

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ

**Крюков Ю.Б.**

(НИИ «УкрНИИМет» УкрГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков)

*Границы нестационарного очага деформации определялись из закона сохранения масс с учетом потока смещения металла, вызванного перемещением границ во времени. При этом положение сечения выхода определялось варьированием уравнения, связывающего координату положения сечения выхода с продольной скоростью металла в этом сечении.*

Особенностью нестационарного процесса прокатки является подвижность во времени границ очага деформации. Решить вариационное уравнение истинного пластического течения [1] можно, если установить функциональную связь между положением границ и варьируемыми параметрами.

Из условия необходимости равенства нормальных скоростей в точке отрыва и закона сохранения объёма при прокатке можно получить выражение для определения положения сечения выхода при нестационарной прокатке без уширения

$$l_2 = \frac{1}{V_0} \left[ - (V_\gamma Y_\gamma - V_0 x_\gamma) + \sqrt{(V_\gamma Y_\gamma - V_0 x_\gamma)^2 + 2RV_0^2 \left( h_0 - \int_0^t V_0 dt \right)} \right] \quad (1)$$

Выражение (1) отражает динамическую зависимость положения сечения  $l_2$  от скорости вертикального перемещения вала. Так, с увеличением обжатия  $V_0 > 0$  сечение выхода находится за осевым сечением валков  $l_2 > 0$  с уменьшением  $V_0 < 0$  – до осевого сечения валков  $l_2 < 0$ .

Чтобы найти  $l_2$  по формуле (1) при наличии уширения, необходимо знать закон изменения ширины по длине очага деформации [2].

Рассмотрим изменения боковой границы нестационарного очага деформации с позиций кинематики течения металла. За пределами геометрического очага деформации взаимные перемещения частиц металла пренебрежимо малы. Отсюда следует, что в сечении выхода скорости частиц металла могут иметь только одно направление, параллельное  $OX$ .

Представив мысленно границу боковой поверхности полосы как подвижный в направлении  $OZ$  и изменяющий свою форму во времени "инструмент"  $Z(x, t)$ , получаем, что в точке  $B$ , где начинается образование сво-

бодной боковой поверхности жесткого конца, возможны три варианта распределения скоростей (рис. 1).

1. Ширина выходящей полосы возрастает. Кромка  $B$  "инструмента", движется в направлении оси  $OZ$  со скоростью  $V_b$ . Поскольку результирующая скорость  $V_1$  направлена по оси  $OX$ , то скорость течения металла  $V$  в точке  $B$  должна иметь компоненту  $V_z$ , равную по величине и противоположную по направлению скорости  $V_b$ .

2. Ширина полосы убывает. Кромка  $B$  "инструмента", движется в направлении, противоположном оси  $OZ$ , со скоростью  $V_b$ . Поскольку результирующая скорость  $V_1$  направлена по оси  $OX$ , скорость течения металла  $V$  в точке  $B$  должна иметь компоненту  $V_z$ , равную по величине и противоположную по направлению скорости  $V_b$ .

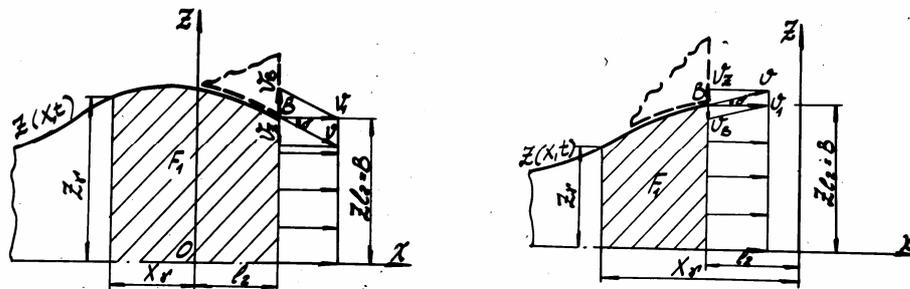


Рисунок 1 – Распределение скоростей в сечении выхода

3. Ширина выходящей полосы постоянна. Это соответствует случаю стационарной прокатки, что позволяет рассматривать прокатку, как течение металла в канале фиксированной конфигурации. В этом случае в сечении выхода отсутствует уширение.

Во всех возможных вариантах результирующая скорости отхода металла в сечении выхода образуется в результате векторного сложения переносной скорости "инструмента"  $V_b$  и относительной скорости металла  $V$ . Соотношение между ними определяет направление скорости металла  $V$  относительно поверхности "инструмента", то есть направление границы боковой поверхности пластического очага деформаций в точке  $B$ .

Таким образом, при увеличении обжатия максимум мгновенной ширины полосы находится в пределах очага деформации а при убывании обжатия наибольшее мгновенное значение ширины очага деформации находится в сечении выхода. Отсутствие разрыва скоростей в сечении выхода между жестким концом и очагом деформации обеспечивается тем, что тангенс мгновенного угла  $\delta$  наклона касательной к боковой поверхности в точке  $B$  определяется как отношение скорости изменения ширины полосы к скорости выхода.

Форма боковой поверхности очага деформации может быть задана с помощью квадратной параболы. После подстановки граничных условий в уравнение параболы получено выражение, описывающее боковую границу очага деформации

$$Z = \frac{b - B - \frac{1}{V_1} \frac{dB}{dt} (l_1 + l_2)}{(l_1 + l_2)^2} (x - l_2)^2 - \frac{1}{V_1} \frac{dB}{dt} (x - l_2) + B \quad (2)$$

где  $b$  и  $B$  – ширина полосы в сечениях входа и выхода. Максимум выражения (2) соответствует значению

$$x_{\max} = \frac{V_1 - l_2(B - b) - \frac{1}{2} \frac{dB}{dt} (l_1^2 - l_2^2)}{V_1(B - l) + \frac{dB}{dt} (l_1 + l_2)}. \quad (3)$$

При нарастании обжатия знак  $x_{\max}$  определяется числителем выражения (3) и зависит от соотношений геометрических размеров и отношения скоростей  $\frac{dB}{dt}$  и  $V$ , то есть максимум (2) может быть расположен как до осевого сечения, так и за ним.

При прокатке с уширением условие сохранения масс в объеме очага деформации, между нейтральным сечением и сечением выхода

$$V_1 Y_1 B = V_\gamma Y_\gamma Z_\gamma + V_0 \int_{x_\gamma}^{l_2} Z dx - \int_{x_\gamma}^{l_2} \frac{dZ}{dt} Y dx, \quad (4)$$

где  $\frac{dZ}{dt}$  – скорость перемещения боковой границы.

Интегрирование выражения (4) в общем виде затруднительно. Однако, выделяя главную линейную часть приращения функций и скорости перемещения боковой границы  $\frac{dZ}{dt} = \frac{dB}{dt}$ , можно получить ее в первом приближении.

При этом функция  $Z_\gamma$  принята линейной функцией от продольной координаты. Первый интеграл выражения (4) представляет собой площадь контакта полосы с валком между сечениями нейтральным и выхода (рис.1). Эта площадь заменена площадью прямоугольника, высота которого равна  $B$ . Второй интеграл выражения (4) это площадь, через которую происходит течение металла в поперечном направлении при вертикальных перемещениях вала (рис.2). Эта площадь может быть заменена площадью прямоугольника, высота которого равна  $h - S$ , где  $S$  - величина вертикального смещения вала относительно первоначального положения.

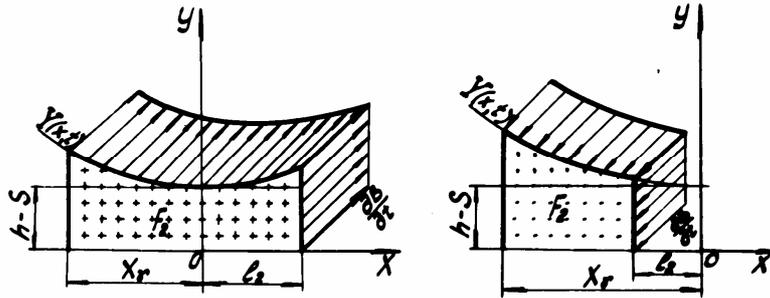


Рисунок 2 – Течение металла в поперечном направлении при вертикальных перемещениях вала

Подставляя принятые для подынтегральных функций соотношения в (4), после преобразований получим уравнение связи  $l_2$  с технологическими параметрами при нестационарной прокатке с уширением

$$l_2 = \frac{1}{\frac{V_0}{V_\gamma} B + \frac{1}{V_\gamma} \frac{dB}{dt} \left( \frac{x_\gamma^2}{2R} - h + S \right)} \left\{ \left[ - \left( \frac{x_\gamma^2}{2R} + h - S \right) B - \frac{V_0}{V_\gamma} B x_\gamma - \frac{1}{2V_\gamma} \frac{dB}{dt} \left( \frac{x_\gamma^2}{2R} - h + S \right) x_\gamma \right] + \sqrt{\left[ \left( \frac{x_\gamma^2}{2R} + h - S \right) B - \frac{V_0}{V_\gamma} B x_\gamma - \frac{1}{2V_\gamma} \frac{dB}{dt} \left( \frac{x_\gamma^2}{2R} - h + S \right) x_\gamma \right]^2 - 2 \left[ \frac{V_0}{V_\gamma} B + \frac{1}{V_\gamma} \frac{dB}{dt} \left( \frac{x_\gamma^2}{2R} - h + S \right) \right] \times \frac{V_0 R}{V_\gamma} (h - S) B} \right\} \quad (6)$$

При  $B = 1$  и  $\frac{dB}{dt} = 0$  выражение (6) совпадает с (1).

Имея функциональную зависимость положения передней и боковой границы нестационарного очага деформации, можно, применяя вариационное уравнение истинного пластического течения, рассчитать все технологические параметры периодической прокатки в валках постоянного радиуса [3].

Такое компьютерное моделирование было выполнено для пускового сортамента проектируемого стана с переменным межосевым расстоянием [4]. Предварительно было построено поле скоростей и скоростей деформаций и получены вариации интегралов мощности и поверхностных сил при пластической деформации в областях с переменными границами.

Результаты расчета приведены на рис. 3, где представлено изменение во времени геометрических параметров очага деформации в виде графиков координаты  $l_1$  границы входа в очаг деформации и координаты  $l_2$  границы выхода из очага деформации. Расстояние  $l_2 - l_1$  между этими графиками

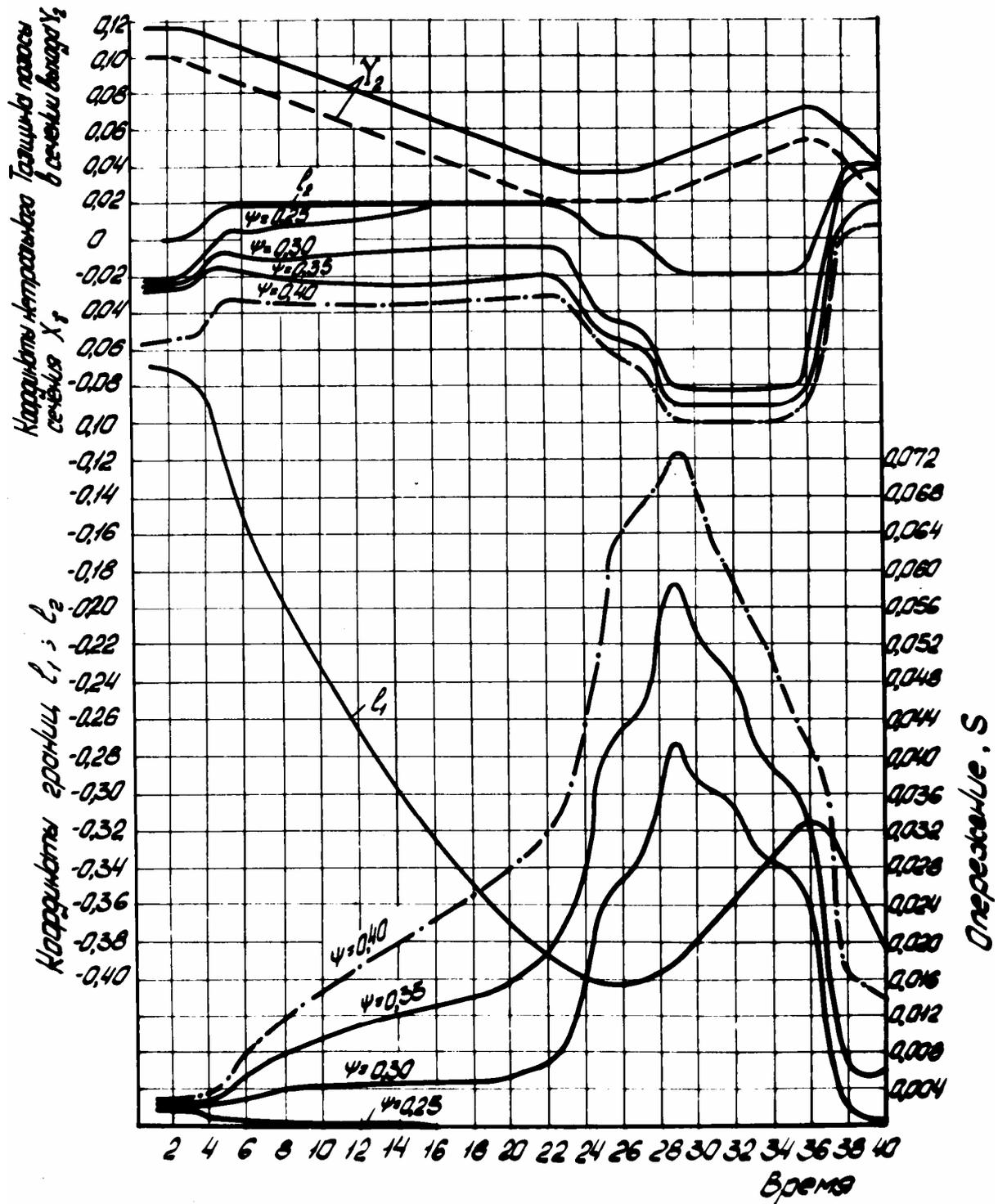


Рисунок 3 – Геометрические параметры очага деформации при периодической прокатке

представляет собой переменную величину длины дуги захвата. Следует отметить, что наибольшего значения длина дуги захвата достигает ранее, чем достигается наименьшее значение толщины полосы в сечении выхода.

Положение сечения выхода из очага деформаций ( $l_2$ ) существенно зависит от изменения скорости вертикального смещения валков. При постоянстве скорости вертикального смещения координата сечения выхода практически не меняется. При изменении знака скорости вертикального смещения валка на обратный (при разведении валков) координата сечения выхода меняет знак.

На рис. 3 представлены графики изменения положения нейтрального сечения ( $x_\gamma$ ) по времени при различных значениях показателя трения  $\psi$ . С увеличением показателя трения нейтральное сечение удаляется от сечения выхода. Особенностью функции  $x_\gamma$  является ее существенная зависимость от изменения скорости смещения, тогда как на участках с постоянной скоростью положение сечения изменяется незначительно.

В начальный период с увеличением обжатия, нейтральное сечение приближается к осевой плоскости. Если показатель трения мал (0,15–0,20), то происходит прекращение процесса прокатки, начинается буксование. В этот момент расстояние между подвижным сечением выхода и нейтральным сечением ( $l_2 - x_\gamma$ ), которое определяет длину зоны опережения, становится равным нулю.

При равномерного опускания валков имеет место сначала некоторое возрастание, а затем убывание длины зоны опережения. Это более четко выражено для меньших значений показателя трения (0,25–0,30). При показателе трения 0,25 имеет место прекращение процесса. С переменной знака скорости смещения величина зоны опережения увеличивается.

Для рассматриваемого процесса графики изменения опережения по времени при различных значениях  $\psi$  представлены в нижней части рис. 3. С увеличением обжатия опережение может уменьшаться при малых значениях  $\psi$  вплоть до прекращения процесса ( $\leq 0,25$ ) и увеличиваться при больших значениях  $\psi$  ( $> 0,25$ ). Наибольшие значения величины мгновенного опережения имеют место при изменении знака вертикальной скорости. Увеличение скорости вертикального смещения валков в 2 раза вызывает прекращение процесса прокатки-осадки при более высоких значениях показателя  $\psi$  (0,25–0,30).

Качественно полученные соотношения технологических параметров отвечают известным экспериментальным и теоретическим исследованиям, но в отличие от них носят более общий характер.

Таким образом, предложена методика, отражающая динамическое соответствие между геометрическими параметрами очага деформации и течением металла в нем, что делает ее использование предпочтительным при расчете технологических параметров периодической прокатки.

Литература

1. Тарновский И.Я, Поздеев А.А., Ганаго О.А. и др. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчёта усилий и деформации). – М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с.
2. Целиков Н.А., Орлов В.К. Определение обжатий при асимметричной прокатке полос периодического профиля // Высокотехнологичное оборудование для металлургической промышленности: сб. трудов международной научно-практической конференции. – М.: ВНИИМЕТМАШ, 2004. – С. 183–187.
3. Сагитов Г.А., Вавилов Н.Ю. Энергетический баланс и варьирование параметров нестационарного очага деформации при периодической прокатке // Сортопрокатное производство: отрасл. сб. науч. тр. – Харьков: УкрНИИмет, 1978. – С. 52–56.
4. Медведев В.С., Крюков Ю.Б., Осипенко В.В. Сортопрокатные станы // Перспективы развития горно-металлургического комплекса: Материалы международной научно-практической конференции. – Краматорск, 2004. – С. 52–56.

© Крюков Ю.Б. 2008