неровностей контртела. Применима эта теория в основном для трения жестких тел с гладкими поверхностями трения.

Энергетическая теория трения. Основывается эта теория на положении о том, что затрачиваемая при трении энергия расходуется на тепловые, механические и электрические явления, а также на химические процессы, имеющие место в зоне контакта трущихся тел. Б.И. Костецким установлено, что работа по преодолению сил трения

$$W = Q + W_{см} + \Delta W_{вн} + \Delta W_{п} + W_d ,$$

где Q – количество выделившейся при трении теплоты; $W_{см}$ – энергия, затраченная на деформацию и скольжение в граничном слое; $\Delta W_{вн}$ – приращение внутренней энергии трибосистемы; $\Delta W_{п}$ – приращение поверхностной энергии; W_d – энергия диссипации (внешнего рассеяния).

Калориметрические исследования и расчеты показали, что около 90% работы сил трения трансформируется в теплоту. Изучение связи силы трения с поверхностной энергией указывает на то, что выбор пар трения должен осуществляться с учетом отношения поверхностной энергии материала $W_{п}$ к эффективному напряжению на контакте $p = c\sigma_r$. Если отношение $W_{п}/p$ минимально, материал обладает хорошими антифрикционными свойствами. О связи процесса трения с поверхностной энергией сопрягаемых тел свидетельствуют результаты исследований полимерных материалов, в частности полиэтилена. Так, при замещении атомов водорода фтором в углеводородной цепи поверхностная энергия полимера снижается. При этом полимер будет обладать более низким коэффициентом трения. Замещение водорода хлором способствует росту, как поверхностной энергии, так и коэффициента трения.

Адгезионно-деформационная теория трения. Основана на выдвинутом Ф. Боуденом и Д. Тейбором (1938 г.) положении о том, что на пятнах фактического контакта давление настолько велико и атомы поверхностей контактирующих выступов сближены на такое малое расстояние, что между ними возникает межатомное взаимодействие. Поэтому вступающие в контакт выступы поверхностей трущихся тел образуют адгезионные связи (мостики сварки). Вначале авторы теории рассматривали трение как сопротивление мостиков сварки срезу. Но впоследствии пришли к выводу, что трение есть суммарный результат сопротивления срезу мостиков сварки и сопротивления более мягкого материала деформированию (пропахиванию) внедрившимися неровностями более твердого тела. Следовательно, сила

трения F представляет собой сумму адгезионной F_a и деформационной F_d составляющих. Рассмотрим возможность оценки каждой из составляющих силы трения.

Для расчета адгезионной составляющей предполагалось, что на каждом из n единичных пятен контакта неровностей площадью A_{ri} образуются мостики сварки, прочность каждого из которого на сдвиг одинакова и равна τ . При приложении касательной нагрузки разрушение мостиков сварки происходит преимущественно по объему более мягкого материала, предел текучести которого при одноосном нагружении σ_T . Деформационная составляющая силы трения рассматривается как сопротивление более мягкого материала перемещению внедрившихся в его объем выступов поверхности сопрягаемого тела. Для ее расчета рассматривается контакт сферы, моделирующей внедрившейся выступ более твердого тела, с пластически деформируемым плоским телом.

Формула для расчета коэффициента трения согласно адгезионно-деформационной теории, полученная с применением модели контакта сфера – полупространство, имеет вид

$$f = f_a + f_d = \frac{\tau}{\sigma_T} + \frac{\pi\alpha}{180} \frac{\sin \alpha}{\pi \sin^2 \alpha / 2},$$

где α – центральный угол между радиусами сферы, соединяющими ее центр с диаметрально расположенными точками границы контакта.

Поскольку глубина внедрения неровностей более твердого тела мала (составляет ориентировочно тысячные доли их радиуса), центральный угол α неровностей реальных деталей не превышает 10° . При таких значени-

ях угла α , согласно адгезионно-деформационной теории, f_d не достигает 0,033, что как минимум в 5 раз меньше адгезионной составляющей.

Справедливость адгезионно-деформационная теории подтверждается результатами экспериментальных исследований Ф. Боудена и А. Хьюза, сущность которых сводится к следующему. С увеличением содержания кислорода в вакуумной камере коэффициент трения металлов уменьшается, поскольку поверхности трения покрываются оксидными пленками, которые препятствуют образованию прочных адгезионных связей и сами обладают низким сопротивлением срезу. Адгезионная природа трения подтверждается также появлением на поверхностях трения вырывов материала – следов разрушения мостиков сварки.

Основным недостатком теории является недооценка деформационной составляющей трения, которая в действительности может играть основную роль при трении шероховатых тел, а также тел, разделенных слоем оксидов или смазочного материала. Авторы этой теории все же допускают, что часть работы трения расходуется на упругопластическую деформацию более мягкого материала твердыми неровностями. Они полагают, что "пропахивающая" составляющая силы трения пропорциональна диаметру канавки, образовавшейся после скольжения внедренной неровности, в третьей степени. Однако эта составляющая силы трения, по их мнению, незначительна.

2.1.3 Молекулярно-механическая теория трения

Современные представления о природе трения изложены в молекулярно-механической теории, предложенной И.В. Крагельским и впоследствии развитой в работах его учеников. Согласно этой теории, трение имеет двойственную природу: молекулярную и механическую, т.е. трение обусловлено преодолением сил молекулярного взаимодействия на пятнах фактического контакта и сопротивлением деформируемого материала перемещению внедрившихся в его объем неровностей более жесткого тела. Следовательно, сила трения должна состоять из молекулярной F_a и механической F_d составляющих.

Молекулярная составляющая. Фактическая площадь контакта мала по сравнению с номинальной. Поэтому даже при малых нагрузках на единичных пятнах контакта выступов развиваются давления, достаточные для их сближения, возникновения между ними межмолекулярного взаимодействия и образования фрикционных связей. Для относительного перемещения контактирующих тел необходимо преодоление межмолекулярного взаимодействия и разрыв фрикционных связей. По мере перемещения неровности разрыв одних (старых) связей сопровождается образованием других. Следовательно, трение представляет собой непрерывный процесс разрушения и возобновления молекулярных связей на пятнах контакта. Суммарная сила межмолекулярного взаимодействия между сближенными участками поверхностей трения представляет собой молекулярную составляющую трения. Очевидно, что чем больше число пятен контакта и их размеры, тем выше должно быть усилие,

необходимое для относительного перемещения контактирующих тел. Следовательно, сила трения $F_a \sim A_r$.

В зависимости от величины сил взаимодействия на пятнах контакта разрушение фрикционных связей может происходить по поверхности раздела материалов. В последнем случае имеет место схватывание. Для исключения схватывания прочность соединений на границе раздела выступов должна быть ниже когезионной прочности более мягкого материала пары трения. Следовательно, для реализации нормального внешнего трения должно выполняться правило положительного градиента механических свойств по глубине: $d\tau/dz > 0$. Здесь τ – разрушающее напряжение сдвига; z – координата, перпендикулярная поверхности трения. Это правило в реальных парах трения реализуется благодаря наличию между контактирующими телами пленки, состоящей из оксидов, смазочных материалов, адсорбированных газов и жидкостей, частиц разрушенного деформированного материала тел трения.

Механическая составляющая силы трения обусловлена сопротивлением деформированию материала, прилегающего к внедрившимся выступам движущегося тела. Внедрившийся на глубину h в поверхностный слой одного тела жесткий выступ другого тела при приложении касательной нагрузки деформирует этот слой. Впереди выступа образуется волна (валик) деформируемого материала, а по краям материал оттесняется в стороны. Под выступом образуется канавка, глубина которой составляет доли микрометра. Высота валика тем выше, чем прочнее молекулярная связь, пластичнее деформируемый материал и глубже внедрение h выступа. Валик

зафиксирован в 1961 г. в экспериментах Р. Куртеля и И.В. Крагельского.

Сила сопротивления перемещению контртела, обусловленная деформированием материала поверхностного слоя микронеровностями, представляет собой механическую составляющую силы трения F_d . При упругом контакте составляющая F_d обусловлена в основном несовершенной упругостью деформируемого материала, т.е. гистерезисными потерями. При пластическом контакте (напряжения в отдельных зонах контакта могут превышать предел текучести материала) F_d обусловлена сопротивлением деформируемого материала пластическому оттеснению и образованию дорожки трения. Молекулярная и механическая составляющие оказывают взаимное влияние друг на друга.

Таким образом, общая сила трения складывается из сил, затрачиваемых на разрушение молекулярных связей и на деформирование материала тонких поверхностных слоев: $F = F_a + F_d$. Согласно молекулярно-механической теории коэффициент трения можно рассчитать по формуле:

$$f = \frac{\tau_0}{\sigma} + \beta + k\alpha_g \sqrt{\frac{a}{R}},$$

где τ_0 – сопротивление срезу при отсутствии нормальных напряжений; σ – нормальные напряжения на контакте; β – пьезокоэффициент, характеризующий упрочнение адгезионной связи под действием нормальных напряжений; k – коэффициент, зависящий от шероховатости поверхности, для наиболее типичных видов обработки поверхностей, распространенных в машиностроении, $k = 0,44$; α – коэффициент гистерезисных потерь; a

– сближение поверхностей; R – радиус кривизны внедрившихся выступов контртела.

При пластическом контакте в формуле принимается $\sigma = HB$ а сближение $a = \left(\frac{2N}{A_c b HB} \right)^{1/2}$.

Если материал на пятнах контакта деформируется в основном упруго, значение f зависит от молекулярного взаимодействия. При пластическом контакте существенную роль оказывает деформационная составляющая. Правильность молекулярно-механической и адгезионно-деформационной теорий трения подтверждена многочисленными экспериментами по изучению влияния режимов нагружения на коэффициент трения.

2.1.4 Факторы, влияющие на коэффициент трения скольжения

Коэффициент трения является функцией ряда факторов, определяющих условия работы пары трения: нагрузки, скорости скольжения, микрогеометрии поверхностей сопрягаемых тел, условий теплоотвода и т.п. Рассмотрим наиболее значимые факторы, руководствуясь при объяснении их влияния на трение твердых тел молекулярно-механической теорией. Приведенные ниже зависимости характерны для предельно широкого интервала изменения факторов.

Нормальная нагрузка. Влияние нагрузки N на коэффициент трения зависит от вида контакта – упругого или пластического. В общем случае зависимость $f(N)$ немонотонна (рисунок 2.3). Положение минимума этой кривой зависит от соотношения молекулярной и меха-

нической составляющих. При увеличении отношения f_a/f_d минимум кривой смещается в область меньших значений N . В области малых нагрузок (левая ветвь кривой) реализуется преимущественно упругий контакт и значение f определяется в основном молекулярной составляющей трения. Уменьшение коэффициента трения с ростом N обусловлено, тем, что N растет быстрее, чем вызываемое этим ростом увеличение площади фактического контакта, и как следствие – силы трения. Так, увеличение нагрузки, например в n раз влечет за собой рост числа фрикционных связей и их размеров, а следовательно, и рост суммарного сопротивления сдвигу в меньшее число раз.

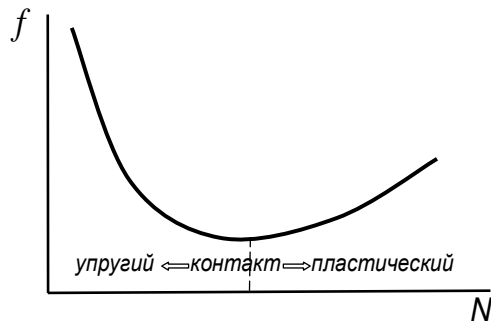


Рисунок 2.3 – Общий вид зависимости коэффициента трения от нагрузки

После достижения минимума f реализуется в основном пластический контакт. При этом давление на пятнах фактического контакта становится равным твердости более мягкого материала и не зависит в дальнейшем от нагрузки. Следовательно, $f_a \approx \text{const}$ и коэффициент трения определяется в основном механической составляющей,

т.е. зависит от глубины относительного внедрения выступов соприкасающихся тел. Зависимость h/R от нагрузки в условиях пластического контакта не существенна: $h/R \sim N^{1/6}$, поэтому наблюдается менее значительное увеличение f с ростом N (правая ветвь кривой на рисунке 2.3). В общем случае описанная зависимость $f(N)$ характерна для трения как металлов, так и полимеров.

Скорость скольжения. Влияние скорости скольжения v на коэффициент трения зависит от ряда факторов, в том числе от нагрузки и механических свойств трущихся тел. В общем случае кривая зависимости $f(v)$ имеет максимум и минимум (рисунок 2.4). Такой вид кривой характерен для несовершенного упругого контакта.

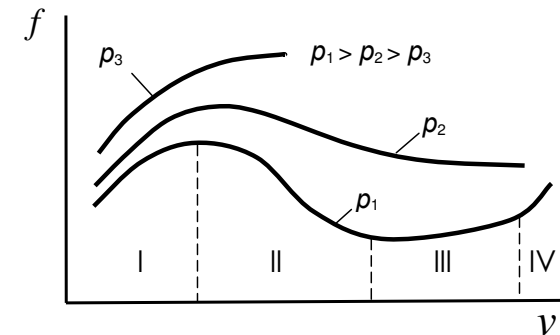


Рисунок 2.4 – Влияние скорости скольжения на коэффициент трения при различном контактном давлении

С ростом v в области малых ее значений (участок I кривой p_1) несколько увеличивается температура на пятнах ФПК, что способствует смятию неровностей, увеличению площади их контакта с контртелом и росту вязко-

го сопротивления деформированию. В зоне контакта не успевает также образоваться оксидная защитная пленка достаточной толщины, и благодаря этому на отдельных участках поверхности трения возможно микрорезание. В итоге коэффициент трения растет. Очевидно, что чем выше давление p на контакте, тем меньшая скорость необходима для достижения максимума f . Если материалы трущихся тел обладают почти совершенными упругими свойствами, а изменение температуры мало и не оказывает влияния на их механические свойства, то коэффициент трения практически не зависит от скорости скольжения.

Падение f при дальнейшем повышении v (участок II) обусловлено снижением как молекулярной, так и механической составляющих. Деформации материала контактирующих выступов при увеличении скорости не успевают распространяться на значительную глубину, упругопластическое тело ведет себя как упругое, уменьшаются глубина внедрения неровностей, размеры и число фрикционных связей. При высоких скоростях скольжения (участок III), наряду с характерными для второго участка явлениями, нагревается поверхностный слой деформируемого материала и реализуется в большей мере пластическая деформация. В итоге возможен рост относительной глубины внедрения неровностей и, как следствие, некоторое увеличение коэффициента трения.

Участок IV кривой $f(v)$ соответствует интенсивному разогреву трущихся тел, размягчению, по крайней мере, одного из них и переходу от внешнего к внутреннему трению, что и отражается катастрофически быстрым ростом f . Наблюдается так называемое пристенное скольжение.

Температура в контакте трущихся тел. Зависимость коэффициента трения от температуры T в зоне контакта трущихся тел немонотонна (рисунок 2.5). Это обусловлено суммарным эффектом изменения молекулярной и механической составляющих коэффициента трения. С ростом T снижается f_a вследствие уменьшения твердости материала и прочности адгезионных соединений на срез. Это вызывает падение коэффициента трения. По мере приближения к T_0 падение f замедляется, поскольку уменьшение твердости материала способствует росту размеров и числа пятен ФПК.

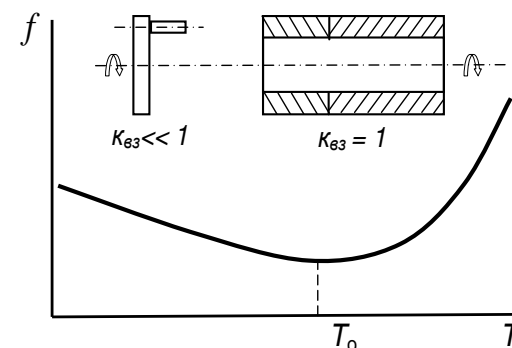


Рисунок 2.5 – Зависимость коэффициента трения от температуры в зоне фрикционного контакта

После достижения некоторого значения T_0 вклад f_a становится более ощутимым и увеличение температуры, обеспечивающее рост h/R , способствует росту коэффициента трения в целом (правая ветвь кривой). Положение минимума кривой $f(T)$ зависит от свойств материалов пары трения, геометрии поверхностей и режимов нагружения. Отметим, что влияние температуры на коэф-

коэффициент трения обусловлено не только приведенными причинами. При повышенных температурах возможны структурные преобразования поверхностных слоев, повышение их химической активности, образование новых соединений на поверхности трения и т.п.

Влияние температуры на f обуславливает зависимость фрикционных характеристик узла трения от его конструкции, в частности от коэффициента взаимного перекрытия, представляющего собой отношение площадей поверхностей трения сопрягаемых тел, а также от теплофизических свойств этих тел, скорости скольжения и нагрузки.

Микрогеометрия поверхностей трения. Влияние микрогеометрии на коэффициент трения зависит от того, какой вид контакта (упругий или пластический) является доминирующим. При упругом контакте зависимость f (R_z) немонотонна (кривая 1 на рисунке 2.6). Увеличение R_z приводит вначале к снижению площади фактического контакта и уменьшению молекулярной составляющей f_a . При дальнейшем увеличении R_z радиусы закругления вершины неровностей уменьшаются. Это способствует более глубокому внедрению их в объем деформируемого материала и увеличению f_d (правая ветвь кривой 1 на рисунке 2.6). При пластическом контакте молекулярная составляющая трения слабо зависит от микрогеометрии контртела, а механическая растет, что и обуславливает монотонный рост коэффициента трения при увеличении R_z (кривая 2 на рисунке 2.6).

Физико-механические свойства контактирующих тел. Влияние свойств контактирующих тел на коэффициент трения связано с числом и прочностью фрикционных связей. Так, при увеличении твердости сопрягаемых тел уменьшаются глубина относительного внедрения и

число контактирующих неровностей. Это приводит к одновременному снижению молекулярной и механической составляющих трения.

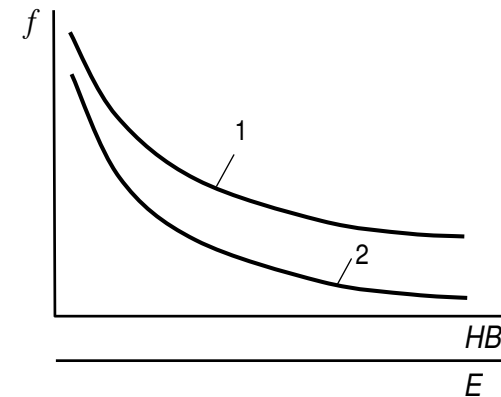


Рисунок 2.7 – Зависимости коэффициента трения от твердости (кривая 1) и модуля упругости (кривая 2)

Однако уменьшение f_a может быть незначительным в связи с ростом сопротивления срезу адгезионной связи при увеличении твердости. В итоге более существенная зависимость $f(HB)$ наблюдается при малых значениях HB и для контакта пластичных материалов (кривая 1 на рисунке 2.7). Наиболее заметно влияние твердости на f при пластическом контакте.

В условиях упругого контакта коэффициент трения зависит от модуля упругости контактирующих тел. С увеличением модуля упругости уменьшается ФПК и глубина относительного внедрения неровностей, что уменьшает соответственно f_a и f_d и приводит к падению коэффициента трения (кривая 2 на рисунке 2.7).

Существенное влияние на коэффициент трения оказывает природа контактирующих тел, определяющая

энергию (тип) связей на пятнах фактического контакта, а также наличие на поверхностях трения оксидных и адсорбционных пленок и их состав.

2.2 Лабораторная работа №3

«Влияние режимов нагружения на трение металлов»

Цель работы: установить влияние режимов нагружения на коэффициент трения скольжения металла по металлу.

Оборудование и материалы: машина трения СМТ-1, ролик из стали диаметром $40 \cdot 10^{-3}$ м и высотой 10 мм, вкладыш из бронзы площадью поверхности трения $A_a = 2 \cdot 10^{-4}$ м², набор грузов, ветошь, растворитель (гексан).

Порядок выполнения работы.

1. Выполнить тарировку системы измерения силы трения машины СМТ-1 (рисунок 2.8). Для этого:

- установить переключатель рода работы 6 в положение «Проверка»

- установить и закрепить ролик 19 на валу машины трения;

- застопорить фиксатором диск 7 датчика момента трения 8, на вал машины установить рычаг, уравновесить его и закрепить гайкой;

- кнопкой 9 установить диапазон измерения момента трения в положение «1». Резисторами, расположенными на панели потенциометра 5, установить положение «нуль».

- установить вкладыш 1 в держатель машины;

- включить блок питания машины трения и потенциометр измерения момента трения;

- на подвес рычага поместить груз массой 5 кг ($M=20$ Н·м) и резистором «Установка предела» довести стрелку

потенциометра до деления «100», снять груз и проконтролировать положение нуля;

- на вал машины установить рычаг, уравновесить его и закрепить гайкой. На подвес рычага положить груз массой $m = 0,5$ кг и записать соответствующее отклонение пера потенциометра l . Последовательно через 0,5 кг увеличивать массу груза до $m = 3,5$ кг и регистрировать l . Аналогично провести тарировку для второго диапазона нагружения;

- снять фиксатор диска 7.

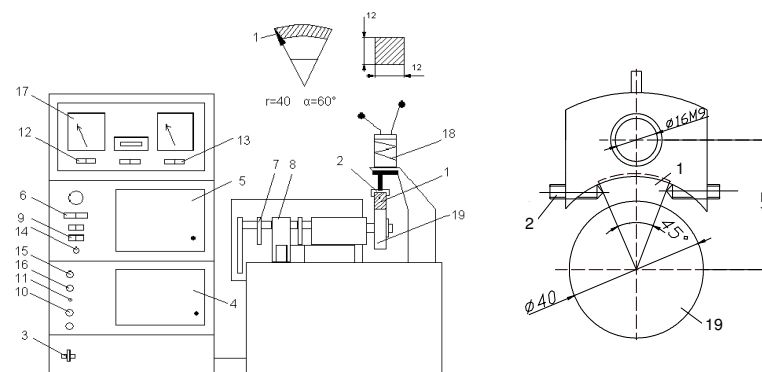


Рисунок 2.8 Схема машины трения СМТ – 1 (а) и контакта пары частичный вкладыш – ролик:

1 – образец; 2 – держатель; 3 – выключатель; 4,5 – потенциометры; 6 – переключатель рода работы; 7 – фиксатор; 8 – датчик момента трения; 9 – переключатель диапазонов измерения момента трения; 10 – выключатель электродвигателя; 11 – сигнальная лампа; 12 – переключатель диапазонов измерения частоты вращения вала; 13 – переключатель диапазонов измерения нагружения; 14 – 16 – резисторы; 17 – тахометр; 18 – пружина; 19 – ролик.

2. Для каждого из грузов рассчитать момент силы M . По полученным данным построить тарировочный график зависимости $M = M(l)$ (рисунок 2.9).

| | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

10. По полученным результатам построить графики зависимости коэффициента трения от скорости в контакте пары трения, и коэффициента трения от давления в паре трения.

9. Сделать выводы о влиянии нормальной нагрузки и скорости скольжения на коэффициент трения бронзы по стали при отсутствии смазочного материала.

Контрольные вопросы

1. Что такое трение? Назовите виды трения.
2. В чем суть геометрической теории трения? Назовите ее недостатки.
3. В чем суть молекулярной теории трения? В каких случаях она применима?
4. В чем отличие адгезионно-деформационной теории от молекулярно-механической?
5. На каких основных положениях базируется адгезионно-деформационная теория трения? Напишите формулу для расчета коэффициента трения.
6. Назовите основные положения молекулярно-механической теории трения.
7. С применением молекулярно-механической теории объясните типичную кривую зависимости коэффициента трения от нагрузки, скорости скольжения и шероховатости поверхности контртела.
8. В каком случае механическая составляющая силы трения будет близка по величине к молекулярной?

9. Напишите и поясните формулу для расчета коэффициента трения, полученную на основе молекулярно-механической теории.

10. Преимущественно какой вид трения реализуется при ходьбе человека?

3 ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ

3.1 Краткие сведения из теории

3.1.1 Основные понятия и определения

Качение – это процесс взаимного перемещения соприкасающихся тел, при повороте одного из которых относительно мгновенной или постоянной оси в контакт вступают новые участки обеих поверхностей трения, а относительная скорость различных точек этого тела определяется их удалением от центра контактной площадки. Из определения следует, что трение качения отличается от других видов трения отсутствием участка поверхности хотя бы одного из сопрягаемых тел, который постоянно находился бы в контакте с поверхностью другого тела. При качении контактная площадка непрерывно перемещается вдоль поверхностей трения обоих тел. Вторым отличительным признаком является то, что направление и абсолютная величина скорости каждой точки поверхности трения катящегося тела относительно поверхности, по которой оно катится, непрерывно изменяются и зависят от расстояния между этой точкой и мгновенной осью вращения.

Различают чистое качение и качение с проскальзыванием. При *чистом качении* линия контакта двух тел должна быть прямой, контакт идеально упругим, а взаимодействующие тела одноименными. При качении цилиндра или шара радиуса R по плоскости качение будет чистым, если при повороте его на некоторый малый угол φ смещение геометрической оси тела качения относительно плоскости будет равно $R\varphi$ (рисунок 3.1). При

чистом качении двух цилиндров их мгновенные оси вращения, проходящие через точку касания O' , должны лежать в одной плоскости, а мгновенные скорости перемещения сопрягаемых поверхностей в рассматриваемой точке должны совпадать по величине и направлению.

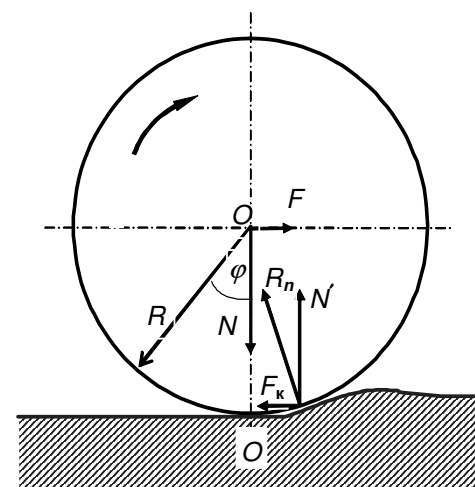


Рисунок 3.1 – Схема качения цилиндра по плоскости

На практике всегда реализуется *качение с проскальзыванием*, поскольку контакт двух реальных тел качения осуществляется не по линии, а по некоторой поверхности, т. к. при нагружении они испытывают упругопластические или вязкоупругие деформации. Мгновенные скорости перемещения тел в точках их контакта чаще всего различаются.

Первое количественное соотношение, описывающее трение при равномерном качении тел, было предложено в 1785 г. Ш. Кулоном на основании результатов опытов по перекачиванию цилиндров из бокаута и вяза по гори-

зонтально расположенным дубовым брусом. Им было установлено, что сопротивление перекачиванию цилиндра растет при увеличении нормальной нагрузки и уменьшении радиуса катящегося тела. На этом основании **коэффициент трения качения** f_k определяют как величину, равную отношению момента силы M сопротивления качению F_k к нормальной силе N , прижимающей сопрягаемые тела друг к другу:

$$f_k = \frac{M}{N} = \frac{F_k R}{N}.$$

Если момент прилагаемой к цилиндру силы F относительно точки O' численно равен моменту силы трения качения F_k , то цилиндр будет равномерно катиться по плоскости. Поскольку контакт тел качения представляет собой площадку конечных размеров, а не точку или линию, то линия действия реакции R плоскости не совпадает с линией действия нормальной силы. Точка ее приложения смещается от центра контактной площадки к ее передней границе. Нормальная составляющая N' реакции плоскости R_n численно равна силе N , а горизонтальная составляющая F_k представляет собой силу трения качения. Коэффициент f_k имеет линейную размерность и характеризует полухорду дуги сжатия, т.е. расстояние, на которое смещена точка реакции опоры относительно O' . Чаще на практике применяется безразмерная величина f_c – **коэффициент сопротивления качению**, численно равная отношению работы A , совершаемой силой F_k на единичном пути ΔL , к нормальной нагрузке:

$$f_c = \frac{A}{N\Delta L} = \frac{M\Delta\varphi}{NR\Delta\varphi} = \frac{f_k R}{N}.$$

В отличие от f_k коэффициент сопротивления качению является безразмерной величиной.

Отличительной особенностью качения является низкое сопротивление относительно перемещению контактирующих тел. Так, сила трения качения на один – два порядка меньше силы трения скольжения.

3.1.2 Природа трения качения

Рассмотрим наиболее распространенные гипотезы о природе сил, оказывающих сопротивление качению. В основу каждой из них положено одно из явлений, протекающих в контакте: молекулярное сцепление, рассеяние энергии, вызванное несовершенной упругостью материалов, проскальзывание поверхностей сопрягаемых тел в пределах контактной площадки.

Адгезионная теория (Г.А. Томлинсон, А.С. Ахматов). Качение рассматривается как процесс непрерывного обновления и разрушения мостиков сварки, время жизни которых даже при средних скоростях составляет порядка 10^{-6} с. При повороте катящегося тела молекулы поверхностей сопрягаемых тел, расположенные впереди контактной площадки, сближаются настолько, что происходит образование адгезионных связей (рисунок 3.2, а). При этом разрушаются адгезионные связи на границе выхода трущихся тел из контакта и подвергаются значительным деформациям контактирующие выступы, которые расположены вблизи этой границы (обозначены штриховыми линиями на рисунке 3.2, а). Адгезионные связи на других участках контакта (в центре контакта и в области, прилегающей к его передней границе) существенного влияния на процесс качения не оказывают. Сле-

довательно, сопротивление качению обусловлено в основном сопротивлением деформированию и разрушению только той части мостиков сварки, которые расположены в зоне выхода трущихся тел из контакта. Такой процесс последовательного разрушения адгезионных связей обуславливает низкое значение силы трения качения.

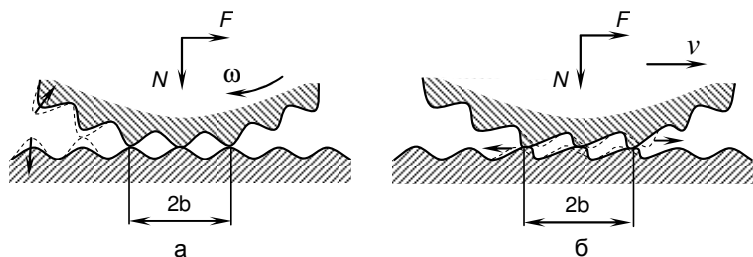


Рисунок 3.2 – Схема разрушения адгезионных связей при качении (а) и скольжении (б) твердых тел

При скольжении тела вращения сила трения значительно выше, чем при качении, поскольку практически все адгезионные связи на контактной площадке оказывают одновременно соизмеримое по величине сопротивление сдвигу (рисунок 3.2, б). На этом рисунке штриховыми линиями показано положение выступов после разрыва связей и их упругого восстановления. Очевидно, что в данном случае число разрушаемых в единицу времени молекулярных связей, а следовательно, и энергия, затрачиваемая на преодоление силы трения значительно выше, чем при качении. Существенным отличием процессов качения и скольжения твердых тел является следующее. При качении образование и разрушение адгезионных связей происходит под действием силы, нормальной к границе раздела неровностей, образующих эту

связь. При скольжении разрушающая сила направлена по касательной к этой границе и должны образовываться более прочные адгезионные связи, поскольку возможен срез оксидных и адсорбционных пленок на вершинах контактирующих неровностей и вступление в контакт ювенильных участков поверхностей.

Подтверждением существования адгезионной составляющей трения качения служат эксперименты по изучению качения шарика из сапфира по медной пластине, в которых установлен перенос меди на поверхность сапфира. Применение смазочного материала (олеиновой кислоты), препятствующего непосредственному контакту неровностей сопрягаемых тел, снижает количество перенесенного металла в 4 раза. Однако при этом коэффициент трения качения изменяется слабо. Следовательно, адгезионная составляющая оказывает влияние на сопротивление качению твердых тел, но ее вклад не является определяющим.

Согласно адгезионной теории, сопротивление качению зависит от адгезионной способности сопрягаемых тел, нагрузки, температуры в зоне контакта и наличия на поверхностях трения адсорбционных и оксидных пленок, определяющих число, размеры и прочность адгезионных связей. Основываясь на адгезионной теории, можно полагать, что чем больше радиус катящегося тела, тем выше f_c , так как растет число молекулярных связей на контакте. Положения этой теории справедливы в большей мере для трения твердых тел в вакууме и инертной среде.

Гистерезисная теория (А.Дюпюи, Д.Тейбор). В основе лежит явление несовершенной упругости материалов тел качения. Согласно этой теории, энергия, затрачиваемая на преодоление сопротивления качению, рас-

ходуется на гистерезисные потери при деформировании сопрягаемых тел. Каждый элемент плоскости, по которой катится цилиндр, испытывает последовательно цикл "нагрузка – разгрузка". Разность между затраченной и возвращенной энергией в этом цикле равна площади петли гистерезиса и может быть выражена в виде $\alpha_g W$, где W – работа по перемещению цилиндра на единицу пути трения. Тогда сила трения качения жесткого цилиндра по упругому основанию описывается формулой

$$F_k = \frac{4\alpha_g}{3\pi} \left(\frac{N}{l}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{R^{\frac{1}{2}}} \left(\frac{1-\mu^2}{\pi E}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{4\alpha_g}{3\pi} \frac{Nb}{lR},$$

где α_g – коэффициент гистерезисных потерь; N – нормальная нагрузка; b – полуширина площадки контакта; l – длина цилиндра; R – радиус цилиндра.

Напряженное состояние материала основания при качении по его поверхности цилиндра существенно отличается от одноосного растяжения. Поэтому α_g , определяемое при одноосном нагружении, должно отличаться от α_g при сложном напряженном состоянии, т. е. при качении. Об этом свидетельствуют опыты Д.А. Гринвунда, выполненные на образцах из резины: при одноосном растяжении тонкостенной резиновой трубки $\alpha_g = 8\%$. При одновременном растяжении и кручении образца (плоское напряженное состояние) гистерезисные потери увеличились в 2 раза. Для сложного напряженного состояния значения α_g могут более чем в 3 раза превышать этот показатель, получаемый при одноосном растяжении. В общем случае гистерезисные потери обусловлены внутренним трением, а также пластическим деформированием микровыступов и пластическим отеснением граничного слоя.

Гистерезисная теория удовлетворительно объясняет причину сопротивления качению жесткого тела по поверхности пластины из эластомера. В значительно меньшей мере она применима для качения металлических тел. Эксперименты по качению друг по другу сферических тел из одноименных металлов показали, что для объяснения их сопротивления качению необходимо принимать явно завышенные значения коэффициента гистерезисных потерь. Так, для меди α_g должно быть равно 0,32, для фосфатистой бронзы – 0,14, для дуралюминия – 0,6, в то время как в действительности для указанных металлов этот показатель находится в пределах 0,02 ÷ 0,04. При малых нагрузках для соответствия расчетных и экспериментальных данных необходимо принимать завышенные значения α_g . Следовательно, гистерезисные потери не являются единственной причиной сопротивления качению твердых тел.

Теория проскальзывания (О. Рейнольдс, А. Пальмгрен, Г. Хизкоут). Согласно этой теории, основной причиной сопротивления качению является проскальзывание в контакте. Проскальзывание может быть обусловлено деформацией контактирующих тел (О. Рейнольдс) либо различием в скоростях различных точек катящегося тела (А. Пальмгрен и Г. Хизкоут).

Проскальзывание по Рейнольдсу наглядно наблюдается при качении жесткого цилиндра по резине. За один оборот цилиндр проходит меньшее расстояние, чем длина его окружности. Это объясняется деформацией контактирующих тел. Так, под действием нормальной нагрузки материал основания деформируется и контакт осуществляется не по линии, а по площадке прямоугольной формы. При этом материал цилиндра в зоне

контакта будет испытывать деформации сжатия, а основания – деформации растяжения. Поэтому при повороте цилиндра освобождающиеся от контакта точки его поверхности будут стремиться удалиться друг от друга, а точки поверхности основания – сблизиться. Это приводит к проскальзыванию микроучастков контактирующих поверхностей одного тела относительно другого.

Существование проскальзывания при качении подтверждено экспериментом (Ф. Боуден), в котором по резиновому основанию перекачивали стальной цилиндр, имеющий диаметрально отверстие с окрашенными краями. Появляющийся на резине отпечаток круглого отверстия имел форму эллипса, ориентированного малой осью в направлении качения. При нагрузке, обеспечивающей внедрение цилиндра в резину на величину, близкую его радиусу, малая ось отпечатка оказалась меньше большой на 10%. Наличие четко обозначенной границы отпечатка свидетельствует о пренебрежимо малом вкладе проскальзывания в сопротивление качению.

Проскальзывание по Пальмгрену – Хизкоуту, или дифференциальное проскальзывание, прослеживается на примере шара, катящегося по прямолинейному желобу (рисунок 3.3, а). За один оборот шара точка *A* должна проходить большее расстояние, чем точка *B*. В то же время путь *L*, пройденный центром шара за один оборот, соответствует какому-то среднему значению, т.е. $2\pi r < L < 2\pi R$. Эта разница вызвана проскальзыванием поверхностей трения сопрягаемых тел.

В центральной части контакта сила проскальзывания F_1 направлена противоположно вектору скорости перемещения центра шара, а на периферийных участках F_2 совпадает с v (рисунок 3.3, б). Чистое качение наблюда-

ется для двух сечений шара, отстоящих на расстоянии $0,17b$ от центра зоны контакта (b – полуширина контактной площадки). На основе анализа момента этих сил относительно точки, в которой проскальзывание отсутствует, Элриджем была получена формула для расчета силы трения, обусловленной проскальзыванием:

$$F_{\text{к}} = \frac{f_{\text{п}} N}{12} \left(\frac{b}{R} \right)^2,$$

где $f_{\text{п}}$ – коэффициент трения, обусловленный проскальзыванием; D – диаметр шара.

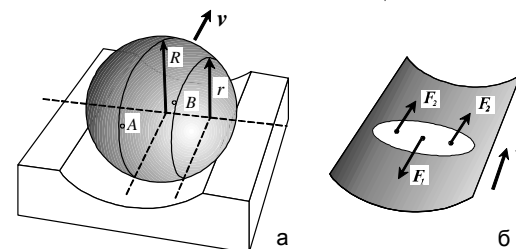


Рисунок 3.3 – Дифференциальное проскальзывание при качении шара по желобу

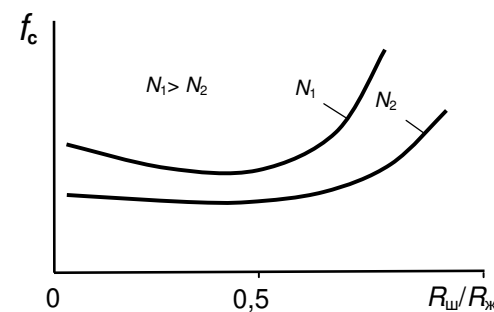


Рисунок 3.4 – Зависимость сопротивления качению шара по желобу от соотношения их размеров

Вклад проскальзывания между поверхностями сопрягаемых тел в сопротивление качению зависит от отношения радиуса шара R к радиусу желоба $R_{\text{ж}}$ (рисунок 3.4). Проскальзывание минимально при $R/R_{\text{ж}} = 0,5 \div 0,6$. Увеличение этого соотношения в области значений $0,6 \div 1,0$ сопровождается ростом площади контакта и проскальзывания и вызывает повышение сопротивления качению. В области значений $R/R_{\text{ж}} < 0,5$ эта зависимость выражена слабее. Здесь снижение f_c связано с уменьшением гистерезисной составляющей.

Влияние дифференциального проскальзывания на сопротивление качению подтверждено в опытах по качению стального шара по желобу, выполненному в плоском образце из резины. Глубина и полуширина желоба были близки к радиусу шара. При этом сила трения качения была достаточно большой, а применение глицерина в качестве смазочного материала снижало сопротивление качению в 3 раза. Следовательно, дифференциальное проскальзывание вносит определяющий вклад в сопротивление качению. По мере срезания поверхностного слоя образца и уменьшения глубины желоба сопротивление качению уменьшалось, что свидетельствовало о существовании в контакте дифференциального проскальзывания. Однако уже при глубине желоба, меньшей 0,2 радиуса шара, уменьшение глубины желоба не приводило к осязатому снижению сопротивления качению. Введение глицерина в зону трения не сопровождалось значительным снижением F_k . Роль проскальзывания становится еще меньше, если оба тела качения выполнены из металла.

3.1.3 Современные представления о природе трения качения

Теория проскальзывания дает заниженные по сравнению с экспериментом величины сопротивления качению. Кроме того, согласно этой теории, два цилиндра одинаковых размеров, выполненные из одного материала, при качении друг по другу не должны испытывать сопротивления качению, что не соответствует действительности. Гистерезисная теория приводит к выводу, что уменьшение радиуса катящегося тела должно сопровождаться ростом сопротивления качению, так как увеличиваются контактное давление и гистерезисные потери. Согласно молекулярной (адгезионной) теории наоборот – f_c должен увеличиваться с ростом R , так как растет фактическая площадь контакта. Согласно экспериментальным данным зависимость $F_k(R)$ имеет минимум. Следовательно, каждая из названных теорий описывает частный случай довольно сложного процесса, протекающего в зоне контакта тел качения.

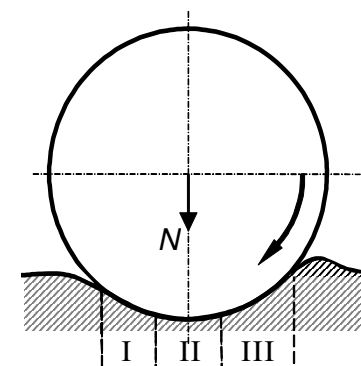


Рисунок 3.5 – Зоны локализации адгезионного взаимодействия, гистерезисных потерь и проскальзывания при качении цилиндра

Согласно современным представлениям сопротивление качению твердого тела по упругому основанию обусловлено тремя одновременно протекающими в зоне контакта явлениями: адгезией, гистерезисными потерями и проскальзыванием. Сопротивление, обусловленное адгезионным взаимодействием, локализуется преимущественно на первом участке зоны контакта (рисунок 3.5). На этом участке поверхности трения тел качения будут разделяться с разрывом адгезионных связей. Гистерезисные потери наблюдаются в основном на первом и третьем участках, т.е. в областях максимальных деформаций сдвига материалов контактирующих тел в направлении вектора скорости. Проскальзывание имеет место по всей контактной площадке.

В реальных узлах трения качение реализуется, как правило, в присутствии смазочного материала, поэтому четвертой составляющей F_k являются механические потери в смазочном материале. Эти потери складываются из усилий, затрачиваемых на перемешивание смазочного материала и образование гидродинамического масляного клина.

3.1.4 Факторы, влияющие на сопротивление качению

Сопротивление качению зависит от условий нагружения, механических свойств сопрягаемых тел, геометрических характеристик и параметров шероховатости поверхностей трения. Ниже представлены типичные кривые зависимостей коэффициента трения от различных факторов в широком диапазоне их изменения.

Размеры тела качения. Зависимость коэффициента сопротивления качению от радиуса R катящегося тела

графически изображается кривой с минимумом (рисунок 3.6). С увеличением R в области малых его значений сопротивление качению становится ниже. Это объясняется интенсивным снижением гистерезисных потерь, которые играют определяющую роль при малых размерах тела качения, когда достигаются большие контактные давления и повышается вклад пластического оттеснения в контактные деформации. С увеличением радиуса тела качения в области больших значений R несовершенство упругих свойств материалов трущихся тел менее ощутимо. Преобладающим становится влияние адгезионной составляющей, которая растет с увеличением радиуса, так как увеличивается площадь контакта и число адгезионных связей.

Нормальная нагрузка. При качении шара или цилиндра по плоскости увеличение нормальной нагрузки вызывает монотонное повышение коэффициента сопротивления качению, причем зависимость $f_c(N)$ близка к линейной. Это обусловлено одновременным ростом всех составляющих сопротивления качению:

- адгезионной, так как увеличивается площадь фактического контакта и число адгезионных связей;
- проскальзывания – вследствие роста деформаций поверхностных слоев сопрягаемых тел и размеров контактной площадки;
- гистерезисных потерь, что связано с повышением доли пластической деформации материалов трущихся тел.

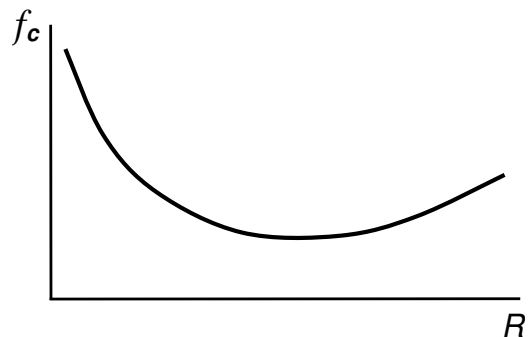


Рисунок 3.6 – Зависимость коэффициента сопротивления качению от радиуса катящегося тела

Описанный вид зависимости $f_c(N)$ подтвержден экспериментами по качению металла по металлу и резине. Установлено, что вид зависимости $f_c(N)$ изменяется при переходе от качения шара (диаметр 203 мм) по плоскости (кривая 1 на рисунке 3.7) к качению по желобу (кривые 2 ÷ 4) диаметром 209,3 мм. Изменение нагрузки в области ее больших значений в меньшей степени сказывается на адгезионной составляющей f_k и проскальзывании.

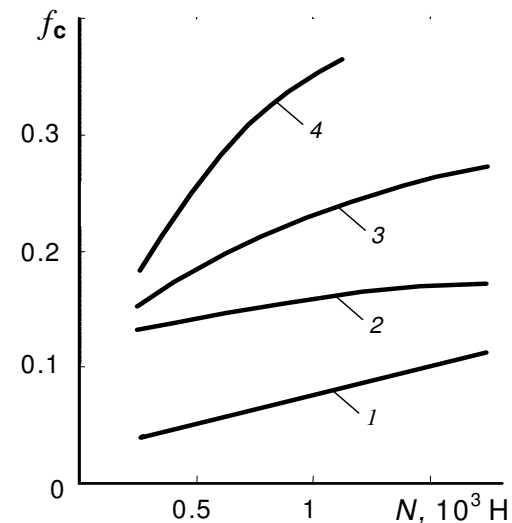


Рисунок 3.7 – Влияние нормальной нагрузки на коэффициент сопротивления качению шара по плоскости (кривая 1) и желобу (кривые 2,3,4)

Смазка. Численное значение коэффициента сопротивления качению в значительной мере определяется наличием в зоне контакта оксидных или смазочных пленок, разделяющих сопрягаемые поверхности. При обильной смазке (кривая 2 на рисунке 3.7) f_c принимает при прочих равных условиях меньшие значения, чем при обедненной подаче смазочных веществ в зону трения (кривая 3). Химическая очистка поверхности (кривая 4) способствует повышению адгезионной составляющей и проскальзывания, что является причиной более высокого сопротивления качению. Сказанное справедливо для высоких нормальных нагрузок. При малых значениях N применение смазочного материала вызывает снижение сопротивления качению ориентировочно на 10%. Такое едва заметное влияние смазочных веществ обусловлено

тем, что снижение затрат на проскальзывание и адгезию на контакте компенсируется затратами на преодоление внутреннего трения в слое смазочного материала.

Температура. Существенное влияние на f_c оказывает температура на локальных участках контакта и температура поверхностных слоев трущихся тел. Вспышки температуры на пятнах контакта и разрыв мостиков сварки приводят к локальному окислению металлов. Твердые продукты окисления способствуют росту сопротивления проскальзыванию. Большие усилия затрачиваются на раздавливание частиц оксидов и подъем тела качения при накатывании его на эти частицы, находящиеся перед контактной площадкой. Повышение средней поверхностной температуры является причиной снижения механических свойств поверхностного слоя. Это, в свою очередь, приводит к увеличению гистерезисных потерь и адгезионной составляющей трения качения. В итоге наблюдается рост коэффициента сопротивления качению.

Скорость перемещения трущихся тел. Увеличение скорости ведет к монотонному росту коэффициента сопротивления качению. Причем эта зависимость менее существенна для качения цилиндра по цилиндру, чем шара по шару. Влияние скорости на f_c осуществляется в основном через посредство гистерезисных потерь, обусловленных ростом температуры на пятнах контакта и образованием оксидных частиц. Проскальзывание и адгезионные явления в данном случае оказывают значительно меньшее влияние на изменение сопротивления качению.

Микротвердость. С ростом микротвердости тел качения уменьшаются потери на проскальзывание и их деформацию, снижается доля пластической деформации. Уменьшается также площадь фактического контакта и

адгезионное взаимодействие контактирующих тел. В итоге повышение микротвердости вызывает падение сопротивления качению.

К важным факторам, определяющим сопротивление тел качению, также относятся: отклонение их от правильной геометрической формы, шероховатость поверхностей, структура материалов тел качения. *Макрогеометрические отклонения* поверхностей тел качения от идеальной формы тел вращения вызывают не только рост f_c , но и снижают его стабильность. Влияние *микрогеометрических отклонений* на трение качения можно оценить на основании экспериментов Д. Биккермана, которые выполнены на паре трения шар – плоскость в широком интервале варьирования нагрузок и радиуса катящегося тела. Показано, что при переходе от шероховатой ($R_a = 3,1$ мкм) поверхности плоского тела к гладкой ($R_a = 0,025$ мкм) сопротивление качению уменьшается в $2 \div 3$ раза.

3.2 Лабораторная работа №4

«Влияние режимов нагружения на трение качения»

Цель работы: выявить закономерности влияния режимов нагружения и механических свойств трущихся тел на коэффициент сопротивления качению.

Оборудование и материалы: машина трения СМТ-1, ролики диаметром $40 \cdot 10^{-3}$ м и высотой 10 мм из стали, бронзы или алюминия, набор грузов, ветошь, растворитель (гексан).

Порядок выполнения работы.

1. Аналогично лабораторной работе «Влияние режимов нагружения на трение металлов» выполнить тарировку системы измерения силы трения машины СМТ-1 и построить тарировочный график.

2. Установить и закрепить ролики из стали на валу машины трения и валу каретки. Проверить биение роликов индикатором. Наименьшее биение достигается проворачиванием образцов относительно вала. Операцию по установке коэффициента проскальзывания K_n не выполнять – во всех экспериментах $K_n = 0$.

3. Протереть поверхности трения образцов тампоном, смоченным в гексане или другом растворителе.

4. Сдвинуть каретку в левое положение и надеть петлю троса уравнивания на винт каретки, плавно опустить каретку до соприкосновения образцов и зафиксировать ее от осевого перемещения.

5. Включить привод машины трения и задать частоту вращения нижнего ролика 120 об/мин.

6. Пружиной или навесными грузами задать нагрузку 100 Н, скорректировать частоту вращения вала и осуществить приработку поверхностей в течение 15 мин.

7. Устанавливая частоту вращения нижнего ролика из ряда: 120, 240 об/мин и нормальную нагрузку из ряда: 50, 100, 150, 200 Н. Продолжительность испытаний и запись момента трения для каждого $N \cdot v$ должна быть не менее 15 мин (до достижения установившегося значения коэффициента трения). Для каждого режима нагружения N и v определить конечное отклонение стрелки потенциометра от нулевой линии, l мм.

8. Заменить пару трения: установить ролики из алюминия или бронзы и повторить эксперимент по п. 2 – 7.

9. Рассчитать коэффициент трения качения и коэффициент сопротивления качению для каждого режима нагружения по формулам:

$$f_k = \frac{M_k}{N} \quad \text{и} \quad f_c = \frac{f_k}{R}$$

где M_k – момент силы трения качения, Н·м

R – радиус ролика, м;

N – нагрузка на узел трения, Н

10. Полученные результаты представить в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Влияние режимов нагружения на трение качения

| № п/п | Нагрузка, N, Н | Отклонение стрелки потенциометра l , мм | Момент трения, $M_{тр}$, Н·м | Коэффициент сопротивления качению f_c |
|--|----------------|---|-------------------------------|---|
| Пара трения сталь – сталь. Скорость $v = \dots$ м/с. | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| Пара трения алюминий – алюминий. Скорость $v = \dots$ м/с. | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| Пара трения бронза – бронза. Скорость $v = \dots$ м/с. | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

10. По полученным результатам построить график зависимости коэффициента сопротивления качению от нагрузки при двух скоростях для каждой из исследованных пар трения.

11. Сделать выводы по полученным графикам зависимостей $f_c(N)$ для различных пар трения.

Контрольные вопросы

1. Что такое трение качения? Назовите отличительные признаки.

2. Почему цилиндр катится по плоскости, а не скользит?

3. Как влияет изменение модуля упругости соприкасаемых тел на сопротивление качению? Какими причинами обусловлено это влияние?

4. После многократного качения шара по одной и той же дорожке трения коэффициент сопротивления качению уменьшается. Почему?

5. В чем суть адгезионной теории трения качения?

6. Для сопряжений из каких материалов гистерезисная составляющая вносит наибольший вклад в трение качения?

7. При каких условиях адгезионная составляющая трения качения становится доминирующей?

8. Почему каждая из теорий в отдельности не может объяснить закономерности влияния режимов нагружения на трение качения?

9. Почему с увеличением нагрузки повышается коэффициент сопротивления качению?

3.2 Лабораторная работа №5

«Влияние смазки на трение качения»

Цель работы: выявить закономерности влияния смазки трущихся тел на коэффициент сопротивления качению.

Оборудование и материалы: машина трения СМТ-1, набор грузов, ролики из стали диаметром $40 \cdot 10^{-3}$ м и высотой 10 мм, жидкий смазочный материал, ветошь, растворитель (гексан).

Порядок выполнения работы.

1. Установить и закрепить ролики из стали на валу машины трения и валу каретки. Проверить биение роликов индикатором. Операцию по установке коэффициента проскальзывания K_n не выполнять.

2. Протереть поверхности трения образцов тампоном, смоченным в гексане или другом растворителе.

3. Сдвинуть каретку в левое положение и надеть петлю троса уравнивания на винт каретки, плавно опустить каретку до соприкосновения образцов и зафиксировать ее от осевого перемещения.

4. Включить привод машины трения и задать частоту вращения нижнего ролика 120 об/мин.

5. Пружиной или навесными грузами задать нагрузку 100 Н, скорректировать частоту вращения вала и осуществить приработку поверхностей в течение 15 мин.

6. Устанавливая частоту вращения нижнего ролика из ряда: 120 об/мин и нормальную нагрузку из ряда: 50, 100, 150, 200 Н. Продолжительность испытаний и записи момента трения для каждого $N \cdot v$ должна быть не менее 15 мин (до достижения установившегося значения коэффициента трения). Для каждого режима нагружения N

и v определить конечное отклонение стрелки потенциометра от нулевой линии, l мм.

7. По наложенной выше методике (п. 2 – 6) провести испытания при обедненной смазке сопряжения. Для этого: остановить машину, протереть тампоном поверхности стальных роликов и повторить испытания при подаче смазочного материала в зону трения капельным способом в зону трения - одна капля смазки на одно испытание.

8. Повторить испытания по п. 2 – 6 при обильной смазке сопряжения. Для этого нижний под ролик поместить кювету с жидким смазочным материалом так, чтобы одна треть его радиуса была погружена в жидкость.

9. Рассчитать коэффициент трения качения и коэффициент сопротивления качению для каждого режима нагружения по формулам п. 9 лабораторной работы №1:

10. Полученные результаты представить в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Влияние режимов нагружения на трение качения при различных видах смазки

| № п/п | Нагрузка, N, Н | Отклонение стрелки потенциометра l , мм | Момент трения, $M_{тр}$, Н·м | Коэффициент сопротивления качению f_c |
|--|----------------|---|-------------------------------|---|
| Трение без смазки. Скорость $v = 0,25$ м/с. | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| Трение при обедненной смазке. Скорость $v = 0,25$ м/с. | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| Трение при обильной смазке. Скорость $v = 0,25$ м/с. | | | | |
| | | | | |

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

11. По полученным данным построить графики зависимости коэффициента сопротивления качению от нагрузки при двух скоростях для каждой из исследованных пар трения.

12. Сделать выводы по полученным графикам зависимостей $f_c(N)$ для различных видов смазки сопряжения.

Контрольные вопросы.

1. В чем различие коэффициента трения качения и коэффициента сопротивления качению? Поясните физический смысл коэффициента трения качения.

2. Как изменится коэффициент сопротивления качению при увеличении температуры сопрягаемых деталей?

3. Почему при трении качения роль смазочного материала менее заметна, чем при трении скольжения?

4. Почему с увеличением шероховатости катящегося поверхности тела коэффициент сопротивления качению возрастает?

5. Как изменится коэффициент сопротивления качению при увеличении радиуса катящегося тела? Почему?

6. Назовите причины снижения трения качения при введении смазочного материала между трущимися телами.

7. Как изменится роль смазочного материала в трении качения при увеличении нормальной нагрузки? Почему?

8. Назовите узлы машин и оборудования, в которых реализуется трение качения

4 ИЗНАШИВАНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

4.1 Краткие сведения из теории

4.1.1 Основные понятия и определения

Изнашивание – это процесс отделения материала с поверхности твердого тела при трении и (или) увеличения остаточной деформации, сопровождающийся постепенным изменением размеров этого тела. Результатом изнашивания является износ трущихся тел. **Износ** – это изменение размеров и формы твердого тела в результате изнашивания.

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

Скорость изнашивания представляет собой износ трущегося тела в единицу времени. О величине износа можно судить по потере массы либо по уменьшению размеров тела в направлении, перпендикулярном к его поверхности трения. 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:

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

Интенсивность изнашивания является более распространенной характеристикой процесса изнашивания. Она представляет собой износ трущегося тела, происходящий на единицу пути трения L . Различают линей-

ную I_h , массовую I_m , объемную I_v и энергетическую I_w интенсивности изнашивания.

Линейная интенсивность изнашивания численно равна толщине изношенного слоя Δh , приходящейся на единицу пути трения:

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

Эта величина может быть определена по изменению объема ΔV или массы Δm исследуемого элемента пары трения:

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

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 деталей машин $I_h = 10^{-3} \div 10^{-13}$.

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

$$I_m = \Delta m/L.$$

Измеряется I_m в кг/м.

Объемная интенсивность изнашивания $I_v, \text{ м}^2$, – это объем материала, изношенного за единицу пути трения:

$$I_v = \Delta V/L.$$

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

$$I_w = \Delta V/(FL).$$

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

Износостойкость материалов трущихся тел – это величина, обратная линейной интенсивности изнашивания. Она характеризует сопротивление материала изнашиванию при заданных режимах трения. Износостойкость $\epsilon_{и}$ материалов деталей 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 $\epsilon_{и}$ от следующего за ним в 10 раз. Номер класса соответствует минимальному показателю степени при $\epsilon_{и}$. Так, если износостойкость соответствует шестому классу, это означает, что $\epsilon_{и} = 10^6 \div 10^7$, если седьмому классу, то $\epsilon_{и} = 10^7 \div 10^8$.

4.1.2 Классификация видов изнашивания

Для каждого узла трения и выбранных режимов нагружения характерен ведущий (доминирующий) вид изнашивания, определяющий интенсивность изнашивания трущихся тел. Наряду с ведущим этот узел подвергается сопутствующим видам изнашивания.

В основу первой классификации, предложенной Бриеллем 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.

Согласно ГОСТ 16429-70 все виды изнашивания можно разделить на три группы: механическое, молекулярно-механическое и коррозионно-механическое. Первая группа объединяет те виды изнашивания, которые являются результатом разрушения поверхностного слоя твердого тела, вызванного его многократными деформациями. Это абразивное, гидроабразивное, газоабразивное, кавитационное, эрозионное и усталостное изнашивание. Абразивное изнашивание, в свою очередь, разделяется на три вида: закрепленными частицами, свободными абразивными частицами и деформируемой массой, содержащей абразивные частицы. Вторая группа представлена адгезионным изнашиванием, обусловленным образованием и разрушением мостиков сварки между контактирующими выступами поверхностей трущихся тел. Третья группа включает окислительное изнашивание и фреттинг-коррозию, основной причиной которых являются химические процессы.

4.1.3 Абразивное изнашивание

Абразивное изнашивание – это отделение с поверхности трения материала и (или) его пластическое деформирование под воздействием твердых частиц, сопровождающееся изменением линейных размеров изнашиваемого тела. В зависимости от того, как связаны абразивные частицы с сопрягаемыми телами, различают три вида абразивного изнашивания.

1. Изнашивание твердыми частицами, неподвижно закрепленными на поверхности трения одного из сопря-

гаемых тел. Это твердые структурные составляющие материала одного из элементов пары трения, частицы абразивной шкурки, брусков и другого инструмента, частицы нагара на стенках цилиндра двигателя внутреннего сгорания;

2. Изнашивание свободными частицами, попадающими в зону контакта трущихся тел (оксиды металлов, наклепанные частицы износа, фрагменты стружки, твердые частицы в смазочном материале и окружающей среде);

3. Изнашивание незакрепленными частицами, передающими давление деформируемой массы (абразивные частицы в почве, горных породах, насыпных грузах при их транспортировании).

Абразивное изнашивание закрепленными частицами.

Этот вид изнашивания является доминирующим в двигателях внутреннего сгорания (пара трения цилиндр – поршневое кольцо), при обработке материалов абразивным инструментом (огранка камней, изготовление линз и изделий из древесины, обработка металлов), сопряжениях металл – керамика, металл – покрытие из высокотвердых материалов и т. д.

Механизмы изнашивания. При абразивном изнашивании металлов твердыми закрепленными частицами возможна одновременная реализация двух механизмов изнашивания. Первый из них – микрорезание наблюдается в том случае, если напряжения на контакте достигают предела прочности изнашиваемого материала. При однократном нагружении перед режущей гранью частицы образуется стружка (рисунок 4.1,а). На поверхности трения возникают канавки, ориентированные вдоль вектора скорости скольжения. Край и дно

канавки содержат микротрещины. При последующих проходах абразивных частиц происходит хрупкое скалывание материала по краям канавок. В большей мере этот механизм проявляется при изнашивании хрупких материалов и характеризуется высокой интенсивностью изнашивания.

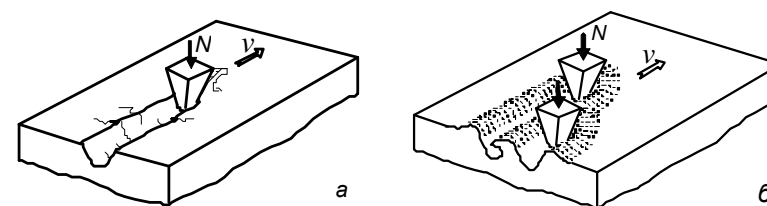


Рисунок 4.1 – Абразивное изнашивание твердого тела в результате: а – микрорезания, б – малоциклового усталости

При реализации второго механизма частицы износа образуются в результате многократного пластического деформирования изнашиваемого материала, приводящего к малоциклового усталости. При первом проходе внедрившейся частицы материал выдавливается из зоны контакта и образует у ее передней грани валик, обтекающий ее, и гребни на краях возникающей канавки (рисунок 4.2,б). Абразивная частица, следующая за ней по близлежащей траектории, отесняет пластически деформированный материал гребней с краев обратно на дно канавки. При последующих проходах частиц описанный цикл деформирования повторяется. Это приводит к появлению микротрещин в деформируемом материале и последующему отделению его от основы и удалению с поверхности трения, т.е. реализуется мало-

цикловая усталость. Микрорезание вносит незначительный (менее 20 %) вклад в изнашивание металлов по сравнению с малоцикловой усталостью. Поверхность металлов, подвергаемых абразивному изнашиванию, покрывается множеством канавок, ориентированных в направлении относительного перемещения сопрягаемых тел

Интенсивность абразивного изнашивания зависит от *номинального давления* p_a на контакте и *твердости изнашиваемого материала* H :

$$I_h \cong k \frac{p_a}{H},$$

где k – коэффициент пропорциональности.

С увеличением нагрузки на абразивные частицы (давления в зоне контакта) глубина их внедрения в изнашиваемый материал возрастает, более толстый слой подвергается деформированию и разрушению. В итоге I_h увеличивается. При изнашивании по закрепленному абразиву относительная износостойкость ϵ_0 технически чистых металлов и отожженной стали прямо пропорциональна их твердости. Это обусловлено уменьшением глубины внедрения абразивных частиц в объем изнашиваемого тела. С увеличением твердости сталей путем термообработки их относительная износостойкость также линейно возрастает, но эта зависимость менее существенна.

Интенсивность изнашивания металлов зависит также от *твердости частиц абразива* H_a . С повышением H_a глубина внедрения абразивных частиц увеличивается, растет глубина бороздок и толщина деформируемого слоя и, как следствие, интенсивность изнашивания материала. Существенную роль в процессе изнашивания ме-

таллов играет *размер частиц абразива* d_a . Зависимость $I_h(d_a)$ графически изображается выпуклыми кверху кривыми. Так, увеличение d_a от 25 до 100 мкм вызывает повышение I_h стали в 3 – 4 раза. Причина в том, что с увеличением d_a число частиц, вступающих в контакт с металлом, уменьшается, растет давление на пятна фактического контакта, а также глубина внедрения частиц и объем бороздок, оставляемых после прохождения каждой частицы. При $d_a > 100$ мкм эта зависимость становится менее ощутимой, что связано с уменьшением числа контактирующих с металлом частиц и, как следствие, числа повреждений.

Контактно-абразивное изнашивание свободными частицами

Контактно-абразивное изнашивание наблюдается в узлах трения двигателей внутреннего сгорания (цилиндр – поршневое кольцо), транспорта (палец – проушина гусеницы трактора, колесо – рельс, пята – подпятник вагонов, сопряжения рычажной тормозной системы тепловозов), горнодобывающего оборудования (сопряжения конвейеров, комбайнов), и других устройствах.

Механизм изнашивания деталей, в контакте которых находится свободный абразив (частицы износа, оксидов, нагара, пыли), зависит от соотношения твердости поверхностей этих тел и твердости абразива, а также от нагрузки. В этом случае можно выделить три вида разрушения поверхностей сопрягаемых деталей.

Попадающие в зону контакта тяжело нагруженных узлов трения (колесо–рельс, зубчатые передачи, подшипники качения) частицы абразива не успевают внедриться в объем одного из трущихся тел на требуемую для микрорезания глубину и разрушаются подобно микровзрыву (рисунок 4.2,а). Образующиеся при этом ос-

колки частиц, обладая высокой скоростью, пластически деформируют поверхностный слой детали либо хрупко разрушают его.

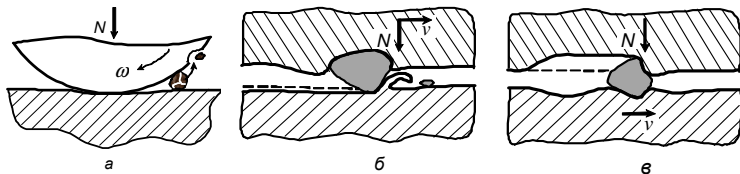


Рисунок 4.2 – Механизмы изнашивания деталей свободными абразивными частицами

При нагрузках, меньших усилия разрушения частиц, происходит их внедрение (шаржирование) в менее твердый материал (верхнее тело на рисунке 4.2,б), и процесс изнашивания определяется условиями шаржирования и свойствами того тела, твердость которого выше. При этом возможны два типа разрушения поверхностей деталей. Если усилие, сдвигающее внедрившуюся частицу, меньше критического, при котором было бы возможно ее перемещение, то реализуется трение закрепленного абразива по более твердому материалу и абразивное изнашивание последнего (рисунок 4.2,б). Так изнашиваются шейки закаленных коленчатых валов автомобилей, сопрягаемые с вкладышами из мягкого металла. Поверхность трения более твердой детали покрывается продольными канавками очень малой глубины.

Если усилие, сдвигающее частицу абразива, больше критического, то происходит ее перемещение в более мягком материале, и он подвергается интенсивному пластическому отеснению (рисунок 4.2,в). Изношенная по-

верхность содержит глубокие канавки, вытянутые вдоль направления скольжения.

Интенсивность изнашивания металлов зависит в основном от твердости сопрягаемых тел H и абразива HV_a . С повышением *твердости абразивных частиц* увеличивается глубина их внедрения в изнашиваемый материал и интенсивность изнашивания деталей возрастает. В значительной степени I_h определяется прочностными свойствами и структурой изнашиваемого металла. С увеличением *прочности, твердости и содержания углерода* в стали ее сопротивление абразивному изнашиванию растет. Интенсивность изнашивания зависит также от концентрации и размеров частиц, попадающих в зазор трущихся тел.

В общем случае зависимость I_h от *размера* абразивных частиц d_a графически изображается кривой с максимумом. В области малых размеров I_h возрастает с повышением d_a вследствие увеличения глубины внедрения частиц в изнашиваемый материал. После достижения максимума возможны стабилизация либо снижение I_h , связанные с уменьшением числа внедряющихся частиц на единицу поверхности изнашиваемой детали и уменьшением вероятности попадания их в зазор трибосопряжения. Увеличение *концентрации* абразива в зоне трения сопровождается монотонным ростом интенсивности изнашивания трущихся тел. Эта зависимость сохраняется и для тел, разделенных слоем смазочного материала.

Изнашивание металлов в массе абразивных частиц

Изнашиванию в массе абразивных частиц подвергаются узлы трения сельскохозяйственной техники (диски, ножи и лемеха почвообрабатывающих машин, ножи и шнеки уборочных комбайнов), горнодобывающего обо-

рудования (долота бурильных установок, ковши экскаваторов, детали подъемных устройств, режущие элементы проходческих комбайнов), транспорта (платформы для насыпных грузов, ленты конвейеров), строительных машин (лопатки и бункеры бетономешалок и асфальтосмесителей) и т.д.

Механизм изнашивания материалов в массе абразивных частиц изменяется в зависимости от соотношения твердости частиц и изнашиваемого материала. Если $H_a > H$, то разрушение поверхности трения детали происходит вследствие микрорезания (отделения стружки) либо в результате малоциклового усталости. Если $H_a < H$ (трение каменного угля по твердосплавным режущим элементам врубовых машин), то изнашиванию предшествует фрикционный разогрев металла на пятнах контакта. В результате твердость отдельных участков поверхности металла уменьшается и реализуется малоцикловая усталость, и (или) повышается интенсивность окисления металла с образованием хрупких оксидных пленок, которые легко разрушаются. Изношенная поверхность детали при трении в абразивсодержащей среде становится гладкой и содержит множество канавок малой глубины.

Интенсивность изнашивания металлов зависит от их твердости и твердости абразивных частиц, формы, размеров и концентрации абразивных частиц в деформируемой массе, температуры, давления на пятнах контакта и скорости перемещения детали в деформируемой массе. Интенсивность протекания данного вида изнашивания зависит от *твердости металла* H . Для чистых металлов характерно увеличение износостойкости при повышении их твердости, что связано с уменьшением глубины внедрения частиц в объем изнашиваемого металла.

Существенное влияние на сопротивление металлов изнашиванию оказывает и *твердость абразива* H_a . Так, при изнашивании корундовым песком износостойкость металлов повышается с ростом их твердости, а зависимость $\epsilon_m(H)$ является линейной. Эта зависимость соответствует смешанному механизму изнашивания, при котором заметный вклад вносит микрорезание, так как твердость корунда значительно превышает твердость металла. При трении по кварцу, твердость которого ниже, чем корунда, образование частиц износа происходит в результате многократного пластического деформирования и, в значительно меньшей степени, – микрорезания. По мере приближения твердости металла к твердости абразива частицы сами деформируются, уменьшаются глубина их внедрения в металл и микрорезание сводится к нулю. При этом сопротивление металла изнашиванию возрастает тем быстрее, чем меньше разница между H_a и H . В итоге наблюдается нелинейная зависимость $\epsilon_m(H)$.

4.1.4 Гидроабразивное изнашивание

Гидроабразивное изнашивание – это отделение с поверхности трения материала либо его пластическое деформирование под воздействием твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости, сопровождающееся изменением размеров изнашиваемого тела.

Этому виду изнашивания подвергаются трубопроводы, детали буровых установок, земснарядов, полевых машин, водного транспорта, турбин, насосов, сопла и дефлекторы дождевальных установок.

Механизм изнашивания. Механизм и интенсивность изнашивания материалов зависят от угла атаки α частиц (угол между вектором скорости движения частиц и изнашиваемой поверхностью). При больших углах атаки ($\alpha \rightarrow 90^\circ$, т.е. частицы падают перпендикулярно к изнашиваемой поверхности), возможны следующие виды изнашивания: *хрупкое разрушение, износ вследствие пластического деформирования, наклеп металла с последующим отделением материала в виде чешуек*. При больших α наиболее высокой износостойкостью обладают материалы, способные выдерживать без разрушения многократные деформации (резина, полимеркерамика, полимеры), способные деконцентрировать напряжения, возникающие в изнашиваемой детали в момент удара частицы. Наименьшее сопротивление изнашиванию оказывают хрупкие материалы (стекло, базальт, керамика). При ударе частицы в поверхностном слое появляются микротрещины, плотность которых при последующих ударах возрастает и в дальнейшем происходит выкрошивание материала между микротрещинами с последующим их измельчением и удалением с поверхности детали (рисунок 4.3,а).

В меньшей степени, чем хрупкие материалы, изнашиваются металлы. При высокой энергии падающих частиц изнашивание является результатом пластического деформирования – оттеснения материала детали (рисунок 4.3,б). Чаще реализуется усталостное разрушение поверхностного слоя металла. При многократном пластическом деформировании поверхностный слой металла наклепывается, становится хрупким и отделяется в виде тонких пластинок (рисунок 4.3,в).

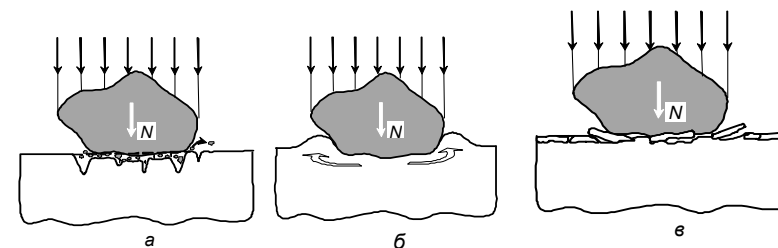


Рисунок 4.3– Механизмы гидроабразивного изнашивания деталей

При малых углах атаки доминирующим механизмом изнашивания является *малоцикловая усталость*, а при $\alpha \rightarrow 0^\circ$ возможно проявление микрорезания. Поверхность детали покрывается вытянутыми в направлении потока жидкости канавками, длина которых растет, а глубина уменьшается с уменьшением угла атаки.

Факторы, влияющие на изнашивание. Стойкость материалов к гидроабразивному изнашиванию зависит от *скорости* v частиц абразива в момент удара по изнашиваемой поверхности. Влияние скорости частиц на износ (потерю массы) материалов описывается степенным уравнением $\Delta m = kv^x$, в котором показатель степени изменяется в интервале 1,5 – 4,0 в зависимости от угла атаки и природы изнашиваемого материала. Наиболее высокие значения показателя степени x характерны для эластичных и хрупких материалов. При низких скоростях значительная часть энергии падающей частицы расходуется на упругое деформирование изнашиваемого тела и возвращается ей после удара. При повышении v рассеяние энергии уменьшается и сводится к нулю, если v достигает скорости распространения звуковой волны в изнашиваемом теле. В последнем случае даже резина

ведет себя подобно хрупкому материалу и подвергается интенсивному изнашиванию.

Энергия удара частицы по изнашиваемому материалу определяется ее *массой* m . Поэтому с увеличением m процесс изнашивания протекает более интенсивно. Это особенно характерно для хрупких материалов и склонных к наклепу металлов.

С повышением *твердости* чистых металлов увеличивается их износостойкость вследствие уменьшения глубины внедрения частиц. Для малых углов атаки эта зависимость является линейной, для больших – отражается выпуклыми кверху кривыми. Усталостное разрушение доминирует при скольжении абразивных частиц (малый угол α), а хрупкое – при ударе под большим α , когда нормальная составляющая достаточна для создания в поверхностном слое изнашиваемого материала высоких напряжений. Повышение твердости сталей при больших α вначале вызывает рост ϵ_m , что связано с уменьшением глубины внедрения частиц в изнашиваемый материал. Однако при высоких значениях H сопротивление стали изнашиванию падает, так как вклад хрупкого разрушения поверхностного слоя в процесс изнашивания становится определяющим.

Влияние *угла атаки* абразивных частиц на износостойкость различных материалов неоднозначно и определяется их сопротивлением малоцикловому и хрупкому разрушению. Для металлов график зависимости $\epsilon_m(HV)$ имеет минимум (рисунок 4.4, кривая 1). Снижение ϵ_m с ростом α вызвано увеличением нормальной составляющей силы удара и глубины внедрения абразивной частицы. Вследствие этого более толстый слой металла подвергается деформированию и разрушению. При $\alpha > 45^\circ$

сопротивление металла изнашиванию возрастает, т.к. абразивная частица, внедрившись в металл, совершает меньший путь и образует бороздку меньшей длины.

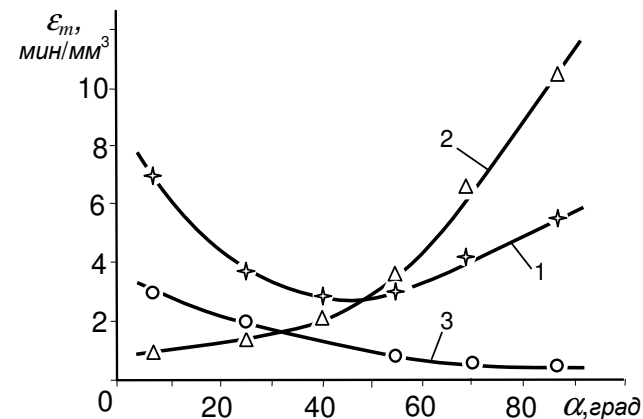


Рисунок 4.4 – Влияние угла атаки частиц на гидроабразивную износостойкость материалов:
1 – сталь У12; 2 – резина Н-6; 3 – базальт

Сопротивление гидроабразивному изнашиванию эластомеров, обладающих способностью выдерживать без разрушения большие деформации, повышается с ростом α . Чем больше α и меньше длина пути скольжения частицы по эластомеру, тем меньше вероятность образования царапин. Увеличивающаяся при этом нормальная составляющая силы удара частицы не вызывает роста ϵ_m , т.к. эластомер, упруго деформируясь, отдает практически всю переданную ему при ударе энергию. Об этом свидетельствует, в частности, кривая 2 на рисунке 4.4, отражающая возрастающую зависимость $\epsilon_m(\alpha)$ для резины. Полимеры превосходят металлы по стойкости к гид-

роабразивному изнашиванию при больших углах атаки и малой энергии удара.

Для хрупких материалов (базальт) характерно падение ϵ_m с ростом угла атаки абразивных частиц (кривая 3). Высокая износостойкость минералов при малых α связана с их высоким сопротивлением внедрению абразивных частиц. По мере увеличения α ведущим становится быстро протекающее хрупкое разрушение.

Увеличение *концентрации* абразива ведет к монотонному росту интенсивности изнашивания до тех пор, пока отскоки после удара об изнашиваемую поверхность частицы не станут сталкиваться с падающими частицами. Дальнейшее увеличение концентрации абразивных частиц в потоке жидкости не вызывает увеличения интенсивности изнашивания.

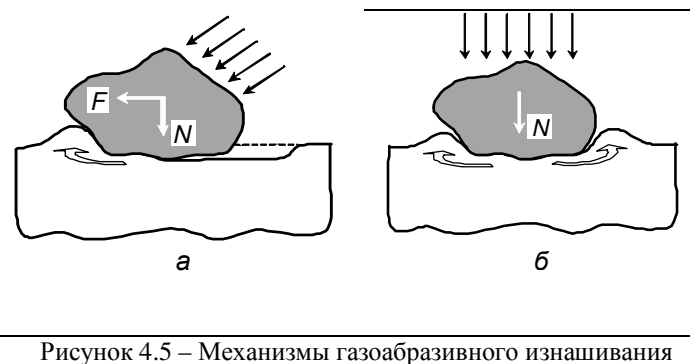
4.1.5 Газоабразивное изнашивание

Газоабразивное изнашивание – это отделение с поверхности трения материала либо его пластическое деформирование под воздействием твердых частиц, увлекаемых потоком газа, сопровождающееся изменением размеров изнашиваемого тела.

Этому виду изнашивания подвергаются детали пневмотранспортных устройств, газовых турбин, дезинтеграторов, горно-шахтного оборудования, молотки дробилок, обшивка летательных аппаратов, лопатки вентиляторов, сопла ракетных двигателей, выхлопные трубы транспортных средств.

Механизм газоабразивного изнашивания. При малых углах атаки, когда реализуется упругопластический

скользящий контакт абразивных частиц с изнашиваемой поверхностью, частицы износа образуются в результате многократного пластического деформирования материала абразивом. На поверхности трения образуются вытянутые в направлении движения частиц лунки, на краях которых располагаются гребешки пластически деформированного материала. После многократных ударов абразивных частиц и деформаций материала происходит его охрупчивание и отделение от поверхности трения. Таким образом, изнашивание является результатом пластического деформирования материала и его *малоцикловой усталости* (рисунок 4.5, а). С повышением твердости материала лунки становятся менее глубокими, меньший объем поверхностного слоя подвергается деформациям и наклепу, а вклад пластических деформаций и усталости в процесс изнашивания снижается. В отдельных случаях возможно *микрорезание* с образованием стружки.



При больших углах атаки изнашивание вязкоупругих и пластичных тел является следствием многократного *пластического деформирования* материала, выдавливаем-

мого абразивной частицей из зоны контакта (рисунок 4.5, б). Поверхность детали покрывается углублениями кратерообразной формы. Возможно отделение частицы износа вследствие *наклепа*, возникновения и развития микротрещин в поверхностном слое с последующим выкрошиванием материала между ними. При изнашивании хрупких материалов доминирующим становится разрушение в результате образования и развития микротрещин в поверхностном слое детали – *хрупкое разрушение*. Появление трещин и выкрошивание хрупкого материала может происходить даже при однократном ударе частицы. По этому механизму разрушаются также оксидные пленки, которые интенсивно образуются на поверхности металла, активированного в результате многократного деформирования абразивными частицами. При газоабразивном изнашивании поверхность ряда материалов, в том числе и металлов, становится волнистой.

Газы обладают значительно более низкой теплоемкостью, чем жидкости. Поэтому, при газоабразивном изнашивании (в отличие от гидроабразивного) на пятнах контакта кратковременно повышается температура настолько, что возможно *локальное плавление* материала либо его интенсивное *окисление*.

Факторы, влияющие на изнашивание. Интенсивность изнашивания зависит в основном от кинетической энергии частиц, угла атаки α и соотношения твердостей изнашиваемого материала и абразивных частиц.

Влияние *твердости изнашиваемого материала* на его сопротивление изнашиванию зависит от угла атаки частиц. При малых α (до 30°) зависимость ϵ_0 чистых металлов от H близка к линейной. Механизм изнашивания материала в этом случае включает в основном малоцик-

ловую усталость. При угле атаки $\alpha \rightarrow 90^\circ$ зависимость $\epsilon_0(H)$ отражается выпуклой кверху кривой. По мере роста твердости изнашиваемого материала в области малых ее значений наблюдается более интенсивный рост его ϵ_0 по сравнению с ростом ϵ_0 при $\alpha < 30^\circ$. Это связано с уменьшением доли пластической деформации и глубины внедрения частиц в изнашиваемый материал. В области больших значений H зависимость $\epsilon_0(H)$ ослабевает, т.к. растет доля быстро протекающего хрупкого разрушения материала.

Зависимость I от угла атаки α графически изображается кривой с максимумом, положение которого определяется механическими свойствами материала. Для хрупких тел (стекло, базальт) угол α , соответствующий максимуму I , находится в интервале $80 - 90^\circ$, для металлов – $40 - 60^\circ$. Максимальный износ эластомеров наблюдается при α , близких к 10° .

С увеличением *скорости* движения абразивных частиц растет энергия удара и ведущим становится хрупкое разрушение. Существует интервал скоростей, в котором температура в контакте частицы с металлом достигает $100 - 250^\circ\text{C}$, образуются оксиды, прочно связанные с основным металлом и предохраняющие его от изнашивания. При высоких скоростях передаваемая частицами энергия может оказаться достаточной для локального плавления даже тугоплавких материалов.

4.1.6 Эрозионное изнашивание

Эрозионное изнашивание – это процесс отделения с поверхности твердого тела частиц материала под воз-

действием движущейся относительно него жидкой или газовой среды, не содержащей абразивных частиц, сопровождающийся изменением размеров этого тела.

Этому виду изнашивания подвергаются отсечные кромки золотников, клапаны гидроаппаратуры, не приработанные поршневые кольца ДВС, лопасти гребных винтов, детали летательных аппаратов, подшипники с газовой смазкой, стволы стрелкового оружия и артиллерийских орудий.

Механизм эрозионного изнашивания. Процесс эрозионного изнашивания можно условно разделить на два этапа. На *первом этапе* разрушение обусловлено трением движущейся среды о поверхность твердого тела. Движущаяся с большой скоростью молекула газа или жидкости, взаимодействует с атомом поверхности твердого тела или адсорбированными молекулами, и передает им часть своей энергии. При этом атом поверхности детали смещается относительно своего положения равновесия, приобретает энергию и после разрыва связи с молекулой совершает колебательное движение (рисунок 4.6,а). Часть приобретенной энергии он передает соседним, например, нижележащим атомам. Многократные взаимодействия с молекулами движущейся среды повышают энергию атома. Его связь с “соседями” ослабляется настолько, что при последующем взаимодействии увлекаемая потоком среды молекула “вытягивает” атом с поверхности. Впоследствии этот процесс повторяется и происходит поочередное удаление атомов, завершающееся образованием углубления на поверхности детали. В пластичных материалах разрушение поверхностного слоя имеет место лишь на последней стадии, а в начальный период накапливаются микропластические деформации, материал наклепывается. Когда исчерпывается

способность металла к упрочнению, происходит “вымывание” частиц материала. Таким образом, первый этап эрозионного изнашивания заканчивается образованием на поверхности трения углублений, вытянутых в направлении движения среды. Он характеризуется низкой интенсивностью изнашивания.

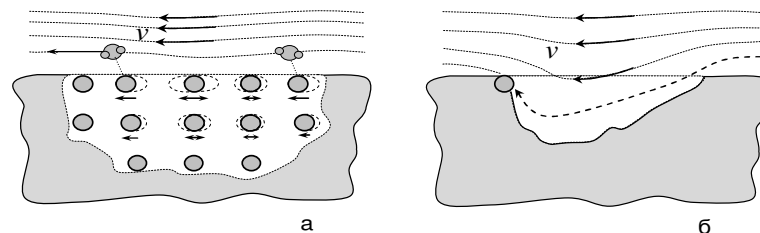


Рисунок 4.6 – Механизм эрозионного изнашивания твердых тел на первом (а) и втором (б) этапах

Более ощутимый вклад в изнашивание вносит *второй этап*. В области углубления нарушается ламинарное течение среды, создаются условия для динамического действия потока. Оно обусловлено ударным действием молекул среды на поверхность твердого тела, которое сопровождается более интенсивной, чем на первом этапе, передачей энергии атомам твердого тела (рисунок 4.6,б). В итоге становится возможным удаление более крупных частиц (зерен с неблагоприятной ориентацией структурных образований относительно действующей силы). Второй этап может сопровождаться образованием и развитием микротрещин или других дефектов поверхности, вызванным расклинивающим действием молекул движущейся среды, внедряющихся в объем этих дефектов с большей скоростью.

Рисунок изношенной поверхности определяется в основном структурой материала, поскольку разрушению подвергаются в первую очередь мягкие составляющие структуры, а также наличием, концентрацией и формой микродефектов на поверхности трения. Чаще всего при эрозионном изнашивании поверхность твердого тела покрывается глубокими, сильно разветвленными раковинами, длина которых значительно превышает ширину.

Факторы, влияющие на изнашивание. Основным фактором, определяющим интенсивность эрозионного изнашивания деталей, является **скорость** v потока газа или жидкости. С повышением v потока увеличивается частота взаимодействия молекул среды с атомом поверхности твердого тела, что повышает его энергию, и уменьшается время, в течение которого атом может передать часть приобретенной энергии “соседям”. В итоге энергия, атома возрастает пропорционально квадрату v потока среды. Кроме того, растет динамическое давление движущейся среды. Результатом действия указанных причин является повышение интенсивности изнашивания твердого тела. Увеличение скорости в области высоких ее значений приводит к нагреву поверхности трения, уменьшению прочности материала и катастрофически быстрому изнашиванию изделий. При этом температура может достигать значений, достаточных для терморазложения поверхностного слоя материала, его отделения от твердого тела и уноса движущейся средой. Подобное явление, называемое абляцией, имеет место при вхождении космических тел в атмосферу, полете снаряда или ракеты. Абляция сопровождается пиролизом, окислением и пластическим течением материала поверхностного слоя, появлением трещин на поверхности трения, ускоряющие разрушение детали.

Интенсивность эрозионного изнашивания материалов зависит от их *природы*. Минимальной износостойкостью обладают полимерные материалы, а максимальной – металлы. Промежуточное положение занимают стекла и керамика. Причина в том, что прочность (энергия связи между молекулами) полимеров значительно ниже, чем металлов. Этому различию способствует и очень низкая теплопроводность полимеров – вся переданная молекулами движущейся среды энергия концентрируется в очень тонком поверхностном слое.

Существенное влияние на интенсивность оказывает *состав движущейся среды*. Так, при сгорании бензина в камере внутреннего сгорания двигателя образуются, двуокись углерода, оксиды серы и азота, соединения хлора. Результатом взаимодействия этих соединений с парами воды является образование угольной, серной, азотной и соляной кислот. Конденсация кислот на стенках цилиндра, поршня и поршневых колец приводит к эрозионно-коррозионному изнашиванию перечисленных деталей. Газовый поток способствует отделению продуктов коррозии с поверхностей трения и их удалению. Очевидно, что интенсивность изнашивания в таких условиях в значительной мере определяется химической активностью среды.

Сопrotивление изнашиванию всех материалов уменьшается при попадании в поток газа капель жидкости, которые существенно ускоряют вторую стадию эрозионного изнашивания. Как правило, жидкая или газовая среда содержит частицы абразива (продукты износа, оксиды, частицы нагара). В этом случае имеет место эрозионно-абразивное изнашивание, интенсивность которого зависит от концентрации, размеров и твердости частиц.

4.1.7 Кавитационное изнашивание

Кавитационное изнашивание – это процесс разрушения поверхностного слоя детали быстро движущейся с переменной скоростью жидкостью, содержащей пузырьки газа, которые схлопываются у поверхности этой детали.

Этому виду изнашивания подвергаются опоры скольжения, работающие в условиях гидродинамической смазки; детали гидравлической аппаратуры и насосов; гребные винты; трубопроводы; запорная арматура; наружные поверхности цилиндров двигателей внутреннего сгорания, охлаждаемых водой; корпуса судов, торпед и т.д.

Кавитация представляет собой протекающий в объеме жидкости процесс зарождения, роста и схлопывания каверн – замкнутых полостей (пузырьков), которые могут содержать газ или пар. Она возникает при снижении статического давления или подводе к жидкости тепловой, электрической или другой энергии.

Механизм кавитационного изнашивания. Процесс изнашивания включает три стадии: зарождение кавитационных пузырьков, их рост и схлопывание, сопровождающееся гидродинамическим ударом. Рассмотрим эти стадии на примере кавитации в потоке жидкости, движущейся по каналу с переменным сечением.

При обтекании препятствия скорость движения и динамическое давление жидкости увеличиваются, а статическое давление падает до величины, обеспечивающей парообразование. Нарушение сплошности потока и интенсивное парообразование происходят в тех областях, где нерастворенный газ или неконденсированный пар,

всегда имеющиеся в жидкости, снижают на 3 ÷ 4 порядка ее прочность на разрыв. Эти области образуют ядра кавитации 1 (рисунок 4.7), которые, попадая в зону низкого статического давления, вырастают в кавитационные пузырьки 2 – пустоты, заполненные паром или газом. Пузырьки, размером порядка десятков микрометров, перемещаются потоком жидкости, увеличиваясь в размерах.

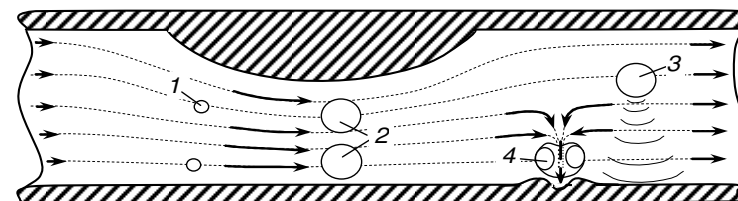


Рисунок 4.7 – Схема кавитационного изнашивания трубопровода

Выделяющийся из жидкости воздух или газ облегчает образование пузырьков. Однако в пузырьке содержание газа незначительно выше, чем в жидкости, поскольку время его существования составляет микросекунды, а этого недостаточно для заметной диффузии газа или воздуха через жидкость к кавернам. После обтекания неровности скорость потока жидкости уменьшается и статическое давление растет. Здесь происходит конденсация пара и растворение газа в окружающей жидкости, после чего наступает третья стадия – схлопывание пузырька, которое сопровождается деформацией материала трубопровода.

Существует две модели, объясняющие возникновение очагов разрушения при кавитации. Согласно одной из них, при схлопывании пузырька в жидкости возникает ударная волна (поз. 3 на рисунке 4.7), которая пластически деформирует материал детали. Но в реальных условиях развивается давление около 0,5 МПа, что на два порядка ниже уровня, необходимого для пластической деформации свинца. Следовательно, этот механизм не может быть определяющим при кавитационном изнашивании.

Согласно второй модели при нахождении пузырька в области высокого статического давления сила поверхностного натяжения жидкости на отдельном участке может оказаться недостаточной для сохранения пузырька. На этом участке поверхность пузырька прогибается и продавливается, и в его объем с большой скоростью устремляются молекулы жидкости (поз. 4 на рисунке 4.7). При этом образуется кумулятивная микроструйка жидкости, которая совершает концентрированный удар по близлежащей поверхности. В момент удара она ведет себя подобно твердому телу и пластически деформирует металл. Многократное воздействие микроструй описанного характера на один и тот же участок поверхности детали приводит к его наклепу и локальному разрушению. Расчеты показали, что достигаемая при этом скорость микроструйки все же недостаточна для пластического деформирования металлов. Более того, неизвестно, каким образом жидкости, обладая высокой текучестью, пластически деформируют металл, оставляя отпечатки, подобные следам от ударов стальных шариков.

Развитием этой модели явились исследования С.П. Козырева, который предположил, что существует аналогия схлопывания пузырька с сосредоточенным (кумуля-

тивным) взрывом, при котором заряд направлен в сторону разрушаемой поверхности выемкой. Выполненные с помощью высокоскоростной киносъемки (60 тыс. кадров в секунду) эксперименты показали, что если кавитационный пузырек имеет на некотором участке поверхности прогиб (выемку), то при схлопывании происходит образование кумулятивных микроструек жидкости. Их скорость в $2 \div 8$ раз превышает скорость жидкости при обычном схлопывании и достигает 400 м/с. При расположении кумулятивной выемки на противоположной разрушаемой поверхности стороне пузырька эта поверхность подвергается сосредоточенному удару.

Тот факт, что в момент удара жидкость ведет себя подобно твердому телу и способна пластически деформировать сталь был подтвержден экспериментально. При выстреле по падающей сверху вниз струе жидкости (смесь трансформаторного масла и канифоли) движущаяся со скоростью 11 м/с пуля изгибалась и растягивала струю – жидкость вела себя подобно эластомеру. Когда скорости пули достигала 25 м/с, струя жидкости, подобно твердому телу хрупко разрушалась с образованием осколков. Следовательно, кумулятивная природа схлопывания пузырьков, высокая скорость движения микроструй жидкости и “твердое” ее состояние в момент удара обеспечивают возможность пластической деформации металла.

После многократного воздействия микроструй описанного характера в поверхностном слое металла появляются линии сдвига по границам зерен, а впоследствии образуются ультрамикротрещины, которые, развиваясь, приводят к выкрошиванию частиц материала и появлению углублений. При изнашивании тел с низкой твердо-

стью вначале на поверхности появляются углубления, которые впоследствии увеличиваются, так как углубление концентрирует (фокусирует) ударные волны от последующего схлопывания пузырьков. На краях углублений образуются ободки пластически деформированного материала. В итоге поверхность детали покрывается углублениями в виде выдавленных кратеров.

Факторы, влияющие на кавитационное изнашивание. Интенсивность кавитационного изнашивания зависит от частоты образования каверн и их размеров, температуры, свойств и состава жидкости, свойств изнашиваемого материала.

Зависимость интенсивности кавитационного изнашивания от *температуры* воды отражается кривой с максимумом при $T = 50^\circ\text{C}$. Рост интенсивности изнашивания в области малых температур, связан с увеличением концентрации кавитационных пузырьков в жидкости. При $T > 50^\circ\text{C}$ поверхностное натяжение воды падает и сила гидродинамического удара при схлопывании пузырьков снижается, что приводит к уменьшению I . Кавитационная стойкость металлов определяется их *структурой* и свойствами. Так, стойкость сталей к изнашиванию растет при повышении содержания углерода до 0,8%, введении легирующих добавок, закалке ТВЧ, цементации и других видах упрочнения, способствующих повышению усталостной выносливости металла.

Интенсивность изнашивания металлов увеличивается с ростом *скорости течения* жидкости, причем эта зависимость более существенна в области высоких скоростей. С повышением скорости увеличиваются размеры и частота образования каверн в жидкости и, вследствие этого, растет интенсивность кавитационного изнашивания.

Полимерные материалы, особенно эластомеры, отличаются высокой стойкостью к кавитационному изнашиванию. В первую очередь это связано с тем, что, обладая низким модулем упругости, эластомеры способны к большим упругим деформациям и поглощению энергии ударов при схлопывании пузырьков. Кроме того, схлопывающийся пузырек отталкивается эластичной поверхностью, что снижает эффективность удара. Вследствие этого период времени до появления на поверхности резины микротрещин в десятки раз превышает завершающий период разрушения ее поверхности. После появления микротрещины происходит ее быстрое развитие в направлении, перпендикулярном вектору скорости. В дальнейшем наблюдается задиры и вырывы больших объемов материала.

4.1.8 Усталостное изнашивание

Усталостное изнашивание – это процесс разрушения поверхности трения детали, вызванный повторно действующими циклами напряжений (деформаций), амплитудное значение которых не превышает предела прочности материала.

Возникает в результате многократного деформирования материала изнашиваемого тела внедрившимися выступами контртела. Этому виду изнашивания подвергаются подшипники качения и скольжения, шейки коленчатых валов, кулачковые механизмы, зубчатые передачи, тормозные и фрикционные диски, пара колесо – рельс и другие детали.

Согласно усталостной теории изнашивание обусловлено наличием следующих факторов:

– дискретным характером взаимодействия трущихся деталей;

– многократно повторяющимся импульсным тепловым воздействием и деформациями материала изнашиваемой детали неровностями контртела;

– наличием микродефектов структуры и их аккумуляцией в поверхностном слое изнашиваемой детали в процессе трения;

– существованием характерного для каждого материала предельного состояния, определяющего условия его разрушения (например, предельная плотность дефектов или энергии, накопленной в локальном объеме).

Деформации изнашиваемого тела при трении. Изнашиваемое тело при скольжении по его поверхности внедрившегося выступа испытывает знакопеременные деформации в двух взаимно перпендикулярных направлениях и деформации сдвига. В направлении движения выступа материал основания впереди контактной площадки испытывает деформации сжатия, а за ней и в зоне контакта – деформации растяжения. В направлении, перпендикулярном поверхности трения, впереди контактной площадки материал растягивается, а в зоне контакта сжимается. Поверхностный слой изнашиваемого тела испытывает также деформации сдвига γ_z . Впереди контактной площадки и за ней деформации сдвига противоположны по знаку, а их максимальные значения наблюдаются на границах контактной площадки. Таким образом, при одном проходе внедрившегося выступа изнашиваемый материал испытывает знакопеременные нормальные деформации и деформации сдвига.

Механизм усталостного изнашивания металлов. Разрушение поверхности трения и образование частиц

износа при усталостном изнашивании представляют собой многостадийный процесс. В процессе трения поверхностный слой изнашиваемого тела испытывает многократные деформации описанного выше характера, вызванные внедрившимися в него и перемещающимися выступами поверхности более твердого элемента пары трения. Это сопровождается появлением в деформируемом материале повреждений (упругих искажений решетки, дислокаций). Дальнейшее деформирование материала приводит к повышению концентрации микродефектов и после достижения определенной концентрации – к образованию ультрамикротрещин. Наиболее высокая плотность дефектов и ультрамикротрещин достигается на границах зерен металла. Впоследствии происходит их развитие и слияние, которое сопровождается образованием микротрещин, ориентированных преимущественно перпендикулярно вектору скорости перемещения трущихся тел. Высокая концентрация напряжений в вершинах микротрещин приводит к их росту в длину. Завершающей стадией этого процесса является отделение от основного материала интенсивно деформируемой его части, которая с течением времени удаляется из зоны трения в виде частиц износа. Рассмотрим эту стадию изнашивания более подробно.

В зависимости от условий нагружения возможно образование микротрещин как на поверхности трения, так и под ней. Образование частиц износа как результат развития *подповерхностных* трещин рассматривается авторами теории изнашивания отслаиванием (деламинационной теории). Н. Су и С. Джаханмир, анализируя напряжения в изнашиваемом теле, пришли к выводу, что на некотором расстоянии от поверхности трения образуется зона пластических деформаций, ограниченная свер-

ху и снизу упругодеформированным материалом. Преимущественно в этой зоне, образуются дефекты. Она расположена на таком расстоянии от поверхности трения, при котором гидростатическое сжимающее напряжение недостаточно для прекращения роста дефектов, а растягивающие напряжения достаточны для их зарождения. Развитие микротрещины в зоне пластических деформаций может происходить либо путем соединения пустот, либо вследствие роста одной из них. После многократного нагружения изнашиваемого тела трещина, распространяясь параллельно поверхности трения, отделяет от основного материала тонкий слой. При выходе ее на поверхность образуется частица износа, напоминающая пластинку, толщина которой на порядок меньше его длины.

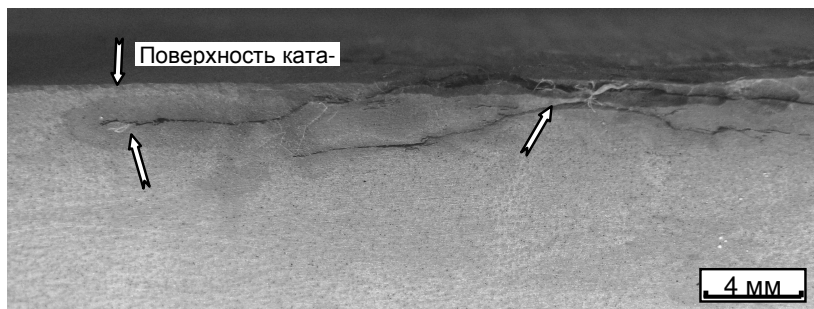


Рисунок 4.8 – Усталостное разрушение поверхностного слоя бандажа колеса тепловоза (радиальное сечение)

Возможно также зарождение микротрещин на поверхности трения и последующее распространение их на значительную глубину с сохранением ориентации перпендикулярно поверхности (рисунок 4.8). При этом образуются частицы износа вследствие скалывания материала по краям микротрещин, ширина которых посте-

пенно увеличивается (показано справа на рисунке). Форма частиц в этом случае напоминает многогранник.

Механизм усталостного изнашивания полимеров.

Кратковременное повышение температуры на пятнах контакта приводит к увеличению подвижности цепей макромолекул и снижению сил внутри- и межмолекулярного взаимодействия. Увеличение сегментальной подвижности сопровождается ростом вероятности необратимого смещения цепей макромолекул под действием механических напряжений при условии, если силы внутри- или межмолекулярного взаимодействия окажутся меньше действующих напряжений. В дальнейшем происходит разрыв связей, чаще всего, межмолекулярных. По мере накопления разрывов связей в процессе трения растут напряжения на соседних, менее напряженных связях и создаются условия для их разрыва. В итоге в структуре полимера образуются микродефекты, частота возникновения которых определяется соотношением вероятностей разрыва и рекомбинации связей в деформируемом материале.

После многократного нагружения в областях максимального скопления микродефектов образуются микротрещины, в вершинах которых локализуются механические напряжения. Усилению неоднородности распределения напряжений способствуют всегда имеющие место дефекты технологического происхождения, а также аморфные прослойки у кристаллизующихся полимеров и наличие двух резко отличающихся по энергии типов взаимодействия: химического (внутримолекулярного) и физического (межмолекулярного). Кинетика завершающего этапа изнашивания – развития трещин и образования частиц износа – определяется типом полимера и со-

отношением тепловой и механической нагрузок на пятна фактического контакта.

Факторы, влияющие на усталостное изнашивание. Усталостное изнашивание в чистом виде не проявляется. Ему сопутствует как минимум один следующих видов: пластическое отеснение материала, абразивное, окислительное или адгезионное изнашивание.

Влияние *нормальной нагрузки* N на интенсивность усталостного изнашивания I_h может быть выражено степенной функцией $I_h = k N^n$. Здесь k – коэффициент, зависящий от скорости скольжения, механических свойств изнашиваемого материала, параметров микрогеометрии поверхности контртела и других факторов. Показатель степени n характеризует сопротивление материала усталостному разрушению при циклическом деформировании. В соответствии с показателем степени зависимость интенсивности изнашивания от давления может графически изображаться выпуклыми кверху или книзу кривыми.

Повышение нормальной нагрузки сопровождается увеличением контактных деформаций и доли пластической деформации материала поверхностного слоя, что увеличивает вероятность необратимого смещения атомов (макромолекул или их сегментов), образования микродефектов и ускоряет рост микротрещин усталости. Кроме того, влияние нагрузки на I_h осуществляется через посредство силы трения и температуры. Так, увеличение N приводит к росту температуры в зоне трения и изменению свойств материала поверхностного слоя. Следствием этого является снижение сопротивления материала усталостному изнашиванию.

При снижении *коэффициента трения* f интенсивность изнашивания деталей уменьшается. Эта зависи-

мость отражается степенной функцией $I_h = k f^{l_y}$. Так, увеличение коэффициента трения в 2 – 3 раза сопровождается возрастанием интенсивности изнашивания на два порядка и более. Причина в том, что с повышением f увеличиваются температура на пятнах контакта выступов сопрягаемых тел, амплитудные значения контактных деформаций и снижается упругость контакта. В области больших значений f интенсивность изнашивания резко возрастает, что может быть вызвано не только увеличением контактных деформаций, но и ростом температуры на пятнах фактического контакта.

Существенное влияние на I_h оказывает *топография поверхностей трения*. Причина в том, что волнистость и шероховатость трущихся тел определяют их площадь фактического контакта, глубину внедрения в изнашиваемый материал выступов более твердого материала, температуру на пятнах контакта и напряженно-деформированное состояние поверхностных слоев элементов пары трения. Изменение волнистости поверхности трения приводит к изменению интенсивности изнашивания на 1 – 2 порядка, а параметров шероховатости – на несколько порядков.

Сопротивление материалов усталостному изнашиванию зависит от их механических свойств. Увеличение *модуля упругости* изнашиваемых материалов при одинаковой прочности на разрыв вызывает рост их износостойкости, поскольку при этом уменьшается площадь фактического контакта, глубина внедрения выступов и контактные деформации изнашиваемого материала. Причем эта зависимость является степенной. Для материалов с одинаковым удлинением $I_h \sim E^{-(1+\beta_o t_y)}$. Показатель степени в этой формуле может изменяться в ин-

тервале $0,6 \div 9,6$ в зависимости от шероховатости и волнистости поверхностей трения. Увеличение *прочности* материала на разрыв вызывает рост его сопротивления усталостному изнашиванию, т.к. при этом уменьшается скорость распространения трещин усталости и вероятность образования частиц износа.

4.1.9 Адгезионное изнашивание

Адгезионное изнашивание – это явление образования прочных соединений в зонах фактического контакта трущихся тел, глубинного вырывания материала одного тела и переноса на поверхность трения другого, сопровождающееся изменением их линейных размеров.

Этому виду изнашивания подвергаются зубчатые и зубчато-винтовые передачи; подшипники скольжения; пары трения плунжер – втулка, цилиндр – поршневое кольцо, направляющие металлорежущих станков – суппорт; трибосопряжения, эксплуатирующиеся в вакууме или инертной среде, при высокой температуре (ролики проходных печей, прокатных станков, детали тормозных устройств).

Механизм адгезионного изнашивания. Процесс адгезионного изнашивания металлов можно условно разделить на три этапа. На *первом этапе* происходит удаление адсорбционных и оксидных пленок с поверхности входящих в контакт неровностей. Нагрев контактирующих выступов в процессе трения способствует дезориентации молекул адсорбированных пленок газа и смазочных веществ, что облегчает их разрушение и удаление при механическом воздействии. При циклическом

действии нормальной и касательной нагрузок в оксидных пленках вначале появляются микротрещины (рисунок 4.9,а), а впоследствии происходит разрушение (рисунок 4.9,б). Скорость их разрушения определяется не только уровнем внешнего механического воздействия, но и соотношением сопротивления деформированию пленки и металла. Если твердость пленки оксида ниже твердости исходного металла, то она раскатывается по поверхности выступа и препятствует образованию адгезионных связей с сопрягаемым телом. В последнем случае адгезионное изнашивание не реализуется.

Если твердость оксида выше твердости металла, то находящийся под оксидной пленкой металл, пластически деформируясь, вызывает ее хрупкое разрушение. Проникая между участками пленки в областях их разрыва, металл выходит на поверхность и благодаря этому обеспечивается возможность образования прочных адгезионных соединений (мостиков сварки) с сопрягаемой поверхностью – наступает *второй этап* (рисунок 4.9,б).

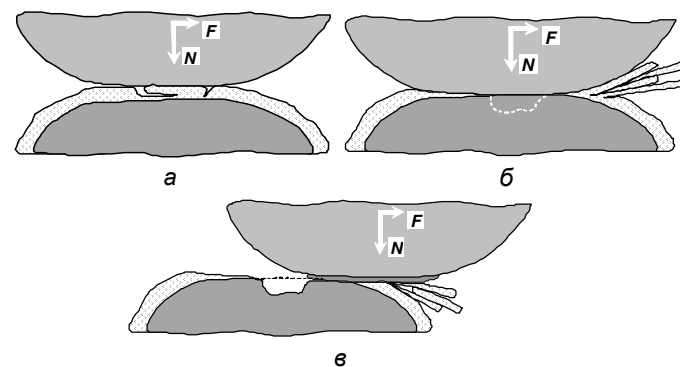


Рисунок 4.9 – Схема образования и разрушения адгезионных связей между выступами поверхностей трения сопрягаемых тел

Возможны два варианта образования мостиков сварки. Суть "холодного" схватывания сводится к следующему. Пластическая деформация вершин выступов способствует образованию и концентрации дислокаций в их поверхностных слоях. При этом повышается диффузионная активность металла. Атомы сопрягаемых выступов диффундируют по вакансиям и в областях фактического контакта формируют структуры общих решеток с металлическими связями. При высоких скоростях скольжения и температуре увеличивается скорость диффузии атомов и происходит процесс термического или "горячего" схватывания. В отдельных случаях возможно оплавление неровностей и образование структуры сплава материалов трущихся тел.

Заключительный этап процесса адгезионного изнашивания – разрушение мостиков сварки (рисунок 4.9,в). Различают четыре вида разрушения:

1. Прочность связи на границе раздела меньше прочности обоих материалов пары трения. В этом случае разрушение происходит преимущественно по границе раздела, и количество материала, удаляемое с обеих поверхностей (интенсивность изнашивания), будет незначительно. На поверхности трения деталей образуются углубления очень малых размеров. Частицы износа имеют неправильную форму, а их масса достигает 10^{-10} г.

2. Соединение на границе раздела прочнее одного из трущихся тел. Срез будет происходить по менее прочному материалу. Частицы этого материала будут налипать на более твердую поверхность и, раскатываясь по ней, образовывать пленку. При этом возможно повышение коэффициента трения, достижение высокой интенсивности изнашивания и переход к катастрофическому

износу. Частицы износа могут приобретать форму тонких пластин. На изнашиваемой поверхности появляются борозды, вытянутые в направлении скольжения.

3. Адгезионное соединение прочнее материалов обоих трущихся тел. Разрушение происходит в основном в объеме менее прочного материала, но возможно также разрушение и сопрягаемого с ним тела из более прочного материала (контртела). Интенсивность изнашивания контртела значительно ниже менее прочного материала. На поверхности контртела образуются полосы скольжения – результат царапания наклепанными частицами, закрепленными в поверхностном слое детали из менее прочного материала.

4. Прочность адгезионного соединения и когезионная прочность трущихся тел одинаковы (трение деталей из одноименных материалов). Это равенство, как правило, нарушается вследствие наклепа, и прочность соединения становится выше прочности металла. Срез происходит по объему контактирующих неровностей, что ведет к интенсивному изнашиванию обоих тел. Глубинное вырывание сопровождается возникновением на поверхности трения менее прочного материала глубоких борозд. На поверхности сопрягаемой детали образуются крупные наросты – задиры. При этом наблюдается перенос материала с одной поверхности трения на другую, возможно оплавление, катастрофический износ и заклинивание деталей.

Факторы, влияющие на адгезионное изнашивание. Интенсивность адгезионного изнашивания зависит от нагрузочно-скоростных режимов, температуры, природы материалов трущихся тел свойств окружающей среды.

С увеличением *нагрузки* интенсивность изнашивания быстро возрастает, а в области больших нагрузок эта за-

висимость усиливается. Это связано с ростом числа и размеров адгезионных связей между трущимися деталями. При высоких нагрузках заметно повышается температура и, как следствие увеличиваются не только число и размеры мостиков сварки, но и их прочность. Происходит интенсивный перенос менее прочного материала на поверхность сопрягаемой детали и повышается вероятность перехода к катастрофическому изнашиванию и заеданию.

С ростом *температуры* активность металла резко возрастает, увеличиваются число и размеры мостиков сварки и наблюдается переход к заеданию. Зависимость $I(T)$ в общем случае изображается кривой с минимумом. При отрицательных температурах медленно образуются оксидные пленки, защищающие выступы трущихся металлов от непосредственного контакта. Поэтому наблюдается интенсивное адгезионное изнашивание, которое снижается по мере повышения температуры и скорости восстановления оксидных пленок. При высоких температурах наблюдается крутой подъем кривой $I(T)$, так как максимальная температура на пятнах контакта может достигать температуры плавления металла. Находясь в состоянии локального расплава, сопрягаемые тела легко образуют прочные адгезионные соединения, что приводит к заеданию и схватыванию трущихся деталей.

Уменьшение *зазора* между поверхностями трущихся деталей снижает давление на контакте, динамические нагрузки и, как следствие, температуру и интенсивность изнашивания. Однако если минимальный диаметральный зазор узла трения будет меньше максимального размера частиц износа, возможно схватывание и заедание. В этом случае частица износа переносится на поверхность контртела и раскатывается по ней, создавая

тем самым условия для трения одноименных материалов.

4.10 Окислительное изнашивание

Окислительное изнашивание – это процесс разрушения оксидных пленок, непрерывно возобновляемых вследствие взаимодействия активного пластически деформируемого поверхностного слоя металла с кислородом воздуха или смазочного материала, сопровождающийся изменением линейных размеров трущихся тел.

Для реализации окислительного изнашивания необходимо, чтобы скорость образования пленок оксидов была больше или равна скорости их разрушения. Этому виду изнашивания подвергаются практически все детали, работающие в кислородсодержащей среде: подшипники качения и скольжения, шарнирно-болтовые соединения, металлические колеса фрикционных передач, детали гидравлических насосов и двигателей внутреннего сгорания и др.

Механизм окислительного изнашивания. Процесс окислительного изнашивания можно разделить на три этапа.

1. В результате пластического деформирования при трении поверхностный слой металла насыщается дислокациями, что повышает его активность и способность взаимодействовать с кислородом.

2. В дальнейшем на поверхности металла появляется оксидная пленка (рисунок 4.10,а) толщиной $\sim 10 \div 100$ нм. Поскольку постоянная кристаллической решетки металла меньше, чем оксида, в объеме оксидной пленки возникают сжимающие напряжения, а в металле – растягивающие. По этой причине на поверхности раздела ис-

ходного металла и оксидного слоя возникают касательные напряжения.

3. При фрикционном нагружении оксидная пленка отделяется от металла по границе раздела на отдельных участках благодаря появлению и росту подповерхностных микротрещин, расположенных параллельно поверхности трения (рисунок 4.10,б). Низкое сопротивление оксидных пленок растяжению, наличие дефектов структуры и внутренних напряжений в пленке способствуют образованию и развитию поверхностных микротрещин, ориентированных перпендикулярно поверхности трения. По мере роста числа циклов нагружения сетка микротрещин становится более плотной. Далее происходит сближение поверхностных и подповерхностных трещин (рисунок 4.10,б), отделение участков оксидной пленки от исходного материала (рисунок 4.10,в) и удаление их из зоны трения (рисунок 4.10,г). На свежесформированной, оголившейся поверхности металла вновь появляется оксидная пленка.

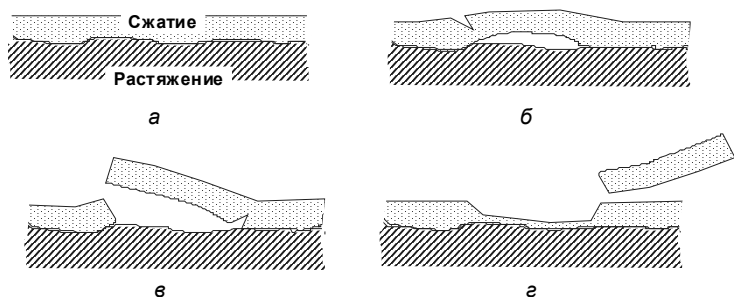


Рисунок 4.10 – Кинетика образования частиц износа при окислительном изнашивании металла

Поверхность детали в процессе преимущественно окислительного изнашивания становится более гладкой

и содержит следы окислительного изнашивания – углубления произвольной формы.

Факторы, влияющие на интенсивность изнашивания. Интенсивность окислительного изнашивания металлов зависит от соотношения скоростей образования и разрушения оксидных пленок. Окисление в трибосопряжениях может играть двойственную роль. При оптимальной скорости образования оксидные пленки защищают трущиеся детали от схватывания и их износостойкость повышается. При более высокой скорости окисления на поверхностях трения образуются толстые оксидные слои, которые легко разрушаются. Это обеспечивает высокую интенсивность изнашивания металла.

Температура. При низких температурах образуются тонкие, порядка десятков нанометров, пленки. Они легко разрушаются, и поэтому доминирует адгезионное изнашивание. С повышением T скорость образования оксидных пленок растет и I уменьшается. При высоких температурах толщина оксидной пленки возрастает, повышается склонность их к хрупкому разрушению и интенсивность изнашивания.

Нагрузка. С увеличением нагрузки в области малых ее значений возрастает вероятность разрушения оксидной пленки выступами сопрягаемой детали. Это повышает долю адгезионного изнашивания и, как следствие, способствует росту I_m . При дальнейшем повышении нагрузки интенсивность изнашивания стали стабилизируется либо снижается, что по-видимому связано с ростом температуры в зоне трения и сближением скоростей образования и разрушения оксидных пленок, предохраняющих металлы от непосредственного контакта и образования мостиков сварки. Минимальная интенсивность изнашивания наблюдается в том случае, если толщина

оксидной пленки достаточна для защиты сопрягаемых металлов от схватывания. Для высоких нагрузок характерен рост I_m , что связано с образованием и разрушением толстых оксидных пленок.

Скорость скольжения оказывает влияние на интенсивность изнашивания через соотношение скорости образования оксидной пленки (управляемой температурой в зоне трения) и скорости ее разрушения. В зависимости от этого соотношения на контакте может иметь место как окислительное, так и адгезионное изнашивание. При малых скоростях преобладает окислительное изнашивание стали и I мала, а по мере повышения v ведущим становится локальное схватывание трущихся тел и возрастает интенсивность изнашивания металла. Причина в том, что разрушенная на вершине выступа оксидная пленка не успевает восстанавливаться за период времени между двумя соседними взаимодействиями с выступами сопрягаемой детали. В интервале средних значений v повышается температура в контакте, что ускоряет образование оксидной пленки, и адгезионное изнашивание стали переходит в окислительное. При дальнейшем увеличении скорости скольжения I возрастает, что связано с образованием толстых оксидных слоев, склонных к хрупкому разрушению. Ведущим видом вновь становится окислительное изнашивание

Состав газовой среды. Наличие кислорода в среде снижает интенсивность изнашивания металла. Так, благодаря возникновению оксидных пленок на поверхности стали интенсивность изнашивания при трении в кислороде на два порядка ниже, чем в инертной среде. В последнем случае оксидная пленка не образуется и реализуется адгезионное изнашивание. Влияние состава среды не ограничивается только содержанием кислорода. Сма-

зочные масла могут являться источником коррозионно-активных веществ, которые образуются при терморазложении присадок на пятнах фактического контакта.

4.11 Изнашивание при фреттинг-коррозии

Фреттинг-коррозия – это процесс разрушения поверхностей трения при малых циклических перемещениях сопрягаемых деталей, сопровождающийся изменением их размеров.

Этот вид изнашивания наблюдается в болтовых, заклепочных, штифтовых и шпоночных соединениях, парах вал–ступица, на посадочных поверхностях деталей, в шарнирах, рессорах, регуляторах электрических контактов, кулачковых механизмах, стальных канатах, а также в узлах трения, подвергающихся вибрационным нагрузкам.

Фреттинг-коррозия проявляется только в том случае, если трущиеся тела совершают циклическое перемещение относительно друг друга на величину, не превышающую размер пятна контакта. Благодаря этому частицы износа не могут выйти за пределы контактной площадки и обеспечивают возникновение высоких давлений на локальных ее участках.

Механизм фреттинг-коррозии. В результате многократного динамического нагружения контактирующих неровностей происходит разрушение и удаление адсорбционных и оксидных пленок с их вершин, т.е. реализуется локальное *окислительное* изнашивание (рисунок 4.11,а). При этом обеспечивается возможность непосредственного контакта ювенильных участков поверхностей, материал вершин взаимодействующих выступов

пластически деформируется, насыщается дефектами и становится активным.

При дальнейшем нагружении между ювенальными поверхностями выступов образуются мостики сварки (поз. 1 на рисунке 4.11,а), которые разрушаются с отрывом микроскопических частиц металла с поверхности одного из трущихся тел и образованием каверны малых размеров (*адгезионное* изнашивание). Поверхность каверны окисляется, а в ее объеме скапливаются оксиды, так как при малых перемещениях их удаление за пределы контакта практически невозможно (поз. 2 на рисунке 4.11,б). Находящиеся в каверне под давлением оксиды вызывают *абразивное* изнашивание обоих тел. Образующиеся при этом частицы вновь окисляются. В результате размер каверны увеличивается (поз. 3 на рисунке 4.11,в).

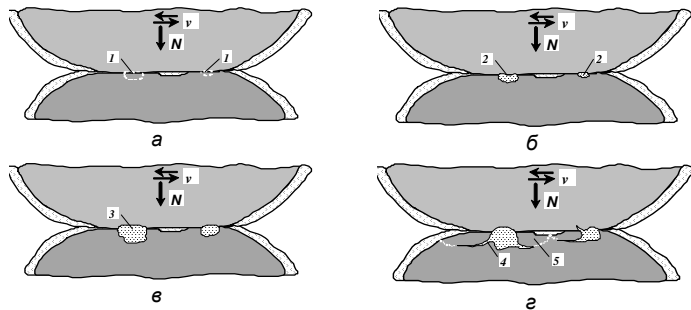


Рисунок 4.11 – Кинетика изнашивания металлов при фреттинг-коррозии

Поскольку частицы оксидов занимают больший объем, чем металл, на основе которого они образовались, давление в кавернах повышается. Это вызывает появление *усталостных* микротрещин (поз. 4 на рисунке 13.39,г), С течением времени микротрещины растут и

отделяют от основного материала частицы более крупных размеров (поз. 5 на рисунке 4.11,г).

Таким образом, при фреттинг-коррозии реализуются одновременно четыре вида изнашивания: окислительное, адгезионное, абразивное и усталостное. Поверхность деталей, подвергаемых фреттинг-коррозии, покрывается углублениями и напоминает по характеру разрушения поверхность после коррозионного изнашивания.

Факторы, влияющие на интенсивность фреттинг-коррозии. Одним из основных факторов является *амплитуда* A относительного перемещения сопрягаемых тел. При малых значениях A частицы износа могут выполнять роль тел качения и предохраняют сопрягаемые тела от интенсивного изнашивания. Увеличение A вызывает рост интенсивности изнашивания, причем в области малых перемещений эта зависимость близка к линейной. Причина в том, что с ростом амплитуды перемещения увеличивается путь трения, вероятность разрушения оксидных пленок и образования мостиков сварки, что сопровождается повышением износа детали. При дальнейшем увеличении амплитуды колебаний интенсивность изнашивания может снижаться вследствие того, что обеспечиваются условия для выхода оксидных частиц из каверн и последняя стадия фреттинг-коррозии (усталостное изнашивание) в этом случае не реализуется.

С повышением *контактного давления* p интенсивность фреттинг-коррозии возрастает, поскольку на большую область распространяется разрушение, растет температура на пятнах контакта выступов и преобладающим становится вклад адгезионного и усталостного видов изнашивания.

Интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии в значительной степени зависит от *температуры* трущихся тел. Так, с ростом температуры испытаний потеря массы образцов из стали вначале уменьшается, что связано с увеличением скорости образования защитных оксидных пленок в контакте. В области высоких температур возможна зависимость $I(T)$, обратная описанной. Повышение интенсивности изнашивания в данном случае связано с тем, что интенсивное окисление металла приводит к росту давления в кавернах. В итоге увеличивается вклад усталостного и адгезионного видов разрушения поверхностей трения.

Частота колебаний изменяет скорость проскальзывания в контакте. При низких частотах увеличивается время действия химических процессов, что при незначительном изменении температуры в контакте вызывает интенсивный, в основном коррозионный, износ поверхностей трения. С ростом частоты колебаний интенсивность изнашивания вначале уменьшается, а затем стабилизируется, так как образуются тонкие, но достаточные для выполнения защитных функций оксидные пленки металлов. При этом значительно снижается вклад адгезионного изнашивания.

На процесс фреттинг-коррозии оказывает существенное влияние *состав окружающей среды*. Так, увеличение влажности воздуха снижает интенсивность изнашивания. Даже в среде едкого натра I значительно ниже, чем в вакуумной среде. Это, возможно, обусловлено гидратацией оксидов и вымыванием жидкостью продуктов разрушения из зоны трения.

4.12 Лабораторная работа №6

«Абразивное изнашивание металлов»

Цель работы: выявить закономерности влияния режимов нагружения на интенсивность изнашивания металла при трении по закрепленному абразиву.

Оборудование и материалы: машина трения СМТ-1, ролик из стали (диаметр $40 \cdot 10^{-3}$ м и высота 10 мм) с закрепленным на поверхности трения абразивом, вкладыш из стали или бронзы, (площадь поверхности трения $2 \cdot 10^{-4}$ м²), весы аналитические ВЛА – 200, набор разновесов, индикатор часового типа, ветошь, растворитель (гексан).

Порядок выполнения работы.

1. Очистить от загрязнений, удалить заусенцы, обезжирить поверхность вкладыша и определить его первоначальную массу m_n на аналитических весах.
2. Установить и закрепить ролик на валу машины трения, вкладыш в держателе машины.
3. Тщательно обезжирить поверхность трения вкладыша.
4. Проверить биение ролика индикатором, достичь наименьшего биения проворачивая ролик на валу машины трения.
5. Включить привод машины трения и задать частоту вращения ролика n из ряда частот: 80, 120 или 240 об/мин.
6. Задать нагрузку N на узел трения из ряда нагрузок: 50, 100, 150, 200 Н и скорректировать частоту вращения ролика.
7. Провести испытание не менее 10 мин. Остановить машину трения.
8. Снять вкладыш, протереть и обезжирить поверхность трения и определить его конечную массу, m_k , кг

9. Установить вкладыш в держателе машины и провести испытания (повторить п. 5 – 8) при новых режимах нагружения. На каждом режиме нагружения проводить испытание не менее 10 мин.

10. Рассчитать интенсивность абразивного изнашивания бронзы по формуле:

$$I_h = \Delta m / (\rho A L)$$

где Δm – изменение массы образца за время испытания, кг;
 $\Delta m = m_n - m_k$
 ρ – плотность материала вкладыша, кг/м³;
 A – площадь поверхности трения, м²;
 L – путь трения, м;

11. Полученные результаты представить в таблице

Таблица 1 – Влияние режимов нагружения на интенсивность изнашивания бронзы

| № п/п | Нагрузка, N, Н | Масса, кг | | Изменение массы Δm , кг | Путь трения L , м | Интенсивность изнашивания, I_h |
|-----------------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| | | начальная m_n | конечная m_k | | | |
| Скорость скольжения $v_1 =$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Скорость скольжения $v_2 =$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

| Скорость скольжения $v_3 =$ | | | | | | |
|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

10. По полученным результатам построить графики зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки при различных скоростях скольжения. Объяснить полученные зависимости

11. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое изнашивание и износ? В чем их различие?
2. Назовите виды абразивного изнашивания деталей. В каких узлах машин они проявляются?
3. Опишите механизмы изнашивания деталей закрепленными абразивными частицами.
4. Опишите механизмы изнашивания деталей свободными абразивными частицами.
5. Опишите механизмы изнашивания деталей деформируемой массой, содержащей абразивные частицы.
6. Начертите график зависимости интенсивности абразивного изнашивания закрепленными частицами от нагрузки. Обоснуйте эту зависимость.
7. Как зависит сопротивление металлов различной твердости изнашиванию деформируемой массой, содержащей абразивные частицы?
8. Как влияет твердость абразивных частиц, находящихся в деформируемой массе, на износостойкость металлов?

9. Начертите график зависимости интенсивности абразивного изнашивания свободными частицами от их концентрации. Обоснуйте эту зависимость

10. При каких условиях увеличение размеров свободных абразивных частиц не будет вызывать повышение интенсивности изнашивания реального узла трения?

4.13 Лабораторная работа №7

«Влияние режимов нагружения на интенсивность изнашивания пары

бронза – сталь при трении скольжения»

Цель работы: выявить закономерности влияния скорости скольжения и нормальной нагрузки на интенсивность изнашивания бронзы при трении скольжения по стали.

Оборудование и материалы: машина трения СМТ-1, ролик из стали (диаметр $40 \cdot 10^{-3}$ м и высота 10 мм), вкладыш из бронзы, (площадь поверхности трения $2 \cdot 10^{-4}$ м²), весы аналитические ВЛА – 200, набор разновесов, индикатор часового типа, ветошь, растворитель (гексан).

Порядок выполнения работы.

1. Очистить от загрязнений, удалить заусенцы, обезжирить поверхность вкладыша и определить его первоначальную массу m_n на аналитических весах.

2. Установить и закрепить ролик на валу машины трения, а вкладыш в держателе машины.

3. Тщательно обезжирить поверхность трения вкладыша и ролика.

4. Проверить биение ролика индикатором, достичь наименьшего биения проворачивая ролик на валу машины трения.

5. Включить привод машины трения и задать частоту вращения ролика n из ряда частот: 80, 120 и 240 об/мин.

6. Задать нагрузку N на узел трения из ряда нагрузок: 50, 100, 150, 200 Н и скорректировать частоту вращения ролика.

7. Провести испытание в течение 10 мин. Остановить машину трения.

8. Снять вкладыш, протереть и обезжирить поверхность трения и определить его конечную массу m_k , кг.

9. Установить вкладыш в держателе машины и провести испытания (повторить п. 5 – 8) при новых режимах нагружения. На каждом режиме нагружения проводить испытание не менее 10 мин.

10. Рассчитать интенсивность абразивного изнашивания бронзы по формуле:

$$I_h = \Delta m / (\rho A L)$$

где Δm – изменение массы образца за время испытания, кг;
 $\Delta m = m_n - m_k$
 ρ – плотность материала вкладыша, кг/м³;
 A – площадь поверхности трения, м²;
 L – путь трения, м;

11. Полученные результаты представить в таблице

Таблица 1 – Влияние режимов нагружения на интенсивность изнашивания бронзы

| № п/п | Нагрузка, N , Н | Масса, кг | | Изменение массы Δm , кг | Путь трения L , м | Интенсивность изнашивания, I_h |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| | | начальная m_n , | конечная m_k | | | |
| Скорость скольжения $v_l =$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

| | | | | | | |
|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Скорость скольжения $v_2 =$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Скорость скольжения $v_3 =$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

10. По полученным результатам построить графики зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки при различных скоростях скольжения. Объяснить полученные зависимости.

11. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое износостойкость, интенсивность изнашивания и скорость изнашивания? В чем их различие?
2. Как образуются частицы износа при гидро- и газоабразивном изнашивании?
3. Назовите причины изменения износостойкости металлов при изменении угла атаки.
4. Опишите этапы эрозионного изнашивания.
5. Опишите кинетику усталостного изнашивания металлов.
6. Почему повышение нормальной нагрузки и коэффициента трения вызывает рост интенсивность усталостного изнашивания?
7. Опишите кинетику кавитационного изнашивания материалов.
8. Как влияет температура жидкости на интенсивность кавитационного изнашивания материалов?

9. Опишите этапы фреттинг-коррозии. Как влияет амплитуда относительного перемещения трущихся деталей на их интенсивность изнашивания?

10. Как образуются частицы износа при окислительном изнашивании?

4.14 Лабораторная работа №8

«Трение и изнашивание металлов и полимерных материалов»

Цель работы: получить сравнительные данные об износостойкости бронзы, чугуна и полимерного материала при трении скольжения по стали.

Оборудование и материалы: машина трения СМТ-1, ролик из стали (диаметр $40 \cdot 10^{-3}$ м и высота 10 мм), вкладыш из чугуна, бронзы и полимерного материала (площадь поверхности трения $2 \cdot 10^{-4}$ м²), весы аналитические ВЛА – 200, набор разновесов, индикатор часового типа, ветошь, растворитель (гексан).

Порядок выполнения работы.

1. Очистить от загрязнений, удалить заусенцы, обезжирить поверхность вкладыша и определить его первоначальную массу m_n на аналитических весах.
2. Установить и закрепить ролик на валу машины трения, а чугунный вкладыш в держателе машины.
3. Тщательно обезжирить поверхность трения вкладыша и ролика.
4. Проверить биение ролика индикатором, достичь наименьшего биения, проворачивая ролик на валу машины трения.
5. Включить привод машины трения и задать частоту вращения ролика n из ряда частот: 120 об/мин.

6. Задать нагрузку N на узел трения из ряда нагрузок: 25, 50, 75, 100 N и скорректировать частоту вращения ролика.

7. Провести испытание в течение 10 мин. Остановить машину трения.

8. Снять вкладыш, протереть и обезжирить поверхность трения и определить его конечную массу m_k , кг.

9. Установить вкладыш в держателе машины и провести испытания (повторить п. 5 – 8) при следующей нагрузке из ряда. На каждом режиме нагружения проводить испытание не менее 10 мин.

10. Повторить испытания по п. 2 – 9 для вкладыша из бронзы и полимерного материала.

11. Рассчитать интенсивность абразивного изнашивания бронзы по формуле:

$$I_h = \Delta m / (\rho A L)$$

где Δm – изменение массы образца за время испытания, кг; $\Delta m = m_n - m_k$
 ρ – плотность материала вкладыша, кг/м³;
 A – площадь поверхности трения, м²;
 L – путь трения, м;

12. Полученные результаты представить в таблице

Таблица 1 – Влияние режимов нагружения на интенсивность изнашивания бронзы

| № п/п | Нагрузка, N , Н | Масса, кг | | Изменение массы Δm , кг | Путь трения L , м | Интенсивность изнашивания, I_h |
|-------------------|-------------------|-----------------|----------------|---------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| | | начальная m_n | конечная m_k | | | |
| Вкладыш из чугуна | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

| | | | | | | |
|----------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | |
| Вкладыш из бронзы | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Вкладыш из полимерного материала | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

13. По полученным результатам построить графики зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки при различных скоростях скольжения. Объяснить полученные зависимости.

14. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое класс износостойкости материалов?
2. Опишите кинетику усталостного изнашивания полимерных материалов.
3. При каких условиях сопротивление абразивному изнашиванию полимерных материалов будет выше, чем стали?
4. Возможна ли фреттинг-коррозия в контакте полимерных материалов?
5. Будет ли изнашиваться высокопрочный стальной вал, сопрягаемый с полимерной втулкой? Почему?
6. Почему сопротивление эластомеров гидро- и газоабразивному изнашиванию при больших углах атаки выше, чем металлов?
7. Назовите условия, необходимые для реализации окислительного изнашивания материалов.