

УДК 621.771.63

Л.А. ИСАЕВИЧ, д-р техн. наук,
М.И. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук,
Д.М. ИВАНИЦКИЙ, канд. техн. наук,
М.М. МАЛЕКИАН (БНТУ)

РАСЧЕТ ОПЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ ПОЛОС ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ С ПОСТОЯННЫМ ОБЖАТИЕМ

При продольной периодической прокатке опережение, сопровождающее процесс, изменяется по мере увеличения или уменьшения обжатия [1]. Это необходимо учитывать при расчете опережения, особенно на участках с переменным обжатием. Опережение на участках с нарастающим обжатием больше, чем оно было бы при среднем, но постоянном обжатии.

Для расчетов обычно используют довольно сложные методики, например, методику расчета переменных скоростей [2]. В данной статье предлагается другой подход. Допускаем, что в рассматриваемом случае не будет изменяться величина критического (нейтрального) угла γ , определяющего положение критического сечения, разделяющего потоки металла на участки опережения и отставания.

Для обеспечения требуемых размеров готового профиля необходим учет опережения на различных фиксированных участках полосы. При такой постановке формула для расчета опережения может быть получена из закона сохранения масс.

Для любого момента времени согласно рисунку 1 справедливо условие [3]

$$Q_{\beta} = Q_{\gamma}, \quad (1)$$

где Q_β и Q_γ – потоки металла, проходящие через соответствующие сечения очага деформации в произвольный момент времени.

В критическом сечении очага деформации поток продольной скорости металла опишется уравнением

$$Q_\gamma = h_\gamma b_\gamma R \omega \cos(\gamma - \beta), \quad (2)$$

где h_γ и b_γ – высота и ширина полосы в критическом сечении; γ – критический угол; R – радиус вала.

Соответственно поток в сечении выхода металла из валков будет

$$Q_\beta = h_\beta b_\beta R(1 + S) \omega \cos \beta, \quad (3)$$

где S – опережение в сечении выхода; β – угол, определяющий положение сечения выхода; $\beta > 0$ при возрастании обжатия и $\beta < 0$ при уменьшении обжатия.

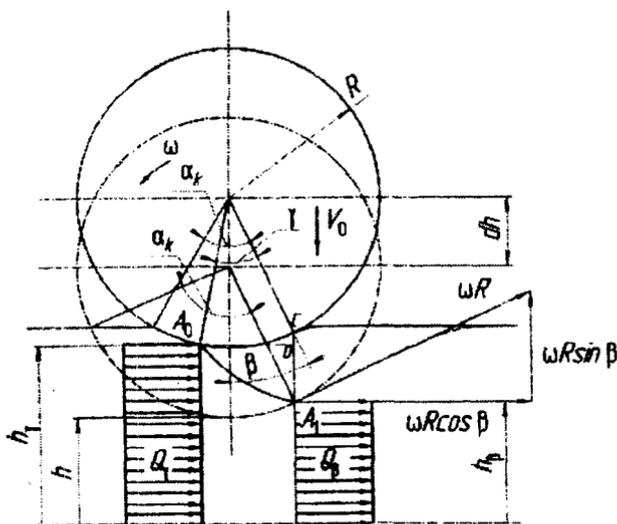


Рисунок 1 – Схема потоков скорости относительно критического сечения в нестационарном очаге деформации

За время движения точки A_0 по дуге γR при вращении валка она сместится вниз на расстояние dh в результате перемещения валка со скоростью V_0 и окажется в положении A_1 . Тогда можно записать, что

$$h_\gamma = h_\beta + 2(dh - CD). \quad (4)$$

Учитывая, что $CD = R[\cos(\gamma - \beta) - \cos\beta]$, находим

$$h_\gamma = h + D(1 - \cos\beta) + 2[dh - R\cos(\gamma - \beta) + R\cos\beta]. \quad (5)$$

В свою очередь,

$$dh = V_0 dt,$$

где dt – время, в течение которого произошло смещение валка в вертикальной плоскости.

При фиксированном значении угла β скорость перемещения валка связана с его окружной скоростью соотношением

$$V_0 = R\omega \sin\beta. \quad (6)$$

С другой стороны $R\gamma = R\omega dt$. Отсюда $dt = \gamma/\omega$. Тогда с учетом симметрии очага деформации

$$h_\gamma = h_\beta + 2R[\gamma \sin\beta - \cos(\gamma - \beta) + \cos\beta]. \quad (7)$$

После подстановки выражений (2), (3) и (7) в формулу (1), приняв, что $b_\gamma \approx b_\beta$ и после некоторых преобразований, получим уравнение для определения мгновенного опережения металла в сечении выхода из очага деформации при прокатке переменного сечения с нарастанием обжатия

$$S = \frac{\{h_{\beta} + 2R[\gamma \sin \beta - \cos(\gamma - \beta) + \cos \beta]\} \cos(\gamma - \beta)}{h_{\beta} \cos \beta} - 1. \quad (8)$$

Принимая во внимание, что $h_{\beta} = h + D[1 - \cos \beta]$, получим формулу для определения опережения

$$S = \frac{\{h + D(1 - \cos \beta) + 2R[\gamma \sin \beta - \cos(\gamma - \beta) + \cos \beta]\} \cos(\gamma - \beta)}{[h + D(1 - \cos \beta)] \cos \beta} - 1.$$

Переходя от тригонометрических функций к их аргументам, окончательно запишем

$$S = \frac{\left(1 + \frac{R}{h} \beta^2 + \frac{R}{h} \gamma^2\right) \left[1 - \frac{(\gamma - \beta)^2}{2}\right]}{\left(1 + \frac{R}{h} \beta^2\right) \left(1 - \frac{\beta^2}{2}\right)} - 1. \quad (9)$$

Формулы, подобные (9), были ранее выведены посредством более сложных рассуждений в работах [4] и [5].

Из формулы (9) вытекает вывод, что на опережение существенно влияет нейтральный угол. Определение нейтрального угла возможно при отыскании нормальных контактных напряжений в очаге деформации. При выводе формул для отыскания нормальных контактных напряжений рассмотрим схему, представленную на рисунке 2. Примем, что касательные напряжения по дуге контакта постоянны и заданы условием Зибеля [6]

$$\tau_x = 2fk, \quad (10)$$

где $k = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_T$ — пластическая постоянная; f — среднее значение коэффициента контактного трения металла о валки.

Дифференциальное уравнение равновесия сил согласно Карману [6] можно представить в виде

$$\frac{dp_x}{dx} - \frac{2k}{z} \cdot \frac{dz}{dx} \pm \frac{\tau_x}{z} = 0, \quad (11)$$

где p_x – нормальное контактное напряжение по дуге касания металла с валком; x и z – текущие ординаты дуги касания. Знак «плюс» перед τ_x относится к зоне отставания, а знак «минус» – к зоне опережения.

Приняв, что $dx = R \cos \varphi d\varphi$, $z = 0,5[h + 2R(1 - \cos \varphi)]$, $\frac{dz}{dx} = \operatorname{tg} \varphi$, уравнение (11) с учетом выражения (10) запишется в виде

$$\frac{dp_\varphi}{R \cos \varphi d\varphi} - \frac{4k}{h + 2R(1 - \cos \varphi)} (\operatorname{tg} \varphi \mp f) = 0.$$

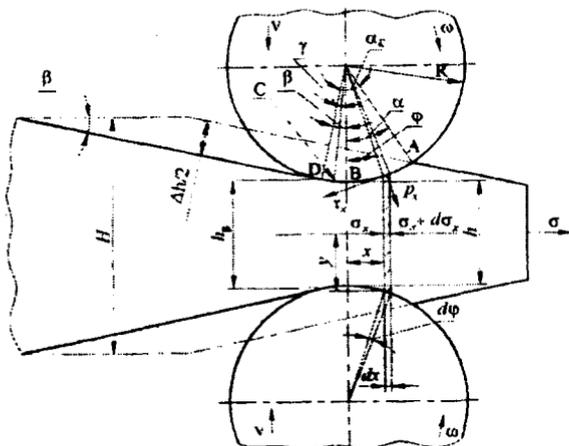


Рисунок 2 – Схема действия сил в очаге деформации при прокатке полосы переменной толщины с постоянным обжатием

После преобразований последнего выражения получим

$$dp_{\varphi} = \frac{4kR}{h + 2R(1 - \cos \varphi)} (\sin \varphi \mp f \cos \varphi) d\varphi. \quad (12)$$

Подставим соотношение $1 - \cos \varphi = 2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}$ в уравнение (12) и после этого запишем

$$dp_{\varphi} = \frac{4k}{\frac{h}{R} + 4 \sin^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right)} (\sin \varphi \mp f \cos \varphi) d\varphi, \quad (13)$$

где знак «минус» относится к участку *AB* зоны отставания и к участку *CD* зоны опережения очага деформации, а знак «плюс» – к участку *BC* зоны отставания при прокатке с нарастающим обжатием.

Интегрируя уравнение (13), а также подставляя значения $\sin^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) \approx \left(\frac{\varphi}{2} \right)^2$ и $\operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{2} \right) \approx \frac{\varphi}{2}$, находим p_{φ} :

для участка *AB* зоны отставания

$$p_{\varphi} = 2k \ln \left(\frac{h}{R} + \varphi^2 \right) - \frac{4kf \left(1 + 2 \frac{R}{h} \right)}{\sqrt{1 + 4 \frac{R}{h}}} \times \\ \times \operatorname{arctg} \left(\frac{\varphi}{2} \sqrt{1 + 4 \frac{R}{h}} \right) + 2kf\varphi + C_{om_1}; \quad (14)$$

для участка *CD* зоны опережения

$$p_{\varphi} = 2k \ln\left(\frac{h}{R} + \varphi^2\right) + 2kf\varphi - \frac{4kf\left(1 + 2\frac{R}{h}\right)}{\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}} \times \\ \times \operatorname{arctg}\left(\frac{\varphi}{2}\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}\right) + C_{\text{оп1}}; \quad (15)$$

для участка *BC* зоны отставания

$$p_{\varphi} = 2k \ln\left(\frac{h}{R} + \varphi^2\right) - 2kf\varphi + \frac{4kf\left(1 + 2\frac{R}{h}\right)}{\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}} \times \\ \times \operatorname{arctg}\left(\frac{\varphi}{2}\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}\right) + C_{\text{от2}}. \quad (16)$$

Величины $C_{\text{от1}}$ и $C_{\text{оп1}}$ находим из граничных условий, рассматривая процесс прокатки с натяжением σ полосы.

В точке *A* при $\varphi = \alpha_K - \beta$ будет $p_{\varphi} = 2k - \sigma$, а в точке *D* при $\varphi = \beta$ величина — $p_{\varphi} = 2k$.

После подстановки значений p_{φ} и φ в уравнения (14) и (15), запишем

$$C_{\text{от1}} = 2k \left\{ \xi_0 - \ln\left(\frac{h}{R} + \alpha^2\right) + \frac{2f\left(1 + 2\frac{R}{h}\right)}{\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}} \operatorname{arctg}\left(\frac{\alpha}{2}\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}\right) - f\alpha \right\},$$

где $\xi_0 = 1 - \frac{\sigma}{2k}$;

$$C_{оп1} = 2k \left\{ 1 - \ln \left(\frac{h}{R} + \beta^2 \right) + \frac{2f \left(1 + 2 \frac{R}{h} \right)}{\sqrt{1 + 4 \frac{R}{h}}} \operatorname{arctg} \left(\frac{\beta}{2} \sqrt{1 + 4 \frac{R}{h}} \right) - f\beta \right\}.$$

Подставив из последних выражений величины постоянных интегрирования $C_{от1}$ и $C_{оп1}$ в (5) и (6), получим уравнения для определения распределения нормальных контактных напряжений по дуге касания:

в зоне отставания на участке AB

$$p_\varphi = 2k \left\{ \xi_0 + \frac{2f \left(1 + 2 \frac{R}{h} \right)}{\sqrt{1 + 4 \frac{R}{h}}} \operatorname{arctg} \left[\frac{\frac{1}{2} \sqrt{1 + 4 \frac{R}{h}} (\alpha - \varphi)}{1 + \frac{\alpha\varphi}{4} \left(1 + 4 \frac{R}{h} \right)} \right] - \right. \\ \left. - \ln \left(\frac{\frac{h}{R} + \alpha^2}{\frac{h}{R} + \varphi^2} \right) + f(\varphi - \alpha) \right\}; \quad (17)$$

в зоне опережения на участке CD

$$p_\varphi = 2k \left\{ 1 + \frac{2f \left(1 + 2 \frac{R}{h} \right)}{\sqrt{1 + 4 \frac{R}{h}}} \operatorname{arctg} \left[\frac{\frac{1}{2} \sqrt{1 + 4 \frac{R}{h}} (\beta - \varphi)}{1 + \left(1 + 4 \frac{R}{h} \right) \frac{\beta\varphi}{4}} \right] - \right.$$

$$-\ln\left(\frac{\frac{h}{R} + \beta^2}{\frac{h}{R} + \varphi^2}\right) + f(\varphi - \beta)\Bigg\}, \quad (18)$$

где β – центральный угол, определяющий положение сечения выхода раската из валков (угол клиновидности).

После решения для точки B (при $\varphi = 0$) совместно уравнений (16) и (17) можно определить постоянную интегрирования $C_{\sigma_{\tau_2}}$:

$$C_{\sigma_{\tau_2}} = 2k \left\{ \xi_{00} + \frac{2f\left(1 + 2\frac{R}{h}\right)}{\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}} \operatorname{arctg}\left(\frac{\alpha}{2} \sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}\right) - \ln\left(\frac{h}{R} + \alpha^2\right) - f\alpha \right\}.$$

Тогда уравнение (16) для определения нормальных контактных напряжений в зоне отставания на участке BC можно записать в следующем виде

$$p_{\varphi} = 2k \left\{ \xi_{00} + \frac{2f\left(1 + 2\frac{R}{h}\right)}{\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}} \operatorname{arctg}\left[\frac{\frac{1}{2}\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}(\varphi + \alpha)}{1 - \frac{\varphi\alpha}{4}\left(1 + 4\frac{R}{h}\right)}\right] - \ln\left(\frac{\frac{h}{R} + \alpha^2}{\frac{h}{R} + \varphi^2}\right) - f(\varphi + \alpha) \right\}. \quad (19)$$

Если сечение, отвечающее критическому углу γ , будет расположено справа от плоскости осей валков (рис.2), то для участка CB ,

в данном случае находящегося в зоне опережения, дифференциальное уравнение прокатки (13) нужно использовать со знаком «плюс».

После интегрирования уравнения (13) со знаком «плюс» запишем

$$p_{\varphi} = 2k \ln\left(\frac{h}{R} + \varphi^2\right) - 2kf\varphi + \frac{4kf\left(1 + 2\frac{R}{h}\right)}{\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}} \times \\ \arctg\left(\frac{\varphi}{2}\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}\right) + C_{оп2}. \quad (20)$$

В свою очередь постоянную интегрирования $C_{оп2}$ определяем после совместного решения уравнений (18) и (20) для точки B при $\varphi = 0$. В этом случае

$$C_{оп2} = 2k \left\{ 1 + \frac{2f\left(1 + 2\frac{R}{h}\right)}{\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}} \arctg\left(\frac{1}{2}\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}\beta\right) - \ln\left(\frac{h}{R} + \beta^2\right) - f\beta \right\}.$$

В результате подстановки значения $C_{оп2}$ в (20) получим уравнение для определения нормальных контактных напряжений по дуге касания в зоне опережения на участке CB

$$p_{\varphi} = 2k \left\{ 1 + \frac{2f\left(1 + 2\frac{R}{h}\right)}{\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}} \arctg\left[\frac{\frac{1}{2}\sqrt{1 + 4\frac{R}{h}}(\beta + \varphi)}{1 - \frac{\beta\varphi}{4}\left(1 + 4\frac{R}{h}\right)}\right] - \right.$$

$$-\ln \left(\frac{\frac{h}{R} + \beta^2}{\frac{h}{R} + \varphi^2} \right) - f(\beta + \varphi) \}. \quad (21)$$

Мгновенное значение угла, характеризующего положение критического сечения и определяющего границу раздела между зоной опережения и зоной отставания, можно найти из условия, что для критического сечения [6]

$$P_{оп\gamma} = P_{от\gamma}.$$

Тогда из совместного решения уравнений (17) и (21) при $\varphi = \gamma - \beta$ или уравнений (18) и (19) при $\varphi = \beta - \gamma$, в зависимости от положения критического сечения относительно плоскости осей валков,

после подстановки значений $\operatorname{tg} \left(\frac{\varphi F}{2G} \right) \approx \frac{\varphi F}{2G}$,

$$\left(\frac{\varphi}{2} F \right)^2 \cdot \frac{\operatorname{tg} Q}{G} \approx 0, \quad \text{где} \quad F = \sqrt{1 + 4 \frac{R}{h}}; \quad G = \left(1 + 2 \frac{R}{h} \right),$$

$$Q = \frac{F}{4fG} \ln \left(\frac{\frac{h}{R} + \beta^2}{\frac{h}{R} + \alpha^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{F\alpha}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{F\beta}{2} \right) \right] + \frac{F}{4G} (\beta - \alpha),$$

получим уравнение

$$\gamma = \frac{1 + 2 \frac{R}{h}}{\frac{R}{h} \sqrt{1 + 4 \frac{R}{h}}} \operatorname{tg} \left\{ 0,5 \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{\alpha}{2} \sqrt{1 + 4 \frac{R}{h}} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{\beta}{2} \sqrt{1 + 4 \frac{R}{h}} \right) \right] \right\} +$$

$$+ \frac{\sqrt{1+4\frac{R}{h}}}{4f\left(1+2\frac{R}{h}\right)} \left[\ln\left(\frac{\frac{h}{R} + \beta^2}{\frac{h}{R} + \alpha^2}\right) - \frac{\sigma}{2k} \right] + \frac{\sqrt{1+4\frac{R}{h}}}{4\left(1+2\frac{R}{h}\right)} (\beta - \alpha) \Bigg\} + \beta. \quad (22)$$

Введем дополнительные обозначения: $x = \frac{\frac{h}{R} + \beta^2}{\frac{h}{R} + \alpha^2}$;

$$y_1 = \frac{\alpha}{2} \sqrt{1+4\frac{R}{h}}; \quad y_2 = \frac{\beta}{2} \sqrt{1+4\frac{R}{h}}; \quad z = \frac{\sqrt{1+4\frac{R}{h}}}{4f\left(1+2\frac{R}{h}\right)} \left[\ln(x) - \frac{\sigma}{2k} \right] +$$

$$+ 0,5[\operatorname{arctg}(y_1) - \operatorname{arctg}(y_2)] + \frac{\sqrt{1+4\frac{R}{h}}}{4\left(1+2\frac{R}{h}\right)} (\beta - \alpha).$$

Тогда

$$\gamma = \frac{1+2\frac{R}{h}}{\frac{R}{h} \sqrt{1+4\frac{R}{h}}} \operatorname{tg}(z) + \beta.$$

Запишем разложение функций $\ln(x)$, $\operatorname{arctg}(y_1)$, $\operatorname{arctg}(y_2)$ и $\operatorname{tg}(z)$ в ряд

$$\ln(x) = (x-1) - \frac{1}{2}(x-1)^2 + \dots;$$

$$\begin{aligned} \operatorname{arctg}(y_1) &= y_1 - \frac{y_1^3}{3} + \frac{y_1^5}{5} - \dots \quad \text{если } (y_1^2 < 1); \\ \operatorname{arctg}(y_2) &= y_2 - \frac{y_2^3}{3} + \frac{y_2^5}{5} - \dots \quad \text{если } (y_2^2 < 1); \\ \operatorname{tg}(z) &= z + \frac{1}{3}z^3 + \frac{2}{15}z^5 + \dots \quad \text{если } \left(z^2 < \frac{\pi^2}{4} \right). \end{aligned}$$

Ограничиваясь первыми членами разложения этих функций tg , arctg и \ln в ряд, можно из уравнения (22) получить упрощенное выражение

$$\gamma = \frac{\alpha_K}{2} \left(1 - \frac{\alpha_K}{2f} + \frac{\beta}{f} \right) - \frac{h\sigma}{8kRf}. \quad (23)$$

С целью экспериментального изучения опережения при прокатке полос переменной толщины с постоянным обжатием использован метод керновых меток [6], который реализован в двухвалковом прокатном стане. Для этого по окружности бочки верхнего вала вдоль образующих цилиндра через каждые 100 мм наносили риски с точностью $\pm 0,1$ мм. При нанесении рисков использовали мерные полоски фольги толщиной 0,2 мм, шириной 20 мм, длиной $100 \pm 0,1$ мм, которые плотно прижимали к бочке вала, а затем с помощью закаленной иглы вдоль торцов полоски наносили риски. Измеряя расстояние между метками, отпечатанными на полосе, можно определить опережение с помощью уравнения

$$S = \frac{l_{\Pi} - l_{\text{В}}}{l_{\text{В}}}, \quad (24)$$

где l_{Π} – расстояние между метками на полосе; $l_{\text{В}}$ – расстояние между метками на валке.

В качестве заготовки была использована полоса толщиной 22 мм, шириной 50 мм и длиной 700 мм, отлитая из свинца марки СЗ

(ГОСТ 3778-98) с содержанием примесей около 0,01 %. Это позволяло моделировать процесс горячей прокатки стали [7]. При построении расчетных кривых коэффициент трения между полосой и валками принимали равным $f = 0,27$ [8].

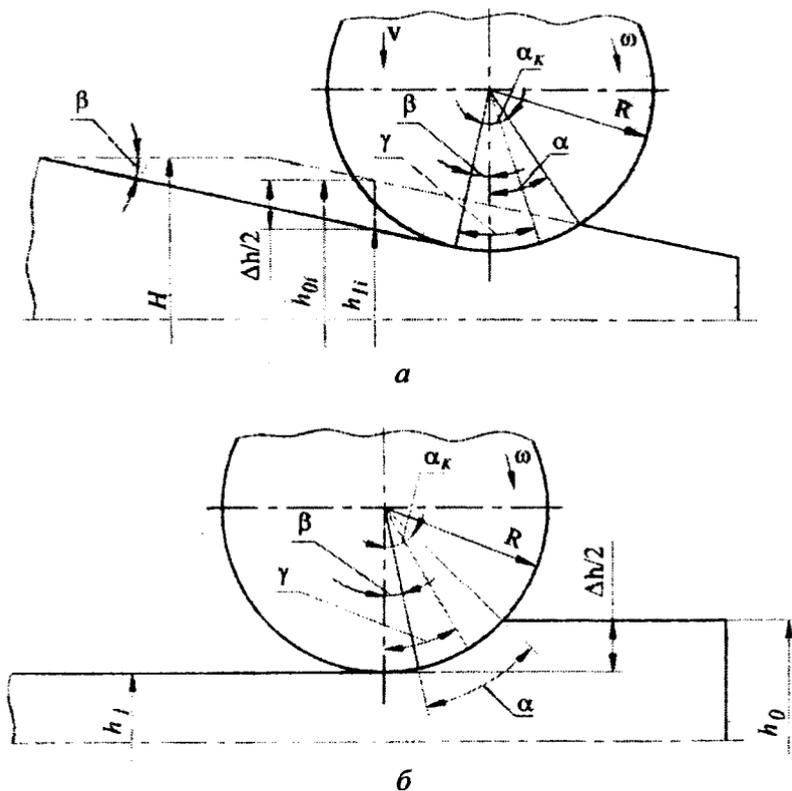


Рисунок 3 – Схемы прокатки полосы переменной (а) и постоянной (б) толщины с одинаковыми углами α_{κ} и γ

Для получения мгновенных значений опережения при проведении экспериментов предложено прокатывать полосу постоянной по длине толщины с постоянным обжатием Δh при разных исходных значениях толщины h_0 (рис. 3, б). Тогда разными будут и конечные значения толщины h . Правомерность такого подхода можно обосновать, анали-

зируя схемы, представленные на рисунке 3. Поскольку в обоих случаях значения угла контакта полосы с валками определяются соотношением $\alpha_K = \sqrt{\Delta h/R}$, то, очевидно, есть основания полагать, что и значения нейтрального угла при этом будут одинаковыми. Следовательно, в соответствии с уравнением (9) одинаковыми будут и значения опережения S . При этом входящее в указанное уравнение значение параметра β необходимо принимать в обоих случаях одним и тем же.

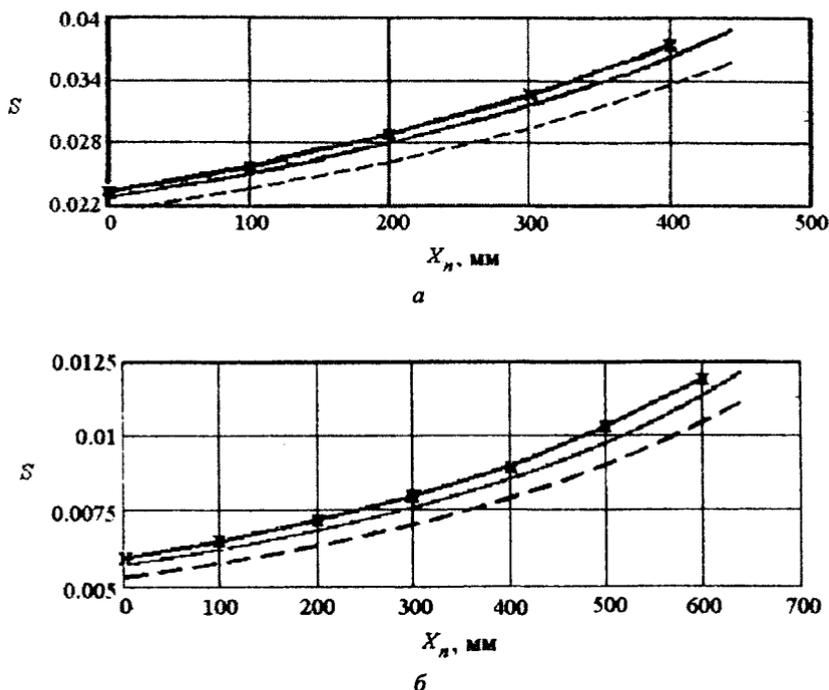


Рисунок 4 – Графики изменения мгновенных значений опережения S в зависимости от координаты X_n , (расстояния от точки начала прокатки полосы переменной толщины с постоянным обжатием до рассматриваемого сечения) при изменяющемся отношении R/h , которые построены по данным, рассчитанным с использованием формулы (9) и (22) (—), взятым из [9] (- -) и полученным из экспериментов (-x-), проведенных с использованием схемы, представленной на рисунке 3, б, для случая прокатки свинцовой полосы в валках диаметром 200 мм при абсолютном обжатии:

а – $\Delta h = 4$ мм; б – $\Delta h = 0,5$ мм

На рисунке 4 приведены графики, построенные по расчетным и экспериментальным данным, характеризующим мгновенные значения опережения. Как видно из графиков, значения расчетных и экспериментальных данных имеют достаточную сходимость, хотя экспериментальная кривая расположена несколько выше расчетной. Это объясняется тем, что при получении расчетных значений с помощью уравнения (9) в последнем был использован метод нижней оценки (метод плоских сечений или метод совместного решения уравнения равновесия и условия пластичности).

Выводы

1. Получены уравнения, которые позволяют рассчитывать значения нейтрального угла и опережения при прокатке полос переменной толщины с постоянными единичными обжатиями при наличии и отсутствии заднего натяжения.

2. Обоснована методика экспериментального определения мгновенных значений опережения, основанная на измерении расстояний между керновыми метками при прокатке полос постоянной толщины с постоянными единичными обжатиями, которая применима для случая прокатки полос переменной толщины при постоянных единичных обжатиях

Литература

1. Степаненко, А. В. Прокатка полос переменного профиля / А.В. Степаненко, В.А. Король, Л.С. Смирнова. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2001. – 180 с.

2. Чекмарев, А. П. Некоторые вопросы продольной периодической прокатки: Тр. Днепропетр. металлург. ин-та / А.П. Чекмарев, А.Ф. Смольянинов. – Днепропетровск: ДМетИ, 1958. – Вып. 37. – С. 185 – 203.

3. Воронцов, Н. М. Периодические профили продольной прокатки (оборудование и технология) / Н.М. Воронцов [и др.]. – М.: Металлургия, 1978. – 232с.

4. Голубев, Т. М. Опережение при прокатке с равномерно изменяющимся обжатием в цилиндрических валках / Т.М. Голубев,

Л.В. Морозов // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1966. – № 6. – С. 105 – 111.

5. Данилов, В. Д. Опережение при прокатке профилей переменного сечения // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1974. – № 1. – С. 82 – 86.

6. Целиков, А. И. Теория продольной прокатки / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 319с.

7. Tsukamoto, H. Simulation of hot steel in plastic working with plasticine and lead / H. Tsukamoto, Y. Taura, J. Ibushi // Advanced technology of plasticity. – 1984, – Vol:II, – P. 53–59.

8. Грудев, А. П. Внешнее трение при прокатке. / А.П. Грудев. – М.: Металлургия, 1973. – 287с.

9. Данилов, В. Д. Критический угол при продольной прокатке профилей переменного сечения в приводных валках равного диаметра / В.Д. Данилов // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1974. – № 8. – С. 43–46.

УДК 631.7/9.016

Л.А. ИСАЕВИЧ, д-р техн. наук,
В.А. КОРОЛЬ, д-р техн. наук,
Д.М. ИВАНИЦКИЙ, канд. техн. наук,
Г.В. КОСТЕНКО (БНТУ)

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ПРОКАТКЕ ЗАГОТОВОК МАЛОЛИСТОВЫХ РЕССОР

Согласно способу получения заготовок переменного профиля для малолистовых рессор, разработанному в научно-исследовательской лаборатории обработки материалов давлением БНТУ [1, 2], полосу, нагретую до 1000⁰С, прокатывают в валковой клети на специальном инструменте (деформирующей оправке), имеющем профиль, соответствующий профилю готового изделия. Начиная с момента поступления заготовки на вход в рабочую клеть и до полного окончания прокатки имеет место сначала частичный, а затем полный контакт горячей полосы с оправкой. В результате этого при прямом ходе оправки