

РОЗДІЛ «ПРОКАТНЕ ВИРОБНИЦТВО»

УДК 621.771.01

МАКСИМЕНКО О.П., д.т.н., профессор
ИЗМАЙЛОВА М.К., к.т.н., доцент
ЛОБОЙКО Д.И., аспирант
СТУДЕНЦОВА И.И., магистр

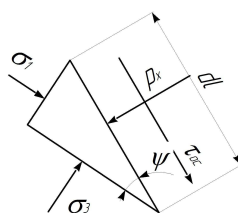
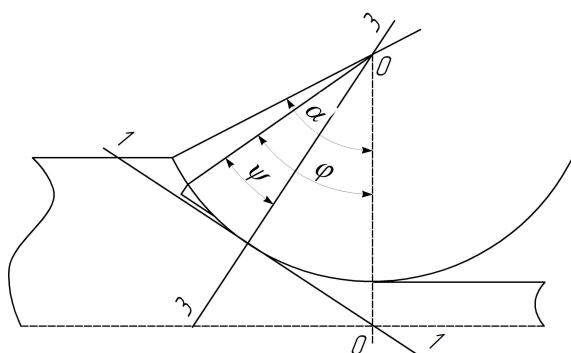
Днепродзержинский государственный технический университет

ДВУХЗВЕННАЯ МОДЕЛЬ ТРЕНИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ

Введение. В работах [1-3] и других приведены модели распределения удельных сил трения в очаге деформации, которые в определенном диапазоне изменения параметров прокатки дают достаточно близкие по отношению к результатам опытов значения. Однако они относятся к разряду подходящих функций и физического обоснования не имеют.

В настоящем исследовании предложена модель распределения удельных сил трения и предпринята попытка ее обоснования с позиции современной теории прокатки.

Постановка задачи. Мысленно представим процесс прокатки как осадку в направлении оси, проходящей под углом $\alpha/2$ (α – угол захвата) к вертикали с последующей транспортировкой металла из очага деформации как упругого тела. Выделим элемент



металла в виде треугольной призмы (рис.1) и рассмотрим его равновесие в условиях осадки. Предположим, что деформация является плоской, и взаимно перпендикулярные грани призмы являются главными площадками. В этом случае на

Рисунок 1 – Схема сил, приложенных к элементарной призме

будут действовать главные нормальные напряжения σ_1 и σ_3 , а на контактной поверхности, являющейся наклонной площадкой, – нормальное давление p_x и касательное напряжение τ_{oc} .

Условие равновесия элемента имеет вид:

$$\begin{cases} \sigma_1 \sin \psi dl - p_x \sin \psi dl + \tau_{oc} \cos \psi dl = 0; \\ \sigma_3 \cos \psi dl - p_x \cos \psi dl - \tau_{oc} \sin \psi dl = 0. \end{cases}$$

Вычитая второе выражение из первого и учитывая уравнение пластичности, имеем:

$$\tau_{oc} = \frac{1}{2} 2k \sin 2\psi.$$

При выделении элемента справа от оси 3-3 касательное напряжение τ_{oc} изменит свое направление, т.к. пластическое течение металла направлено в противоположную сторону. Конечное выражение для определения τ_{oc} справа от оси 3-3 имеет вид, анало-

гичный выше приведенному уравнению. Если принять за начало отсчета ось 0-0 (рис.1), то получим одно уравнение, описывающее изменение удельных сил трения на контакте при осадке металла валками:

$$\tau_{oc} = \frac{1}{2} 2k \sin 2\left(\varphi - \frac{\alpha}{2}\right), \quad (1)$$

где $2k$ – сопротивление деформации металла;

φ – текущий угол в очаге деформации.

Выделим вторую составляющую трения, связанную с транспортированием через очаг деформации предварительно продеформированных элементов металла. Пусть эта составляющая зависит от скольжения и определяется функцией:

$$\tau_{тр} = fp_x. \quad (2)$$

Тогда удельная сила трения t_x в зоне контакта полосы с валками приобретает вид:

$$t_x = \tau_{тр} + \tau_{oc} = fp_x + \frac{1}{2} 2k \sin 2\left(\varphi - \frac{\alpha}{2}\right). \quad (3)$$

Заметим, что f является условным коэффициентом, как следует из выражения (3) он не равен среднему коэффициенту трения в очаге деформации, полученному как отношение площадей эпюр удельных сил трения и нормального давления:

$$f_{cp} = \frac{\int_0^{\alpha} t_x d\varphi}{\int_0^{\alpha} p_x d\varphi} = \frac{\int_0^{\alpha} t_x d\varphi + \left| \int_0^{\gamma} t_x d\varphi \right|}{\int_0^{\alpha} p_x d\varphi}. \quad (4)$$

Необходимо отметить, что представленная модель в определенной мере соответствует уравнению К.Н.Шевченко, приведенному в [4]:

$$\tau_x = fp_x + t_0(v_B - v_x), \quad (5)$$

где t_0 – некоторая постоянная;

v_x – скорость металла (тангенциальная);

v_B – линейная скорость вращения валков.

Модели (3) и (5) изменения удельных сил трения относят к разряду двухзвенных.

Проведем проверку на соответствие выражения (3) предельным условиям прокатки. Из теории известно, что предельная захватывающая способность валков возникает при $\alpha = 2f_y$. В этом случае очаг деформации представляет собой только зону отставания, и удельные силы трения на выходе металла из валков равны нулю. В первом приближении, принимая $\sin 2\left(\varphi - \frac{\alpha}{2}\right) \approx 2\left(\varphi - \frac{\alpha}{2}\right) rad$ и учитывая граничные условия на выходе металла из валков, для давления ($p_x = 2k$) и для удельной силы трения в предельном случае прокатки ($t_x = 0$) из уравнения (3) получаем $\alpha = 2f$. Как видно, выражение (3) отражает предельное условие прокатки в установившемся режиме.

Вводя во второй член выражения (3) коэффициент $n_1 = \left(\frac{2f}{\alpha}\right)^2$, из последнего

можно получить известное в теории уравнение для определения угла нейтрального сечения:

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2f} \right).$$

Проведенный анализ показывает, что предлагаемая модель трения соответствует предельным и кинематическим условиям прокатки.

В работе [5] А.П.Грудев сделал существенное замечание относительно формулы К.Н.Шевченко, связанное с тем, что произведение $f p_x$ составляет только часть от общей удельной силы трения в контакте вала и полосы, тогда как в теории принято считать, что это произведение представляет собой полную удельную силу трения. Учитывая это, введем в уравнение (3) коэффициент n_2 , который по величине всегда меньше единицы и определяется из граничных условий при решении дифференциального уравнения Т.Кармана. Это возможно, так как модель (3) описывает изменение удельных сил трения по всей длине очага деформации как в зоне отставания, так и в зоне опережения. Следовательно, граничное условие, что при $h_x = h_1$, давление $p_x = 2k$ можно использовать для определения n_2 .

Кроме того, для того, чтобы произведение $n_2 f$ было близким к коэффициенту трения скольжения в упругой и начальной части очага деформации, ко второму слагаемому в качестве множителя введем функцию $\frac{\varphi - \alpha}{\alpha}$.

Окончательно предлагаемая модель распределения удельных сил трения в очаге деформации при прокатке приобретает вид:

$$\frac{t_x}{2k} = n_2 f \frac{p_x}{2k} + \frac{1}{2} \sin \left[2n_1 \left(\varphi - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \frac{\varphi - \alpha}{\alpha}. \quad (6)$$

Дадим некоторые пояснения в отношении методики расчета удельных сил трения согласно (6) и среднего коэффициента трения в очаге деформации.

Заметим, что этот коэффициент должен быть получен из решения дифференциального уравнения Т.Кармана с учетом (6) и равен его опытному значению для заданных условий прокатки. Поэтому процедура решения состоит из нескольких этапов. Предварительно следует задаться условным коэффициентом f . В первом приближении он может быть принят равным опытному значению коэффициента трения скольжения или рассчитан по одной из известных эмпирических формул, например, формуле А.П.Грудева [6]. В результате решения уравнения Т.Кармана с учетом модели трения (6) получаем эпюры распределения контактных напряжений и средний коэффициент трения $f_{\text{ср}}$. Если этот коэффициент не удовлетворяет опытными данными, то, варьируя величиной f , находим требуемое значение $f_{\text{ср}}$. В этом случае рассчитанное среднее давление металла на валки будет соответствовать опытному значению коэффициента трения и равновесию полосы в очаге деформации.

Для расчета $\frac{p_x}{2k}$, $\frac{t_x}{2k}$ и $f_{\text{ср}}$ с применением ЭВМ была разработана программа численного определения этих величин с использованием метода Рунге-Кутты.

По нашему мнению, эту методику расчета контактных напряжений и среднего коэффициента трения можно распространить на случаи тонколистовой горячей и холодной прокатки, а также при определении продольной устойчивости полосы в очаге деформации.

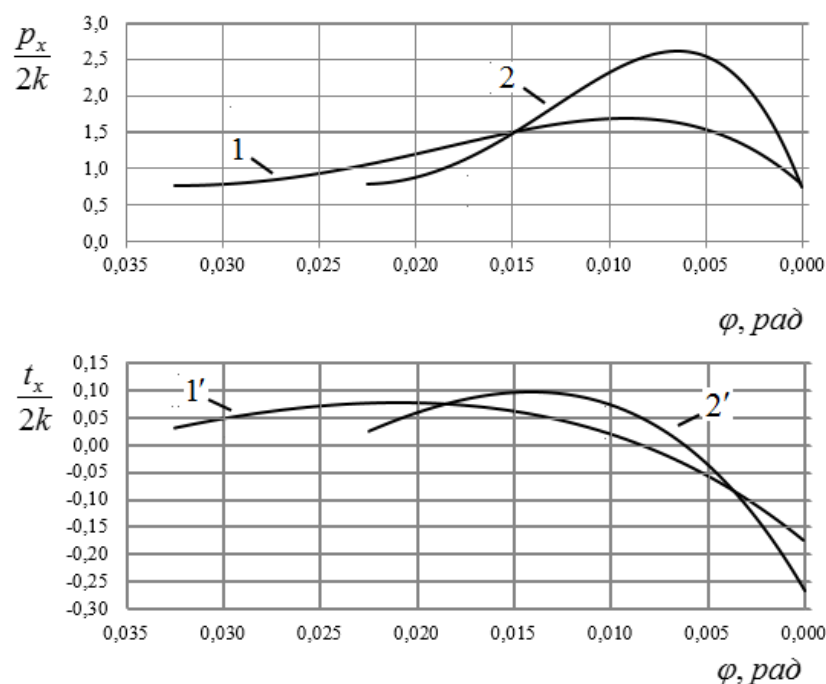
Результаты работы. Ниже приведены примеры расчета контактных напряжений при параметрах деформации, соответствующих опытной прокатке жести и тонкого листа. Так, в работе [7] приведены режимы обжатий, кинематические и силовые параметры при прокатке жести 0,2x855 мм на стане 1400. Расчеты распределения $\frac{P_x}{2k}$ и $\frac{t_x}{2k}$ проведены для случаев прокатки в третьей и четвертой клетях. Параметры деформации приведены в табл.1. Результаты вычислений показаны на рис.2 и в табл.2 (знаменатель).

Таблица 1 – Режимы деформации и силовые параметры при прокатке жести на стане 1400

№ клетки	Толщина полосы, мм		$\frac{\sigma_0}{\sigma_{T0}}$	$\frac{\sigma_1}{\sigma_{T1}}$	f_y	$\frac{P_{cp}}{2k}$	$\alpha_{спл}$	$v_B, \text{ м/с}$	$S, \%$	f	n_2
	h_0	h_1			f_{cp}						
3	1,24	0,73	0,238	0,223	0,049	1,21	0,0325	8,14	5,45	0,057	0,698
					0,049	1,24					
4	0,73	0,44	0,223	0,266	0,048	1,33	0,0225	13,56	7,55	0,059	0,565
					0,048	1,6					

Примечание: σ_0 и σ_1 – заднее и переднее удельные натяжения;

σ_{T0} и σ_{T1} – предел текучести металла до входа в очаг деформации и на выходе из него.



1 и 1' – $\frac{P_x}{2k}$ и $\frac{t_x}{2k}$ при прокатке в третьей клетке;

2 и 2' – $\frac{P_x}{2k}$ и $\frac{t_x}{2k}$ при прокатке в четвертой клетке

Рисунок 2 – Распределение контактных напряжений при прокатке металла в третьей и четвертой клетях стана 1400

Корректируя значение f , равенство между f_{cp} и опытным коэффициентом трения f_y ($f_{cp} = f_y = 0,049$) при прокатке в третьей клетке было достигнуто при $f = 0,057$ (табл.1). Заметим также, что произведение $f \cdot n_2 = 0,04$ существенно ниже среднего по очагу деформации коэффициента трения. Необходимо также отметить, что расчетные и опытные значения безразмерного среднего давления $\frac{P_{cp}}{2k}$ и опережения S достаточно близки. При расчете опережения угол нейтрального сечения определяли непосредственно из

эпюры распределения удельных сил трения.

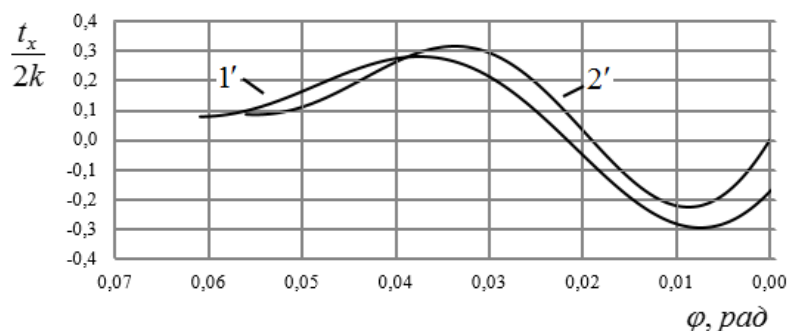
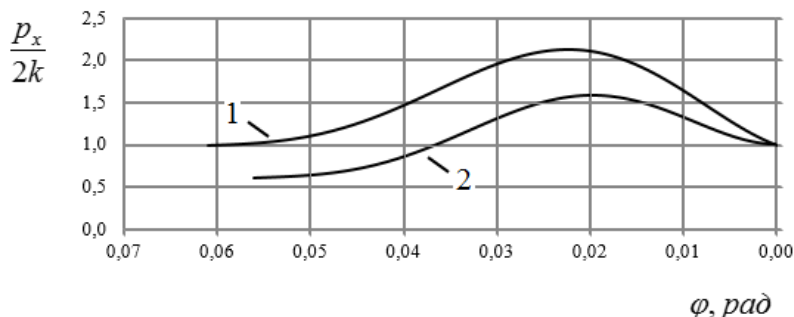
Аналогичные выводы можно сделать, анализируя данные прокатки металла в четвертой клетке.

Продолжая сравнительный анализ, рассмотрим распределение контактных напряжений при условиях прокатки, приведенных в работе [8]. Расчеты выполнены для случаев прокатки образцов под номерами фигур 94 и 97. Параметры прокатки и силовые характеристики деформации приведены в табл.2. Расчетные значения среднего давления $\frac{P_x}{2k}$ и опережения S показаны в знаменателе этой таблицы.

Таблица 2 – Режимы деформации и силовые параметры при холодной прокатке листовой стали в лабораторных условиях [8]

№ фигуры	Толщина полосы, мм		$\frac{\sigma_0}{\sigma_{T0}}$	$\frac{\sigma_1}{\sigma_{T1}}$	$S, \%$	$\frac{P_{cp}}{2k}$	$\alpha_{cпл}$	$l_{cпл}, мм$	$v_B, мм/с$	f_{cp}	f	n_2
	h_0	h_1										
94	1,95	1,50	0,394	0	1,4	1,05	0,056	7,98	50	0,16	0,21	0,68
					2,4	1,1						
97	1,95	1,32	0	0	5,7	1,55	0,061	9,82	42	0,12	0,21	0,41
					5,9	1,52						

Из табл.2 следует, что при холодной прокатке стальных образцов под номерами 94 и 97 так же, как и при прокатке жести (табл.1) расчетные и опытные значения среднего давления и опережения достаточно близки. Результаты расчетов также приведены на рис.3.



1 и 1' – $\frac{P_x}{2k}$ и $\frac{t_x}{2k}$ при прокатке образца 97;

2 и 2' – $\frac{P_x}{2k}$ и $\frac{t_x}{2k}$ при прокатке образца 94

Рисунок 3 – Распределение контактных напряжений в соответствии с результатами опытов [8]

на рис.3. Как видно, в этом случае картина распределения сил трения несколько отличается от эпюр, приведенных на рис.2. По-видимому, это связано с увеличением среднего коэффициента трения в очаге деформации. Сравнивая кривые распределения давления при прокатке образцов 94 и 97 с разным задним натяжением, приходим к известному выводу, что с увеличением заднего натяжения контактное напряжение $\frac{P_x}{2k}$ уменьшается.

Выводы. В работе предложена двухзвенная модель распределения удельных сил трения в очаге деформации, ко-

торая учитывает известные положения теории прокатки. Разработана методика расчета этих напряжений. Имеет место определенное соответствие между расчетными и опытными эпюрами удельных сил трения, а также значениями среднего давления, опережения и коэффициента трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / [А.Н.Леванов, В.Л.Колмогоров, С.П.Буркин и др.]. – М.: Металлургия, 1976. – 416с.
2. Семенюта А.Я. Определение удельных давлений при прокатке широких полос средней толщины / А.Я.Семенюта // ДМеТи. Обработка металлов давлением: научные труды. – М.: Металлургия, 1967. – Т52. – С.118-123.
3. Василев Я.Д. Модель напряжений трения при тонколистовой прокатке / Я.Д.Василев, А.В.Дементненко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2002. – №1. – С.29-33.
4. Шевченко К.Н. Закон трения при прокатке и другие замечания. / К.Н.Шевченко // Теория прокатки: материалы конференции по теоретическим вопросам прокатки. – М.: Металлургиздат, 1962. – С.459-461.
5. Грудев А.П. Внешнее трение при прокатке / А.П.Грудев. – М.: Металлургия, 1973. – 288с.
6. Грудев А.П. Теория прокатки / А.П.Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240с.
7. Василев Я.Д. Разработка энергосберегающих режимов натяжения на непрерывных станах холодной прокатки / Я.Д.Василев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №2. – С.34-38.
8. Королев А.А. Новые исследования деформации металла при прокатке / А.А.Королев. – М.: Машгиз, 1953. – 267.

Поступила в редколлегию 07.04.2015.

УДК 621.771.01

МАКСИМЕНКО О.П., д.т.н., профессор
ИЗМАЙЛОВА М.К., к.т.н., доцент
ЛОБОЙКО Д.И., аспирант
КУЗЬМИН Е.В., магистр

Днепродзержинский государственный технический университет

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОСЫ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ С НАТЯЖЕНИЕМ

Введение. В работе [1] разработана методика оценки продольной устойчивости простого процесса прокатки и предельной захватывающей способности валков, которая связана с определением среднеинтегральной результирующей продольных сил пластически деформируемого металла. Эта результирующая представляет собой силу сопротивления, реакцию на действие внешних сил. Поэтому если продольная результирующая направлена противоположно движению полосы, то прокатка будет устойчивой, без пробуксовок. В случае равенства её нулю – процесс совершается в предельных условиях, а при положительном векторе этой силы (по ходу прокатки) деформация металла становится невозможной. Кроме того, как следует из [1], потеря равновесия полосы в зоне контакта её с валками может возникать при наличии зоны опережения.

Постановка задачи. Разовьем идею о продольной устойчивости процесса на случай прокатки с натяжением полосы. Пусть в этих условиях деформации выполнено численное решение уравнения Т.Кармана и получена эпюра распределения давления по