

УДК 621.771.001

**Я.Д. Василев**, д-р техн. наук, профессор

**Р.А. Замогильный**, мл. науч. сотр., e-mail: rz90@i.ua

Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ), Днепр, Украина

## Влияние особенностей контактного взаимодействия тонкой полосы с валками на параметры начальной настройки рабочей клетки и наименьшую толщину прокатываемой полосы

*Исследованы особенности силового взаимодействия тонкой полосы с валками и с рабочей клетью в целом при холодной прокатке. Показано, что при холодной прокатке тонких полос, упругие деформации валков и полосы оказывают решающее влияние на погонную силу прокатки  $P_c/b$ . Представлены данные, подтверждающие, что формирование толщины полосы при прокатке происходит в результате совместного взаимодействия последней с рабочими валками и с рабочей клетью в целом.*

*Из-за низких значений модуля жесткости рабочих клеток  $M_{кл}$  ( $M_{кл} = 4,5-7,5$  МН/мм) действующих станом холодной прокатки упругие деформации последних  $\delta_{кл}$  многократно превышают толщину полосы на выходе из очага деформации  $h_1$  ( $\delta_{кл} \gg h_1$ ), и процесс прокатки реализуется всегда в предварительно прижатых валках с силой  $P_{пр}$ , что ограничивает возможности оборудования для прокатки полос малой толщины. С уменьшением толщины и ширины полосы  $b$  вследствие уменьшения параметра  $b/L$  (где  $L$  – длина бочки валков), концевые участки бочек рабочих валков в процессе прокатки также находятся в «забое», то есть прижаты силой  $P_z$ , которая суммируется с силой прокатки  $P_c$ , что приводит к дополнительной нагрузке валков и, как следствие, к дополнительному ограничению возможностей оборудования для прокатки полос меньшей толщины.*

*Впервые решена задача по определению параметров начальной настройки рабочей клетки при прокатке, когда концевые участки рабочих валков находятся в «забое» в процессе прокатки, и предложено решение для определения наименьшей толщины полосы  $h_{1нм}$ , которая может быть прокатана на конкретном стане. Экспериментальная проверка расчетного определения параметров начальной настройки и наименьшей толщины полосы, которая может быть прокатана на конкретном стане  $h_{1нм}$ , подтвердила работоспособность и достаточную точность предложенных решений, что дает основание рекомендовать их для практического применения при расширении сортамента выпускаемой продукции на действующих станах, в сторону уменьшения толщины прокатываемых полос и при проектировании сортамента на новых станах для прокатки тонких и особо тонких полос, в том числе жести и фольги.*

**Ключевые слова:** холодная прокатка, стан, нажимное приспособление, сила, упругая деформация, взаимодействие, полоса, толщина.

**Введение.** Холоднокатаный прокат является одним из наиболее востребованных видов металлопродукции. По данным работ [1, 2], потребление плоского холоднокатаного проката и жести в мире в настоящее время оценивается на уровне 130 млн т в год и продолжает расти. При этом наибольшим спросом пользуется холоднокатаный прокат толщиной 0,8–1,2 мм и менее средней ширины (до 1400 мм), доля которого составляет 71 % [1]. Поэтому основной тенденцией развития производства холоднокатаного проката является освоение и увеличение выпуска профилей тоньше 0,8 мм, вплоть до 0,25–0,35 мм, а также тонкой и особо тонкой жести толщиной 0,12–0,16 мм и улучшение качества выпускаемой продукции.

**Актуальный уровень технологии и исследований.** Для производства холоднокатаного проката применяют непрерывные, а также одно- и двухклетевые реверсивные станы, оснащенные четырехшестивалковыми клетями, с длиной бочки валков 1200–2500 мм [3–6]. Подавляющее большинство из них предназначено для выпуска продукции широкого сортамента как по толщине, так и по ширине, что связано с необходимостью частого изменения начальной настройки рабочих клеток, поскольку значения параметров  $R/h_0$  (где  $R$ ,  $h_0$  – радиус рабочего валка и толщина полосы на входе в очаг деформации) и  $b/L$  (где  $b$ ,  $L$  – ширина полосы и длина бочки валков) изменяются соответственно в пределах 100–3000 и 0,4–0,9.

Кроме того, холодная прокатка тонких и особо тонких полос осуществляется с малыми абсолютными обжатиями  $\Delta h$  ( $\Delta h \leq 0,005-0,5$  мм) и с большими средними контактными нормальными напряжениями  $p_{\text{срс}}$  ( $p_{\text{срс}} \geq 500-1500$  Н/мм<sup>2</sup>). В этих условиях прокатки упругие деформации радиального сжатия рабочих валков и упругие деформации полосы становятся одним из основных факторов, определяющих уровень параметров процесса. В результате упругого сжатия валков и упругого восстановления полосы происходит существенное увеличение длины очага деформации  $l_c$ , что вызывает рост контактных нормальных напряжений  $p_{\text{срс}}$ , силы  $P_c$ , момента  $M_c$  и мощности  $N_c$  прокатки. Этим объясняется тот факт, что сила, действующая на нажимные винты рабочих клетей промышленных станов, при холодной прокатке полос шириной 1000 мм достигает 10–20 МН. Принимая во внимание, что модуль жесткости рабочих клетей действующих станов холодной прокатки находится в диапазоне 4,5–7,5 МН/мм [5–9], упругие деформации  $\delta_{\text{кл}}$  последних при указанных выше значениях силы прокатки достигают 1,5–4,5 мм. Поэтому процесс холодной прокатки тонких и особо тонких полос на промышленных станах осуществляется практически всегда в условиях, когда валки до начала прокатки находятся в «забое», то есть прижаты силой  $P_{\text{пр}}$  [6, 7].

**Цель работы.** Определение параметров начальной настройки рабочих клетей при холодной прокатке тонких и особо тонких полос имеет свои особенности, которые в настоящее время изучены недостаточно полно. В частности, не учтено влияние силы забоя концевых участков рабочих валков  $P_3$  в процессе прокатки, что существенно. Остается открытым также вопрос об определении наименьшей толщины полосы  $h_{1\text{нм}}$ , которая может быть прокатана на конкретном стане. Задачи, вытекающие из обозначенного круга вопросов, являются актуальными, и их решение имеет важное научное и прикладное значение. Поэтому они и определили цель настоящего исследования.

**Постановка задачи и методика исследования.** При прокатке тонких и особо тонких полос концевые участки бочек рабочих валков на действующих станах практически при любых значениях силы прокатки  $P_c$  и параметра  $b/L < 0,8$  находятся в «забое» в процессе прокатки, то есть прижаты силой  $P_3$  [10]. Поэтому на рабочие валки, в процессе прокатки, а, следовательно, и на нажимные винты рабочей клетки, действуют две силы (без учета влияния сил уравнивания верхнего полукомплекта валков и гидромеханического профилирования валков) – сила прокатки  $P_c$  и сила «забоя»  $P_3$ . Следовательно, сила, действующая на нажимные винты  $P_{\text{нв}}$  при прокатке тонких и особо тонких полос, равна:

$$P_{\text{нв}} = P_c + P_3, \quad (1)$$

и известное ограничение по силе прокатки ( $P_c \leq [P]$ ) следует записывать в виде:

$$P_{\text{нв}} \leq [P], \quad (2)$$

где  $[P]$  – допустимое значение силы на нажимные винты.

Вероятность появления силы  $P_3$  и ее величина возрастают с уменьшением толщины прокатываемой полосы  $h_1$  и параметра  $b/L$ , а также с увеличением силы прокатки  $P_c$ . При  $b/L = 1,0$  сила  $P_3$  равна нулю, независимо от значений  $h_1$  и  $P_c$ . Закономерности взаимодействия и параметры начальной настройки рабочих клетей при прокатке толстых и тонких широких полос рассмотрены подробно в литературе [6, 7].

При прокатке тонких и особо тонких относительно узких полос суммарная стрела прогиба активных обрезающих рабочих валков  $2\delta_{\text{ао}}$  [8, 10] обычно превышает толщину полосы  $h_1$ , и зазор  $S_{1к}$  вблизи торцов их бочек приобретает отрицательные значения ( $S_{1к} < 0$ ). В этом случае, как уже отмечалось выше, концевые участки бочек рабочих валков в процессе прокатки находятся в «забое», то есть прижаты силой  $P_3$  и сила, действующая на нажимные винты, выражается уравнением (1). Кроме того, рабочие валки до прокатки прижаты силой  $P_{\text{пр}}$ . Значения сил  $P_{\text{пр}}$  и  $P_3$ , которые являются параметрами начальной настройки рабочей клетки, находят в результате решения системы:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{P_c + P_3 - P_{\text{пр}}}{M_{\text{кл}}} \\ P_c &= \varphi(h_1) \\ P_3 &= \varphi(h_1) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

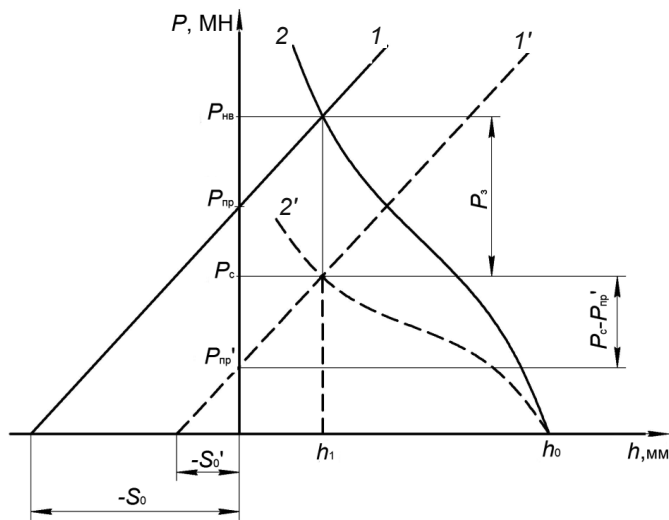
где  $P_c$  – сила прокатки;  $P_3$  – сила «забоя» концевых участков бочек валков;  $P_{\text{пр}}$  – сила предварительного прижатия валков.

Основные проблемы при решении системы (3) связаны с определением функций  $P_c = \varphi(h_1)$  и  $P_3 = \varphi(h_1)$ . Возможности и пути построения кривой пластичности  $P_c = \varphi(h_1)$  рассмотрены ранее и опубликованы в литературе [6–9]. Возможности определения функций  $P_3 = \varphi(h_1)$  изложены ниже.

На рисунке представлено графическое решение системы (3) для случаев прокатки, когда процесс осуществляется с «забоем» концевых участков рабочих валков (сплошные линии 1 и 2) и без такового (штриховые линии 1' и 2').

Из рисунка следует, что когда концевые участки рабочих валков находятся в «забое» в процессе прокатки (сплошные линии 1 и 2), получение требуемой толщины полосы  $h_1$  достигается при более высоких значениях сил  $P_{\text{нв}}$  и  $P_{\text{пр}}$  или при большей величине отрицательного зазора между валками до прокатки ( $-S_0 = P_{\text{пр}}/M_{\text{кл}}$ ). Разность ординат кривых 2 и 2' при  $h = h_1$  численно равна силе забоя концевых участков рабочих валков в процессе прокатки  $P_3$ . Таким образом, учет влияния силы  $P_3$  при начальной настройке рабочей клетки сводится к увеличению силы предварительного прижатия валков с  $P_{\text{пр}}$  до  $P_{\text{пр}}$  или к увеличению отрицательного зазора между ними с  $S_0'$  до  $S_0$ .

Для аналитического решения системы (3) необходимо найти функцию  $P_3 = \varphi(h_1)$ . Наиболее точное



Графическое решение системы (3) по определению параметров начальной настройки рабочей клетки при прокатке с «забоем» концевых участков рабочих валков

определение силы  $P_3$  может быть реализовано в результате совместного решения уравнения прокатки и задачи о напряженно-деформированном состоянии валков [8]. Приближенно силу  $P_3$  можно определить по сближению осей бочек рабочих валков на участках их непосредственного контакта [8, 9]. Расчет силы прокатки  $P_c$  производили по хорошо апробированной методике, учитывающей влияние упругих деформаций валков и полосы коэффициента трения, деформационных и температурно-скоростных условий прокатки [11].

**Результаты исследований и их анализ.** Расчеты силы забоя  $P_3$  с использованием методик, приведенных в работах [8, 9], показали, что в случае применения цилиндрических валков в последних клетях на двух- и шестиклетевом стане 1400 ОАО «АрселорМиталл Темиртау» [4] при прокатке жести 0,145-0,36x855-890 мм ( $b/L = 0,61-0,64$ ) ее значения, в зависимости от предела текучести исходного подката и принятых режимов деформации, могут достигать 0,2–0,9  $P_c$ . Такие большие величины силы  $P_3$  приводят к увеличению нагрузки на нажимные винты и к снижению обжимающей способности рабочих клетей, к увеличению контактных напряжений на концевых участках рабочих валков, их дополнительному разогреву, быстрому износу и разрушению, а также к дополнительному расходу энергии на преодоление сопротивления сил трения качения на концевых участках бочек рабочих валков, находящихся в «забое», что нежелательно и в большинстве случаев недопустимо. Вместе с тем прижатие («забой») концевых участков бочек рабочих валков на некоторой длине, примыкающей к кромкам полосы, целесообразно, так как это обеспечивает поперечную устойчивость полосы в процессе прокатки [7–9, 12]. Поэтому на практике стремятся к определению оптимальной или некоторой приемлемой минимальной величины силы  $P_3$ . Для минимизации величины силы  $P_3$  применяют подходящие профилировки рабочих и опорных валков, рабочие клетки с осевой сдвижкой рабочих или промежуточных (на шестивалковых клетях) валков

или клетки, оснащенные валками системы SVC, либо другие технические решения, направленные на достижение этой цели [12].

Система уравнений (3) отражает особенности нагружения валкового узла и настройки рабочей клетки при прокатке тонких и особо тонких полос, что позволяет использовать ее также для определения «наименьшей толщины полосы  $h_{1нм}$ , которая может быть прокатана на конкретном стане с наибольшим обжатием». С этой целью первое уравнение этой системы может быть записано в виде:

$$h_{1нм} = \frac{P_c + P_3 - P_{пр}}{M_{кл}} = \delta_{клс} + \delta_{клз} + \delta_{клпр}, \quad (4)$$

где  $\delta_{клс}$ ,  $\delta_{клз}$ ,  $\delta_{клпр}$  – упругие деформации рабочей клетки, вызванные силами прокатки  $P_c$ , забоя концевых участков рабочих валков  $P_3$  и предварительного прижатия валков  $P_{пр}$  соответственно.

Из уравнения (4) видно, что наименьшая толщина полосы  $h_{1нм}$ , которая может быть прокатана на конкретном стане, определяется упругими деформациями клетки, вызванных силами  $P_c$ ,  $P_3$  и  $P_{пр}$ , то есть жесткостью всей рабочей клетки, а не только радиальной жесткостью рабочих валков, как полагали исследователи, ранее пользующиеся вместо термина «наименьшая толщина прокатываемой полосы  $h_{1нм}$ », термином «минимальная толщина прокатываемой полосы  $h_{1мин}$ » [5, 9]. На необоснованность и ошибочность термина «минимальная толщина полосы  $h_{1мин}$ » и соответствующих моделей для ее определения было обращено внимание также в работе [10].

Как следует из уравнения (4), абсолютная величина наименьшей толщины полосы  $h_{1нм}$ , которая может быть прокатана на конкретном стане, определяется только жесткостью рабочей клетки и технологическими ограничениями. Принимая во внимание (1) и (2), уравнение (4) представилось в виде:

$$h_{1нм} = \frac{P_{нв} - P_{пр}}{M_{кл}} \leq \frac{[P] - P_{пр}}{M_{кл}}. \quad (5)$$

Анализ последнего уравнения показывает, что наименьшая толщина полосы  $h_{1нм}$ , которая может быть прокатана на конкретном стане, определяется разностью двух сил – допускаемого значения силы, действующей на нажимные винты, и силы предварительного прижатия валков перед прокаткой. Очевидно, что чем меньше разность значений этих сил, тем меньше толщина полосы  $h_{1нм}$ , которая может быть прокатана на конкретном стане. Но это возможно только при высоком и соизмеримом уровне сил  $P_{нв}$  и  $P_{пр}$  и подтверждает хорошо известный из практики факт, что холодная прокатка тонких и особо тонких полос реализуется с «большими силами и с малыми крутящими моментами».

Для проверки точности и работоспособности уравнения (4) на двухвалковом лабораторном стане 200 было проведено специальное исследование, в ходе которого прокатывали отожженные образцы из

Расчетные и экспериментальные значения толщины  $h_{1нм}$  при прокатке на лабораторном стане 200

	Параметры прокатки									
	$h_0$ , мм	$\varepsilon$	$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$2k_{ср}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$f$	$P_{пр}$ , кН	$p_{срс}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$P_c$ , кН	экспериментальные $h_1$	расчетные по модели $h_{1нм}$
1	0,252	0,263	260	498	0,167	21,0	1288	268	0,186	0,189
2	0,249	0,259					1287	269	0,185	0,188
3	0,253	0,261					1273	266	0,187	0,186
4	0,251	0,258					1271	264	0,186	0,184
5	0,252	0,26					1274	265	0,186	0,185
6	0,253	0,261					1273	267	0,187	0,186
7	0,252	0,26					1274	268	0,186	0,187
8	0,255	0,263					1270	265	0,188	0,185
9	0,254	0,262					1271	266	0,187	0,186
10	0,253	0,261					1273	267	0,187	0,186

стали 08кп [ $\sigma_T = \sigma_{тисх} + 34,6(100\varepsilon_s)^{0,6}$ ] с номинальными размерами 0,22-0,25x47,5x300 мм без применения технологической смазки и натяжения со скоростью 0,3 м/с. Валки стана специальной конструкции были изготовлены из стали 9ХФ, имели диаметр 201,2 мм, длину бочки 50 мм и шлифованную рабочую поверхность с твердостью 92 HSD. Прокатку вели в предварительно прижатых валках. Сила предварительного прижатия валков  $P_{пр}$  ограничивалась возможностями ручного нажимного устройства и не превышала 18–22 кН. Значение параметра  $b/L$  равнялось 0,95, что исключало возможность забоя свободных (концевых) участков бочек валков в процессе прокатки. В ходе экспериментов измеряли толщину и ширину образцов до и после прокатки, значения силы предварительного прижатия валков  $P_{пр}$  и силы, действующей на нажимные винты  $P_{нв}$ , которая в данном случае равнялась силе прокатки  $P_c$ . Измерение перечисленных параметров осуществляли по общепринятым методикам. В таблице представлены рассчитанные по уравнению (4), то есть теоретические и экспериментальные значения толщины образцов после прокатки, которые рассматривались в качестве наименьших  $h_{1нм}$ , поскольку ограничивались параметрами начальной настройки (силой  $P_{пр}$ ) и жесткостью рабочей клетки лабораторного стана ( $M_{кл} = 1,32$  МН/мм).

Из таблицы видно, что экспериментальные и рассчитанные по уравнению (4) значения наименьшей толщины прокатываемой полосы  $h_{1нм}$  практически совпали. Это подтверждает точность, надежность и работоспособность уравнения (4) для прогнозирования наименьшей толщины прокатываемой полосы  $h_{1нм}$ , что дает основание рекомендовать его для практического применения.

**Выводы**

Исследованы особенности силового взаимодействия тонкой полосы с валками и с рабочей клетью в целом при холодной прокатке. В большинстве случаев при решении поставленной задачи обычно учитывают только особенности контактного взаимодействия полосы с рабочими валками, что необходимо,

но недостаточно. Показано, что формирование толщины полосы при прокатке происходит в результате совместного взаимодействия последней с рабочими валками и с рабочей клетью в целом. Такой подход при решении данной задачи использован в настоящей статье.

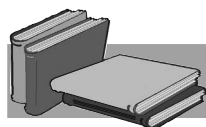
Пластическая деформация полосы при холодной прокатке осуществляется с малыми абсолютными обжатиями  $\Delta h$  ( $\Delta h \leq 0,005-0,5$  мм) и с большими средними контактными напряжениями  $p_{срс}$  ( $p_{срс} > 500-1500$  Н/мм<sup>2</sup>). В этих условиях прокатки упругие деформации валков и полосы оказывают решающее влияние на погонную силу прокатки  $P_c/b$  (где  $P_c$ ,  $b$  – сила прокатки и ширина прокатываемой полосы), значения которой достигают 8–20 кН/мм, что приводит к увеличению силы прокатки на действующих станах холодной прокатки до 15–25 МН и более.

Из-за низких значений модуля жесткости рабочих клеток  $M_{кл}$  ( $M_{кл} = 4,5-7,5$  МН/мм) действующих станов холодной прокатки, упругие деформации последних  $\delta_{кл}$  многократно превышают толщину полосы на выходе из очага деформации  $h_1$  ( $\delta_{кл} \gg h_1$ ), и процесс прокатки реализуется всегда в предварительно прижатых валках с силой  $P_{пр}$ , что ухудшает условия эксплуатации валков и ограничивает возможности технологического оборудования для прокатки полос малой толщины. Установлено, что с уменьшением толщины и ширины полосы  $b$  вследствие уменьшения параметра  $b/L$  (где  $L$  – длина бочки валков), концевые участки бочек рабочих валков, каждый длиной менее  $0,5(L-b)$ , в процессе прокатки также находятся в «забое», то есть прижаты силой  $P_3$ , которая суммируется с силой прокатки  $P_c$ . Это приводит к дополнительному нагружению и ужесточению условий работы валков и, как следствие, к дополнительному ограничению возможностей оборудования для прокатки полос меньшей толщины.

Впервые решена задача по определению параметров начальной настройки рабочей клетки при прокатке, когда концевые участки рабочих валков находятся в «забое» в процессе прокатки и предложено решение для определения наименьшей толщины полосы  $h_{1нм}$ , которая может быть прокатана на кон-

кратном стане. Экспериментальная проверка расчетного определения параметров начальной настройки и наименьшей толщины полосы, которая может быть прокатана на конкретном стане  $h_{1\text{нм}}$ , подтвердила работоспособность и достаточную точность предложенных решений, что дает основание рекомендовать

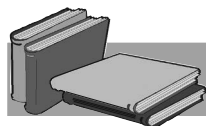
их для практического применения при расширении сортамента выпускаемой продукции на действующих станах, в сторону уменьшения толщины прокатываемых полос и при проектировании сортамента на новых станах для прокатки тонких и особо тонких полос, в том числе жести и фольги.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Федонин О.В., Урну С.Я., Немкин М.В., Даниленко Д.Н., Кондауров Е.Л. Перспективы развития производства холоднокатаного проката на мировом и российском рынках. *Металлург*. 2011. № 5. С. 9–16.
2. Василев Я.Д., Замогильный Р.А., Самокиш Д.Н. Тенденции развития производства и потребления жести в мире. *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2017. № 9. С. 61–67.
3. Антипин В.Г., Зиновьева Н.Г., Овчинников А.М. Черная металлургия США. *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2014. № 2. С. 3–21.
4. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 2. Производство холоднокатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2010. 608 с.
5. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и агрегатов прокатных станов. 2-е изд. перераб и доп. М.: Металлургия, 1985. 376 с.
6. Василев Я.Д., Сафьян М.М. Производство полосовой и листовой стали. Киев: Вища школа, 1976. 292 с.
7. Меерович И.М., Герцев А.И., Горелик В.С., Классен Э.Я. Повышение точности листового проката. М.: Металлургия, 1969. 264 с.
8. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов. М.: Металлургия, 1972. 512 с.
9. Полухин П.И., Железнов Ю.Д., Полухин В.П. Тонколистовая прокатка и служба валков. М.: Металлургия, 1967. 388 с.
10. Василев Я.Д., Дементюенко А.В. Непрерывная прокатка тонких и особо тонких полос. Непрерывная прокатка: Коллективная монография. Днепропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. С. 137–293.
11. Василев Я.Д., Самокиш Д.Н., Дементюенко А.В., Завгородний М.И. Единая методика расчета энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной полосовой прокатки. *Бюллетень «Черная металлургия»*. 2014. № 1. С. 50–58.
12. Будаева А.А., Коновалов Ю.В., Ткалич К.Н., Качалка З.Г., Паргамонов Е.А. Профилирование валков листовых станов. Киев, 1986. 190 с.

Поступила 04.01.2019



## REFERENCES

1. Fedonin, O.V., Urnu, S.Ya., Nemkin, M.V., Danilenko, D.N., Kondaurou, E.L. (2012). Prospects for the development of cold-rolled steel production in the world and Russian markets. *Metallurg. Metallurgist*, no. 5, pp. 9–16 [in Russian].
2. Vasilev, Ya.D., Zamogilny, R.A., Samokish, D.N. (2017). Trends in the development of production and consumption of tinplate in the world. *Chernaya metallurgiya: Biuletin' Instituta "Chermetinformatsiya"*. *Ferrous metallurgy: Bulletin of the Institute "Chermetinformatsiya"*, no. 9, pp. 61–67 [In Russian].
3. Antipin, V.G., Zinov'eva, N.G., Ovchinnikov, A.M. (2014). Ferrous metallurgy of USA. *Chernaya metallurgiya: Biuletin' Instituta "Chermetinformatsiya"*. *Ferrous metallurgy: Bulletin of the Institute "Chermetinformatsiya"*, no. 2, pp. 3–21 [in Russian].
4. Konovalov, Yu.V. (2010). Directory by rolling specialist. Reference book in 2 books. Book 2. Production of cold-rolled sheets and strips. Moscow: Teplotekhnik, 608 p. [in Russian].
5. Korolev, A.A. (1985). Design and calculation of machines and units of rolling mills. 2nd ed. revised and enlarged. Moscow: Metallurgiya, 376 p. [in Russian].
6. Vasilev, Ya.D., Saf'yan, M.M. (1976). Production of strip and sheet steel. Kyiv: Vyshcha shkola, 192 p. [in Russian].
7. Meerovich, I.M., Gertsev, A.I., Gorelik, V.S., Klassen, E.Ya. (1969). Improving the accuracy of sheet metal. Moscow: Metallurgiya, 264 p. [in Russian].
8. Poluhin, V.P. (1972). Mathematical modeling and computer calculation of sheet rolling mills. Moscow: Metallurgiya, 512 p. [in Russian].
9. Poluhin, P.I., Zheleznov, Yu.D., Poluhin, V.P. (1967). Sheet rolling and rolls service. Moscow: Metallurgiya, 388 p. [in Russian].
10. Vasilev, Ya.D., Dementienko, A.V. (2002). Continuous rolling of thin and extremely thin strips. *Continuous rolling: Collective monograph*. Dnipropetrovsk, Dnipro-VAL Publ., pp. 137–293 (In Russian)
11. Vasilev, Ya.D., Samokish, D.N., Dementienko, A.V., Zavgorodny, M.I. (2014). Unified method of calculating energy and temperature-speed parameters of the process of cold strip rolling. *Chernaya metallurgiya: Biuletin' Instituta "Chermetinformatsiya"*. *Ferrous metallurgy: Bulletin of the Institute "Chermetinformatsiya"*, no. 1, pp. 50–58 [in Russian].
12. Budakva, A.A., Konovalov, Yu.V., Tkalych, K.N., Kachalka, Z.G., Pargamonov, Ye.A. (1986). Profiling rolls of sheet mills. Kyiv, 190 p. [in Russian].

Received 04.01.2019

## Анотація

Я.Д. Василев, д-р техн. наук, професор

Р.О. Замогильний, мол. наук. співр., e-mail: rz90@i.ua

Національна металургійна академія України (НМетАУ), Дніпро, Україна

**Вплив особливостей контактної взаємодії тонкої штаби з валками на параметри початкового налаштування робочої кліти і найменшу товщину штаби, що прокатується**

Досліджено особливості силової взаємодії тонкої штаби з валками і з робочою кліткою в цілому при холодній прокатці. Показано, що при холодній прокатці тонких штаб, пружні деформації валків і штаби мають вирішальний вплив на погонну силу прокатки  $P_c/b$ . Представлено дані, які підтверджують, що формування товщини штаби при прокатці відбувається в результаті спільної взаємодії останньої з робочими валками і з робочою кліткою в цілому.

Через низькі значення модуля жорсткості робочих клітей  $M_{кл}$  ( $M_{кл} = 4,5-7,5$  МН/мм) діючих станів холодної прокатки пружні деформації останніх  $\delta_{кл}$  багаторазово перевищують товщину штаби на виході з осередку деформації  $h_1$  ( $\delta_{кл} \gg h_1$ ), і процес прокатки реалізується завжди в попередньо притиснутих валках з силою  $P_{пр}$ , що обмежує можливості обладнання для прокатки штаб малої товщини. Зі зменшенням товщини і ширини штаби  $b$  внаслідок зменшення параметра  $b/L$  (де  $L$  – довжина бочки валків), кінцеві ділянки бочок робочих валків в процесі прокатки також знаходяться в «забої», тобто притиснуті силою  $P_з$ , яка підсумовується з силою прокатки  $P_c$ , що призводить до додаткового навантаження валків і, як наслідок, до додаткового обмеження можливостей обладнання для прокатки штаб меншої товщини.

Вперше вирішено задачу з визначення параметрів початкової настройки робочої кліти під час прокатки, коли кінцеві ділянки робочих валків знаходяться в «забої» в процесі прокатки і запропоновано рішення для визначення найменшої товщини штаби  $h_{1нм}$ , яка може бути прокатана на конкретному стані. Експериментальна перевірка розрахункового визначення параметрів початкової настройки і найменшої товщини штаби, яка може бути прокатана на конкретному стані  $h_{1нм}$ , підтвердила працездатність і достатню точність запропонованих рішень, що дає підставу рекомендувати їх для практичного застосування при розширенні сортаменту продукції, що випускається на діючих станах, в сторону зменшення товщини штаб, що прокатуються, і при проектуванні сортаменту на нових станах для прокатки тонких і особливо тонких штаб, в тому числі жерсті і фольги.

## Ключові слова

Холодна прокатка, стан, натискний пристрій, сила, пружна деформація, взаємодія, штаба, товщина.

## Summary

Ya.D. Vasilev, Doctor of Engineering Sciences, Professor

R.A. Zamogilny, Junior Researcher, e-mail: rz90@i.ua

National Metallurgical Academy of Ukraine (NMetAU), Dnipro, Ukraine

**Influence of the special features of contact interaction of the thin strip with rolls on the parameters of the initial setting of the working stand and the least thickness of the rolled strip**

The features of the force interaction of a thin strip with rollers and with a working stand as a whole during cold rolling are investigated. It is shown, that during cold rolling of thin strips, the elastic deformations of the rolls and the strips have a decisive influence on the linear rolling force  $P_c/b$ . The data are presented confirming, that the formation of the strip thickness during rolling occurs as a result of the joint interaction of the strip with the work rolls and with the working stand as a whole.

Due to the low modulus of stiffness of the working stands,  $M_{кл}$  ( $M_{кл} = 4.5-7.5$  MN/mm) of the cold rolling mills in operation, the elastic deformations of the last  $\delta_{кл}$  are many times greater than the thickness of the strip at the exit from the deformation zone  $h_1$  ( $\delta_{кл} \gg h_1$ ) and the rolling process is always implemented in pre-pressed rollers with a power  $P_{пр}$ , which limits the ability of the equipment for rolling strips of small thickness. With a decrease in the thickness and width of the strip  $b$  due to a decrease in the parameter  $b/L$  (where  $L$  is the length of the roll barrel), the end sections of the barrels of the work rolls in the rolling process are also in the "bottom face", i. e. pressed force  $P_з$ , which is summed with the force rolling  $P_c$ , which leads to additional loading of the rolls and, as a consequence, to an additional limitation of the equipment for rolling strips of smaller thickness.

For the first time, the problem of determining the parameters of the initial setting of the working stand during rolling was solved, when the end sections of the work rolls are in the "bottom" during the rolling process and a solution is proposed for determining the smallest strip thickness  $h_{1нм}$ , that can be rolled on a particular mill. The experimental verification of calculation of the parameters of the initial setting and the smallest thickness of the strip, which can be rolled up at a specific state  $h_{1нм}$

*confirmed the efficiency and sufficient accuracy of the proposed solutions, which makes it possible to recommend them for practical application in expanding the range of products produced in operating states in the direction reducing the thickness of the strip that are rolled out and designing the assortment at the new mills for the rolling of thin and especially thin strips, including tinplate and foil.*

**Keywords**

*Cold rolling, rolling mill, screw device, force, elastic deformation, interaction, strip, thickness.*