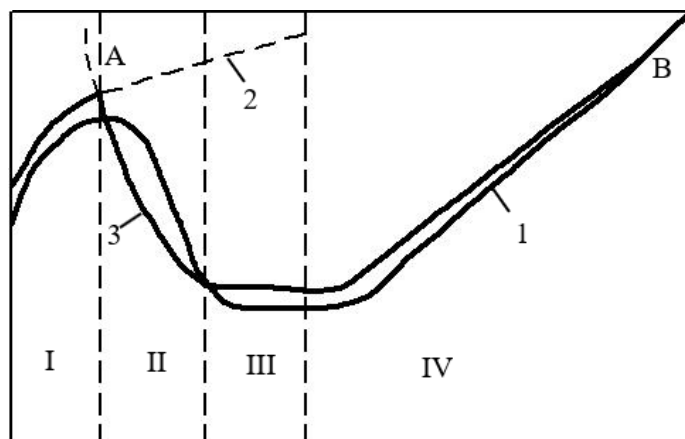


Днепропетровский государственный технический университет

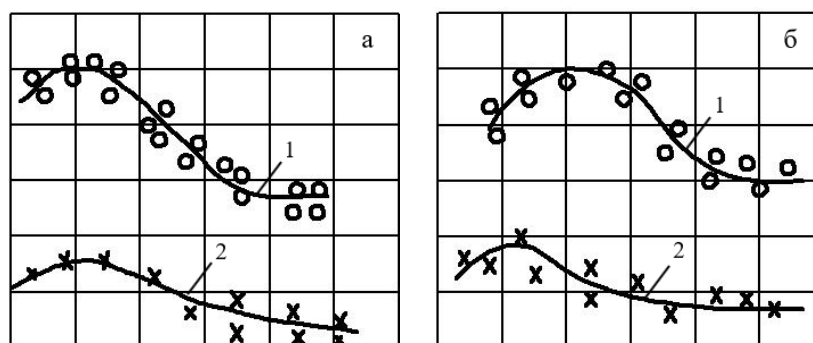
**КОНТАКТНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕНИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ СТАЛИ**

**Введение.** В зависимости от параметров деформации и эффективности технологической смазки трение при холодной прокатке стали охватывает весь спектр режимов от граничного до классического гидродинамического. В этом диапазоне режимов особое место принадлежит контактно-гидродинамическому трению, при котором толщина смазочной пленки в очаге деформации зависит не только от гидродинамических факторов, но и от упругой деформации поверхностей, образующих смазочный клин в предочаговой зоне. Теоретические исследования механизма образования масляной пленки в очаге деформации при контактно-гидродинамической смазке опубликованы в работах [1-3]. Необходимо отметить, что на эту толщину смазочного слоя определенное влияние оказывает и микрорельеф поверхностей валка и полосы [4]. Особенностью контактно-гидродинамической теории является зависимость коэффициента трения от скорости скольжения [5-7], которая показана на кривой 1 рис. 1. Диапазон значений этой зависимости можно разделить на четыре характерных участка. Возрастающая ветвь кривой на участке I выражает классическую зависимость, вытекающую из закона Ньютона, согласно которому сила вязкого сдвига в масляном слое должна быть пропорциональна градиенту скорости скольжения. При дальнейшем увеличении скорости скольжения кривая рассматриваемой зависимости переходит через максимум и в области II коэффициент трения уменьшается, что связано с некоторым увеличением температуры контакта и снижением вязкости смазки. При дальнейшем увеличении скорости скольжения влияние термического эффекта компенсируется гидродинамическим, что приводит к неизменности коэффициента трения в зоне III. При достаточно высокой скорости скольжения в условиях тяжело нагруженного контакта резко возрастает температура смазочного слоя, уменьшается толщина его вплоть до разрыва масляной пленки, что ведет к патологическому росту коэффициента трения (зона IV). Следует отметить, что экспериментальные исследования этой зависимости в условиях холодной прокатки с применением технологической смазки подтверждают выше рассмотренную теоретическую кривую [8]. Так, при прокатке углеродистых и легированных марок стали с минеральным маслом ИС-30 и синтетической смазкой СПТ-4 опытная зависимость средней удельной силы трения  $t_{cp}$  от скорости скольжения (рис. 2) имеет такой же вид, как показанный на рис. 1 за исключением IV зоны. Опытные данные работы [9] включают и начало четвертой зоны. Контактно-гидродинамическую теорию смазки подтверждают эксперименты А.П. Грудева по изучению зависимости коэффициента трения  $f_y$  от толщины слоя смазки [10]. Проведенный анализ показал, что основой изучения механизма трения при холодной прокатке с технологической смазкой может служить контактно-гидродинамическая теория. Она рассматривает механизм смазочного действия и трения в условиях тяжело нагруженного контакта при тонкопленочной смазке.



- 1 – согласно контактно-гидродинамической теории;
- 2 – кривая, построенная по выражению (4);
- 3 – кривая, соответствующая уравнению (5)

Рисунок 1 – Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения



а) – сталь 08кп; б) – 12X18H10  
1 – смазка ИС-30; 2 – смазка СПТ-4;

Рисунок 2 – Зависимость средней удельной силы трения от скорости скольжения

**Результаты работы.** В связи с изложенным целью настоящей работы является исследование коэффициента трения  $f_y$  при холодной прокатке стали с позиции контактно-гидродинамической теории. В соответствии с этой теорией на среднюю удельную силу трения в очаге деформации  $t_{cp}$  оказывают влияние толщина смазочной пленки  $\xi_{cp}$ , скорость скольжения  $V_{н\dot{e}.cp.}$ , микрорельеф поверхности валков  $R_{zb}$ , среднее давление  $p_{cp}$  и кинематическая вязкость  $\nu$ . Общая функциональная зависимость имеет вид:

$$t_{cp} = \phi \left[ \xi_{cp}; V_{н\dot{e}.cp.}; p_{cp}; R_{zb}; \nu \right], \quad (1)$$

$$\xi_{cp} = \frac{\xi_{0\dot{e}} + \xi_{1\dot{e}}}{2}; \xi_{1\dot{e}} = \xi_{0\dot{e}} \frac{1 + \mu}{2\mu}; \xi_{1\dot{e}} = V_a \frac{\Delta h}{3h_1}$$

В работе [1-3] проанализирована контактно-гидродинамическая модель толщины слоя смазки, которая определяется:

$$\frac{\xi_{0\dot{e}}}{\Delta h} = 3,6 \left[ \frac{\eta_0 (V_B + V_0)}{\beta \sigma_T \Delta h \cdot \alpha_c} \right]^{0,5} (\theta_\beta \sigma_T)^{0,6} \left( \frac{\beta \sigma_T}{2 \cdot \varepsilon \cdot E_i} \right) \frac{1}{1 - \exp(-\theta_\beta \sigma_T)} \quad (2)$$

Для расчёта толщины  $\xi_{0_\varepsilon}$  необходимо знать динамическую вязкость смазки  $\eta_0$  в предочаговой зоне, которая зависит от средней температуры смазочного слоя в ней Тарси [3]:

$$T_{\text{н.н.}} = T_0 + \frac{0,15 f_y \beta \sigma_T V_{\text{н.н.}} \xi_{0_\varepsilon}^{0,5} \cdot v^{0,17} \cdot \alpha_1^{0,33}}{(V_B + V_0)^{0,5} \lambda \cdot A_0}, \quad (3)$$

где  $\xi_{1_\varepsilon}$  – толщина слоя смазки на выходе металла из валков;

$\mu$  – коэффициент вытяжки;

$V_B$  – линейная скорость вращения валков;

$\Delta h$  – абсолютное обжатие;

$h_1$  – толщина полосы после прохода;

$\beta \sigma_T$  – вынужденный предел текучести;

$V_0$  – скорость полосы на выходе в очаге деформации;

$\alpha_c$  – сплюснутый угол захвата;

$\theta$  – пьезокоэффициент вязкости смазки;

$\varepsilon$  – относительное обжатие;

$E_{\text{п}}$  – модуль упругости I рода полосы;

$\alpha_{\text{п}}$  – коэффициент теплоотдачи масляной пленки поверхностям валка и полосы;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$A_T$  – термический эквивалент работы.

С помощью анализа размерностей преобразуем выражение (1) в следующее соотношение безразмерных параметров:

$$f_y = K_1 \left( \frac{v}{V_{\text{н.н.}} \xi_{\text{н.н.}}} \right)^a \left( \frac{R_z}{\xi_{\text{н.н.}}} \right)^b \quad (4)$$

Заметим, что коэффициент кинематической вязкости  $\nu$ , входящий в уравнение (4), отражает влияние молекулярного веса смазки на трение в очаге деформации, или её граничных свойств. Зависимость коэффициента трения от толщины смазочной плёнки определяет характер его связи с гидродинамическими параметрами. Микрорельеф поверхности валка показывает влияние сцепления металла с рабочим инструментом на характер трения, а скорость скольжения учитывает величину сдвига в единицу времени.

При определении числовых значений коэффициента  $K_1$  и показателей степеней  $a$  и  $b$  воспользуемся экспериментальными зависимостями коэффициента трения от толщины смазочной плёнки и шероховатости поверхности валков [11]. Представляя результаты опытных данных в логарифмических координатах, найдем вышеупомянутые постоянные величины.

Зависимость коэффициента трения от микрорельефа валков при прокатке с минеральными и растительными маслами позволяет определить показатель степени  $b$

$$\hat{a}_1 = \text{tg} \beta_1 = 0,35;$$

$$\hat{a}_0 = \text{tg} \beta_0 = 0,5,$$

где  $\beta_1$  и  $\beta_0$  – углы наклона прямых к горизонтали при прокатке с минеральным и растительным маслами.

Далее найдем показатель степени  $a$  у первого безразмерного множителя уравнения (4):

$$a_i = \operatorname{tg} \gamma_i - \hat{a}_i, a_i = 0,2 - 0,35;$$

$$a_\delta = \operatorname{tg} \gamma_\delta - \hat{a}_\delta, a_\delta = 0,3 - 0,5 = -0,2,$$

где  $\gamma_i$  и  $\gamma_\delta$  – углы наклона логарифмических зависимостей коэффициента трения от толщины смазочной плёнки для минеральных и растительных масел.

Зная показатели степеней в уравнении (4) и учитывая результаты опытов нетрудно определить усредненное значение коэффициента  $K_1$ :  $K_{1i} = 0,35$ ,  $K_{1\delta} = 0,25$ .

Уравнение (4) соответствует первой зоне общей зависимости коэффициента трения от скорости скольжения (рис. 1, кривая 2). Преобразуем выражение (4) таким образом, чтобы оно описывало изменение коэффициента трения в зонах 2–4. Такой немонотонной функцией может быть следующее уравнение.

$$f_y = \frac{1}{2} \left[ A_1 \left( \frac{V_{\text{н.н.}} \xi_{\text{н.н.}}}{v} \right)^{\hat{n}_1} + A_2 \left( \frac{V_{\text{н.н.}} \xi_{\text{н.н.}}}{v} \right)^{\hat{n}_2} \right] \left( \frac{R_z}{\xi_{\text{н.н.}}} \right)^a \quad (5)$$

Как и ранее, используя опытные данные работы [11], определим коэффициенты, входящие в уравнение (5). Значения постоянных множителей  $A_1$  и  $A_2$ , а также показателей степени  $C_1$ ,  $C_2$  и  $\nu$  приведённые в табл. 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов выражения (5)

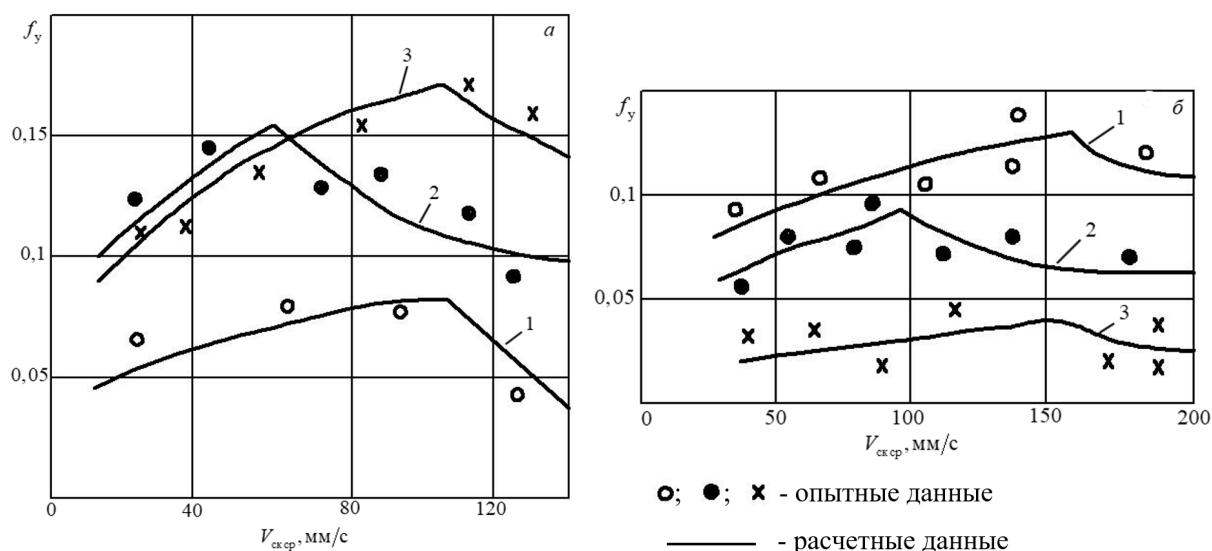
Технологическая смазка	$A_1$	$A_2$	$C_1$	$C_2$	$\nu$
Минеральное масло	0,075	0,025	0,15	-0,3	0,35
Растительное масло	0,043	0,013	0,15	-0,3	0,5

При выполнении конкретных расчетов необходимо знать среднюю температуру смазочного слоя во входной части очага деформации (3), затем определить динамическую вязкость смазки в этой области, далее найти толщину слоя смазки  $\xi$  (2), получить среднее её значение, а затем с помощью формул (4) или (5) рассчитать коэффициент трения. Кроме того, предварительно необходимо рассчитать сплюснутый угол захвата и другие известные геометрические и кинематические параметры. В общем, эта задача сводится к совместному решению уравнений (2)–(5) при использовании метода последовательных приближений. Для чего была разработана специальная программа расчетов на ЭВМ.

Результаты расчета коэффициента трения при холодной прокатке с применением технологической смазки приведены на рис. 3. Они выполнены в соответствии с условиями опытной прокатки стальных образцов поперечными размерами  $h_0 \times b_0 = 0,6 \times 40$  мм с обжатием  $\varepsilon = 0,1 - 0,25$  в валках диаметром 195 мм. При выполнении расчетов среднюю скорость скольжения изменяли путем регулирования скорости прокатки и обжатия. В связи с чем толщина слоя смазки в очаге деформации по мере роста скорости скольжения также изменялась.

Из графиков рис. 3 видно, что результаты расчета достаточно близки к опытным данным и охватывают две зоны общей зависимости коэффициента трения от скорости скольжения.

При увеличении вязкости технологической смазки увеличивается длина первой зоны, т.е. классического гидродинамического трения.



а) – сталь 08кп; б)– 12Х18Н10  
1 – смазка ИС-30; 2 – смазка СПТ-4;

Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения при холодной прокатке стали со смазкой

В табл. 2 приведены сравнительные расчетные значения коэффициента трения для условий прокатки на промышленных станах [9]. Эти значения получены при использовании разных методик. Сопоставление коэффициентов трения показывает, что расчеты по предложенной методике дают результаты несколько ниже по сравнению с исследованиями А.П. Грудева [10], но выше значений полученных В.К. Белосевичем [9]. Расчеты коэффициента трения по формуле В.А. Николаева [12] и по предложенной методике достаточно близки.

Таблица 2 – Сравнение расчетных значений коэффициента трения

Прокатный стан	Расчет в соответствии с методикой	Коэффициент трения				
		Клеть №1	Клеть №2	Клеть №3	Клеть №4	Клеть №5
1200	Предложенная методика	0,079	0,059	0,054	0,047	0,044
	[10]	0,141	0,113	0,104	0,094	0,080
	[9]	0,065	0,042	0,032	0,028	0,024
	[12]	0,081	0,078	0,071	0,068	0,066
1700	Предложенная методика	0,093	0,087	0,082	0,082	-
	[10]	0,141	0,142	0,129	0,130	-
	[9]	0,093	0,082	0,067	0,058	-
	[12]	0,074	0,075	0,076	0,077	-
2500	Предложенная методика	0,096	0,091	0,082	0,073	-
	[10]	0,199	0,174	0,133	0,105	-
	[9]	0,179	0,170	0,108	0,082	-
	[12]	0,079	0,078	0,075	0,075	-

**Выводы.** На основе исследования толщины слоя смазки в очаге деформации и опытных данных, связанных с трением на контакте металла с валками, а также анализа контактно-гидродинамической теории разработана методика определения коэффициента трения при холодной прокатке с применением технологической смазки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Максименко О. П. Элементы контактной гидродинамики в исследовании толщины смазочной пленки при прокатке. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1991. № 2. С. 23–26.
2. Максименко О. П., Подберезный Н. П. Исследование контактно-гидродинамической смазки при прокатке. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1994. № 8. С. 12–14.
3. Максименко О. П., Лейко О. Е. Основы трибологии : навч. посіб. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2005. 192 с.
4. Грудев А. П., Максименко О. П., Иванов К. А. Влияние микронеровностей поверхности валков и полосы на формирование смазочного слоя в очаге деформации при прокатке. *Обработка металлов давлением : Научные труды ДМетИ*. 1976. С. 198–205.
5. Кондир Д. С. Контактная гидродинамическая смазка деталей машин. М. : Машиностроение, 1976. 304 с.
6. Дроздов Ю. Н. Арагов В. Г. Расчет коэффициента трения в тяжело нагруженном контакте при скольжении. *Машиноведение*. 1975. № 6. С. 81–83.
7. Гаркунов Д. Н. Триботехника. М. : Машиностроение, 1985. 424 с.
8. Белосевич В. К., Нетесов Н. П. Совершенствование процесса холодной прокатки. М. : Металлургия, 1971. 270 с.
9. Белосевич В. К. Трение, смазка, теплообмен при холодной прокатке листовой стали. М. : Металлургия, 1989. 256 с.
10. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке. М. : Металлургия, 1973. 288 с.
11. Грудев А. П., Тилик В. Т. Технологические смазки в прокатном производстве. М. : Металлургия, 1975. 368 с.
12. Николаев В. А. Технология прокатки листов и полос: учеб. пособие. К. : УМК ВО, 1990. 168 с.

Поступила в редколлегию 02.09.2020.

УДК.621.771.01

DOI 10.31319/2519-2884.tm.2020.7  
 МАКСИМЕНКО О.П., д.т.н., профессор  
 НИКУЛИН А.В., к.т.н., доцент  
 ЛОБОЙКО Д.И., к.т.н., доцент  
 ХАЕНКО Д.А., магистр

Днепропетровский государственный технический университет

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ПРИ ПРОКАТКЕ С НАТЯЖЕНИЕМ ПОЛОСЫ

**Введение.** Прокатка металла на непрерывных и реверсивных станах часто совершается с натяжением полосы. Межклетевое натяжение раската уменьшает давление в очагах деформации, что снижает поперечную разнотолщинность прокатываемого листа, а также предотвращает смещение его к краю бочки валков. Регулируя межклетевые натяжения, можно также обеспечить оптимальные, с точки зрения энергосбережения, условия прокатки [1, 2].

Физическая сущность непрерывной прокатки с натяжением подробно изложена в книге В.Н. Выдрин [3].