

РОЗДІЛ «ПРОКАТНЕ ВИРОБНИЦТВО»

УДК 621.771.01

МАКСИМЕНКО О.П., д.т.н., професор
ЛОБОЙКО Д.И., зав. лабораторією
БАКУН В.В., магістр

Дніпровський державний технічний університет, г. Каменське

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОСЫ В ВАЛКАХ

Введение. В работах [1-3] предложена новая методика оценки продольной устойчивости полосы в очаге деформации, которая основана на расчете средней результирующей текущих горизонтальных сил пластически деформируемого металла. Исследованиями установлено, что если эта сила направлена противоположно движению полосы, то процесс будет совершаться устойчиво без частичных пробуксовок. В случае равенства её нулю прокатка будет проводиться в предельных условиях. При совпадении вектора этой результирующей и направления движения полосы процесс невозможен. В основу разработанной методики положена схема равновесия текущего объема металла в очаге деформации (рис.1).

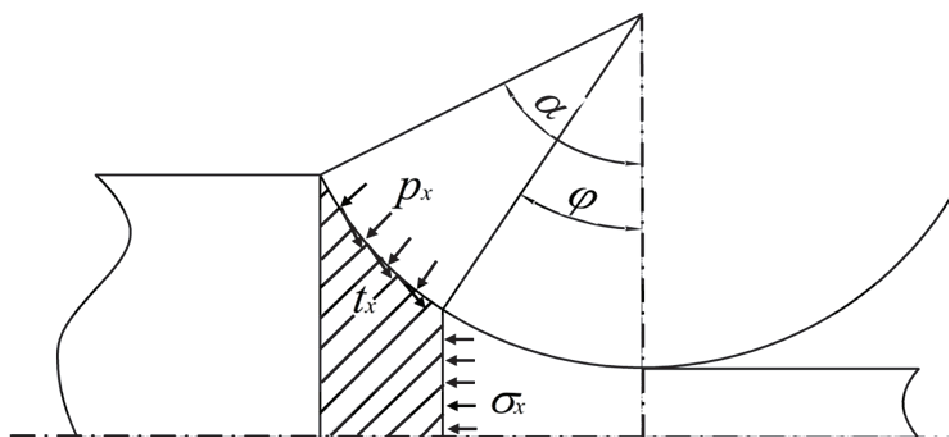


Рисунок 1 – Схема равновесия текущего объема металла в очаге деформации

Условие равенства контактных и внутренних сил в этом случае имеет вид:

$$-2 \int_{\varphi}^{\alpha} p_x \sin \varphi \cdot R d\varphi b + 2 \int_{\varphi}^{\alpha} t_x \cos \varphi \cdot R d\varphi b = \sigma_x h_x b, \quad (1)$$

где p_x и t_x – нормальное давление и удельная сила трения;

σ_x – нормальное продольное напряжение, вызванное пластической деформацией металла;

R и b – радиус валков и ширина раската;

α и φ – угол захвата и его текущее значение в очаге деформации;

h_x – текущая толщина полосы.

Постановка задачі. Правая часть выражения (1) представляет собой текущую продольную силу в очаге деформации Q_{xnp} .

При анализе устойчивости процесса важно знать не текущее значение силы Q_{xnp} , а её среднее результирующее значение $Q_{ср np}$, которое равно:

$$Q_{ср np} = \frac{1}{ld} \int_0^{\alpha} Q_{xnp} R d\varphi. \quad (2)$$

Учитывая, что эта сила является реакцией на внешнее воздействие, активную в очаге деформации роль она играть не может. Согласно этой гипотезе и построена методика оценки продольной устойчивости полосы в валках. Анализируя выражение (1), важно установить, какая силовая модель, известная в теории прокатки, является аналогом этого уравнения. Для этого продифференцируем равенство (1). Предварительно заметим, что рассматривается случай прокатки широкой полосы, когда $\Delta b \approx 0$.

$$d \left[-2 \int_{\varphi}^{\alpha} p_x \sin \varphi \cdot R d\varphi \right] + d \left[2 \int_{\varphi}^{\alpha} t_x \cos \varphi \cdot R d\varphi \right] = d\sigma_x h_x + dh_x \sigma_x. \quad (3)$$

Если $h_x = h_1 + R\varphi^2$, то $dh_x = 2R\varphi \cdot d\varphi$.

Рассмотрим первый член левой части уравнения (3).

Пусть $\int_{\varphi}^{\alpha} p_x \sin \varphi \cdot R d\varphi = \psi(\alpha) - \psi(\varphi)$. Тогда при дифференцировании первый

член правой части этого выражения равен нулю. В результате

$$d \left[-2 \int_{\varphi}^{\alpha} p_x \sin \varphi \cdot R d\varphi \right] = 2 p_x \sin \varphi \cdot R d\varphi,$$

$$d \left[2 \int_{\varphi}^{\alpha} t_x \cos \varphi \cdot R d\varphi \right] = -2 t_x \cos \varphi \cdot R d\varphi,$$

и выражение (3) приобретает вид:

$$2 p_x \sin \varphi \cdot R d\varphi - 2 t_x \cos \varphi \cdot R d\varphi = d\sigma_x h_x + \sigma_x \cdot 2R d\varphi$$

или

$$2R\varphi \cdot d\varphi \left(p_x \frac{\sin \varphi}{\varphi} - t_x \frac{\cos \varphi}{\varphi} - \sigma_x \right) = d\sigma_x h_x.$$

В практических случаях $\frac{\sin \varphi}{\varphi} \approx 1$, а $\frac{\cos \varphi}{\varphi} \approx \frac{1}{tg\varphi}$.

Тогда

$$dh_x \left(p_x - \frac{t_x}{tg\varphi} - \sigma_x \right) = d\sigma_x h_x.$$

Предполагая, что p_x и σ_x являются главными напряжениями, имеем:

$$p_x - \sigma_x = 2k_{ср}, \quad (4)$$

где $2k_{cp}$ – среднее сопротивление деформации металла.

$$dp_x = d\sigma_x.$$

Подставляя эти значения в предыдущее уравнение, получаем:

$$dp_x = \left(2k_{cp} - \frac{t_x}{\operatorname{tg}\varphi} \right) = \frac{dh_x}{h_x}. \quad (5)$$

Результаты работы. Таким образом, проведенный анализ показал, что аналогом выражения (1) является широко известное в теории прокатки дифференциальное уравнение равновесия Т.Кармана (5). Следовательно, при определении продольных нормальных напряжений σ_x и сил Q_{xnp} и Q_{cpnp} можно исходить из решения уравнения Т.Кармана при модели трения в виде:

$$t_x = fp_x$$

или любой другой подходящей функции.

Как известно, анализ результатов исследования лучше проводить в безразмерной форме. Поэтому уравнение (5) при удельных силах трения, заданных кулоновской моделью, приведено к безразмерному виду:

$$d\left(\frac{p_x}{2k_{cp}}\right) = \left(1 - \frac{f \frac{p_x}{2k_{cp}}}{\operatorname{tg}\varphi} \right) \frac{dh_x}{h_x} \quad (6)$$

Решая это выражение с учётом условия пластичности

$$\frac{p_x}{2k_{cp}} = 1 + \frac{\sigma_x}{2k_{cp}},$$

можно получить распределение давления $\frac{p_x}{2k_{cp}}$; $\frac{\sigma_x}{2k_{cp}}$; $Q_{xnp}^* = \frac{Q_{xnp}}{2k_{cp}Rb}$ и

$Q_{cpnp}^* = \frac{Q_{cpnp}}{2k_{cp}Rb}$ в безразмерной форме.

Проанализируем изменение средней результирующей силы Q_{cpnp}^* в зависимости от условий прокатки по опытным данным П.Л.Клименко [4, 5]. В этих случаях экспериментальные эпюры распределения контактных напряжений таковы, что в одних условиях процесс ведется с опережением, в других опытах – при однозонном скольжении металла в валках. Условия прокатки, при которых измерялись контактные напряжения, приведены в табл. 1.

Измерение контактных напряжений в условиях первого опыта показало, что в очаге деформации имеет место развитая зона опережения. Запас втягивающих металл в валки сил значителен, процесс прокатки совершался устойчиво без видимости малейших пробуксовок, на что обращает внимание автор выполненного исследования [4]. При теоретическом определении распределения контактных и внутренних напряжений, а также текущих продольных сил, показанных на рис.2 (кривые 1), видно, что значения

$\frac{\sigma_x}{2k_{cp}}$ по всей длине очага деформации являются сжимающими. Тогда текущие силы Q_{xnp}

Таблица 1 – Параметры прокатки при исследовании контактных напряжений

Номер опыта	Толщина образца, мм		Средний коэффициент трения	Диаметр валков, мм	Угол захвата, рад.	Параметр формы $\frac{l_d}{h_{cp}}$	Источник	Условия прокатки
	h_0	h_1						
1	6	4,2	0,21	210	0,131	2,7	[4]	Горячая прокатка стали
2	2	1,0	0,09	208	0,098	7	[5]	Прокатка свинца с технологической смазкой
3	2,2	1,2	0,06	208	0,098	6	[5]	Прокатка свинца с технологической смазкой

Примечание: ширина образцов $b = 50$ мм

и их средняя результирующая $Q_{ср пр}^*$ направлены противоположно движению полосы (принимают отрицательные значения), что свидетельствует о продольной устойчивости металла в валках. Из отмеченного следует, что теоретические выводы подтверждаются экспериментом. Аналогичные выводы можно сделать и в отношении второго опыта при прокатке свинцовых образцов с малоэффективной технологической смазкой. Вместе с тем следует отметить, что при прокатке в условиях второго опыта зона опережения была малой, и запас стягивающих сил был значительно меньшим. Теоретическое решение приведено кривыми 2 на рис.2. В этом случае результирующая сила $Q_{ср пр}^*$ также отрицательна, хотя по абсолютной величине значительно меньше, чем в первом случае ($Q_{ср пр}^* = -0,0017$). Прокатка свинцовых образцов в третьем опыте проводилась с эффективной технологической смазкой, коэффициент трения равен $f_{ср} = 0,06$. Процесс прокатки протекал при однозонном скольжении металла в валках. Автор отмечает [5], что в этом случае эпюры контактных напряжений получены при неустойчивой прокатке с пробуксовками металла. Теоретическое решение в этом случае прокатки представлено на рис.2 кривыми 3. Текущая сила $Q_{х пр}^*$ на большей части очага деформации является положительной, средняя результирующая сила $Q_{ср пр}^* = 0,0006$, что свидетельствует о невозможности устойчивого процесса прокатки.

Выводы. Таким образом, расчетные данные полностью подтвердили результат эксперимента. Значение средней результирующей силы пластически деформируемого металла может характеризовать продольную устойчивость полосы в валках, и уравнение Т.Кармана может использоваться для этой оценки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максименко О.П. Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий: монография / О.П.Максименко, Д.И.Лобойко, М.К.Измайлова. – Днепро-дзержинск: ДГТУ, 2016. – 213с.
2. Максименко О.П. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке / О.П.Максименко, Д.И.Лобойко, Р.Я.Романюк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 6. – С.47-49.
3. Максименко О.П. Уточнение условий продольной устойчивости процесса прокатки / О.П.Максименко, Р.Я.Романюк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 1. – С.41-43.

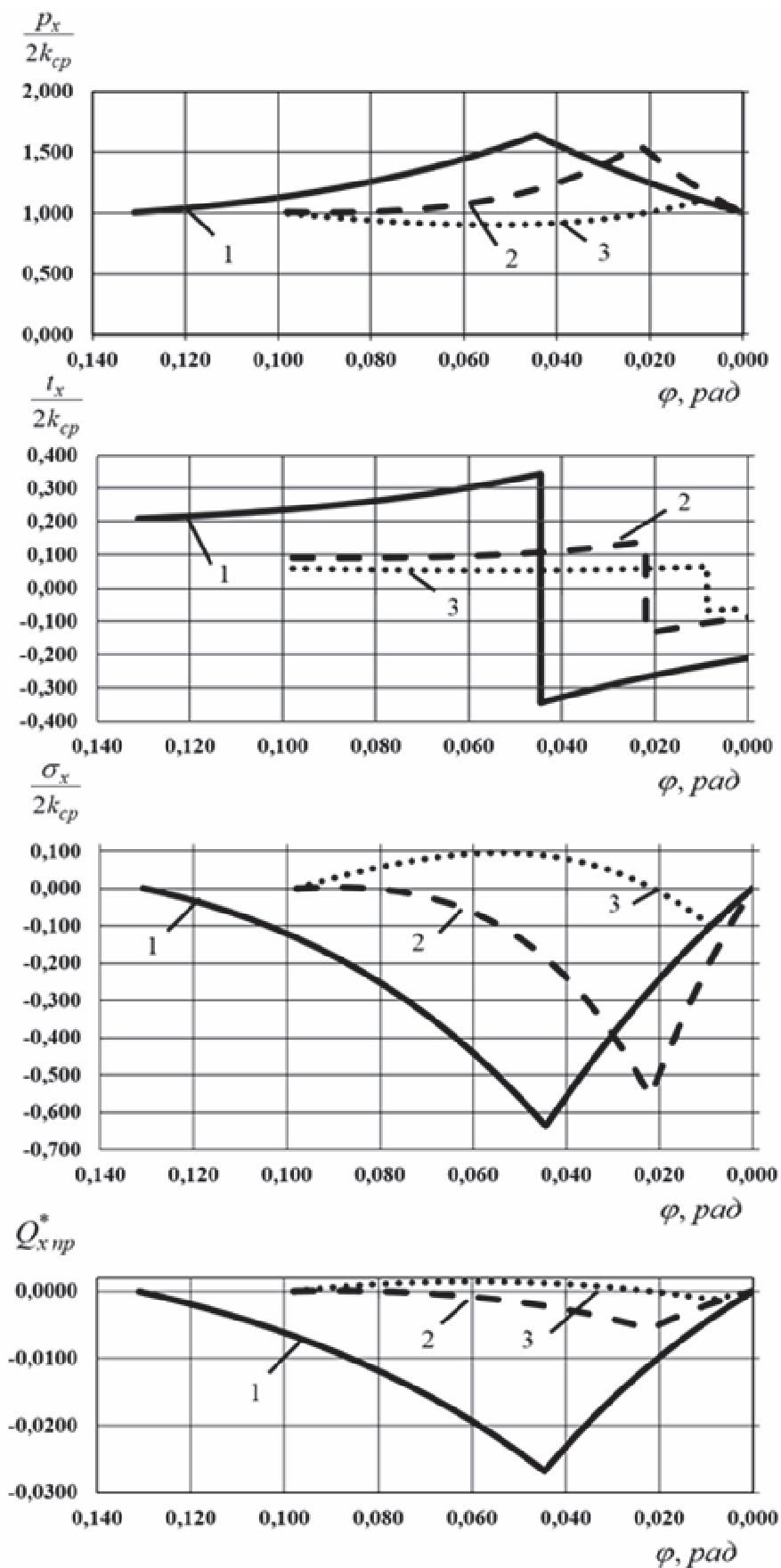


Рисунок 2 – Теоретические эпюры распределения контактных и внутренних напряжений, а также текущих продольных сил

4. Чекмарев А.П. Анализ процесса прокатки по данным распределения контактных напряжений / А.П.Чекмарев, П.Л.Клименко // Теоретические проблемы прокатного производства. Теория прокатки: Всесоюзн. науч.-техн. конф., 1975 г.: материалы / под ред. А.П.Чекмарева. – М.: Металлургия, 1975. – С.33-37.
5. Клименко П.Л. Контактное напряжение при прокатке с технологической смазкой / П.Л.Клименко // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 8. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ: Сучасні технології. – 2005. – С.44-49.

Поступила в редколлегию 18.12.2017.

УДК.621.771.01

МАКСИМЕНКО О.П., д.т.н., профессор
ЛОБОЙКО Д.И., зав. лабораторией
МАРЧЕНКО К.К., аспирант
ПУСТОВА С.Ю., магистр

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ В КОМПЛЕКСЕ ПРИВОДНЫХ И НЕПРИВОДНОЙ КЛЕТЕЙ

Введение. В работах [1-3] опубликованы результаты исследования процесса прокатки в блоке клетей, включающем неприводную. Такой процесс обеспечивается запасом сил трения в смежных приводных клетях. В указанных исследованиях дана оценка энергоэффективности процесса в комплексе с неприводной клетью, а также проанализировано влияние трения в опорах холостых валков на энергосиловые параметры. При непрерывной прокатке с натяжением или подпором полосы важно обеспечить продольную устойчивость металла, чтобы предотвратить возможные случаи частичной или полной пробуксовки его в валках.

Постановка задачи. В связи с этим, целью данного исследования является выполнение теоретического анализа процесса прокатки в комплексе, состоящем из трех клетей, средняя из которых является неприводной.

Результаты работы. Продольную устойчивость полосы в валках каждой клетки оценивали по величине и направлению действия средней результирующей $Q_{ср.пр.}^*$ внутренних горизонтальных сил пластически деформируемого металла. Методика определения силы $Q_{ср.пр.}^*$ приведена в публикациях [4-6]. Заметим, что эта результирующая является силой сопротивления, реакцией на действие контактных напряжений и поэтому активную роль в процессе деформации полосы играть не может. В связи с отмеченным, прокатка металла в очаге деформации будет устойчивой, если $Q_{ср.пр.}^* < 0$. При $Q_{ср.пр.}^* = 0$ процесс совершается в предельных условиях. В случае, если эта сила направлена по движению полосы, процесс невозможен.

Теоретический анализ проводили на примере прокатки в первых трех клетях черновой группы среднесортного стана 400/200 ДМКД. Предположим, что средняя клеть этого комплекса является неприводной. Граничные условия при сравнении затрат энергии в случае обычной прокатки и с применением неприводной клетки были одинаковыми, т.е. $q_{01_n} = q_{01_n}$ и $q_{13_n} = q_{13_n}$.