

Коэффициент сухого трения

А. К. Радченко, А. Г. Орёл, Л. А. Радченко

Рассмотрены методики определения коэффициента сухого трения компактных металлов, порошка металла о металлическую поверхность и порошка о порошок, а также факторы, влияющие на его величину. Коэффициент трения покоя для некоторых компактных металлов в 2 и более раз превышает коэффициент трения скольжения. Среди факторов, влияющих на трение, рассмотрены давление на трибосопряжение и температура. В сравнении с температурой давление оказывает большее влияние. Для металлов трение может быть описано двухчленным законом, в котором адгезионная составляющая, зависящая от давления, может во много раз (до 100) превосходить деформационную составляющую. Для компактного золота коэффициент сухого трения изменяется от 0,6 до 2,5. Для пары порошок—компактная поверхность коэффициент трения изменяется: железо—сталь — от 0,236 до 0,272, медь—сталь — от 0,241 до 0,444, сталь—сталь — от 0,334 до 0,400. Для пары порошок—порошок коэффициент трения изменяется: железо—железо — от 0,527 до 0,700, медь—медь — от 0,544 до 0,681, сталь—сталь — от 0,338 до 0,459. Кроме того, на коэффициент трения оказывает влияние структура и состояние металла.

Ключевые слова: коэффициент сухого трения, металлы, металлические порошки, давление, температура.

Введение

При прокатке трение играет двоякую роль. С одной стороны, наличие трения обуславливает собственно процесс прокатки, а с другой — трение влияет на энергозатраты. Повышение коэффициента трения увеличивает угол захвата и повышает производительность прокатного стана, одновременно увеличивается работа прокатки за счет необходимости преодоления возрастающих сил трения. Коэффициент трения входит в уравнения, определяющие параметры очага деформации (уравнение Экелунда—Павлова). Применительно к прокатке порошков рассматривается главным образом сухое трение. Для оценки величины трения используем коэффициент трения. Для оценки величины и влияния коэффициента трения при прокатке порошков (главным образом металлических) рассмотрим сначала коэффициент сухого трения компактных материалов и факторы, на него влияющие, а затем коэффициенты трения порошок—твердая поверхность и порошок—порошок.

Коэффициент сухого трения компактных материалов (металлов)

Рассмотрим факторы, влияющие на коэффициент сухого трения металла о металл. Согласно работе [1], на коэффициент трения главным образом влияют давление, температура и другие факторы.

Влияние давления. Сварка трением

Общая зависимость коэффициента трения от нагрузки имеет следующий характер: с увеличением нагрузки коэффициент трения сначала снижается, а затем несколько возрастает [1—3]. Для устранения влияния

оксидных пленок Ф. Боуден и Д. Тейбор исследовали влияние давления (10^{-5} —10 Н) на коэффициент трения f золота по золоту [4]. Они установили различные зависимости для разного состояния металла: для наклепанного состояния — слабая ниспадающая зависимость ($f = 0,8$ — $0,6$), для отожженных механически полированных слоев — возрастание ($1,0 \rightarrow 1,5$), а для отожженных электрополированных — скачкообразный рост при нагрузке $\sim 0,1$ Н ($1,4 \rightarrow 2,5$). К сожалению, не указана площадь образца, поэтому нельзя судить о величине контурного давления. Увеличение давления при трении может привести к схватыванию, что характерно для ряда металлов и сплавов. Явление схватывания рассматривается не только в трибологии [5—8], но и в других областях науки [9—15]. Глубокое изучение этого процесса позволило найти и использовать его положительные стороны и развить новые науки, например сварку трением [10—12].

Трение при схватывании может быть описано лишь с использованием двухчленного закона для коэффициента трения f [2, 6]:

$$f = \frac{F_d}{N} + \frac{F_a}{N} = f_d + f_a, \quad (1)$$

где F_d и F_a — деформационная и адгезионная составляющие силы трения; N — нагрузка, действующая на трибосопряжение по нормали; f_d и f_a — деформационная и адгезионная составляющие коэффициента трения.

Если, по модельным расчётам [16], величина f_d даже при очень высоких давлениях ограничена на уровне 0,44 (для статических условий, трение покоя) — 0,67 (для динамических условий, трение скольжения), то величина f_a при появлении сварки трением может быть существенно выше 1. Кроме того, при очень низких нормальных давлениях ($N \rightarrow 0$) $F_a \neq 0$ и коэффициент трения также может достигать существенных величин. Для металлов адгезионная составляющая может в 100 раз превышать деформационную составляющую и их соотношение f_a/f_d на 1—2 порядка выше, чем для других материалов: фторопластов (0,2—1), полиамидов (2—9), поликарбонатов (4—9), резины (2—3) [17].

Влияние температуры

Для разных условий трения и материалов зависимость коэффициента трения от температуры имеет различный характер. Коэффициент трения металла о металл с ростом температуры сначала несколько уменьшается, а потом возрастает [2, 18]. Например, при прокатке стали температура перегиба соответствует примерно 700 °С [19]. Коэффициент трения на резце (при резании стали ШХ15) увеличивается от 0,53 до 0,61 с ростом температуры от 400 до 590 °С, а потом снижается до 0,42 при температуре 1000 °С.

Для расчёта коэффициента трения при различных температурах прокатки С. И. Губкиным предложена формула

$$f_2 = f_1 e^{\pm \chi(t_2 - t_1)}, \quad (2)$$

где f_1 и f_2 — коэффициенты трения при температурах t_1 и t_2 ; χ — температурный коэффициент.

Знак \pm обозначает, что для разных температур зависимость имеет разное направление, однако точку перегиба необходимо определять экспериментально.

Величина коэффициента трения

Величина коэффициента трения, по определению, равна тангенсу угла наклона зависимости силы трения F от силы нормального нагружения N , действующей на трибосопряжение (закон Амонтона):

$$f = \frac{F}{N}, \quad (3)$$

или тангенсу угла наклона зависимости силы трения от суммы сил нормального нагружения и адгезии (формула (1), являющаяся математическим выражением закона Кулона). Первый закон (формула (3)) применим для различных неметаллов и умеренных сил нагружения, второй закон (формула (1)) — к материалам, склонным к взаимодействию при трении, например, как уже отмечалось, некоторым металлам и сплавам. К сожалению, экспериментальные зависимости F от N , как правило, не приводятся.

Зависимость силы трения от величины взаимного перемещения трущихся поверхностей показана на рис. 1, а. В соответствии с этой зависимостью различают силы трения покоя F_n , неполного трения скольжения F_n и скольжения F_c [20]. Величина перемещения a соответствует предельному значению предварительного смещения. При достижении максимальной величины силы трения F_n происходит так называемый срыв, характеризуемый понижением как силы трения, так и коэффициента трения. Иногда срыв переходит в автоколебательный процесс (рис. 1, б).

Дальнейшее изучение процессов, происходящих при трении, позволило выявить много отклонений от описанных законов. Так, Б. И. Костецким с сотрудниками было открыто явление структурной приспособляемости при трении [21]. Суть этого явления заключается в том, что, как отмечают авторы, для *всех* материалов, применяемых в парах трения, существует диапазон нагрузок и скоростей перемещения, в котором трение и износ на несколько порядков ниже, чем вне этого диапазона [21]. Такое положение заставило учёных иначе объяснить установленные ранее зависимости [22]. Так, Б. И. Костецкий отмечает [23], что сила трения T является не функцией нормальной нагрузки, а оператором процессов, возникающих при том или ином сочетании нормальной нагрузки N , скорости скольжения V и векторов параметра трения \bar{C} (материалов, условий среды и др.):

$$T(N) = A\{N, V, \bar{C}\}. \quad (4)$$

Существование явления структурной приспособляемости ни у кого не вызывает сомнения, однако величина эффекта и всеобщность явления остаются дискуссионными. Формула (4) является достаточно общей и по ней нельзя рассчитать границы зон структурной приспособляемости.

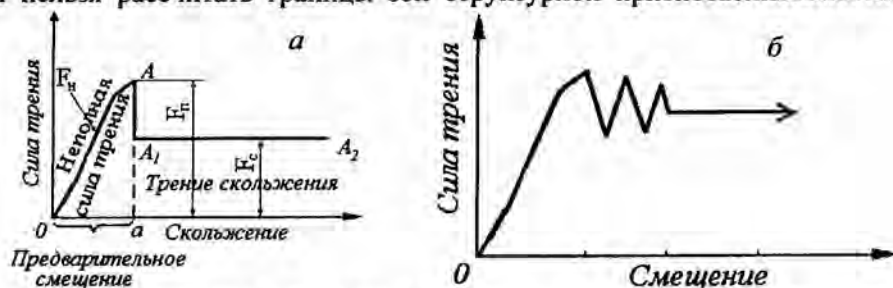


Рис. 1. Зависимости силы трения от величины перемещения поверхностей [3, с. 117] при скольжении (а) и с автоколебаниями (б).

Захарчук О. М. и Соколан К. С. отмечают [24], что поскольку на эффективный коэффициент сухого трения-скольжения в случае образования молекулярных связей значительно влияет сопротивление сдвигу обрабатываемого материала, что, в свою очередь, зависит также от гидростатического давления в зоне контакта, то f представляет собой не константу, а функционал. Для большинства материалов этот функционал имеет вид двухчленной зависимости типа (1)

$$f = \frac{l}{q_{гс}} + f_0, \quad (5)$$

где f_0 — молекулярный коэффициент трения-скольжения обрабатываемого материала по инструменту; l — параметр сдвига при бесконечно большом гидростатическом давлении в зоне контакта; $q_{гс}$ — гидростатическое давление в зоне контакта.

Анализ формулы (5) показывает, что параметр α не имеет чёткого физического смысла, непонятна также необходимость привлечения бесконечно большого гидростатического давления. Как показал расчёт [25], силы молекулярного (ван-дер-ваальсового) взаимодействия на несколько порядков меньше сил атомарного (химического) взаимодействия, поэтому формула (5) не может отражать реальных процессов, происходящих при трении, например, металлов.

К сожалению, в современной справочной литературе [26], равно как и в учебной [20], рядом с величиной коэффициента трения не указывают диапазон параметров трения и условий, которым он отвечает, а также интервалы параметров существования структурной приспособляемости. Лишь в отдельных справочных изданиях приводят зависимости коэффициента трения от параметров процесса с указанием условий, в которых они получены [27]. Конструкторы, технологи и другие специалисты до сих пор используют приближенные величины коэффициента трения [28—31]. Справочные значения коэффициента сухого трения для компактных металлов изменяются главным образом от 0,16 до 0,27, а для других материалов коэффициент сухого трения может достигать 0,83 [32].

Коэффициент сухого трения порошков о компактную поверхность (внешнее трение порошков)

Методики определения коэффициента трения

Методики определения коэффициента трения порошка о твёрдую поверхность (коэффициента внешнего трения порошка) [33] схожи с методиками определения коэффициента трения двух твёрдых тел [34]. Большинство методов, которые используют для определения коэффициента внешнего трения порошка, можно условно разделить по движению контртела (твёрдая поверхность) на поворотные [35—38] и прямолинейные, с нижним и верхним расположением контртела [33]. Поворотные устройства состоят из вращающегося диска, на котором расположены две цилиндрические ёмкости без дна, заполненные порошком [33], вращающейся чаши с порошком, на который установлен диск, насаженный на тот же вал, что и чаша [38, 39], и пресс-формы с круглым пуансоном, к которому прикладывается давление [37]. Во всех описанных случаях измеряют вращательный момент, необходимый для поворота диска, чаши

или пуансона. Есть и специальные методы определения коэффициента трения: многократное прессование в пресс-форме образцов разной высоты либо в пресс-форме различного диаметра с фиксированием плотности и давления прессования и последующего расчёта коэффициента трения [40], измерение давления выталкивания при выталкивании спрессованной заготовки из пресс-формы и последующий расчёт коэффициента трения [41] и др.

Зависимости коэффициента трения от параметров испытания и других факторов

Согласно Е. Б. Ложечникову с сотрудниками, использовавшим оригинальную методику определения коэффициента трения [36], его величина для порошка железа марки ПЖ1М2 в зависимости от прикладываемого давления (в интервале 0,068—0,35 кПа) изменялась от 0,163 до 0,152, а для того же порошка после вальцовки — от 0,215 до 0,218. Для шихты твердого сплава ВК-6 f изменялся от 0,24 до 0,28, а после вальцовки — от 0,272 до 0,354. Шероховатость поверхности контртела не указана.

Мальцев М. А. и Николаев А. И. также при малых давлениях (0,07—0,5 кПа) изучали влияние на коэффициент внешнего трения порошков шероховатости (от 7 до 9 класса чистоты или R_a уменьшалась от 6,3 до 0,8 мкм), скорости вращения контртела (от 6 до 21 об/мин) и гранулометрического состава порошков [39]. Изменение шероховатости диска и скорости вращения чаши почти (до 3%) не повлияли на коэффициент трения и он для следующих порошков составлял: Fe — 0,37; Ti — 0,46; Cr — 0,465; X18H9T — 0,38; X17H2 — 0,385. Уменьшение размера частиц от 600 до 50 мкм для порошка X18H15 привело к росту коэффициента трения (от 0,345 до 0,46) на 25%. Аналогичная зависимость наблюдалась и для порошков титана и нержавеющей стали X18H9T, полученных совместным восстановлением, и лишь для вихревого порошка этой стали коэффициент трения практически не зависел от размера частиц.

Спиновым В. А. изучено влияние как давления (0,1—45 кПа), так и схемы испытания (прямолинейная с верхним и нижним расположением контртела) [33]. Он установил, что при схеме испытания с нижним расположением контртела в исследованном диапазоне давлений коэффициент трения для железного порошка не изменяется и равен 0,32. При схеме испытания с верхним расположением контртела коэффициент трения с увеличением давления уменьшается от 0,55 до 0,33, стабилизируясь, примерно при 20 кПа.

Чайников Н. А. использовал поворотную методику [37] с пуансоном шероховатостью 9—10 класса и изучал изменение коэффициента трения порошков в зависимости от давления прессования (от 10 до 600 МПа) [42, 43]. Для порошков железа марки ПЖ3М3, меди марки ПМС-2 и олова марки ПО2 коэффициенты трения с ростом давления, соответственно, понижались от 0,35 до 0,26, от 0,35 до 0,24 и от 0,46 до 0,35, причем стабилизация нижней величины коэффициента трения наступала при давлениях выше 150—200 МПа. Для описания зависимости коэффициента трения от давления прессования получена следующая формула [43]:

$$f = \frac{\tau_0 \zeta}{P_{уд}} + \delta + \operatorname{tg} \psi, \quad (6)$$

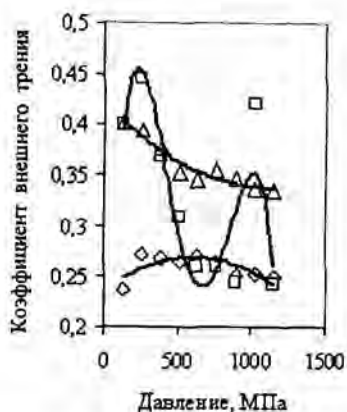


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения порошков железа (\diamond), меди (\square) и стали (Δ) о стальную поверхность от нормального давления [45]; — — полиномиальная зависимость.

где τ_0 — прочность на срез молекулярных связей; ζ — относительная фактическая площадь контактов порошка с шероховатой поверхностью; $p_{уд}$ — удельное давление прессования; δ — коэффициент, характеризующий увеличение проч-

ности на срез молекулярных связей с повышением нормального давления; ψ — средний угол наклона боковых сторон микровыступов шероховатой поверхности порошка. Численные значения τ_0 и δ приводятся в справочной литературе [44, с. 68]. Значения ψ для медного и оловянного порошков автор берёт 7 и 15°, хотя, как известно, форма частиц у порошка меди дендритная, а у олова — близкая к сферической.

Жданович Г. М. при определении коэффициента трения железного, медного и стального порошков о пуансон в интервале давлений 127—1146 МПа получил монотонную зависимость лишь для порошка стали (рис. 2) [45]. Коэффициент трения для железа изменялся в интервале 0,236—0,272, для меди — от 0,241 до 0,444, для стали — от 0,334 до 0,400. Зависимость для железа имела выпуклость, для меди она была волнообразной, для стали — ниспадающей.

Сивов А. В. и другие установили, что время скольжения диска о порошок (10—120 с) также влияет на коэффициент трения [38]. Так, с увеличением времени скольжения коэффициент трения железного порошка уменьшается от 0,48 до 0,38, медного — от 0,47 до 0,46, никелевого — от 0,49 до 0,45, нержавеющей стали — от 0,45 до 0,39 и нихрома — от 0,42 до 0,37.

Коэффициент сухого трения порошка о порошок (внутреннее трение порошков)

Методики определения

Методики определения коэффициентов внутреннего трения порошков унаследованы главным образом из механики сыпучих сред [46—48] и заключаются в сдвиге нагруженного порошка. Существуют также методики, основанные на исследовании параметров сыплющегося порошка, в частности в барабане [49]. Вообще методики определения коэффициентов трения порошок—порошок и порошок—твёрдая поверхность близки (верхние или нижние контртела могут быть либо порошком, либо твёрдым телом) [49]. Коэффициент внутреннего трения определяют также по углу естественного откоса порошка.

Зависимости от параметров испытания и других факторов

Из параметров испытания изучали влияние на коэффициент внутреннего трения нормального давления [45], а из свойств порошков — их химического состава, относительной насыпной плотности [50] и размера частиц [51].

Бальшин М. Ю. установил [50], что коэффициент внутреннего трения порошка Cu зависит от его насыпной плотности и с её уменьшением от 0,493 до 0,093 (в относительных единицах) коэффициент трения увеличивается от 0,65 до 2,23*, тогда как коэффициент внешнего трения порошка Cu по медной поверхности составляет 0,1—0,2 (то есть различие в 3—15 раз).

Жданович Г. М. изучал зависимости коэффициентов внутреннего трения железного, медного и стального порошков от величины нагружения (в интервале давлений 38—344 МПа) и получил немонотонные зависимости (рис. 3) [45]. Коэффициент трения для железа изменялся в интервале 0,527—0,700, для меди — от 0,544 до 0,681, для стали — от 0,338 до 0,459.

Как отмечают японские ученые [51], коэффициент внутреннего трения возрастает с уменьшением размера частиц для грубых порошковых материалов. Для тонких порошковых материалов коэффициент внутреннего трения и сила когезии значительно больше, чем для грубых. Текучесть может быть выражена для грубых порошковых материалов через коэффициент внутреннего трения, а для тонких — через коэффициент внутреннего трения и силу когезии.

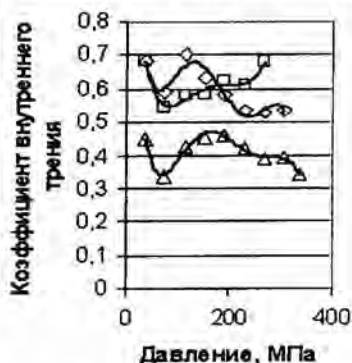
Значения коэффициентов трения

По данным В. С. Каташинского и Н. В. Рухайло, средний коэффициент внутреннего трения для железного и медного электролитического порошков составляет 0,53 и 0,45 соответственно [52]. Ими измерены коэффициенты внутреннего трения сферического, карбонильного и электролитического никелевых порошков, которые составили 0,31, 0,49 и 0,53 соответственно.

Коэффициент трения пары порошок—порошок, как правило, выше коэффициента трения пар порошок—твердая поверхность, твердая поверхность—твердая поверхность для материалов одного химического состава. Как отмечает М. Ю. Бальшин, коэффициент внутреннего трения порошка резко отличается от коэффициента внешнего трения [50].

В табл. 1 приведены коэффициенты трения некоторых компактных металлов и коэффициенты внешнего и внутреннего трения соответствующих порошков, позаимствованные из различных источников. Эти значения имеют лишь ознакомительный характер, так как определялись в различных условиях, которые, как правило, не указаны [2, 29, 53, 54]. Только в источнике [55] указаны условия испытания: коэффициенты трения покоя (μ) и скольжения (μ_s) определялись для сухих поверхностей на воздухе, при комнатной температуре и относительной влажности 50%

Рис. 3. Зависимости коэффициента внутреннего трения порошков железа (\diamond), меди (\square) и стали (Δ) от величины прикладываемого нормального давления [45]: — — полиномиальная зависимость.



* Рассчитывался по углу естественного откоса и имеет наибольшее значение.

Т а б л и ц а 1. Коэффициенты трения компактных металлов f и порошков (п — покоя, с — скольжения)

Металлы трущейся пары	Компактные материалы		Компактный материал— порошок	Порошок— порошок	Примечание относится к столбцу 5*
	на воздухе	в вакууме			
Медь—медь	0,7 [2] 0,55с [54] 1,0п [53]	4,8 [2]	0,1—0,2 [50]	0,65 [50] 1,11 [50] 1,66 [50] 2,23 [50] 0,58 [51] 0,73 [51]	ОНП = 0,493 ОНП = 0,265 ОНП = 0,169 ОНП = 0,093 ОНП = 0,174 ОПУ = 0,239
Медь—сталь	0,27 [20] 0,29с [29] 1,05п [29] 0,36с [55] ¹ 0,53п [55] ¹	—	0,35—0,24 [42] 0,24—0,44 [45]	—	
Железо— железо	0,19 [20] 0,51 [54]		0,24—0,27 ² [45]	0,53—0,70 [45] 0,65 [51] 0,87 [51]	ОНП = 0,25 ³ ОПУ = 0,28 ³
Никель— никель	0,50п [55] 0,7—1,1п [53] 0,53с [53]	5—8 [17] 4,6 [2]	—	0,53 [51] 0,87 [51] 0,31 [51] 0,51 [51]	ОНП = 0,36 ⁴ ОПУ = 0,41 ⁴ ОНП = 0,390 ⁵ ОПУ = 0,42 ⁵
Сталь— сталь	0,8п [53] 0,74п [55] 0,57с [55]	0,26 ⁶	0,33—0,40 [45]	0,34—0,46 [45]	
Алюминий— алюминий	0,57п [54] 1,35п [53]		0,61—0,84 [51] ⁷ 0,36с [51] ⁸	2,23 [50]	ОНП = 0,093
Алюминий— сталь	0,47с [29] ¹ 0,61п [29] ¹				
Титан— железо	0,49п [54]				
Титан— титан	55п [54]		0,29—0,31 [39] ⁹ 0,35—0,50 [39] ¹⁰	0,70 [51] ¹¹ 1,11 [51] ¹¹	ОНП = 0,193 ОПУ = 0,264

*ОНП — относительная насыпная плотность; ОПУ — относительная плотность утряски. ¹Низкоуглеродистая сталь. ²Железный порошок по стали. ³Порошок марки ПЖ1М2. ⁴Порошок никелевый электролитический. ⁵Порошок никелевый распыленный. ⁶Сталь 40Х13 по стали 12Х18Н10Т, вакуум $6,5 \cdot 10^{-4}$ Па, температура 20 °С. ⁷Порошок марки ПА-1. ⁸Алюминиевые гранулы, прокатка при температуре 400—500 °С. ⁹Порошок титановый электролитический, ОНП = 0,30—0,35. ¹⁰Порошок титановый марки ИПМ-1А, ОНП = 0,267. ¹¹Порошок титановый, ОНП = 0,193.

(к сожалению, даже в этом случае не указаны интервал нормальных давлений, шероховатость поверхностей и их химическое состояние, а именно степень окисленности).

Таблица 2. Разность Δ коэффициентов трения покоя f_n и скольжения f_c

Металлы трущейся пары	Компактные материалы		$\Delta = f_n - f_c$	$\Delta f_n, \%$	$\Delta f_c, \%$	Источник
	покоя f_n	сколь- жения f_c				
Медь—медь	1,0	0,55	0,45	45	81,82	[53, 54]
Медь—сталь	1,05	0,29	0,76	72,38,	262,07	[29, 55]
	0,53	0,36	0,17	32,08	47,22	
Никель— никель	1,1—	0,53	0,57—	51,	107,55—	[53]
	0,7			82—		
Сталь—сталь	0,74	0,57	0,17	22,97	29,82	[55]
Алюминий— сталь	0,61	0,47	0,14	22,95	29,79	[29]

Самый высокий коэффициент трения покоя у рассмотренных пар компактных металлов принадлежит паре алюминий—алюминий (1,35), самый низкий — паре титан—железо (0,49). Значения коэффициентов сухого трения покоя и скольжения приведенных пар компактных металлов существенно различаются. Коэффициенты трения покоя больше коэффициентов трения скольжения.

В табл. 2 приведены разности между коэффициентами трения покоя и трения скольжения, а также их относительные величины. Иногда эти разницы превышают величину самого коэффициента трения скольжения (медь—сталь, никель—никель). Данный факт объясняется формированием и разрывом как механических, так и химических связей и возникновением автоколебаний [3]. Кроме того, сами значения некоторых коэффициентов трения компактных металлов, приводимые различными авторами, значительно различаются (медь—сталь, никель—никель и др.). Коэффициенты трения порошка о компактную поверхность не превышают величину коэффициентов трения покоя компактных металлов, а коэффициенты трения порошка о порошок могут быть выше f_n компактных металлов. Изложенное можно объяснить большим вкладом механической составляющей в случае порошков.

Бальшиным М. Ю. получены очень высокие коэффициенты трения порошка о порошок для меди, обусловленные методом их определения (коэффициент трения принимается равным тангенсу угла естественного откоса) [50]. Для лёгких медных порошков коэффициент трения больше 2. Остальные значения коэффициентов трения не превышают 0,7.

Выводы

В коэффициенте сухого трения скольжения выделяют адгезионную и деформационную составляющие. Адгезионная составляющая для неметаллических материалов может быть меньше либо в несколько раз (почти на порядок) превышать деформационную составляющую, тогда как для металлических пар трения это превышение может достигать двух порядков. Это отличие металлов от других материалов обуславливает значительное отклонение их коэффициента трения от среднего значения при изменении условий (режимов) трения.

Между коэффициентами сухого трения покоя и скольжения металлических пар существует довольно большая разница. Для рассмотренных

пар трения разность составляет 0,17—0,76, причём она может в 2 раза превосходить величину сухого трения скольжения соответствующей пары.

Коэффициент трения покоя может быть определён лишь при достижении максимальной (предельной) силы трения покоя. На участке, где действует неполная сила трения покоя, коэффициент трения не может быть определён и эту силу нельзя использовать для его расчёта.

Существуют различные трактовки явления изменения коэффициента трения при переходе от состояния покоя к состоянию скольжения. Это — влияние инерционных сил, возникновение явления автоколебания, предполагается также, что природа этого явления связана с эффектами упругости.

1. *Кузнецов В. Д.* Физика твердого тела. Т. IV. Материалы по физике внешнего трения, износа и внутреннего трения твердых тел. — Томск: Полиграфиздат, 1947. — 542 с.
2. *Кразельский И. В.* Трение и износ. — М.: Машиностроение, 1968. — 480 с.
3. *Справочник по триботехнике* / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. В 3-х т. Т. 1. Теоретические основы. — М.: Машиностроение, 1989. — 400 с.
4. *Боуден Ф. П.* Трение и смазка / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. — М.: Машгиз, 1960. — 450 с.
5. *Гельман А. С.* О природе сварки трением // Автоматическая сварка. — 1965.
6. *Дмитриченко М. Ф.* Структурні зміни поверхневих і приповерхневих шарів металу при терті / М. Ф. Дмитриченко, А. О. Глухонець // Вісник ЖДТУ. — 2010. — № 2 (53). — С. 45—47.
7. *Носовский И. Г.* О механизме схватывания металлов при трении // Трение и износ. — 1993. — 14, № 4. — С. 19—24.
8. *Хлебалин Н. А.* Библиотека моделей трения в SIMULINK (опыт создания и использования) / Н. А. Хлебалин, А. Ю. Костиков // Труды Второй Всерос. науч. конф. "Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB". — М.: ИПУ РАН, 2004. (на компакт-диске, ISBN 5-201-14971-5). — С. 1611—1633.
9. *Борц Б. В.* Исследование процессов сварки многослойных структур из кристаллитов различного химического состава с помощью горячей прокатки в вакууме / [Б. В. Борц, А. Ф. Ванжа, А. Т. Лопата и др.] // Вопросы атомной науки и техники. — 2005. — 88, № 5. — С. 156—158.
10. *Бринза В. Н.* Исследование пластической деформации биметалла титан—сталь при прокатке: Автореф. ... канд. техн. наук. — М., 1962. — 19 с.
11. *Бульчев В. В.* Теоретические предпосылки и практическая реализация электроконтактной приварки проволоки с притормаживанием роликового электрода // Наука и образование. — 2011. — № 6. — С. 1—11. (Электронный журнал : <http://technomag.edu.ru/doc/188555.html>).
12. *Семенов А. П.* Исследование схватывания металлов при совместном пластическом деформировании. — М.: Изд-во Академии наук СССР, 1953. — 120 с.
13. *Рибиндер П. А.* О природе схватывания твердых тел. — М.: Наука, 1968. — 59 с.
14. *Sylvia H. Larsson* kinematic wall friction properties of reed canary grass powder at high and low normal stresses // Powder Technology. — 2010. — 198. — P. 108—113.
15. *Yong-Ming Tien.* Wall friction measurement and compaction characteristics of bentonite powders / [Yong-Ming Tien, Po-Lin Wu, Wei-Hsing Huang et al.] // Ibid. — 2007. — 173. — P. 140—151.
16. *Гогаев К. А.* Механические свойства порошкового титана на разных стадиях его получения. V. Свойства титановой ленты, полученной прокаткой порошка / [К. А. Гогаев, В. А. Назаренко, В. С. Воропаев и др.] // Порошковая металлургия. — 2009. — № 11/12. — С. 51—59.

17. *Инженерный справочник. Коэффициент трения скольжения пар металлов, дегазированных в вакууме* [Электронный ресурс] — Режим доступа: URL: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/Frication/Sliding Friction19>— Загол. с экрана.
18. *Клементьев Н. М.* Температурная зависимость внешнего трения металлов и неметаллов в газах и в вакууме. — Воронеж, 1969. — 135 с.
19. *Василен Я. Д.* Теория подовожной прокатки / Я. Д. Василен, О. А. Минаев. — Донецк : УНІТХ, 2009. — 488 с.
20. *Мышкин Н. К.* Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. — М. : Физ.-мат. лит., 2007. — 368 с.
21. *Поверхностная прочность материалов при трении* / Под ред. проф. Б. И. Костецкого. — К. : Техніка, 1976.
22. *Костецкий Б. И.* Механо-химические процессы при граничном трении / Б. И. Костецкий, М. Э. Натансон, Л. И. Бершадский. — М. : Наука, 1972. — 169 с.
23. *Костецкий Б. И.* Трение, смазка и износ в машинах. — К. : Техника, 1970.
24. *Захарчук О. М.* Аналіз методів розрахунку сил тертя під час пластичного деформування / О. М. Захарчук, К. С. Соколан // http://www.rusnauka.com/5_NITSB_2009/Tecnic/41221.doc.htm
25. *Гогаев К. А.* Формование порошковых систем / К. А. Гогаев, А. К. Радченко. — Донецк : Ноулідж, 2011. — 477 с.
26. *Трение и смазки при обработке металлов давлением* : (Справ. изд.) / [А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик]. — М. : Metallurgia, 1982. — 312 с.
27. *Справочник по триботехнике*. В 3-х т. Т. 3. Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств. Методы и средства триботехнических испытаний / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. — М. : Машиностроение, 1992. — 730 с.
28. *Грудев А. П.* Внешнее трение при прокатке. — М. : Metallurgia, 1973. — 287 с.
29. *Инженерный справочник. Коэффициенты трения покоя и скольжения для пар наиболее распространённых материалов* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/Frication/FrictionToVariousPairs/> — Загол. с экрана.
30. *Крагельский И. В.* Коэффициенты трения: (Справ. пособие) / И. В. Крагельский, И. Э. Виноградова. — М. : ГН-ТИМЛ, 1955. — 188 с.
31. *Крагельский И. В.* Коэффициенты трения / И. В. Крагельский, И. Э. Виноградова. — М. : Машгиз, 1962. — 220 с.
32. *Кошкин Н. И.* Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. — М. : Наука, 1966. — С. 37.
33. *Спинов В. А.* К исследованию сдвига на контакте "сыпучее тело—опорная поверхность": Прокатка порошков / В. А. Спинов, Г. А. Виноградов, Р. Л. Оганян // Изв. АН Арм. ССР. Сер. техн. наук. — 1971. — 24, № 2. — С. 36—47.
34. *Савельев И. В.* Курс общей физики. — М. : 1970. — 1. — С. 121.
35. *Бесчастная Н. В.* Устройство для определения коэффициента трения дисперсных материалов / [Н. В. Бесчастная, Ю. В. Трухан, Ю. М. Шуляков, С. А. Власов] // Порошковая металлургия. — Краснодар : Краснодар. политехн. ин-т, 1979. — С. 63—66.
36. *Ложечников Е. Б.* Некоторые свойства порошков, определяющие их прокатываемость / Е. Б. Ложечников, С. С. Клименков, А. М. Кожевников // Metallurgia. Машины и технология обработки металлов давлением. — Минск : Белорус. политехн. ин-т. — 1974. — Вып. 5. — С. 56—62.
37. *Жданович Г. М.* Соппротивление порошковых материалов. — Мн. : Бестпринт, 1999. — 340 с.
38. *Бошин С. Н.* Крупногабаритные подшипники скольжения из порошкового проката / [С. Н. Бошин, А. Н. Николаев, А. В. Сивов и др.]. — Ярославль : Яросл. межотрасл. произв. хозрасч. объедин. "Вторчермет", 1977. — 180 с.

39. Мальцев М. В. Исследование внешнего трения металлических порошков в области низких давлений / М. В. Мальцев, А. Н. Николаев // Порошковая металлургия. — 1969. — № 7. — С. 73—77.
40. Кунин Н. Ф. Внешнее трение при прессовании порошкообразных материалов / Н. Ф. Кунин, Б. Д. Юрченко // Там же. — 1968. — № 2. — С. 13—20.
41. Степанов С. И. О давлении выталкивания прессовок из железного порошка и стальной стружки // Там же. — 1968. — № 7. — С. 22—24.
42. Чайников Н. А. Исследование коэффициента внешнего трения при прессовании металлических порошков // Там же. — 1979. — № 10. — С. 35—38.
43. Чайников Н. А. Расчетный коэффициент внешнего трения при прессовании металлических порошков // Там же. — 1981. — № 5. — С. 11—15.
44. Трение, изнашивание и смазка / И. В. Крагельский и др. — М. : Машиностроение, 1978, кн. 1. — 200 с.
45. Жданович Г. М. Исследование внешнего и внутреннего трения при прессовании металлических порошков // Тр. VII Всесоюз. науч.-техн. конф. по порошковой металлургии. — Ереван, 1964. — С. 320—322.
46. Барон Л. И. и др. Характеристики трения горных пород. — М. : Наука, 1967. — 208 с.
47. Классен П. В. Основы техники гранулирования (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / П. В. Классен, И. Г. Гринаев. — М. : Химия, 1982. — 272 с.
48. Masaki S. Compacting metal powder differential speed rolling / S. Masaki, T. Hirohata, Q. V. Zhu // Adv. Technol. Plasticity. — 1993. — VI. — P. 182—187.
49. Буланов В. Я. Диагностика металлических порошков / [В. Я. Буланов, Л. И. Кватер, Т. В. Долгаль и др.]. — М. : Наука, 1983. — 280 с.
50. Бальшин М. Ю. Порошковое металловедение. — М. : Металлургиздат, 1948. — 332 с.
51. Keijiro T. Реологические исследования порошкообразных материалов / Т. Keijiro, М. Kej, О. Masashi // Фунсай Mikromeritics. — 1980. — № 25. — С. 14—20.
52. Каташинский В. П. Угловые параметры и опережение при прокатке гранул алюминия и его сплавов / В. П. Каташинский, Г. А. Виноградов, Г. Я. Калущкий // Порошковая металлургия. — 1978. — № 11. — С. 15—18.
53. The Engineering Toolbox. Friction and coefficients of friction [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html. — Загол. с экрана.
54. RoyMech. Coefficient of friction [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.roytech.co.uk/Useful Tables/Tribology/co of frict.htm>. — Загол. с экрана.
55. PhysLink Physics and astronomy online. Science 1995. Coefficients of friction [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.physlink.com/Reference/Friction Coefficients.cfm>. — Заголовок с экрана.

Кoeffициент сухого трения

А. К. Радченко, А. Г. Орел, Л. А. Радченко

Розглянуто методики визначення коефіцієнта сухого тертя компактних металів, порошку металу о металеву поверхню і порошку о порошок, а також фактори, що впливають на його величину. Коефіцієнт тертя спокою для деяких компактних металів в 2 і більше разів перевищує коефіцієнт тертя ковзання. Серед факторів, що впливають на тертя, розглянуто тиск на трибоспряження і температура. У порівнянні з температурою тиск має більший вплив. Для металів тертя може бути описане двочленним законом, в якому адгезійна складова, що залежить від тиску, може у багато разів (до 100) перевершувати

деформаційну складову. Для компактного золота коефіцієнт сухого тертя змінювався від 0,6 до 2,5. Для пари порошок—компактна поверхня коефіцієнт тертя змінювався: залізо—сталь — від 0,236 до 0,272, мідь—сталь — від 0,241 до 0,444, сталь—сталь — від 0,334 до 0,400. Для пари порошок—порошок коефіцієнт тертя змінювався: залізо—залізо — від 0,527 до 0,700, мідь—мідь — від 0,544 до 0,681, сталь—сталь — від 0,338 до 0,459. Крім того, коефіцієнт тертя залежить від структури та стану металу.

Ключові слова: коефіцієнт сухого тертя, метали, металеві порошки, тиск, температура.

Coefficient of dry friction

A. K. Radchenko, A. G. Orel, L. A. Radchenko

This review covers the methodology for determining the coefficient of dry friction compact metal powder of metal on metal surface and the powder of the powder, and the factors of affecting its value. The coefficient of static friction for some compact metal in 2 or more times the coefficient of sliding friction. Among the factors influencing the friction considered tribounit pressure and temperature. Compared to the temperature, the pressure has a greater impact. For metals, the friction can be described by the binomial law, in which the adhesive component, which depends on the pressure, can be many times (up to 100) are superior to the strain component. For a compact gold dry friction coefficient varies from 0,6 to 2,5. For a pair of powder — a compact surface friction coefficient varied: Iron—Steel — from 0,236 to 0,272, copper—steel — from 0,241 to 0,444, steel—steel — from 0,334 to 0,400. For a pair of powder—powder friction changed: iron—iron — from 0,527 to 0,700, copper—copper — from 0,544 to 0,681, steel—steel — from 0,338 to 0,459. Besides the friction coefficient depends on the structure and state of the metal.

Keywords: coefficient of dry friction, metals, powders, pressure, temperature.