



Оригинальная статья

УДК 621.771.01

DOI 10.17073/0368-0797-2022-8-590-595

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2371>



СИЛОВЫЕ УСЛОВИЯ ПРОКАТКИ В УНИВЕРСАЛЬНЫХ КАЛИБРАХ СОВРЕМЕННЫХ РЕЛЬСОБАЛОЧНЫХ СТАНОВ

А. Р. Фастыковский¹, А. В. Добрянский², В. В. Дорофеев²

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

Аннотация. Развитие подвижного железнодорожного состава, увеличение скорости перевозки, грузонапряженности магистралей и их протяженности требует постоянного совершенствования технологии производства железнодорожных рельсов. Современные рельсобалочные станы имеют в своем составе непрерывно-реверсивную группу клетей, в которую входят универсальные клетки. Прокатка рельсовых профилей в универсальных калибрах кардинально отличается от прокатки в двухвалковых калибрах. В настоящее время она недостаточно хорошо изучена как в теоретическом, так и практическом плане. Определены условия осуществления процесса прокатки в универсальных калибрах с парой неприводных валков, учитывающие величины активных (резервных) сил трения, действующих со стороны приводных валков, и реактивных сил со стороны неприводных валков и валковой арматуры. Методом энергетического баланса решена задача по определению усилия подпора, необходимого для деформирования в неприводных валках. При решении уравнения равновесия сил в очаге деформации, образованном приводными валками, определен резерв сил трения, который во многом определяет возможность процесса прокатки. Получены теоретические зависимости для оценки силового баланса при прокатке в универсальных калибрах современных рельсобалочных станов с учетом резерва сил трения, обеспеченного приводными валками, и подпора, необходимого для деформирования в неприводных валках. Информация о силовых условиях в универсальном калибре необходима для анализа процесса прокатки в универсальном калибре при различных режимах деформирования и уточнения коэффициентов вытяжки по элементам получаемого профиля. Предложены зависимости позволяющие оценить расход резерва сил трения на работу валковой арматуры, которая обслуживает универсальный калибр. Уточнена известная формула А.И. Целикова, А.И. Гришкова по определению уширения применительно к прокатке в универсальных калибрах с двумя неприводными валками. Отмечено влияние подпора со стороны неприводных валков на изменение размеров подошвы и головки рельсовых профилей.

Ключевые слова: силовые условия, универсальный калибр, рельсобалочный стан, область осуществимости, уширение, коэффициент вытяжки

Для цитирования: Фастыковский А.Р., Добрянский А.В., Дорофеев В.В. Силовые условия прокатки в универсальных калибрах современных рельсобалочных станов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 8. С. 590–595.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-590-595>

Original article

POWER CONDITIONS OF ROLLING IN UNIVERSAL CALIBERS OF MODERN RAIL-BEAM MILLS

A. R. Fastyskovskii¹, A. V. Dobryanskii², V. V. Dorofeev²

¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

² JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant” (16 Kosmicheskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654043, Russian Federation)

Abstract. Development of rolling stock, increase in the speed of transportation, load-bearing capacity of highways and their length requires constant improvement of the production technology for railway rails. Modern rail-beam mills have in their composition a continuously reversible group of stands, which includes universal stands. Rolling of rail profiles in universal calibers is radically different from rolling in two-roll calibers, and at the moment is not well studied, both theoretically and practically. The article defines the conditions for feasibility of the rolling process in universal calibers with a pair of non-drive rolls, taking into account the values of active (reserve friction forces) acting from the drive rolls and reactive forces from the non-drive rolls and roller fittings. The energy balance method solves the problem of determining the back-up force required for deformation in non-drive rolls. When solving the equation of equilibrium of forces in the deformation center formed by the drive rolls, the reserve of friction forces is defined, the magnitude

of which largely determines the possibility of the rolling process. Theoretical dependences are obtained for estimating the power balance during rolling in universal calibers of modern rail-beam mills, taking into account the reserve of friction forces provided by the drive rolls and the support required for deformation in non-drive rolls. Information about the force conditions in a universal caliber is necessary to analyze the feasibility of the rolling process in it under various deformation modes and to clarify the drawing coefficients for elements of the resulting profile. Dependencies are proposed that allow estimating the consumption of the reserve of friction forces for the operation of roller fittings serviced by universal caliber. The well-known formula of A.I. Tselikov and A. I. Grishkov on the definition of broadening was clarified in relation to rolling in universal calibers with two non-drive rolls. The support from the non-drive rolls side effects the change in size of sole and head of the rail profiles.

Keywords: power conditions, universal caliber, rail-beam mill, feasibility area, broadening, extraction coefficient

For citation: Fastykovskii A.R., Dobryanskii A.V., Dorofeev V.V. Power conditions of rolling in universal calibers of modern rail-beam mills. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 8, pp. 590–595. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-590-595>

ВВЕДЕНИЕ

Технологический процесс прокатки постоянно совершенствуется, внедряется новое оборудование и приемы обработки, совершенствуются методики расчетов и анализа новых технических и технологических решений [1, 2]. Такая тенденция не обошла стороной и рельсобалочное производство. Современный рельсобалочный стан в своем составе имеет непрерывно-реверсивную группу клетей (тандем-группа), в которую входят универсальные клетки. Способ прокатки рельсов в универсальных клетях получил широкое распространение за рубежом, начиная со второй половины прошлого века, и является основным направлением совершенствования технологии производства рельсов в настоящее время [3 – 10]. Использование универсальных клетей позволяет добиться высокой производительности, хороших потребительских свойств рельсовой продукции [11 – 13]. Использование универсальных калибров существенно меняет баланс сил в очаге деформации по сравнению с прокаткой в двухвалковых калибрах, что, в свою очередь, перераспределяет коэффициенты вытяжки по элементам рельсовых профилей и требует соответствующих корректировок калибровок. В настоящее время вопрос силового баланса в универсальных калибрах рельсобалочных станов является недостаточным изученным и требует дополнительных исследований.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Особенность прокатки в универсальных калибрах заключается в том, что из четырех валков два горизонтальные (приводные), а два вертикальные (неприводные). Деформирование неприводными валками осуществляется за счет использования резерва тягивающих сил трения приводных валков. При расчетах формоизменения металла в универсальных калибрах необходимо учитывать этот фактор, так как при небольших резервах тягивающих сил трения возможны пробуксовки и другие негативные явления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим прокатку в универсальных калибрах при условии, что два горизонтальных валка – приводные, а

два вертикальных – неприводные. Прокатка для рассматриваемого случая возможна при следующем условии:

$$Q_{\text{н}} - Q_{\text{н}} - Q_{\text{а}} > 0, \quad (1)$$

где $Q_{\text{н}}$ – горизонтальная составляющая тягивающих сил трения приводных горизонтальных валков; $Q_{\text{н}}$ и $Q_{\text{а}}$ – горизонтальная составляющая сил, необходимой для деформирования металла неприводными валками и для работы валковой арматуры.

Устойчивая прокатка в универсальном калибре возможна при 30 % запасе тягивающих сил трения и с учетом этого зависимость (1) преобразуется к виду:

$$\frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{н}} + Q_{\text{а}}} > 1,3. \quad (2)$$

Для проверки выполнения условия (2) необходимо определить горизонтальные проекции соответствующих сил.

Горизонтальную составляющую сил, необходимой для деформирования металла вертикальными неприводными валками, определим при решении уравнения энергетического баланса:

$$N_{\text{ф}} + N_{\text{тр}} + N_{\text{х}} - N_{\text{н}} = 0, \quad (3)$$

где $N_{\text{ф}}$, $N_{\text{тр}}$, $N_{\text{х}}$ и $N_{\text{н}}$ – мощность, необходимая для формоизменения, преодоления сил трения, холостого хода и деформирования неприводными валками.

При прокатке рельсовых профилей левый и правый вертикальные валки имеют различные контуры поверхности и разную деформацию головки и подошвы. Для учета рассматриваемой особенности при определении продольной силы, необходимой для деформирования, сначала рассмотрим симметричную прокатку с размерами и режимами деформации, соответствующими левому валку, затем проведем аналогичные расчеты для правого валка, просуммируем полученные значения продольных сил и поделим пополам.

При решении уравнения (3) необходимо воспользоваться зависимостями для определения соответствующих мощностей.

Мощность для деформирования $N_{\text{н}}$ неприводными валками можно найти по формуле [14]:

$$N_n = \sigma_n V_c, \quad (4)$$

где σ_n – напряжение подпора для деформирования неприводными валками, МПа; V_c – секундный объем.

Мощность на формоизменение определим по следующему уравнению:

$$N_\phi = p_{cp} v \omega_{cp} \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right), \quad (5)$$

где v – скорость прокатки, м/с; ω_{cp} – средняя площадь сечения, мм²; h_0 и h_1 – начальная и конечная толщина полосы, мм; p_{cp} – среднее нормальное напряжение, МПа.

Мощность сил трения на контактной поверхности неприводных валков определим с учетом мощностей сил трения, действующих в зонах опережения и отставания, с использованием зависимостей [15], по формуле:

$$N_{тр} = \int \int_{F_{от}} \tau_{от} \Delta v_{от} dF + \int \int_{F_{оп}} \tau_{оп} \Delta v_{оп} dF, \quad (6)$$

где $\Delta v_{от}$ и $\Delta v_{оп}$ – продольные составляющие скоростей скольжения в зонах отставания и опережения, мм/с; $\tau_{от}$ и $\tau_{оп}$ – касательные силы трения в зонах отставания и опережения, МПа; $F_{от}$ и $F_{оп}$ – контактные площади в зонах отставания и опережения, мм².

Мощность, расходуемая на вращение неприводных валков [15], определим по выражению:

$$N_x = - \int \int_{F_{от}} \tau_{от} v_b dF + \int \int_{F_{оп}} \tau_{оп} v_b dF, \quad (7)$$

где v_b – горизонтальная составляющая окружной скорости валков, м/с.

Решая совместно уравнения (6) и (7), получена зависимость вида:

$$N_{тр} + N_x = \sum_1^n \left(\int \int_{F_{оп}} \tau_{оп} v_m dF - \int \int_{F_{от}} \tau_{от} v_m dF \right), \quad (8)$$

где v_m – скорость частиц металла на контактной поверхности в направлении, касательном к поверхности валков, мм/с.

После соответствующих подстановок и решения уравнения (3) получим зависимость для определения горизонтальной составляющей силы, необходимой для деформирования неприводными вертикальными валками:

$$Q_n = p_{cp} S_0 \ln \lambda_n + b_{cp} \mu_n p_{cp} l_{дн} \times \left[\frac{\lambda_n^{0,75}}{\cos(0,25\alpha_n)} - \frac{\lambda_n^{0,25}}{\cos(0,75\alpha_n)} \right], \quad (9)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения на входе в универсальный калибр, мм²; λ_n – коэффициент вытяжки металла при деформировании неприводными валка-

ми; μ_n – коэффициент трения в неприводных валках; α_n – угол захвата неприводными валками, рад; $l_{дн}$ – длина дуги захвата в неприводных валках; b_{cp} – средняя ширина полосы в неприводных валках, мм.

Для определения резерва сил трения в приводных валках воспользуемся решением уравнения равновесия сил в очаге деформации. Рассмотрим предельные условия, когда подпирательная сила уравнивает резерв сил трения. В этом случае в очаге деформации остается одна зона отставания.

Спроектируем силы, действующие в симметричном очаге деформации, по направлению движения металла (ось x):

$$2R_n b'_{cp} \int_0^\alpha \tau_{cp} \cos \theta d\theta - 2R_n b'_{cp} \int_0^\alpha p_{cp} \sin \theta d\theta - Q_n = 0, \quad (10)$$

где R_n – радиус приводных валков, мм; τ_{cp} – среднее касательное напряжение при деформировании в приводных валках, МПа; θ – текущий угол, рад; α – угол захвата в приводных валках, рад; b'_{cp} – средняя ширина полосы в приводных валках, мм.

Преобразуя полученное уравнение, допустим, что касательные напряжения связаны с нормальными через коэффициент трения:

$$2R_n b'_{cp} \mu_y p_{cp} \int_0^\alpha \cos \theta d\theta - 2R_n b'_{cp} p_{cp} \int_0^\alpha \sin \theta d\theta - Q_n = 0, \quad (11)$$

где Q_n – резерв стягивающих сил трения приводных горизонтальных валков, Н; μ_y – коэффициент трения в приводных валках на установившейся стадии прокатки.

После решения уравнения (11) получим зависимость для определения резерва стягивающих сил трения приводных горизонтальных валков:

$$Q_n = p_{cp} l_d b'_{cp} (2\mu_y - \alpha), \quad (12)$$

где l_d – длина дуги захвата в приводных горизонтальных валках, мм.

Еще одним источником реактивной силы является валковая арматура, работа которой обеспечивается резервом сил трения очага деформации обслуживаемой клетки. При прокатке железнодорожных рельсов в тандем-группе использование валковой арматуры сводится к минимуму с целью снижения поверхностных дефектов и этой составляющей можно пренебречь. При прокатке асимметричных рельсовых профилей, таких как острые, усековые рельсы или при использовании универсальных калибров на сортовых станах валковая арматура задействуется в полном объеме. Это вносит изменение в энергетический баланс и этот факт нужно учитывать. Основные функции валковой арматуры, обслуживающей универсальный калибр, сводятся к удержанию профиля от сваливания и правке полосы на выходе.

Определим необходимое продольное усилие для удержания от сваливания в вводной арматуре. Мощность, расходуемую на удержание от сваливания, можно найти по формуле [16]:

$$N_c = M_c \omega = M_c \theta_c v, \quad (13)$$

где M_c – момент скручивания, Н·м; ω – угловая скорость скручивания, с⁻¹; v – скорость движения раската, м/с; θ_c – относительный угол закручивания на единицу длины, рад.

Подставив соответствующую зависимость для определения входящих в формулу (13) величин [17, 18], после преобразований получим:

$$Q_c = \frac{0,157 \sigma_s h_{пр}^2 (3b_{пр} - h_{пр})}{L_c}, \quad (14)$$

где L_c – расстояние от оси удерживающего ролика до оси валков, мм; $b_{пр}$ и $h_{пр}$ – ширина и высота приведенной полосы, мм; σ_s – сопротивление деформации, МПа.

Продольную силу, необходимую для пластического изгиба выходящего из очага деформации конца полосы, можно определить по формуле:

$$Q_{изг} = \frac{b_{пр} h_{пр}^2 \sigma_s \mu}{2x \left(1 - \frac{x}{l_{пров}} \right)}, \quad (15)$$

где $l_{пров}$ – длина проводки, мм; x – расстояние от носка проводки до места приложения силы, мм; μ – коэффициент трения между полосой и проводкой.

Продольную силу, необходимую для работы валковой арматуры, можно найти по формуле:

$$Q_a = Q_c + Q_{изг}. \quad (16)$$

Использование универсальных калибров при производстве рельсов по сравнению с классическим способом кардинально меняет баланс сил в очаге деформации. Появляются дополнительные реактивные (подпирающие) силы, действующие со стороны неприводных валков. Реактивные силы со стороны неприводных валков, действующие на подошву и головку, меняют условия

уширения рассматриваемых элементов (приращение фланцев) в сторону увеличения, что, в свою очередь, снижает коэффициенты вытяжки подошвы и головки в универсальном калибре [19].

Дополнительное приращение фланцев за счет уширения необходимо учесть и компенсировать увеличением деформации во вспомогательной клетке дуо.

В литературе известна формула А.И. Целикова, А.И. Гришкова для определения уширения (Δb) с учетом внешнего силового воздействия в виде натяжения или подпора [20]:

$$\Delta b = 0,54 C_B C_\sigma \left(l_d - \frac{\Delta h}{2\mu_y} \right) \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right), \quad (17)$$

где C_B – коэффициент, учитывающий влияние ширины; C_σ – коэффициент, учитывающий влияние натяжения или подпора.

С учетом полученных зависимостей (9) и (16), коэффициент C_σ можно определить по формуле:

$$C_\sigma = 1 + \frac{2(Q_n + Q_a)}{F_1 \sigma_s}, \quad (18)$$

где F_1 – площадь поперечного сечения на выходе из очага деформации.

Используя полученные зависимости, можно определить приращение ширины элементов рельсового профиля и коэффициенты вытяжки. Полученная информация необходима для корректировки профиля в универсальных клетях непрерывной тандем-группы современного рельсобалочного стана.

Выводы

Определены условия осуществимости процесса прокатки в универсальных калибрах с парой неприводных валков. Получены зависимости, позволяющие оценить силовой баланс в универсальных калибрах современных рельсобалочных станов, учитывающие подпирающие силы со стороны вертикальных неприводных валков и валковой арматуры. Уточнена известная формула А.И. Целикова, А.И. Гришкова для определения уширения элементов рельсовых профилей за счет учета силового баланса универсальных калибров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Fastikovskiy A.R., Dorofeev V.V., Efimov O.Yu. Evaluation of technological risks in the work of rolling equipment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 411. Article 012080. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012080>
2. Fastikovskiy A.R., Peretyatko V.N., Evstifeev V.V., Efimov O.Yu. Performance analysis of the rolling equipment using computer modeling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 411. Article 012080. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012080>
3. Fastikovskiy A.R., Peretyatko V.N., Evstifeev V.V., Efimov O.Yu. Performance analysis of the rolling equipment using computer modeling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 411. Article 012080. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012080>

- neering. 2018. Vol. 411. Article 012081.
<http://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012081>
3. Lassent A. Le train a'poutrelles et a'rails de l'usine d'hagauge (SASILOR) // *Revue de Metallurgie*. 1974. Vol. 11. No. 10. P. 733–748. (In Fr.).
4. Mennel G. Schienenwalzung in Universal Gerust der Modernisierung der Strass Hagange // *Der Kalibreur*. 1981. No. 35. P. 15, 16. (In Germ.).
5. Svejkovsky U. Newest technologies for economical sections production // *AISE Steel Technology*. 2002. Vol. 79. No. 2. P. 33–39.
6. Frank E. Fonner. Steel dynamics commissions its new structural and rail division // *AISE Steel Technology*. 2002. Vol. 79. No. 11-12. P. 27–35.
7. Nigris G., Schroder J. Profile sizing process for high-quality medium / heavy sections and rails // *MPT International*. 2002. Vol. 25. No. 3. P. 48–54.
8. Шилов В.А., Шварц Д.Л., Скосарь Е.О. Особенности прокатки длинномерных рельсов на универсальном рельсобалочном стане // *Металлург*. 2016. № 3. С. 44–48.
9. Svejkovsky U., Perala R.E. State of the art of rail rolling // *Iron and Steel Technology*. 2005. Vol. 2. No. 10. P. 19–24.
10. Universal rail and section rolling mill for Wisco // *NEWSletter SMS Metallurgy*. 2006. No. 2. P. 78.
11. Головатенко А.В., Волков К.В., Дорофеев В.В., Степанов С.В., Добрянский А.В. Развитие технологии прокатки и процессов калибровки железнодорожных рельсов // *Производство проката*. 2014. № 2. С. 25–39.
12. Смирнов В.К., Бондин А.Р., Михайленко А.М. Исследование прокатки рельсов в универсальных клетях // *Производство проката*. 2003. № 12. С. 24–30.
13. Фастыковский А.Р., Перетятко В.Н. Неприводные универсальные калибры – новое направление в производстве рельсов // *Металлург*. 2002. № 5. С. 48–50.
14. Фастыковский А.Р., Перетятко В.Н. Изучение резервных сил трения при прокатке в вытяжных калибрах // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2002. Т. 45. № 4. С. 22–24.
15. Выдрин В.Н., Федосиенко А.С., Крайнов В.И. Процесс непрерывной прокатки. М.: Металлургия, 1970. 456 с.
16. Федин В.П., Грицук Н.Ф. Валковая арматура сортовых станов. М.: Металлургия, 1975. 216 с.
17. Работнов Ю.М. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 742 с.
18. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. М.: Высш. шк., 2003. 560 с.
19. Суворов И.К. Уширение при прокатке в неприводных валках // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1961. Т. 4. № 1. С. 118–120.
20. Никитин Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки. М.: изд. МГТУ им. Баумана, 2009. 399 с.
- ing. 2018, vol. 411, article 012081.
<http://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012081>
3. Lassent A. Le train a'poutrelles et a'rails de l'usine d'hagauge (SASILOR). *Revue de Metallurgie*. 1974, vol. 11, no. 10, pp. 733–748. (In Fr.).
4. Mennel G. Schienenwalzung in Universal Gerust der Modernisierung der Strass Hagange. *Der Kalibreur*. 1981, no. 35, pp. 15, 16. (In Germ.).
5. Svejkovsky U. Newest technologies for economical sections production. *AISE Steel Technology*. 2002, vol. 79, no. 2, pp. 33–39.
6. Frank E. Fonner. Steel dynamics commissions its new structural and rail division. *AISE Steel Technology*. 2002, vol. 79, no. 11-12, pp. 27–35.
7. Nigris G., Schroder J. Profile sizing process for high-quality medium / heavy sections and rails. *MPT International*. 2002, vol. 25, no. 3, pp. 48–54.
8. Shilov V.A., Shvarts D.L., Skosar' E.O. Aspects of the rolling of long rails on a universal rail-beam mill. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 3-4, pp. 260–266. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0284-9>
9. Svejkovsky U., Perala R.E. State of the art of rail rolling. *Iron and Steel Technology*. 2005, vol. 2, no. 10, pp. 19–24.
10. Universal rail and section rolling mill for Wisco. *NEWSletter SMS Metallurgy*. 2006, no. 2, pp. 78.
11. Golovatenko A.V., Volkov K.V., Dorofeev V.V., Stepanov S.V., Dobryanskii A.V. Development of rolling technology and calibration processes of railway rails. *Proizvodstvo prokata*. 2014, no. 2, pp. 25–39. (In Russ.).
12. Smirnov V.K., Bondin A.R., Mikhailenko A.M. Investigation of rolling rails in universal stands. *Proizvodstvo prokata*. 2003, no. 12, pp. 24–30. (In Russ.).
13. Fastyskovskii A.R., Peretyat'ko V.N. Use of non-driven universal passes is new trend in rail production. *Metallurg*. 2002, no. 5, pp. 48–50. (In Russ.).
14. Fastyskovskii A.R., Peretyat'ko V.N. Studying the reserve forces of friction during rolling in break-down passes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2002, vol. 45, no. 4, pp. 22–24. (In Russ.).
15. Vydrin V.N., Fedosienko A.S., Krainov V.I. *Process of Continuous Rolling*. Moscow: Metallurgiya, 1970, 456 p. (In Russ.).
16. Fedin V.P., Gritsuk N.F. *Roll Reinforcement of Long Mills*. Moscow: Metallurgiya, 1975, 216 p. (In Russ.).
17. Rabotnov Yu.M. *Mechanics of a Deformable Solid*. Moscow: Nauka, 1988, 742 p. (In Russ.).
18. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. *Resistance of Materials*. Moscow: Vyssh. shk., 2003, 560 p. (In Russ.).
19. Suvorov I.K. Broadening when rolling in non-drive rolls. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1961, vol. 4, no. 1, pp. 118–120. (In Russ.).
20. Nikitin G.S. *Theory of Continuous Longitudinal Rolling*. Moscow: Izd. MSTU im. Bauman, 2009, 399 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Ростиславович Фастыковский, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: omd@sibsiu.ru

Андрей Владимирович Добрянский, старший калибровщик рельсобалочного цеха, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
E-mail: Andrey.Dobryanskij@evraz.com

Владимир Викторович Дорофеев, д.т.н., главный калибровщик рельсобалочного цеха, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
E-mail: Vladimir.Dorofeev@evraz.com

Andrei R. Fastyskovskii, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head the Chair "Metal Forming and Metal Science. OJSC "EVRAZ ZSMK", Siberian State Industrial University
E-mail: omd@sibsiu.ru

Andrei V. Dobryanskii, Senior Calibrator of Rail-Beam Shop, JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant"
E-mail: Andrey.Dobryanskij@evraz.com

Vladimir V. Dorofeev, Dr. Sci. (Eng.), Chief Calibrator of Rail-Beam Shop, JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant"
E-mail: Vladimir.Dorofeev@evraz.com

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А. Р. Фастыковский – постановка и решение задачи по определению продольной силы, необходимой для деформирования в неприводных валках, установление зависимости для определения резерва сил трения в приводных валках.

А. В. Добрянский – аналитический обзор по теме статьи, определение условий осуществимости процесса деформирования в универсальном калибре, установление зависимости для определения продольной силы, необходимой для работы валковой арматуры, обслуживающей универсальный калибр.

В. В. Дорофеев – постановка и решение задачи по учету влияния реактивных сил трения, действующих со стороны неприводных валков, на уширение в универсальном калибре.

A. R. Fastykovskii – formulation and solution of the problem of determining the longitudinal force necessary for deformation in non-drive rolls, establishing a dependence for determining the reserve of friction forces in drive rolls.

A. V. Dobryanskii – analytical review on the topic of the article, determination of the conditions of the deformation process in a universal caliber, establishment of the dependence for determining the longitudinal force necessary for the operation of the roll reinforcement serving the universal caliber.

V. V. Dorofeev – formulation and solution of the problem of accounting for the effect of reactive friction forces acting from the non-drive rolls on broadening in a universal caliber.

Поступила в редакцию 17.12.2021
После доработки 01.06.2022
Принята к публикации 09.06.2022

Received 17.12.2021
Revised 01.06.2022
Accepted 09.06.2022
