



УДК 621.771.06

DOI 10.17073/0368-0797-2025-1-14-20



Оригинальная статья

Original article

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДУЛЯ ЖЕСТКОСТИ КЛЕТЕЙ ЧИСТОВОЙ ГРУППЫ НЕПРЕРЫВНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

И. Д. Поспелов

Череповецкий государственный университет (Россия, 162600, Вологодская обл., Череповец, пр. Луначарского, 5)

idpospelov@chsu.ru

Аннотация. Модуль жесткости является важным техническим параметром каждой клетки «кварто» непрерывного широкополосного стана горячей прокатки и характеризует величину усилия прокатки, вызывающую упругую деформацию всех конструктивных элементов рабочей клетки в сборе. От достоверности определения такого параметра на этапе проектирования эффективных технологических режимов прокатки напрямую зависит точность отклонений продольного и поперечного профиля горячекатаных полос и качество листового проката. При обзоре классических методов расчета упругих деформаций рабочих четырехвалковых клеток, основанных на законах теории упругости, и современных публикаций сделан вывод, что необходимо учитывать динамическую составляющую при определении модуля жесткости рабочих клеток станов горячей и холодной прокатки. Отсутствие учета вышеуказанной составляющей влечет за собой существенные ошибки в выставлении межвалковых зазоров на этапе настройки стана под прокатку полос требуемой конечной толщины. В данной работе выполнено исследование модуля жесткости клеток чистовой группы действующего непрерывного широкополосного стана с учетом их конструктивных особенностей при производстве горячекатаных полос различного листового сортамента низкоуглеродистых сталей, преимущественно предназначенных для дальнейшей холодной прокатки. При анализе экспериментальных данных получены достоверные уравнения регрессии, позволяющие учитывать влияние ширины прокатываемой полосы на модуль жесткости клеток. Исследование представлено в графической и табличной форме, демонстрирующей изменение значений модуля жесткости для различных клеток стана. Результаты исследования позволяют проектировать и вносить изменения в существующие технологические режимы горячей прокатки с целью обеспечения требуемой точности продольного и поперечного профиля горячекатаных полос.

Ключевые слова: модуль жесткости четырехвалковой клетки, непрерывный широкополосный стан горячей прокатки, усилие прокатки, межвалковый зазор, ширина полосы, уравнения регрессии, режимы прокатки

Для цитирования: Поспелов И.Д. Исследование модуля жесткости клеток чистовой группы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2025;68(1):14–20. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-1-14-20>

STIFFNESS MODULUS OF STANDS IN FINISHING GROUP OF CONTINUOUS WIDE-STRIP HOT ROLLING MILL

I. D. Pospelov

Cherepovets State University (5 Lunacharskogo Ave., Cherepovets, Vologda Region 162600, Russian Federation)

idpospelov@chsu.ru

Abstract. Stiffness modulus is an important technical parameter of each four-high stand of continuous wide-strip hot rolling mill and characterizes the roll force that causes elastic deformation of all structural elements of the working stand in the assembly. Accuracy of deviations of longitudinal and widthwise profile of hot-rolled strips and quality of sheet products directly depends on reliability of determination of such parameter at the design stage of efficient technological rolling schedule. After review of classical methods for calculating elastic deformations of four-high stands based on the laws of the elasticity theory and modern publications, it was concluded that it is necessary to take into account the dynamic component when determining the stiffness modulus of the working stands of hot and cold rolling mills. Lack of record-keeping above the specified component entails significant errors in the alignment of the roll gaps at the stage of mill setting for rolling the strips of the required final thickness. In this work, we studied the stiffness modulus of the finishing stands of the operating continuous wide-strip mill, taking into account their constructional features in the production of hot-rolled strips of various sheet gauge of low-carbon steels, mainly intended for further cold rolling. When analyzing experimental data, reliable regression equations were obtained that allow taking into account the effect of the rolled strip width on the stiffness modulus of stands. The results of investigations are presented in graphical and tabular form, demonstrating the change in the stiffness modulus for different mill stands. The results allow us to design and make changes to the existing hot rolling modes in order to ensure the required accuracy of the longitudinal and widthwise profile of hot-rolled strips.

Keywords: stiffness modulus of four-high stand, continuous wide-strip hot rolling mill, rolling force, rolling gap, strip width, regression equations, rolling schedule

For citation: Pospelov I.D. Stiffness modulus of stands in finishing group of continuous wide-strip hot rolling mill. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(1):14–20. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-1-14-20>

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в мировом производстве уменьшились допуски на отклонения продольного и поперечного профиля горячекатаных полос из низкоуглеродистых сталей, что вызвано общей тенденцией повышения требований к качеству листового проката. Это актуально как для наиболее тонких горячекатаных полос толщиной 0,8 – 1,5 мм, непосредственно используемых в машиностроении и строительстве, так и для полос толщиной 1,8 – 5,5 мм, направляемых в качестве подката на станы холодной прокатки для дальнейшего производства полос с жесткими требованиями отклонений геометрических характеристик продольного и поперечного профиля.

Требования к точности горячекатаного стального листа, поставляемого в пакетах и рулонах, отражены в ГОСТ 19903 – 74, по точности листы подразделяются на две группы: листы повышенной (группа А) и нормальной (группа Б) точности. В зависимости от толщины и ширины они имеют различные допуски по толщине. Например, листы толщиной 1,8 – 2,0 мм при ширине 1500 – 1820 мм: при повышенной точности $\pm 0,17$ мм, при обычной $\pm 0,20$ мм. Однако очень высокие требования к профилю предъявляются к горячекатаным полосам, которые направляют на станы холодной прокатки для дальнейшего производства автомобильного листа – требуемые отклонения толщины по всей площади не должны превышать $\pm(2 - 5)$ % от номинальной толщины подката [1].

Задача уменьшения отклонений нормируемых характеристик продольного профиля горячекатаных полос до значений, определяемых вышеуказанными допусками, способствовала развитию методов теории тонколистовой горячей прокатки [2 – 4]. На их основе были созданы модели управления продольной и поперечной разнотолщиной в функции всех значимых технологических режимов прокатки [5 – 7].

Анализ зарубежных публикаций показывает прямую связь параметров точности продольного и поперечного профиля горячекатаных [8 – 10] и холоднокатаных полос [11; 12] с параметрами жесткости как отдельных, так и в сборе конструктивных элементов клеток «кварто». Аналогичные исследования широко представлены в отечественной классической учебной литературе [13 – 15]. Наибольший интерес для исследования представляет модуль жесткости каждой клетки непрерывной группы стана, так как от точности определения такой характеристики зависит правильность

выставки межвалкового зазора [16; 17], что напрямую влияет на точность начальной настройки всего стана и эффективность управляющих воздействий для корректировки точности толщины полосы во время прокатки [18 – 20].

Целью данной работы является исследование изменения модуля жесткости клеток непрерывной чистовой группы при горячей прокатке полос различного сортамента путем обработки экспериментальных данных на действующем широкополосном стане.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Уравнение, которое выражает прямую линейную взаимосвязь между упругой деформацией клетки «кварто» и действующим на валки усилием прокатки P_i , можно записать в следующем виде:

$$P_i = M_{\text{кл}}(h_i - S_i), \quad (1)$$

где $M_{\text{кл}}$ – модуль жесткости клетки «кварто», МН/мм; h_i – толщина полосы после прокатки в i -ой клетки стана, мм; S_i – предварительно выставленный раствор между валками i -ой рабочей клетки, мм.

От точности определения величины $M_{\text{кл}}$ в уравнении (1), при известной требуемой толщине прокатываемой полосы h_i , зависит, как было отмечено ранее, правильность первоначального выставления межвалкового зазора S_i и точность прокатки.

При деформации (обжатии) металла до требуемой толщины h_i рабочие валки воспринимают усилие P_i , которое можно принимать направленным вертикально. Это усилие воспринимается всеми элементами клетки в сборе: четырехвалковой системой, подпятниками с месдозами и подушками опорных валков, подпятниками нажимных винтов, нажимными винтами, гайками нажимных винтов и станинами закрытого типа (рис. 1). Авторами классических методов расчета упругих деформаций рабочих четырехвалковых клеток [13 – 15] принято, что все детали деформируются согласно законам упругости. На основании этого предположения модуль жесткости каждой рабочей клетки «кварто» непрерывного стана определяют по известным теоретическим формулам упругой деформации всех вышеперечисленных деталей, воспринимающих вертикальное усилие на валки при прокатке. Авторы подчеркивают [13 – 15], что данные формулы применимы к расчету статического модуля жесткости без учета влияния скорости вращения опорных валков

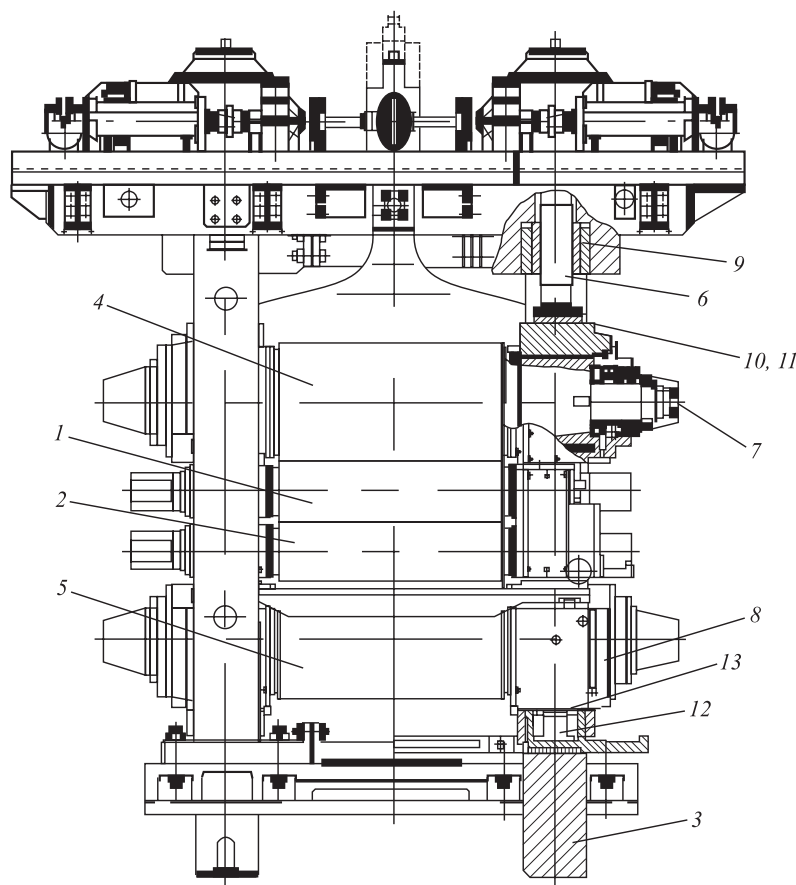


Рис. 1. Конструкция четырехвалковой клетки стана горячей прокатки:

1, 2 – рабочие валки; 3 – станина закрытого типа; 4, 5 – опорные валки; 6 – нажимной винт; 7, 8 – подушки опорных валков; 9 – гайка нажимная; 10 – подпятник нажимного винта; 11 – месдоза нажимного винта; 12 – опора подушки нижнего опорного валка; 13 – месдоза нижней подушки

Fig. 1. Construction of four-high stand of hot rolling mill:

1, 2 – working rolls; 3 – close-top roll housing; 4, 5 – back-up rolls; 6 – mill screw; 7, 8 – back-up chocks; 9 – packing nut; 10 – thrust bearing of mill screw; 11 – pressure capsule of mill screw; 12 – bearing part of lower back-up chocks; 13 – pressure capsule of lower back-up chocks

на деформацию в подшипниках гидродинамического типа, горизонтального смещения вертикальных осевых плоскостей опорных и рабочих валков относительно друг друга [21] и других динамических факторов прокатки [10 – 12] на все элементы каждой клетки в сборе.

В современных условиях оценку модуля жесткости клеток стана рационально проводить на основе кривых нагружения методом предварительного сжатия вращающихся рабочих валков в положение «забоя». Данный способ был применен для оценки модуля жесткости клеток «кварто» чистовой группы широкополосного стана горячей прокатки 2000 ПАО «Северсталь». Усилие сжатия в процессе оценки варьировали в реальном диапазоне рабочих усилий прокатки: от 0 до 30 МН для клеток 6 – 9 и от 0 до 20 МН для клеток 10 – 12 при постоянной скорости вращения рабочих валков каждой клетки, равной средней скорости прокатки полосы в i -ой клетки. Во избежание дополнительных погрешностей, перед началом измерений на валки в процессе нагружения подавали охлаждающую жидкость.

Полученные экспериментальные данные по усилиям сжатия $P_{сж.i}$ и суммарных упругих деформаций в i -ой клетки чистовой группы $S_{кл.i}$ фиксировались АСУ ТП чистовой группы стана 2000. Далее была обработана в графическом виде на рис. 2 информация зависимости суммарного усилия сжатия $P_{сж.i}$ каждой клетки и упругой деформации всех составных элементов клетки $S_{кл.i}$. Материалы и номинальные диаметры рабочих и опорных валков представлены в табл. 1.

Модуль жесткости в i -ой клетки забоя $M_{кл.i}^0$ определяли по линейной части кривых на рис. 2 как отношение усилия сжатия $P_{сж.i}$ к упругой деформации клетки $S_{кл.i}$:

$$M_{кл.i}^0 = \frac{P_{сж.i}}{S_{кл.i}}. \quad (2)$$

В процессе анализа кривых на рис. 2 было установлено, что для всех клеток стана начало линейного участка деформации клетки приходится на область, где усилие сжатия составляет 6,484 – 3,041 МН, причем

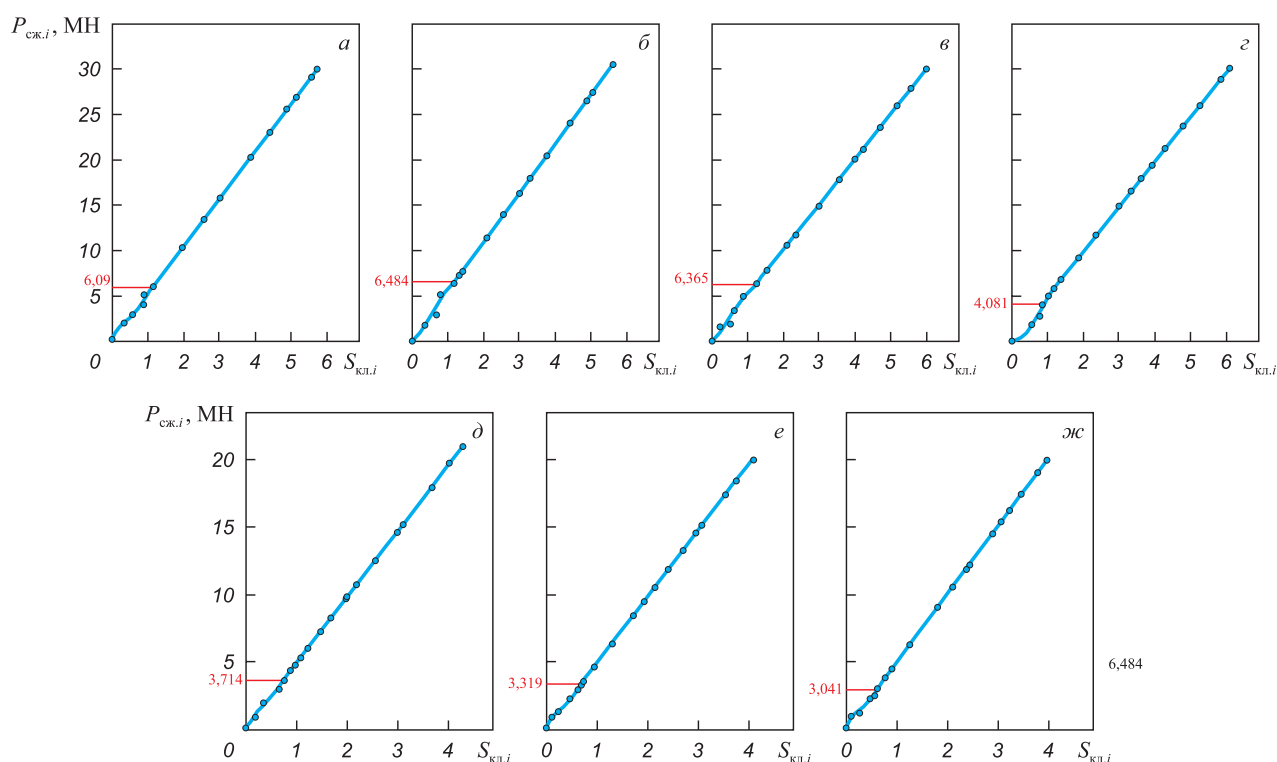


Рис. 2. Графические схемы нагружения клетей стана методом предварительного сжатия вращающихся рабочих валков:
а – клеть 6; б – клеть 7; в – клеть 8; г – клеть 9; д – клеть 10; е – клеть 11; ж – клеть 12

Fig. 2. Graphics of loading pre-stressed stands of rotating work rolls:
а – stand 6; б – stand 7; в – stand 8; г – stand 9; д – stand 10; е – stand 11; ж – stand 12

большие значения усилия приходятся на первые клетки. При дальнейшем увеличении усилия сжатия деформация клетки строго линейна и подчиняется во всем диапазоне рабочих усилий законам упругости.

Определение модуля жесткости клетки «забоя» $M_{кл,i}^0$ по формуле (2) на основе данных рис. 2 и его дальнейшее использование, без значительной погрешности, справедливо при прокатке полос в чистовой группе стана 2000 максимальной ширины $b_i = 1820$ мм.

Исследование зависимости модуля жесткости клетки «кварто» чистовой группы стана 2000 от ширины прокатываемой полосы b_i осуществляли по следующей методике. В процессе установившейся прокатки все клетки находятся в режиме постоянного положения нажимных механизмов, при деформации полосы в i -ой клетке АСУ ТП чистовой группы стана фиксирует среднюю толщину полосы h_i , усилие прокатки P_i и среднюю упругую деформацию клетки $S_{кл,i}$. Усредненное значение

Таблица 1. Упругие свойства материала и номинальные диаметры рабочих и опорных валков клетей чистовой группы стана 2000

Table 1. Elastic material characteristics and nominal diameters of working and back-up rolls in finishing group of mill 2000

Номер клетки	D_p , мм	E_p , МПа	ν_p	Материал рабочих валков	$D_{оп}$, мм	$E_{оп}$, МПа	$\nu_{оп}$
6	930	200 000	0,29	Высокохромистый закаленный чугун	1600	219 000	0,35
7	890	205 000					
8	800	215 000	0,32	Высокохромистый термостойкий чугун			
9, 10	800	175 000	0,28	Индефинитный чугун			
11, 12	825						

Пр и м е ч а н и е: D_p – номинальный диаметр рабочих валков; E_p – модуль упругости материала рабочих валков; ν_p – коэффициент Пуассона материала рабочих валков; $D_{оп}$ – номинальный диаметр опорных валков; $E_{оп}$ – модуль упругости материала опорных валков; $\nu_{оп}$ – коэффициент Пуассона материала опорных валков.

модуля жесткости i -ой клетки $M_{кл.i}^b$ вследствие изменения ширины прокатываемой полосы b_i можно вычислить по уравнению

$$M_{кл.i}^b = \frac{P_i}{S_{кл.i}}. \quad (3)$$

Физический смысл величины $M_{кл.i}^b$ указывает на изменение величины упругой деформации клетки вследствие прогиба валковой системы под прокатываемой полосой шириной b_i . Разницу между значением модуля жесткости клетки без полосы $M_{кл.i}^0$ и рассчитанному по приведенному выше уравнению (3) обозначим $\Delta M_{кл.i}^b$. По окончании исследований были созданы базы данных, в которых фиксировались следующие значения параметров прокатки в i -ой клетке:

- средняя ширина b_i и средняя толщина h_i прокатываемой полосы;
- значение изменения упругой деформации клетки $S_{кл.i}$;
- расчетное значение поправки $\Delta M_{кл.i}^b$.

Таким образом, модуль жесткости клетки под полосой шириной b_i менее 1820 мм с учетом поправки $\Delta M_{кл.i}^b$ может быть определен по следующей формуле

$$M_{кл.i} = M_{кл.i}^0 - \Delta M_{кл.i}^b, \quad (4)$$

где $M_{кл.i}^0$ – величина модуля жесткости клетки «забоя», МН/мм; $\Delta M_{кл.i}^b$ – значение поправки при оценке модуля жесткости i -ой клетки вследствие изменения ширины прокатываемой полосы b_i , МН/мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подготовленная к проведению регрессионного анализа выборка была получена для 46 режимов прокатки в чистовой группе стана 2000 полос из низкоуглеродистых марок стали толщиной 1,2 – 5,5 мм и шириной 1005 – 1625 мм, преимущественно предназначенных для дальнейшей холодной прокатки на разных комплектах рабочих и опорных валков. В ходе регрессионного анализа были получены линейные уравнения в табл. 2, которые адекватно описывают характер изменения поправки $\Delta M_{кл.i}^b$ к модулю жесткости клетки «забоя» $M_{кл.i}^0$ с учетом ширины прокатываемой полосы b_i .

Поскольку фактические значения критерия Фишера F в табл. 3 значительно превосходят табличное

Таблица 2. Значения модуля жесткости клетки «забоя» $M_{кл.i}^0$, регрессионные уравнения расчета $\Delta M_{кл.i}^b$ и их достоверность

Table 2. Values of stiffness modulus of pre-stressed stand $M_{st,i}^0$, regression equations for $\Delta M_{st,i}^b$ calculation and their reliability

Номер клетки	$M_{кл.i}^0$, МН/мм	Уравнение регрессии расчета $\Delta M_{кл.i}^b$, МН/мм	R^2	F
6	5,25	$0,6136 - 0,000300b_i$	0,8928	183,22
7	5,45	$0,8247 - 0,000410b_i$	0,8349	111,25
8	5,00	$0,9884 - 0,000494b_i$	0,9552	469,07
9	4,95	$1,0474 - 0,000524b_i$	0,9140	233,81
10	4,89	$1,0409 - 0,000520b_i$	0,9540	456,26
11	4,93	$0,8574 - 0,000428b_i$	0,9194	205,95
12	5,055	$0,9173 - 0,000458b_i$	0,9417	355,36

Таблица 3. Расчетные значения модуля жесткости клетки и проверка их достоверности путем расчета усилия

Table 3. Calculated values of rolling stands stiffness modulus and verification thereof by force calculation

Номер клетки	$\Delta M_{кл.i}^b$, МН/мм	$M_{кл.i}$, МН/мм	h_i , мм	S_i , мм	P_i , МН		ΔP_i , %
					расчетное	измеренное	
6	0,386	5,0264	18,55	13,260	26,590	25,070	6,06
7	0,297	5,1583	10,02	4,510	28,422	27,588	3,02
8	0,353	4,6538	5,63	1,303	20,137	20,682	2,64
9	0,373	4,5838	3,95	0,620	15,264	15,786	3,31
10	0,372	4,5251	2,89	–0,464	15,177	15,547	2,38
11	0,306	4,6290	2,28	–0,797	14,243	14,292	0,34
12	0,328	4,7331	2,00	0,151	8,7515	8,787	0,40

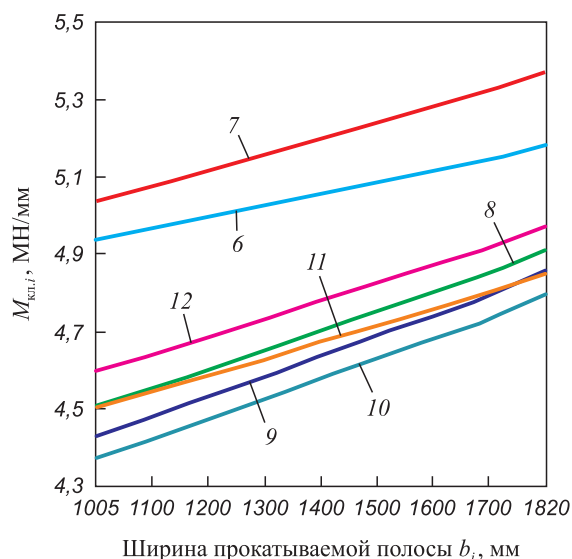


Рис. 3. Графики изменения модуля жесткости $M_{кл,i}$ в зависимости от ширины прокатываемой полосы b_i : (цифры кривых – номер клетки)

Fig. 3. Graphics of change in stiffness modulus $M_{кл,i}$ depending on width of rolled strip b_i : (numbers of curves – numbers of stands)

значение $F_{кр}(1; 44) = 4$ при степенях свободы $k_1 = 1$ и $k_2 = 44$, то коэффициенты детерминации R^2 статистически значимы и уравнения регрессии $\Delta M_{кл,i}^b$ в табл. 2 статистически надежны. Уравнения из табл. 2 справедливы в диапазоне изменения:

- профилировок рабочих валков от $-0,5$ до $-0,15$ мм;
- диаметров рабочих валков от 930 до 800 мм;
- диаметров опорных от 1616 до 1488 мм;
- глубины скосов на опорных валках 0,8 мм и их длины 300 мм.

На основе данных табл. 3 построены графики изменения модуля жесткости $M_{кл,i}$ для каждой клетки чистовой непрерывной группы стана 2000 (рис. 3) в зависимости от ширины прокатываемой полосы b_i .

Достоверность определения величины модуля жесткости клетки $M_{кл,i}$ с учетом поправки $\Delta M_{кл,i}^b$ на изменение ширины прокатываемой полосы b_i проверяли при решении уравнения (1) и сравнении измеренного значения усилия прокатки P_i в i -ой клетки стана при прокатке полосы толщиной 2,0 мм и шириной 1300 мм из стали 08Ю. Значение предварительного зазора в табл. 3 между рабочими валками S_i фиксировалось АСУ ТП чистовой группы стана 2000. Расчетные и измеренные значения усилия прокатки, а также результаты их сравнения приведены в табл. 3.

Поскольку максимальное значение погрешности сравнения ΔP_i в табл. 3 не превосходит значения 6,06 %, то для проектирования технологических режимов горячей прокатки на действующем стане 2000, обеспечивающих требуемую точность продольного и поперечного профиля горячекатаных полос с применением моделей управления продольной и поперечной разнотолщин-

ностью [5 – 7], целесообразно использовать представленные выше результаты исследований модуля жесткости.

Выводы

На основе обработки результатов исследований и экспериментов получены достоверные зависимости, описывающие влияние ширины прокатываемой полосы на изменение модуля жесткости клеток «кварто» чистовой группы действующего стана горячей прокатки.

Установлено, что прокатка при движении полосы в чистовой группе от первой до последней клетки с усилиями в диапазоне менее 6,484 – 3,041 МН нежелательна, так как при таких силах прокатки клетки испытывают нелинейную деформацию, которая вносит дополнительные колебания межвалкового зазора.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке эффективных технологических режимов прокатки в чистовой группе клеток для производства горячекатаных полос с минимальными отклонениями геометрических характеристик продольного и поперечного профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки. Москва: Черметинформация; 2004:416.
2. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А. Расчет усилий горячей прокатки тонких полос с учетом напряженно-деформированного состояния в зоне прилипания очага деформации. *Производство проката*. 2007;(4):7–15.
Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A. Calculation of hot rolling forces of thin strips taking into account the stress-strain state in adhesion region of deformation zone. *Proizvodstvo prokata*. 2007;(4):7–15. (In Russ.).
3. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А., Завражнов А.А., Траино А.И. Моделирование контактных напряжений и усилий горячей прокатки тонких широких полос с учетом зоны прилипания и упругих участков очага деформации. *Металлы*. 2007;(2):26–35.
Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A., Zavrazhnov A.A., Traino A.I. Simulation of contact stresses and forces during hot rolling of thin wide strips with allowance for a stick zone and elastic regions in the deformation zone. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2007;(2):112–119.
<https://doi.org/10.1134/S003602950702005X>
4. Гарбер Э.А., Пospelov И.Д., Кожевникова И.А. Влияние химического состава и упругих свойств полосы и валков на энергосиловые параметры широкополосных станов горячей прокатки. *Производство проката*. 2011;(8):2–7.
Garber E.A., Pospelov I.D., Kozhevnikova I.A. Influence of chemical compositions and elastic properties of strip and rolls on energy and force parameters in wide-strip hot rolling mills. *Proizvodstvo prokata*. 2011;(8):2–7. (In Russ.).
5. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А. Эффективные режимы горячей прокатки тонких полос на широкополосных станах. *Производство проката*. 2009;(1):10–16.

- Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A. Effective hot rolling modes of thin strips at wide-strip mills. *Proizvodstvo prokata*. 2007;(4):7–15. (In Russ.).
6. Гарбер Э.А., Поспелов И.Д., Траино А.И., Савиных А.Ф., Николаев Н.Ю., Мишнев П.А. Моделирование продольной разнотолщинности горячекатаных стальных полос в непрерывной группе клетей широкополосного стана. *Металлы*. 2012;(4):47–53.
Garber E.A., Pospelov I.D., Traino A.I., Savinykh A.F., Nikolaev N.Yu., Mishnev P.A. Simulation of the longitudinal thickness deviation of the steel strips hot rolled in the continuous group of a broad-strip mill. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012;(9):831–836.
<https://doi.org/10.1134/S0036029512090042>
 7. Поспелов И.Д., Румянцев В.В. Совместное регулирование продольной и поперечной разнотолщинности при горячей прокатке в чистовой группе клетей непрерывного широкополосного стана. *Прокатное производство. Приложение к журналу «Технология металлов»*. 2024;(20):10–19.
<https://doi.org/10.31044/1684-2499-2024-0-20-10-19>
Pospelov I.D., Rumyantsev V.V. Joint regulation of longitudinal and transverse gage variations during hot rolling in finishing group of stands of continuous broadband mill. *Rolling Production. Appendix to Journal "Technology of Metals"*. 2024;(20):10–19. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31044/1684-2499-2024-0-20-10-19>
 8. Wu J., Yan X. Coupling vibration model for hot rolling mills and its application. *Journal of Vibroengineering*. 2019;21(7):1795–1809.
<https://doi.org/10.21595/jve.2019.20226>
 9. Qi J.B., Wang X.X., Yan X.Q. Influence of mill modulus control gain on vibration in hot rolling mills. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2020;27:528–536.
<https://doi.org/10.1007/s42243-020-00375-3>
 10. Wang L., Hou P., Wang S., Wang C., Yan X., Wang X. Study on the effect of rolling mill dynamic stiffness on coupled vibration of hydraulic machine. *Journal of Vibroengineering*. 2024;26(3):455–468.
<https://doi.org/10.21595/jve.2023.23524>
 11. Jia X.D., Wang S., Yan X.Q., Wang L.D., Wang H.P. Research on dynamic response of cold rolling mill with dynamic stiffness compensation. *Electronics*. 2023;12(3):0599.
<https://doi.org/10.3390/electronics12030599>
 12. Gong D.Y., Xu J.Z., Yuan F.C. Study on roll elastic deformation asymmetrical 4-high mill stiffness. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*. 2012;33(11):1586–1590.
 13. Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. и др. Машины и агрегаты металлургических заводов: Учебник для студентов металлургических и машиностроительных специальностей вузов: в 3-х томах. Москва: Альянс; 2018:679.
 14. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов: Учебник для вузов. Москва: Металлургия; 1987:480.
 15. Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Черный В.А., Кузнецов Л.А., Журавский А.Г. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки. Москва: Металлургия; 1975:368.
 16. Wenyu M., Fenqin W., Xibang Z., Wei G., Ziyang L., Lin T. Influence of rolling force and roll gap on thickness of strip. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017;239:012012.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/239/1/012012>
 17. Laihua T., Qiaoyi W., Huajie W. Establishment and numerical analysis of rolling force model based on dynamic roll gap. *Applied Sciences*. 2023;13(13):7394.
<https://doi.org/10.3390/app13137394>
 18. Zhenhua W., Yu H., Yuanming L., Tao W. Prediction model of strip crown in hot rolling process based on machine learning and industrial data. *Metals*. 2023;13(5):900.
<https://doi.org/10.3390/met13050900>
 19. Haibo X., Xingsheng L., Tao Z. Numerical analysis of the effect of work roll bending on strip crown during tandem hot rolling. *International Journal of Applied Mechanics*. 2022;14(07):2250052.
<https://doi.org/10.1142/S1758825122500521>
 20. Liu G.M., Li Y.G., Huang Q.X., Yang X. Axial force analysis and roll contour configuration of four-high CVC mill. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018;(2):7527402.
<https://doi.org/10.1155/2018/7527402>
 21. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А., Траино А.И. К вопросу о влиянии трения первого и второго рода на энергосиловые параметры горячей прокатки в клетях кварто. *Металлы*. 2007;(6):47–56.
Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A., Traino A.I. Effect of sliding and rolling friction on the energy-force parameters during hot rolling in four-high stands. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2007;(6):484–491.
<https://doi.org/10.1134/S0036029507060080>

Сведения об авторе

Иван Дмитриевич Поспелов, к.т.н., доцент, Череповецкий государственный университет
ORCID: 0009-0000-5974-5718
E-mail: idpospelov@chsu.ru

Information about the Author

Ivan D. Pospelov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Cherepovets State University
ORCID: 0009-0000-5974-5718
E-mail: idpospelov@chsu.ru

Поступила в редакцию 24.07.2024
 После доработки 18.09.2024
 Принята к публикации 29.10.2024

Received 24.07.2024
 Revised 18.09.2024
 Accepted 29.10.2024