

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ METAL FORMING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.778.014

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-60-70



МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ ПОЛОСЫ НА СТАНЕ ДУО-130

Радионова Л.В.¹, Громов Д.В.¹, Фаизов С.Р.¹, Лисовский Р.А.², Зараменских С.Е.², Глебов Л.А.²

¹ Московский политехнический университет, Москва, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В работе приведено описание конструктивных особенностей лабораторного научно-исследовательского стана ДУО-130 с длиной бочки валка 160 мм. Стан представленной конструкции позволяет осуществлять прокатку с максимальным усилием на валки 60 кН и допустимым моментом прокатки 710 Н·м. Максимальная скорость прокатки 0,3 м/с. Системы автоматизации и сбора данных, которыми оснащен стан, позволяют задавать межвалковый зазор и скорость прокатки и измерять усилие и момент прокатки. В ходе экспериментальной прокатки свинцовой полосы толщиной 1,2 мм из заготовки толщиной 11,5 мм в 6 проходов были измерены усилия и моменты прокатки. В работе приведены экспериментальные кривые усилий и моментов прокатки. Методика расчета усилия и момента прокатки, разработанная применительно к стану ДУО-130, учитывает конструкционные особенности стана, геометрические параметры и свойства прокатываемого материала. Сравнение экспериментальных и расчетных значений усилия и момента прокатки показало их высокую сходимость, ошибка не превышает 5%. В ходе экспериментальных исследований установлено, что момент холостого хода стана 65 Н·м. Коэффициент трения при прокатке свинцовой полосы на стальных валках равен 0,18. Показатель отношения плеча равнодействующей сил давления металла на валки к длине дуги захвата при расчете момента прокатки следует принимать равным 0,5. Предложенная методика расчета усилия и момента прокатки может быть использована для проведения аналитических исследований влияния режимов прокатки на энергосиловые параметры. Представленный в работе лабораторный прокатный стан ДУО-130 может быть задействован в научно-исследовательской деятельности при изучении новых сплавов, а также в образовательном процессе при подготовке специалистов металлургической и машиностроительной направленности.

Ключевые слова: прокатка, прокатный стан, усилие прокатки, момент прокатки, месдоза, среднее давление на валки, очаг деформации, стан ДУО-130

© Радионова Л.В., Громов Д.В., Фаизов С.Р., Лисовский Р.А., Зараменских С.Е., Глебов Л.А., 2024

Для цитирования

Методика расчета энергосиловых параметров прокатки полосы на стане ДУО-130 / Радионова Л.В., Громов Д.В., Фаизов С.Р., Лисовский Р.А., Зараменских С.Е., Глебов Л.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 60-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-60-70>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

A METHOD FOR CALCULATING ENERGY AND POWER PARAMETERS OF STRIP ROLLING ON DUO MILL 130

Radionova L.V.¹, Gromov D.V.¹, Faizov S.R.¹, Lisovsky R.A.², Zaramenskikh S.E.², Glebov L.A.²

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article describes the design features of laboratory research duo mill 130 with a roll body length of 160 mm. The mill of the described design provides for rolling with a maximum roll force of 60 kN and an allowable rolling torque of 710 N·m. Maximum rolling speed is 0.3 m/s. Automation and data acquisition systems of the mill are used to set the roll gap and rolling speed and measure rolling force and torque. During the experimental rolling of a lead strip, 1.2 mm thick, from a workpiece, 11.5 mm thick, in 6 passes, we measured rolling forces and torques. The research presents experimental curves of rolling forces and torques. The method for calculating rolling force and torque developed for duo mill 130 factors into the structural features of the mill, geometric parameters and properties of the rolled material. A comparison of the experimental and calculated values of rolling force and torque showed their high convergence, the error did not exceed 5%. It was established during experimental studies that idle torque of the mill was 65 N·m. The coefficient of friction when rolling the lead strip on steel rolls is 0.18. The ratio of the arm of the resultant forces of metal pressure on the rolls to length of the contact arc, when calculating rolling torque, should be taken 0.5. The proposed method for calculating rolling force and torque can be used to conduct analytical studies on the influence of rolling modes on energy and power parameters. Laboratory duo rolling mill 130 presented in the research can be used in research activities to study new alloys, as well as in the educational process, when teaching engineers for metallurgy and mechanical engineering sectors.

Keywords: rolling, rolling mill, rolling force, rolling torque, load cell, average roll pressure, deformation zone, duo mill 130

For citation

Radionova L.V., Gromov D.V., Faizov S.R., Lisovsky R.A., Zaramenskikh S.E., Glebov L.A. A Method for Calculating Energy and Power Parameters of Strip Rolling on Duo Mill 130. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 60-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-60-70>

Введение

При разработке новых сплавов, технологий их последующей обработки, а также при проектировании прокатного оборудования необходимо определять не только закономерности изменения физико-механических свойств материалов при пластической деформации, но и энергосиловые параметры, необходимые для осуществления формоизменения.

Прокатное производство является одним из основных переделов металлургической промышленности [1]. До 90% всей выплавляемой стали, а также большую часть цветных металлов подвергают прокатке [2]. Металлургическая отрасль России по уровню технологий и применяемого оборудования находится на мировом уровне [3], а разработке новых сплавов с уникальными свойствами в нашей стране в настоящее время уделяется особое внимание [4-7].

Для проведения исследований и отработки технологий прокатки разрабатываемых сплавов в России имеется несколько специализированных лабораторий, наиболее известные располагаются в научно-исследовательских институтах, таких как ГНЦ ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина» [8], НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [9] и др. При грантовой поддержке государственных фондов в последние го-

ды создаются исследовательские лаборатории в университетах. Оснащаются такие лаборатории современным научно-исследовательским оборудованием, и в качестве одного из примеров можно отметить лабораторию «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» в МГТУ им. Г.И. Носова [10]. Ведущие металлургические компании также активно включились в процесс оснащения современным научно-исследовательским и учебным оборудованием корпоративных образовательных и научных центров, профильных вузов и колледжей [11, 12], партнерские отношения с которыми поддерживают на протяжении многих лет. Современное автоматизированное оборудование, такое как прокатный или волочильный стан, сопровождается методическим обеспечением [13, 14], что позволяет максимально полно и грамотно использовать его технические возможности.

В работе [15] показано, что одна из основных характеристик процесса прокатки – давление металла на валки – имеет большое количество методик расчета, которые дают существенные расхождения в расчетах. Методики расчета энергосиловых параметров прокатки в разные годы были предложены ведущими прокатчиками – академиком А.И. Целиковым [16, 17], С.И. Губкиным [18], А.А. Королевым [19] и др. Расхождения в расчетах авторы работы [20] объясняют

существенными отличиями прокатных станов, для которых методики были предложены и особенностями типов прокатки – горячая, холодная, толстолистовая, тонколистовая, а также геометрией (высотой) очага деформации. В то же время анализ этих методик показывает [21], что принципы расчета среднего давления металла на валки схожи, и обоснованное применение коэффициентов, которые присутствуют в формулах, позволяют получать адекватные практическим измерениям значения энергосиловых параметров прокатки [22]. При выборе значений коэффициентов, учитывающих скорость деформации, напряженно-деформированное состояние, натяжение, контактное трение и др., нужно отталкиваться от технологических параметров прокатки и конструктивных особенностей конкретного прокатного стана.

В связи с вышесказанным целью настоящей работы является разработка методики расчета энергосиловых параметров прокатки применительно к стану ДУО-130 с учетом его конструктивных особенностей, геометрических параметров прокатываемой полосы и реализуемых технологических режимов.

Конструктивные особенности стана ДУО-130

Прокатный стан ДУО-130 состоит из трех конструктивных объектов: главной линии прокатной клетки (рис. 1), шкафа (рис. 2, а) и пульта (рис. 2, б) управления. Рабочая клеть прокатного стана ДУО-130 (рис. 3, а) имеет два валка диаметром 130 мм ($R = 65$ мм) и длиной 160 мм, которые посредством подушек установлены в станину. Для подачи заготовки в валки и приема проката после деформации на рабочей клетке смонтирован приемно-задающий стол (рис. 3, а). Нажимной механизм рабочей клетки (рис. 3, б) реализован электромеханическим способом с применением шагового двигателя.

Для измерения усилия прокатки конструкцией предусмотрена возможность установки мессдоз. Прокатные валки приводятся в движение мотор-редуктором с асинхронным двигателем мощностью 5,5 кВт со скоростью вращения до 1440 об/мин. Для измерения скорости прокатки применяется инкрементальный энкодер, установленный на валу двигателя мотор-редуктора. Установка и определение зазора между валками осуществляется с помощью шагового двигателя с энкодером (см. рис. 3, а). Для определения усилия прокатки между нажимным винтом и подушкой установлена мессдоза типа шайба с допустимым давлением 40 кН (см. рис. 3, б). Стан представленной конструкции позволяет осуществлять прокатку с максимальным усилием на валки 60 кН и допустимым моментом прокатки 710 Н·м. Максимальная скорость прокатки 0,3 м/с.

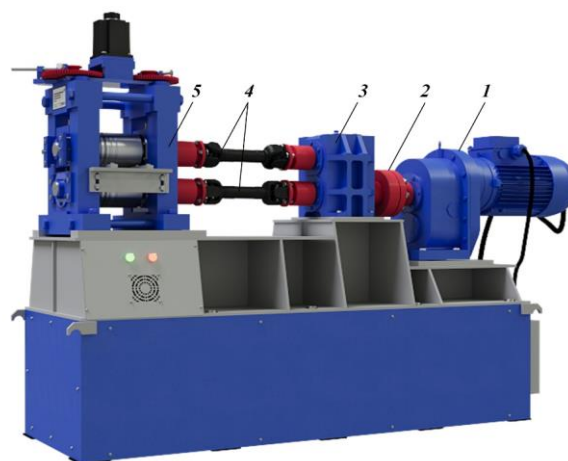


Рис. 1. Главная линия прокатной клетки стана ДУО-130:
1 – мотор-редуктор; 2 – муфта;
3 – шестеренная клеть; 4 – универсальный шпиндель; 5 – рабочая клеть

Fig. 1. The main drive system of duo rolling mill 130:
1 is an electric motor gearbox; 2 is a coupling;
3 is a pinion stand; 4 is a universal spindle;
5 is a rolling stand

Управление двигателем осуществляется преобразователем частоты с векторным управлением и обратной связью по скорости. Преобразователь частоты установлен в шкафу управления станом (см. рис. 2, б). Сигналы задания на него поступают с программируемого логического контроллера (ПЛК). На контроллер поступают сигналы с мессдоз через весовые преобразователи. ПЛК связывается с компьютером и передает информацию о всех технологических переменных процесса. Человеко-машинный интерфейс позволяет оператору управлять процессом через пульт управления. На лицевой панели пульта (см. рис. 2, а) располагаются сенсорный экран, кнопки управления, ручки регулировки скорости и сигнальные лампы. На сенсорном мониторе посредством специального программного обеспечения отображаются основные параметры процесса: общее усилие прокатки, скорость прокатки, зазор между валками, момент на валу редуктора.

Система автоматизации позволяет осуществлять управление станом путем изменения скорости вращения валков и выставлением межвалкового зазора, а система сбора данных фиксировать технологические параметры и определять усилие и момент прокатки. На экран сенсорного монитора выводится информация о технологических режимах прокатки, введенная оператором стана, и энергосиловые характеристики, полученные с датчиков, установленных на стане (рис. 4).



Рис. 2. Пульт (а) и шкаф (б) управления стана ДУО-130
 Fig. 2. The control panel (a) and an automation cabinet (б) of duo rolling mill 130

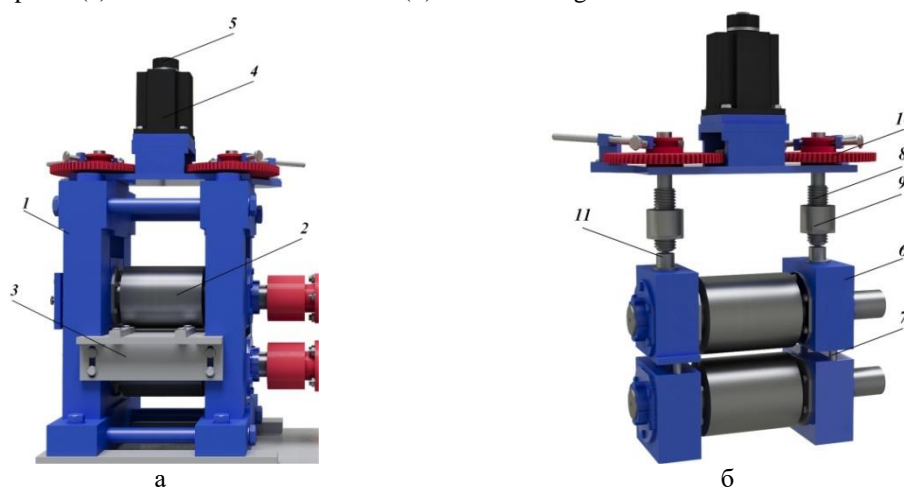


Рис. 3. Рабочая клеть прокатного стана ДУО-130: общий вид (а), электромеханический нажимной механизм (б);
 1 – станина; 2 – универсальные валки; 3 – приемно-задающий стол; 4 – шаговый электродвигатель;
 5 – энкодер; 6 – подушка; 7 – уравнивающее устройство; 8 – нажимной винт; 9 – нажимная гайка;
 10 – шестерня; 11 – мессдоза
 Fig. 3. The rolling stand of duo mill 130: a general view (а), electromechanical screw-down mechanism (б);
 1 is a housing; 2 are universal rolls; 3 is a receiving and feeding table; 4 is a stepper motor; 5 is an encoder;
 6 is a roll chock; 7 is a counterbalance; 8 is an adjusting screw; 9 is a screw box; 10 is a pinion gear;
 11 is a load cell

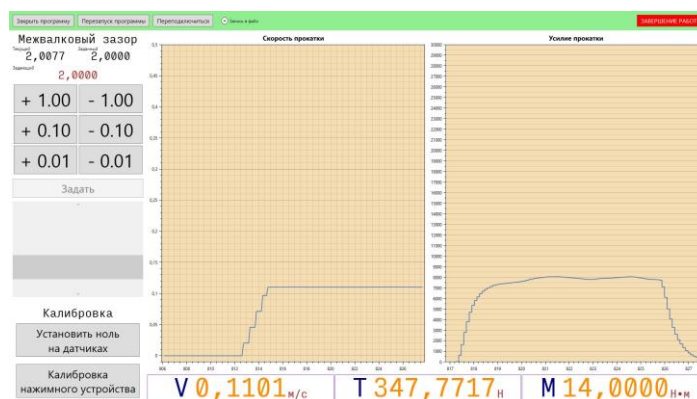


Рис. 4. Экран при прокатке полосы из заготовки $h_0 = 3,15$ мм с межвалковым зазором $h_{\text{зазор}} = 2,00$ мм
 Fig. 4. A screen when rolling strips from the billet, $h_0 = 3.15$ mm, with roll gap $h_{\text{gap}} = 2.00$ mm

Экспериментальное определение усилия и момента прокатки свинцовой полосы

Экспериментальная прокатка литых заготовок размером 11,5×51,0×200,0 мм из свинца марки С1 (99,95% Pb) осуществляется при комнатной температуре. Скорость прокатки составляла 0,11 м/с. Коэффициент трения при прокатке свинца согласно литературным источникам может быть от 0,15 до 0,30 [13]. Сопротивление деформации свинца марки С1 $\sigma_s = 10$ МПа. Температура рекристаллизации свинца составляет -33°C.

Режимы деформации и измеренные средние (экспериментальные) значения усилия прокатки указаны в табл. 1. Экспериментальные кривые усилия прокатки по проходам, полученные при измерениях на стане ДУО-130, представлены на рис. 5. В ходе экспериментальной прокатки измерялись геометрические размеры проката – толщина и ширина. Это позволило рассчитать абсолютное обжатие, уширение при прокатке, суммарное относительное обжатие. Стоит обратить внимание на то, что толщина полосы после прокатки отличается от межвалкового зазора при прокатке (см. рис. 4 и табл. 1). Это связано с упругим сжатием валков, жесткостью клетки и упругой деформацией прокатываемого металла.

Уширение металла при прокатке наблюдается до толщины проката 3,15 мм. В пятом и последующих проходах уширение металла отсутствует, связано это с изменением соотношения высоты к ширине полосы в процессе прокатки.

Измерение момента прокатки реализовано посредством системы автоматизации прокатного стана. Сигнал, пропорциональный моменту на валу двигателя, снимается с преобразователя частоты. На рис. 6

приведена нагрузочная диаграмма для прокатки в 6 проходов (см. табл. 1). Поскольку в конструкции имеется редуктор с передаточным числом $j_{ред} = 32,66$, момент прокатки (суммарный момент на бочке верхнего и нижнего валков) будет равен

$$M_{пр} = M_{дв} \cdot j_{ред} - M_{хх}, \quad (1)$$

где $M_{хх}$ – момент, соответствующий силам трения в подшипниках и передаточных элементах клетки, включая двигатель, приведенный к скорости вращения валков, Н·м.

В каждом проходе нагрузочная диаграмма имеет четыре характерных участка (рис. 6 и 7). На участке 1 происходит разгон стана и момент, создаваемый двигателем на валках клетки, соответствует сумме момента холостого хода $M_{хх}$ и динамического момента, необходимого для создания запаса кинетической энергии вращающихся масс:

$$M_{дин} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

где J – момент инерции всех вращающихся элементов клетки, Н·м; $\frac{d\omega}{dt}$ – ускорение при разгоне.

На участках 2 и 4 валки вращаются вхолостую и момент двигателя идет только на преодоление момента холостого хода $M_{хх}$. На участке 3 осуществляется прокатка металла и двигатель преодолевает как сопротивление момента холостого хода $M_{хх}$, так и момента прокатки $M_{пр}$.

Таблица 1. Экспериментальные значения усилия прокатки полосы
Table 1. Experimental values of strip rolling force

Номер прохода	Межвалковый зазор $h_{зазор}$, мм	Толщина полосы до прокатки h_0 , мм	Толщина полосы после прокатки h_1 , мм	Ширина полосы до прокатки b_0 , мм	Ширина полосы после прокатки b_1 , мм	Абсолютное уширение Δb , мм	Абсолютное обжатие Δh , мм	Суммарное относительное обжатие $\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0}$	Экспериментальное усилие прокатки $P_{экс}$, Н
1	9,0	11,50	9,10	51,0	52,0	1,0	2,40	0,21	8000
2	7,0	9,10	7,10	52,0	52,8	0,8	2,00	0,38	7700
3	5,0	7,10	5,15	52,8	53,3	0,5	1,95	0,55	8500
4	3,0	5,15	3,15	53,3	53,8	0,5	2,00	0,73	9800
5	2,0	3,15	2,15	53,8	53,8	0	1,00	0,81	8000
6	1,0	2,15	1,20	53,8	53,8	0	0,95	0,90	11000

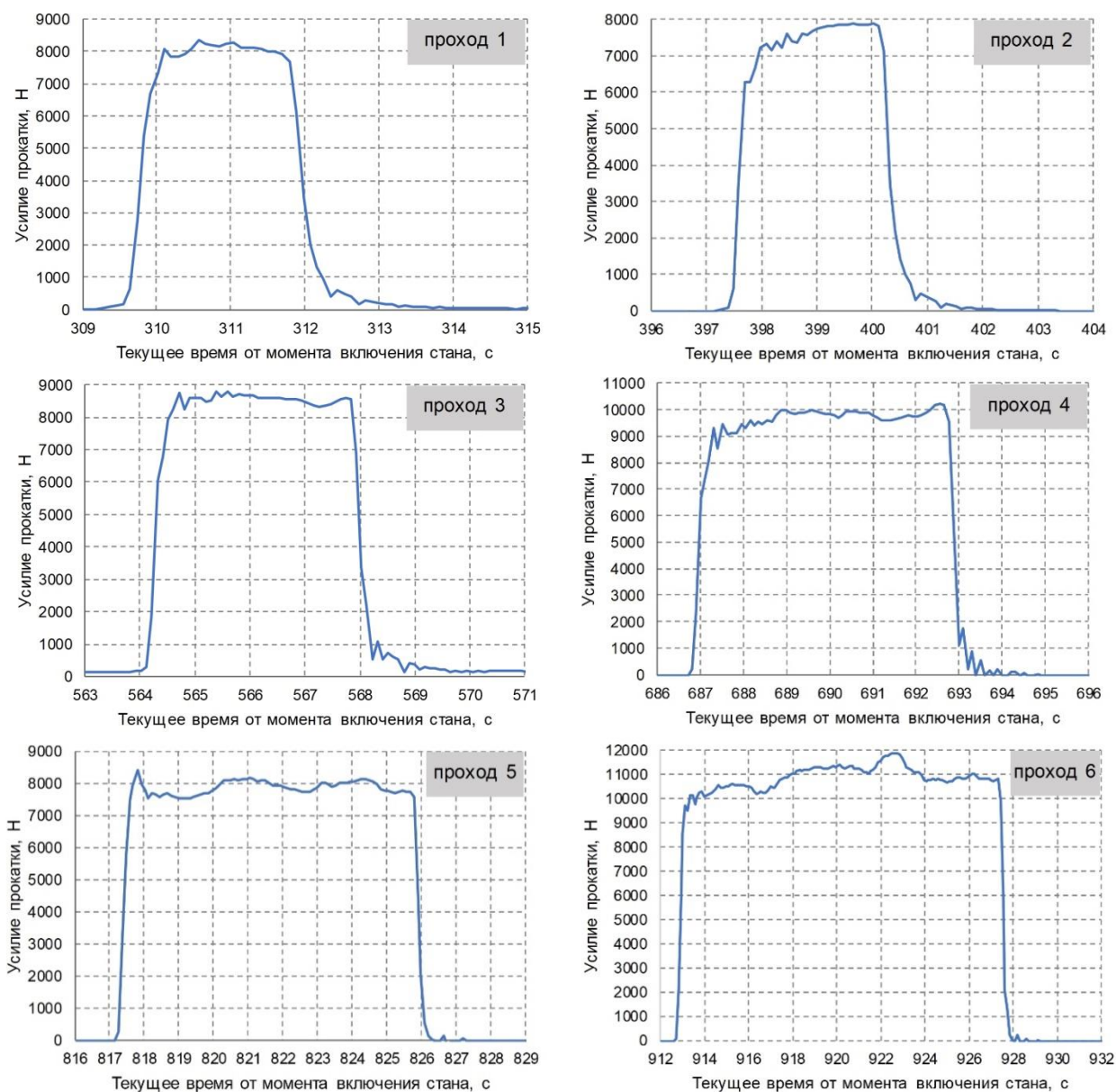


Рис. 5. Экспериментальные кривые усилия прокатки полосы по проходам

Fig. 5. Experimental curves of strip rolling force in passes

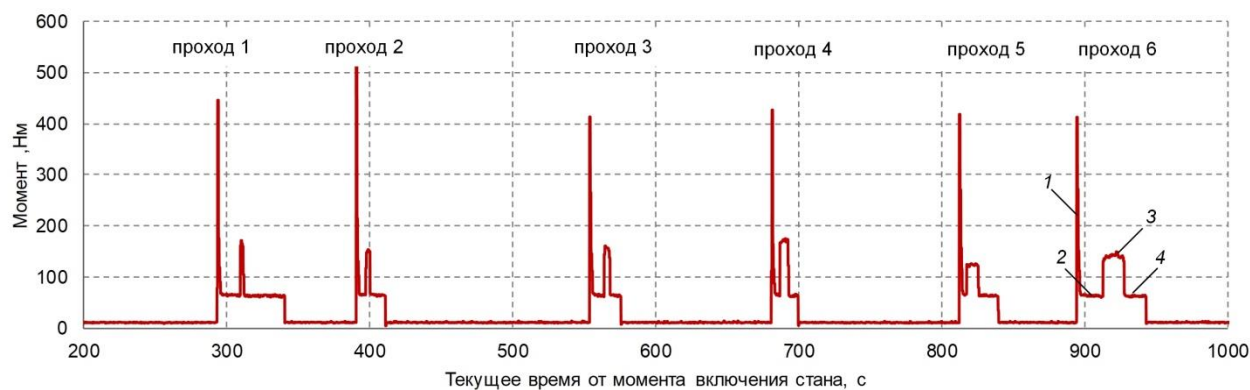


Рис. 6. Нагрузочная диаграмма для прокатки в 6 проходов

Fig. 6. A load diagram of rolling in 6 passes

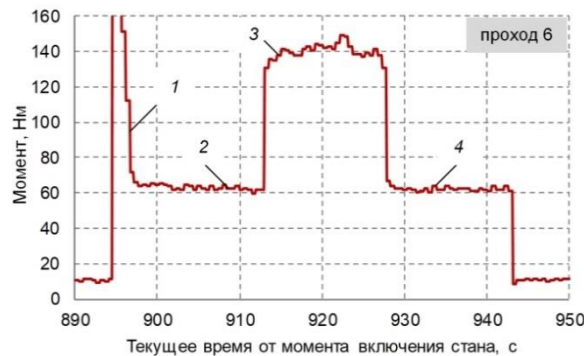


Рис. 7. Нагрузочная диаграмма для прокатки в 6-м проходе
Fig. 7. A load diagram of rolling in the 6th pass

Определение усилия и момента прокатки расчетным методом

Для теоретического определения усилия прокатки необходимо рассмотреть очаг деформации (рис. 8). При прокатке на стане ДУО-130 реализуется наипростейший процесс листовой прокатки, когда на металл действуют только силы от валков, движение металла при входе и выходе равномерное, оба валка приводные, имеют одинаковые скорости и диаметры, металл имеет известное сопротивление деформации.

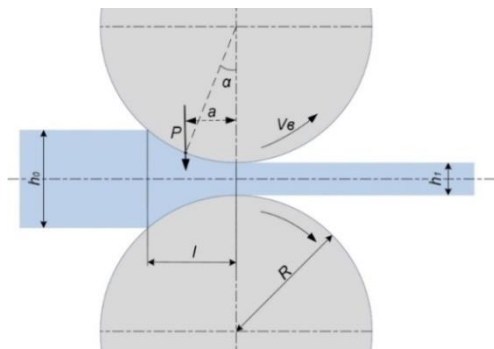


Рис. 8. Очаг деформации при листовой прокатке на стане ДУО-130
Fig. 8. Deformation zone during sheet rolling on duo mill 130

В этом случае определение усилия прокатки сводится к определению площади контакта прокатываемого металла с валками и установлению среднего удельного давления металла на валки p_{cp} :

$$P = p_{cp} \cdot F_k, \tag{3}$$

где F_k – площадь контакта металла с валками, мм²; p_{cp} – среднее удельное давление металла на валки, МПа.

При прокатке на гладкой бочке и наличии уширения площадь контакта определяют как

$$F_k = \frac{b_0 + b_1}{2} \cdot l, \tag{4}$$

где b_0 – ширина полосы до прокатки, мм; b_1 – ширина полосы после прокатки, мм; l – длина дуги захвата, мм.

Длину дуги захвата определяем как

$$l = \sqrt{\Delta h \cdot R}, \tag{5}$$

где $\Delta h = h_0 - h_1$ – абсолютное обжатие, мм; R – радиус валка, мм.

Для определения среднего давления металла на валки, как было отмечено выше, имеется множество формул, но в настоящем расчете мы воспользуемся формулой А.И. Целикова [16] для горячей прокатки:

$$p_{cp} = n_\gamma \cdot n_b \cdot n_\sigma \cdot \sigma_s, \tag{6}$$

где $n_\gamma = 1,00-1,15$ – коэффициент, учитывающий влияние схемы деформированного состояния. При отсутствии уширения $n_\gamma = 1,15$; n_b – коэффициент, учитывающий влияние ширины полосы. При $\frac{b}{l} \approx 5$, произведение коэффициентов $n_\gamma \cdot n_b = 1$, а при $\frac{b}{l} > 5$, то $n_\gamma \cdot n_b = 1,15$; $n_\sigma = 0,8-8,0$ – коэффициент, учитывающий напряженное состояние, зависящее от внешнего трения, внешних зон и натяжения; σ_s – среднее значение сопротивления деформации.

Для листовой холодной прокатки без натяжения в работе [17] рекомендуется рассчитывать среднее удельное давление по формуле

$$p_{cp} = 1,15 \cdot \sigma_s \cdot \frac{2h_n}{\Delta h(\delta - 1)} \left[\left(\frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 1 \right], \tag{7}$$

где $\delta = \frac{2 \cdot f \cdot l}{\Delta h}$ – параметр Целикова; f – коэффициент трения;

$$h_n = h_1 \cdot \left(\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \cdot \left(\frac{h_0}{h_1} \right)^\delta}}{\delta + 1} \right)^{\frac{1}{\delta}} \tag{8}$$

– высота очага деформации в нейтральном сечении, мм.

Результаты расчета по приведенной выше методике для режимов экспериментальной прокатки (см. табл. 1) приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения усилия прокатки полосы
Table 2. Calculated values of strip rolling force

Номер прохода	Толщина полосы после прокатки h_1 , мм	Длина дуги захвата l , мм	Площадь контакта металла с валками $F_{к}$, мм ²	Коэффициент трения f	Среднее значение сопротивления деформации σ_s , МПа	Среднее удельное давление металла на валки $p_{ср}$, МПа	Расчетное усилие прокатки P , Н
1	9,10	12,5	643,2	0,18	10,0	12,5	8021
2	7,10	11,4	597,5	0,18	10,0	12,7	7597
3	5,15	11,3	597,3	0,18	11,0	14,5	8637
4	3,15	11,4	610,6	0,18	11,5	16,2	9909
5	2,15	8,1	433,7	0,18	12,0	17,9	7750
6	1,20	7,9	422,8	0,18	14,5	25,3	10708

Момент, необходимый для вращения валков прокатного стана

$$M = M_{пр} + M_{хх} + M_{дин}, \quad (8)$$

где $M_{пр}$ – момент прокатки, требуемый для преодоления сил деформации прокатываемого металла и сил трения между металлом и валками, Н·м; $M_{хх}$ – момент холостого хода, Н·м; $M_{дин}$ – динамический момент, необходимый для преодоления сил инерции и в установившемся режиме прокатки равный нулю, Н·м.

Момент прокатки может быть определен как

$$M_{пр} = 2 \cdot P \cdot a = 2 \cdot P \cdot \psi \cdot l, \quad (9)$$

где $\psi = \frac{a}{l}$ – отношение плеча a равнодействующей сил давления к длине дуги захвата l (см. рис. 6).

Экспериментальные данные [24, 25] показывают, что на высоких очагах деформации $\psi = 0,50-0,57$, а на низких очагах деформации уменьшается до 0,28. В нашем случае при подстановке $\psi = 0,50$ расчетные значения момента прокатки (табл. 3) с высокой точностью совпадают с экспериментальными.

Расчетные значения усилия и момента прокатки совпадают с экспериментальными, полученными при прямом измерении в ходе прокатки, с ошибкой не более 5%. Методика расчета усилия прокатки, рекомендованная А.И. Целиковым, и допущения, принятые для анализируемого процесса прокатки свинцо-

вой полосы на стане ДУО-130, позволяют говорить об ее адекватности и возможности использования для аналитических исследований. Возможность применения этой методики для других сплавов и типоразмеров проката требует проведения их экспериментальной прокатки на стане ДУО-130 для определения коэффициентов, учитывающих особенности процесса.

Заключение

В работе приведено описание конструктивных особенностей лабораторного научно-исследовательского стана ДУО-130, позволяющего осуществлять прокатку полосы шириной до 150 мм. Системы автоматизации и сбора данных, которыми оснащен стан, позволяют задавать межвалковый зазор и скорость прокатки и измерять усилие и момент прокатки. Измеренные значения усилия и момента при прокатке свинцовой полосы в 6 проходов с высокой точностью, ошибка не превышала 5%, соответствуют расчетным. Методика расчета усилия и момента прокатки, разработанная применительно к стану ДУО-130, может быть использована для проведения аналитических исследований влияния режимов прокатки на энергосиловые параметры.

Представленный в работе лабораторный прокатный стан ДУО-130 может быть задействован в образовательном процессе при подготовке специалистов металлургической и машиностроительной направленности.

Таблица 3. Экспериментальные и расчетные значения момента прокатки полосы
Table 3. Experimental and calculated values of strip rolling torque

Номер прохода	Измеренный момент $M_{изм}$, Н·м	Момент холостого хода $M_{хх}$, Н·м	Момент прокатки экспериментальный $M_{пр,э}$, Н·м	Момент прокатки расчетный $M_{пр,р}$, Н·м
1	165	65	100	100
2	150	65	85	86
3	160	65	95	97
4	170	65	105	108
5	125	65	60	62
6	145	65	80	81

Список источников

1. Гугис Н.Н. Развитие прокатного производства в Российской Федерации в 2019-2022 годах // *Сталь*. 2023. №2. С. 14-26. EDN WPTQJS.
2. Шаталов Р.Л. Расчет, проектирование и применение прокатного оборудования: учеб. пособие. Вологда: ООО «Издательство "Инфра-Инженерия"», 2020. 236 с. EDN CGZYRN.
3. Штанский В.А. Обеспечение устойчивого инновационного развития предприятий металлургического комплекса // *Экономика промышленности*. 2019. Т. 12. №4. С. 466-472. DOI: 10.17073/2072-1633-2019-4-466-472. EDN IEDGIS.
4. Закономерности формирования и особенности влияния тонкой структуры на свойства магниевого сплава нового поколения / Е.Ф. Волкова, В.А. Дуюнова, И.В. Мостяев, М.В. Акинина // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2020. №1(32). С. 55-63. DOI: 10.38013/2542-0542-2020-1-55-63. EDN IGFQBQ.
5. Захаров В.В., Филатов Ю.А., Телешов В.В. Работы ОАО «ВИЛС» в области создания деформируемых алюминиевых сплавов на основе новых систем легирования // *Технология легких сплавов*. 2018. №4. С. 16-23. EDN YZAJDV.
6. Эволюция микроструктуры и механических свойств нового деформируемого сплава системы Al-Cu-Fe / А.В. Поздняков, Р.Ю. Барков, Ж. Сарсенбаев и др. // *Физика металлов и металловедение*. 2019. Т. 120. №6. С. 668-672. DOI: 10.1134/S0015323019060093. EDN UCKMJM.
7. Физико-химические характеристики новых комплексных ниобийсодержащих сплавов / О.В. Заякин, И.Н. Кель, Д.С. Ренев и др. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2023. Т. 66. №5. С. 616-622. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-5-616-622. EDN WDWEQI.
8. <https://www.thermet.net/production/> (дата обращения 10.12.2023)
9. <https://viam.ru/news/7062#> (дата обращения 10.12.2023)
10. Исследование особенности формирования структуры стали 08Ю при асимметричной прокатке на новом стане 400 / Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, А.М. Песин, М.В. Чукин // *Черные металлы*. 2022. №10. С. 39-44. DOI: 10.17580/chm.2022.10.07. EDN LQNOKQ.
11. Учебно-исследовательский прокатный стан ДУО-130 / Л.В. Радионова, Р.А. Лисовский, С.Р. Фаизов и др. // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2023. Т. 10. №1. С. 61-66. DOI: 10.24892/RIJE/20230112. EDN OSVNAE.
12. Научно-исследовательский волочильный стан / Л.В. Радионова, Р.А. Лисовский, С.Р. Фаизов и др. // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2023. Т. 10. №3. С. 51-55. DOI: 10.24892/RIJE/20230310. EDN RAQMSS.
13. Физическое моделирование при изучении студентами теории и технологии прокатки / Л.В. Радионова, Р.А. Лисовский, Д.В. Громов и др. // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Металлургия. 2023. Т. 23. №2. С. 23-42. DOI: 10.14529/met230203. EDN RGPZMK.
14. Дубинский Ф.С. Учебно-исследовательский тренажер-имитатор процессов сортовой прокатки / Ф.С. Дубинский, М.А. Соседкова, П.А. Мальцев // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Металлургия. 2015. Т. 15. №2. С. 120-125. EDN TQIWTP.
15. Гасияров В.Р., Радионов А.А., Пузанкова Е.А. Методика расчета момента прокатки на толстолистовом стане 5000 // *Электротехнические системы и комплексы*. 2009. №16. С. 100-109. EDN QMNNKP.
16. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. М.: Металлургиздат, 1962. 495 с. EDN YKTGIN.
17. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
18. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1947. 423 с.
19. Королев А.А. Прокатные станы и оборудование прокатных цехов. Атлас. Т. 2. М.: Металлургия, 1981. 208 с.
20. Гасияров В.Р., Радионов А.А., Усатый Д.Ю. Разработка уточнённой методики расчёта момента на валу двигателя клетки толстолистового стана горячей прокатки и проверка её адекватности // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2011. №4. С. 78-81. EDN ODZISV.
21. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Обработка металлов давлением», направления подготовки дипломированных специалистов «Металлургия» / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2003. 506 с. EDN QNANGB.
22. Исследование энергосиловых параметров холодной прокатки листа на стане 2500 ОАО «ММК» / В.М. Салганик, А.А. Радионов, В.А. Антипенко, В.В. Андросенко // *Электротехнические системы и комплексы*. 2000. №5. С. 114-120. EDN QMNKAD.
23. Решение технологических задач ОМД на микроЭВМ: учеб. пособие для студентов, аспирантов, преподавателей и инженеров-технологов, использующих персональную вычислительную технику / В.Л. Колмогоров, С.И. Паршаков, С.П. Буркин и др. М.: Металлургия, 1993. 320 с. EDN WZELDM.
24. Румянцев М.И., Кинзин Д.И. Теория прокатки / Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. 188 с. EDN XQPULB.
25. Рудской А.И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению «Металлургия» / Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский гос. политехн. ун-т. Санкт-Петербург: Наука, 2008. EDN QNCBAH.

References

- Gugis N.N. Development of rolling production in the Russian Federation in 2019-2022. *Stal* [Steel]. 2023;(2):14-26. (In Russ.)
- Shatalov R.L. *Raschet, proektirovanie i primeneniye prokatnogo oborudovaniya: ucheb. posobie* [Calculation, design and application of rolling equipment: study guide]. Vologda: LLC Infra-Inzheneriya Publishing House, 2020, 236 p. (In Russ.) EDN CGZYRH. ISBN 978-5-9729-0434-4
- Shtansky V.A. Ensuring sustainable innovative development of enterprises of the metallurgical complex. *Ekonomika promyshlennosti* [Russian Journal of Industrial Economics]. 2019;12(4):466-472. (In Russ.) DOI:10.17073/2072-1633-2019-4-466-472. EDN IEDGIS
- Volkova E.F., Duyunova V.A., Mostyaev I.V., Akinina M.V. Regularities of the formation and features of the influence of a fine structure on the properties of a new generation magnesium alloy. *Vestnik Kontserna VKO Almaz – Antey* [Journal of Almaz – Antey Air and Space Defence Corporation]. 2020;(1(32)):55-63. (In Russ.) <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-55-63>. EDN IGFQBQ
- Zakharov V.V., Filatov Yu.A., Teleshov V.V. Research of OJSC VILS in the field of developing deformable aluminum alloys based on new alloying systems. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2018;(4):16-23. (In Russ.). EDN YZAJDV
- Pozdnyakov A.V., Barkov R.Yu., Sarsenbaev Zh. et al. Evolution of microstructure and mechanical properties of a new Al–Cu–Er wrought alloy. *Physics of Metals and Metallography*. 2019;120(6):614-619. DOI: 10.1134/S0031918X19060097. EDN HCYDXA
- Zayakin O.V., Kel I.N., Renev D.S. et al. Physico-chemical characteristics of new complex niobium-containing alloys. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2023;66(5):616-622. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-616-622>. EDN WDWEQI
- Available at: <https://www.chermet.net/production/> (Accessed on December 10, 2023)
- Available at: <https://viam.ru/news/7062#> (Accessed on December 10, 2023)
- Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Pesin A.M., Chukin M.V. Investigation of the features of the formation of the structure of steel 08Yu during asymmetric rolling on a new mill 400. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2022;(10):39-44. (In Russ.) DOI: 10.17580/chm.2022.10.07. EDN: LQNOKQ
- Radionova L.V., Lisovsky R.A., Faizov S.R. et al. Educational and research duo rolling mill 130. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2023;10(1):61-66. (In Russ.) DOI: 10.24892/RIJIE/20230112. EDN OSVHAE
- Radionova L.V., Lisovsky R.A., Faizov S.R. et al. A wire drawing machine for research. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2023;10(3):51-55. (In Russ.) DOI: 10.24892/RIJIE/20230310. EDN RAQMSS
- Radionova L.V., Lisovsky R.A., Gromov D.V. et al. Physical simulation when students study theory and technologies of rolling. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2023;23(2):23-42. (In Russ.) DOI: 10.14529/met230203. EDN RGPZMK
- Dubinskiy F.S., Sosedkova M.A., Maltsev P.A. Research and training simulator of shape rolling process. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2015;15(2):120-125. (In Russ.) EDN TQIWTP
- Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Puzankova E.A. Methods of calculating rolling torque on plate mill 5000. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical Systems and Complexes]. 2009;(16):100-109. (In Russ.) EDN QMNNKP
- Tselikov A.I. *Teoriya rascheta usily v prokatnykh stanakh* [Theory of calculating forces in rolling mills]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 495 p. (In Russ.) EDN YKTGIH
- Tselikov A.I., Nikitin G.S., Rokotyan S.E. Theory of longitudinal rolling. Moscow: Metallurgiya, 1980, 320 p. (In Russ.)
- Gubkin S.I. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1947, 423 p. (In Russ.)
- Korolev A.A. *Prokatnye stany i oborudovanie prokatnykh tsekhov. Atlas* [Rolling mills and equipment of rolling shops. Atlas]. Volume 2. Moscow: Metallurgiya, 1981, 208 p. (In Russ.)
- Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Usaty D.Yu. Developing an updated methodology for calculating torque of the motor shaft for stands of the hot plate rolling mill and checking its adequacy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics]. 2011;(4):78-81. (In Russ.) EDN ODZISV
- Salganik V.M., Gun I.G., Karandaev A.S., Radionov A.A. *Tonkoslyabovye liteyno-prokatnye agregaty dlya proizvodstva stalnykh polos: ucheb. posobie dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po spetsialnosti «Obrabotka metallov davleniem», napravleniya podgotovki diplomirovannykh spetsialistov «Metallurgiya»* [Thin slab casting and rolling facilities for producing steel strips: study guide for university students majoring in metal forming, the metallurgy field of study]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University (national research university), 2003, 506 p. (In Russ.) EDN QNANGB
- Salganik V.M., Radionov A.A., Antipenko V.A., Androsenko V.V. Study on energy and power parameters of cold rolling of sheet metal on mill 2500 at OJSC

- ММК. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical Systems and Complexes]. 2000;(5):114-120. (In Russ.) EDN QMNKAD
23. Kolmogorov V.L., Parshakov S.I., Burkin S.P. et al. *Reshenie tekhnologicheskikh zadach OMD na mikroEVM: ucheb. posobie dlya studentov, aspirantov, преподаvateley i inzhenerov-tekhnologov, ispolzuyushchikh personalnyuyu vychislitelnyuyu tekhniku* [Solution of technological problems of metal forming using a microcomputer: study guide for students, postgraduate students, university teachers and technology engineers using personal computing equipment]. Moscow: Metallurgiya, 1993, 320 p. EDN WZELDM
24. Rumyantsev M.I., Kinzin D.I. *Teoriya prokatki* [Rolling theory]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2017, 188 p. (In Russ.) EDN XQPULB
25. Rudskoy A.I., Lunev V.A. *Teoriya i tekhnologiya prokatnogo proizvodstva: ucheb. posobie dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po napravleniyu «Metallurgiya»*; *Federalnoe agentstvo po obrazovaniyu, Sankt-Peterburgskiy gos. politekhn. un-t* [Theory and technology of rolling: study guide for university students majoring in metallurgy; Federal Agency for Education, Saint Petersburg State Polytechnic University]. Saint Petersburg: Nauka, 2008. (In Russ.) ISBN 978-5-02-025302-5. EDN QNCBAH

Поступила 01.02.2024; принята к публикации 20.02.2024; опубликована 30.09.2024

Submitted 01/02/2024; revised 20/02/2024; published 30/09/2024

Радионова Людмила Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлургия», Московский политехнический университет, Москва, Россия.
Email: radionoalv@rambler.ru. ORCID 0000-0001-9587-2925

Громов Дмитрий Владимирович – аспирант кафедры «Металлургия», Московский политехнический университет, Москва, Россия.
Email: gromov111999@gmail.com. ORCID 0000-0001-6036-3784

Фаизов Сергей Радиевич – младший научный сотрудник кафедры «Автоматика и управление», Московский политехнический университет, Москва, Россия.
Email: faizovsergey@gmail.com. ORCID 0000-0001-6644-1173

Лисовский Роман Андреевич – инженер-программист НИИ «Учебная техника и технологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: lisovskiira@susu.ru. ORCID 0000-0002-8857-2606

Зараменских Сергей Евгеньевич – инженер-конструктор НИИ «Учебная техника и технологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: s.zaramenskih@yandex.ru. ORCID 0000-0001-5137-3796

Глебов Лев Александрович – аспирант кафедры «Процессы и машины обработки металлов давлением», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: glebovla@susu.ru. ORCID 0000-0001-6484-1894

Liudmila V. Radionova – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Metallurgy Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.
Email: radionoalv@rambler.ru. ORCID 0000-0001-9587-2925

Dmitriy V. Gromov – postgraduate student of the Metallurgy Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.
Email: gromov111999@gmail.com. ORCID 0000-0001-6036-3784

Sergey R. Faizov – Junior Researcher of the Automation and Control Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.
Email: faizovsergey@gmail.com. ORCID 0000-0001-6644-1173

Roman A. Lisovsky – Programming Engineer of the Educational Technology and Equipment Research and Production Institute, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: lisovskiira@susu.ru. ORCID 0000-0002-8857-2606

Sergey E. Zaramenskikh – Programming Engineer of the Educational Technology and Equipment Research and Production Institute, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: s.zaramenskih@yandex.ru. ORCID 0000-0001-5137-3796

Lev A. Glebov – postgraduate student of the Department of Metal Forming Processes and Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: glebovla@susu.ru. ORCID 0000-0001-6484-1894