

## Коэффициент трения при прокатке

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

*Для определения коэффициента трения при симметричной прокатке применяют различные методы (больше 20), из которых лишь некоторые могут быть использованы для несимметричной прокатки с учётом направления сил трения (метод опережения и метод определения по диаграмме радиального давления на валок). Рассмотрены модели сил трения при прокатке и гипотезы о характере сил трения между поверхностью касания валков и прокатываемой полосой. К параметрам, от которых зависит коэффициент трения при прокатке, относятся химический состав материала и состояние поверхности валков, ее шероховатость и температура металла. При прокатке компактных материалов выделяют коэффициент трения при захвате заготовки и при установившемся процессе. Последний, как правило, почти в 2 раза меньше первого, что обусловлено точкой приложения равнодействующей реакции прокатываемой заготовки на деформационное воздействие со стороны валка. Величина коэффициента трения определяет размеры очага деформации и угловые параметры процесса прокатки, а именно величины угла захвата и нейтрального угла. Регулирование коэффициента трения при прокатке позволяет оптимизировать энергосиловые параметры процесса.*

**Ключевые слова:** прокатка, коэффициент сухого трения, металлы, металлические порошки.

### Коэффициент трения при прокатке компактных материалов

#### Методы определения

Методы определения коэффициента трения при прокатке описаны в работах как по прокатке металлов и сплавов [1—3], так по трению [4]. Грудев А. П. насчитывает около 20 способов определения коэффициента трения при прокатке [1]. Рассмотрим главные из них [4].

1. *Метод определения коэффициента трения по углу захвата при прокатке в ручьевых валках* состоит в том, что прокатываемая полоса заводится в ручей с легким прижимом к валкам. Верхний валок медленно поднимается до момента захвата полосы. Условие захвата выглядит следующим образом:

$$\cos \alpha_0 = 1 - \frac{h_0 - h_1}{D}, \quad (1)$$

где  $\alpha_0$  — угол захвата на начальном этапе процесса прокатки;  $h_0$  и  $h_1$  — зазор между валками и толщина образца;  $D$  — диаметр валков. Коэффициент трения рассчитывают как  $f = \operatorname{tg} \alpha_0$ .

Этот метод используют для определения коэффициента трения на начальном этапе прокатки.

2. *Метод максимального угла касания* (по А. П. Грудеву) заключается в том, что после захвата полосы валками увеличивается обжатие прокатываемого образца либо за счет изготовления клиновидных образцов, либо за счет постепенного сближения валков (предпочтителен второй способ). Обжатие возрастает до тех пор, пока не начинается пробуксовка

валков. В этот момент замеряют дугу и угол захвата  $\alpha_0$  и рассчитывают как

$$\alpha_0 = n\beta, \quad (2)$$

где принимают  $n = 2$ , а коэффициент трения рассчитывают как  $f = \operatorname{tg} \beta$ .

По данным А. Я. Хейна,  $n$  зависит от величины  $f \sqrt{\frac{R}{h_1}}$  ( $R$  — радиус валков), с увеличением которой  $n$  уменьшается от 1,92 до 1,67 [5]. Этот метод дает возможность определять величину коэффициента трения в установившемся процессе прокатки.

3. *Метод торможения в валках посредством клещевого захвата* [2] состоит в том, что прокатываемая полоса соединяется посредством клещевого захвата с динамометром, замеряющим усилие тяги  $P$ , при котором начинается пробуксовка валков. Одновременно замеряется полное давление на валках  $Q$ . Коэффициент трения рассчитывают по формуле

$$f = \frac{Q}{2P} + \operatorname{tg} \frac{\beta_y}{2}, \quad (3)$$

где  $\beta_y$  — угол прокатки при установившемся процессе прокатки, соответствует точке приложения равнодействующего давления.

При расчёте по формуле (3) приняты следующие допущения:

- а) упругие дефекты образца отсутствуют;
- б) точка приложения равнодействующего давления находится в середине дуги касания.

Результат во многом зависит от оператора: замер надо проводить в самом начале пробуксовки.

4. *Метод опережения* состоит в том, что на поверхности валков на определенном расстоянии находятся два углубления, которые оставляют на прокатываемой полосе два выступа. Опережение  $S$  находят как

$$S = \frac{l_n - l_b}{l_b}, \quad (4)$$

где  $l_n$  и  $l_b$  — длины дуги между отметками полосы и валком соответственно.

Угол трения  $\beta$  находят из выражения

$$\beta = C_2 C_3 \frac{\frac{\alpha}{2}}{1 - \frac{\gamma}{C_1 \frac{\alpha}{2}}}, \quad (5)$$

где  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  — постоянные, которые рассчитывают по известным формулам [4].

5. *Метод определения коэффициента трения при прокатке по давлению металла на валки* заключается в том, что распределение давления по дуге захвата и полное давление на валки замеряются с помощью эшпюры. Величины коэффициента трения подбираются таким образом, чтобы удовлетворялась теоретически выведенная зависимость между коэффициентом трения и давлением. Однако, как отмечает А. П. Грудев, определенный при помощи этого метода коэффициент трения превращается в поправочный коэффициент.

6. *Определение коэффициента трения при помощи диаграммы радиального давления на валок* проводится следующим образом: диаграмму распределения давления на валки снимают посредством точечных месдоз и коэффициент трения рассчитывают по эпюре нормальных давлений (напряжений) из следующего выражения:

$$f = \frac{S_p}{(F_1' - F_2')R}, \quad (6)$$

где  $S_p$  — статический момент эпюры нормального давления на валок;  $F_1'$  и  $F_2'$  — площади частей эпюры нормальных контактных напряжений, соответствующие зоне отставания и зоне опережения.

При выводе уравнения (6) сделаны следующие допущения:

- коэффициент трения по дуге захвата постоянен;
- зона застоя отсутствует;
- статический момент эпюры нормальных давлений на валок равен статическому моменту эпюры вертикальных составляющих давлений на валок ( $S_n = S_p$ ).

Автор не приводит полученные коэффициенты трения. Это допущение отличает данный метод от всех предыдущих. Очевидно, погрешность будет тем больше, чем меньше радиус валков и чем больше обжатие.

#### **Зависимости коэффициента трения от параметров прокатки**

Величина коэффициента трения при прокатке зависит от многих параметров процесса. В соответствии с работой [6] рассмотрим главные из них.

#### *Химический состав материала и состояние поверхности валков*

На станах используют главным образом стальные и чугунные валки. Результаты исследований свидетельствуют, что при прокатке на стальных валках коэффициент трения на 15—20% больше, чем при прокатке на чугунных. Это объясняется тем, что в структуре чугуна присутствуют составляющие (ледебурит, цементит, графит) с низким адгезионным взаимодействием (схватыванием) с такими металлическими фазами, как феррит и аустенит. При исследовании влияния состояния поверхности валков на коэффициент трения в реальных условиях установлено, что, кроме шероховатости (микрорельефа), на поверхности присутствуют прилипшие частицы металла (окалины, загрязнения и др.).

#### *Шероховатость поверхности валков*

Шероховатость поверхности валков относится к факторам, сильно влияющим на коэффициент трения. При нормальных температурных условиях зависимость коэффициента трения при прокатке (скорость 0,1 м/с) стали Ст. 3 (измеренного разными методами) от шероховатости поверхности валков носит немонотонный характер: с ростом шероховатости коэффициент трения при установившемся процессе прокатки сначала понижается, проходя минимум при  $R_a = 0,2—0,6$  мкм, а затем возрастает, стабилизируясь примерно при  $R_a = 1,5$  мкм (рис. 1, а).

С увеличением микронеровностей поверхности грубо обработанных валков коэффициент трения при захвате и высоких температурах существенно увеличивается (рис. 1, б).

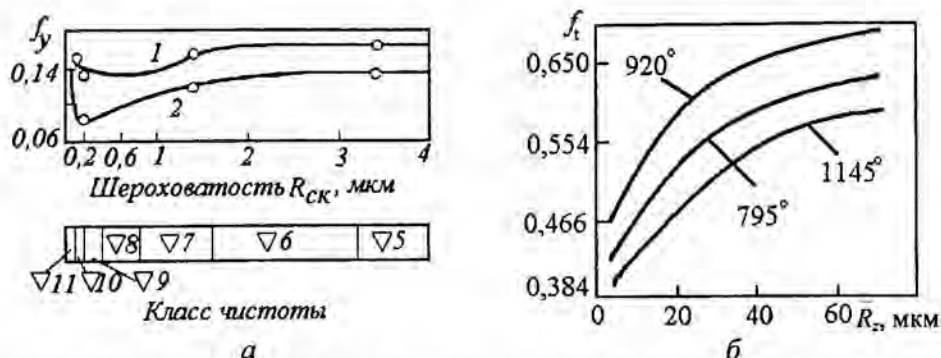


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения от шероховатости валков для чистой [1] (а) и грубой [6] (б) поверхности при нормальной (а) и высокой (б) температурах. Методы определения коэффициента трения: 1 — валковый трибометр; 2 — по углу захвата.

### Химический состав прокатываемого металла

Изменение коэффициента трения при прокатке в зависимости от химического состава металла подчиняется тем же закономерностям, что и коэффициента трения металла о металл при перемещении по плоскости, а именно: чем ниже температура плавления металла, тем выше коэффициент трения; чем больше сродство металла к кислороду, тем меньше коэффициент трения. Также влияет склонность металла к образованию твердых растворов и химических соединений: чем она выше, тем коэффициент трения больше. Как отмечают Я. Д. Василев и О. А. Минаев, коэффициент трения у коррозионно-стойкой стали, алюминия и его сплавов, титана, цинка, свинца и других выше в сравнении с углеродистыми сталями [6].

### Температура металла

С ростом температуры углеродистых сталей коэффициент трения сначала повышается, а затем понижается. Максимум на кривой зависит от химического состава прокатываемой стали и условий нагрева, но, как правило, находится в интервале температур 700—1000 °С. Аналогичный характер зависимости наблюдается и для некоторых других металлов, например меди. Эта закономерность обусловлена количеством и свойствами оксидов на поверхности металла.

### Скорость прокатки

С повышением скорости прокатки коэффициент трения понижается. Однако ход зависимости при холодной и горячей прокатке различный. При горячей прокатке на гладких валках коэффициент трения медленно понижается с ростом скорости от 0 до 2,5 м/с, а потом остается неизменным на уровне 0,1. При холодной прокатке коэффициент трения резко уменьшается до скорости 5 м/с.

### Модели коэффициента трения при прокатке

Величина коэффициента трения определяется конкретными условиями процесса: материалом и состоянием поверхности валков, химическим составом прокатываемого материала, температурой образца, скоростью прокатки и др. Поэтому для точного определения коэффициента трения необходимо учитывать количественное влияние каждого из перечислен-



ных параметров. В этой связи теоретическое определение коэффициента трения при прокатке невозможно, поэтому для прогнозирования величины коэффициента трения используют приближенные модели.

Грудев А. П., обработав и обобщив результаты исследования коэффициента трения при горячей прокатке, выполненные С. Экелундом, И. М. Павловым, Н. Н. Гетом, А. И. Целиковым и другими учеными, предложил следующие линейные модели определения коэффициента трения при горячей прокатке сталей [2].

При захвате:

$$f_3 = k_b k_c k_v (0,84 - 0,0004 t_m), \quad (7)$$

где  $k_b$ ,  $k_c$ ,  $k_v$  — коэффициенты, учитывающие состояние поверхности и материал валков, содержание углерода в стали и скорость прокатки соответственно;  $t_m$  — температура металла, °С.

При установившемся процессе:

$$f_3 = k_b k_c k_v (0,55 - 0,00024 t_m). \quad (8)$$

Значения коэффициентов  $k_b$ ,  $k_c$ ,  $k_v$  для различных условий прокатки можно найти в работе [6]. Формулы (7) и (8) предназначены для прогнозирования коэффициента трения при температуре металла выше 700 °С.

Для расчета коэффициента трения при холодной прокатке применяют модель А. П. Грудева

$$f_y = \frac{k_{см} [1 + (0,4 + \varepsilon) R_z]}{1 + 0,25 \sqrt{v_{50}} - 0,005 v_{50}} \left[ 0,07 - \frac{0,1 V_B^2}{2(1 + V_B) + 3V_B^2} \right], \quad (9)$$

где  $k_{см}$  — коэффициент, который учитывает природу смазки (коэффициент  $k_{см}$  составляет: для растительных смазок 1,0; для минеральных — 1,4),  $\varepsilon$  — условное частичное относительное обжатие, доли единицы;  $R_z$  — высота неровностей на поверхности валков, мкм;  $v_{50}$  — кинематическая вязкость технологической смазки при 50 °С, мм<sup>2</sup>/с (сантистоксы);  $V_B$  — окружная скорость валков, м/с.

### Величина коэффициента трения при прокатке

Вследствие наличия зон отставания и опережения в очаге деформации направление продольных сил трения, действующих на прокатываемый металл до нейтрального сечения, совпадает с направлением прокатки, а за нейтральным сечением — направлено в противоположную сторону. Поперечные силы трения направлены к оси симметрии изделия.

Распределение нормальных контактных напряжений по дуге захвата и полное давление на валки зависят от характера распределения сил трения по дуге захвата и их величины. Как отмечает И. М. Павлов, внешнее трение вызывает объемное напряженное состояние прокатываемого металла, обуславливая величины главных напряжений и соотношение между вытяжкой и уширением [3].

Гипотезы сил трения рассматриваются в двумерном пространстве (в плоскости, перпендикулярной осям валков). Считается, что как ход, так и величина сил трения во всех параллельных плоских сечениях по ширине проката одинаковы. На рис. 2, а показано изменение величины нормального контактного напряжения по горизонтальной проекции дуги захвата для различных коэффициентов трения при прокатке широкой полосы (при прочих равных условиях).

Существуют следующие предположения о характере сил трения между поверхностью касания валков и прокатываемой полосой:

а) силы трения пропорциональны давлению (по Карману), то есть закон Амонтона (формула (3)).

$$\tau_x = f p_x, \quad (10)$$

где  $\tau_x$  и  $p_x$  — сила трения и давление в любой точке ( $x$ ) дуги захвата;

б) силы трения  $\tau$  пропорциональны истинному сопротивлению деформации  $\sigma_s$  (по Зибелю):

$$\tau = f \sigma_s. \quad (11)$$

в) трение между изделием и валками жидкостное и поэтому силы трения пропорциональны градиенту скорости  $dV_x/dy$  по толщине смазочного слоя (по Надаи):

$$\tau = \eta \frac{dV_x}{dy}, \quad (12)$$

где  $\eta$  — коэффициент вязкости смазочного материала;

г) между зонами опережения и отставания существует застойная зона, где скорость металла  $V_{Me}$  равна окружной скорости валков  $V_b$  и пластическая деформация происходит по закону течения вязкой жидкости (по Целикову):

$$V_{Me} = V_b. \quad (13)$$

На рис. 2, б и в показаны теоретические зависимости изменения нормальных контактных напряжений и удельных сил трения по дуге контакта в соответствии с различными гипотезами трения. Видно, что кривые контактных напряжений, соответствующие гипотезам Кармана и Зибеля, относятся к разным величинам коэффициента трения (рис. 2, а). А именно гипотеза Зибеля соответствует меньшему коэффициенту трения и, очевидно, лучше описывает тонколистовую прокатку или прокатку на гладкой бочке. Кривые по гипотезам Зибеля и Целикова не соответствуют экспериментальным кривым. Кривые удельных сил трения, соответствующие гипотезам Кармана и Целикова, имеют как совпадающие участки, так и несовпадающие. Главное отличие заключается в том, что, по Карману, в точке контакта, соответствующей нейтральному сечению, удельная сила трения изменяется скачком (изменяет знак, но абсолютная величина остаётся неизменной), а по Целикову — изменяет направление

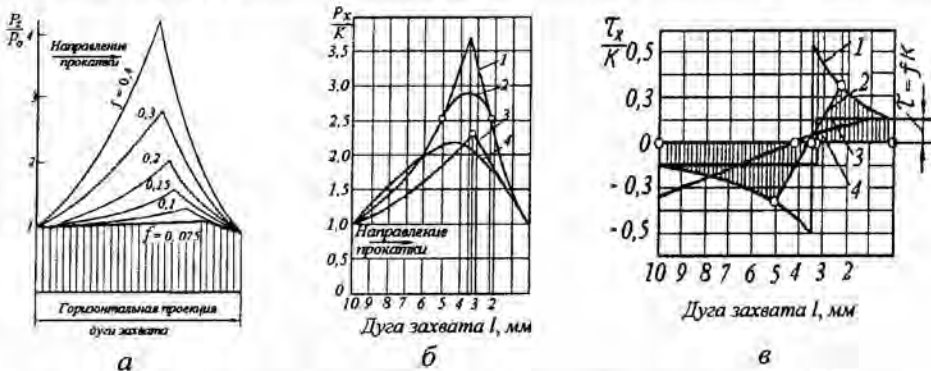


Рис. 2. Изменение удельных давлений (а, б) и удельных сил трения (в) по дуге захвата для различных коэффициентов трения (а) и гипотез (б, в) трения при прокатке [4]: 1 — по Карману; 2 — по Зибелю; 3 — по Надаи; 4 — по Целикову.

на некотором расстоянии от нейтрального сечения и плавно переходит через ноль. По Зибелю, удельная сила трения имеет одинаковую величину по всей линии контакта и только в нейтральном сечении скачкообразно изменяет знак. По Надаи, удельные силы трения по всей длине контактной зоны изменяются линейно, пересекая ноль в точке контакта, соответствующей нейтральному сечению. Как видим, разным гипотезам соответствует различная работа сил трения (для одной из сил заштрихован участок). Наибольшая работа сил трения соответствует гипотезе Кармана, наименьшая — гипотезам Зибеля и Надаи.

Наличие трех различных зон в очаге деформации (отставания, застойной или прилипания и опережения) обуславливает переменный коэффициент трения по дуге захвата.

Условием естественного захвата при несимметричной прокатке является [4]

$$\operatorname{arctg} f = \beta \geq (R_1 + R_2) \frac{\alpha_0}{2R_2}, \quad (14)$$

где  $\alpha_0$  — угол касания или угол захвата при неустановившемся процессе прокатки;  $\beta$  — угол трения;  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы меньшего и большего валков.

При симметричной прокатке условие захвата описывается выражением

$$f = \operatorname{tg} \alpha_0. \quad (15)$$

То есть, если не прикладывать внешнюю силу, угол захвата равен углу трения  $\alpha_0 = \beta$ .

При установившемся процессе прокатки угол захвата  $\alpha_y$  связан со степенью деформации приблизительной зависимостью

$$\alpha_y \approx \sqrt{\frac{h_0 - h_1}{R}}. \quad (16)$$

Приближенно считается, что в установившемся процессе прокатки коэффициент трения больше или равен половине тангенса угла захвата [4]:

$$f \geq \frac{\operatorname{tg} \alpha_0}{2}. \quad (17)$$

Соотношение между углом контакта  $\alpha$  при установившемся процессе прокатки, нейтральным углом  $\gamma$  и коэффициентом трения  $f$  выражено формулой Экелунда—Павлова

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2f}\right). \quad (18)$$

Известно несколько эмпирических формул для расчета коэффициента трения при холодной прокатке [1]. Симс Р. Б. и Артур Д. Ф. для описания полученной ими зависимости коэффициента трения при установившемся процессе прокатки  $f_y$  от скорости прокатки предложили формулы

$$f_y = 10^{-3} e^{av-b}; \quad (19)$$

$$f_y = f_n e^{-cv}, \quad (20)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  — эмпирические константы;  $f_n$  — коэффициент статического трения или трения покоя ( $V = 0$ ).

Формула (20) правомерна при интервале скоростей менее 0,25 м/с.

Грудевым А. П. на основании обработки экспериментальных данных разработана формула для расчёта  $f_y$

$$f_y = k_n k_c \left[ 0,07 - \frac{0,1V^2}{2(1+V) + 3V^2} \right], \quad (21)$$

где  $k_n$  — коэффициент состояния поверхности валков;  $k_c$  — коэффициент, учитывающий вид смазки. Значения  $k_n$  и  $k_c$  приведены в работах [7, 8].

Старченко Д. И., Кузьмин В. И. и Обернихин С. А. в работе [9] предложили формулу

$$f_y = f_0 \pm \frac{V}{a+bV}, \quad (22)$$

где  $f_0$  — коэффициент трения при очень малой скорости прокатки;  $a$  и  $b$  — эмпирические константы.

Грудев А. П. установил, что при холодной прокатке чёрных металлов на гладких валках коэффициент продольного и поперечного трения составляет 0,2—0,28 [1]. Василев Я. Д. и Минаев А. А. отмечают, что значения коэффициента трения при горячей прокатке чёрных металлов в большинстве случаев находятся в пределах: при захвате — 0,3—0,5; при установившемся процессе — 0,2—0,4 [6]. При холодной прокатке: при захвате — 0,1—0,2; при установившемся режиме — 0,03—0,15. Как видим, величины коэффициентов трения, приводимые разными авторами, отличаются.

### **Коэффициент трения при симметричной прокатке порошков**

Трение при прокатке порошков играет важную роль. Оно, собственно, обуславливает процесс прокатки. Анализ работ по определению и расчету коэффициента трения при прокатке порошков о твердую поверхность приведен в обзоре [10] О. А. Катруса.

### **Коэффициент трения при несимметричной прокатке порошков**

При прокатке порошков условия асимметричной (несимметричной) прокатки возникают при различных граничных условиях прокатки (коэффициентах трения) на разных валках прокатного стана: прокатка биметаллов [11], различная скорость вращения валков [12], различные диаметры валков [13, 14], различные схемы прокатки (прокатка с одним приводным валком [15]) и в других случаях [13, 16]. Аналогичное явление наблюдается и при прокатке биметаллов из компактных материалов [17]. Кроме перечисленных факторов, на асимметрию прокатки влияют и другие факторы [18], например силы гравитации [19].

### **Выводы**

Существует большое количество методов определения коэффициента трения при прокатке (больше двадцати), каждый из них имеет свои достоинства и недостатки и лишь некоторые из них могут быть использованы при несимметричной прокатке.

К параметрам, от которых зависит коэффициент трения при прокатке, относятся химический состав материала и состояние поверхности валков, шероховатость поверхности валков, температура металла.

При прокатке компактных материалов выделяют коэффициент трения при захвате заготовки и при установившемся процессе. Последний, как правило, почти в 2 раза меньше первого, что обусловлено точкой



приложения равнодействующей реакции прокатываемой заготовки на деформационное воздействие со стороны валка.

Трение при прокатке играет определяющую роль, обуславливая возможность протекания прокатки. Величина коэффициента трения влияет на размеры очага деформации и угловые параметры прокатки, а именно величины угла захвата и нейтрального угла. Регулирование коэффициента трения при прокатке позволяет оптимизировать энергосиловые параметры прокатки.

1. *Грудев А. П.* Внешнее трение при прокатке. — М. : Metallurgia, 1973. — 287 с.
2. *Грудев А. П.* Основные закономерности и механизмы внешнего трения при холодной прокатке: Автореф. ... д-ра техн. наук. — Днепропетровск : Днепропетровский металлургический ин-т, 1968. — 38 с.
3. *Грудев А. П.* Трение и смазки при обработке металлов давлением : (Справ. изд.) / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. — М. : Metallurgia, 1982. — 312 с.
4. *Крагельский И. В.* Коэффициенты трения: (Справ. пособие) / И. В. Крагельский, И. Э. Виноградова. — М. : ГН-ТИМЛ, 1955. — 188 с.
5. *Хейн А. Я.* Процесс ленточной и тонколистовой прокатки. — М. : Metallurgizdat, 1941. — 248 с.
6. *Василев Я. Д.* Теория позадвальной прокатки / Я. Д. Василев, О. А. Минаев. — Донецк. УНИТЭХ, 2009. — 488 с.
7. *Пресняков А. А.* К вопросу об условиях захвата металла валками при прокатке и коэффициенте внешнего трения // Обработка металлов давлением. — М. : Metallurgizdat, 1952.
8. *Мышкин Н. К.* Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 368 с.
9. *Старченко Д. И.* / Д. И. Старченко, В. И. Кузьмин, С. А. Обернихин // Изв. вузов. Чёрная металлургия. — 1967. — № 8. — С. 86—91.
10. *Катрус О. А.* Трение при прокатке порошков // Порошковая металлургия. — 1982. — № 3. — С. 5—13.
11. *Кулешов И. Е.* Исследование влияния граничных условий на процесс прокатки биметаллических материалов из порошков / И. Е. Кулешов, А. М. Галкин, Л. С. Шмелев // Там же. — 1978. — № 3. — С. 72—73.
12. *Hirohata T.* Experiment on metal powder compaction by differential speed rolling. / T. Hirohata, S. Masaki, S. Shima // JMPT. — 2001. — III, issues 1—3. — P. 113—117.
13. *Ребиндер П. А.* О природе схватывания твердых тел. — М. : Наука, 1968. — 59 с.
14. *Ревякин В. П.* Исследование некоторых вариантов прокатки металлических порошков: Автореф. ... канд. техн. наук. — Ленинград : ЛПИ, 1968. — 16 с.
15. *Мамыкин Э. Т.* Комплекс машин и методика определения антифрикционных свойств материалов при трении скольжения / [Э. Т. Мамыкин, М. К. Ковпак, А. И. Юга, Н. Ф. Шейко, В. В. Пушкарев] // Порошковая металлургия. — 1973. — № 1. — С. 67—72.
16. *Аксенов Г. И.* Исследование прокатки металлических порошков по различным вариантам / Г. И. Аксенов, В. П. Ревякин // Труды ЛПИ. — 1969. — № 296. — С. 101—104.
17. *Мякин О. А.* Исследование напряженного и деформированного состояния при несимметричной прокатке биметалла титан—сталь в гладких валках: Автореф. ... канд. техн. наук. — М., 1973. — 21 с.
18. *Николаев В. А.* Теория и технология несимметричной прокатки / [В. А. Николаев, В. Л. Мазур, А. К. Голубченко, Е. В. Бинкевич]. — М. : Информат, 1996. — 262 с.

19. Боровик П. В. Фактор трения в асимметрии распределения момента прокатки с учетом действия гравитации / П. В. Боровик, В. А. Луценко // Сб. науч. трудов Дон ГТУ. — Вып. 32. — Алчевск: Дон ГТУ, 2010. — 476 с.

## Коефіцієнти тертя при прокатці

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

*Для визначення коефіцієнта тертя при симетричній прокатці застосовують різні методи (більше 20), з яких лише деякі можуть бути використані для несиметричної прокатки (метод випередження і метод визначення по діаграмі радіального тиску на валок). Розглянуто моделі сил тертя при прокатці і гіпотези про характер сил тертя між поверхнею торкання валків і прокатуваної смуги. До параметрів, від яких залежить коефіцієнт тертя при прокатці, відносяться хімічний склад матеріалу і стан поверхні валків, її шорсткість і температура металу. При прокатці компактних матеріалів виділяють коефіцієнт тертя при захваті заготовки і при сталому процесі. Останній, як правило, майже в 2 рази менше першого, що обумовлене точкою докладання рівнодіючої реакції прокатуваної заготовки на деформаційний вплив з боку валка. Величина коефіцієнта тертя визначає розміри осередку деформації і кутові параметри процесу прокатки, а саме величини кута захвату і нейтрального кута. Регулювання коефіцієнта тертя при прокатці дозволяє оптимізувати енергосилові параметри процесу.*

**Ключові слова:** прокатування, коефіцієнт сухого тертя, метали, металеві порошки.

## The coefficients of friction in rolling

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

*To determine the coefficient of friction at the symmetric rolling using various methods (more than 20), of which only a few can be applied to asymmetric rolling (method of timing and method of determining the chart radial pressure on the roll). The models of the rolling friction and hypotheses about the nature of friction between the surface of contact of the rolls and the rolled strip. To the parameters that determine the coefficient of friction in rolling are the chemical composition of the material and condition of the rollers, shafts and surface roughness of the metal temperature. When rolling compact materials emit friction capture logging and the steady process. The latter, as a rule, almost 2 times less than the first, because of the point of application of the resultant reaction rolled blanks on the deformation effect of the roll. The coefficient of friction determines the size of the deformation zone and angular parameters of the rolling process, namely, the angle of capture and the neutral corner. Regulation of the coefficient of friction when rolling power parameters to optimize the process.*

**Keywords:** rolling, coefficient of dry friction, metals, powders.