

РОЛЬ ТРЕНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ

Radchenko A., Gogaev K.

Franzevitch Institute for Problems of Materials Science of NASU, Kyiv, Ukraine, (ArRadch@ipms.kiev.ua)

ROLE OF FRICTION IN ASYMMETRICAL ROLLING

Рассмотрены методы определения коэффициента трения при прокатке применительно к условиям несимметричной прокатки на валках разного диаметра вращающихся с одинаковыми угловыми скоростями. Предложена гипотетическая кривая изменения коэффициента трения при прокатке порошков, с учётом существования трения скольжения и трения покоя. Предложено на участке дуги контакта, где сила трения соответствует неполной силе трения коэффициент трения принимать равным коэффициенту трения покоя. Этот участок будет соответствовать зоне прилипания. Показано, что при рассмотренной схеме несимметричной прокатки в зоне отставания на малом валке сила трения выталкивает металл из валков, а в зоне опережения направление и величина силы трения на большом валке будет зависеть от параметров прокатки.

Ключевые слова: несимметричная прокатка, металлические порошки, коэффициент трения, трение скольжения, трение покоя

Введение

Процесс прокатки, как компактных материалов, так и порошков, становится возможным благодаря наличию сил трения между обрабатываемым материалом и валком. Величина сил трения и условия прокатки влияют на энергосиловые параметры прокатки, обуславливают величину опережения и уширения полосы, угловые параметры процесса прокатки, то есть играют чрезвычайно важную роль [1].

Постановка задачи - формулировка цели статьи

Недостаточное понимание роли и величины коэффициента трения при различных схемах прокатки сдерживает развитие теоретического описания этих процессов.

Целью данной статьи является анализ роли трения в очаге деформации при симметричной и несимметричной прокатке с позиций современных представлений о трении в условиях неполной силы трения, трения покоя и трения скольжения и на этой основе прогнозирование изменения коэффициента трения в очаге деформации при прокатке.

Основной материал исследования

Рассмотрим некоторые из существующих методов определения и расчёта коэффициента трения при прокатке и оценим возможность их применения для несимметричной прокатки.

Экспериментальные методы определения коэффициента трения при симметричной прокатке

Методы определения коэффициента трения при прокатке описаны как в работах по прокатке металлов и сплавов [1, 2, 3], так и в работах по трению [4, 5]. А.П. Грудев [1] насчитывает около 20 способов определения коэффициента трения при прокатке. Рассмотрим те из них, которыми может быть определён коэффициент трения при несимметричной прокатке.

1. *Метод максимального угла захвата* (по И.М. Павлову), состоит в том, что прокатываемая полоса с легким прижимом придавливается к сведённым вазбой вращающимся 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 α_0 – угол захвата на начальном этапе процесса прокатки (максимальный угол захвата); h_0 и h_1 – зазор между валками и толщина образца; D – диаметр валков.

Коэффициент трения, соответствующий углу захвата, определяют по формуле

$$f_s = \operatorname{tg} \alpha_0 \quad (2)$$

Этот метод может быть использован для определения коэффициента трения на валках разного диаметра на начальном этапе прокатки компактного металла.

2. *Метод максимального угла касания* (по А.П. Грудеву) состоит 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, когда начинается пробуксовка валков. В этот момент замеряется дуга захвата и угол захвата (α_0) рассчитывают как:

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_y}{n} \quad (3)$$

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

По данным А.Я. Хейн n зависит от величины $f \sqrt{\frac{R}{h_1}}$, с увеличением которой n уменьшается от 1,92 до 1,67. Этот метод дает возможность определять величину коэффициента трения на валках разного диаметра в установившемся процессе прокатки компактных металлов.

3. *Метод принудительного торможения полосы* состоит в том, что прокатываемая полоса соединяется посредством клещевого захвата с динамометром, измеряющим усилие тяги P , при котором начинается пробуксовка валков. Одновременно замеряется полное давление на валках Ω . Коэффициент трения рассчитывают по упрощенной формуле:

$$f = \frac{\Omega}{2P} + \operatorname{tg} \frac{\alpha_y}{2}, \quad (4)$$

где α_y – угол прокатки при установившемся процессе прокатки, соответствует точке приложения равнодействующей.

При расчёте по этой формуле сделаны следующие допущения:

- упругие эффекты образца отсутствуют;
- точка приложения равнодействующего давления находится в середине дуги касания.

Результат во многом зависит от оператора: замер надо производить в самом начале пробуксовки. Этот метод может быть применён для определения усреднённой величины коэффициента трения при несимметричной прокатке компактных металлов.

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

$$S = \frac{l_n - l_b}{l_b}, \quad (5)$$

где l_n и l_b – длины дуги между отметками полосы и валка, соответственно.

Далее с помощью преобразований формулы Финка находят величину нейтрального угла

$$\cos \gamma = \frac{D + h_1}{2D} + \sqrt{\left(\frac{D + h_1}{2D}\right)^2 - \frac{h_1(1 + S)}{D}}. \quad (6)$$

или используют упрощенную формулу учёта опережения

$$\gamma = \sqrt{\frac{Sh_1}{R}} \quad (7)$$

Значение угла γ подставляют в формулу Экелунда-Павлова решённую относительно коэффициента трения (принимая $f_y = \beta_y$)

$$f_y = \frac{\alpha^2}{2(\alpha - 2\gamma)} \quad (8)$$

Метод опережения даёт достаточно надёжные значения коэффициента трения при прокатке тонких полос, когда $l_d/h_{cp} > 3 \div 4$. Эту методику приближённого определения коэффициента трения можно использовать при несимметричной прокатке для определения коэффициента трения на каждом из валков.

5. *Метод давления* заключается в том, что распределение давления по дуге захвата и полное давление на валки замеряется с помощью эпюры. Значения коэффициента трения подбираются, таким образом, чтобы удовлетворялась теоретически выведенная зависимость между коэффициентом трения и давлением. Однако, он может быть использован только для приближённого определения коэффициента трения и возможность его использования для несимметричной прокатки как компактных металлов так и порошков требует проверки.

6. *Определение коэффициента трения при помощи диаграммы радиального давления на валок* производится следующим образом – диаграмма распределения давления на валки снимается посредством точечных месдоз и коэффициент трения рассчитывается по эпюре нормальных давлений (напряжений) из следующего выражения:

$$f = \frac{S_p}{(F_1^I - F_2^I)R}, \quad (9)$$

где S_p – статический момент эпюры нормального давления, F_1^I и F_2^I – площади частей эпюры нормальных контактных напряжений соответствующие зоне отставания и зоне опережения.

При выводе уравнения (9) сделаны следующие допущения:

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

Очевидно, погрешность будет тем больше, чем меньше радиус валков и чем больше обжатие. Этот метод даёт возможность определять коэффициент трения на каждом из валков при прокатке как компактных металлов так и порошков.

7. Коэффициент трения валок-металл может быть определён на испытательных машинах трения, работающих по схеме вал-палец [6], когда диаметр и шероховатость вала равна диаметру и шероховатости валка, а палец выполнен из покатываемого металла либо полым и в него насыпан порошок который прокатывают.

Расчёт коэффициента трения при несимметричной прокатке

При несимметричной прокатке на валках разного диаметра вращающихся с одинаковыми угловыми скоростями в зоне деформации меньшего валка появляется составляющая аналогичная заднему натяжению, а на валке большего диаметра – составляющая аналогичная переднему натяжению.

При наличии переднего и заднего натяжений формула Эжелунда-Павлова приобретает дополнительный член (формула Ю.М.Файнберга) и принимает вид [7]:

$$\frac{\gamma}{\alpha} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta_y}\right) + \frac{q_1 h_1 - q_0 h_0}{4fp_{cp}R}. \quad (10)$$

либо близкий к ней (формула В.Н. Выдрина) с учётом сдвиговых напряжений (τ_{cp})

$$\frac{\gamma}{\alpha} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta_y}\right) + \frac{h_1(q_1 - q_0)}{4\tau_{cp}R}, \quad (11)$$

где q_0 и q_1 – соответственно заднее и переднее удельное натяжение; h_0 и h_1 – соответственно толщина на входе и выходе из очага деформации; p_{cp} и τ_{cp} – соответственно значения нормальных и касательных контактных напряжений, подсчитанные без учёта упругих деформаций валков и полосы.

В случае той же схемы прокатки А.П. Грудевым предложена иная формула. Она описывает соотношение между нейтральными углами на маленьком и большом валках γ_1 и γ_2 , углами контакта на маленьком и большом валках α_1 и α_2 , и углом трения β_y при установившемся несимметричном процессе прокатки (предполагается, что коэффициент трения одинаков на обоих валках) и имеет вид [7].

$$\gamma_1 + \gamma_2 = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} - \frac{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}{4\beta_y}. \quad (12)$$

откуда можно рассчитать коэффициент трения f

$$f \approx 2\beta_y = \frac{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}{\alpha_1 + \alpha_2 - 2(\gamma_1 + \gamma_2)}. \quad (13)$$

Отличие роли трения при симметричной прокатке от роли трения в рассмотренном случае несимметричной прокатки заключается в том, что в первом случае на дуге контакта до нейтрального угла (зона отставания) сила трения на обоих валках вталкивает металл в валки, а во втором случае на валке малого диаметра сила трения выталкивает металл из валков. Это происходит при всех допустимых зазорах и при всех допустимых соотношениях валков. На дуге контакта в зоне опережения на малом валке имеет место обычный случай прокатки (могут реализовываться различные случаи в зависимости от соотношения величин нейтральных углов, которые имеют разные значения на малом и большом валках. Эти значения зависят как от величины зазора между валками (максимальных нормальных контактных напряжений) так и от соотношения диаметров валков [8].

Объяснение наличия зоны прилипания в очаге деформации при прокатке и гипотетическое распределение величины коэффициента трения по дуге контакта

При прокатке железных порошков рассчитывали коэффициент трения, относя величину измеренной силы трения к величине нормального давления (рис.1 а) [9, 10]. В результате получали коэффициент трения

равный нулю в области соответствующей нейтральному углу. Но коэффициент трения не всегда может быть

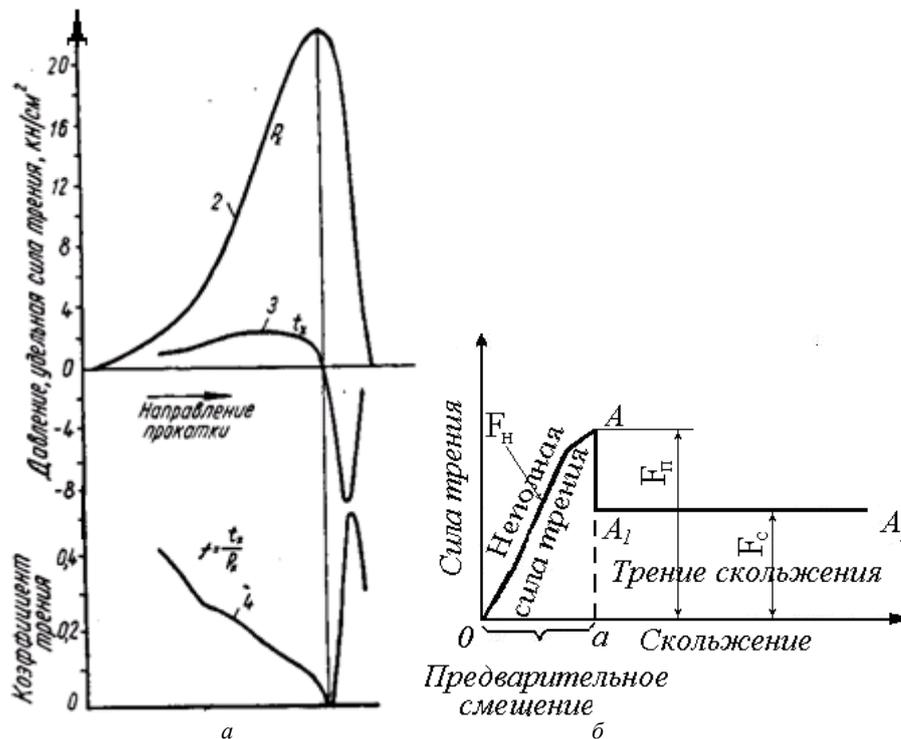


Рис. 1. Кривые распределения давления, удельной силы трения и коэффициента трения по дуге контакта валок—прокат при прокатке железного порошка (а) [10] и зависимость силы трения от величины перемещения поверхностей [11] (б)

определён. Это относится к коэффициенту трения покоя, когда величина силы трения равна неполной силе трения. Наличие неполной силы трения демонстрируется на простом случае измерения коэффициента трения, когда к неподвижному горизонтально лежащему телу прикладывают непрерывно возрастающую силу (рис.1б). С ростом прикладываемой силы происходит предварительное перемещение без разрыва связей. Когда сила достигает точки А происходит срыв и тело начинает двигаться. Сила соответствующая точке А отнесённая к весу тела даёт коэффициент трения покоя, а сила соответствующая точке А₁ отнесённая к весу тела даёт коэффициент трения скольжения. Как видим, они имеют разную величину. Аналогичная картина имеет место при прокатке, в области близкой к нейтральному углу. Силы связи между трущимися поверхностями не дают возможности перемещению. Возникает зона «прилипания». Поскольку металл в зоне прилипания не перемещается, а его деформация продолжается, начинают сдвигаться внутренние слои металла, преодолевая силы внутреннего трения, а также металл начинает течь, в стороны вызывая уширение.. В этом случае может нарушаться гипотеза плоских сечений и это надо учитывать.

Гипотетическая зависимость (рис. 2) построена по экспериментальным результатам расчёта коэффициента трения [10] с учётом зависимости на рис 1 б.

Согласно гипотетической зависимости изменения коэффициента трения по дуге контакта можно выделить следующие 4 зоны.

1. На этом участке имеет место трение скольжения, и коэффициент трения скольжения уменьшается с ростом давления прокатки. В теории трения известно, что с ростом давления прокатки, как компактных материалов, так и порошков коэффициент трения может понижаться [3, 12]. На этом участке, хотя давление и растёт, сила трения сначала увеличивается, а за тем из-за уменьшения кривизны очага деформации начинает уменьшаться и попадает на участок неполной силы трения (рис.1, б), что приводит к прилипанию металла к поверхности валков, и переходу к трению покоя.

2. На этом участке имеет место трение покоя. Согласно имеющимся экспериментальным данным и существующим моделям трения коэффициент трения покоя выше коэффициента трения скольжения, например, для пары сталь по стали примерно на 30 % [13]. Эта зона продолжается до тех пор, пока сила трения не превысит неполную силу трения, что происходит за нейтральным углом, где сила трения имеет обратный знак. Коэффициент трения покоя переходит в коэффициент трения скольжения (с меньшей абсолютной величиной).

3. На этом участке имеет место трение скольжения. Сила трения растёт до нейтрального сечения, а после нейтрального сечения резко уменьшается с уменьшением упругих сил действующих в этой области очага деформации.

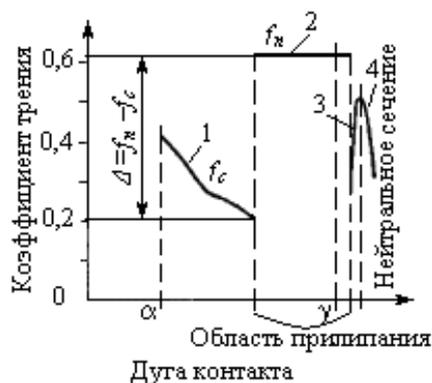


Рис. 2. Гипотетическая зависимость изменения коэффициента трения по дуге контакта

4. На этом участке имеет место трение скольжения. Он заканчивается на выходе проката из валков в зоне завершения контакта.

Пояснение спорных моментов гипотетической зависимости.

Если в контактной зоне очага деформации работает только закон Леонардо да Винчи-Амонтона (одночленный), то коэффициент трения по дуге контакта даст линейную зависимость параллельную оси абсцисс $f = \text{const}$. С другой стороны зависимость на рис. 1 б описывает простую схему испытания (определения коэффициента трения): к грузу (либо телу под неизменной нагрузкой) прикладывается переменное усилие направленное перпендикулярно к нормальной нагрузке. В случае же прокатки схема сложная: нормальная сила переменна и является лишь составляющей, компонентой результирующей силы, которая непрерывно меняет направление. Кроме того в случае прокатки компактного металла он сам деформируясь приводит к появлению тангенциальной составляющей, которая либо складывается либо вычитается из силы

трения дает результирующую которую и фиксирует наклонная мсдоза (рис.1 а) С этим может быть связано кажущееся изменение коэффициента трения рассчитанное в работах [9, 10].

Выводы

1. Рассмотренные методы экспериментального определения коэффициента трения (кроме метода давления, применение которого требует дополнительной проверки) могут быть использованы для определения коэффициента трения при несимметричной прокатке, кроме того может быть использован метод испытания типа вал (втулка) палец с использованием стандартных машин трения.

2. По сложившейся традиции при прокатке порошков определяют коэффициент трения на участке неполной силы трения и предполагают, что в точке касания соответствующей нейтральному сечению он равен 0 [9, 10], хотя в этих условиях (прилипания проката к валку) коэффициент трения не может быть определен. На участке дуги контакта, где сила трения соответствует неполной силе трения коэффициент трения принимается равным коэффициенту трения покоя. Этот участок и будет соответствовать зоне прилипания.

3. При рассмотренной схеме несимметричной прокатки в зоне отставания на малом валке сила трения выталкивает металл из валков, а в зоне опережения направление и величина силы трения на большом валке будет зависеть от параметров прокатки.

Анотація. Розглянуті методи визначення коефіцієнта тертя при прокатуванні стосовно умов несиметричного прокатування на валках різного діаметру, що обертаються з однаковими кутовими швидкостями. Запропонована гіпотетична крива зміни коефіцієнта тертя при прокатуванні порошків, з врахуванням існування тертя ковзання і тертя спокою. Запропоновано на ділянці дуги контакту, де сила тертя відповідає неповній силі тертя коефіцієнт тертя приймати рівним коефіцієнту тертя спокою. Ця ділянка відповідатиме зоні прилипания. Показано, що при розглянутій схемі несиметричної прокатки в зоні відставання на малому валку сила тертя виштовхує метал з валків, а в зоні випередження напрямом і величина сили тертя на великому валку залежатиме від параметрів прокатування.

Ключові слова: несиметричне прокатування, металеві порошки, коефіцієнт тертя, тертя ковзання, тертя спокою

Abstract. Purpose. Methodology of estimation the friction coefficient is discussed relative to asymmetrical rolling for powders using rollers of different diameters that rotate with similar angle velocities.

Design/methodology/approach Experimental methods and analytical dependencies used for measuring the friction coefficient for various patterns of rolling are considered. The method of forward slip, the method of measurement of friction coefficient via the diagram of radial pressure upon the roll, and the method of roller-pin testing on standard friction machines are validated as useful for application to conditions of asymmetrical rolling on rollers of various diameters that rotate with similar angle velocities. A hypothetical curve of the friction coefficient variation at powder rolling is suggested that accounted for the presence of slipping friction and friction at rest. At the above pattern of asymmetrical rolling, the friction force of the smaller roller extrudes the metal out of the rolls within the lag zone, while in the zone of slippage on the delivery side, the friction force on the major roll shall depend on the rolling conditions.

Keywords: asymmetrical rolling, metal powders, coefficient of friction, slipping friction, friction at rest.

1. Грудев А.П. Внешнее трение при прокатке. Москва «Металлургия» 1973. 287с.
2. Грудев А.П. Основные закономерности и механизмы внешнего трения при холодной прокатке. А. реф. д.т.н. Днепропетровск, 1968. 38с.
3. Трение и смазки при обработке металлов давлением. Справ. изд. А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. – М.: Metallurgiya, 1982, – 312 с.

4. *Крагельский И.В.*, Виноградова И.Э. Коэффициенты трения. Справочное пособие. – М.: ГН-ТИМЛ, 1955. – 188 с.
5. *Крагельский И.В.*, Виноградова И.Э. Коэффициенты трения. М.: Mashgiz, 1962. – 220 с.
6. *Мамыкин Э.Т.*, Ковпак М.К., Юга А.И., Шейко Н.Ф., Пушкарев В.В. Комплекс машин и методика определения антифрикционных свойств материалов при трении скольжения // Порошковая металлургия. 1973, №1. – С. 67 – 72.
7. *Грудев А.П.* Теория прокатки. – М.:Металлургия, 1988. – 240с.
8. *Гогаев К.А.*, Калущий Г.Я., Воропаев В.С. Асимметричная прокатка металлических порошков II. Угловые параметры асимметричной прокатки // – Порошковая металлургия. – 2009. – № 5/6. – С. 35 – 40.
9. *Чекмарев А. П.*, Клименко П. Л., Виноградов Г. А. Исследование удельного давления, удельного трения и коэффициента трения при прокатке металлических порошков // Порошковая металлургия, № 2, 1963.
10. *Каташинский В.П.*, Виноградов Г.А. Метод исследования удельных сил трения и давлений при прокатке металлических порошков // Порошковая металлургия. – 1965, № 2. – с.
11. *Справочник по триботехнике* / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т.1. Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
12. *Жданович Г.М.* Исследование внешнего и внутреннего трения при прессовании металлических порошков / Тр. VII всесоюз. научн.-техн. конф. по порошковой металлургии. – Ереван, 1964. – С. 320 – 322.
13. *PhysLink*. Physics and astronomy online. Since 1995. Coefficients of friction [Электронный ресурс] — Режим доступа: URL: <http://www.physlink.com/Reference/FrictionCoefficients.cfm> — Загол. с экрана.

REFERENCES

1. *Grudev A.P.* Vneshnee trenie pri prokatke [External friction during rolling]. Moscow, Metallurgija, 1973. 287p.
2. *Grudev A.P.* Osnovnye zakonomernosti i mehanizmy vneshnego trenija pri holodnoj prokatke [Basic laws and mechanisms of sliding friction in cold rolling]. A. ref. d.t.n. Dnepropetrovsk, 1968. 38p.
3. *Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem* [Friction and lubrication in metal forming]. Sprav. izd. A.P. Grudev, Ju.V. Zilberg, V.T. Tilik. M.: Metallurgija, 1982, 312 p.
4. *Kragelskij I.V.*, Vinogradova I. Je. Kojefficienty trenija [Coefficients of friction]. Moscow: GN-TIML, 1955. 188 p.
5. *Kragelskij I.V.*, Vinogradova I. Je. Kojefficienty trenija. [Coefficients of friction]. Moscow: Mashgiz, 1962. 220 p.
6. *Mamykin É. T.* Kovpak M. K, Yuga A. I., Sheiko N. F and Pushkarev V. V.. A set of machines and a method for determining the bearing characteristics of materials under sliding friction conditions. Powder Metallurgy and Metal Ceramics 1973. V. 12, N. 1, pp. 55-58
7. *Grudev A.P.* Teorija prokatki. [The theory of rolling]. Moscow: Metallurgija, 1988. 240p.
8. *Gogaev K.A.* Uglovyje parametry asimmetrichnoj prokatki. Asimmetrichnaja prokatka metallicheskih poroshkov II. K.A. Gogaev, G. Ja. Kaluckij, V.S. Voropaev. Poroshkovaja metallurgija. 2009. No 5/6, pp. 35-40.
9. *Chekmarev A. P.*, Klimentko P. L., Vinogradov G. A. Issledovanie udel'nogo davlenija, udel'nogo trenija i kojefficienta trenija pri prokatke metallicheskih poroshkov. Poroshkovaja metallurgija, no 2, 1963, pp. 27-31. (In Russian)
10. *Katashinskii V. P.* and Vinogradov G. A. A method of studying specific friction forces and pressures in the rolling of metal powders. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 1965. V. 4, N. 2. pp. 91-94
11. *Spravochnik po tribotekhnike* [Tribotekhnike reference book]. Pod obshch. red. M. Hebды, A.V. Chichinadze. V 3 t. T.1. Teoreticheskie osnovy [Theoretical basic]. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 400 p
12. *Zhdanovich G.M.* Issledovanie vneshnego i vnutrennego trenija pri pressovanii metallicheskih poroshkov Tr. VII vsesojuzn. nauchn.-tehn. konf. po poroshkovej metallurgii. Erevan, 1964. P. 320 – 322.
13. *PhysLink*. Physics and astronomy online. Since 1995. Coefficients of friction [Electronic resource]. Access mode: URL: <http://www.physlink.com/Reference/FrictionCoefficients.cfm>. The title screen.