

МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

В. А. СПИНОВ, Г. А. ВИНОГРАДОВ, Р. А. ОГАНЯН

К ИССЛЕДОВАНИЮ СДВИГА НА КОНТАКТЕ „СЫПУЧЕЕ ТЕЛО — ОПОРНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ“

1. Некоторые общие положения

Сведения о механизме сдвига на контакте „сыпучее тело — опорная поверхность“ представляют интерес в различных отраслях инженерного знания. Укажем например, на порошковую металлургию. В частности, в прокатке порошков такие сведения позволяют оценить протяженность области улаотнения очага деформации, транспортирующую способность прокатных валков и др.

Весьма важно знать отношение сдвигающего усилия T к действующей на контакт нормальной нагрузке P , которое назовем коэффициентом сдвига. В физике трения [1] именно так определяется коэффициент трения. Поэтому в дальнейшем применительно к контакту „сыпучее тело — опорная поверхность“ понятия коэффициент сдвига и коэффициент трения будем считать тождественными. Такая трактовка коэффициента сдвига фактически принята в механике сыпучих сред [2] и прокатке порошков [3, 4], причем, коэффициент сдвига (трения) рассматривается как константа совокупности технологических свойств порошка, природы материала и частоты обработки опорной поверх-

Таблица 1

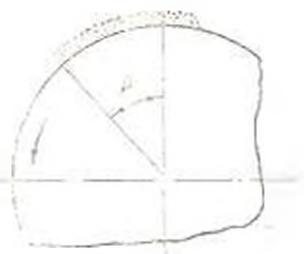
Наименование пар трения		Значения μ	
		по данным работ [5]	По данным авторов, полученным по методике работ [6]
Смещение шарошечной пары опорная поверхность	порошок стали IX18H11 совместно с постановочными, $\rho_{\text{ш}} = 1,95 \text{ г/см}^3$	0,38	0,53—1,43
	порошок железный Сулинского завода, $\rho_{\text{ш}} = 2,90 \text{ г/см}^3$	0,38	0,60—1,73
	порошок титановый марки ИМП-1А, $\rho_{\text{ш}} = 1,2 \text{ г/см}^3$	0,46	0,75— ∞

* $\rho_{\text{ш}}$ — плотность насыпной порошковой массы.

ности. В том, что подобный подход весьма упрощен, убедимся на следующем примере.

Зафиксируем произвольные пары трения, например, некоторые из тех, для которых в работе [5] приведены численные значения коэффициента трения μ (см. табл. 1), и рассмотрим предельное равновесие тонких (0,5—1 мм) слоев выбранных нами порошков на цилиндрической поверхности прокатного вала (рис. 1). Материал вала и чистота обработки его поверхности пусть соответствуют выбранным в табл. 1. По Г. И. Аксенову [6] тангенсы углов β , фиксирующих передний фронт слоя относительно вертикальной оси вала, будут равны искомым коэффициентам трения. Сравнивая полученные экспериментальные данные с имеющимися в литературе (см. табл. 1), убеждаемся в их неопровержимости. Итак, представление о коэффициенте трения как о константе трущейся пары экспериментально не подтверждается.

Рис. 1. Предельное равновесие сыпучего тела на цилиндрической привальной поверхности (стрелкой показано направление поворота вала)



Подобная ситуация совершенно естественна в теории трения [1]. В частности, именно об этом говорит факт увеличения коэффициента трения пары «порошкообразный минерал—опорная поверхность» с уменьшением размера частиц порошка [7]. Как можно убедиться из [4], этот факт неизвестен исследователям трения применительно к прокатке порошков.

Остановимся предварительно на некоторых особенностях механизма трения из контакте «сыпучее тело—опорная поверхность». Визуальное наблюдение сдвига свободно насыпанных порошков относительно опорной поверхности позволяет утверждать, что мы имеем дело с одновременным протеканием процессов качения с проскальзыванием и чистого скольжения частиц, составляющих сыпучее тело. Такое утверждение справедливо как для весьма шероховатых опорных поверхностей (например, грубо строганная сталь), так и для достаточно гладких (сталь шлифованная). Небольшая роль собственно качения частиц сыпучего тела в процессе сдвига позволяет трактовать последний как скольжение. Учет явления качения частиц при этом может носить характер поправки.

При отыскании функции коэффициента трения μ будем пренебрегать его деформационной составляющей, а аналитическое представление адгезионной составляющей трактовать в форме Б. В. Дерягина [8]:

$$\mu(P) = \mu_0 + \mu_1 \frac{S_c(P)}{P} \quad (1)$$

или же

$$\mu(p_0) = \mu_0 + \frac{\mu_1}{p_0} \quad (1a)$$

где μ_0 и μ_1 — константы пары трения; S_c — фактическая площадь контакта; p_0 — фактическая интенсивность распределения P (фактическое давление на контакт).

Согласно [9] связь p_0 и P представляема в виде:

$$p_0 = \zeta P^{\chi-1} \quad (2)$$

где ζ и $\chi \in \left[\frac{2}{3}, 1 \right]$ — константы пары трения и характера контакта, сле-

довательно, функция μ может быть тождественной константой $\left(\mu = \mu_0 + \frac{\mu_1}{p_0} \right)$ — где p_0 — предел структурной прочности сыпучего тела в об-

ласти контакта) — лишь при $\chi = 1$ (случай пластического характера контакта). В общем же случае ($\chi < 1$) функция μ должна быть убывающей с непустой областью монотонности и принимающей постоянные значения лишь при больших l . Интересующим нас объектом можно сопоставить, как мы уже убедились, по крайней мере, 2 существенно различающихся численных значения μ . Этот факт не позволяет пластический характер контакта рассматривать для них как единственно возможный.

В прикладном смысле представление функции μ более удобно в терминах интенсивности нормальной нагрузки, однако, ввиду известных затруднений при оценке величины S_c [1,9] формула (1a) оказывается практически мало пригодной. Будем поэтому исходить из номинальной S_n площади контакта, являющейся, как правило, константой эксперимента и искать функцию $\mu(P)$ в классе непрерывных функций в виде:

$$\mu(p_0) = \mu^* + \frac{h(p_0)}{p_0} \quad (3)$$

где $p_0 = \frac{P}{S_n}$ — номинальная интенсивность P (номинальное давление на контакт); μ^* — некоторая константа [$\mu^* > \mu_0$ в формулах (1) и (1a)]; $h(p_0)$ — медленно возрастающая в сравнении с p_0 неотрицательная функция. Чтобы в (3) был сохранен физический смысл формул (1) и (1a) при проведении эксперимента необходимо соблюсти условие:

$$\operatorname{sgn} \Delta p_0 = \operatorname{sgn} \Delta p_1 \quad (4)$$

где Δp_0 и $\Delta p_0'$ — приращение соответствующих интенсивностей нагрузки P , по крайней мере, на некотором непустом множестве $\{p_0\}$.

Однозначность представлений (1) и (3) для конкретных условий эксперимента предполагает независимость функции μ от условий нагружения контакта. Это связано с тем, что по И. В. Крагельскому [1] гистерезис $S_0(P)$ пренебрежимо мал. Для интересующих нас объектов это утверждение не является очевидным и требует специального исследования. В общем случае следует ожидать соблюдения неравенства

$$\mu(p_0) \leq \mu(p_0, p_{\max}) \quad (5)$$

где μ^+ и μ^- — функции коэффициента трения соответственно только при нагружении контакта и нагружении контакта до $p_{\max} > p_0$ и последующем его разгрузении до p_0 . Естественно, что каждому значению p_0 может в последнем случае предшествовать нагружение до произвольного $p_{\max} > p_0$ и, следовательно, функция μ^+ , строго говоря, не может быть однозначной. Если же в соотношениях (1) и (3) под μ понимать μ^+ , то и тогда однозначность функции коэффициента трения может быть достигнута лишь при одинаковой длительности неподвижного контакта, обеспечивающей идентичность его реологического поведения [1]. Таким образом, время t должно быть введено в (1) и (3) в качестве параметра.

До сих пор мы анализировали поведение функции μ лишь в случае трения покоя. Кинетическое (по терминологии Б. В. Дерягина) трение в общем случае имеет более сложную природу. Для рассматриваемых нами объектов такое различие, однако, может быть сведено к влиянию одного лишь времени t неподвижного контактирования. Это объясняется тем, что действие всех иных факторов, влияющих на функцию коэффициента трения через скорость $v_{\text{ск}}$ относительного скольжения на контакте может быть представлено через влияние температуры контакта [1]. Но именно температурным фактором мы вправе пренебречь в поставленной нами задаче. Следовательно, функция коэффициента кинетического трения должна мажорироваться функцией коэффициента трения покоя, т. е. удовлетворять соотношению

$$\sup \mu(p_0, v_{\text{ск}}) = \mu(p_0, 0) \quad (6)$$

и быть невозрастающей функцией $v_{\text{ск}}$.

Итак, проанализированный нами процесс трения на контакте «сыпучее тело-опорная поверхность» не позволяет ожидать получения простых решений в виде тождественных констант пар трения. Тем не менее и здесь могут быть найдены разумные оценки, дающие возможность их использования в практических расчетах технологических процессов, в частности, прокатки порошков.

2. Особенности методики экспериментального определения коэффициента трения на контакте „сыпучее тело-опорная поверхность“

При экспериментальной оценке функции коэффициента трения опорную поверхность методически более правильно и просто выбрать плоской. Действительно, при изменении коэффициента трения по уже использованной нами методике Г. И. Аксенова [6] предельное равновесие сыпучей среды на криполинейной поверхности (рис. 1) наступит одновременно не для всех частиц среды, а лишь для тех, которые формируют передний фронт слоя с угловой координатой β . Если теперь принять во внимание адгезионное взаимодействие частиц сыпучей среды, то, как нетрудно заметить, измеряемый угол β будет превышать фактический угол трения. Не менее существенно и то, что схема на рис. 1 не позволяет эффективно варьировать нагрузку на контакт.

Для выбора оптимальной измерительной схемы воспользуемся известной классификацией И. В. Крагельского [10].

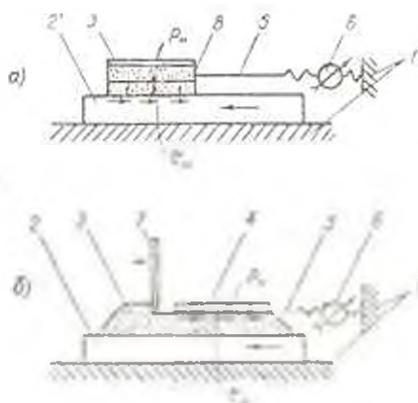


Рис. 2. Принципиальная схема измерения коэффициента трения на контакте „сыпучее тело-опорная поверхность“ при верхнем (а) и нижнем (б) расположении контртела: 1—неподвижное основание; 2—подвижное основание контртела; 3—сыпучее тело; 4—контртело; 5—тяга; 6—силоизмерительное устройство; 7—устройство для предварительной подготовки поверхности сдвига; 8—обойма.

На первый взгляд наиболее универсальной является схема с верхним расположением контртела (рис. 2, а), сочетающая легкость варьирования нагрузки на контакт с простотой расчета интенсивности τ сдвигающего усилия T при условии равномерного распределения усилия T по поверхности S_c . Не представляет затруднения и управление временем неподвижного контактирования, правда лишь для длительностей порядка десятков секунд (превышающих время приложения к контртелу сдвигающего усилия). Если контртелу придать вращательное движение вокруг неподвижной вертикальной оси, то с некоторыми оговорками оказывается возможным изучать и кинетическое трение. Именно последняя схема была использована М. В. Мальцевым [4, 5] при получении уже цитированных нами численных значений коэффициентов трения, представлявших собой константы пар трения. Полагая, что в работах [4, 5] в силу большого собственного веса контртела авторы оперировали с достаточно большими интенсивностями τ , таки-

ми, что согласно (1а) приводят к $\mu(p_n) \sim \mu_0$ либо $\mu_0 = \frac{S_1}{p_n}$, мы максимально облегчили контртело, выполнив его двухслойным с несущим слоем из оргстекла. Стальной слой сложенного контртела в дальнейшем подвергался шлифованию до получения $p_{н1} = 0,0057 \text{ н см}^2$. В качестве второго элемента пары трения был выбран железный порошок марки ПЖ 4М. Длительность неподвижного контактирования в опытах была одинаковой и составляла порядка 30 сек. интенсивность p нормальной нагрузки на контакт варьировалась от $0,0057 \text{ н см}^2$ до $1,98 \text{ н см}^2$.

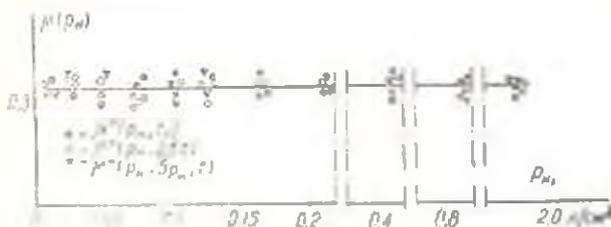


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения на контакте «стальное контртело-железный порошок» от нагрузки, полученная по методике рис. 2, а.

Полученные результаты (график функции $\mu(p_n)$ на рис. 3) качественно согласуются с данными работ [4, 5] и представляют собой константы пар трения. Варьирование временем неподвижного контактирования (порядка 15 сек) и переход к функции $\mu(p_n, \Delta p_n)$ не изменяет, как видно из рис. 3, характер уже установленной зависимости. Подобное положение позволяет утверждать о наличии пластического контакта в опытах и, следовательно, о несоблюдении условия (4) при любой p_n . Численные значения функции μ соответствуют достаточно большой интенсивности p_n , такой, что упругое и упруго-пластическое свойства контакта не могут проявиться. Объяснить полученные результаты оказывается возможным, если привлечь к рассмотрению понятие о контурной поверхности контакта S_k [1]. При небольших интенсивностях p_n вследствие неизбежной волнистости контактируемых поверхностей имеет место неравенство

$$S_1 < S_k < S_n, \quad (7)$$

при котором интенсивность p_n оказывается уже достаточно высокой. Согласно (7) при увеличении p_n имеется возможность роста S_k . Закон изменения S_k оказывается, по-видимому, таковым, что обеспечивается пластический характер контакта или же постоянство p_n .

Итак, методика определения коэффициента трения на контакте «опорная поверхность-выпуклое тело», основанная на верхнем расположении контртела, вызывает вырождение функции $\mu(p_n)$ в точку на кривой и поэтому не может рассматриваться как универсальная.

Более предпочтительным в этом смысле является нижнее (рис. 2, б) расположение контртела. В частности, для уже рассмотренной пары трения график функции $\mu^*(p_n)$ (кривая 1 на рис. 4) в большей своей части (для $p_n \geq 0,0140 \text{ н см}^2$) согласуется с теоретическими представлениями. Подтверждается также строгое неравенство в соотношении (5) (кривые 1 и 2 на рис. 4). Здесь принято $p_{n \text{ макс}} = 5p_n$, длительность неподвижного контактирования составляла 30 сек.

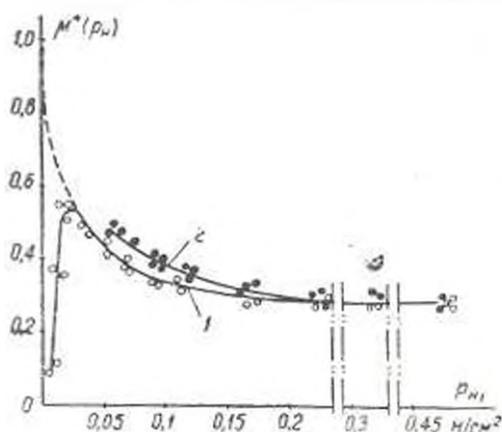


Рис. 4. Та же зависимость, что и на рис. 3, но полученная по методике рис. 2, б: 1 — $\mu^*(p_n)$; 2 — $\mu^*(p_n, 5p_n)$.

Если опытную кривую $\mu^*(p_n)$ экстраполировать, как показано на рис. 4, на $p_n \in [0; 0,0200] \text{ н см}^2$, то данные по $\mu^*(p_n)|_{p_n \rightarrow 0}$ оказываются сопоставимыми с коэффициентами трения, полученными по методике [6] и приведенными в правом столбце табл. 1.

Опыты по схеме рис. 2, б проводились с прямоугольной обоймой ($S_0 = 5,6 \times 5,9 \text{ см}^2$) из органического стекла, силоизмерительное устройство состояло из консольной балки и индикатора часового типа. Трение на контакте „обойма-сыпучее тело“ не принималось во внимание. Немонотонность опытной кривой на рис. 4 мы относим на счет выбора неоптимальной геометрии обоймы, ибо максимум опытной кривой $\mu^*(p_n)$, как показали опыты по варьированию S_0 , не остается неизменным по величине и расположению на оси p_n .

Сопоставление кривых рис. 3 и 4 для больших p_n не дает их совпадения, что объясняется неучетом нами потерь на трение на контакте „обойма-порошок“. В правильности такого предположения нетрудно убедиться, не прибегая к сложным расчетам. В самом деле, почти очевидно, что с увеличением площади обоймы в свету удельный вес влияния на p_n трения на контакте „порошок-обойма“ должен уменьшаться. Но тогда, изменив в опытах на сдвиг по схеме рис. 2, б только S_0 ($12,5 \times 12,5 \text{ см}^2$), мы приходим (рис. 5) к ожидаемому совпадению функций $\mu^*(p_n)$.

Столь существенное различие результатов по сравниваемым методикам может быть объяснено подвижностью сыпучего тела и его способностью конформировать волнистость поверхности контртела на схеме

рис. 2, б. В отличие от условия (7) здесь вполне правдоподобно допустить справедливость соотношения

$$S_0 \leq S_0 \approx S_{II}, \quad (8)$$

из которого в силу невозможности увеличения S_0 будет следовать реализация условия (4), по крайней мере, на некотором непустом множестве $\{p_{II}\}$. Но последнее, как мы уже упоминали, является необходимым условием для корректного построения функции $\varphi(p_{II})$.

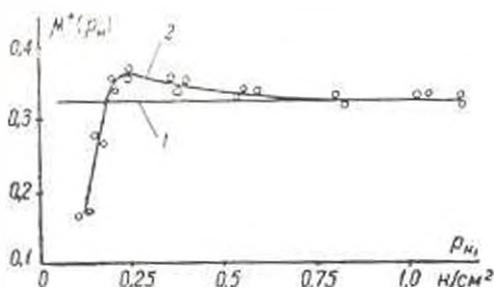


Рис. 5. Оценка поведения кривых $M^*(p_{II})$, полученных на приборах рис. 2 при больших p_{II} .

Итак, данные, получаемые на сдвиговых приборах с верхним расположением контртела следует рассматривать как неполные применительно ко всем тем конкретным технологическим схемам, где сыпучее тело может гравитационно перемещаться относительно опорной поверхности, а интенсивность нормальной нагрузки p_{II} варьируется в широких пределах и может быть сколь угодно малой. Здесь правильность построения функции $\varphi(p_{II})$ может быть обеспечена лишь при использовании сдвиговых приборов с нижним расположением контртела. Данные приборов с верхним расположением могут быть при этом не более как контрольными для случая больших p_{II} . Можно, однако, указать конкретные случаи технологических процессов, когда такие данные будут достаточными. Это, например, трение на поверхности контакта „порошок-верхний пуансон“ и „порошок-верхний валок“ соответственно при прессовании и прокатке порошков. В последнем случае утверждение справедливо для вертикального и некоторых наклонных расположений валков.

Нетрудно видеть, что приведенные примеры являются частными.

Согласно экспериментальным кривым на рис. 4 и 5 их отклонение от констант $\varphi = \text{const}$ наблюдается только для небольших (менее 1 н/см^2) p_{II} . В соответствии с (3) условие $\text{lim}_{p_{II} \rightarrow \infty} \varphi(p_{II}) = \varphi^* = \text{const}$ должно распространяться на все те p_{II} , для которых неучет деформационной составляющей для функций $\varphi(p_{II})$ является правомерным. Можно предположить, что применительно к методам формования в порошковой металлургии такой диапазон p_{II} будет достаточно широким,

по крайней мере, вплоть до величин, характеризующих собой трансформацию сыпучего тела в жесткое пористое.

В этом смысле частное значение $\mu^* \in \mu(p)$, регистрируемое сдвиговыми приборами с верхним расположением контртела, приобретает весьма важное содержание и, если область малых p , не представляет по каким-либо соображениям практического интереса, оно становится универсальной константой пары трения, как это принято сейчас, и частности, и уже цитированных нами работах. Сдвиговые приборы с верхним расположением контртела оказываются при этом вполне пригодными для практического использования.

В ы ы ы

1. В зависимости от метода методики исследования экспериментально определяемый на контакте «сыпучее тело-опорная поверхность» коэффициент трения может быть константой пары трения (сдвиговые приборы с верхним расположением контртела) или некоторой функцией (с непустой областью монотонности) номинального давления на контакт (сдвиговые приборы с нижним расположением контртела).

2. В области малых (до 10^3 см^2) номинальных давлений на контакт достоверные данные по коэффициенту трения могут быть получены лишь на сдвиговых приборах с нижним расположением контртела. При переходе к большим номинальным давлениям измерения по сравнимым методикам в одинаковой степени достоверны.

Институт проблем материаловедения
АН УССР

Поступило 3 III 1976.

Գ. Ա. ՍՊՅԱՆՈՎ, Գ. Ա. ՉԵՆՈՎՆԻՔԱՆՈՎ, Թ. Լ. ՍԵՆՆԻՆ

ՀԱՅԿՐԱՆԻ ԽՈՐՀԻՆԻ-ՇԻՆՈՐԱՆԱՆՆԵՐԻ, ԽՈՍԻՐԵՎՈՒԹՅԱՆ ԿՈՄՍՈՒՆՏՈՒ-
ՍԱԼՔԻ ԱՐԹՈՒՆԴԱՄԵՐՈՒԹՅԱՆ, ՀԱՅԲԵՐ

Ա Վ Փ Ն Փ Ո Ւ Մ

Վերլուծությունը և անվարկված սահմանի գալստանները տարուն մարմին-հենարանային մակերևույթի կոնտակտում և սահմանի բարձրագույն ֆունկցիոնալի հատուցման փորձարարական մեթոդները կախված կոնտակտում եզրումը բնակվածրից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Крательский И. В. Трение и износ. Изд. «Машинное трение», 1968.
2. Венков Р. А. Механика насыпных тел. Изд. «Машиностроение», 1964.
3. Алексеев Г. И., Николаев А. И. Угол наклона сыпучих телами при протекании. Труды ГПИ им. М. И. Калинина, т. II, вып. 5. Изд. «Речной транспорт», М., 1956.

4. *Мальцев М. В.* Исследование процесса прокатки металлических порошков. Автореферат диссертации, Горький, 1967.
5. *Мальцев М. В., Николаев А. Н., Тихонов Г. Ф., Хромов В. Г.* Угол захвата порошка при прокатке. Сб. «Порошковая металлургия». Материалы IX Всесоюзной конференции по порошковой металлургии. Изд. Латвийского республик. и-та научно-техн. информации и пропаганды, Рига, 1968.
6. *Аксенов Г. И.* Основы порошковой металлургии. Кузбасское книжное издательство, 1962.
7. *Дерягин Б. В., Лазарев В. П.* «Коллоидный журнал», т. 4, № 4, 1935.
8. *Дерягин Б. В.* Молекулярная теория трения и скольжения. ЖФХ, т. 5, № 9, 1934.
9. *Дерягин Н. В.* Физическая площадь касания твердых поверхностей. Изд. АН СССР, 1962.
10. *Кривельский И. В.* О методе определения сил трения скольжения несмазанных поверхностей. Сб. «Трение и износ в машинах». Всесоюзная конференция по трению и износу в машинах. Изд. АН СССР. М.—Л., 1940.