

УДК 621.771:621.892

EDN: OUBOII

Митичкина Н. Г., *Кравцова С. И.*Донбасский государственный технический университет***E-mail: kravtsovasvetlaya@yandex.ru*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СМАЗОК В ЧИСТОВОЙ КЛЕТИ ТЛС 3000

Методом математического эксперимента получены математические зависимости для определения коэффициента трения при установившемся процессе горячей прокатки ряда сталей в чистой клети толстолистостанов 3000 Алчевского металлургического комбината, учитывающие влияние скорости прокатки, смазки и температуры прокатки. Полученные результаты позволяют уточнить энергосиловые параметры процесса при проектировании технологии прокатки в чистой клети с применением технологических смазок и могут быть использованы в системах автоматизированного проектирования стана для прогнозирования его работы.

Ключевые слова: коэффициент трения, толстолистовой стан, технологическая смазка, скорость прокатки, температура прокатки.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Одним из главных направлений повышения эффективности толстолистовых станов является ресурсо- и энергосбережение [1]. Тенденция совмещения нескольких процессов в технологии производства толстолистовой стали, таких как прокатка и термомеханическая обработка для получения заданных свойств, требует от стана выдерживать повышенные величины моментов прокатки, так как необходимо контролировать температуру конца прокатки в сочетании с высокими степенями деформации для обеспечения надлежащего качества проката. С этой точки зрения важны любые способы уменьшения нагрузки на клети, например, снижение сил трения при прокатке. Этого можно достичь, применяя технологическую смазку [2, 3]. При этом важным является не только применение смазочных средств, но и уточненный расчет для конкретных условий стана коэффициента трения.

Методы расчета коэффициента трения для процесса горячей прокатки основываются на температурной зависимости, предложенной Эжелундом. В этих методах также учитываются различные факторы,

такие как материал и состояние поверхности валков, химический состав прокатываемого материала, скорость прокатки, а также наличие и тип смазки.

В работах [4, 5] авторы предложили методику определения коэффициента контактного трения в условиях установившегося процесса горячей прокатки стали. Эта методика принимает во внимание такие параметры, как состояние поверхности, химический состав стали, угол захвата, скорость прокатки, температуру деформации, влияние типа смазки и толщину смазочной пленки. Представляет интерес адаптация данной зависимости к конкретным условиям стана методом вычислительного эксперимента, что может упростить зависимость, при этом не снижая ее точности.

Постановка задачи. Адаптацию можно произвести методом математического эксперимента на основании данных, полученных в работе [5].

В данной работе проведем исследование коэффициента трения при горячей прокатке применительно к условиям толстолистостанов 3000 Алчевского металлургического комбината. С помощью электронных таблиц по методике [5] создана программа

расчета коэффициента трения для реальных условий процесса прокатки в чистовой клети стана 3000.

В связи с этим **целью** настоящей работы явилось определение зависимости коэффициента трения в условиях установившегося процесса горячей прокатки толстых листов с применением смазки в чистовой клети толстолистного стана 3000 Алчевского меткомбината.

Объект исследования — технологический процесс прокатки толстых листов на толстолистном стане 3000.

Предмет исследования — закономерности определения коэффициента трения в условиях установившегося процесса горячей прокатки толстых листов.

Задачи исследования:

- на основе многофункциональной зависимости коэффициента трения при горячей прокатке стали получить адаптивную модель для конкретных условий чистовой клети стана 3000;
- проверить адекватность предложенной модели;
- получить полиномы для сталей, наиболее часто прокатываемых на стане 3000.

Методика исследования. Исследование проводилось методом вычислительно-го полного факторного эксперимента. С помощью модели изучили влияние следующих параметров на значение коэффициента трения f в условиях установившегося процесса горячей прокатки: температуры прокатки T (°C), скорости прокатки v (м/с) и коэффициента $K_{вс}$, обозначающего различные виды смазки. Приняты следующие диапазоны изменения значений перечисленных параметров в соответствии с технологической инструкцией для чистовой клети стана 3000:

- температура прокатки изменяется от 1050 до 720 °C;
- скорость прокатки от 2 до 5,65 м/с, согласно принятой технологии прокатки в чистовой клети стана 3000;
- коэффициент, учитывающий вид смазки, изменяется от 0,25 до 0,9, согласно [4].

Остальные параметры, применяемые для расчета на примере стали 45 (средние значения химических элементов): абсолютное обжатие 1,4 мм, что обеспечивало соблюдение захвата, среднеарифметическое отклонение профиля валков 1,6 мкм, диаметр валков 900 мм, толщина смазочной пленки 1 мкм.

Изложение материала. Обозначим через μ коэффициент трения при установившемся процессе горячей прокатки между заготовкой и валками. Для определения количества опытов примем модель полного факторного эксперимента с тремя факторами, число опытов определяется как 2^3 [6]:

$$N = 2^3 = 8.$$

Однако для проверки адекватности модели этого количества недостаточно. Необходимо добавить опыт на нулевом уровне, то есть $N=9$. Основные уровни варьирования факторов представлены в таблице 1.

Кодированные значения факторов вычисляем из выражения

$$X_i = \frac{(x_i - x_{i0})}{\Delta x_i},$$

где X_i — кодированное значение фактора, x_i — натуральное значение фактора, x_{i0} — натуральное значение на нулевом уровне, Δx_i — интервал варьирования, $i = 1, 2, 3$ — номер фактора.

Тогда математическая модель будет иметь вид

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_1 X_2 + b_5 X_1 X_3 + b_6 X_2 X_3 + b_7 X_1 X_2 X_3. \quad (1)$$

Значения кодированных факторов занесем в таблицу 2.

Значения y_n получим по зависимости (2.7) [5] и занесем в соответствующий столбец, затем с помощью методов математической статистики проведем вычислительный эксперимент.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Таблица 1
Основные уровни варьирования факторов

Уровень варьируемых факторов	Кодовое обозначение	Температура раската, °С	Скорость прокатки, м/с	Коэффициент, учитывающий вид смазки
		X ₁	X ₂	X ₃
Нулевой уровень	0	885	3,825	0,575
Интервал варьирования	Δ	165	1,825	0,325
Верхний уровень	+	1050	5,65	0,9
Нижний уровень	–	720	2,0	0,25

Значение коэффициентов b_i находим по следующей формуле

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_{ki} y_k.$$

Тогда в кодированных переменных уравнение (1) примет вид

$$y = 0,1072 - 0,0034X_1 - 0,0038X_2 + 0,0454X_3 + 0,0007X_1X_2 - 0,0014X_1X_3 - 0,0016X_2X_3 + 0,0003X_1X_2X_3. \quad (2)$$

Для проверки адекватности модели используем F -критерий Фишера, который определяется по формуле

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2},$$

$m = N - (k + 1) = 5$ — число степеней свободы;

$S_{ad}^2 = \sum \Delta y_i^2 / m = 0,00000344$ — дисперсия адекватности,

$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 = 0,0021$ — дисперсия ошибок эксперимента;

k — количество факторов эксперимента.

При выборе коэффициента Фишера принимаем уровень значимости, равный 0,05, тогда его табличное значение $F_{табл} = 5,41$. В результате расчета $F = 0,0016$. Поскольку табличное значение больше полученного, это свидетельствует о том, что построенная модель является адекватной.

Кроме того, оценим эффективность и информационную ценность модели. Вычислим дисперсию относительно среднего значения отклика:

$$S_c^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 = 0,0021.$$

Рассчитаем остаточную дисперсию:

$$S_{ост}^2 = \frac{1}{N-p} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = 0,0000172,$$

где p — количество оцениваемых коэффициентов регрессии модели.

Таблица 2
Матрица планирования и результаты вычислительного эксперимента

Номер п/п	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	y _n
1	+	+	+	+	+	+	+	0,1428
2	+	-	+	-	+	-	-	0,1516
3	-	+	+	-	-	+	-	0,1505
4	-	-	+	+	-	-	+	0,1632
5	+	+	-	+	-	-	-	0,0575
6	+	-	-	-	-	+	+	0,0610
7	-	+	-	-	+	-	+	0,0606
8	-	-	-	+	+	+	-	0,0657
9	0	0	0	0	0	0	0	0,1119

Тогда коэффициент эффективности

$$F_u = \frac{S_c^2}{S_{ост}^2} = 121,87.$$

Это показывает, что полученная модель эффективна, так как коэффициент эффективности больше 5.

Среднее относительное отклонение значений по рассматриваемой и предложенной модели

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{y - \hat{y}}{y} \right| \cdot 100 = 0,6 \, \%.$$

Для проверки значимости коэффициентов модели доверительный коэффициент определяем по формуле

$$\Delta b_j = \pm t \cdot S_{bj} = \pm 0,0026,$$

где $S_{bj}^2 = \frac{1}{N} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = 0,00000191$ —

среднеквадратичная ошибка коэффициента регрессии; t — табличное значение критерия Стьюдента, при надежности 0,9 и 9 опытах оно равно 1,9. Таким образом, в уравнении (2) значимыми являются коэффициенты линейной части уравнения, однако для повышения точности модели будем учитывать их все.

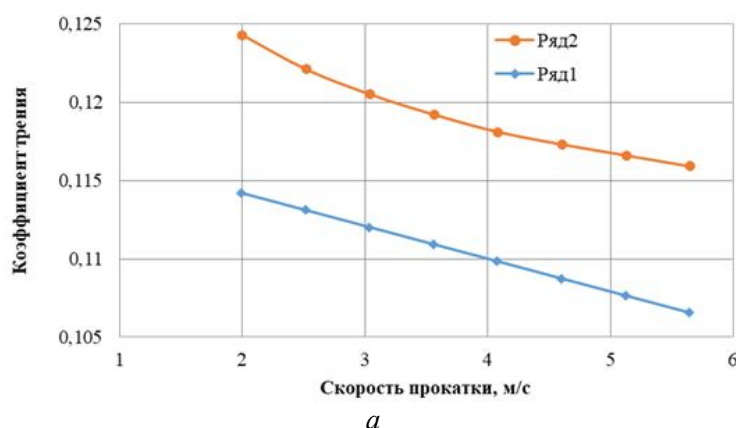
Преобразуя уравнение (2) к размерному виду, производя декодирование модели, получим зависимость коэффициента трения в размерных переменных

$$f = 0,0353 - 7,4 \cdot 10^{-6} T - 0,00102v + 0,1838K_{ec} + 5,9 \cdot 10^{-7} Tv - 3,8 \cdot 10^{-5} TK_{ec} - (3) - 0,0053vK_{ec} + 2,9 \cdot 10^{-6} TvK_{ec},$$

где T изменяется от 720 до 1050 °С, v — от 2 до 5,65 м/с и K_{ec} — от 0,25 до 0,9.

Графическую интерпретацию результатов приведем на рисунке 1 на примере стали 45, рассчитанную по полученной регрессионным способом формуле (3) и по формулам автора работы [5].

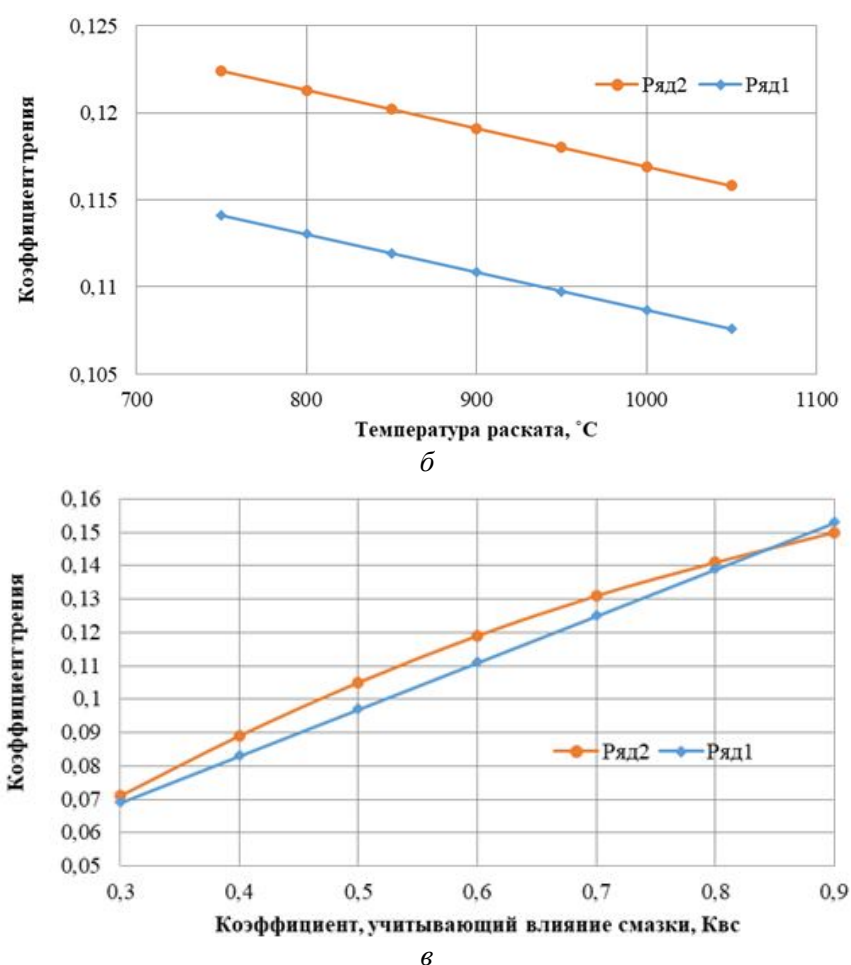
Приведенные зависимости показали, что предложенная регрессионная модель повторяет исследуемую зависимость, а относительная ошибка не превышает 8 %, что делает ее пригодной для использования в технологических расчетах. Для выполнения регрессионного анализа была сделана программа на ЭВМ, что позволило, используя приведенный алгоритм, получить полиномы для сталей, наиболее часто прокатываемых на стане 3000 Алчевского меткомбината. Результаты исследований сведены в таблицу 3.



Ряд 1 — регрессионная модель; ряд 2 — расчетные значения по [5]

Рисунок 1 — Зависимость коэффициента трения в условиях установившегося процесса горячей прокатки от скорости прокатки (а: $T = 900$ °С; $K_{ec} = 0,6$ — соответствует применению эмульсии масла), температуры раската (б: $v = 3,6$ м/с; $K_{ec} = 0,6$ — соответствует применению эмульсии масла) и коэффициента, учитывающего влияние смазки (в: $T = 900$ °С; $v = 3,6$ м/с)

МЕТАЛЛУРГИЯ



Продолжение рисунка 1

Таблица 3

Кoeffициенты полученных полиномов для сталей

Сталь	Кoeffициенты полиномов							
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇
09Г2С	0,0434	-8,9·10 ⁻⁶	-0,0012	0,2226	6,8·10 ⁻⁷	-4,6·10 ⁻⁵	-0,0065	3,6·10 ⁻⁶
Ст3сп	0,0313	-6,8·10 ⁻⁶	-0,0010	0,1586	6,0·10 ⁻⁷	-3,2·10 ⁻⁵	-0,0045	2,4·10 ⁻⁶
17Г1С	0,0412	-8,2·10 ⁻⁶	-0,0011	0,2131	6,0·10 ⁻⁷	-4,4·10 ⁻⁵	-0,0063	3,6·10 ⁻⁶
10ХСНД	0,0427	-8,5·10 ⁻⁶	-0,0012	0,2220	6,5·10 ⁻⁷	-4,7·10 ⁻⁵	-0,0065	3,7·10 ⁻⁶
РСД-32	0,0434	-8,8·10 ⁻⁶	-0,0012	0,2234	6,5·10 ⁻⁷	-4,7·10 ⁻⁵	-0,0065	3,7·10 ⁻⁶

Выполненные исследования позволили сделать следующие **выводы**:

1. Методом вычислительного эксперимента получены математические модели для расчета коoeffициента трения в условиях установившегося процесса горячей прокатки с использованием технологических смазок, адаптированные к условиям чистовой клетки стана 3000 Алчевского ме-

таллургического комбината для сталей 45, 09Г2С, Ст3сп, 17Г1С, 10ХСНД, РСД-32.

2. Полученные результаты в достаточной степени согласуются с моделью работы [5]. Максимальная относительная погрешность не превышает 8 % для всех рассмотренных сталей. Адекватность модели проверена по критерию Фишера ($F_{расч} < F_{табл}$).

3. Полученные зависимости могут быть использованы для технологических расчетов энергосиловых параметров при прокатке в чистовой клети толстолистового стана 3000 Алчевского металлургического

комбината при применении различных видов технологических смазок.

Дальнейшие исследования будут направлены на экспериментальное уточнение полученных зависимостей.

Список источников

1. Шабалов И. П., Шафигин З. К., Муратов А. Н. Ресурсосберегающие технологии производства толстолистового проката с повышенными потребительскими свойствами. М. : Металлургия, 2007. 351 с. : ил.
2. Скляр В. О. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии : учебное пособие. Донецк : ДонНТУ, 2014. 224 с.
3. Данько А. В. Современное развитие листопрокатного производства : учебное пособие. Алчевск : ДонГТУ, 2010. 161 с.
4. Капланов В. И., Курпе А. Г. Многофункциональная зависимость коэффициента трения при горячей прокатке стали // Производство проката. 2006. № 11. С. 6–9.
5. Курпе А. Г. Моделирование технологического процесса прокатки толстых листов на стане 3600 ОАО «МК „Азовсталь“» : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мариуполь, 2006. 24 с.
6. Юдин Ю. В., Майсурадзе М. В., Водолазский Ф. В. Организация и математическое планирование эксперимента : учебное пособие. Екатеринбург : изд-во Урал. ун-та, 2018. 124 с.

© Митичкина Н. Г., Кравцова С. И.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МТ ДонГТУ Денищенко П. Н.,
зам. начальника по технологии ТЛЦ 2 ООО «ЮГМК» Осипенко А. А.*

Статья поступила в редакцию 11.03.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Митичкина Наталия Геннадиевна, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Кравцова Светлана Игоревна, ассистент каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия,
e-mail: kravtsovasvetlaya@yandex.ru

Mitichkina N. G., *Kravtsova S. I. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: kravtsovasvetlaya@yandex.ru)

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE FRICTION COEFFICIENT FOR PLATE ROLLING WITH TECHNOLOGICAL LUBRICANTS IN THE PM 3000 FINISHING STAND

By the method of mathematical experiment, the mathematical dependences for determining the friction coefficient at steady-state process of hot rolling a number of steels in the finishing stand of plate mill 3000 of Alchevsk Iron-and-Steel Works, considering the influence of rolling speed, lubrication and temperature of rolling, have been obtained. The obtained results allow to specify the energy and power parameters of the process when designing rolling technology in the finishing stand with the use of technological lubricants and can be used in the systems of computer-aided design of the mill for predicting its operation.

Key words: friction coefficient, plate mill, technological lubricants, rolling speed, rolling temperature.

References

1. Shabalov I. P., Shafigin Z. K., Muratov A. N. Resource-saving technologies for production of heavy plate rolled products with enhanced consumer properties [*Resursosberegayushchie tekhnologii proizvodstva tolstolistovogo prokata s povyshennymi potrebitel'skimi svojstvami*]. M. : Metallurgizdat. 2007. 351 p. : ill. (rus)
2. Sklyar V. O. Innovative and resource-saving technologies in metallurgy: textbook [*Innovacionnye i resursosberegayushchie tekhnologii v metallurgii: uchebnoe posobie*]. Donetsk : DonNTU, 2014. 224 p. (rus)
3. Dan'ko A. V. Modern development of sheet rolling production : textbook [*Sovremennoe razvitie listoprokatnogo proizvodstva : uchebnoe posobie*]. Alchevsk : DonSTU, 2010. 161 p. (rus)
4. Kaplanov V. I., Kurpe A. G. Multifunctional dependence of friction coefficient at hot-rolling steel [*Mnogofunkcional'naya zavisimost' koefficienta treniya pri goryachej prokatke stali*]. Proizvodstvo prokata. 2006. No. 11. Pp. 6–9. (rus)
5. Kurpe A. G. Modeling of technological process of thick plates rolling at the mill 3600 of OAO "AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS": synopsis of a thesis of PhD in Engineering [*Modelirovanie tekhnologicheskogo processa prokatki tolstyh listov na stane. 3600 OAO "MK 'AZOVSTAL'" : avtoref. dis. kand. tekhn. nauk.*]. Mariupol'. 2006. 24 p. : ill. (rus)
6. Yudin Yu. V., Maisuradze M. V., Vodolazsky F. V. Organization and mathematical planning of experiment : textbook [*Organizaciya i matematicheskoe planirovanie eksperimenta : uchebnoe posobie*]. Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2018. 124 p. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mitichkina Natalia Gennadievna, PhD in Engineering, Assistant Professor, Acting Head of the Department of Metallurgical Technologies
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Russia

Kravtsova Svetlana Igorevna, Assistant lecturer of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia,
e-mail: kravtsovasvetlaya@yandex.ru