

УДК 621.771.01

О.П. Максименко, д-р техн.наук, проф., Р.Я. Романюк, асп.

Днепродзержинский государственный технический университет, г.Днепродзержинск, Украина

АНАЛИЗ РАВНОВЕСИЯ СИЛ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОСТОМ ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ

На основі аналізу рівноваги металу в осередку деформації, показано, що втягуючі сили витрачаються не тільки на подолання виштовхуючих, але й на врівноваження внутрішніх сил, що виникають при пластичній деформації металу. Для забезпечення цієї рівноваги, кут нейтрального перетину приймає значення, що відповідає взаємодії цих сил.

Таким чином, певний вплив на кут нейтрального перетину, крім контактних сил, робить і напружений стан прокатуемого металу.

On a base of the assaying of balance of metal in byte of deformations, it is shown, that retracting forces are spent not only on overcoming pushing out, but also an equilibration of internal forces which originate at a flowage of metal. For maintenance of this balance, the angle of neutral cross-section adopts a value, corresponding to interacting of these forces.

Thus, the certain agency on an angle of neutral cross-section, except for contact forces, renders also a triaxial stress rolls metal.

Введение. В работах [1-3] разработан новый метод определения продольной устойчивости процесса прокатки, заключающийся в расчёте средней результирующей горизонтальных контактных сил в очаге деформации. По величине и направлению этой силы можно дать оценку того, в каких условиях протекает процесс и возможен ли он при определённых параметрах.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей влияния внутреннего напряжённого состояния металла на продольную устойчивость прокатки, на кинематические параметры, а также на уточнение роли угла нейтрального сечения, как регулятора равновесия сил в очаге деформации.

Ввиду того, что исходными данными при определении средней результирующей горизонтальных сил являются эпюры контактных напряжений, обратимся к результатам теоретического исследования по распределению давления $\frac{p_x}{2k}$ (k – сопротивление чистому сдвигу пластически деформируемого металла) и удельных сил трения

$\frac{t_x}{2k}$, приведённые в [4]. Заметим, что при решении дифференциального уравнения Кармана, В.Я. Василёв воспользовался моделью трения, учитывающей как скольжение в очаге деформации, так и кулоновскую связь между контактными напряжениями. При прокатке в условиях, когда $R = 300$ мм, $h_0 = 0,3$ мм, $\alpha_y = 0,017$ рад и $f = 0,044$ (R – радиус валков, h_0 – начальная толщина полосы, α_y – угол захвата в установившемся режиме, f – коэффициент трения), результаты расчёта контактных напряжений имеют вид, показанный на рис. 1, а, б).

На графике рис. 1, в приведено распределение контактных горизонтальных напряжений $\frac{q_x}{2k}$ в очаге деформации, рассчитанных согласно [3, формула (1)]. Кривая изменения текущей горизонтальной контактной силы

$$Q_x^* = \frac{Q_x}{2kRb} = \int_{\varphi}^{\alpha} \frac{q_x}{2k} d\varphi, \quad (1)$$

полученная в соответствии с формулой [3, формула (2)], приведена на рис. 1, г.

В текущем сечении, например при $\varphi = \varphi_1 = 0,12$ рад, значение силы Q_x^* равно интегральной сумме горизонтальных сил на участке от $\varphi = \alpha$ до $\varphi = \varphi_1$ (рис. 2), что соответствует площади под кривой $\frac{q_x}{2k}$ на этом участке (рис. 1, в).

Как видно, сила Q_x^* на границах контактной зоны равна нулю (рис. 1, г). Отсюда следует, что скорости v_0 и v_1 (v_0 и v_1 – скорости полосы на входе в валки и выходе из них соответственно) во времени остаются неизменными, т.е. процесс является стационарным.

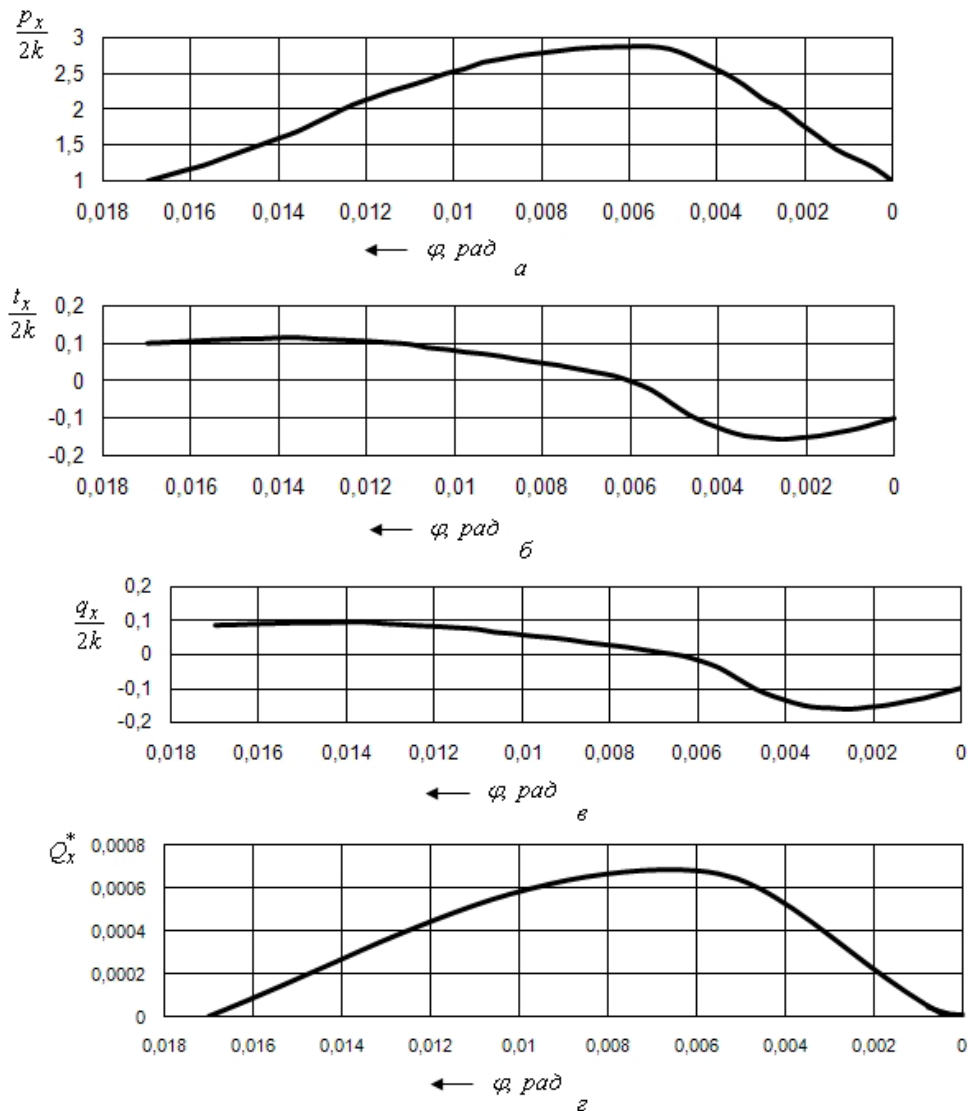


Рис. 1. Эпюры распределения контактных напряжений, продольного внешнего напряжения и текущей результирующей горизонтальных внешних сил

Заметим, что по длине зоны контакта полосы с валами текущая сила Q_x^* изменяется по определённому закону, следовательно, всегда можно получить среднее её значение Q_{cp}^* (рис. 1, г).

Средняя результирующая горизонтальных контактных сил Q_{cp}^* , как показано в работах [1-3], является индикатором продольной устойчивости процесса прокатки. При положительном значении этой силы (направление соответствует движению полосы), процесс протекает устойчиво, при нулевом её значении – прокатка ведётся в предельных условиях, если вектор силы Q_{cp}^* направлен противоположно движению металла – процесс невозможен.

При установившемся режиме деформации среднюю результирующую горизонтальных контактных сил можно выделить и при других моделях трения [1, 2], действующих в контакте полосы с валами, а также обрабатывая экспериментальные эпюры контактных напряжений [3].

Подчёркнём, что эта сила получена в условиях стационарного процесса. Казалось бы, налицо очевидное противоречие, т.к. не соблюдается равновесие контактных сил. Однако, обратимся к вычислению продольных нормальных напряжений $\frac{\sigma_x}{2k}$. С учётом уравнения пластичности нетрудно рассчитать эти напряжения (рис. 3, а), найти текущее значение горизонтальных внутренних сил в каждом сечении очага деформации (рис. 3, б):

$$Q_{x\text{вн}} = \sigma_x h_x b = (p_x - 2k) \left(h_1 + R\varphi^2 \right) b = 2kRb \left(\frac{p_x}{2k} - 1 \right) \left(\frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right);$$

или в безразмерной форме:

$$Q_{xвн}^* = \frac{Q_{вн}}{2kRb} = \left(\frac{p_x}{2k} - 1 \right) \left(\frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right), \quad (2)$$

где b – ширина полосы,

и получить среднюю её величину $Q_{срвн}^*$.

Сравнивая текущие значения результирующих горизонтальных контактных и внутренних сил, приходим к равенству:

$$2Q_x^* = Q_{срвн}^*$$

или

$$2Q_{ср}^* = Q_{срвн}^* \quad (3)$$

Следует заметить, что под воздействием результирующей силы $Q_{срвн}^*$ на определённой части очага деформации возникает “попятное” движение металла, на что обращал внимание ещё В.Е. Грум-Гржимайло [5]. Если нанести вертикальные линии на поверхность полосы (рис. 2, линия 1), то при входе в очаг деформации они изгибаются в направлении, противоположном движению металла (рис. 2, кривая 2). Аналогичные опыты с вкрученными в подкат винтами проводил Н. Метц [6] и получил те же результаты. На основании вышеизложенного можно заключить, что сила $Q_{срвн}^*$ направлена противоположно движению полосы.

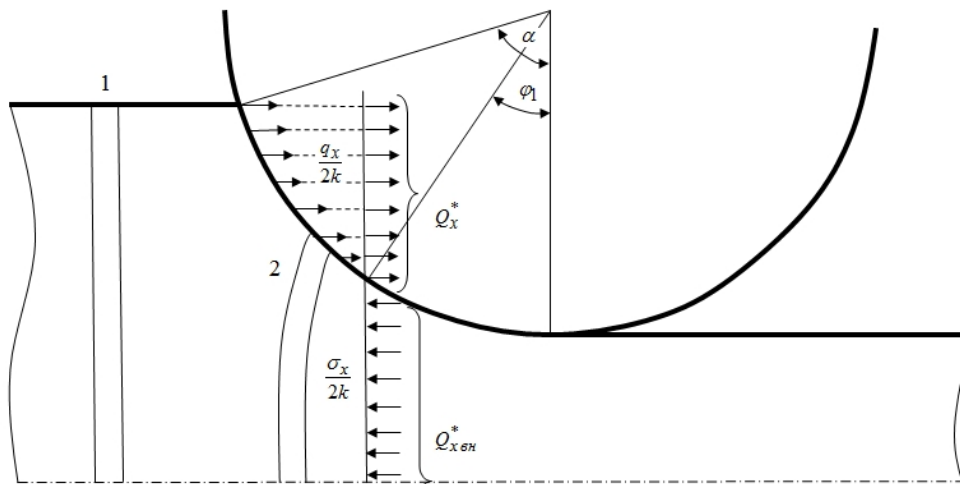


Рис. 2 – Силы, действующие в очаге деформации при установившемся процессе прокатки

Анализируя выражение (3), необходимо подчеркнуть, что при данном значении угла нейтрального сечения γ втягивающие силы затрачиваются не только на преодоление выталкивающих, но и на уравнивание внутренних сил. В этом можно убедиться, если сравнить значения γ , полученные непосредственно из решения дифференциального уравнения равновесия Т. Кармана по эпюрам распределения удельных сил трения и по формуле Павлова-Эжелунда при одинаковых условиях прокатки. Результаты вычислений приведены в таблице 1.

Анализ полученных данных показывает, что угол нейтрального сечения, определяемый из эпюр, всегда меньше, чем по указанной формуле. Это связано с тем, что при решении уравнения Т. Кармана в равновесии участвуют и внутренние силы деформируемого металла, а при расчёте по формуле Павлова-Эжелунда – только контактные.

Таблица. 1

Сравнение значений угла нейтрального сечения

№ п/п	Толщина полосы, мм		Угол захвата, α , рад	Радиус валков, R , мм	$\frac{l_d}{h_{ср}}$	Коэф. трения, f	Угол γ , рад		Относ. разница, %
	h_0	h_1					по эпюрам	по формуле Павлова	
1	0,3	0,21	0,017	300	20	0,044	0,006	0,0069	13,4
2	0,6	0,42	0,024	300	14	0,056	0,0072	0,0094	23,4
3	9	6,6	0,2	60	1,54	0,15	0,033	0,037	10,8
4	9	6,6	0,2	60	1,54	0,2	0,05	0,055	9,1
5	5	4,45	0,129	93	2,54	0,152	0,026	0,037	29,7
6	1,0	0,64	0,06	100	7,3	0,06	0,0078	0,0087	11,5
7	2,4	0,5	0,141	100	9,7	0,2	0,04	0,0456	12,3

Важно отметить, что угол γ изменяется таким образом, чтобы обеспечить равновесие сил (3). Если оно нарушилось, например, контактные силы $2Q_{cp}^*$ стали больше $Q_{cp\,вн}^*$, то возникает избыточная сила в направлении прокатки. Она приведёт к ускорению и увеличению скорости полосы, что вызовет рост угла γ и, в конечном счёте, к восстановлению равенства (3).

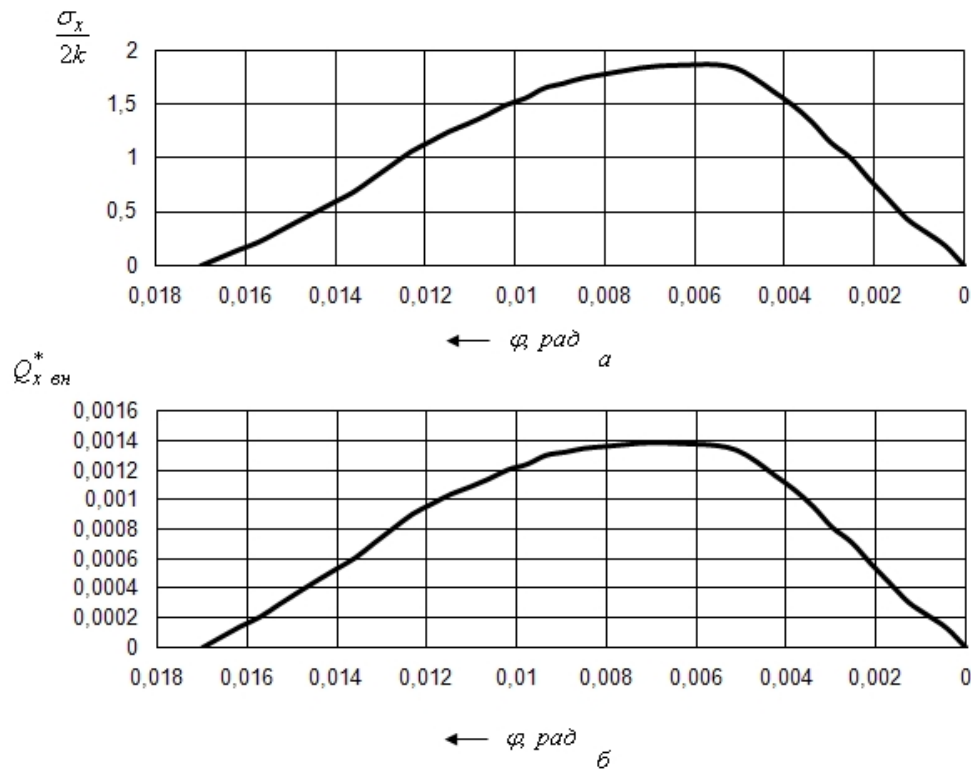


Рис. 3 – Эпюры распределения внутреннего напряжения и текущей результирующей горизонтальных внутренних сил

Следовательно, регулирующая роль угла нейтрального сечения заключается в поддержании равновесия между результирующими горизонтальными силами на контакте и внутри деформируемого металла. Другие горизонтально направленные силы в очаге деформации не действуют. Кроме того, согласно (3), внутренние силы, оказывая влияние на значение γ , влияют и на кинематические прокатки.

Таким образом, как показало исследование, при устойчивом процессе прокатки на контакте металла с валками всегда действует результирующая сила Q_{cp}^* в направлении движения полосы. Тогда, принятое в теории положение о том, что действующие на контакте силы взаимно уравновешены, является спорным. Равновесие в очаге деформации действительно соблюдается, но с учётом внутренних сил. Отсюда следует, что при установившемся процессе общая равнодействующая контактных сил наклонена в сторону движения полосы. Только в предельном случае прокатки, когда $Q_{cp}^* = 0$, она принимает вертикальное направление. Очевидно, что, с учётом силы Q_{cp}^* , плечо момента будет отличаться от величины, равной $\psi \cdot l_d$ (ψ – коэффициент плеча момента; l_d – геометрическая длина очага деформации), что будет являться объектом дальнейшего исследования.

Выводы. Показано, что равновесие в очаге деформации имеет место только с учётом внутренних сил пластически деформируемого металла. Втягивающие металл в валки силы затрачиваются не только на преодоление выталкивающих, но и на уравновешивание внутренних сил. В связи с этим, определённое влияние на угол нейтрального сечения оказывает напряжённое состояние прокатываемого металла.

Список литературы

1. Максименко О. П. Влияние режима трения на устойчивость прокатки при однозонном скольжении металла в валках // О. П. Максименко, Р. Я. Романюк, А. А. Никулин // Изв. вуз. Чёрная металлургия. 2008, № 6. – С.26-29.
2. Максименко О. П. Теоретический анализ захватывающей способности валков в установившемся режиме прокатки // О. П. Максименко, А. А. Никулин, Р. Я. Романюк // Изв. вуз. Чёрная металлургия. 2008, № 10. – С.32-34.
3. Максименко О. П. Исследование средней результирующей горизонтальных сил в очаге деформации при прокатке. // О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // Изв. вуз. Чёрная металлургия. 2009, № 10. – С.22-24.
4. Василев Я.Д. Развитие теории контактных напряжений при прокатке / Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 5. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. – С.86-96.
5. Грум-Гржимайло В.Е. Прокатка и калибровка. Л., "Кубуч", 1933. – 127 с.
6. Метц Н. Опытное исследование горячей прокатки железа / Вопросы металлургии, 1926, №1-2.