

1471

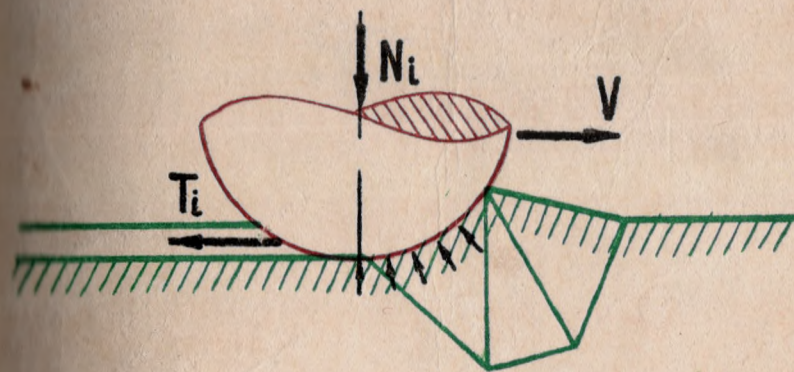
Цена 43 коп.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Балакин В. А.

**ОСНОВЫ  
ПРОЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**  
(Трение и износ)



Гомель 1974



039.6  
520

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
Б С С Р

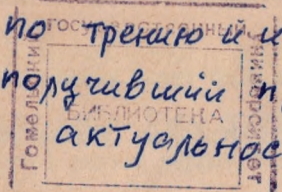
ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Кафедра физики твердого тела

В. А. БАЛАКИН

ОСНОВЫ ПРОЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ  
(ТРЕНИЕ И ИЗНОС)

Конспект лекций

Это первый в СССР учебник  
по трению и износу в машинах,  
получивший признание своей  
актуальностью в СССР



Гомель, 1974 г.

Франки  
30 июня 2021



34.413  
5 20

В учебном пособии систематизированы основные сведения о трении и износе поверхностей твердых тел.

Рассматривается современное состояние вопроса о взаимодействии твердых тел при трении, расчете микрогеометрии контакта, сил трения и износа. Большое внимание уделено теплофизике процессов трения. Изложение температурных задач трения увязано с основными положениями теории теплопроводности.

Учебное пособие наряду с курсом "Физико-химическая механика контактного взаимодействия" предназначено для студентов, специализирующихся по физике твердого тела на физическом факультете ГГУ.

Табл. 6, илл. 80, библи. 120.

Рецензент д-р техн. наук Ю.Н. Дроздов.

Под общей редакцией канд. техн. наук В.П. Ставрова.

© Гомельский государственный университет, 1974.

№ 0233467-

ДУ "Сетка публічних бібліотек горада Гомеля"

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения надежности и долговечности машин является одной из основных проблем научно-технического прогресса. Современные образцы промышленного оборудования представляют собой сложные технические комплексы, нередко состоящие из сотен и тысяч различных деталей. В этих условиях качество отдельных элементов конструкций зачастую оказывает решающее влияние на надежность всего комплекса. Преждевременный выход из строя незначительного, на первый взгляд, элемента может привести к неудаче космического эксперимент, остановить автоматическую линию, мощный энергоблок или шагающий экскаватор, что повлечет за собой немалые экономические потери.

Под надежностью машины или прибора понимают их способность работать в соответствии с назначением и техническими условиями на эксплуатацию в течение выбранного времени.

Под долговечностью машины понимается ее свойство сохранять работоспособность до установленного предельного состояния, которое определяется по изменению параметров работы, условиям безопасности и т. д.

Долговечность машины может быть ограничена износом одного из основных рабочих узлов. Очень часто машина массой в несколько тонн в результате износа теряет всего десятые доли килограмма и становится полностью изношенной.

Надежность и долговечность характеризуют качество продукции. Повышение качества продукции, связанное с увеличением надежности и долговечности изделий, равноценно увеличению объема выпуска продукции, росту производительности труда, повышению мощности машиностроительных предприятий.



В общей проблеме повышения надежности и долговечности машин большое внимание уделяется вопросам трения и износа контактирующих поверхностей, правильному проектированию узлов трения и выбору режима смазки. Потери на трение только в машинах промышленности нашей страны исчисляются в миллиардах киловатт-часов энергии. В одной лишь текстильной промышленности эти потери достигают 85% от всей потребляемой энергии и только 15% ее идет на полезную работу. Из-за технических неисправностей ежедневно простаивает до 40% автомашин и до 30% тракторов.

В настоящее время на техническое обслуживание и текущий ремонт автомобилей расходуется свыше 200 миллионов рублей в год. Стоимость ремонта автомобиля за период его эксплуатации в 2-3 раза выше стоимости его изготовления, причем значительная часть расходов вызывается преждевременным износом деталей ходовой части. На ремонт экскаваторов одной только марки ЭКГ-4 ежегодно расходуется 26 миллионов рублей - в 1,33 раза больше, чем на выпуск новых.

Быстрый износ и затупление режущего инструмента сельскохозяйственных машин также наносит большой материальный ущерб стране, исчисляемый многими миллионами рублей. Так, например, лемехи у плуга работают несколько дней, а в некоторых случаях 5-10 часов и полностью изнашиваются.

Ствол нарезного артиллерийского орудия "живет" всего 10-15 сек, т.е. 500-1000 выстрелов, и выходит из строя.

Во вступительном слове на III Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах, состоявшейся в апреле 1956 года, директор Института машиноведения АН СССР академик А.А.Благодирев отмечает: "Расход металла в нашей стране, связанный с прежде-

временным выходом из строя машин и с изготовлением большого количества запасных частей к ним, в денежном выражении исчисляется десятками миллиардов рублей. Задача повышения сроков службы машин имеет важное народнохозяйственное значение для нашей страны".

В докладе "Увеличение износоустойчивости машин - один из путей повышения эффективности народного хозяйства" на Всесоюзном семинаре по избирательному переносу, состоявшемся в апреле 1972 года в Москве, директор Института проблем механики АН СССР академик А.Ю.Ишлинский подчеркивал: "Главнейшей причиной выхода деталей и рабочих органов машин из строя является не их поломка, а износ поверхностей трения. У нас в стране на ремонт машин расходуется ежегодно 12-14 миллиардов рублей. Стоимость ремонта нередко превышает стоимость новых машин и оборудования. Проблема борьбы с трением и износом приобретает еще большую актуальность в свете решений XXIV съезда партии, в которых отменена важность повышения эффективности народного хозяйства путем внедрения новейших достижений науки и техники".

За последние несколько лет был принят ряд постановлений Совета Министров СССР, направленных на повышение качества выпускаемой продукции. Создан Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР. Значение стандартов и технических условий для народного хозяйства очень велико, так как ими определяется уровень качества выпускаемой продукции. Продукция, изготовленная на уровне мировых стандартов, присваивается "Знак качества".

Повышение надежности и долговечности связано с изучением физических процессов, протекающих в тех или иных сочленениях и узлах изделия. Следует иметь в виду, что многие интересую-



щие нас процессы, связанные с трением и износом сопряженных поверхностей, еще не полностью изучены; относительно механизма некоторых процессов и влияния на них тех или иных факторов высказываются различные гипотезы. И если в настоящее время на достаточно высоком уровне разработаны вопросы проектирования механизмов и машин, вопросы расчета на прочность отдельных сочленений и узлов, то совершенно отсутствуют справочные и учебные пособия по расчету на надежность и долговечность узлов трения.

Большую трудность представляет расчет и прогнозирование сил трения и износа в фрикционном сочленении, особенно с учетом изменения условий трения и режима работы. Вследствие этого на предприятиях находят широкое применение эксплуатационные испытания на трение и износ, а сама наука о трении в основном еще является экспериментальной.

Природа внешнего трения чрезвычайно сложна. Для объяснения физики процесса трения приходится использовать большой объем информации из различных смежных наук, в том числе сформировавшихся сравнительно недавно. Сюда относятся: физика твердого тела, физика поверхностных явлений и тонких пленок, физическое металловедение, физика разрушений, теплофизика, молекулярная физика граничного трения, физико-химическая механика фрикционного взаимодействия, электрохимия и т.д. Развитие современных физических методов исследований поверхностей твердых тел, таких, как спектроскопия, радиоспектроскопия, рентгеноструктурный анализ, электронография, электронная микроскопия и др., позволяет проводить тонкие исследования изменений, происходящих в поверхностных слоях трущихся тел. Учитывая

сложность явления трения, необходимо отметить, что наука о трении и износе накопила достаточно большой теоретический и экспериментальный материал. Назрела необходимость в разработке учебного пособия по теории трения и износа, предназначенного для студентов. Такое пособие полезно также и для аспирантов, работников НИИ и промышленных предприятий.

## ГЛАВА I

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРЕНИИ И ИЗНОСЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

#### § I. Основные понятия

Трение принято подразделять на внешнее и внутреннее. Под внешним трением понимается сопротивление, возникающее в области контакта твердых тел при их относительном перемещении в плоскости касания. Сила сопротивления, направленная в сторону, противоположную сдвигающему усилию, называется силой трения. Работа силы трения в процессе движения превращается в теплоту (молекулярное движение).

В зависимости от величины перемещений различают:

- а) силу трения движения  $T$ ,
- б) неполную силу трения покоя  $T'$ ,
- в) полную силу трения покоя (или просто силу трения покоя)  $T_0$ .

Сила трения движения возникает при скольжении трущихся тел друг относительно друга и соответствует большим относительным перемещениям.

Неполная сила трения покоя соответствует очень малым,



частично обратимым перемещениям, величина которых пропорциональна приложенной силе. Перемещение, соответствующее полной силе трения, называется предварительным смещением. В случае предварительного смещения активные силы  $F$  и  $P$  уравновешиваются силами реакции в том числе  $T'$ , и тело находится в покое.

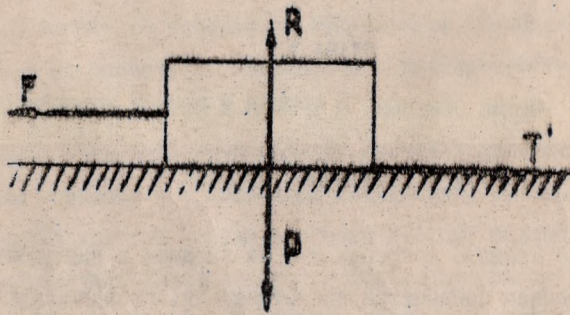


Рис. I.

Неполная сила трения покоя зависит от сдвигающего усилия и изменяется с увеличением последнего от нуля до некоторого максимального значения, при котором она называется полной силой трения покоя.

Полная сила трения покоя соответствует моменту перехода от предельной величины предварительного смещения в относительное перемещение.

По кинематическим признакам различают:

- 1) трение скольжения, при котором одна и та же номинальная поверхность одного тела поступательно перемещается по поверхности другого тела;
- 2) трение вращения, при котором точки поверхности трения одного тела описывают в плоскости касания двух тел концентрические

кие окружности вокруг центра, лежащего на оси вращения;

3) трение качения.

По признакам состояния поверхностей трущихся тел и наличия смазки различают следующие виды трения скольжения:

1. Трение идеально чистых (хвентильных) поверхностей, освобожденных от адсорбированных и окисных пленок. Такие поверхности образуются при больших контактных давлениях и значительных пластических деформациях, когда крупные пленки разрушаются, образуя чистую поверхность, а также в результате разрушения смазочного слоя под действием температуры. С трением идеально чистых поверхностей приходится сталкиваться в вакуумной и космической технике.
2. Жидкостное (гидродинамическое) трение, при котором трущиеся поверхности разделены слоем смазки, подчиняющейся при трении законам гидродинамики вязкой жидкости. Такой вид трения широко распространен в разнообразных конструкциях подшипников скольжения.
3. Граничное трение, при котором твердые поверхности разделены весьма тонкими (0,1 мкм и менее) адсорбционными слоями любой природы и происхождения; физические свойства этих слоев определяются влиянием твердых фаз. Вещество, распределенное тонким слоем на поверхности твердой фазы, приобретает совершенно иные свойства, отличные от тех, которыми оно обладает в массе (объеме). Например, жидкость в тонком слое на поверхности твердого тела способна приобретать упругость формы и свойства твердого тела. Эти свойства вещество приобретает под действием поля твердой поверхности, что дает со-



нование говорить об особом "граничном состоянии" вещества и об образованных им на поверхности твердой фазы "граничных слоях". Обладая достаточной прочностью, граничные слои способны выдерживать при трении высокие нормальные давления, не разрушаясь и экранируя поверхности от непосредственного контакта. В то же время на некотором расстоянии от поверхности они имеют весьма малое сопротивление сдвигу. Эти свойства граничных слоев обеспечивают эффективную смазку поверхностей при трении. Граничное трение имеет место в подавляющем большинстве узлов трения и во многих технологических процессах обработки материалов.

4. Сухое трение, возникающее при отсутствии смазки и загрязнений между контактирующими поверхностями. При сухом трении поверхности покрыты сравнительно толстыми пленками окислов (более 0,1 мкм).
5. Полусухое трение - смешанное трение, одновременно граничное и сухое.
6. Полужидкостное трение - смешанное трение, одновременно жидкостное и граничное или жидкостное и сухое.

Коэффициентом трения скольжения  $f$  называется отношение силы трения движения  $T$  к нагрузке  $N$ , сжимающей тела касания,

$$f = \frac{T}{N} \quad (I.1)$$

Коэффициентом трения покоя  $f_0$  называется отношение полной силы трения покоя  $T_0$  к нагрузке  $N$ , сжимающей тела касания,

$$f_0 = \frac{T_0}{N} \quad (I.2)$$

Таким образом, коэффициент трения устанавливает формальную связь (не отражающую физики процесса взаимодействия поверхностей при трении) между измеряемыми в опытах силой трения и нормальной нагрузкой.

Трением качения называется сопротивление, возникающее при качении одного тела по другому. При качении колеса (катка) по опорной поверхности вследствие его деформации и деформации поверхности под действием нагрузки создается площадка конечных размеров.

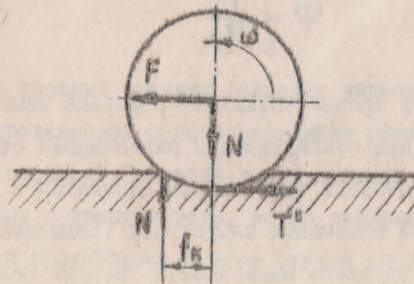


Рис. 2.

На площадке касания материал колеса сжат, а материал опорной поверхности растянут. При последовательном нарушении контакта в данном месте растянутые слои опорной поверхности и сжатые слои поверхности колеса в результате упругости стремятся восстановить свою первоначальную форму, что ведет к проскальзыванию поверхностных слоев контактирующих тел.



Коэффициент трения качения  $f_k$  есть коэффициент пропорциональности в уравнении Кулона, полученном им в 1821 году опытным путем,

$$T'' = f_k \frac{N}{r}, \quad (I.3)$$

где  $T''$  — сила трения качения;  
 $r$  — радиус колеса (катка).

Размерность коэффициента трения качения  $f_k$  линейная.

Коэффициентом сцепления  $\psi$  между колесом и опорной поверхностью называется отношение

$$\psi = \frac{T''}{N}. \quad (I.4)$$

Внутреннее трение возникает в объеме вещества (одного и того же тела) при относительном перемещении отдельных его частей. В первую очередь этот термин относится к жидкости (смазке), обладающей объемными свойствами (толщиной более 0,1 мкм) и разделяющей трущиеся поверхности твердых тел. Если жидкость находится между двумя движущимися друг относительно друга параллельными твердыми плоскостями (рис. 3), то сила внутреннего трения будет пропорциональна вязкости, градиенту скорости по толщине жидкости и площади поверхности скольжения

$$T = \mu \frac{dv}{dn} S, \quad (I.5)$$

где  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости;  
 $\frac{dv}{dn}$  — градиент скорости по толщине;  
 $S$  — площадь поверхности скольжения.

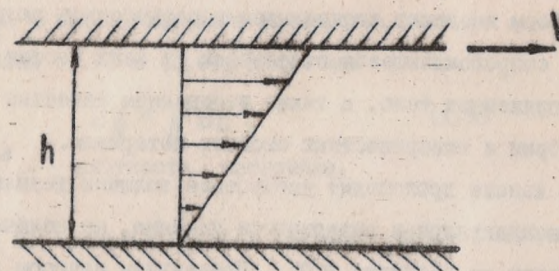


Рис. 3.

В более сложных случаях движения жидкости сила внутреннего трения определяется с использованием уравнений гидродинамики и теории подобия. Известно также явление затухания колебаний, вызванных в твердом теле, когда деформации и разрушения материалов не происходит. В этом случае упругая энергия колебаний рассеивается, превращаясь в тепло, а различные механизмы превращения упругой энергии в тепловую также называются внутренним трением.

Если рассматривать реальные случаи контактного взаимодействия поверхностей твердых тел при трении, то к понятиям внешнего и внутреннего трения необходимо подходить с одной общей позиции. Так, например, при сухом трении упруго-пластические деформации поверхностных слоев трущихся тел происходят с рассеиванием энергии и превращением ее в тепло, т.е. имеет место механизм внутреннего трения. Аналогичные явления наблюдаются при трении идеально чистых поверхностей. Схватывание поверхностей также объясняется переходом к внутреннему трению.