

УДК 621.771.01

Максименко О. П.
Романюк Р. Я.
Романюк К. В.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ С УЧЁТОМ ПРОДОЛЬНЫХ 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 (при «отрицательном» опережении), что трудно объяснить с позиции существующей теории. Кроме того, эксперименты А. П. Грудева, В. И. Прокофьева и других исследователей показывают, что процесс прокатки может прерываться при значительном опережении. Эти результаты также не получили убедительного объяснения.

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 процесса прокатки.

Исходными данными для определения горизонтальных сил являются эпюры контактных напряжений, которые могут быть получены из дифференциального уравнения Т. Кармана. В качестве модели трения при решении уравнения равновесия используется зависимость, которая учитывает скольжение в очаге деформации и кулоновскую связь между контактными напряжениями [2].

Получим теоретически эпюры контактных напряжений для следующих условий прокатки: $R = 97,3$ мм, $h_1 = 1,1$ мм, $\alpha_y = 0,2$ рад и $f_y = 0,25$ (R – радиус валков, h_1 – конечная толщина полосы, α_y – угол захвата в установившемся режиме, f_y – коэффициент трения в зонах скольжения). Результаты расчёта приведены на рис. 1, а, б. Следует отметить, что все расчёты выполнены в безразмерных величинах, хотя всегда можно получить эти величины в размерной форме.

Имея эпюры безразмерного давления $\frac{p_x}{2k}$ (k – сопротивление металла чистому сдвигу) и, учитывая уравнение пластичности, нетрудно рассчитать продольное нормальное напряжение $\frac{\sigma_x}{2k}$ (рис. 1, в), действующее в каждом сечении очага деформации. Далее найдём распределение вдоль очага деформации текущей продольной внутренней силы:

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

или в безразмерной форме:

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

где φ – текущий угол в зоне контакта полосы с валками;
 b – ширина полосы, в условиях плоской задачи $b = const$;
 h_x – текущая толщина металла.

Эюра изменения текущей силы $Q_{x\text{вн}}^*$ приведена на рис. 1, г. Как видно на границах очага деформации эта сила принимает нулевое значение, что подчёркивает стационарность процесса. В зависимости от условий прокатки внутренняя сила $Q_{x\text{вн}}^*$ может изменяться как количественно, так и качественно. Так, при прокатке с $\alpha_y > f_y$ на части очага деформации возникают продольные нормальные растягивающие напряжения [4, 5] и др. В соответствии с этим, и сила $Q_{x\text{вн}}^*$ на данном участке меняет своё направление. Учитывая, что растягивающие напряжения σ_x возникают при $\alpha_y > f_y$, то, как будет показано дальше, результирующую $Q_{x\text{вн}}^*$ можно использовать для оценки продольной устойчивости процесса прокатки.

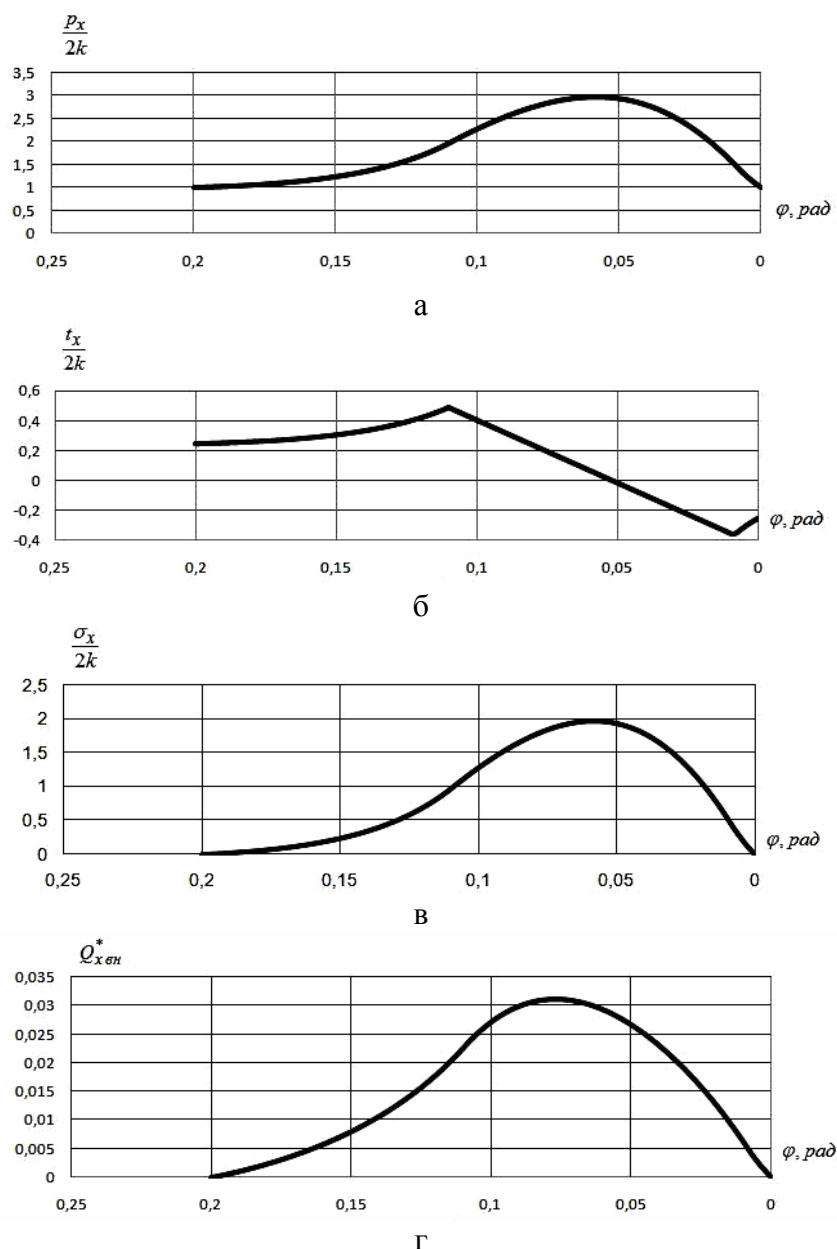


Рис. 1. Эюры распределения контактных напряжений (а, б), внутреннего горизонтального напряжения (в) и текущей продольной внутренней силы (г)

В условиях поставленной задачи во всех сечениях очага деформации сила $Q_{x\text{вн}}^*$ является сжимающей. Далее найдём среднее значение этой силы:

$$Q_{ср\ вн}^* = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} Q_{вн}^* d\varphi. \quad (2)$$

Таким образом, в очаге деформации выделена результирующая внутренняя сила пластически деформируемого металла. Анализируя опытные данные Метца [6], а также исследования В. Е. Грум-Гржимайло [7] можно убедиться в реальности силы $Q_{ср\ вн}^*$. Под воздействием этой силы на значительной части очага деформации возникает как бы «попятное» движение металла. Предварительно нанесенные вертикальные риски на поверхности полосы (рис. 2, прямые 1) при пластической деформации изгибаются в сторону входа металла в валки (рис. 2, кривые 2).

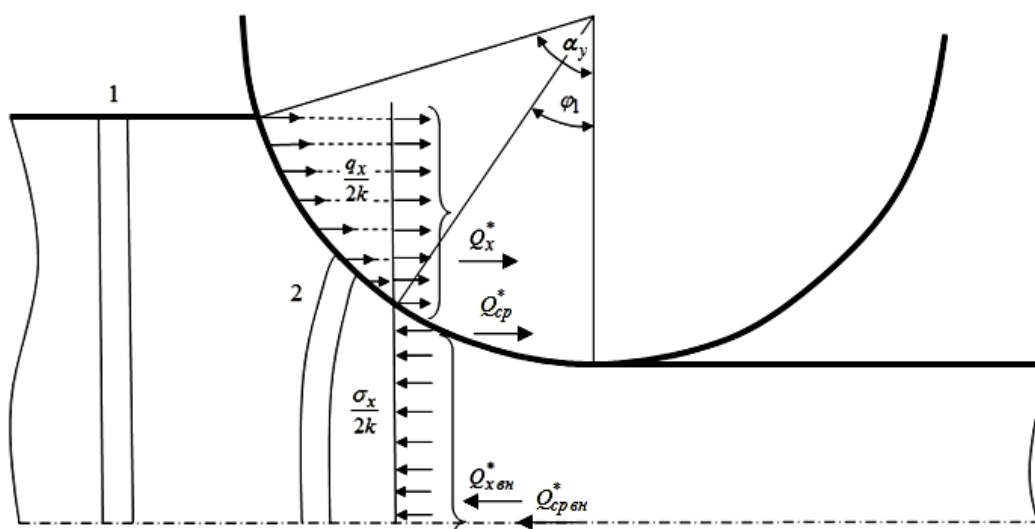


Рис. 2. Силы, действующие в очаге деформации при установившемся процессе прокатки

Согласно дифференциальному уравнению Т. Кармана уравновесить $Q_{вн}^*$ могут только горизонтальные контактные силы Q_x^* , методика расчёта которых приведена в [1–3]. Эпюры изменения горизонтального напряжения $\frac{q_x}{2k} = -\frac{p_x}{2k} \sin \varphi + \frac{t_x}{2k} \cos \varphi$ и текущей горизонтальной контактной силы Q_x^* приведены на рис 3, а, б.

Анализируя эпюры распределения горизонтальных контактных и внутренних сил, приходим к выводу, что во всех сечениях очага деформации соблюдается равенство:

$$2Q_x^* = Q_{вн}^*. \quad (3)$$

Важно отметить, что текущую силу Q_x^* можно выделить и из опытных эпюр контактных напряжений [3, 8]. На основании равенства (3) можно сделать вывод, что и средние значения этих сил будут аналогично соотноситься, т. е.:

$$2Q_{ср}^* = Q_{ср\ вн}^*. \quad (4)$$

Сила $Q_{ср}^*$ направлена по движению прокатываемого металла и способствует процессу прокатки, сила $Q_{ср\ вн}^*$ направлена в обратную сторону и старается затормозить его. Направление действия этих сил показано на рис. 2.

Из выражения (4) следует, что втягивающие металл в валки контактные силы затрачиваются не только на преодоление выталкивающих, но и на уравнивание внутренних сил, что, по-видимому, должно оказать влияние на захватывающую способность валков.

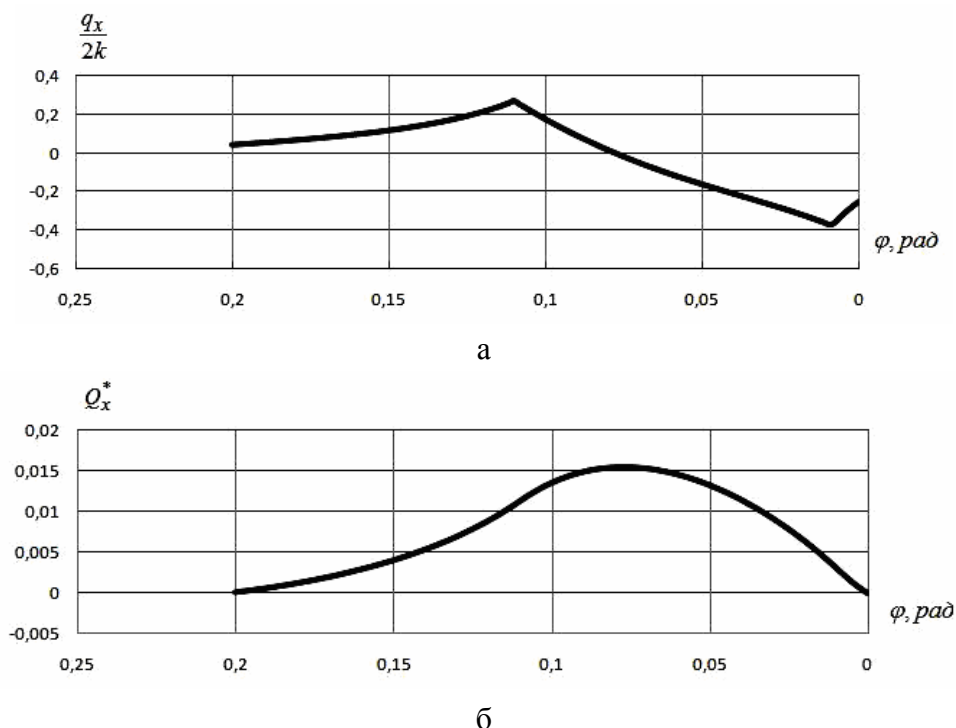


Рис. 3. Эпюры распределения продольного контактного напряжения (а) и текущей результирующей горизонтальных контактных сил (б)

Проанализируем устойчивость процесса прокатки на основе определения внутренних горизонтальных сил для условий опытной прокатки [9], в которой исследована зависимость опережения от угла захвата и показано, что при $S = 4\%$ возникает пробуксовка полосы в валках. Казалось бы, в очаге деформации ещё имеется достаточный запас сил трения, но устойчивый процесс прокатки уже невозможен.

Опыты были проведены при прокатке свинцовых образцов на конечную толщину $h_1 = 3,75$ мм при среднем коэффициенте трения $f_y = 0,28$. Прокатку вели на стане дуо в валках диаметром $D = 210$ мм.

На графиках рис. 4 приведены теоретические эпюры контактных напряжений (а, б) для трёх случаев прокатки с разными углами захвата, близкими к предельному. Эти эпюры получены при решении уравнения Кармана с моделью трения [2].

Далее рассчитали эпюру продольных нормальных внутренних напряжений (в) и определили текущую горизонтальную внутреннюю силу (г) при тех же углах захвата.

Как видно из эпюр распределения $Q_{x\text{вн}}^*$, в первом случае, при угле захвата $\alpha_y = 0,3$ рад, все значения $Q_{x\text{вн}}^*$ являются одного знака, следовательно, средняя сила $Q_{ср\text{вн}}^*$ (рис. 2) направлена в сторону, противоположную движению полосы. Согласно (4) в этом случае по направлению прокатки действует средняя результирующая горизонтальных контактных сил $Q_{ср}^*$ (рис. 2), которая и способствует устойчивому ведению процесса прокатки. Во втором случае, при $\alpha_y = 0,39$ рад, имеют место области разных по знаку значений силы $Q_{x\text{вн}}^*$, причём, как видно из эпюры, площади этих областей приблизительно одинаковы, поэтому $Q_{ср\text{вн}}^* \approx 0$, а также и $Q_{ср}^* \approx 0$. Тогда, в соответствии с [8], при данном угле захвата наступают

предельные условия прокатки. И в последнем случае, при $\alpha_y = 0,45$ рад, процесс прокатки невозможен, потому что результирующая контактная сила Q_{cp}^* направлена противоположно движению полосы.

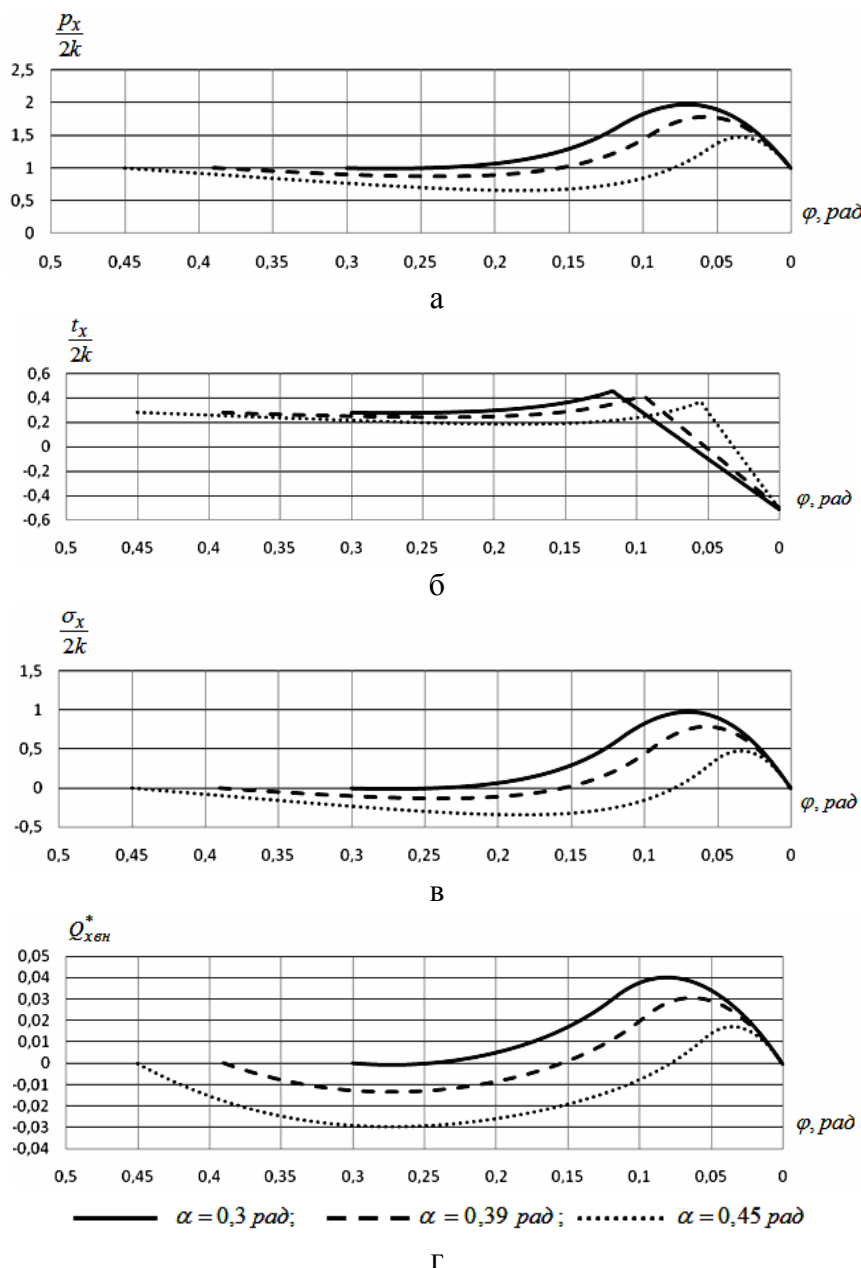


Рис. 4. Эпюры распределения контактных напряжений (а, б), продольного внутреннего напряжения (в) и текущей результирующей горизонтальных внутренних сил (г) для условий опытов [9]

Таким образом, как показало исследование, оценить устойчивость процесса прокатки можно как при анализе контактных сил в очаге деформации [3], так и внутренних. Также отметим, что 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. Из выражения (4) и пунктирной кривой рис. 4, г также следует, что с учётом внутренних сил захватывающая способность валков в установившемся режиме будет хуже, чем

принято теорией ($\frac{\alpha_y^{\max}}{f_{cp}} = \frac{0,39}{0,28} = 1,4$), т. к. контактными втягивающими силами дополнительно

необходимо преодолевать и результирующую внутреннюю силу Q_{cp}^* . Поэтому, как показывают опыты [9, 10] и исследование [8], процесс прокатки может затормаживаться при наличии зоны опережения. Кроме того, при устойчивом процессе общая равнодействующая контактных сил не может быть направлена вертикально ввиду действия горизонтальной результирующей Q_{cp}^* , направленной в сторону движения полосы. Только в предельном случае прокатки, когда Q_{cp}^* равна нулю, общая равнодействующая принимает вертикальное направление.

ВЫВОДЫ

Показано, что равновесие в очаге деформации имеет место только с учётом внутренних сил пластически деформируемого металла. Втягивающие металл в валки контактные силы затрачиваются не только на преодоление выталкивающих, но и на уравнивание внутренних сил, в результате чего снижается захватывающая способность валков в установившемся режиме.

ЛИТЕРАТУРА

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. Хейн А. Я. Процесс ленточной и тонколистовой прокатки / А. Я. Хейн. – М.: Металлургиздат, 1941. – 247 с.
5. Целиков А. И. Теория расчёта усилий в прокатных станах / А. И. Целиков. – М.: Металлургиздат, 1962. – 496 с.
6. Метц Н. Опытное исследование горячей прокатки железа / Н. Метц // Вопросы металлургии. – 1926. – № 1–2. – С. 45–50.
7. Грум-Гржимайло В. Е. Прокатка и калибровка / В. Е. Грум-Гржимайло. – Л.: Кубуч, 1933. – 127 с.
8. Максименко О. П. Оценка устойчивости процесса прокатки по опытным этюдам контактных напряжений / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 2. – С. 110–114.
9. Гончаров Ю. В. Исследование экспериментальных методов определения коэффициента внешнего трения при прокатке / Ю. В. Гончаров, В. И. Прокофьев // Обработка металлов давлением, научные труды ДМетИ, т. XLIX. – М.: Металлургия, 1965. – С. 238–254.
10. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков / А. П. Грудев. – М.: СП Интермет Инжиниринг, 1998. – 283 с.

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

Романюк Р. Я. – аспирант ДГТУ;

Романюк К. В. – магистр ДГТУ.

ДГТУ – Днепропетровский государственный технический университет,
г. Днепропетровск.

E-mail: r22roma@mail.ru