The mechanism and regularities of the lubricating action of emulsions and suspensions during the rolling of strips are considered. The regularities of the influence of the lubricant entering the deformation center during rolling are revealed on the formation of the microrelief of the rolled metal. The experimental results are analyzed. Recommendations are given on the use of theoretical solutions in the selection of process lubrication and rolling regimes to meet specified requirements for the quality of the surface of finished metal products.

Key words: metal, quality, surface, microrelief, rolling, lubrication, emulsion, suspension

Поступила 17.07.2017

Наука

УДК. 621. 771. 01

О. П. Максименко /д. т. н./, Е. В. Кузьмин

Днепровский государственный технический университет, г. Днипро, Украина e-mail: zhenya.kuzmin@gmail.com

Саморегулирование процесса с учётом внутренних продольных сил при прокатке в проволочном блоке

O. P. Maksimenko /Dr. Sci. (Tech.)/, E. V. Kuzmin Dniprovskiy State Technical University, Dnipro,

Dniprovskiy State Technical University, Dnipro, Ukraine e-mail: zhenya.kuzmin@gmail.com

Self-regulation of the process taking into account internal longitudinal forces during rolling in a wire block

Цель. На основе определения внутренних продольных сил пластически деформируемого металла и константы непрерывной прокатки дать оценку продольной устойчивости процесса.

Методика. Режимы прокатки рассчитаны с использованием методики, предложенной в работе [5]. **Научная новизна.** Применение средней результирующей продольных сил для расчета геометрических, силовых и кинематических параметров процесса в проволочном блоке.

Практическая значимость. Определение границ саморегулирования процесса прокатки при внешнем воздействии на объект. (Табл. 4. Библиогр. 7 назв.)

Ключевые слова: саморегулирование, продольная устойчивость, проволочный блок.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Как известно, эффективным регулятором равновесия сил в очаге деформации при внешнем воздействии является угол нейтрального сечения ү. В случае колебания каких-либо параметров возникает корректировка скоростного режима, что автоматически приводит к новому устойчивому, равновесному состоянию металла в валках. Теоретически, процесс саморегулирования сохраняется вплоть до выклинивания зоны опережения из очага деформации. Вместе с тем опыты [1; 2] показывают, что равновесие сил в зоне пластической деформации может нарушаться, с последующей частичной или полной пробуксовкой полосы в валках, при наличии зоны опережения. Аналогичный вывод получен теоретически на основе анализа взаимодействия контактных и внутренних сил в очаге деформации [3; 4]. Поэтому предел возможного саморегулирования устойчивого процесса прокатки не всегда ограничивается условием γ = 0. Важную роль при оценке предельных условий прокатки играет результирующая продольных сил пластически деформируемого металла Q[°]_{ср.пр.}[4]. Эта результирующая, являясь силой сопротивления, всегда должна быть направлена противоположно движению полосы. На основе анализа силы Q _{ср.пр.} в работе [5] предложена оценка продольной устойчивости полосы в валках, которая сводится к следующему: при отрицательном значении этой силы процесс совершается устойчиво, без частичных пробуксовок, при нулевом её значении прокатка ведется в предельных условиях, при положительном - процесс невозможен.

Постановка задачи. Аналитически исследовать границы саморегулирования процесса про-

© О. П. Максименко /д. т. н./, Е. В. Кузьмин, 2017 г.

катки в проволочном блоке при внешнем воздействии на объект.

Изложение материалов и результатов работы. Методика [5] была применена для расчета режимов деформации, кинематических и силовых параметров, а также продольной устойчивости полосы в очаге деформации при прокатке в проволочном блоке стана 400/200 ПАО «ДМК». В случае прокатки катанки Ø 5,5 мм из заготовки Ø 17,3 мм режим обжатий был выбран близким к реальному и приведен в табл. 1. При определении режимов натяжения полосы между клетями проволочного блока и силовых условий использовали метод соответственной полосы совместно с методикой оценки продольной устойчивости процесса, а также исходя из закона постоянства секундных объемов. Результаты вычислений приведены в табл. 1. Анализ полученных данных показывает, что во всех клетях проволочного блока процесс протекал устойчиво (Q[°]_{ср.пр.} по

всем клетям принимает отрицательное значение). Удельные натяжения металла между клетями до-

статочно низкие (
$$\left(\frac{\sigma_0}{2k_{cp}}\right)_i$$
 и $\left(\frac{\sigma_1}{2k_{cp}}\right)_3$ не превышают

0,02). Значения опережения с учетом натяжении полосы находятся в пределах 4,2–8,3%. Показанные в табл. 1 режимы деформации и натяжения полосы, а также силовые и кинематические условия будем считать номинальными, полученными при неизменных условиях (в отсутствие внешнего воздействия).

Проанализируем возможность саморегулирования процесса прокатки в проволочном блоке при внешнем воздействии в виде увеличения диаметра исходной заготовки на 0,5 мм. В начальный момент увеличенный объем металла в очаге деформации первой клети приводит к рассогласованию скоростей раската на выходе из неё V₁₁ и на входе во вторую клеть V₀₂.

Таблица 1

Режим деформации и устойчивость процесса при прокатке катанки Ø 5,5 мм из заготовки Ø 17,3 мм

| | Реальные геометрические размеры металла и другие параметры | | | | | | | | | | | | | |
|------|---|------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|------------------|----------|----------------|-----------------------|-----------------|------------------------|-----------------|-------------------|-------|
| N∘ | h ₀ , | h ₁ , | Δh , | b ₀ , | <i>b</i> ₁ , | $V_{0'}$ | $V_{B'}$ | $V_{1'}$ | $F_{0'_2}$ | $F_{1'_2}$ | <i>R</i> _{k'} | B _{k'} | h _{вр} , | t, |
| | MM | MM | MM | MM | MM | M/C | м/с | M/C | MM ² | MM ² | MM | MM | MM | MM |
| 1 | 17,30 | 10,90 | 6,40 | 17,30 | 21,09 | 10,42 | 12,93 | 13,63 | 234,9 | 180,5 | 102,7 | 23,65 | 4,6 | 1,70 |
| 2 | 21,09 | 13,71 | 7,39 | 10,90 | 13,71 | 13,63 | 16,01 | 16,68 | 180,4 | 147,4 | 100,6 | 13,83 | 6,14 | 1,43 |
| 3 | 13,71 | 9,30 | 4,41 | 13,71 | 16,13 | 16,68 | 19,86 | 20,89 | 148,1 | 117,7 | 103,3 | 18,89 | 3,5 | 2,30 |
| 4 | 16,13 | 10,93 | 5,20 | 9,30 | 10,93 | 20,89 | 25,06 | 26,23 | 118,0 | 93,7 | 101,7 | 11,45 | 4,95 | 1,03 |
| 5 | 10,93 | 6,60 | 4,33 | 10,93 | 14,01 | 26,23 | 31,63 | 33,88 | 94,7 | 72,6 | 104,0 | 16,85 | 2,7 | 1,20 |
| 6 | 14,01 | 8,60 | 5,41 | 6,60 | 8,60 | 33,88 | 39,98 | 42,37 | 72,9 | 58,04 | 102,6 | 8,97 | 3,7 | 1,20 |
| 7 | 8,60 | 6,60 | 2,0 | 8,60 | 9,13 | 42,37 | 49,78 | 52,02 | 57,7 | 47,28 | 104,2 | 13,56 | 2,1 | 2,40 |
| 8 | 9,13 | 6,88 | 2,24 | 6,60 | 6,88 | 52,02 | 63,21 | 66,11 | 47,3 | 37,20 | 103,3 | 7,27 | 2,92 | 1,04 |
| 9 | 6,88 | 4,20 | 2,68 | 6,88 | 8,65 | 66,11 | 79,60 | 86,21 | 37,1 | 28,53 | 104,8 | 10,24 | 1,6 | 1,00 |
| 10 | 8,65 | 5,47 | 3,18 | 4,20 | 5,47 | 86,21 | 98,00 | 104,67 | 28,8 | 23,5 | 103,8 | 5,76 | 2,18 | 1,11 |
| | Геометрические размеры, приведенные к соответственной полосе и другие параметры | | | | | | | | | | | | | |
| No | h ₀ , | h ₁ , | Δh , | <i>b</i> ₀ , | <i>b</i> ₁ , | a _y , | 0* | r | $\sqrt{2k}$ | V | Rv^2/h | $\sigma_0/$ | $\sigma_1/$ | S* |
| 1 12 | MM | MM | MM | MM | MM | рад | ι × α | p.np. f | $c_{cp}/2\kappa_{cp}$ | Ŷ | n_{γ}/n_1 | $2k_{cp}$ | $2k_{cp}$ | |
| 1 | 15,33 | 9,66 | 5,67 | 15,33 | 18,69 | 0,23 | 5 -0,0 | 0231 | 1,22 | 0,071 | 0,0533 | 0 | 0,01 | 0,054 |
| 2 | 18,69 | 12,14 | 6,55 | 9,66 | 12,14 | 0,25 | 5 –0,0 | 0205 | 1,16 | 0,071 | 0,0422 | 0,01 | 0,01 | 0,042 |
| 3 | 12,14 | 8,24 | 3,9 | 12,14 | 14,29 | 0,19 | 4 -0,0 |)217 | 1,25 | 0,064 | 0,0518 | 0,01 | 0,02 | 0,052 |
| 4 | 14,29 | 9,68 | 4,61 | 8,24 | 9,68 | 0,21 | 3 -0,0 | 0201 | 1,19 | 0,067 | 0,047 | 0,02 | 0,02 | 0,047 |
| 5 | 9,68 | 5,85 | 3,83 | 9,68 | 12,41 | 0,19 | 2 -0,0 | 0222 | 1,35 | 0,063 | 0,0709 | 0,02 | 0,02 | 0,071 |
| 6 | 12,41 | 7,62 | 4,79 | 5,85 | 7,62 | 0,21 | 6 -0,0 | 0214 | 1,26 | 0,067 | 0,0603 | 0,02 | 0,02 | 0,06 |
| 7 | 7,62 | 5,85 | 1,77 | 7,62 | 8,09 | 0,13 | 0 -0,0 |)172 | 1,28 | 0,050 | 0,0449 | 0,02 | 0,02 | 0,045 |
| 8 | 8,09 | 6,1 | 1,99 | 5,85 | 6,1 | 0,13 | 9 -0,0 |)179 | 1,28 | 0,052 | 0,0465 | 0,02 | 0,02 | 0,046 |
| 9 | 6,1 | 3,72 | 2,38 | 6,1 | 7,67 | 0,15 | 1 -0,0 |)221 | 1,55 | 0,054 | 0,0834 | 0,02 | 0,02 | 0,083 |
| 10 | 7,67 | 4,85 | 2,82 | 3,72 | 4,85 | 0,16 | 5 -0,0 |)221 | 1,42 | 0,057 | 0,0699 | 0,02 | 0 | 0,069 |

Примечание: h_0_{-} начальная толщина; h_1_{-} конечная толщина; Δh – абсолютное обжатие; b_0 – начальная ширина; b_1 – конечная ширина; V_0 – скорость на ходе в клеть; $V_{\rm B}$ – скорость валков; V_1 – скорость на выходе из клети; F_0 – начальная площадь; F_1 – конечная площадь; $R_{\rm k_-}$ катающий радиус валков; $B_{\rm k}$ – ширина калибра; $h_{\rm Bp}$ – глубина вреза калибра; t – зазор; $a_{\rm y}$ – угол захвата при установившемся процессе; $p_{cp}/2k_{cp}$ – безразмерное среднее давление; γ – угол нейтрального сечения; $\sigma_0/2k_{cp}$, $\sigma_1/2k_{cp}$ – удельное безразмерное заднее и переднее натяжения; f = 0,3 – коэффициент трения (для всех случаев)

При этом несколько возрастает поперечное течение металла, увеличивается угол нейтрального сечения и скорость полосы на выходе из первой клети, что ведет к уменьшению натяжения или даже к подопру её перед второй клетью. В следующий момент, в соответствии с выражением [6]:

$$S^{*} = \frac{R\gamma^{2}}{h_{1}} + \frac{\frac{\sigma_{1}}{2k_{cp}} \frac{h_{1}}{R_{k}} \frac{b_{1}}{b_{cp}} - \frac{\sigma_{0}}{2k_{cp}} \frac{h_{0}}{R_{k}} \frac{b_{0}}{b_{cp}}}{4\frac{p_{cp}}{2k} f_{y}}, \qquad (1)$$

начинает падать опережение и скорость полосы на выходе из первой клети.

При определенном натяжении (подпоре) вновь происходит согласование скоростей V_{11} и V_{02} (см. строчки 1 табл. 1 и 2). Далее, согласно закону постоянства секундных объемов при известной ширине раската, определяемой по формуле [7]:

$$\left(\frac{b_1}{b_0}\right)_i = 0,943 + 0,113 \cdot \frac{h_0}{h_1} + 0,004 \cdot \frac{D_{\tilde{o}}}{h_1} + 0,014 \cdot \frac{B_{\kappa}}{b_0}, \quad (2)$$

находили новую скорость полосы на выходе из второй клети $V_{12} = 16,96$ м/с и опережение $S_2^* = 4,3\%$. Затем, в соответствии с (1), саморегулированием корректировали удельное переднее

натяжение во второй клети
$$\left(\frac{\sigma_1}{2k_{cp}}\right)_2 = 0,019$$
. По дан-

ной схеме выполнялась процедура расчета всех необходимых параметров прокатки в остальных проходах. Результаты моделирования процесса саморегулирования приведены в табл. 2.

Заметим, что с увеличением диаметра подката результирующая продольная сила $Q^*_{\rm ср.пр.}$ несколько уменьшилась по абсолютной величине практически во всех проходах. Это, согласно с методикой [5], показывает, что процесс прокатки при внешнем возмущении стал менее устойчивым по сравнению с номинальным. Кроме того, необходимо подчеркнуть, что при прокатке в десятой клети в соответствии с законом постоянства секундных объемов металла, скорость его на выходе из валков должна быть V_{110} = 104,7 м/с при опережении S^*_{10} = 6,8%.

Но, в условиях заданного удельного натяжения

$$\left(\frac{\sigma_0}{2k_{cp}}\right)_{10} = 0,19$$
, это опережение (1) не может быть

больше 3,7 %. Такое несоответствие отражается на скорости V_{010} , что в конечном счете приведет к потере устойчивости полосы по всей линии

Таблица 2

Режим деформации и устойчивость процесса при прокатке катанки Ø 5,5 мм из заготовки Ø 17,8 мм

| Реальные геометрические размеры металла и другие параметры | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------------|-----------|
| No | h ₀ , | h ₁ , | Δh , | <i>b</i> ₀ , | <i>b</i> ₁ , | $V_{0\prime}$ | V _в , | V ₁ , | $F_{0'}$ | F ₁ , | R _k | B _k , | <i>h</i> _{вр} , | <i>t,</i> |
| 1 12 | MM | MM | MM | MM | MM | м/с | м/с | м/с | MM | MM ² | MM | MM | MM | MM |
| 1 | 17,80 | 10,90 | 6,40 | 17,30 | 21,11 | | 12,93 | 13,63 | 3 248, | 7 180,6 | 102,7 | 23,65 | 4,6 | 1,70 |
| 2 | 21,11 | 13,71 | 7,39 | 10,90 | 13,71 | 13,63 | 16,01 | 16,71 | 180, | 6 147,4 | 100,6 | 13,83 | 6,14 | 1,43 |
| 3 | 13,71 | 9,30 | 4,41 | 13,71 | 16,13 | 16,71 | 19,86 | 20,91 | 148, | 1 117,7 | 103,3 | 18,89 | 3,5 | 2,30 |
| 4 | 16,13 | 10,93 | 5,20 | 9,30 | 10,93 | 20,91 | 25,06 | 26,28 | 3 118, | 0 93,7 | 101,7 | 11,45 | 4,95 | 1,03 |
| 5 | 10,93 | 6,60 | 4,33 | 10,93 | 14,01 | 26,28 | 31,63 | 33,92 | 94,7 | 72,6 | 104,0 | 16,85 | 2,7 | 1,20 |
| 6 | 14,01 | 8,60 | 5,41 | 6,60 | 8,60 | 33,92 | 39,98 | 4,42 | 72,9 | 58,04 | 102,6 | 8,97 | 3,7 | 1,20 |
| 7 | 8,60 | 6,60 | 2,0 | 8,60 | 9,13 | 4,42 | 49,78 | 52,05 | 5 57,7 | 47,28 | 104,2 | 13,56 | 2,1 | 2,40 |
| 8 | 9,13 | 6,88 | 2,24 | 6,60 | 6,88 | 52,05 | 63,21 | 66,2 | 47,3 | 37,20 | 103,3 | 7,27 | 2,92 | 1,04 |
| 9 | 6,88 | 4,20 | 2,68 | 6,88 | 8,65 | 66,2 | 79,60 | 86,3 | 37,1 | 28,53 | 104,8 | 10,24 | 1,6 | 1,00 |
| 10 | 8,65 | 5,47 | 3,18 | 4,20 | 5,47 | 86,3 | 98,00 | 104,7 | 28,8 | 23,5 | 103,8 | 5,76 | 2,18 | 1,11 |
| Геометрические размеры, приведенные к соответственной полосе и другие параметры | | | | | | | | | | | тры | | | |
| No | h ₀ , | <i>h</i> ₁ , | Δh , | <i>b</i> ₀ , | <i>b</i> ₁ , | a _y , | 0* | 1 | $\frac{1}{2k}$ | v | Rv^2/h | $\sigma_k/2k$ | $\sigma/2k$ | S* |
| | MM | MM | MM | MM | MM | рад | ι × | cp.np. | cp/ _~cp | Ĭ | <i>ny</i> / <i>n</i> ₁ | 0 ₀ / <u>-</u> <i>n</i> _{cp} | 017 _ <i>n</i> _{cp} | |
| 1 | 15,77 | 9,66 | 5,67 | 15,77 | 18,7 | 0,24 | 4 -0, | 023 | 1,22 | 0,0714 | 0,0543 | 0 | 0,001 | 0,055 |
| 2 | 18,7 | 12,14 | 6,55 | 9,66 | 12,14 | 0,25 | 5 -0, | 022 | 1,15 | 0,0723 | 0,0431 | 0,001 | 0,019 | 0,043 |
| 3 | 12,14 | 8,24 | 3,9 | 12,14 | 14,29 | 0,19 | 4 -0,0 |)202 | 1,234 | 0,0526 | 0,0526 | 0,019 | 0,031 | 0,053 |
| 4 | 14,29 | 9,68 | 4,61 | 8,24 | 9,68 | 0,21 | 3 -0, | 018 | 1,17 | 0,0678 | 0,048 | 0,031 | 0,047 | 0,048 |
| 5 | 9,68 | 5,85 | 3,83 | 9,68 | 12,41 | 0,19 | 2 -0, | 019 | 1,3 | 0,0633 | 0,071 | 0,047 | 0,061 | 0,071 |
| 6 | 12,41 | 7,62 | 4,79 | 5,85 | 7,62 | 0,21 | 6 -0,0 |)155 | 1,19 | 0,0670 | 0,061 | 0,061 | 0,085 | 0,061 |
| 7 | 7,62 | 5,85 | 1,77 | 7,62 | 8,09 | 0,13 | 0 -0,0 |)114 | 1,18 | 0,0504 | 0,0454 | 0,085 | 0,108 | 0,045 |
| 8 | 8,09 | 6,1 | 1,99 | 5,85 | 6,1 | 0,13 | 9 -0,0 | 0098 | 1,14 | 0,0527 | 0,0472 | 0,108 | 0,137 | 0,047 |
| 9 | 6,1 | 3,72 | 2,38 | 6,1 | 7,67 | 0,15 | 1 -0,0 |)126 | 1,31 | 0,0546 | 0,0839 | 0,137 | 0,19 | 0,084 |
| 10 | 7,67 | 4,85 | 2,82 | 3,72 | 4,85 | 0,16 | 5 -0 | ,01 | 1,3 | 0,0452 | 0,0452 | 0,19 | 0 | 0,037 |

© Металлургическая и горнорудная промышленность/2017 � 6

проволочного блока. Поэтому результаты расчета саморегулирования процесса нуждаются в корректировке. Несколько увеличим переднее

натяжение в первой клети
$$\left(\frac{\sigma_1}{2k_{cp}}\right)_1 = 0,003$$
 и по-

вторим процедуру расчета. Результаты вычислений приведены в табл. 3. Как следует из таблицы, после корректировки натяжения во всех проходах соблюдается равенство $S = S^*$, значения $Q^*_{cp,np.} < 0$ по всем клетям, т. е. прокатка в проволочном бло-

Оценим вероятность саморегулирования процесса при увеличении диаметра подката на 0,92 мм. Геометрические и кинематические параметры реальной и соответственной полосы приведены в табл. 4. Предварительные расчеты

показали, что при $\left(\frac{\sigma_1}{2k_{cp}}\right)_1 > 0$ выйти на устойчи-

вый процесс деформации не удаётся. Поэтому

Таблица 3

Скорректированный режим деформации для катанки Ø 5,5 мм из заготовки Ø 17,8 мм

| | Реальные геометрические размеры металла и другие параметры | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|-------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|------------------|---------------------------------|--------|------|-----------------|-----------------|----------------|------------------------------|-------------------------------|-------|
| No | h ₀ , | <i>h</i> ₁ , | Δh , | <i>b</i> ₀ , | <i>b</i> ₁ , | $V_{0'}$ | $V_{\scriptscriptstyle \rm B'}$ | V | 11 | $F_{0'}$ | $F_{1'}$ | R _k | <i>B</i> _{k'} | <i>h</i> _{вр} , | t, |
| 1 № | MM | MM | MM | MM | MM | м/с | м/с | M/ | ′c | MM ² | MM ² | MM | MM | MM | MM |
| 1 | 17,80 | 10,90 | 6,40 | 17,30 | 21,11 | | 12,93 | 16, | 62 | 248,7 | 180,6 | 102,7 | 23,65 | 4,6 | 1,70 |
| 2 | 21,11 | 13,71 | 7,39 | 10,90 | 13,71 | 16,62 | 16,01 | 16, | 96 | 180,6 | 147,4 | 100,6 | 13,83 | 6,14 | 1,43 |
| 3 | 13,71 | 9,30 | 4,41 | 13,71 | 16,13 | 16,96 | 19,86 | 20, | 89 | 148,1 | 117,7 | 103,3 | 18,89 | 3,5 | 2,30 |
| 4 | 16,13 | 10,93 | 5,20 | 9,30 | 10,93 | 20,89 | 25,06 | 26, | 26 | 118,0 | 93,7 | 101,7 | 11,45 | 4,95 | 1,03 |
| 5 | 10,93 | 6,60 | 4,33 | 10,93 | 14,01 | 26,26 | 31,63 | 33, | 89 | 94,7 | 72,6 | 104,0 | 16,85 | 2,7 | 1,20 |
| 6 | 14,01 | 8,60 | 5,41 | 6,60 | 8,60 | 33,89 | 39,98 | 42, | 38 | 72,9 | 58,04 | 102,6 | 8,97 | 3,7 | 1,20 |
| 7 | 8,60 | 6,60 | 2,0 | 8,60 | 9,13 | 42,38 | 49,78 | 51, | 99 | 57,7 | 47,28 | 104,2 | 13,56 | 2,1 | 2,40 |
| 8 | 9,13 | 6,88 | 2,24 | 6,60 | 6,88 | 51,99 | 63,21 | 66, | 19 | 47,3 | 37,20 | 103,3 | 7,27 | 2,92 | 1,04 |
| 9 | 6,88 | 4,20 | 2,68 | 6,88 | 8,65 | 66,19 | 79,60 | 86, | 24 | 37,1 | 28,53 | 104,8 | 10,24 | 1,6 | 1,00 |
| 10 | 8,65 | 5,47 | 3,18 | 4,20 | 5,47 | 86,24 | 98,00 | 104 | ,73 | 28,8 | 23,5 | 103,8 | 5,76 | 2,18 | 1,11 |
| Ι | Геометрические размеры металла, приведенные к соответственной полосе и другие параметры | | | | | | | | | | | | | | |
| N∘ | h ₀ , | h ₁ , | Δh , | <i>b</i> ₀ , | <i>b</i> ₁ , | a _y , | 0 | 6 | n | /2k | v | Rv^2/h | $\sigma_c/2k$ | $\sigma_{k}/2k$ | S* |
| | MM | MM | MM | MM | MM | рад | <u>ι</u> ~ | cp.np. | P cp | / <u> </u> | 1 | | 00, <u>-</u> , _{cp} | 017 _ ,v _{cp} | |
| 1 | 15,77 | 9,66 | 5,67 | 15,77 | 18,7 | 0,24 | 4 -0, | 0231 | 1 | ,22 | 0,0709 | 0,0543 | 0 | 0,003 | 0,054 |
| 2 | 18,7 | 12,14 | 6,55 | 9,66 | 12,14 | 0,25 | 5 -0 | ,021 | 1 | ,16 | 0,0720 | 0,0431 | 0,003 | 0,006 | 0,043 |
| 3 | 12,14 | 8,24 | 3,9 | 12,14 | 14,29 | 0,19 | 4 -0 | ,022 | 1 | ,25 | 0,0646 | 0,0526 | 0,006 | 0,01 | 0,052 |
| 4 | 14,29 | 9,68 | 4,61 | 8,24 | 9,68 | 0,21 | 3 -0, | 0215 | 1 | ,21 | 0,0674 | 0,048 | 0,01 | 0,013 | 0,048 |
| 5 | 9,68 | 5,85 | 3,83 | 9,68 | 12,41 | 0,19 | 2 -0, | 0229 | 1 | ,37 | 0,0634 | 0,071 | 0,013 | 0,016 | 0,071 |
| 6 | 12,41 | 7,62 | 4,79 | 5,85 | 7,62 | 0,21 | 6 -0, | 0219 | 1 | ,26 | 0,0671 | 0,061 | 0,016 | 0,018 | 0,06 |
| 7 | 7,62 | 5,85 | 1,77 | 7,62 | 8,09 | 0,13 | 0 -0, | 0172 | 1 | ,28 | 0,0502 | 0,0454 | 0,018 | 0,02 | 0,044 |
| 8 | 8,09 | 6,1 | 1,99 | 5,85 | 6,1 | 0,13 | 9 -0, | 0179 | | 1,3 | 0,0524 | 0,0472 | 0,02 | 0,02 | 0,046 |
| 9 | 6,1 | 3,72 | 2,38 | 6,1 | 7,67 | 0,15 | 1 -0, | 0221 | 1 | ,28 | 0,0544 | 0,0839 | 0,02 | 0,02 | 0,083 |
| 10 | 7,67 | 4,85 | 2,82 | 3,72 | 4,85 | 0,16 | 5 –0, | 0221 | 1 | ,25 | 0,0572 | 0,0452 | 0,02 | 0 | 0,069 |

Режим деформации и устойчивость процесса при прокатке катанки Ø 5,5 мм из заготовки Ø 18,22 мм

| | Реальные геометрические размеры металла и другие параметры | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--|------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------------|------------|--|
| No | h ₀ , | h ₁ , | Δh , | <i>b</i> ₀ , | <i>b</i> ₁ , | V ₀ , | V _{в'} | V ₁ , | $F_{0'}$ | F ₁ , | R _k , | <i>B</i> _k , | h _{вр} , | <i>t</i> , | |
| 1 № | MM | MM | MM | MM | MM | м/с | м/с | м/с | MM ² | MM ² | MM | MM | MM | MM | |
| 1 | 18,22 | 10,90 | 6,40 | 18,22 | 21,15 | | 12,93 | 13,63 | 260,6 | 181 | 102,7 | 23,65 | 4,6 | 1,70 | |
| 2 | 21,15 | 13,71 | 7,39 | 10,90 | 13,71 | 12,93 | 16,01 | 16,73 | 180,6 | 147,4 | 100,6 | 13,83 | 6,14 | 1,43 | |
| 3 | 13,71 | 9,30 | 4,41 | 13,71 | 16,13 | 16,01 | 19,86 | 20,96 | 148,1 | 117,7 | 103,3 | 18,89 | 3,5 | 2,30 | |
| 4 | 16,13 | 10,93 | 5,20 | 9,30 | 10,93 | 19,86 | 25,06 | 26,34 | 118,0 | 93,7 | 101,7 | 11,45 | 4,95 | 1,03 | |
| 5 | 10,93 | 6,60 | 4,33 | 10,93 | 14,01 | 25,06 | 31,63 | 33,99 | 94,7 | 72,6 | 104,0 | 16,85 | 2,7 | 1,20 | |
| 6 | 14,01 | 8,60 | 5,41 | 6,60 | 8,60 | 31,63 | 39,98 | 42,50 | 72,9 | 58,04 | 102,6 | 8,97 | 3,7 | 1,20 | |
| 7 | 8,60 | 6,60 | 2,0 | 8,60 | 9,13 | 39,98 | 49,78 | 52,15 | 57,7 | 47,28 | 104,2 | 13,56 | 2,1 | 2,40 | |

© Металлургическая и горнорудная промышленность/2017 � 6

Таблица 4

| Г | Геометрические размеры металла, приведенные к соответственной полосе и другие параметры | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------|--------|-----------------|--------------------|--------------------|-------|--|--|
| Nº | <i>h</i> ₀ , мм | h ₁ , мм | <u>Δ</u> h, мм | <i>b</i> ₀ , мм | <i>b</i> ₁ , мм | а _у , рад | Q [*] _{cp.np.} | $p_{cp}/2k_{cp}$ | γ | $R\gamma^2/h_1$ | $\sigma_0/2k_{cp}$ | $\sigma_1/2k_{cp}$ | S* | | |
| 1 | 16,14 | 9,66 | 5,67 | 16,14 | 18,75 | 0,251 | -0,0233 | 1,22 | 0,0712 | 0,054 | 0 | 0 | 0,054 | | |
| 2 | 18,75 | 12,14 | 6,55 | 9,66 | 12,14 | 0,256 | -0,0214 | 1,16 | 0,0745 | 0,046 | 0 | 0,025 | 0,046 | | |
| 3 | 12,14 | 8,24 | 3,9 | 12,14 | 14,29 | 0,194 | -0,0187 | 1,21 | 0,0663 | 0,055 | 0,025 | 0,06 | 0,055 | | |
| 4 | 14,29 | 9,68 | 4,61 | 8,24 | 9,68 | 0,213 | -0,0131 | 1,12 | 0,0695 | 0,051 | 0,06 | 0,107 | 0,050 | | |
| 5 | 9,68 | 5,85 | 3,83 | 9,68 | 12,41 | 0,192 | -0,0120 | 1,18 | 0,0642 | 0,073 | 0,107 | 0,17 | 0,075 | | |
| 6 | 12,41 | 7,62 | 4,79 | 5,85 | 7,62 | 0,216 | -0,0018 | 0,993 | 0,0684 | 0,063 | 0,17 | 0,265 | 0,063 | | |
| 7 | 7,62 | 5,85 | 1,77 | 7,62 | 8,09 | 0,130 | 0,0030 | 0,903 | 0,0512 | 0,046 | 0,265 | 0,34 | 0,047 | | |

приняли удельное натяжение в первом проходе равным нулю.

Результаты расчетов показаны в табл. 4, из которой следует, что от прохода к проходу удельные натяжения существенно возрастают. В шестом проходе переднее удельное натяже-

ние составило $\left(\frac{\sigma_1}{2k_{cp}}\right)_6 = 0,265$. При этом результирующая продольных сил по клетям блока по

абсолютной величине снижается и в шестом проходе составляет $Q^*_{cp,np.} < -0,0018$. При указанном заднем удельном натяжении полосы прокатка в седьмой клети становится невозможной $(Q^*_{cp,np.} > 0)$, т. к. втягивающих металл в валки сил недостаточно для обеспечения устойчивого процесса. В этом проходе, конечно, можно создать условия для нормальной прокатки за счет увеличения переднего натяжения. Но при выполнении этого условия процесс в восьмой клети тем более станет невозможным по той же причине.

Выводы. Проведенное исследование показало, что теоретическим путем можно установить границы саморегулирования процесса прокатки в проволочном блоке при внешнем воздействии на объект. Причем методика позволяет дать оценку саморегулирования не только по изменению размеров исходной заготовки, но и по величине выработки калибров, изменения коэффициента трения, температуры полосы и других параметров.

Библиографический список / References

1. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков / А. П. Грудев. – М.: Интермет Инжиниринг, 1998. – 283 с.

Grudev A. P. Zakhvatyvayushchaya sposobnost' valkov. Moscow, Internet Inzheniring, 1988, 283 p.

2. Прокофьев В. И. Максимальные углы захвата при установившемся процессе прокатки / В. И. Прокофьев // Обработка металлов давлением: Научные труды, ДМетИ. – М.: Металлургиздат, 1962. – Вып. XLVIII. – С. 234–239. Prokofev V. I. *Maksimalnyie uglyi zahvata pri ustanovivshemsya protsesse prokatki*. Obrabotka metallov davleniem: Nauchnyie trudyi, DMetI. Moscow, Metallurgizdat. 1962, issue XLVIII, pp. 234-239.

3. Максименко О. П. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, Р. Я. Романюк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 6. – С. 47–49.

Maksimenko O. P., Loboyko D. I., Romanyuk R. Ya. Analiz silovogo vzaimodeystviya v ochage deformatsii pri prokatke. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. 2013, no. 6, pp. 47-49.

4. Максименко О. П. Анализ продольной устойчивости процесса прокатки с учетом внутренних сил и режима натяжения полосы / О. П. Максименко, М. К. Измайлова, Д. И. Лобойко. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 6. – С. 47–49.

Maksimenko O. P., Izmaylova M. K., Loboyko D. I. *Analiz prodol'noyustoychivosti protsessa prokatki s uchetom vnutrennikh sil i rezhima natyazheniya polosy*. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. 2015, no. 1, pp. 59-62.

5. Максименко О. П. Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контакных условий: монография / О. П. Максименко, Д. И. Лобой-ко, М. К. Измайлова. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2016. – 212 с.

Maksimenko O. P., Loboyko D. I., Izmaylova M. K. *Prodol'naya ustoychivost' polosy v valkakh s analizom kontaktnykh usloviy*. Dneprodzerzhinsk, DDTU, 2016, 213 p.

6. Грудев А. П. Теория прокатки / А. П. Грудев. – [изд. 2-е перераб. и доп.] – М.: Интермет Инжиниринг, 1998. – 283 с.

Grudev A. P. *Teoriya prokatki*. Moscow, Intermet Inzhiniring, 1998, 283 p.

7. Уширение при прокатке в калибрах вытяжной системы «овал-круг» / М. Н. Штода, С. В. Ершов, К. Г. Геймур, В. М. Самохвал, С. Ю. Гаврилин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30 (1202). – С. 79–87.

Shtoda M. N., Ershov S. V., Geymur K. G., Samohval V. M., Gavrilin S. Yu. *Ushirenie pri prokatke v kalibrah vyityazhnoy sistemyi "ovalkrug"*. Visnik NTU "HPI". Seriya: InnovatsIynI tehnologiyi ta obladnannya obrobki materIalIv u mashinobuduvannI ta metalurgiyi. Kharkiv, NTU "HPI", 2016, no. 30 (1202), pp. 79-87.

Purpose. On the basis of the determination of the internal longitudinal forces of the plastically deformable

metal and the constant of rolling, give an estimate of the longitudinal stability of the process.

Methodology. Rolling modes are calculated using the technique proposed in [5].

Originality. Application of the average resultant, longitudinal forces, to calculate the geometric, force and kinematic parameters of the process in the wire block.

Practical value. Determination of the boundaries of self-regulation of the rolling process under external influence on the object.

Key words: self-regulation, longitudinal stability, wire block.

Поступила 24.07.2017

