

УДК 621.771.001.23

Курдюкова Л. А.  
Козленко Д. А.

## МОДЕЛЬ КЛЕТИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО СТАНА

При разработке новых технологических процессов и отладки уже существующих важным является возможность математического их описания и прогнозирования на этой основе их параметров, что позволит значительно экономить материальные ресурсы.

Целью настоящей работы является разработка математических моделей, обеспечивающих расчет в реальном режиме времени заданий на установку начальных межвалковых растворов и заданий на их изменение, отвечающих величине дополнительных (управляющих) обжатий. Эти математические модели представлены как пакет под названием «Модель клетки толстолистого стана» и включает модели расчета силы прокатки, расчета модуля жесткости клетки, модели расчета модуля жесткости полосы, расчета межвалкового зазора (рис. 1).

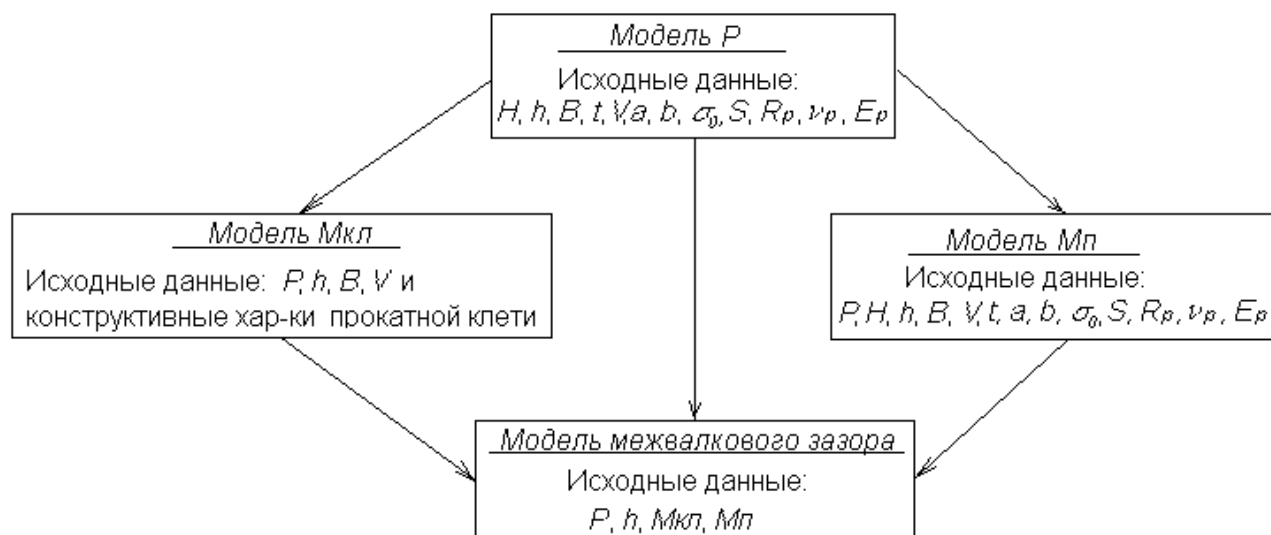


Рис. 1. Блок-схема модели клетки толстолистого стана:

$H$  – толщина полосы на входе, мм;  $h$  – толщина полосы на выходе, мм;  $B$  – ширина полосы, мм;  $t$  – температура полосы, °С;  $V$  – скорость прокатки, м/с;  $a, b, \sigma_0, S$  – константы по скорости деформации и относительной деформации, базисное сопротивление деформации и коэффициент при базисном сопротивлении при определении сопротивления деформации по формуле, предложенной Андреюком – Тюленевом [1];  $R_p$  – радиус рабочего вала, мм;  $\nu_p$  – коэффициент Пуассона рабочего вала;  $E_p$  – модуль упругости рабочего вала, МН/мм<sup>2</sup>;  $P$  – сила прокатки, МН;  $Mп$  – модуль жесткости полосы, МН/мм;  $Mкл$  – модуль жесткости клетки, МН/мм

В качестве математического и программного обеспечения расчета силы прокатки приняты программные блоки, разработанные в программном пакете «Толстяк\_В», предназначенном для расчета фабрикации слябов, температурных, энергосиловых условий прокатки, требований к параметрам двигателей главного привода, режимов работы систем охлаждения раскатов, производительности и циклограмм работы ТЛС в функции заданного режима обжатий, температуры нагрева слябов, требуемой температуры начала и конца чистовой прокатки, температуры начала и конца охлаждения [2].

Модель расчета модуля жесткости полосы. Модуль жесткости полосы или условный модуль жесткости полосы ( $Mn$ ) определяется как тангенс угла наклона упруго-пластической кривой полосы [3, 4, 5].

Принципиально численное определение модуля жесткости полосы во всех методиках одинаково, и зависит от формы выбранного уравнения величины давления металла на валки, которое, как известно, зависит от ряда величин:

$$P = f(\sigma_s, R, H, h, B, f \dots), \quad (1)$$

где  $\sigma_s$  – сопротивление деформации, кг/мм<sup>2</sup>;  $f$  – коэффициент трения. Однако по результирующему уравнению эти методики можно разделить на общие, предназначенные для горячей тонколистовой прокатки на непрерывных станах [5, 6], например, в [6] приведена громоздкая методика определения модуля жесткости полосы для материала Ст 3, либо для станов холодной прокатки [5, 7, 8], и частные, когда общую методику ограничивают рамками существующего производства или прокатываемого материала. Основное преимущество частных методов их простота и ограниченность являются так же и их недостатком, например, уравнения модуля жесткости для стана 2000 НЛМК и 1700 «Карметкомбината», которые определяются в зависимости только от фактора  $B/H$  [9] не пригодны для использования в условиях других производств. Но они просты в использовании на данных станах. Также в рассмотренных методиках для горячей прокатки не учитывается упругое сплющивание рабочих валков в очаге деформации и не дана оценка возможности использования для условий прокатки толстых листов.

Предлагаем общую методику определения модуля жесткости полосы для толстолистовых станов. В результате дифференцирования уравнения (1) по толщине полосы  $h$  получили следующее уравнение:

$$Mn = \frac{\left[ a \cdot \left( \frac{R}{2 \cdot Ld} - \frac{Ld}{\Delta h} \right) - \frac{b \cdot \varepsilon \cdot Ld}{H} - \frac{n}{2 \cdot n_\sigma \cdot h_{cp}} (R + m \cdot Ld) - \frac{R}{2 \cdot Ld} \right] p_{cp} \cdot B}{\left[ \frac{n \cdot Ld}{n_\sigma \cdot h_{cp}} - a - 1 \right] \frac{8 \cdot R \cdot (1 - \nu)^2}{\pi \cdot E \cdot Ld} \cdot p_{cp} - 1}, \quad (2)$$

где  $n$  – расчетный параметр,  $n = \begin{cases} 0,213; m \geq 2 \\ 0,5 \cdot (1 - 1/m^2); m < 2 \end{cases}$ ;  $\varepsilon$  – относительная деформация;

$p_{cp}$  – среднее давление, Мн/мм<sup>2</sup>  $p_{cp} = 1,15 \cdot \sigma_s \cdot n_\sigma$ ;  $Ld$  – длина очага деформации с учетом

сплющивания рабочих валков, мм  $Ld = \sqrt{R \left( \Delta h + \frac{16(1 - \nu)^2}{\pi E B} P \right)}$ ;  $n_\sigma$  – коэффициент напряжен-

ного состояния;  $n_\sigma = \begin{cases} 0,674 + 0,213 \cdot m, m \geq 2 \\ 0,5 \cdot (m + 1/m), m < 2 \end{cases}$  [10];  $m$  – параметр формы,  $m = \frac{Ld}{h_{cp}}$ ;  $h_{cp}$  – сред-

няя толщина полосы, мм.

Преимущества предложенной методики следующие: относительная простота формы уравнения по сравнению с известными; расчет не зависит от коэффициента трения, определение которого сопряжено с некоторыми трудностями, такими как масштабность расчета и выбор методики для определения этого коэффициента трения; длина очага деформации рассчитывается с учетом упругой деформации рабочего валка; учитывается сопротивление деформации стали.

К недостаткам данного уравнения следует отнести то, что данное уравнение не показывает вклад основных показателей процесса прокатки, таких как толщина, ширина, скорость, температура полосы, радиус рабочих валков в модуль жесткости полосы, которые

в уравнении (2) присутствуют в неявном виде. Поэтому аппроксимируем результаты расчета по уравнению (2). В результате аппроксимирования получили следующее уравнение. Пример расчета по уравнению (3) приведен для следующих исходных данных:  $t = 800$  °С,  $B = 1000$  мм,  $R = 400, 500, 600$  мм,  $V = 2-3,5$  м/с,  $H = 200$  мм, обжатии 15, 30 % для рис. 2, а и 15, 30, 45 % для рис. 2, б.

$$Mn = B \cdot \left[ 1005,5 \cdot H^{-0,77} + m \cdot \left( 160 \cdot H^{-0,5} + 8,52 \cdot H^{-0,5234} (V - 3) + 0,44 \cdot H^{-0,501} (R - 550) + 0,016 \cdot H^{-0,6019} (T - 1000)^2 - 1,048 \cdot H^{-0,5533} (T - 1000) \right) \right] \quad (3)$$

Уравнение рассчитано на использование для черновой прокатки при следующих изменениях параметров процесса прокатки:  $H = 20-200$  мм,  $\varepsilon = 15-50$  %,  $t = 800-1100$  °С,  $V = 2-5$  м/с,  $R = 400-600$  мм. Погрешность расчета по аппроксимированному уравнению (3) в указанном диапазоне использования составляет 5,5 %.

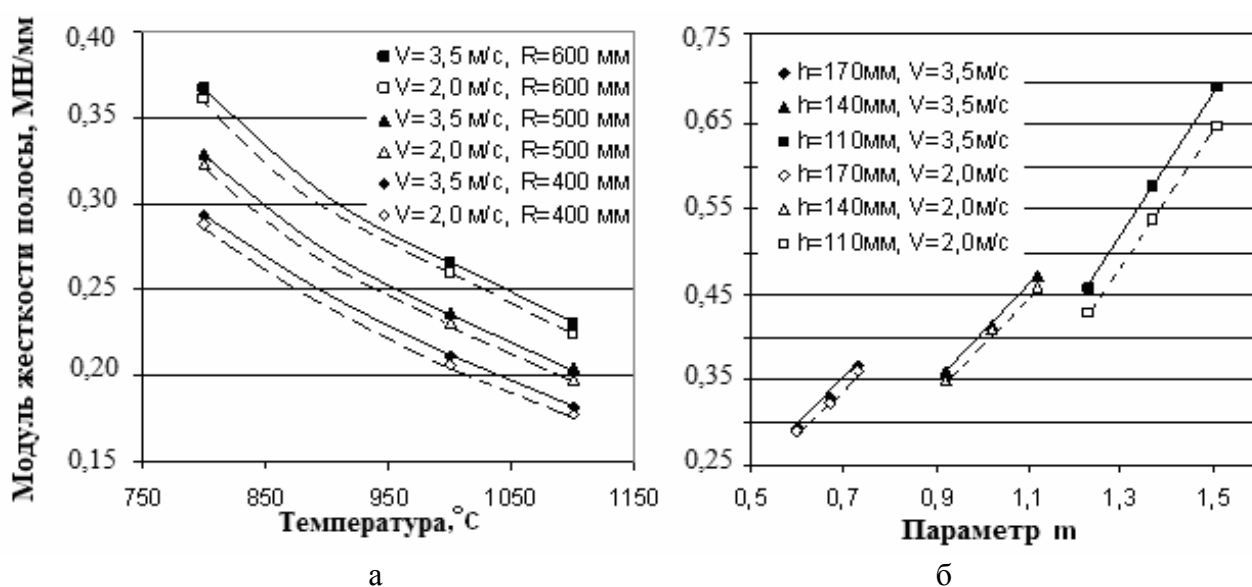


Рис. 2. Расчет модуля жесткости полосы по аппроксимированному уравнению

*Модель расчета модуля жесткости клетки.* Для расчета модуля жесткости клетки разработали методику, в которой учитывается деформация всех элементов прокатной клетки и которая учитывает нелинейное изменение упругой деформации клетки от величины нагрузки. В методике учтены следующие элементы клетки: станина, упорный подшипник, нажимной винт, гайка нажимного винта, гидронажимное устройство, подпятник под нажимной винт, подкладка под подпятник, подушки опорных валков, подшипники опорных валков, палец и поддон под палец нижнего опорного валка, планка под поддон, плита под поддон и валковая система, которая испытывает: прогиб рабочих валков; проседание опорных валков; сжатие по контакту рабочих и опорных валков; сжатие по контакту рабочих валков или рабочих валков в очаге деформации; сжатие шейки опорного валка. Относительная погрешность расчета по разработанной методике расчета модуля жесткости клетки для стана 3000 АМК составляет в рабочем диапазоне сил 6–35 МН – 0,02 % [11].

На рис. 3 приведена зависимость деформации клетки стана 3000 при прокатке полосы шириной 1000, 1500, 2000, 2500 мм и при нагружении «вал на вал».

На рис. 4 приведена зависимость упругой деформации и модуля жесткости клетки стана 3000 при нагружении «вал на вал» в диапазоне силы 6–45 МН. Как видно из графика кривая модуля жесткости имеет нелинейный характер на всем диапазоне силы, что говорит о нелинейном характере деформации клетки под нагрузкой.

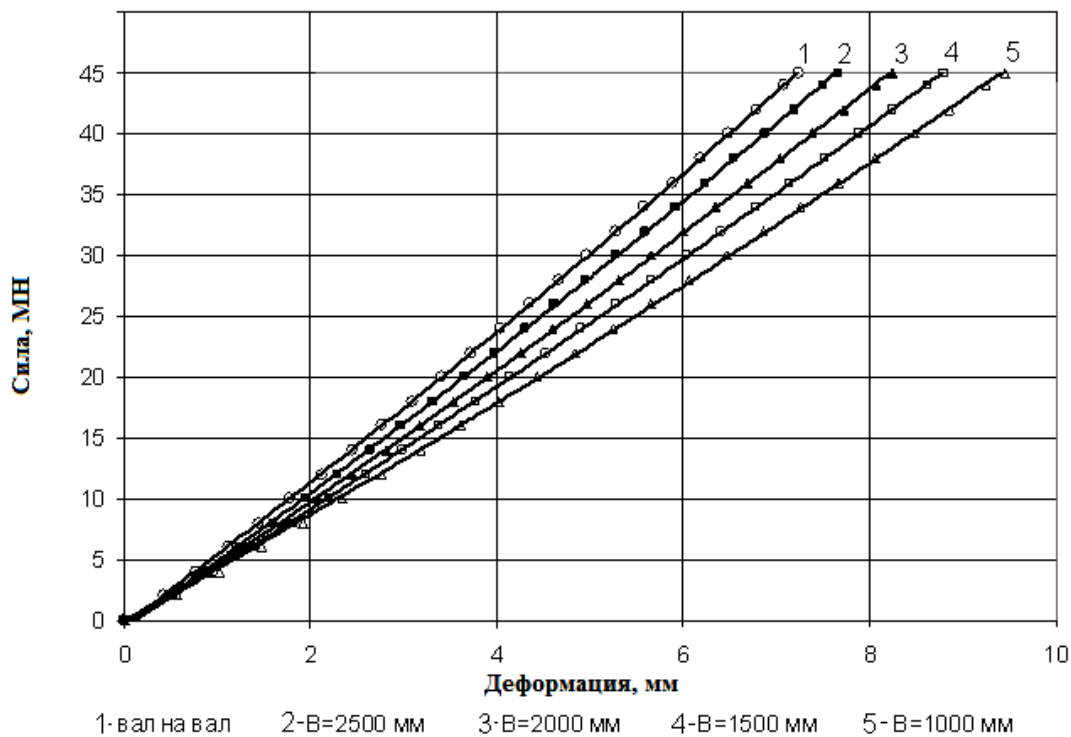


Рис. 3. Зависимость деформации клетки стана 3000 АМК от ширины полосы

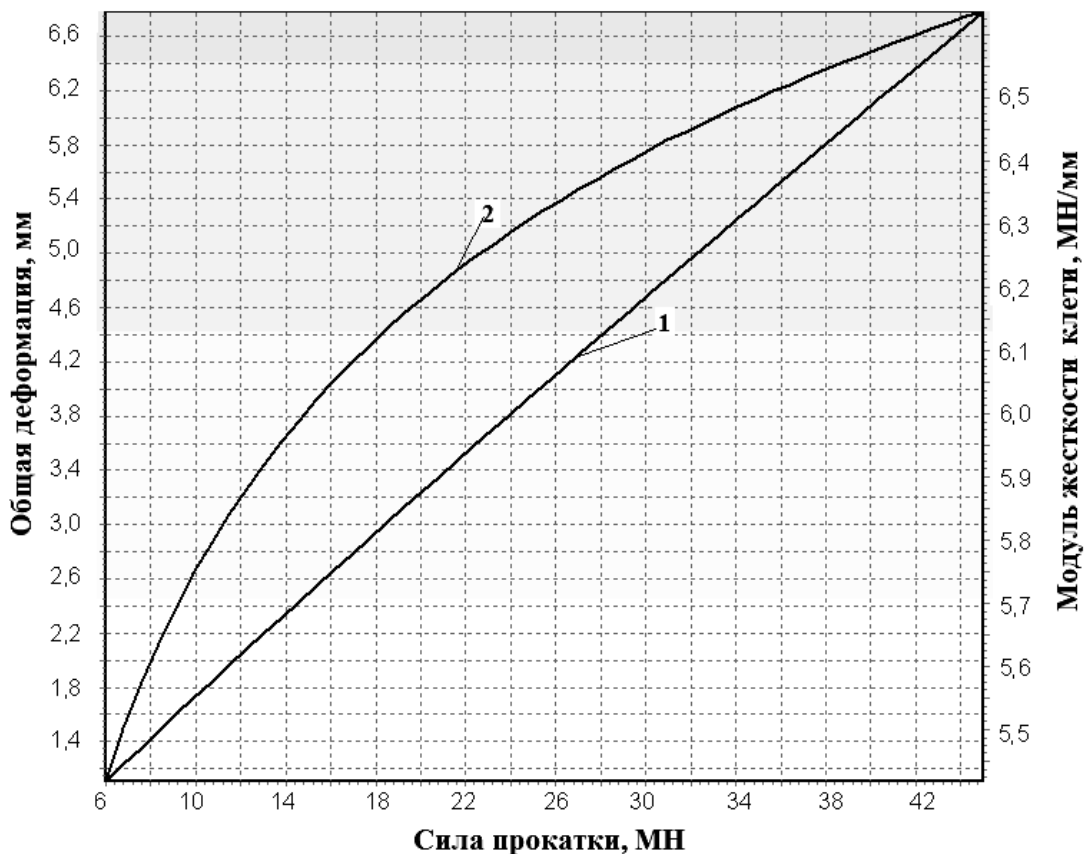


Рис. 4. Зависимость упругой деформации и модуля жесткости клетки 3000 АМК от нагрузки:

1 – кривая упругой деформации клетки; 2 – кривая модуля жесткости клетки

Модель расчета межвалкового зазора. Известные модели зазора клетки основаны на уравнении Головина-Симса (4):

$$S_0 = h_1 - \frac{P}{M_K}, \tag{4}$$

где  $S_0$  – зазор между валками, мм;  $h_1$  – конечная толщина полосы, мм.

На рис. 5. приведена схема алгоритма расчета межвалкового зазора для толстолистовых станов. На схеме выделены блоки расчета начального межвалкового зазора и блоки регулирования толщины полосы по имеющемуся изменению  $\Delta P$ , при профилировании раската и при прогнозировании изменении входящих параметров  $H, h, B, V, t$ .

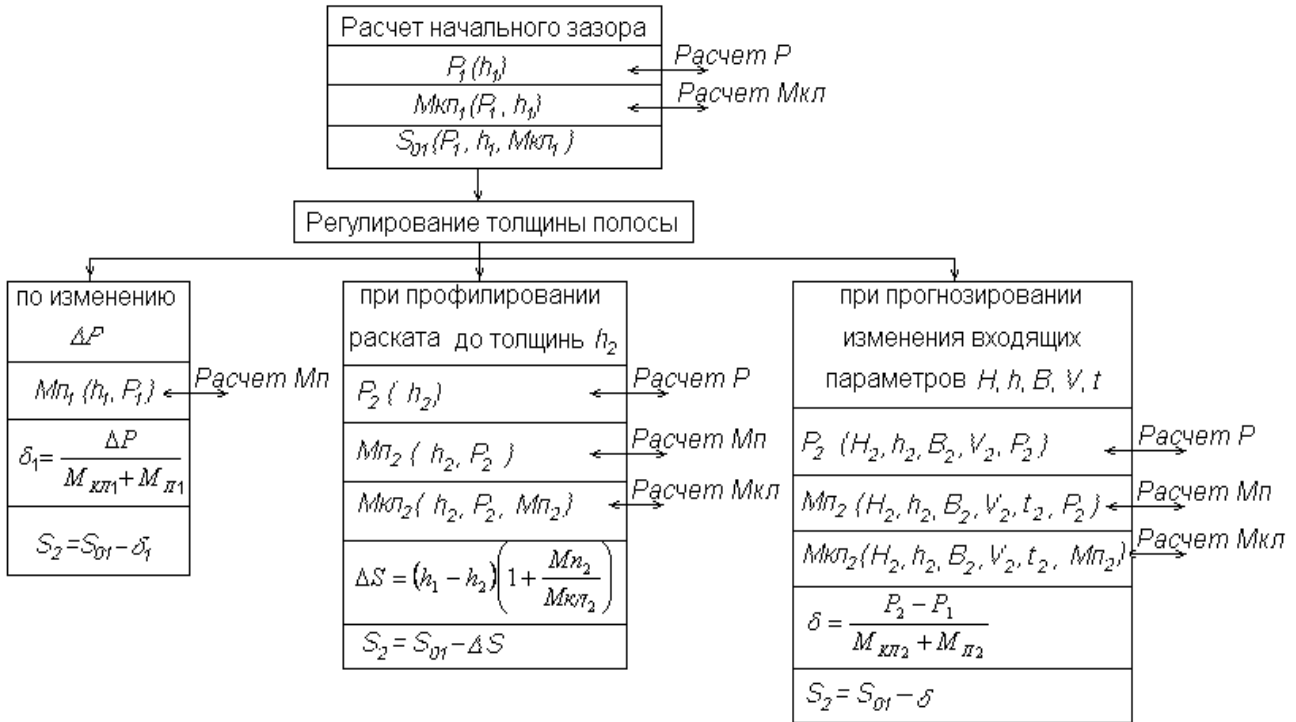


Рис. 5. Схема алгоритма расчета межвалкового зазора

Блок определения зазора при изменении силы прокатки рассчитан на работу в реальном времени изменения межвалкового зазора. При изменении силы прокатки происходит пересчет модуля жесткости полосы  $Mn$  с новым значением силы, рассчитывается управляющее изменение межвалкового зазора  $\delta_1$  по формуле (5) и новый межвалковый зазор  $S_2$ , на который сразу же будет перестраиваться нажимное устройство.

$$\delta_1 = \frac{\Delta P}{M_{кп1} + Mn_1}. \tag{5}$$

Блок определения межвалкового зазора при профилировании используется при управлении формой раската в плане. При расчете зазора при профилировании происходит пересчет силы прокатки по новой толщине листа на выходе из клетки. После расчета силы пересчитывают значения модуля жесткости полосы  $Mn$  и модуля жесткости клетки  $Mкп$  по полученному значению силы и заданной толщине на выходе, и рассчитывается управляющее изменение величины межвалкового зазора  $\Delta S$  по формуле (6). По известной величине изменения зазора определяется новый межвалковый зазор  $S_2$ .

$$\Delta S = (h_1 - h_2) \left( 1 + \frac{Mn_2}{Mкп_2} \right). \tag{6}$$

Блок прогнозирования межвалкового зазора при известной величине изменения исходных данных выполняет расчет необходимого зазора по известным изменениям параметров: температурному клину, входящей разнотолщинности, разноширинности, изменению скорости. По известному изменению входящего параметра рассчитывается сила прокатки  $P_2$ , модуль жесткости полосы  $Mn_2$  и модуль жесткости клетки  $M_{кл2}$  и рассчитывается управляющее изменение межвалкового зазора  $\delta$  по формуле (7). По известному изменению межвалкового зазора определяется новый межвалковый зазор  $S_2$ .

$$\delta = \frac{P_2 - P_1}{M_{кл2} + Mn_2}. \quad (7)$$

## ВЫВОДЫ

Модель клетки необходима для автоматического регулирования продольной разнотолщинности полосы и регулирования формой раската в плане. Предложенная модель клетки прокатного стана учитывает модуль жесткости клетки и полосы. Разработанная методика расчета модуля жесткости полосы предназначена для черновой прокатки на толстолистовых станах. Предложена методика по расчету модуля жесткости клетки с учетом нелинейного изменения деформации клетки от нагрузки. Предложенная модель межвалкового зазора предусматривает несколько режимов работы системы регулирования продольной разнотолщинности и предусматривает наличие операции профилирования широкой грани раската.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Л. В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации металла от температуры, скорости и степени деформации / Л. В. Андреев, Г. Г. Тюленев // *Сталь*. – 1972. – № 9. – С. 825–828.
2. Остапенко А. Л. Проектирование технологии горячей прокатки листов и полос / А. Л. Остапенко, Э. Е. Бейгельзимер, Н. В. Миненко // *Металл и литье Украины*. – 2006. – № 7–8. – С. 56–60.
3. Суяров Д. И. Качество тонких стальных листов / Д. И. Суяров, М. А. Беняковский. – М.: *Металлургия*, 1964. – 176 с.
4. Полухин П. И. Тонколистовая прокатка и служба валков / И. П. Полухин, Ю. Д. Железнов, В. П. Полухин. – М.: *Металлургия*, 1967. – 388 с.
5. Повышение точности листового проката / И. М. Меерович, А. И. Герцев, В. С. Горелик, Э. Я. Классен. – М.: *Металлургия*, 1969. – 264 с.
6. Ткалич К. Н. Точная прокатка тонких полос / К. Н. Ткалич, Ю. В. Коновалов. – М.: *Металлургия*, 1972. – 176 с.
7. Автоматизированное проектирование и реализация технологии холодной прокатки электротехнической стали / А. П. Долматов, В. Н. Скороходов, В. П. Настич, А. Е. Чеглов. – М.: *Наука и технологии*, 2000. – 448 с.
8. Жесткость тонких и тончайших полос и лент при холодной прокатке / С. В. Родинков, Ю. В. Гесслер, В. К. Орлов, А. Н. Акимов // *Производство проката*. – 2005. – № 2. – С. 5–9.
9. Клименко В. М. Об определении модуля жесткости полосы / В. М. Клименко, Г. И. Манишин, Ю. В. Коновалов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1977. – № 12. – С. 87–89.
10. Музалевский О. Г. Рациональные технологические схемы производства тонко- и толстолистовой стали на широкополосных станах горячей прокатки / О. Г. Музалевский, Б. Ф. Фитилев, В. М. Бурдин // *Сталь*. – 1976. – № 3. – С. 235–240.
11. Остапенко А. Л. Методики расчета упругих деформаций рабочих клеток станов для производства листов и полос / А. Л. Остапенко, Ю. Н. Белобров, Л. А. Забира // *Черная металлургия. Бюл. НТИ*. – 2008. – № 12. – С. 42–46.

Курдюкова Л. А. – аспирант ДонНТУ;

Козленко Д. А. – ст. инженер НПО «Доникс».

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

НПО «Доникс» – Научно-производственное объединение «Доникс», г. Донецк.

E-mail: omd@fizmet.dgtu.donetsk.ua