

УДК 621.771.251

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОКАТКОЙ ПРОФИЛЕЙ ПРОСТОЙ ФОРМЫ

Фастыковский А.Р.¹, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением
и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» (omd@sibsiu.ru)

Базайкин В.И.¹, д.т.н., профессор кафедры «Прикладная математика
и информатика» (bazaykin@ayndex.ru)

Беляев С.В.², д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Литейное
производство» (sbeliaev@sfu-kras.ru)

Живаго Э.Я.¹, д.т.н., профессор кафедры «Механика и машиностроение» (zhivago-ed@yandex.ru)

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

² Сибирский федеральный университет
(660025, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79)

Аннотация. К перспективному направлению получения простых профилей можно отнести бескалибровую прокатку. Благодаря использованию формоизменения в гладких валках, это направление существенно снижает расходы на производство готовой продукции и упрощает процесс прокатки. Однако, несмотря на все очевидные плюсы деформирования в гладких валках, имеются и недостатки, затрудняющие промышленную реализацию. К ним относятся необходимость кантовки после каждого пропуска и небольшой коэффициент вытяжки в гладких валках, вызывающий увеличение количества пропусков. Для решения проблем при промышленном внедрении бескалибровой прокатки на действующем производстве предлагается использовать неприводные вертикальные клетки в непрерывных группах. Деформирование в неприводных вертикальных клетях обеспечивается более полным использованием резерва контактных сил трения приводных клеток, установленных перед ними. Определены условия, при которых возможно использование неприводных вертикальных клеток. После решения уравнения равновесия сил на контактной поверхности в очаге деформации приводной клетки получена зависимость, по которой можно найти продольную силу. Решив уравнение баланса мощностей при формоизменении в неприводных валках, получена зависимость для определения продольной силы. Предложена зависимость, по которой можно определить максимально допустимое расстояние между приводной и неприводной клетями, обеспечивающее продольную устойчивость полосы. Применив зависимости для определения условий деформирования в приводных горизонтальных и неприводных вертикальных клетях с гладкими валками, были рассчитаны режимы обжатия при прокатке арматуры № 12 в условиях непрерывного мелкосортного стана 250 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с использованием в черновых клетях бескалибровой прокатки. Использование неприводных вертикальных клеток позволит освоить прокатку более крупной литой заготовки квадрат 125×125 мм. Оценена экономическая составляющая перехода на более крупную литую заготовку с освоением бескалибровой прокатки. Показаны преимущества предлагаемых решений в сравнении с классическим способом прокатки арматуры № 12.

Ключевые слова: профили простой формы, бескалибровая прокатка, экономические показатели.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-12-918-924

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в ряде зарубежных стран успешно освоена технология получения простых профилей с преимущественным использованием гладких валков [1 – 3]. Суть процесса заключается в обжатии прямоугольника либо в чередующихся вертикальных и горизонтальных гладких валках, либо в гладких горизонтальных валках с кантовкой на 90° после каждого пропуска. Формирование готового профиля осуществляется в двух – трех последних калибрах.

К преимуществам технологии прокатки простых профилей в гладких валках относится следующее: увеличение прочности валков за счет отсутствия вреза калибров; универсальность способа прокатки; сокращение парка валков; упрощение настройки стана; сни-

жение технологических нагрузок; расширение возможностей сортовых станов; повышение эффективности их работы с малотоннажными партиями.

Однако, несмотря на все очевидные плюсы предварительного формоизменения заготовки в гладких валках, имеются и недостатки, серьезно осложняющие практическую реализацию процесса. К недостаткам относятся необходимость кантовок после каждого прохода, снижение общего коэффициента вытяжки ввиду особенностей прокатки с использованием гладких валков, что в свою очередь вызывает необходимость увеличения количества прокатных клеток [4 – 7].

Перспективным направлением, позволяющим устранить имеющиеся недостатки бескалибровой прокатки, является использование резерва сил трения на установившейся стадии прокатки для дополнительного

формоизменения в неприводных валках [8, 9]. Резерв сил трения на установившейся стадии процесса прокатки в настоящее время активно используется в совмещенных процессах прокатка – прессование, прокатка – разделение [10 – 14]. Применение дополнительных вертикальных неприводных валков, установленных в непосредственной близости от приводных и работающих благодаря использованию резерва сил трения, позволит повысить устойчивость полосы, увеличить суммарный коэффициент вытяжки.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ РЕАЛИЗАЦИИ
ПРЕДЛАГАЕМЫХ РЕШЕНИЙ**

Практическая реализация предложения, связанного с использованием резерва сил трения при освоении бескалибровой прокатки, может быть осуществлена при выполнении следующего условия:

$$Q_1 \geq Q_2, \tag{1}$$

где Q_1 – продольная сила, обеспеченная резервом сил трения при прокатке в приводной клетке, кН; Q_2 – необходимая для деформирования в неприводных валках, Вт; N_3 – мощность подпора (+) или натяжения (–), создаваемая клетью, расположенной за неприводными валками, Вт.

Продольную силу, обеспеченную резервом сил трения, определим, решая уравнение равновесия сил в очаге деформации при условии одностороннего скольжения (одна зона отставания). При неполном использовании резерва сил трения на контактной поверхности очага деформации присутствуют зоны опережения и прилипания [15]. Уравнение равновесия сил в очаге деформации при прокатке прямоугольной полосы в гладких валках при полном использовании возможностей контактных сил трения с учетом внешнего влияния будет иметь вид:

$$2Rb_{cp} \int_0^\alpha \tau_{cp} \cos \theta d\theta - 2Rb_{cp} \int_0^\alpha p_{cp} \sin \theta d\theta - Q_1 \pm Q_0 = 0, \tag{2}$$

где R – радиус валков, мм; b_{cp} – средняя ширина полосы, мм; α – угол захвата, рад; τ_{cp} – контактные силы трения, МПа; θ – текущий угол, рад; p_{cp} – средние нормальные напряжения, МПа; Q_0 – заднее натяжение (–), подпор (+), кН.

После интегрирования и преобразований получим

$$Q_1 = p_{cp} R \alpha b_{cp} (2\mu_y - \alpha) \pm Q_0, \tag{3}$$

где μ_y – коэффициент трения на установившейся стадии процесса прокатки.

Как следует из зависимости (3), на величину продольной силы наибольшее влияние оказывают угол захвата и коэффициент трения. Чем больше продольная сила, тем большую деформацию можно обеспечить в неприводных валках. Для проверки достоверности

полученной зависимости были проведены лабораторные эксперименты по определению продольной силы при прокатке прямоугольных свинцовых образцов на гладких валках. При изучении влияния угла захвата и коэффициента трения моделировали условия сортовой прокатки. Полученные результаты приведены на рисунке. Расчетные величины продольной силы близки к экспериментальным значениям в рассматриваемых условиях, что дает основание рекомендовать зависимость (3) для определения продольной силы при прокатке прямоугольных заготовок в гладких валках.

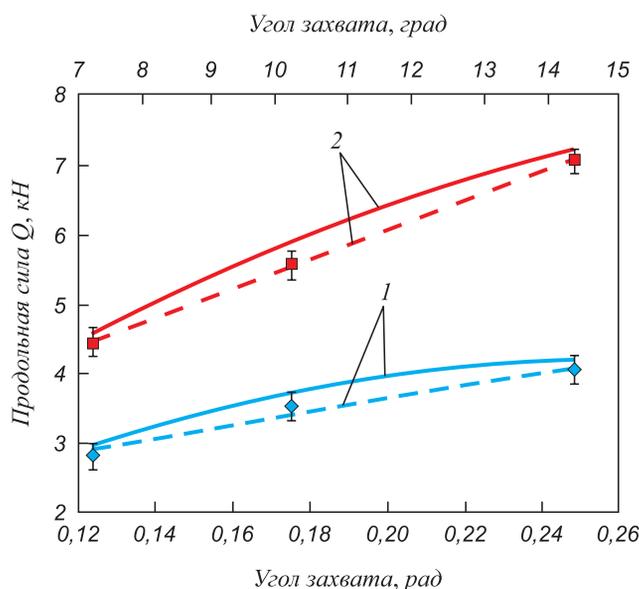
Для проверки выполнения неравенства (1) требуется знать продольную силу Q_2 , необходимую при деформировании в неприводных валках. Величину Q_2 можно определить по уравнению энергетического баланса:

$$N_\phi + N_{тр} + N_x - N_2 \pm N_3 = 0, \tag{4}$$

где N_ϕ – мощность, затрачиваемая на формоизменение, Вт; $N_{тр}$ – мощность сил трения на контактной поверхности неприводных валков, Вт; N_x – мощность сил сопротивления вращению, Вт; N_2 – мощность, необходимая для деформирования в неприводных валках, Вт; N_3 – мощность подпора (+) или натяжения (–), создаваемая клетью, расположенной за неприводными валками, Вт.

Мощность, необходимую для формоизменения, определим по следующей формуле [16]:

$$N_d = p_{cp} v h_{cp} b_{cp} \ln \frac{h_0}{h_1}, \tag{5}$$



Экспериментальные (---) и теоретические (—) зависимости продольной силы Q_1 от угла захвата при $\mu = 0,26$ (1), $\mu = 0,33$ (2)

Experimental (---) and theoretical (—) dependences of the longitudinal force Q_1 on capture angle: 1 – $\mu = 0.26$; 2 – $\mu = 0.33$

где v – скорость прокатки, м/с; h_{cp} – средняя высота полосы в очаге деформации, мм; h_0 и h_1 – начальная и конечная толщина полосы, мм.

Мощность сил трения в очаге деформации с учетом зон отставания и опережения можно определить по формуле [17, 18]:

$$N_{тр} = \int_{F_1} \tau_1 \Delta v_1 dF + \int_{F_2} \tau_2 \Delta v_2 dF, \quad (6)$$

где τ_1 и τ_2 – контактные силы трения в зонах отставания и опережения, МПа; Δv_1 и Δv_2 – продольные составляющие скоростей скольжения в зонах отставания и опережения, мм/с; F_1 и F_2 – контактные площади в зонах отставания и опережения, мм².

Мощность, расходуемую на вращения неприводных валков, можно определить по уравнению:

$$N_x = - \int_{F_1} \tau_1 v_b dF + \int_{F_2} \tau_2 v_b dF, \quad (7)$$

где v_b – скорость точки на валке, мм/с.

Найти усилие, необходимое для формоизменения в неприводных валках, можно путем преобразования зависимостей (4 – 7):

$$Q_2 = \sigma_s b_1 h_1 \ln \lambda_2 + \mu_y b_1 l_{d_2} \times \left[\frac{1}{\lambda_2^{0,25} \cos(0,25\alpha_2)} - \frac{1}{\lambda_2^{0,75} \cos(0,75\alpha_2)} \right], \quad (8)$$

где σ_s – сопротивление деформации, МПа; b_1 – ширина заготовки после прокатки в приводных валках, мм; λ_2 – коэффициент вытяжки в непрерывных валках; l_{d_2} – длина дуги захвата в неприводных валках, мм; α_2 – угол захвата в неприводных валках, рад.

Особенностью использования клетей с неприводными валками является необходимость учета продольной устойчивости полосы в промежутке между приводной и неприводной клетями. Устойчивость полосы зависит от продольной силы, обеспечивающей деформирование в неприводных валках, и расстояния между клетями. Оценить максимально допустимое расстояние (l_{max}), обеспечивающее устойчивость в промежутке между приводной и неприводной клетями, можно при использовании формулы Эйлера для определения устойчивости колонн [19], преобразовав ее к виду:

$$l_{max} = \frac{\pi \sqrt{E i_{min}^2}}{\sqrt{\sigma_2 k}}, \quad (9)$$

где E – модуль упругости первого рода, МПа; i_{min} – минимальный радиус инерции сечения заготовки, мм; σ_2 – напряжение подпора для деформирования в неприводной клетке, МПа; k – коэффициент приведения длины.

При использовании уравнения (9) необходимо правильно выбрать коэффициент приведения длины, который изменяется (0,5 – 2,0) в зависимости от характера закрепления стержня. Из приведенных в работе [19] схем закрепления для случая деформирования в неприводном многовалковом калибре подходит схема с коэффициентом приведения длины 0,5, такие же рекомендации по коэффициенту приведенной длины представлены в работе [20]. Как показали эксперименты, при использовании неприводных гладких валков подходит схема закрепления с коэффициентом приведенной длины 0,7.

Пользуясь принципами, рассмотренными выше, была проверена возможность реализации технологии бескалибровой прокатки в черновой группе клетей применительно к условиям непрерывного мелкосортного стана 250 сортопрокатного цеха АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ ЗСМК). Рассмотрен вариант перехода стана 250 сортопрокатного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с катаной заготовки 100×100 мм на литую 125×125 мм при прокатке арматуры № 12 с использованием в черновой группе бескалибровой прокатки в приводных горизонтальных и неприводных вертикальных клетях. Результаты расчетов приведены в табл. 1, где для сравнения показана классическая калибровка арматурного профиля № 12 из заготовки (квадрат 100×100 мм). Использование в черновой непрерывной группе неприводных вертикальных клетей позволит решить два важных вопроса: использовать бескалибровую прокатку и перейти на более крупную литую заготовку с исключением двух приводных клетей в промежуточной группе. Еще одно достоинство предлагаемого варианта получения арматуры № 12 заключается в уменьшении числа механических кантовок скручиванием с шести до трех, что упрощает конструкцию выводной валковой арматуры.

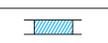
ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕДЛАГАЕМЫХ РЕШЕНИЙ

Для большей объективности оценки достоинств предлагаемых решений рассмотрим экономическую составляющую на примере освоения более крупной литой заготовки квадрата 125×125 мм. Переход на крупную литую заготовку (табл. 1) возможен либо при использовании предлагаемого решения, либо при установке двух дополнительных приводных клетей.

Для определения стоимости закупки и монтажа нового оборудования воспользовались методикой расчетов, основанной на использовании веса устанавливаемого оборудования и стоимости отечественного стандартного оборудования. Вес устанавливаемого оборудования принимали равным весу аналогичного на рассматриваемом непрерывном мелкосортном стане. Стоимость монтажа нового оборудования, затраты на

Варианты калибровок для получения арматуры № 12 в условиях непрерывного мелкосортного стана 250 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Table 1. Pass options for receiving rebar No. 12 in the conditions of 250 continuous small-grade mill of JSC “EVRAZ ZSMK”

№ клетки	Действующая калибровка на АО «ЕВРАЗ ЗСМК»			Калибровка с использованием в черновых клетях гладких валков в приводных горизонтальных и не приводных вертикальных клетях						
	Заготовка 100×100 мм			Заготовка 125×125 мм						
	Форма калибра	Размер полосы		λ_1	Форма калибра	Размер полосы		Условие устойчивости полосы	λ_1	Суммарный коэффициент вытяжки
	<i>h</i> , мм	<i>b</i> , мм	<i>h</i> , мм			<i>b</i> , мм				
А		68,0	114,0	1,43		95,0	130,6	1,00	1,26	1,45
						110,0	98,0	1,37	1,15	
1		73,0	82,0	1,29		85,0	112,0	0,89	1,13	–
2		48,0	95,0	1,30		95,0	88,0	1,32	1,14	1,38
						71,0	97,0	0,93	1,21	
3		52,0	63,0	1,46		70,0	77,2	1,37	1,28	1,61
						59,0	73,0	1,10	1,26	
4		33,0	74,0	1,32		50,0	65,0	1,24	1,33	1,88
						42,0	55,0	1,30	1,41	
5		40,0	45,0	1,35		36,0	47,0	1,31	1,36	1,51
						40,0	38,0	1,24	1,11	
6		23,0	58,0	1,37		21,0	50,0	–	1,44	–
7		38,0	29,4	1,32		30,0	25,0	–	1,40	–
8		18,0	46,3	1,20	–	–	–	–	–	–
9		30,0	23,8	1,32	–	–	–	–	–	–
10		14,5	30,7	1,24		14,5	32,0	–	1,25	–
11		23,0	19,6	1,25		23,0	19,7	–	1,25	–
12		11,5	29,6	1,27		11,5	29,6	–	1,27	–
13		19,0	15,1	1,27		19,0	15,1	–	1,27	–
14		11,5	21,5	1,08		11,5	21,5	–	1,08	–
15		14,5	14,5	1,23		14,5	14,5	–	1,23	–
16		10,0	18,5	1,08		10,0	18,5	–	1,08	–

Пр и м е ч а н и е. Для клетки № 17 (арматура № 12) значения показателей взяты по ГОСТ Р 52544 – 2006.

его эксплуатацию определяли по общеизвестным нормативам. Рассмотрим два варианта перехода на более крупную литую заготовку. Первый вариант – установка двух дополнительных клетей в черновую группу и прокатка по классической калибровке арматуры № 12.

Второй вариант – использование пяти дополнительных не приводных вертикальных клетей и формоизменение по схеме бескалибровой прокатки в черновой группе при получении арматуры № 12 (табл. 1). Полученные результаты расчетов экономических показателей сведе-

Экономические показатели перевода непрерывного мелкосортного стана 250 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» на литую заготовку 125×125 мм

Table 2. Economic indicators of transfer of 250 continuous light section mill of JSC “EVRAZ ZSMK” to casting of 125×125 mm billet

Затраты	Приводные клетки	Неприводные клетки	Абсолютное отклонение
Затраты на закупку и монтаж оборудования			
Стоимость оборудования, тыс. руб.	18 345	9305	9040
Монтаж оборудования, тыс. руб.	1306	1325	-19
Недополученная прибыль в период монтажа оборудования, тыс. руб.	13 100	10 915	2185
Итого, тыс. руб.	32 751	21 545	11 206
Дополнительные годовые издержки производства продукции			
Амортизация основных средств (ОС), тыс. руб.	1834,5	930,5	904
Ремонт ОС, тыс. руб.	1712	1080	632
Содержание ОС, тыс. руб.	1408	880	528
Сменное оборудование, тыс. руб.	336	200	136
Итого, тыс. руб.	5290,5	3090,5	2200

ны в табл. 2. Вариант с использованием непрерывных вертикальных клетей с экономической точки зрения существенно выигрывает как на стадии закупки и монтажа оборудования, так и в процессе последующей эксплуатации.

Выводы

Предложено использовать неприводные вертикальные клетки для реализации бескалибровой прокатки в черновой непрерывной группе клетей мелкосортного стана 250 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» при получении профилей простой формы. Определены условия, при которых возможна прокатка в непрерывных группах с использованием неприводных клетей. На примере действующего непрерывного мелкосортного стана 250 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» доказаны возможности и экономические преимущества применения бескалибровой прокатки с использованием неприводных вертикальных клетей при переходе на более крупную литую заготовку квадрат 125×125 мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Janazawa T., Tanaka T., Noda A. Development of grovelless rolling // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. 1983. Vol. 23. No. 8. P. 710 – 715.
- Janazawa T., Tanaka T., Hirai N., Aoyama K. Development of grovelless rolling // Iron and Steel Engineer. 1984. Vol. 61. No. 8. P. 25 – 30.
- Colin R., Leger Alfred R., Parisean David L., Simons Keith. Morgan’s compact mill design parameters, applications and operational benefits // Iron and Steel Engineering. 1982. Vol. 59. No. 11. P. 25 – 30.
- Бескалибровая прокатка сортовых профилей / Л.Е. Кандауров, Б.А. Никифоров, А.А. Морозов и др. – Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 1998. – 128 с.
- Платов С.И., Макачук А.А., Анцупов В.П. Бескалибровая прокатка: технология и оборудование. – Магнитогорск: изд. Магнитогорского гос. техн. ун-та, 2005. – 115 с.
- Кандауров Л.Е., Никифоров Б.А., Белан А.К. Рациональные режимы бескалибровой прокатки // Изв. вуз. Черная металлургия. 1996. № 11. С. 35 – 37.
- Кандауров Л.Е., Никифоров Б.А., Белан А.К. и др. Технические и экономические аспекты применения бескалибровой прокатки на стане 150 БМК // Производство проката. 1998. № 8. С. 43 – 45.
- Фастыковский А.Р., Фастыковский Д.А. Оценка возможностей контактных сил трения с целью интенсификации процесса прокатки на установившейся стадии // Производство проката. 2013. № 7. С. 9 – 12.
- Фастыковский А.Р., Уманский А.А. Теория и практика ресурсосберегающих технологий производства сортового проката на действующих непрерывных станах // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 5. С. 322 – 327.
- Matsuo G., Suzuki M. The latest technology of multi – slit rolling // SEA. ISI Quaterly. 1995. No. 3. P. 49 – 58.
- Sidelnikov S.B., Galiev R.I., Bepalov V.M., Samchuk A.P. Determining power-energy parameters of combined rolling-extrusion process for low-plastic aluminium alloys // Non-ferrous Metals. 2018. No. 1. P. 30 – 36.
- Sidelnikov S., Galiev R., Lopatina E., Samchuk A. Analysis of energy-force parameters of combined processing receiving modifying bars from Al-5Ti-1B alloy // Non-Ferrous Metals. 2017. Vol. 42. No. 1. P. 30 – 35.
- Fastykovskii A.R. Region for extrolling and effective deformation modes // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2011. Vol. 52. No. 3. P. 230 – 233.
- Grzyb R., Misiolek Z. The concept and the theoretical fundaments of a new combined process of rolling and extrusion // Archiwum Hutnitwa. 1983. Vol. 28. No. 3. P. 305 – 319.

15. Grzyb R., Misiolok Z. The experimental investigations on the force parameters and metal flow in the combined process of rolling and extrusion // *Archiwum Hutnitwa*. 1983. Vol. 28. No. 3. P. 321 – 340.
16. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. – М.: Metallurgiya, 1970. – 358 с.
17. Выдрин В.Н., Федосиенко А.С., Крайнов В.И. Процесс непрерывной прокатки. – М.: Metallurgiya, 1970. – 456 с.
18. Выдрин В.Н. Динамика прокатных станков. – Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – 255 с.
19. Ицкович Г.М. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1986. – 352 с.
20. Фастыковский А.Р. Продольная устойчивость полосы при работе системы прокатная клеть – неприводной инструмент // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2013. № 4. С. 21 – 24.

Поступила в редакцию 29 марта 2019 г.
После доработки 19 июля 2019 г.
Принята к публикации 5 сентября 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 12, pp. 918–924.

INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR PRODUCTION OF ROLLED PROFILES WITH SIMPLE FORM

A.R. Fastyskovskii¹, V.I. Bazaikin¹, S.V. Belyaev²,
E.Ya. Zhivago¹

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. A promising direction for production of simple profiles by rolling includes grooveless rolling. Due to the use of forming in smooth rolls, this direction significantly reduces the production cost of finished products and simplifies the rolling process. However, despite all the obvious advantages of deformation in smooth rolls, there are disadvantages that complicate industrial implementation including the need for edging after each pass and a small coefficient of extraction in smooth rolls. It causes an increase in the number of passes. For the solution of problems encountered in current industrial implementation of grooveless rolling, it is proposed to use deprived-wide vertical stands in continuous groups. Deformation in non-water vertical stands is provided by more complete use of the reserve of contact friction forces of the drive stands installed in front of them. The conditions under which the use of non-water vertical stands is possible are determined. After solving the equation of forces equilibrium on the contact surface in the deformation center of the drive stand, dependence is obtained by which it is possible to find the value of longitudinal force provided by reserve of friction forces. By solving the equation of power balance in form of non-drive rolls, the dependence is obtained determining the longitudinal force required for deformation. The authors offer the dependence by which it is possible to determine the maximum allowed distance between the drive and non-drive stands, providing longitudinal stability of the strip. Using dependencies to determine conditions of deformation in horizontal drive and non-driven vertical mills with smooth rolls, reduction modes during rolling of rebar No. 12 in conditions of JSC “EVRAZ ZSMK” 250 continuous light section mill using roughing stands for grooveless rolling were calculated. As a result it was found that the use of non-water vertical stands allows rolling of larger cast billet of 125x125 mm square on the mill. Economic component of transition to the larger cast billet with development of grooveless rolling was estimated. Advantages of the proposed solutions are shown in comparison with classical method of rebar No. 12 rolling on 250 continuous small-grade mill of JSC “EVRAZ ZSMK”.

Keywords: simple form profiles, grooveless rolling, economic parameters.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-12-918-924

REFERENCES

1. Janazawa T., Tanaka T., Noda A. Development of grooveless rolling. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1983, vol. 23, no. 8, pp. 710–715.
2. Janazawa T., Tanaka T., Hirai N., Aoyama K. Development of grooveless rolling. *Iron and Steel Engineer*. 1984, vol. 61, no. 8, pp. 25–30.
3. Colin R., Leger Alfred R., Parisean David L., Simons Keith. Morgan’s compact mill design parameters, applications and operational benefits. *Iron and Steel Engineering*. 1982, vol. 59, no. 11, pp. 25–30.
4. Kandaurov L.E., Nikiforov B.A., Morozov A.A. etc. *Beskalibrovaya prokatka sortovykh profilei* [Grooveless rolling of section profiles]. Magnitogorsk: Magnitogorskii dom pechati, 1998, 128 p. (In Russ.).
5. Platov S.I., Makarchuk A.A., Antsupov V.P. *Beskalibrovaya prokatka: tekhnologiya i oborudovanie* [Grooveless rolling: technology and equipment]. Magnitogorsk: MGTU, 2005, 115 p. (In Russ.).
6. Kandaurov L.E., Nikiforov B.A., Belan A.K. Rational modes of grooveless rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1996, no. 11, pp. 35–37. (In Russ.).
7. Kandaurov L.E., Nikiforov B.A., Belan A.K. etc. Technical and economic aspects of the use of grooveless rolling at 150 BMK mill. *Proizvodstvo prokata*. 1998, no. 8, pp. 43–45. (In Russ.).
8. Fastyskovskii A.R., Fastyskovskii D.A. Assessment of possibilities of contact friction forces in order to intensify rolling process at a steady stage. *Proizvodstvo prokata*. 2013, no. 7, pp. 9–12. (In Russ.).
9. Fastyskovskii A.R., Umanskii A.A. Theory and practice of resource-saving technologies of mill bar production at the operating continuous rolling mills. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 5, pp. 322–327. (In Russ.).
10. Matsuo G., Suzuki M. The latest technology of multi – slit rolling. *SEA. ISI Quaterly*. 1995, no. 3, pp. 49–58.
11. Sidelnikov S.B., Galiev R.I., Bespalov V.M., Samchuk A.P. Determining power-energy parameters of combined rolling-extrusion process for low-plastic aluminium alloys. *Non-Ferrous Metals*. 2018, no. 1, pp. 30–36.
12. Sidelnikov S., Galiev R., Lopatina E., Samchuk A. Analysis of energy-force parameters of combined processing for receiving modifying bars from Al-5Ti-1B alloy. *Non-Ferrous Metals*. 2017, vol. 42, no. 1, pp. 30–35.
13. Fastyskovskii A.R. Region for extrolling and effective deformation modes. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2011, vol. 52, no. 3, pp. 230–233.
14. Grzyb R., Misiolok Z. The concept and the theoretical fundamentals of a new combined process of rolling and extrusion. *Archiwum Hutnitwa*. 1983, vol. 28, no. 3, pp. 305–319.
15. Grzyb R., Misiolok Z. The experimental investigations on the force parameters and metal flow in the combined process of rolling and extrusion. *Archiwum Hutnitwa*. 1983, vol. 28, no. 3, pp. 321–340.
16. Tselikov A.I., Grishkov A.I. *Teoriya prokatki* [Theory of rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1970, 358 p. (In Russ.).
17. Vydrin V.N., Fedosienko A.S., Krainov V.I. *Protsess nepreryvnoi prokatki* [Continuous rolling process]. Moscow: Metallurgiya, 1970, 456 p. (In Russ.).
18. Vydrin V.N. *Dinamika prokatnykh stanov* [Dynamics of rolling mills]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1960, 255 p. (In Russ.).

19. Itskovich G.M. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Vysshaya shkola, 1986, 352 p. (In Russ.).
20. Fastykovskii A.R. Longitudinal stability of the band at the system of rolling stand – non-drive tool. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 4, pp. 21–24. (In Russ.).

Information about the authors:

A.R. Fastykovskii, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Metal Forming and Metal Science. JSC “EVRAZ ZSMK” (omd@sibsiu.ru)

V.I. Bazaikin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Applied Mathematics and Informatics (bazaykin@yandex.ru)

S.V. Belyaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Foundry” (sbeliaev@sfu-kras.ru)

E.Ya. Zhivago, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Mechanics and Machine Engineering (zhivago-ed@yandex.ru)

Received March 29, 2019

Revised July 19, 2019

Accepted September 5, 2019
