

УДК 621.771

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТОРА ТРЕНИЯ ДЛЯ ПЯТИКЛЕТЕВОГО СТАНА НЕПРЕРЫВНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ 2800

© 2025 В.В. Яшин⁵, И.А. Латушкин⁵, Е.В. Арышенский², Е.А. Суздальцев¹,
М.А. Лапшов⁵, С.В. Коновалов²

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
г. Самара, Россия

² Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

³ Самарский металлургический завод, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 27.05.2025

Исследование посвящено усовершенствованию модели расчёта фактора трения для непрерывного пятиклетевого стана горячей прокатки 2800. Разработана новая аналитическая зависимость, учитывающая ключевые технологические параметры: вязкость смазки, скорость прокатки, сопротивление материала деформации и длину очага деформации. Модель продемонстрировала высокую точность ($R^2=0.93$). Внедрение модели в автоматическую систему управления процессом позволило оптимизировать процесс регулирования толщиной, за счет чего области с отклонениями по толщине на горячекатаной заготовке сокращены в 3-4 раза, а выход годной продукции увеличен на 2%. Результаты имеют важное прикладное значение для автоматизации процессов горячей прокатки алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: прокатка, алюминиевые сплавы, условия трения, повышение выхода годного, математическое моделирование.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-136-141

EDN: QSJBCG

ВВЕДЕНИЕ

Современные горячекатаные заготовки из алюминиевых сплавов, помимо определенных уровней физико-механических свойств и качества поверхности, также должны соответствовать строгим требованиям по геометрическим характеристикам [1]. Так, для обеспечения требований технических условий, допустимые пределы разнотолщинности на горячекатаной заготовке устанавливаются на уровне $\pm 0,25$ мм [2]. Но для баночной ленты отклонения устанавливаются на порядок ниже. Это происходит из-за высокоскоростных условий штамповки банок, наличие такой разнотолщинности приводит к критическому росту силы трения, вызывающей отказы оборудования. В связи с этим допустимое отклонение толщины баночной ленты регламентируется диапазоном $\pm 0,005$ мм, а горячей заготовки $\pm 0,025$ мм. Обеспечение требуемой разнотолщинности является одной из ключевых задач прокатного производства [3-4]. На сегодняшний день остаётся нерешённой проблема утолщённых концов катаной продукции, длина которых значительно влияет на коэффициент выхода готовой продукции. Одной из причин отклонения по толщине является неточное определение величины упругого растяжения клетки, возникающего вследствие действия сил в очаге деформации [5-6]. Чтобы компенсировать упругие деформации, зазоры устанавливают с учётом расчётной поправки, величина которой определяется математической моделью стана. Точность данной модели непосредственно влияет на продолжительность периода достижения заданной толщины проката и, следовательно, длину участка полосы с отклонением от допустимых значений толщины заготовки.

Современные расчетные модели горячей прокатки базируются на уравнении Кармана-Целикова, [7] одним из параметров адаптации, в котором является коэффициент или фактор трения (далее по-казатель) в зависимости от выбранного закона определения контактных касательных напряжений.

Так для прокатки алюминиевых сплавов в непрерывных станах горячей прокатки в основном применяется модель Зибеля [8]:

Яшин Василий Владимирович, кандидат технических наук, менеджер по печному оборудованию.

E-mail: Vasily.Yashin@samara-metallurg.ru

Латушкин Илья Анатольевич, специалист по технологической наладке. E-mail: Ilya.Latushkin@samara-metallurg.ru

Арышенский Евгений Владимирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой обработки металлов давлением и материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК. E-mail: arishenskiy_ev@sibsiu.ru

Суздальцев Егор Алексеевич, студент.

Лапшов Максим Александрович, инженер-конструктор. E-mail: Maksim.Lapshov@samara-metallurg.ru

Коновалов Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики и машиностроения. E-mail: konovalov@sibsiu.ru

$$\tau = m\tau_s, \quad (1)$$

$$m = \sigma_s^{a_1} \Delta H^{a_2}, \quad (2)$$

где m – фактор трения;

σ_s и τ_s – предел текучести деформируемого материала при растяжении и сдвиге соответственно;

ΔH – абсолютные обжатия;

a_1 и a_2 – коэффициенты, подбираемые эмпирически.

Адаптация модели осуществляется обратным пересчетом, основываясь на фактически замеренных параметрах прокатки (толщина, скорость, натяжение, опережение и усилие прокатки). Длительность такого расчета зависит от того, насколько точно задан показатель трения для первой итерации.

Таким образом несмотря на то, что показатель трения является параметром адаптации, определение его является важным аспектом для оптимизации процесса обработки металлов давлением и напрямую влияет на выход годного при прокатки алюминиевых сплавов [9].

Основной недостаток данной модели, вызван тем, что ряд условий прокатки, влияющих на фактор трения m , а именно, вязкость смазки (в зависимости от давления), скорость, прокатки, длина очага деформации в первой и последней клетки сильно отличаются. При этом данные переменные не учитываются в выражении (2). Поэтому использование уравнения (2) при настройке регулирующих воздействий приводит либо к завышенной ошибке в расчетах усилия на первой клетки, или на последней. В результате чего автоматическое регулирование становится невозможным и процесс настройки стана осуществляется оператором в ручном режиме, что приводит к неоправданно большой длине настроенного участка, на котором разнотолщинность выходит за допустимые требования [10-11].

Целью данной работы является повышение точности модели расчета контактных напряжений при прокатке в многоклетевых станах за счет учета влияния скорости прокатки, длины очага деформации и вязкости смазки.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Испытания проводились на линии горячей прокатки АО СМЗ. Стан производит рулоны и плиты из алюминиевых сплавов, толщиной от 2,2 мм до 60 мм, шириной от 1100 мм до 2150 мм, массой рулона до 20 т.

В состав линии горячей прокатки входит реверсивная клеть черновой прокатки, пятиклетевая непрерывная группа и подпольная моталка для смотки полосы в рулон. Прокатные клетки типа кварто. Технические характеристики стана представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики клеток непрерывной группы стана горячей прокатки

Наименование параметра	Величина параметра
Диаметр рабочих валков, мм	650 ÷ 630
Диаметр опорных валков, мм	1400 ÷ 1350
Длина бочки рабочих и опорных валков, мм	2800
Максимальная ширина прокатываемой горячекатаной полосы, мм	2300
Максимально допустимое усилие при прокате, Н*10 ⁶	24,5
Максимальная скорость прокатки в клетки, м/мин	
F1	72
F2	90
F3	134,4
F4	270
F5	324
Номинальная мощность двигателя каждой клетки, кВт	4200

Во время прокатки система измерения регистрирует следующие параметры: обжатия (датчиками положения), температуру раската и полосы на выходе из клетки F5, усилие прокатки (месдозы под подушками опорных валков), межклетевые натяжения (месдозы в роликах натяжения), толщи-

ну полосы и ее профиль (рентгеновские толщиномер и профилемер), скорость полосы и вращения рабочих валков (тахометры на роликах натяжения и на рабочих валках).

Для построения физической модели связи пиковых напряжений и скоростей деформации используем закон, предложенный Селларсом, который часто применяется для алюминиевых сплавов [12-14]:

$$\sigma_m = \frac{1}{\alpha} \left(\operatorname{arcsch} \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} \right), \quad (3)$$

где A , α , n – константы исследуемого материала, подлежащие определению из данных экспериментов регрессионным анализом;

Z – это параметр Зенера–Холломона, который описывает деформационное поведение металлических материалов:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right). \quad (4)$$

В выражении (4) $\dot{\epsilon}$ и T – соответственно скорость (с^{-1}) и абсолютная температура (К) деформации; R – газовая постоянная (Дж/моль·К); Q – энергия активации (Дж/моль) процесса, контролирующего горячую деформацию; σ_m – максимальное напряжение текучести

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для решения данной задачи определялась аналитическая зависимость контактных касательных напряжений от параметров прокатки. Для этого в свою очередь был проведен статистический анализ данных, полученных при прокатки алюминиевых полос и лент на непрерывном стане пяти-клетевом стане горячей прокатки 2800. Для каждой катаной полосы численным методом (Эйлера) определялось значение фактора трения m , обеспечивающего требуемый уровень сходства между измеренными значениями опережения и усилия прокатки с фактическими. Влияние основных переменных на фактор трения представлены на рисунке 1.

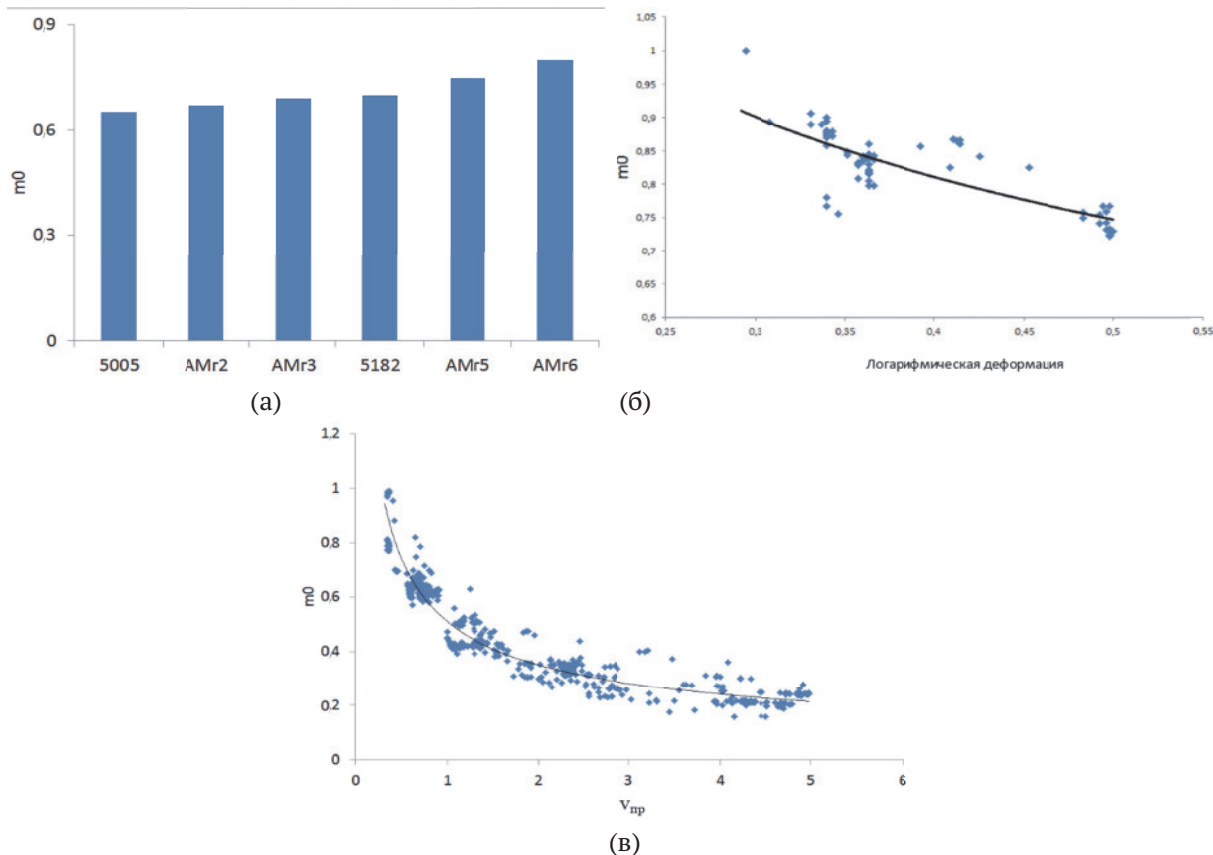


Рисунок 1 - Влияние основных факторов на фактор трения:
а) от сплава; б) от обжатия; в) от скорости прокатки

Анализ статистических данных позволил вывести функцию для расчета фактора трения в зависимости от вязкости масляной фазы эмульсии η , скорости прокатки v , предела текучести σ_s и длины проекции дуги захвата на направление прокатки l_d :

$$m = 1.31 \left(\frac{\eta v}{\sigma_s l_d} \right)^{-0.42}, \quad (5)$$

Данная зависимость графически представлена на рисунке 2.

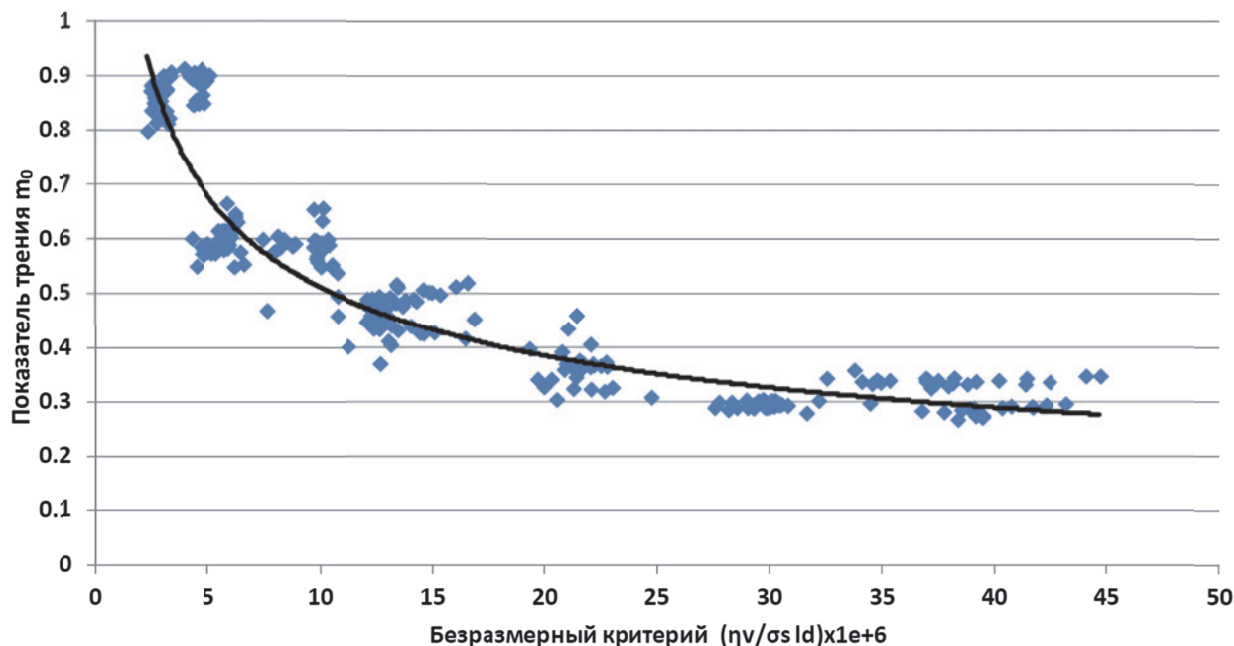


Рисунок 2 – Зависимость фактора трения от безразмерного критерия $\frac{\eta v}{\sigma_s l_d}$

Тогда уравнение контактных касательных напряжений принимает вид

$$\tau = 0.75 \left(\frac{l_d}{\eta v} \right)^{0.42} \sigma_s^{1.42}, \quad (6)$$

Коэффициент корреляции при использовании данного выражения составляет 0.93 (рисунок 3), что говорит о его адекватности, но стандартное отклонение равно 0.064, что приводит к отклонению в расчете усилия в пределах -200..+200 тонн силы.

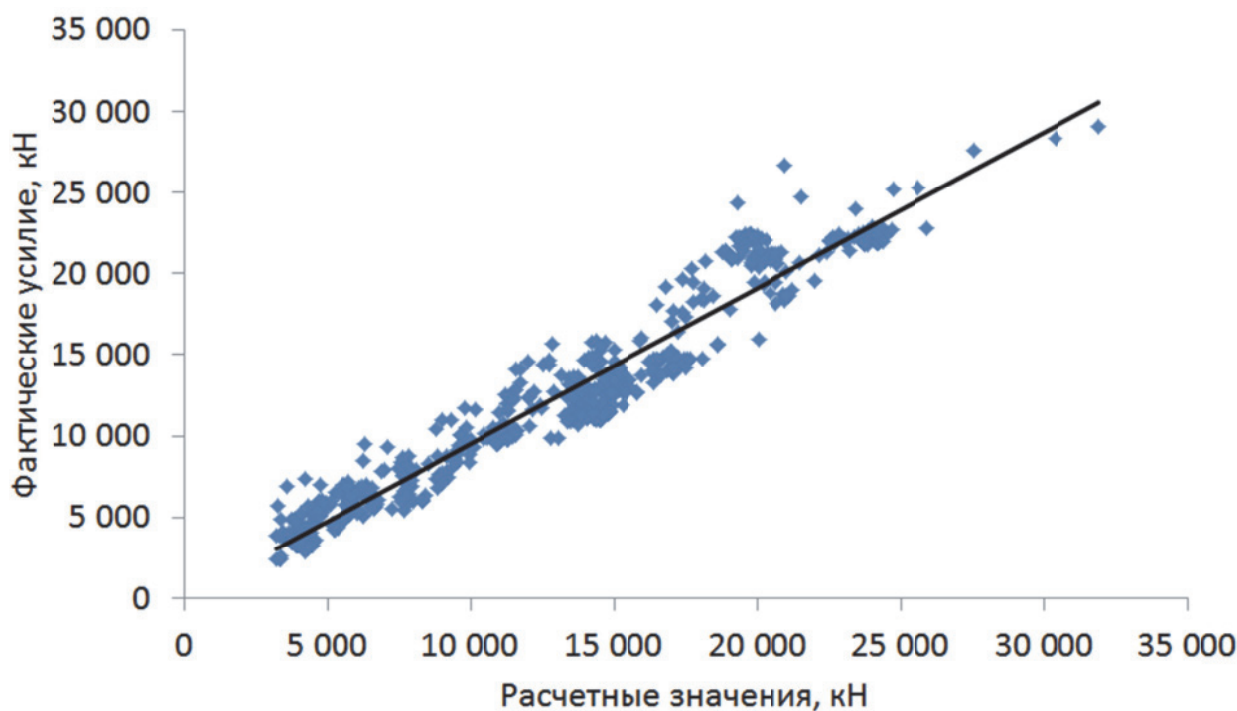


Рисунок 3 – Сравнение расчетных значений усилия прокатки по модели с фактическими измеренными на стане

Отклонения объясняются состоянием поверхности валков, вариацией характеристик эмульсии, точностью измерений параметров прокатки [15].

Функция (4) интегрирована в автоматическую систему управления стана. В результате внесенных изменений повышена точность расчетов режимов прокатки и значительно увеличена скорость адаптации системы. Длина дефектного конца рулона, на котором происходит настройка стана на требуемую толщину, сократилась с 80–100 м до 20–30 м (рисунок 4), что обеспечило увеличение выхода годного на 2%.

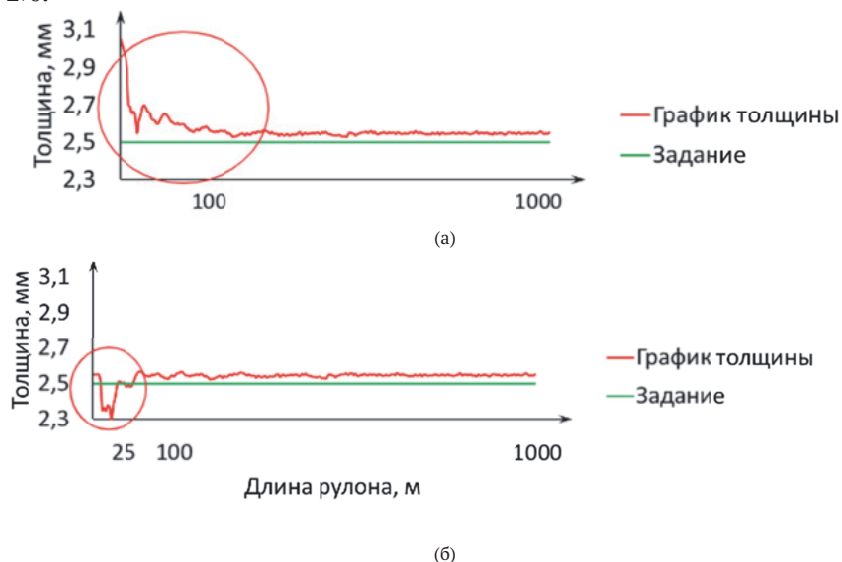


Рисунок 4 – График выхода толщины полосы на заданную: а) со старой моделью на основе формулы (2); б) по новой модели – уравнение (6)

ВЫВОДЫ

Разработана модель для расчета контактных касательных напряжений в зависимости от таких параметров прокатки, как вязкость масляной фазы эмульсии, скорость прокатки, предел текучести при температуре прокатки и длина проекции дуги захвата на направление прокатки. Модель основана на законе Зибеля с определением фактора трения по формуле (5). Внедрение разработанной модели позволяет автоматизировать процесс выхода на годную толщину и при этом значительно сократить области с отклонениями по толщине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кавалла, Р. Управление структурой и свойствами листовых заготовок из магниевых сплавов в условиях бесслитковой прокатки [Электронный ресурс] / Р. Кавалла, В.Ю. Бажин // Записки Горного института. – 2015. – Т. 214. – С. 33–38.
2. ГОСТ 21631-2019 Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия [Текст] : офиц. изд. – Введ. 2020-07-01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 27 с.
3. Thickness control in hot strip rolling using advanced automation systems / P. Smith [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 52. – P. 120–135.
4. Целиков А.И. Теория прокатки / А.И. Целиков, А.Н. Гришков. – М. : Металлургия, 1970. – 495 с.
5. Roberts W.L. Elastic deformation of rolling mill stands under load / W.L. Roberts // Iron and Steel Engineer. – 1965. – Vol. 42. – № 4. – P. 123–134.
6. Способ компенсации упругих деформаций прокатной клетки : пат. 2654328 Рос. Федерация : МПК В21В 37/00 / В.П. Иванов, А.С. Петров ; заявитель и патентообладатель ОАО «ММК». – № 2017112345 ; заявл. 10.04.2017; опубл. 15.05.2018. – 8 с.
7. Целиков, А. И. Теория расчета усилий в прокатных станах / А. И. Целиков. – М. : Гос. НТИ лит. по черн. и цвет. метал., 1962. – 494 с.
8. Зайков, М.А. Процесс прокатки: справочник / М.А. Зайков, В.П. Полухин, А.М. Зайков, Л.Н. Смирнов. – М.: МИСиС, 2004. – 640 с.
9. Грудев, А.П. Внешнее трение при прокатке / А.П. Грудев. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.
10. ГОСТ 21631-2021 Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. – Введ. 2022-01-01. – М.: Стандартинформ, 2021. – 24 с.
11. Wang X. Thickness control in hot rolling of aluminum alloys / X. Wang, L. Zhang // Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – Vol. 271. – P. 36–45.
12. Rushchits, S.V. Modeling the hot deformation behavior of 1565ch aluminum alloy / S.V. Rushchits [et al.] // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 684. – P. 35–41
13. Галкин, А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / А.М. Галкин, П.И. Полухин,

- Г.Я. Гун. – М.: Metallurgy, 1983. – 352 с.
14. Полухин, П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М.: Metallurgy, 1983. – 352 с.
 15. Шаталов Р.Л. Разработка и исследование условий прокатки латунных листов с разворотом, обеспечивающих улучшение качества проката [Текст] / Р.Л. Шаталов, А.С. Калмыков, Е.А. Юдин // Metallurg. – 2021. – № 4. – С. 51-57 : ил. – Библиогр.: с. 57 (11 назв.). – ISSN 0202-3776

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR DETERMINING THE FRICTION FACTOR FOR A FIVE-CELL CONTINUOUS HOT ROLLING MILL 2800

© 2025 V.V. Yashin, I.A. Latushkin, E.V. Aryshenskiy, E.A. Suzdaltsev, M.A. Lapshov, S.V. Konovalov

¹ Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

² Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

³ Samara Metallurgical Plant, Samara, Russia

The study is devoted to improving the friction factor calculation model for a continuous five-cell hot rolling mill 2800. A new analytical relationship has been developed that takes into account key technological parameters: lubrication viscosity, rolling speed, material resistance to deformation, and the length of the deformation site. The model demonstrated high accuracy ($R^2=0.93$). The introduction of the model into the automatic process control system made it possible to optimize the thickness control process, due to which the areas with thickness deviations on the hot-rolled billet are reduced by 3–4 times, and the yield of suitable products was increased by 2%. The results are of great practical importance for the automation of hot rolling processes of aluminum alloys.

Keywords: rolling, aluminum alloys, friction conditions, increasing the yield, mathematical modeling.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-136-141

EDN: QSJBCG

REFERENCES

1. Kavalla, R. Management of the structure and properties of magnesium alloy sheet blanks in the conditions of ingot-less rolling [Electronic resource] / R. Kavalla, V.Yu. Bazhin // Notes of the Mining Institute. – 2015. – T. 214. – С.33-38.
2. GOST 21631-2019 Aluminum and aluminum alloy sheets. Technical specifications [Text] : official ed. – Introduction. 2020-07-01. – М. : Standartinform, 2019. – 27 p.
3. Thickness control in hot strip rolling using advanced automation systems / P. Smith [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 52. – P. 120-135.
4. Tselikov A.I. Theory of rolling / A.I. Tselikov, A.N. Grishkov. – М. : Metallurgiya Publ., – 1970. – 495 p.
5. Roberts W.L. Elastic deformation of rolling mill stands under load / W.L. Roberts // Iron and Steel Engineer. – 1965. – Vol. 42. – No. 4. – P. 123-134.
6. Method of compensation of elastic deformations of the rolling rack : pat. 2654328 Russian Federation : IPC B21B 37/00 / V.P. Ivanov, A.S. Petrov ; applicant and patent holder of OJSC MMK. – No. 2017112345 ; application dated 04/10/2017 ; published on 05/15/2018. – 8 p.
7. Tselikov, A.I. The theory of calculating forces in rolling mills / A. I. Tselikov. – М. : Gos. NTI lit. in black. and the color. metal., 1962. – 494 p.
8. Zaikov, M.A. The rolling process: a reference / M.A. Zaikov, V.P. Polukhin, A.M. Zaikov, L.N. Smirnov. – М.: MISIS, 2004. – 640 p.
9. Grudev, A.P. External friction during rolling / A.P. Grudev. – М.: Metallurgy, 1973. – 288 p.
10. GOST 21631-2021 Sheets of aluminum and aluminum alloys. Technical specifications. - Introduction. 2022-01-01. – М.: Standartinform, 2021. – 24 p.
11. Wang X. Thickness control in hot rolling of aluminum alloys / X. Wang, L. Zhang // Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – Vol. 271. – P. 36-45.
12. Rushchits, S.V. Modeling the hot deformation behavior of 1565ch aluminum alloy / S.V. Rushchits [et al.] // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 684. – P. 35-41
13. Galkin, A.M. Resistance to plastic deformation of metals and alloys / A.M. Galkin, P.I. Polukhin, G.Ya. Gun. – М.: Metallurgy, 1983. – 352 p.
14. Polukhin, P. I. Resistance to plastic deformation of metals and alloys / P. I. Polukhin, G. Ya. Gun, A.M. Galkin. – М.: Metallurgy, 1983. – 352 p.
15. Shatalov R.L. Development and research of rolling conditions for brass sheets with a turn, ensuring an improvement in the quality of rolled products [Text] / R.L. Shatalov, A.S. Kalmykov, E.A. Yudin // Metallurg. – 2021. – No. 4. – pp. 51-57 : ill. – Bibliogr.: p. 57 (11 titles.). – ISSN 0202-3776

Vasily Yashin, Candidate of Technical Sciences, Furnace Equipment Manager. E-mail: Vasily.Yashin@samara-metallurg.ru

Ilya Latushkin, Specialist in Technological Adjustment. E-mail: Ilya.Latushkin@samara-metallurg.ru

Evgeny Aryshenskiy, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metalworking by Pressure and Materials Science of EVRAZ ZSMK. E-mail: arishenskiy_ev@sibsiu.ru

Egor Suzdaltsev, Student. E-mail: Maksim.Lapshov@samara-metallurg.ru

Maxim Lapshov, Design Engineer. E-mail: Maksim.Lapshov@samara-metallurg.ru

Sergey Konovalov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering. E-mail: konovalov@sibsiu.ru