

диффузии, при которой крупные частицы оседают по сложной траектории, а мелкие постоянно находятся во взвешенном состоянии.

3. Разработана математическая модель процесса переноса пылевых частиц воздушным потоком в подземных горных выработках.

4. Получена аналитическая зависимость скорости оседания пылевых частиц от скорости движения воздушного потока в горной выработке, плотности пылевых частиц и их диаметра, а также вязкости среды оседания.

5. Установлены границы оседания на вентиляционном штреке от выхода из лавы различных фракций угольной пыли: для частиц диаметром 50 мкм — 27 м; 25 мкм — 125 м; 10 мкм — 773 м; 5 мкм — 3250 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлёв В.П., Демишева Е.Ф., Спиринов Л.А. Аэродинамические методы борьбы с угольной пылью. Из-во Ростовского университета, 1988. – 144 с.
2. Романенко С.Б. Аппаратно-программный комплекс контроля уровней запылённости на базе датчиков нового поколения / Горный информационно-аналитический бюллетень, 2007. – С. 273–279.
3. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М.: Из-во «Наука». 1981. – 174 с.
4. Бурчаков А.С., Москаленко Э.М. Динамика аэрозолей в горных выработках. – М.: Наука, 1965. – 65 с.
5. Борьба с пылью в очистных забоях / Гродель Г.С., Губский Ю.Н., Кривохижа Б.М., Шпак А.Ф. – К.: Техніка, 1983. – 71 с.
6. Аэрология горных предприятий: учеб. пособие / В.И. Голинько, Я.Я. Лебедев, А.А. Литвиненко, О.А. Муха; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д.:НГУ, 2015. – 206 с.
7. Рудничная вентиляция: Справочник / Гращенко Н.Ф., Петросян А.Э., Фролов М.А. и др. – М.: Недра, 1988. – 440 с.
8. Брэдишоу П. Введение в турбулентность и её измерение. – М.: Мир, 1974. – 280 с.

пост. 26.09.2017

О.П. МАКСИМЕНКО, д.т.н., профессор, O.maks1940@gmail.com

Е.В. КУЗЬМИН, аспирант, zhenya.kuzmin1993@gmail.com

Д.И. ЛОБОЙКО, зав. лаборатории, darloboyko@gmail.com

В.О. ЛЫСАК, магистрант

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское

Моделирование процесса саморегулирования при прокатке в проволочном блоке стана 400/200 ПАО «ДМК»

На основе определения внутренних продольных сил пластически деформируемого металла и константы непрерывной прокатки в работе дана оценка продольной устойчивости процесса, а также показаны возможности его саморегулирования при внешнем возмущении на примере формоизменения раската в проволочном блоке стана 400/200 ПАО «ДМК».

On the basis of the determination of the internal longitudinal forces of a plastically metal and the constant of continuous rolling, in this work is given an estimate of the longitudinal stability of the process as well as the possibilities of its self-regulation under external disturbances, for example, an external disturbance in the case of a forming of a metal in a wire block 400/200 PJSC “DMK”.

Постановка проблемы

Как известно, эффективным регулятором равновесия сил в очаге деформации при внешнем воздействии является угол нейтрального сечения γ . 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 $\gamma = 0$. 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 положительном — процесс невозможен.

Формулировка цели исследования

Аналитически исследовать границы саморегулирования процесса прокатки в проволочном блоке при внешнем воздействии на объект.

Изложение основного материала

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 диамет-

ром 5,5 мм из заготовки диаметром 17,3 мм режим обжатий был выбран близким к реальному и приведён 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 ($Q_{\text{ср.пр.}}^*$ по всем клетям принимает отрицательное зна-

чение). Удельные натяжения металла между клетями достаточно низкие $\left(\frac{\sigma_0}{2k_{\text{ср}}}\right)_i$ и $\left(\frac{\sigma_1}{2k_{\text{ср}}}\right)_i$ не превышает 0,02). Значения опережения с учётом натяжения полосы находится 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 взаимодействия).

Таблица 1. Режим деформации и устойчивости процесса при прокатке катанки диаметром 5,5 мм из заготовки 17,8 мм

| Реальные геометрические размеры металла и другие параметры | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|------------|-----------------|------------|------------|------------------|-----------------------|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------|
| № | h_0 , мм | h_1 , мм | Δh , мм | b_0 , мм | b_1 , мм | V_0 , м/с | V_B , м/с | V_1 , м/с | F_0 , мм ² | F_1 , мм ² | R_k , мм | B_k , мм | $h_{\text{вп}}$, мм | t , мм |
| 1 | 17,80 | 10,90 | 6,40 | 17,30 | 21,11 | - | 12,93 | 13,63 | 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 | 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 | 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 | 6,68 | 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 | | | | | | | | | | | | | | |
| № | h_0 , мм | h_1 , мм | Δh , мм | b_0 , мм | b_1 , мм | α_y , рад | $Q_{\text{ср.пр.}}^*$ | $\frac{p_{\text{ср}}}{2k_{\text{ср}}}$ | γ , рад | $\frac{R\gamma^2}{h_1}$ | $\frac{\sigma_0}{2k_{\text{ср}}}$ | $\frac{\sigma_1}{2k_{\text{ср}}}$ | S^* | |
| 1 | 15,77 | 9,66 | 5,67 | 15,77 | 18,7 | 0,244 | -0,023 | 1,22 | 0,0714 | 0,0543 | 0 | 0,001 | 0,055 | |
| 2 | 18,7 | 12,14 | 6,55 | 9,66 | 12,14 | 0,255 | -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 | 0,194 | -0,0202 | 1,234 | 0,0526 | 0,0526 | 0,019 | 0,031 | 0,053 | |
| 4 | 14,29 | 9,68 | 4,61 | 8,24 | 9,68 | 0,213 | -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 | 0,192 | -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 | 0,216 | -0,0155 | 1,19 | 0,0670 | 0,061 | 0,061 | 0,085 | 0,061 | |
| 7 | 7,62 | 5,85 | 1,77 | 7,62 | 8,09 | 0,130 | -0,0114 | 1,18 | 0,0504 | 0,0454 | 0,085 | 0,108 | 0,045 | |
| 8 | 8,06 | 6,1 | 1,99 | 5,85 | 6,1 | 0,139 | -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 | 0,51 | -0,0126 | 1,31 | 0,0546 | 0,0839 | 0,137 | 0,19 | 0,084 | |
| 10 | 7,67 | 4,85 | 2,82 | 3,72 | 4,85 | 0,165 | -0,01 | 1,3 | 0,0452 | 0,0452 | 0,19 | 0 | 0,037 | |

Примечание: h_0 — начальная толщина; h_1 — конечная толщина; Δh — абсолютное обжатие; b_0 — начальная ширина; b_1 — конечная ширина; V_0 — скорость на входе в клеть; V_B — скорость валков; V_1 — скорость на выходе из клетки; F_0 — начальная площадь; F_1 — конечная площадь; R_k — катающий радиус валков; B_k — ширина калибра; $h_{\text{вп}}$ — глубина вреза калибра; t — зазор; α_y — угол захвата при установившемся процессе; $p_{\text{ср}}/2k_{\text{ср}}$ — безразмерное среднее давление; γ — угол нейтрального сечения; $\sigma_0/2k_{\text{ср}}$, $\sigma_1/2k_{\text{ср}}$ — удельное безразмерное заднее и переднее натяжение; $f = 0,3$ — коэффициент трения (для всех случаев).

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 клетки приводит к рассогласованию скоростей раската на выходе из неё V_{11} и на входе во вторую клеть V_{02} .

При этом несколько возрастает поперечное течение металла, увеличивается угол нейтрального сечения и скорость полосы на выходе из первой клетки, что ведет к уменьшению натяжения или даже к подпору её

перед второй клетью. В следующий момент, в соответствии с выражением [6]:

$$S^* = \frac{R\gamma^2}{h_1} + \frac{\frac{\sigma_1}{2k_{\text{ср}}} \frac{h_1}{R_k} \frac{b_1}{b_{\text{ср}}} - \frac{\sigma_0}{2k_{\text{ср}}} \frac{h_0}{R_k} \frac{b_0}{b_{\text{ср}}}}{4 \frac{p_{\text{ср}}}{2k} f_y}, \quad (1)$$

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

При определенном натяжении (подпоре) вновь происходит согласование скоростей V_{11} и V_{02} (см.

строчки 1 табл. 1 и 2). Далее, согласно закона постоянства секундных объемов при известной ширине раската, определяемой по формуле [7]:

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

находили новую скорость полосы на выходе из второй клетки $V_{12} = 16,96 \text{ м/с}$ и опережение $S_2^* = 4,3\%$. Затем, в

соответствии с (1), саморегулированием корректировали удельное переднее натяжение во второй клетки

$$\left(\frac{\sigma_1}{2k_{cp}}\right)_2 = 0,019. \text{ По данной схеме выполнялась проце-}$$

дура расчета всех необходимых параметров прокатки в остальных проходах. Результаты моделирования процесса саморегулирования приведены в табл. 2.

Таблица 2. Режим деформации и устойчивости процесса при прокатке катанки диаметром 5,5 мм из заготовки 17,8 мм

| Реальные геометрические размеры металла и другие параметры | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|------------|-----------------|------------|------------|------------------|---------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|----------|
| № | h_0 , мм | h_1 , мм | Δh , мм | b_0 , мм | b_1 , мм | V_0 , м/с | V_B , м/с | V_1 , м/с | F_0 , мм ² | F_1 , мм ² | R_k , мм | B_k , мм | $h_{вп}$, мм | t , мм |
| 1 | 17,80 | 10,90 | 6,40 | 17,30 | 21,11 | - | 12,93 | 13,63 | 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 | 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 | 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 | 6,68 | 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 | | | | | | | | | | | | | | |
| № | h_0 , мм | h_1 , мм | Δh , мм | b_0 , мм | b_1 , мм | α_y , рад | $Q_{ср.пр}^*$ | $\frac{P_{ср}}{2k_{ср}}$ | γ , рад | $\frac{R\gamma^2}{h_1}$ | $\frac{\sigma_0}{2k_{ср}}$ | $\frac{\sigma_1}{2k_{ср}}$ | S^* | |
| 1 | 15,77 | 9,66 | 5,67 | 15,77 | 18,7 | 0,244 | -0,023 | 1,22 | 0,0714 | 0,0543 | 0 | 0,001 | 0,055 | |
| 2 | 18,7 | 12,14 | 6,55 | 9,66 | 12,14 | 0,255 | -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 | 0,194 | -0,0202 | 1,234 | 0,0526 | 0,0526 | 0,019 | 0,031 | 0,053 | |
| 4 | 14,29 | 9,68 | 4,61 | 8,24 | 9,68 | 0,213 | -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 | 0,192 | -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 | 0,216 | -0,0155 | 1,19 | 0,0670 | 0,061 | 0,061 | 0,085 | 0,061 | |
| 7 | 7,62 | 5,85 | 1,77 | 7,62 | 8,09 | 0,130 | -0,0114 | 1,18 | 0,0504 | 0,0454 | 0,085 | 0,108 | 0,045 | |
| 8 | 8,06 | 6,1 | 1,99 | 5,85 | 6,1 | 0,139 | -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 | 0,51 | -0,0126 | 1,31 | 0,0546 | 0,0839 | 0,137 | 0,19 | 0,084 | |
| 10 | 7,67 | 4,85 | 2,82 | 3,72 | 4,85 | 0,165 | -0,01 | 1,3 | 0,0452 | 0,0452 | 0,19 | 0 | 0,037 | |

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

Но, в условиях заданного удельного натяжения $\left(\frac{\sigma_0}{2k_{ср}}\right)_{10} = 0,19$, 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 проволочного блока. Поэтому результаты расчета саморегулирования процесса нуждаются в корректировке. Несколько увеличим переднее натяжение в первой клетки

$$\left(\frac{\sigma_1}{2k_{ср}}\right)_1 = 0,003 \text{ и повторим процедуру расчета. Ре-}$$

зультаты вычислений приведены в табл. 3. Как следует из таблицы после корректировки натяжения во всех проходах соблюдается равенство $S = S^*$, $Q_{ср.пр}^* < 0$ значения по всем клетям, т.е. прокатка в проволочном блоке перешла в новое устойчивое состояние за счет саморегулирования процесса.

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 $\left(\frac{\sigma_1}{2k_{ср}}\right)_1 > 0$ вый-

ти на устойчивый процесс деформации не удаётся. Поэтому 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 пе-

реднее удельное натяжение 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 $Q_{cp.пр.}^* = -0,0018$. При указанном заднем удельном натяжении полосы в седьмой

клетки становится невозможной ($Q_{cp.пр.}^* > 0$), 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 клетке тем более станет невозможным по той же причине.

Таблица 3. Скорректированный режим деформации для катанки диаметром 5,5 мм из заготовки 17,8 мм

| Реальные геометрические размеры металла и другие параметры | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|------------|-----------------|------------|------------|------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|----------|
| № | h_0 , мм | h_1 , мм | Δh , мм | b_0 , мм | b_1 , мм | V_0 , м/с | V_B , м/с | V_1 , м/с | F_0 , мм ² | F_1 , мм ² | R_k , мм | B_k , мм | $h_{вр}$, мм | t , мм |
| 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 | 20,86 | 148,1 | 117,7 | 103,3 | 18,89 | 3,5 | 2,30 |
| 4 | 16,13 | 10,93 | 5,20 | 9,30 | 10,93 | 20,86 | 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 | 6,68 | 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 |
| Геометрические размеры, приведенные к соответственной полосе и другие параметры | | | | | | | | | | | | | | |
| № | h_0 , мм | h_1 , мм | Δh , мм | b_0 , мм | b_1 , мм | α_y , рад | $Q_{cp.пр.}^*$ | $\frac{P_{cp}}{2k_{cp}}$ | γ , рад | $\frac{R\gamma^2}{h_1}$ | $\frac{\sigma_0}{2k_{cp}}$ | $\frac{\sigma_1}{2k_{cp}}$ | S^* | |
| 1 | 15,77 | 9,66 | 5,67 | 15,77 | 18,7 | 0,244 | -0,0231 | 1,22 | 0,0709 | 0,0543 | 0 | 0,003 | 0,054 | |
| 2 | 18,7 | 12,14 | 6,55 | 9,66 | 12,14 | 0,255 | -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 | 0,194 | -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 | 0,213 | -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 | 0,192 | -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 | 0,216 | -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 | 0,130 | -0,0172 | 1,28 | 0,0502 | 0,0454 | 0,018 | 0,02 | 0,044 | |
| 8 | 8,06 | 6,1 | 1,99 | 5,85 | 6,1 | 0,139 | -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 | 0,51 | -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 | 0,165 | -0,0221 | 1,25 | 0,0472 | 0,0452 | 0,02 | 0 | 0,069 | |

Таблица 4. Режим деформации и устойчивости процесса при прокатке катанки диаметром 5,5 мм из заготовки 18,22 мм

| Реальные геометрические размеры металла и другие параметры | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|------------|-----------------|------------|------------|------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|----------|
| № | h_0 , мм | h_1 , мм | Δh , мм | b_0 , мм | b_1 , мм | V_0 , м/с | V_B , м/с | V_1 , м/с | F_0 , мм ² | F_1 , мм ² | R_k , мм | B_k , мм | $h_{вр}$, мм | t , мм |
| 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 | 57,5 | 47,28 | 104,2 | 13,56 | 2,1 | 2,40 |
| Геометрические размеры, приведенные к соответственной полосе и другие параметры | | | | | | | | | | | | | | |
| № | h_0 , мм | h_1 , мм | Δh , мм | b_0 , мм | b_1 , мм | α_y , рад | $Q_{cp.пр.}^*$ | $\frac{P_{cp}}{2k_{cp}}$ | γ , рад | $\frac{R\gamma^2}{h_1}$ | $\frac{\sigma_0}{2k_{cp}}$ | $\frac{\sigma_1}{2k_{cp}}$ | 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 | |

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грудев А.П. Захватывающая способность прокатных валков / А.П. Грудев. – М : «СП Интермет Инжиниринг», 1998. – 283 с.
2. Прокофьев В.И. Максимальные углы захвата при установившемся процессе прокатки / В. И. Прокофьев // Обработка металлов давлением : Научные труды, ДМетИ. – М. : Metallurgizdat. – 1962. – Вып. XLVIII. – С. 234–239.
3. Максименко О.П. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке / О.П. Максименко, Д.И. Лобойко, Р.Я. Романюк // Metallurgическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 6. – С. 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 // Metallurgическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 1. – С. 59–62.
5. Максименко О.П. Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий: Монография / О.П. Максименко, Д. И. Лобойко, М. К. Измайлова. – Днепропетровск : «ДДТУ», 2016. – 212 с.
6. Грудев А.П. Теория прокатки / А. П. Грудев. [изд. 2-е перераб. и доп.]– М : «СП Интермет Инжиниринг», 2001. – 280 с.
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 «ХП». Серія Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 30(1202). – С. 79–87.

пост. 02.10.2017