

УДК 621.771.01

МАКСИМЕНКО О.П., докт. техн. наук, проф., ДГТУ, г. Днепродзержинск
РОМАНЮК Р.Я., аспирант, ДГТУ, г. Днепродзержинск

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ

В статті, на основі визначення середньої результуючої горизонтальних зовнішніх сил, розроблена методика сталості процесу прокатки. Використовуючи цю методику, можна оцінити сталість процесу в більш широких межах, ніж за допомогою кута нейтрального перетину.

Ключові слова: Епюра, контактні напруження, сила, рівновага, сталий процес, осередок деформації, закон тертя, контактено-гідродинамічна модель.

In paper, on the basis of definition of an average resultant of horizontal external forces, the technique of stability of process rolling rinks is developed. Using this technique, it is possible to estimate stability of process in wider limits, than by means of a corner of neutral section.

Key words: The epure, contact pressures, force, equilibrium, resistant to process, a strain byte, the friction law, an contact-hydrodynamic sample piece.

В статье, на основе определения средней результирующей горизонтальных внешних сил, разработана методика устойчивости процесса прокатки. Используя эту методику, можно оценить устойчивость

процесса в более широких пределах, чем с помощью угла нейтрального сечения.

Ключевые слова: Эпюра, контактные напряжения, сила, равновесие, устойчивый процесс, очаг деформации, закон трения, контактено-гидродинамическая модель.

1. Введение

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 и даже при отставании на выходе из них, что трудно объяснить с позиции существующей теории. Кроме того, эксперименты А.П. Грудева [1], В.И. Прокофьева [2] и других исследователей показывают, что процесс прокатки может прерываться при наличии опережения. Эти результаты также не получили убедительного объяснения.

2. Постановка задачи

Целью работы является анализ всех сил, действующих в очаге деформации, и на основе этого, разработка методики оценки устойчивости процесса в продольном направлении.

3. Порядок исследования

Рассмотрим силы, действующие в зоне контакта полосы с валками. Исходными данными для их анализа принимаем эпюры распределения контактных напряжений по длине очага деформации.

Для примера обратимся к данным теоретического исследования нормальных давлений и удельных сил трения [3].

При прокатке в условиях, когда радиус валков $R = 300$ мм, начальная толщина полосы $h_0 = 0,3$ мм, угол захвата $\alpha_y = 0,017$ рад и коэффициент трения $f = 0,044$, эпюры контактных напряжений имеют вид, показанный на рис. 1, а, б.

На графике (рис. 1, в) приведено распределение внешнего горизонтального напряжения в каждом сечении очага деформации, определяемого по формуле:

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

где φ – текущий угол в очаге деформации,

$2k$ – сопротивление деформации.

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

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

Как видно, данная сила на границах контактной зоны равна нулю. Отсюда следует, что скорости полосы на входе и выходе из валков остаются постоянными во времени. Следовательно, процесс прокатки является стационарным.

Вместе с тем, внутри очага деформации текущая сила Q_x^* изменяется по определённому закону и очевидно можно найти её среднее значение Q_{cp}^* .

Эта горизонтальная результирующая, являющаяся внешней силой, 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 текущее по очагу деформации значение горизонтальных внутренних сил $Q_{x\text{вн}}^*$ (рис. 2, б):

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

и получить среднюю величину горизонтальных внутренних сил $Q_{cp\text{вн}}^*$.

Сравнивая среднее значение внешних и внутренних сил, приходим к выводу, что:

$$2Q_{cp}^* = Q_{cp\text{вн}}^*, \quad (4)$$

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 $Q_{cp\text{вн}}^*$. 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:

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

при одинаковых условиях прокатки.

Результаты вычислений приведены в таблице 1.

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.

Таблица 1

№ п/п	Толщина полосы, мм		Угол захвата, α , рад	Радиус валков, R , мм	$\frac{l_d}{h_{cp}}$	Коэф. трения, f	Угол γ , рад		Относ. разница, %
	h_0	h_1					по эпюрам	по формуле Павлова	
	1	0,3					0,21	0,017	
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

Заметим, что безразмерная средняя результирующая горизонтальных сил Q_{cp}^* тесно связана с кинематическими параметрами прокатки и, в частности, с опережением металла, что видно из графиков на рис. 3. Теоретический расчёт опережения проводился по известной формуле Головина-Дрездена. При определении силы Q_{cp}^* исходили из вышеприведенной методики. Опытные значения опережения и условия прокатки взяты из работы [1]: диаметр валков $D = 194,6$ мм, конечная толщина образцов $h_1 = 1,1$ мм, коэффициент трения $f_y = 0,25$.

Как следует из рис. 3, б зависимость опережения и силы Q_{cp}^* от угла захвата α_y является качественно одинаковой. Опытные и расчётные значения опережения весьма близки. Важно подчеркнуть, что, как утверждает автор [1], при угле захвата $\alpha_y = 0,34$ рад наступают предельные условия прокатки, хотя опережение составляет 10,1 %. Из графика (рис. 3, б) видно, что при этом безразмерная результирующая сила Q_{cp}^* равна нулю.

Для получения эпюр контактных напряжений использовали решение дифференциального уравнения Кармана при модели трения [4,5].

На рис. 4 приведены эпюры изменения текущей результирующей силы в условиях, близких к предельным.

В первом случае, при угле захвата $\alpha_y = 0,33$ рад, положительная площадь под кривой Q_x^* больше отрицательной, следовательно сила Q_{cp}^* положительна, направлена в сторону движения полосы и способствует устойчивому процессу прокатки. Во втором ($\alpha_y = 0,35$ рад) – эти площади равны, $Q_{cp}^* \approx 0$, следовательно, наступают предельные условия. И в последнем случае, при $\alpha_y = 0,36$ – преобладает

отрицательная площадь, средняя результирующая сила меньше нуля, поэтому устойчивый процесс деформации невозможен.

Аналогично проанализируем данные [2], представленные на рис. 5, а. Для условий опытной прокатки: диаметр валков $D = 210$ мм, конечная толщина образцов $h_1 = 3,75$ мм, коэффициент трения $f_y = 0,28$, приведены обобщённые результаты исследования (рис. 5, б).

Автор отмечает, что при угле захвата $\alpha_y = 0,4$ рад и опережении $S = 4\%$ возникает пробуксовка металла в валках.

Заметим, что в этом случае также сила $Q_{cp}^* \approx 0$.

В литературе имеются опытные данные, например Т. Мидзуно [6], И.М. Павлова и В.К. Белосевича [7], а также других, в которых наблюдается устойчивый процесс прокатки при “отрицательном” опережении с применением эффективных технологических смазок.

На основе вышеизложенной методики с применением контактно-гидродинамической модели трения при решении дифференциального уравнения Кармана, построим модель процесса прокатки для условий: диаметр валков $D = 200$ мм, конечная толщина образцов $h_1 = 0,64$ мм, угол захвата $\alpha = 0,06$ рад. Обобщенные результаты приведены на рис. 6.

Как следует из графика изменения силы Q_{cp}^* , процесс прокатки может протекать при положительном, нулевом опережении, и даже при отставании скорости полосы на выходе из валков. И только при опережении $S = -4,7\%$ наступают предельные условия деформации, т.к. средняя результирующая сила принимает нулевое значение.

Приведённые графики убеждают в том, что средняя результирующая горизонтальных сил Q_{cp}^* отражает реальную устойчивость процесса прокатки по условиям захвата, и сигнализирует о возможности пробуксовки металла в очаге деформации.

Таким образом, учитывая, что при простом устойчивом процессе средняя результирующая горизонтальных внешних сил в очаге деформации не равна нулю, то общая равнодействующая внешних сил будет наклонена в сторону движения полосы.

4. Выводы

При анализе эпюр контактных напряжений можно выделить среднюю результирующую горизонтальных сил в очаге деформации. В зависимости от условий прокатки она может принимать разные значения.

Показано, что предельные условия деформации наступают при равенстве данной силы нулю. Во всех остальных случаях, при устойчивой прокатке, она направлена в сторону движения металла.

Таким образом, общая результирующая всех сил наклонена в сторону процесса деформации, а не направлена вертикально, как это принято в теории. Очевидно, что в этом случае изменится плечо приложения данной силы, что является дальнейшей задачей исследований в этом направлении.

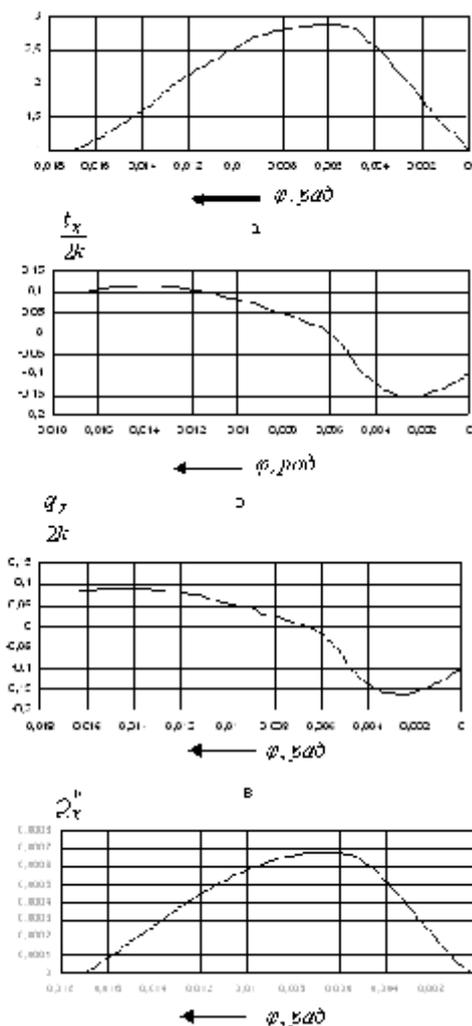


Рисунок 1 – Эпюры распределения контактных напряжений, продольного внешнего напряжения и текущей результирующей горизонтальных внешних сил

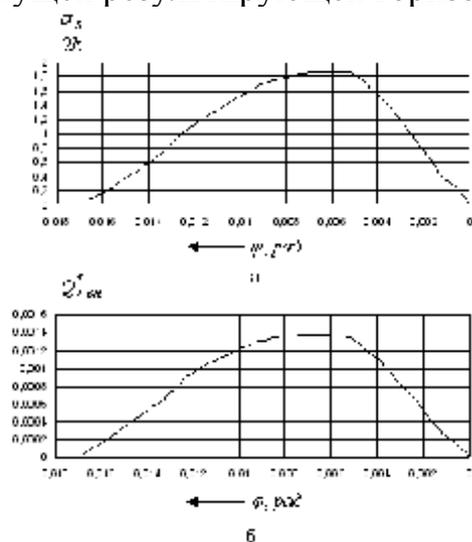


Рисунок 2 – Эпюры распределения внутреннего напряжения и текущей результирующей горизонтальных внутренних сил
 а – практические данные А.П. Грудева; б – результаты теоретического исследования;

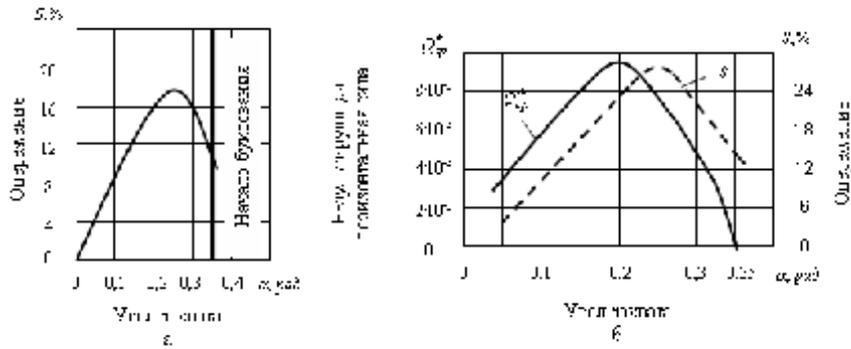


Рисунок 3 – Зависимость опережения и силы Q_{cp}^* от угла захвата

1 – $\alpha = 0,33$ рад; 2 – $\alpha = 0,35$ рад; 3 – $\alpha = 0,36$ рад;

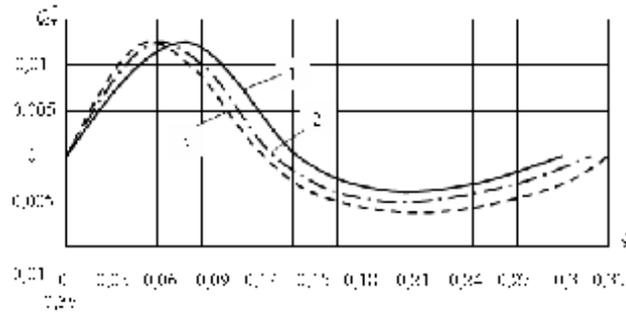


Рисунок 4 – Эпюры распределения силы Q_{cp}^* по длине очага деформации
а – практические данные В.И. Прокофьева; б – результаты теоретического исследования;

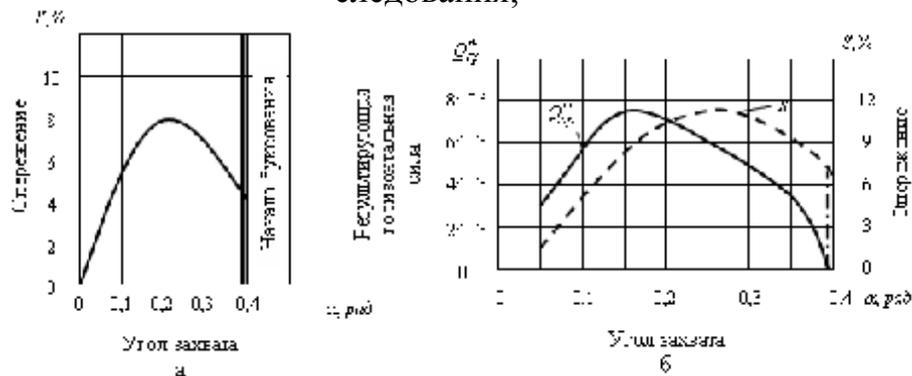


Рисунок 5 – Зависимость опережения и силы Q_{cp}^* от угла захвата

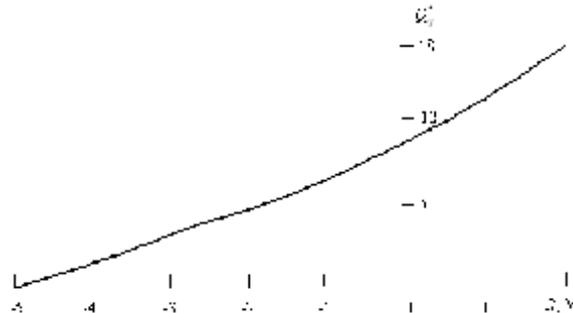


Рисунок 6 – Зависимость силы Q_{cp}^* от опережения при исследовании с использованием контактно-гидродинамической модели трения

Список литературы: 1. Грудев А.П. Захватывающая способность прокатных валков. М.: “СП Интермет Инжиниринг”, 1998. – 283 с. 2. Гончаров Ю.В., Прокофьев В.И. Исследование экспериментальных методов определения коэффициента внешнего трения при прокатке // Обработка металлов давлением: Науч. тр. ДМетИ. – Вып. XLIX: – М.: Металлургия, 1965. – С.238-254. 3. 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. 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. Теоретический анализ захватывающей способности валков в установленном режиме прокатки / О. П. Максименко, А.А. Никулин, Р. Я. Романюк // Изв. вуз. Чёрная металлургия. 2008, № 10. – С.32-34. 6. Такадзи Мидзуно. Экспериментальное исследование холодной прокатки / Сосей-то како. Том 7. 1966, № 66. – С.363-389. 7. Павлов И. М. К вопросу об отрицательном опережении при прокатке / И. М. Павлов, В. К. Белосевич // Изв. вуз. Чёрная металлургия. 1961, № 10. – С.46-49.

УДК 621. 771. 057

СЕРЕДА Б.П., докт. техн. наук, проф., ЗГИА, г. Запорожье
КОВАЛЕНКО А.К., аспирант, ЗГИА, г. Запорожье

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ В КАЛИБРАХ

Рассмотрен процесс прокатки в калибрах. Предложена математическая модель напряженно-деформированного состояния на боковой поверхности полосы. Найдено оптимальное соотношение параметров калибра, позволяющие рационально использовать энергетические и материальные ресурсы, а также получать прокат без брака.

Ключевые слова: оптимизация, калибр, полоса, деформация.

Розглянуто процес прокатування в калібрах. Запропоновано математична модель напружено-деформованого стану на бічній поверхні штаби. Знайдено оптимальне співвідношення параметрів калібру, що дозволяють раціонально використовувати енергетичні й матеріальні ресурси, а також одержувати прокат без браку.

Ключові слова: оптимізація, калібр, штаба, деформація.

A process proskating rink in calibres is considered. The mathematical model of the is intense-deformed condition on a lateral surface of a strip is offered. The optimum parity of parameters of the caliber is found, allowing rationally to use power and material resources, and also to receive hire without marriage.

Key words: an optimisation, a caliber, a strip, a deformation.

1. Введение

В условиях постоянной борьбы за рынки сбыта продукция украинских производителей по соотношению цены и качества нередко проигрывает своим китайским и русским аналогам, поэтому наиболее остро стоит вопрос комплексного решения таких задач, как обеспечение роста производительности станков, повышение качества поверхности и макроструктуры проката.

Нередко эти требования производства находятся между собой в противоречиях и поэтому необходима оптимизация технологии прокатки. Важной задачей явл-