

УДК 621.771.001.23

Василев Я. Д.  
Замогильный Р. А.  
Самокиш Д. Н.  
Олейник А. В.

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПОЛОСОВОЙ ПРОКАТКЕ

Силы трения на контакте полосы с валками оказывают большое влияние на энергосиловые и кинематические параметры процесса холодной полосовой прокатки [1–3]. Количественной мерой этого влияния служит коэффициент трения. Поэтому при разработке режимов деформации на полосовых станах холодной прокатки необходима точная и надежная информация о величине коэффициента трения [1, 4]. Несмотря на то, что вопросы трения являются одними из ключевых в современной теории продольной прокатки теоретическое определение коэффициента трения при прокатке, в том числе холодной, в настоящее время невозможно. По этой причине информацию о величине коэффициента трения при холодной прокатке получают экспериментальным или расчетным путем с использованием эмпирических формул или инженерных методик [5–9]. Очевидно, что точность расчета коэффициента трения при холодной прокатке по приближенным формулам (методикам), в зависимости от принятых допущений при их разработке, может быть различной.

Из изложенного следует, что прогнозирование коэффициента трения при холодной прокатке сегодня возможно только по приближенным формулам или инженерным методикам. Поэтому совершенствование известных и разработка новых методов (методик, формул) расчета коэффициента трения при холодной полосовой прокатке с целью повышения точности и надежности его определения является актуальной задачей.

Пластическая деформация металла при холодной полосовой прокатке осуществляется в результате совместного упруго-пластического, силового, фрикционного, кинематического и теплового взаимодействия полосы с валками [1–3]. Кроме того, процесс холодной прокатки реализуется всегда с применением технологической смазки, которая подается непрерывно в виде 1...4 % эмульсии на валки и полосу [5, 10]. Исходным материалом для приготовления эмульсии на промышленных станах холодной полосовой прокатки служат многокомпонентные смазочные композиции (эмульсолы), производство которых осуществляется на специализированных предприятиях. Поэтому при расчетном определении коэффициента трения на полосовых станах холодной прокатки должно быть учтено количественное влияние каждого из названных факторов, а также физико-химические свойства технологической смазки [3, 9]. В опубликованных работах, посвященных расчетному определению коэффициента трения при холодной полосовой прокатке, количественное влияние перечисленных факторов обычно учитывается приближенно, а влиянием некоторых из них просто пренебрегают, что снижает точность прогнозирования данного параметра [5–9].

Общим недостатком этих работ является то, что используемые в них формулы для расчетного определения коэффициента трения содержат в качестве сомножителя «коэффициент  $k_{см}$ , учитывающий влияние природы технологической смазки» [5, 6]. Рекомендуемые значения коэффициента  $k_{см}$  по данным этих работ равны: 1,0 для растительных масел и 1,4 для минеральных масел и эмульсолов на основе минеральных масел. Такой подход определения коэффициента  $k_{см}$  приводит к погрешности при расчете коэффициента трения до 40 %, поскольку физико-химические свойства как растительных, так и минеральных (нефтяных) масел не являются одинаковыми в соответствующих группах, а все эмульсолы представляют собой смесь минерального масла с растительными и животными жирами, синтетически жирными кислотами, эмульгаторами, поверхностно активными веществами и присадками [5, 10–12].

Цель работы заключается в уточнении методики расчета коэффициента трения при холодной полосовой прокатке путем разработки метода определения коэффициента  $k_{см}$ , ос-

нованного на учете фактических значений физико-химических свойств конкретной технологической смазки (эмульсола).

Рассмотрим возможность теоретического определения коэффициента  $k_{см}$  по предлагаемому методу на примере известной формулы А.П. Грудева для расчета коэффициента трения при установившемся процессе холодной прокатки [5, 6]:

$$f = k_{см} \frac{1}{1 + 0,25\sqrt{v_{50}} - 0,005v_{50}} (1 + 0,5R_z) \left[ 0,07 - \frac{0,1V_в^2}{2(1 + V_в) + 3V_в^2} \right], \quad (1)$$

где  $v_{50}$  – кинематическая вязкость смазки при 50 °С, мм<sup>2</sup>/с;

$R_z$  – высота микронеровностей на поверхности валка, мкм;

$V_в$  – окружная скорость валков при прокатке, м/с.

Формула (1), предложенная почти полвека тому назад, является приближенной. Она учитывает только часть факторов влияющих на величину коэффициента трения при холодной прокатке, поэтому неоднократно уточнялась автором [5, 6], и другими исследователями [7–9]. Как уже отмечалось выше во всех формулах для расчета коэффициента трения при холодной прокатке, в том числе и более корректных [7, 8], присутствует коэффициент  $k_{см}$ . Строго говоря коэффициент  $k_{см}$  должен учитывать не просто «влияние природы технологической смазки», а влияние физико-химических свойств технологической смазки на ее смазочную эффективность. Поскольку влияние одного из важнейших физических свойств технологической смазки на ее смазочную эффективность – вязкости в формуле (1) учтено, то логично заключить, что должно быть учтено и влияние химических свойств последней. Основными из них, особенно для растительных масел и эмульсолов, являются число омыления (*ЧОМ*) и кислотное число (*КЧ*) [5,10–12]. В данной работе, при определении коэффициента  $k_{см}$ , влияние этих показателей учтено.

При обосновании формулы (1) А.П. Грудев полагал, что смазочная эффективность любой технологической смазки определяется исключительно ее вязкостью, и исходил из понимания, что из всех технологических смазок, применяемых в то время при холодной прокатке наиболее эффективной является пальмовое масло ( $v_{50} = 28$  мм<sup>2</sup>/с), а наименее эффективной – индустриальное масло 20 ( $v_{50} = 20$  мм<sup>2</sup>/с) [5, 6]. Из соотношения вязкостей этих масел он и определил граничные значения коэффициента  $k_{см}$  – 1,0 для растительных масел и 1,4 – для минеральных масел. Учет вязкости смазки при определении коэффициента  $k_{см}$  является только одним из необходимых условий при решении этой задачи. Поэтому в данной работе при определении коэффициента  $k_{см}$  учитывали также влияние химических свойств технологической смазки через *ЧОМ* и *КЧ*. Исходя из сказанного, расчет коэффициента  $k_{см}$  производили по формуле:

$$k_{см} = 2,4 - \sqrt{1 + \frac{ЧОМ + КЧ}{ЧОМ_{пм} + КЧ_{пм}}}, \quad (2)$$

где *ЧОМ*, *КЧ*, *ЧОМ<sub>пм</sub>*, *КЧ<sub>пм</sub>* – число омыления и кислотное число конкретной технологической смазки и пальмового масла соответственно, мг КОН/г.

Минеральные масла не омыляются, а их кислотное число пренебрежимо мало [5]. Поэтому расчетные значения коэффициента  $k_{см}$  для этих масел по формуле (2) равны  $\approx 1,4$ . При расчетном определении коэффициента  $k_{см}$  в случае применения при холодной прокатке эмульсий на основе растительных масел или эмульсолов в формулу (2) следует подставлять соответственно значения *ЧОМ* и *КЧ* конкретного растительного масла или конкретного эмульсола.

В табл. 1 приведены значения коэффициента  $k_{см}$ , полученные расчетным путем по формуле (2) для некоторых растительных масел и эмульсолов, применяемых в качестве технологических смазок при холодной прокатке. При выполнении расчетов  $k_{см}$  использовали данные о *ЧОМ* и *КЧ* анализируемых масел (эмульсолов), приведенных в работах [5,10–12]. Для большей наглядности эти данные представлены также в виде гистограммы на рис. 1.

Таблица 1

Расчетные значения коэффициента  $k_{см}$  для некоторых растительных масел и эмульсолов, применяемых в качестве технологических смазок при холодной прокатке

№ п/п	Наименование масла или марки эмульсола	Физико-химические свойства смазок (эмульсолов)			Расчетные значения коэффициента $k_{см}$
		$\nu_{50}$ , мм <sup>2</sup> /с	ЧОМ, мг КОН/г	КЧ, мг КОН/г	
1	Пальмовое масло	28	206,5	11	0,986
2	Тиннол 12	40,7	196	21,2	0,986
3	Quakerol 27	42	192	17,8	0,998
4	Кориандровое масло	26,5	197	8	1,006
5	Luberol B	30,7	192,9	10,1	1,010
6	Balmer	31,2	190,5	8,2	1,017
7	Подсолнечное масло	21,5	190	6	1,021
8	Luberol	30,8	189,6	5,8	1,022
9	Хлопковое масло	26	195	0,3	1,022
10	Касторовое масло	130	189,5	4	1,025
11	Gerolub (Henkel)	35	185	5,6	1,030
12	Quakerol 680-1 DPD	38	178	11,25	1,033
13	Quakerol 680-2 DPD	41	162	11,15	1,060
14	Quakerol 680 DPD	35	162	10,8	1,060
15	Quakerol 403	47	128,5	10,5	1,120
16	Cold Roller	28,14	81	21	1,188
17	Quakerol 41CB	36,6	76	10,8	1,217
18	Quakerol 1508	49,8	75	10,3	1,220
19	Quakerol 1137	40,6	39,7	35	1,241
20	ЭП-29	48	45	5	1,291
21	ЭТ-2У	33	28	19	1,297
22	Т	25	35	8	1,306
23	Агринол ОМ	32,3	22,4	19	1,309
24	ЭКС	65	13,5	9	1,350
25	Э-2 (Б)	58	15	6	1,353
26	ЭГТ	72	14	2,8	1,362
27	ОП	55	13,5	2,5	1,364
28	ЭТ-2	60	11	4	1,366
29	ЭС*	34,5	9,5	-	1,378

\* – Значение КЧ данного эмульсола принято равным нулю.

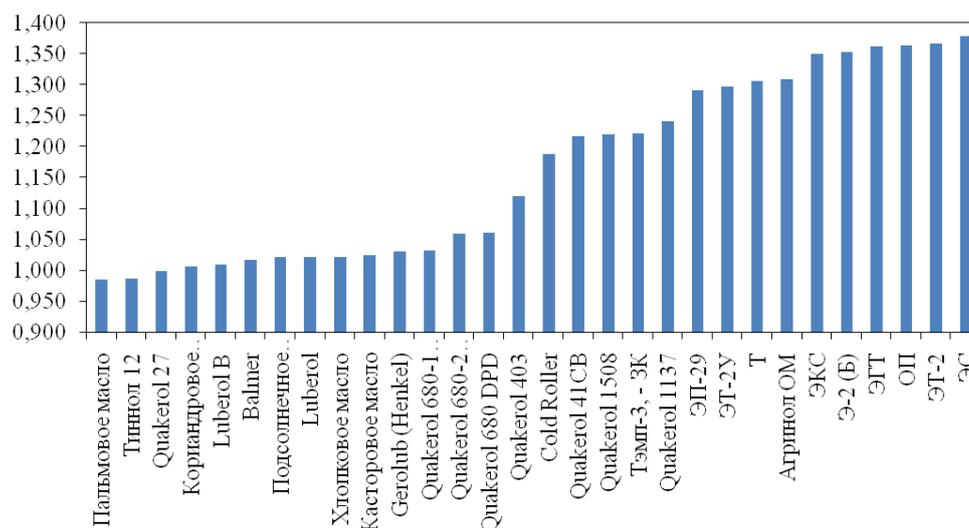


Рис. 1. Распределение коэффициента  $k_{cm}$  в зависимости от технологической смазки при холодной прокатке

Как следует из табл. 1 и рис. 1, значения коэффициента  $k_{cm}$  для растительных масел находятся в диапазоне 0,986...1,025, т.е. практически равны 1,0. При этом наиболее низкие значения этого параметра соответствуют пальмовому (0,986) и кориандровому (1,006) маслам. Видно также, что современные эмульсолы отличаются большими величинами параметра  $ЧОМ$  ( $ЧОМ=162...196$  мг КОН/г) и характеризуются низкими (не более 1,03...1,06) значениями коэффициента  $k_{cm}$ , а некоторые из них (Luberol B, Balmer) имеют значения  $k_{cm}$  практически равные 1,0 (1,010; 1,017) и по этому показателю соответствуют кориандровому и хлопковому маслам, т.е. высокоэффективным растительным маслам, либо не уступают пальмовому маслу. Например, значения коэффициента  $k_{cm}$  для эмульсола Тиннол 12 и пальмового масла одинаковы и равны 0,986.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что наиболее низкими значениями  $k_{cm}$  отличаются растительные масла и эмульсолы с большим числом омыления, либо с большой суммой числа омыления и кислотного числа. Например, при уменьшении суммы ( $ЧОМ+КЧ$ ) с 203 мг КОН/г (Luberol B) до 102 мг КОН/г (Cold Roller), 50 мг КОН/г (ЭП-29) и 21 мг КОН/г (Э-2 (Б)), т.е. в два, четыре и десять раз, значения коэффициента  $k_{cm}$  увеличиваются с 1,010 соответственно до 1,188; 1,291 и 1,353. Наиболее высокие значения коэффициента  $k_{cm}$  (1,378) зафиксированы для эмульсола ЭС.

Рассчитанные по формуле (2) значения коэффициента  $k_{cm}$  количественно более точно характеризуют смазочные свойства технологических смазок, поэтому их практическое использование в технологических расчетах позволит повысить точность и надежность определения коэффициента трения при холодной прокатке, и как следствие, обеспечить более высокую точность прогнозирования энергосиловых параметров на действующих станах холодной прокатки.

## ВЫВОДЫ

Предложен метод теоретического определения коэффициента  $k_{cm}$ , характеризующего смазочную эффективность технологических смазок при холодной прокатке по показателям их химических свойств. Использование значений коэффициента  $k_{cm}$ , полученных с учетом химических свойств каждой конкретной технологической смазки (эмульсола) позволит повысить точность расчета коэффициента трения при холодной прокатке по любой формуле (методике) как минимум на 10...40%, поскольку до настоящего времени значения коэффициента  $k_{cm}$  принимались постоянными и равными соответственно 1,0 (для растительных масел) и 1,4 (для минеральных масел и эмульсолов).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василев Я.Д. *Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки* / Я.Д. Василев. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.
2. Василев Я.Д. *Теория продольной прокатки. Учебник для магистрантов ВУЗов* / Я.Д. Василев, А.А. Минаев. – Донецк: УНИТЕХ, 2010. – 456 с.
3. Василев Я.Д. *Основы теории продольной холодной прокатки: Пластическая деформация металлов. Коллективная монография* / Я.Д. Василев. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – С.107–125.
4. *Экспериментальная проверка точности и работоспособности единой методики расчета энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной полосовой прокатки* / Я.Д. Василев, Д.Н. Самокиш, А.В. Дементюченко, М.И. Завгородний // *Черная металлургия: Бюллетень института «Черметинформация»*. – 2014. – № 2. – С. 65–73.
5. Грудев А.П. *Трение и смазки при обработке металлов давлением. Справ. изд.* / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
6. Грудев А.П. *Теория прокатки. Изд. 2-е, перераб и доп.* / А.П. Грудев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 280 с.
7. Мазур В.Л. *Производство листа с высококачественной поверхностью* / В.Л. Мазур. – М.: Металлургия, 1982. – 166 с.
8. *Управление качеством тонколистового проката* / В.Л. Мазур, А.М. Сафьян, И.Ю. Приходько, А.И. Яценко. – К.: Техника, 1997. – 384 с.
9. Василев Я.Д. *Методика расчета коэффициента трения при холодной прокатке с эмульсией на основе эмпирических зависимостей* / Я.Д. Василев // *Производство проката*. – 2012. – № 6. – С. 15–19.
10. Грудев А.П. *Технологические смазки в прокатном производстве* / А.П. Грудев, В.Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
11. *Формирование чистоты поверхности при производстве холоднокатаного металла на 2-х клетевом реверсивном стане ОАО «ММК»* / А. В. Горбунов, Н. Л. Зайсанова, Т. М. Кочнева, Т. В. Коляда, Ш. Х. Набиев, Р. Е. Халлиулин // *Совершенствование технологии на ОАО «ММК»*. Сб. тр. ЦЛК. – Магнитогорск, 2005. – Выпуск 9. – С. 130 – 136
12. *Испытания эмульсолов фирмы Henkel на непрерывном пятиклетевом стане 2030 бесконечной прокатки* / А.В. Долматов, А.В. Морозов, М.А. Усачев, В.Д. Шепилов, А.А. Челядинов // *Металлург*. – 2014. – №9. – С. 80–86.

## REFERENCES

1. Vasilev Ja.D. *Inzhenernye modeli i algoritmy rascheta parametrov holodnoj prokatki* / Ja.D. Vasilev. – М.: Metallurgija, 1995. – 368 s.
2. Vasilev Ja.D. *Teorija prodol'noj prokatki. Uchebnik dlja magistrantov VUZov* / Ja.D. Vasilev, A.A. Minaev. – Doneck: UNITEH, 2010. – 456 s.
3. Vasilev Ja.D. *Osnovy teorii prodol'noj holodnoj prokatki: Plasticheskaia deformacija metallov. Kollektivnaja monografija* / Ja.D. Vasilev. – Dnepropetrovsk: Akcent PP, 2014. – S.107–125.
4. *Jeksperimental'naja proverka tochnosti i rabotosposobnosti edinoj metodiki rascheta jenergosilovyh i temperaturno-skorostnyh parametrov processa holodnoj polosovoj prokatki* / Ja.D. Vasilev, D.N. Samokish, A.V. Dementienko, M.I. Zavgorodnij // *Chernaja metallurgija: Bjulleten' instituta «Chermetinformacija»*. – 2014. – № 2. – S. 65–73.
5. Grudev A.P. *Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem. Sprav. izd.* / A.P. Grudev, Ju.V. Zil'berg, V.T. Tilik. – М.: Metallurgija, 1982. – 312 s.
6. Grudev A.P. *Teorija prokatki. Izd. 2-e, pererab i dop.* / A.P. Grudev. – М.: Intermet Inzhiniring, 2001. – 280 s.
7. Mazur V.L. *Proizvodstvo lista s vysokokachestvennoj poverhnost'ju* / V.L. Mazur. – М.: Metallurgija, 1982. – 166 s.
8. *Upravlenie kachestvom tonkolistovogo prokata* / V.L. Mazur, A.M. Safjan, I.Ju. Prihod'ko, A.I. Jacenko. – К.: Tehnika, 1997. – 384 s.
9. Vasilev Ja.D. *Metodika rascheta koefefficienta trenija pri holodnoj prokatke s jemul'siej na osnove jempiricheskijh zavisimostej* / Ja.D. Vasilev // *Proizvodstvo prokata*. – 2012. – № 6. – S. 15–19.
10. Grudev A.P. *Tehnologicheskie smazki v prokatnom proizvodstve* / A.P. Grudev, V.T. Tilik. – М.: Metallurgija, 1975. – 368 s.
11. *Formirovanie chistoty poverhnosti pri proizvodstve holodnokatanogo metalla na 2-h klevom reversivnom stane ОАО «ММК»* / А. В. Gorbunov, N. L. Zajsanova, T. M. Kochneva, T. V. Koljada, Sh. H. Nabiev, R. E. Halliulin // *Sovershenstvovanie tehnologii na ОАО «ММК»*. Sb. tr. CLK. – Magnitogorsk, 2005. – Vy-pusk 9. – S. 130 – 136
12. *Ispytanija jemul'solov firmy Henkel na nepreryvnom pjatikletem stane 2030 beskonechnoj prokatki* / A.V. Dolmatov, A.V. Morozov, M.A. Usachev, V.D. Shepilov, A.A. Cheljadinov // *Metallurg*. – 2014. – №9. – S. 80–86.

Василев Я. Д. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ  
 Замогильный Р. А. – аспирант каф. ОМД НМетАУ  
 Самокиш Д. Н. – ассист. каф. ОМД НМетАУ  
 Олейник А. В. – студент НМетАУ

НМетАУ – Национальная металлургическая Академия Украины, г.Днепр.

E-mail: roman.zamogilniy@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 31.01.2017 г.