

УДК 621.77.621.892.(03)

Василев Я. Д.
Замогильный Р. А.
Ковтун А. Ю.

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ЭПЮРАМ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

При прокатке вся энергия, необходимая для обжатия полосы валками передается фрикционным путем. По этой причине силы трения на контакте полосы с валками, зависящие от величины коэффициента трения, оказывают большое влияние на все параметры процесса прокатки. При однозначном скольжении металла относительно инструмента количественная взаимосвязь между силой трения T и нормальной силой N при прокатке согласно закону Амонтона определяется по формуле [1]:

$$T = f \times N. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности f в этой формуле известен под названием коэффициент трения скольжения. Коэффициент трения скольжения (далее коэффициент трения) представляет собой некую безразмерную физическую константу, величина которой при прокатке определяется химическим составом и состоянием контактирующих поверхностей валков и полосы, а также условиями их фрикционного взаимодействия [1, 2]. В соответствии с законом Амонтона, справедливость которого не ставится под сомнение, под термином коэффициент трения при прокатке f по смыслу подразумевают некоторую среднюю постоянную величину данного параметра для всего очага деформации [1, 2].

В настоящее время теоретическое определение коэффициента трения невозможно. Поэтому данные о величине коэффициента трения при прокатке получают только экспериментальным путем. Практически все методы экспериментального определения коэффициента трения при прокатке, а их около 20, основаны на измерении интегральных характеристик процесса, которые прямо или косвенно отражают влияние силы трения на коэффициент трения [1, 2]. Наиболее точные и надежные из них (методы крутящего момента и принудительного торможения полосы) предусматривают прямое измерение сил T и N и определяют величину коэффициента трения как частное этих сил:

$$f = \frac{T}{N}. \quad (2)$$

Зависимость (2) вытекает из закона Амонтона и предназначена для вычисления коэффициента трения по экспериментальным значениям сил T и N при прокатке, зафиксированным в условиях однозначного скольжения. Она вполне корректна, поскольку силы T и N являются интегральными характеристиками процесса. Однако в дальнейшем многие исследователи совершенно необоснованно и ошибочно стали использовать аналогичные по структуре зависимости для определения «коэффициента трения в точке», т. е. в любом сечении очага f_x и «его среднего значения для всего очага деформации» f_{cp} по экспериментальным эпюрам контактных напряжений при прокатке [1, 3, 4]:

$$f_x = \frac{|\tau_x|}{p_x}; \quad (3)$$

$$f_{cp} = \frac{|\tau_{cp}|}{p_{cp}}, \quad (4)$$

где f_x , τ_x , p_x – коэффициент трения, напряжение трения и нормальное напряжение в точке на контакте полосы с валками;

f_{cp} , τ_{cp} , p_{cp} – средние по очагу деформации значения коэффициента трения, напряжения трения и нормального напряжения при прокатке.

Такой подход определения «коэффициента трения» по экспериментальным эпюрам контактных напряжений при прокатке был спровоцирован тем, что в литературе по теории прокатки закон Амонтона (1) без каких-либо оснований стали отождествлять с «моделью напряжений трения при прокатке в условиях однозначного скольжения» [1, 3–5].

$$\tau = fp, \quad (5)$$

где τ , p – напряжение трения и нормальное контактное напряжение.

Условие (5) теоретически необоснованно и экспериментально не подтверждено и естественно, моделью напряжений трения, а тем более законом трения при прокатке не является [2, 6]. Это просто одно из многих грубых допущений, принятых в современной теории прокатки [2]. «Коэффициенты трения f_x и f_{cp} », вычисляемые с использованием условий (3) и (4) в работе [3] названы соответственно «показатель» и «средний показатель» напряжения контактного трения. Таким образом, и условия (3), (4) должны рассматриваться только в качестве допущений. Об этом свидетельствует тот факт, что опубликованные в литературе данные о «коэффициентах трения f_x и f_{cp} » при прокатке, полученные с использованием условий (3) и (4), подтверждения и объяснения не имеют. Например, в результате чего: а) «коэффициент трения f_x » в сечениях входа и выхода полосы из очага деформации приобретает наибольшие, а в нейтральном сечении нулевые значения [3, 5]; б) «коэффициент трения f_{cp} » при прокатке с натяжением увеличивается и достигает чрезмерно больших величин – до 0,62–0,70 и до 0,38–0,42, когда прокатка ведется соответственно с задним и передним натяжением [4]; в) «коэффициент трения f_{cp} » при прокатке на сухих валках уменьшается с увеличением фактора формы очага деформации или с ростом частного относительного обжатия [3] и др.

Из изложенного следует, что получение надежных данных о величине коэффициента трения при холодной прокатке по экспериментальным эпюрам контактных напряжений в настоящее время невозможно из-за отсутствия корректной модели напряжений трения и создания на её основе соответствующей методики для реализации данного метода.

Целью работы является определение коэффициента трения по эпюрам контактных напряжений по методике, учитывающей особенности кинематики очага деформации при холодной прокатке, что позволит повысить точность определения данного параметра.

Ранее в работах [2, 6, 7] было показано, что при теоретическом определении напряжений трения на контактной поверхности при прокатке должно быть учтено, по меньшей мере, влияние коэффициента трения, нормальных контактных напряжений и скорости скольжения. С учетом сказанного для теоретического определения напряжений трения при прокатке тонких широких полос, когда процесс осуществляется в режимах сухого или смешанного трения были предложены следующие модели [2, 7]:

для зоны отставания:

$$\tau_{ox} = -fp_{ox} \frac{V_{ck0x}}{|V_{ck0}|} = -f_y p_{ox} \frac{h_0}{h_0 - h_n} \left(\frac{h_n}{h_x} - 1 \right); \quad (6)$$

для зоны опережения:

$$\tau_{1x} = -fp_{1x} \frac{V_{ck1x}}{|V_{ck1}|} = -fp_{1x} \frac{h_1}{h_n - h_1} \left(\frac{h_n}{h_x} - 1 \right), \quad (7)$$

где τ_{ox} , V_{ck0x} , p_{ox} , τ_{1x} , V_{ck1x} , p_{1x} – значения напряжений трения, скорости скольжения и контактных нормальных напряжений в рассматриваемом сечении очага деформации соответственно в зонах отставания и опережения;

$V_{ck0x}, V_{ck1x}, h_0, h_1$ – значения скорости скольжения и толщины полосы соответственно в сечениях входа и выхода из очага деформации;

h_n – толщина полосы в нейтральном сечении.

Знак (–) в моделях (6) и (7) указывает на то, что векторы τ_{ox} , и $V_{ck0x}, \tau_{1x}, V_{ck1x}$ – направлены в противоположные стороны.

Как отмечалось выше, коэффициент трения в моделях (6), (7) является постоянной величиной вдоль очага деформации. Поэтому, для получения количественных данных о величине данного параметра по экспериментальным эпюрам контактных напряжений при прокатке рекомендуется формула [2]:

$$f = \frac{|\tau_{cp}| (|V_{ck0}| + |V_{ck1}|)}{p_{cp} 2V_{ckcp}}, \quad (8)$$

где

$$V_{ckcp} = \frac{V_6}{2} \left[\left(1 - \frac{h_n}{h_0}\right) \left(1 - \frac{l_{0n}}{l}\right) + S \frac{l_{0n}}{l} \right]; \quad (9)$$

p_{cp}, τ_{cp} – средние значения нормальных контактных напряжений и напряжений трения;

l, l_{0n} – длина очага деформации и длина зоны опережения;

S, V_6 – опережение и окружная скорость валков.

После подстановки значений V_{ck0}, V_{ck1} и V_{ckcp} в формулу (8) получили следующую зависимость для вычисления коэффициента трения по экспериментальным эпюрам контактных напряжений при двумерной прокатке тонких полос [2]:

$$f = \frac{|\tau_{cp}| \left(\frac{h_n}{h_1} - \frac{h_n}{h_0} \right)}{p_{cp} \left[\left(1 - \frac{h_n}{h_0}\right) \left(1 - \frac{l_{0n}}{l}\right) + S \frac{l_{0n}}{l} \right]}. \quad (10)$$

Зависимость (10) отличается от условия (4) тем, что она учитывает влияние кинематических условий прокатки на величину коэффициента трения. Это логично, поскольку без учета влияния кинематики очага деформации корректное теоретическое определение напряжений трения при прокатке невозможно [2]. Кроме того, она учитывает в явном виде влияние обжатия, а через h_n, l_{0n} и S влияние натяжения на коэффициент трения. Влияние перечисленных факторов на величину коэффициента трения при холодной прокатке весьма существенно. Анализ показал, что второй множитель правой части зависимости (10) всегда больше единицы и при прокатке без натяжения составляет 1,2–1,8 и более. Это означает, что значения «коэффициента трения f_{cp} », вычисленные по условию (4) с использованием экспериментальных эпюр контактных напряжений, будут получаться всегда заниженными в 1,2–1,8 раза и более.

Зависимость (10) для вычисления коэффициента трения по экспериментальным эпюрам контактных напряжений при холодной полосовой прокатке имеет достаточное физическое и математическое обоснование. Все необходимые для её реализации исходные данные, за исключением опережения S , определяются по параметрам эпюр контактных напряжений. Основные трудности при определении коэффициента трения этим методом связаны с получением экспериментальных эпюр контактных напряжений при прокатке.

С использованием зависимости (10) были рассчитаны значения коэффициента трения по экспериментальным эпюрам контактных напряжений, приведенным в работе [3], которые были получены, при холодной прокатке на сухих валках образцов из стали 08кп с номинальной толщиной 1,2 мм. Результаты расчетов коэффициента трения f в виде зависимости $f = \varphi(l_c/h_{cp})$ (где l_c, h_{cp} – экспериментально измеренная длина очага деформации и средняя толщина полосы в очаге деформации) представлены на рис. 1, а.

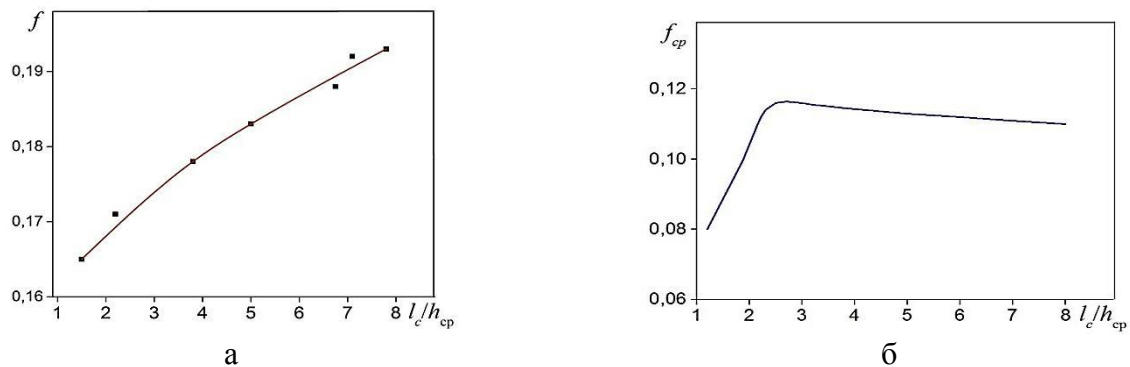


Рис. 1. Зависимости $f = \varphi(l_c/h_{cp})$ (а) и $f_{cp} = \varphi(l_c/h_{cp})$ (б), построенные по экспериментальным эпюрам контактных напряжений при холодной прокатке, приведенным в работе [3]

Из рисунка видно, что значения коэффициента трения по экспериментальным эпюрам контактных напряжений при холодной прокатке находятся в диапазоне от 0,17 до 0,19 и с увеличением фактора формы очага деформации l_c/h_{cp} (частного относительного обжатия при прокатке) возрастают. Приведенная на рисунке зависимость $f = \varphi(l_c/h_{cp})$ как по величине, так и по характеру изменения коэффициента трения от обжатия согласуется с данными, которые были получены другими методами [1, 8]. Это служит подтверждением точности и надежности метода определения коэффициента трения при прокатке по экспериментальным эпюрам контактных напряжений.

Для сравнения на рис. 1, б показана также взятая из работы [3] зависимость «среднего показателя напряжения контактного трения» $f_{cp} = \varphi(l_c/h_{cp})$, значения которого были рассчитаны по условию (4). Видно, что значения показателя f_{cp} примерно в два раза меньше значений коэффициента трения f , полученных с использованием зависимости (10) и с ростом параметра l_c/h_{cp} уменьшаются. Как уже отмечалось, данные о f_{cp} , полученные по экспериментальным эпюрам контактных напряжений, коэффициентом трения не являются, поскольку не учитывают влияние кинематики очага деформации при прокатке. По этой причине они научной, а тем более практической ценности не представляют. Тем не менее, во многих публикациях исследователи продолжают отождествлять значения f и f_{cp} , полагая, что «средний показатель напряжений трения» f_{cp} является «средним коэффициентом трения» на контактной поверхности при прокатке [1, 3]. Это и послужило причиной опубликования в работе [4] явно спорных результатов, согласно которым значения коэффициента трения при прокатке с натяжением увеличиваются и при прокатке с превалирующим задним натяжением достигают 0,62–0,70. Такие большие значения коэффициента трения не могут быть объяснены с позиций современной теории прокатки.

ВЫВОДЫ

Установлено, что принятие грубых допущений в качестве моделей напряжений трения при прокатке типа «закона Амонтона» для определения коэффициента трения по экспериментальным эпюрам контактных напряжений приводит к получению ошибочных значений данного параметра и к необоснованным выводам.

Для получения надежных данных о величине коэффициента трения при прокатке, по экспериментальным эпюрам контактных напряжений необходима корректная модель напряжений трения при прокатке и создания на её основе методики для реализации данного метода. Показано, что корректная модель напряжений трения при прокатке должна учитывать, по меньшей мере, влияние коэффициента трения, нормальных контактных напряжений и скорости скольжения.

На базе новой модели напряжений трения, учитывающей особенности кинематики очага деформации при прокатке тонких широких полос создана и реализована современная методика определения коэффициента трения по эпюрам контактных напряжений. С использованием предложенной методики получены новые данные о величине коэффициента трения

при холодной прокатке по экспериментальным эпюрам контактных напряжений. Сопоставление этих данных с коэффициентами трения, полученными другими методами в аналогичных условиях прокатки показало их хорошее соответствие, что служит подтверждением точности и надежности предложенной методики определения коэффициента трения по экспериментальным эпюрам контактных напряжений и дает основание рекомендовать её для практического применения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грудев А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением [текст] : справ. изд. / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : Металлургия, 1982. – 312 с.
2. Василев Я. Д. Теория продольной прокатки [текст] : учебник для магистрантов вузов / Я. Д. Василев, А. А. Минаев. – Донецк : УНИТЕХ, 2010. – 456 с.
3. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке [текст] / П. И. Полухин, В. А. Николаев, В. П. Полухин, А. В. Зиновьев, Е. Н. Косаримов. – М. : Металлургия, 1974. – 200 с.
4. Непрерывная прокатка полос. Непрерывная прокатка : коллективная монография / В. Н. Данченко, О. Н. Штехно, А. И. Молчанов, А. М. Сафьян, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – Днепропетровськ : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – С. 7–136.
5. Целиков А. И. Теория продольной прокатки [текст] / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
6. Василев Я. Д. Уточнение модели напряжений трений при прокатке [текст] / Я. Д. Василев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 5. – С. 19–23.
7. Василев Я. Д. Модель напряжений трения при тонколистовой прокатке [текст] / Я. Д. Василев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 1. – С. 29–33.
8. Василев Я. Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки / Я. Д. Василев. – М. : Металлургия, 1995. – 368 с.

REFERENCES

1. Grudev A. P. Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem [tekst] : sprav. izd. / A. P. Grudev, Ju. V. Zil'berg, V. T. Tilik. – M. : Metallurgija, 1982. – 312 s.
2. Vasilev Ja. D. Teorija prodol'noj prokatki [tekst] : uchebnik dlja magistrantov vuzov / Ja. D. Vasilev, A. A. Minaev. – Doneck : UNITEH, 2010. – 456 s.
3. Kontaktnoe vzaimodejstvie metalla i instrumenta pri prokatke [tekst] / P. I. Poluhin, V. A. Nikolaev, V. P. Poluhin, A. V. Zinov'ev, E. N. Kosarimov. – M. : Metallurgija, 1974. – 200 s.
4. Nepreryvnaja prokatka polos. Nepreryvnaja prokatka : kollektivnaja monografija / V. N. Danchenko, O. N. Shtehno, A. I. Molchanov, A. M. Saf'jan, Ju. V. Zil'berg, V. T. Tilik. – Dnipropetrovs'k : RVA «Dnipro-VAL», 2002. – S. 7–136.
5. Celikov A. I. Teorija prodol'noj prokatki [tekst] / A. I. Celikov, G. S. Nikitin, S. E. Rokotjan. – M. : Metallurgija, 1980. – 320 s.
6. Vasilev Ja. D. Utochnenie modeli naprjazhenij trenij pri prokatke [tekst] / Ja. D. Vasilev // Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija. – 2001. – № 5. – S. 19–23.
7. Vasilev Ja. D. Model' naprjazhenij trenija pri tonkolistovoj prokatke [tekst] / Ja. D. Vasilev // Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija. – 2002. – № 1. – S. 29–33.
8. Vasilev Ja. D. Inzhenernye modeli i algoritmy rascheta parametrov holodnoj prokatki / Ja. D. Vasilev. – M. : Metallurgija, 1995. – 368 s.

Василев Я. Д. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ;

Замогильный Р. А. – аспирант НМетАУ;

Ковтун А. Ю. – студент НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр.

E-mail: rz90@i.ua

Статья поступила в редакцию 14.03.2018 г.