

УДК 621.771.01

Максименко О. П.
Романюк Р. Я.**РАВНОВЕСИЕ МЕТАЛЛА В ВАЛКАХ С УЧЁТОМ ВНУТРЕННИХ СИЛ**

В теории принято, что угол нейтрального сечения является регулятором равновесия сил в очаге деформации, и при нулевом его значении наступают предельные условия прокатки. Вместе с тем, известны опытные данные устойчивого процесса при однозонном скольжении металла в валках или даже при отставании на выходе из них, что трудно объяснить с позиции существующей теории. Кроме того, эксперименты [1] и других исследователей показывают, что процесс прокатки может прерываться при значительном опережении. Эти результаты также не получили убедительного объяснения.

В работах [2–5], на основе анализа теоретических эпюр контактных напряжений, показано, что индикатором устойчивости процесса может служить средняя результирующая горизонтальных сил, действующая в очаге деформации. В зависимости от величины и направления этой силы, прокатка либо протекает устойчиво без частичных пробуксовок, либо совершается в предельных условиях или же невозможна.

Целью настоящей работы является анализ равновесия металла в валках с учётом средней результирующей горизонтальных сил в зоне деформации Q_{cp}^* , а также исследование влияния внутреннего напряжённого состояния металла на кинематику процесса прокатки, в частности на угол нейтрального сечения.

Как следует из [3–5] Q_{cp}^* является безразмерной внешней силой, которая определена в условиях стационарной задачи. Однако в теории принято считать, что при установившемся процессе общая равнодействующая внешних сил в зоне контакта полосы с валками направлена вертикально. В этих двух суждениях просматривается определённое противоречие, сомнительность в истинности одного из них.

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 деформации) и удельных сил трения $\frac{t_x}{2k}$, приведённые в [6]. Заметим, что при решении дифференциального уравнения Кармана, автор 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 в очаге деформации:

$$\frac{q_x}{2k} = -\frac{p_x}{2k} \sin \varphi + \frac{t_x}{2k} \cos \varphi, \quad (1)$$

где φ – текущий угол в очаге деформации.

Ниже на рис. 1, г показана кривая изменения текущей результирующей горизонтальных сил Q_x^* в безразмерной форме:

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

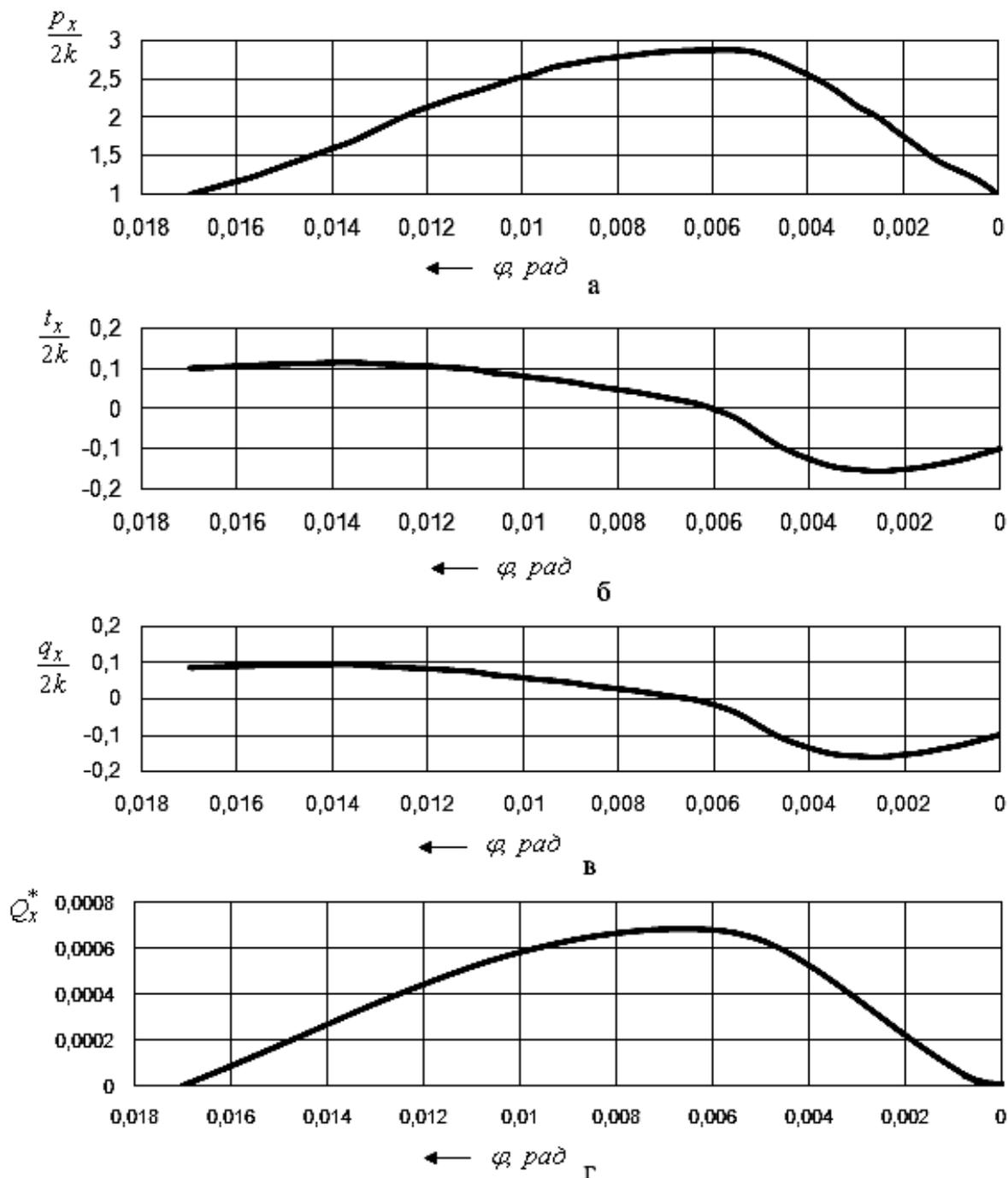


Рис. 1. Эпюры распределения контактных напряжений, продольного внешнего напряжения и текущей результирующей горизонтальных внешних сил

Как видно, данная сила на границах контактной зоны равна нулю. Отсюда следует, что 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. Следовательно, процесс является стационарным.

Заметим, что внутри очага деформации текущая сила Q_x^* изменяется по определённо-му закону и, очевидно, можно найти её среднее значение. В данном случае $Q_{cp}^* = 0,00039$.

Эта горизонтальная результирующая является внешней силой, она и подвергается анализу в наших исследованиях.

Для решения вопроса о том, какие силы её уравнивают, проанализируем распределение продольных нормальных напряжений, возникающих в пластически деформируемом металле $\frac{\sigma_x}{2k}$. Учитывая уравнение пластичности, нетрудно построить график изменения этих напряжений (рис. 2, а), найти текущую по очагу деформации результирующую горизонтальных внутренних сил $Q_{x\text{вн}}^*$ (рис. 2, б) и получить её среднюю величину $Q_{\text{срвн}}^*$:

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

$$Q_{x\text{вн}}^* = \frac{Q_{x\text{вн}}}{2kRb} = \left(\frac{p_x}{2k} - 1 \right) \left(\frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right), \quad (3)$$

где $Q_{x\text{вн}}$ – текущая результирующая внутренних сил в размерной форме;
 b – ширина полосы.

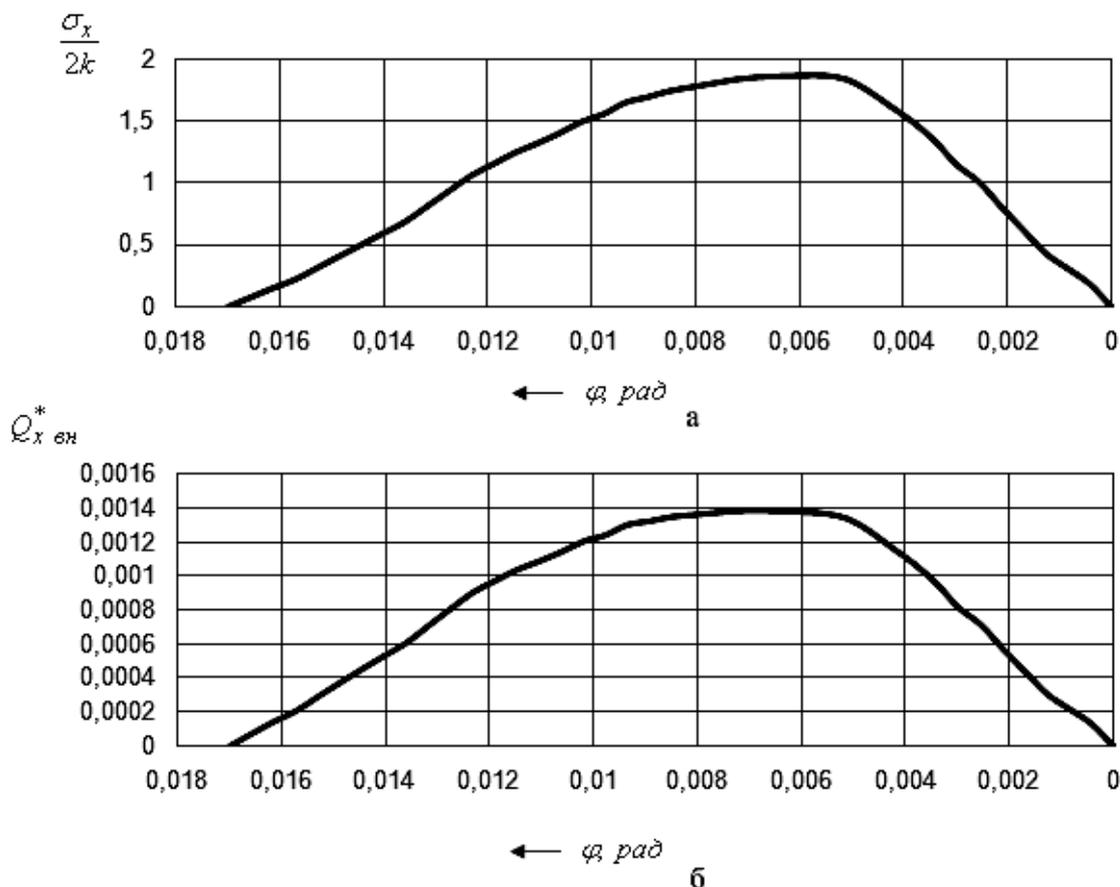


Рис. 2. Эпюры распределения внутреннего напряжения и текущей результирующей горизонтальных внутренних сил

Сравнивая средние значения внешних и внутренних сил, приходим к выводу, что:

$$2Q_{\text{ср}}^* = Q_{\text{срвн}}^*, \quad (4)$$

т. е. они взаимно уравновешены, чем и обеспечивается стационарность процесса.

Очевидно, что при данном угле нейтрального сечения γ втягивающие силы затрачиваются не только на преодоление выталкивающих, но и на уравнивание силы $Q_{ср\text{вн}}^*$. В этом можно убедиться, если сравнить значения γ , полученные непосредственно из решения дифференциального уравнения Кармана по эпюрам распределения удельных сил трения и по известной формуле, при одинаковых условиях прокатки:

$$\gamma = \frac{\alpha_y}{2} \left(1 - \frac{\alpha_y}{2f_y} \right). \quad (5)$$

Результаты вычислений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение значений угла нейтрального сечения

№ п/п	Толщина полосы, мм		Угол захвата, α , рад	Радиус валков, R , мм	$\frac{l_d}{h_{ср}}$	Коеф. 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

Анализ полученных данных показывает, что угол γ , определяемый из эпюр всегда меньше, чем по приведенной формуле. Последнее связано с тем, что при решении уравнения Кармана внутренние силы деформируемого металла в равновесии участвуют, а при расчёте по формуле И. М. Павлова нет.

Проведенное исследование также показывает, что общая равнодействующая контактных сил при устойчивом процессе прокатки отклонена от вертикали в сторону движения полосы, т.к. включает составляющую $Q_{ср}^*$. Только в предельных условиях, когда $Q_{ср}^* = 0$, она направлена вертикально.

Очевидно, что, с учётом силы $Q_{ср}^*$, 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.

В [1, с. 64] приведена опытная зависимость предельного угла захвата в установившемся режиме α_y от конечной толщины полосы h_1 . Как видно, правая ветвь полученной кривой понижается. Автор объясняет эту зависимость влиянием зоны прилипания и смещением равнодействующей нормальных давлений в сторону входа металла в валки.

С помощью приведенной методики, получена аналогичная зависимость (рис. 3), которая не учитывает влияние вышеуказанных факторов. Возможно, что, наряду с зоной прилипания и положения равнодействующей, на характер этой зависимости дополнительно влияет и средняя результирующая внутренних сил.

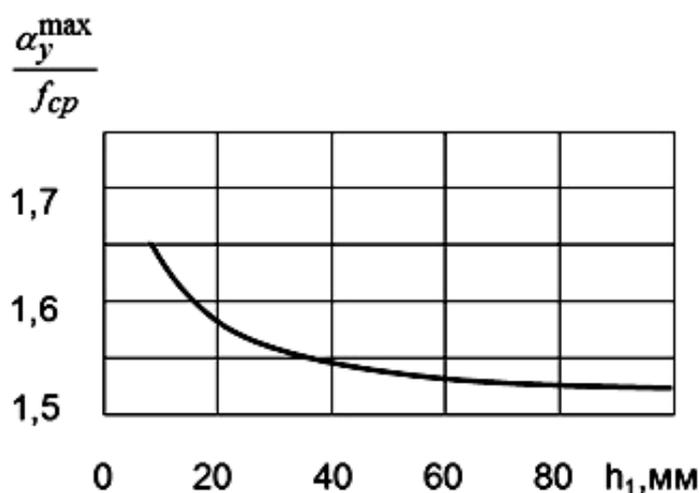


Рис. 3. Зависимость предельного угла захвата от конечной толщины полосы: f_{cp} – средний по очагу деформации коэффициент трения

ВЫВОДЫ

Показано, что средняя результирующая внешних горизонтальных сил в очаге деформации уравнивается внутренними силами деформируемого металла, что обеспечивает стационарность процесса.

Следовательно, втягивающие металл в валки силы затрачиваются не только на преодоление выталкивающих, но и внутренних сил, возникающих при пластической деформации полосы. В связи с чем определенное влияние на угол нейтрального сечения оказывает напряжённое состояние прокатываемого металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков / А. П. Грудев – М. : СП Интермет Инжиниринг, 1998. – 283 с.
2. Максименко О. П. Исследование процесса прокатки в режиме гидродинамического трения / О. П. Максименко, В. М. Самохвал // Изв. вуз. Чёрная металлургия. – 2007. – № 2. – С. 40–43.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Василев Я. Д. Развитие теории контактных напряжений при прокатке / Я. Д. Василев // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 5. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ : Системні технології. – 2002. – С. 86–96.

Максименко О. П. – д-р техн. наук, проф. ДГТУ;

Романюк Р. Я – аспирант ДГТУ.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет,
г. Днепродзержинск.

E-mail: r22roma@mail.ru