

УДК 621.77

Кириенко А. А.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТЕЙ ПОГЛОЩЕННОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ПРОКАТКЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ ФАКТОРОВ ТРЕНИЯ

Горячая прокатка на блюминге – высокоэффективный процесс производства полуфабриката. Ранее в работах была рассмотрена проблема распределения энергии при прокатке [1] и влияние трения на технологические условия процесса проката крупных слитков на блюминге [2]. Так же был рассмотрен возможный вариант интенсификации процесса прокатки с помощью резонансно вибропластического эффекта, где было показана связь между вязкостью и частой сдвижных колебаний, но величина вязкости не определялась [3]. Так же в работе указано на значения фактора трения и степени его адекватности на этапе подбора к математической модели [4].

Целью работы является определение частей энергии, которая поглощается при прокатке с учетом влияния фактора трения.

При прокатке металла на блюминге определяющее значение имеет давление металла на валки и его абсолютные значения, а также фактор трения, который достигает при прокатке на блюминге максимальной величины 0,577, особенно при первых проходах при чередовании захвата с пробуксовкой. Согласно экспериментальным данным при прокатывании блюмов на блюминге наблюдается следующая эпюра трения (рис. 1).

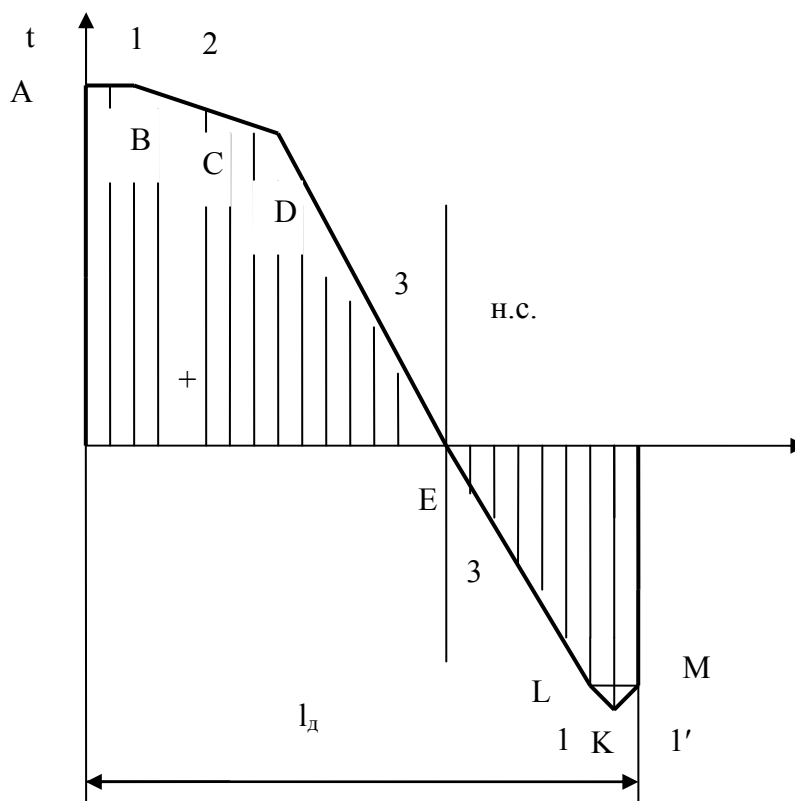


Рис. 1. Эпюра силы трения, которая наблюдается при прокатке на блюминге: 1 – зона скольжения; 2 – зона сдвига приконтактных шаров металла; 3 – зона прилипания

Приняв радиальное давление металла на валки как заряд  $dp_r$ , а напряжение в данном слое металла  $\sigma$  за потенциал, то прирост работы  $dA_r$  по перемещению заряда в поле напряженного металла, что позволяет рассмотреть прирост давления и его соотношение с работой [5].

Рассмотрев давление как заряд  $dp_r$ , а дугу контакта металла с валком  $L$  как поделенную на участки  $L_{\text{дол}}$ , где каждый участок дуги контакта имеет определенный потенциал прироста давления  $dp_{r,i+1}$  по сравнению с предыдущим (табл. 1).

Таблица 1

Дуга контакта металла с валком  $L$ , поделенная на участки  $L_{\text{дол}}$ .

№ прохода	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$	$L$
I	0.029	0.058	0.058	0.058	0.0145	0.0145	0.23216
II	0.0276	0.0553	0.0553	0.0553	0.0138	0.0138	0.22135
III	0.029	0.058	0.058	0.058	0.0145	0.0145	0.23216
IV	0.0276	0.0553	0.0553	0.0553	0.01383	0.01383	0.22135
V	0.0276	0.0553	0.0553	0.0553	0.0138	0.0138	0.22135
VI	0.0276	0.0553	0.0553	0.0553	0.0138	0.0138	0.22135
VII	0.0262	0.0525	0.0525	0.0525	0.0131	0.0131	0.21
VIII	0.0262	0.0525	0.0525	0.0525	0.0131	0.0131	0.21
IX	0.0262	0.0525	0.0525	0.0525	0.0131	0.0131	0.21
X	0.0262	0.0525	0.0525	0.0525	0.0131	0.0131	0.21
XI	0.0253	0.0506	0.0506	0.0506	0.0126	0.0126	0.202515
XII	0.026	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.013	0.20838
XIII	0.0287	0.0574	0.0574	0.0574	0.0143	0.0143	0.229782

Соотношение  $i$ -го участка с предыдущим  $i-1$ , выражается как дифференциал участков дуги контакта  $\Delta L = L_i - L_{i-1}$ , который находится за эпюрой трения. Приняв функцию распределения давления за корневую  $p = -\sqrt{L}$  [6] и проинтегрировав данное выражение, потенциал прироста давления на данном участке можно выразить следующим образом:

$$dp_{r,i+1} = \frac{p_{cp}}{L} \left| \frac{\Delta L_{\text{дол}}^{1.5}}{1.5} \right|, \quad (1)$$

где  $dp_{r,i+1}$  – потенциал прироста давления;  $p_{cp}$  – среднее значение давления металла на валки;  $\Delta L$  – дифференциал участков дуги контакта.

Так при среднем давлении металла на валки 75,4–88,7 (МПа) (табл. 2).

Таблица 2

Среднее давление металла на валки  $p_{cp}$  (МПа) для тринадцати проходов на блюминге

№ прохода	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
$p_{cp}$ (МПа)	75,4	77,9	82,8	86,7	80,5	79,9	85,6	87,5	88,7	81,2	79,6	77,8	86

Применив, потенциал прироста давления для шести участков дуги контакта по данной формуле получим, следующие результаты, которые показывают значение каждой части дуги контакта по возможности приращения давления (табл. 3).

Данные результаты показывают, что участки дуги контакта имеют разный потенциал прироста давления металла на валки, так на участке прилипания рис. 1 зона 3 потенциал прироста давления металла на валки равен нулю, а на участке скольжения после нейтрального сечения рис. 1 зона 1 потенциал прироста давления принимает отрицательную величину.

Соответственно разные участки дуги контакта имеют разный потенциал прироста давления, что влияет на поглощение ими энергии через выполненную работу. Таким образом, через потенциал прироста давления можно определить значение данного участка дуги контакта на долю выполненной работы.

Работа, которая выполняется в очаге деформации, пропорциональна давлению металла на валки [7]:

$$\begin{cases} \frac{A_{сж}}{A} + \frac{A_U}{A} + \frac{A_L}{A} = 1; \\ \frac{P_{сж}}{P_{cp}} + \frac{P_U}{P_{cp}} + \frac{P_L}{P_{cp}} = 1, \end{cases} \quad (2)$$

где  $A$  – полная работа прокатки;  $A_{сж}$  – работа преодоления сопротивления статического сжатия;  $A_U$  – работа преодоления дополнительного сопротивления деформации в результате действия скорости деформации;  $A_L$  – работа, вызванная трением при скольжении металла по поверхности валка;  $p_{сж}$  – сопротивления статического сжатия;  $p_U$  – дополнительное сопротивление деформации от действия скорости деформации;  $p_L$  – дополнительного сопротивления от трения при скольжении металла по поверхности валка;  $p_{cp}$  – среднее давление металла на валки.

Таблица 3

Значение потенциала прироста давления металла на валки  $\Delta P$  (МПа) по участкам дуги контакта  $L_n$  и номера прохода

№ прохода	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$
I	33,85	61,89	0	0	- 83,77	0
II	34,148	62,44	0	0	- 84,49	0
III	37,17	67,965	0	0	- 91,99	0
IV	38,005	69,49	0	0	- 94,04	0
V	35,29	64,52	0	0	- 87,312	0
VI	35,045	64,04	0	0	- 86,66	0
VII	36,55	66,824	0	0	- 90,45	0
VIII	37,36	68,31	0	0	- 92,46	0
IX	37,87	69,244	0	0	- 93,726	0
X	34,67	63,39	0	0	- 85,8	0
XI	33,37	84,9	0	0	- 82,59	0
XII	33,09	60,509	0	0	- 81,9	0
XIII	38,41	70,27	0	0	- 95,1	0

Среднее давление металла на валки можно определить по формуле А. П. Чекмарева [8] через суму давлений:

$$p_{cp} = p_{сж} + p_U + p_L, \quad (3)$$

где  $p_{сж}$  – сопротивление статическому сжатию;  $p_U$  – сопротивление деформации от действия скорости деформации;  $p_L$  – дополнительное сопротивление деформации при скольжении металла по поверхности валка:

$$p_{сж} = \sigma_{сж} = 2\tau, \quad (4)$$

где  $p_{сж}$  – сопротивление статическому сжатию;  $\sigma_{сж}$  – напряжение сжатия;  $\tau$  – скалывающее напряжение равное:

$$\tau_u = \eta \frac{du}{dy}, \quad (5)$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости (внутреннее трение), Па·с.;  $\frac{du}{dy}$  – градиент скорости.

$$p_U = \eta \frac{2v \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}}{H + h}, \quad (6)$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости;  $v$  – скорость прокатки;  $H$  – начальная высота сечения полосы;  $h$  – конечная высота сечения полосы;  $R$  – радиус валков;  $\Delta h$  – обжатие за проход.

$$p_L = p' \frac{1.6f \sqrt{R\Delta h} - 1.2\Delta h}{H + h}, \quad (7)$$

где  $p' = p_{сж} + p_U = k$  – динамическая граница текучести;  $f$  – коэффициент внешнего трения;  $H$  – начальная высота полосы;  $h$  – конечная высота полосы;  $R$  – радиус валков;  $\Delta h$  – обжатие за проход.

Работа [3] посвящена интенсификации процесса прокатки с использованием вибропластического эффекта, где наибольшее внимание уделялось частоте колебательного движения и в меньшей степени вязкости металла в очаге деформации. Тем не менее, вязкость входит в формулу А. П. Чекмарев [8] для определения среднего давления металла на валки  $p_{cp}$ , через сумму давлений. Вязкость является важнейшим компонентом в формуле для определения всех трех слагаемых, входя в них в качестве множителя.

Недостатком данной работы было то, что вязкость рассматривалась как постоянная величина и без учета влияния на нее сил трения. Применяв формулу Ньютона [9] для определения касательных напряжений:

$$\sigma_\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy}, \quad (8)$$

где  $\sigma_x$  – тангенциальное напряжение;  $du$  – скорость перемещения металла м/с;  $dy$  – расстояние от центра металла к слою, который движется м;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Представив тангенциальное напряжение  $\sigma_x$  через площадь контакта  $F_{ij} = B_i \cdot L_{ij}$  ( $i$  – номер прохода;  $j$  – номер участка дуги контакта) и силу трения  $T$ .

Решив формулу 8 по отношению к вязкости, формула 8 примет вид:

$$\eta_{ij} = \frac{T_{ij}}{B_i \cdot L_{ij}} \frac{\Delta y_i}{\Delta u_{ij}}, \quad (9)$$

где  $\eta_{ij}$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $T_{ij}$  – сила трения, Н;  $\Delta u$  – скорость перемещения металла, м/с;  $\Delta y$  – расстояние от центра металла к слою, который движется, м;  $B_i$  – ширина полосы раската, м;  $L_{ij}$  – длина участка дуги контакта, м;  $i$  – номер прохода;  $j$  – номер участка дуги контакта.

Данная формула позволяет рассчитать дифференциал вязкости  $\Delta \eta_{ij}$  при переходе из одного участка дуги контакта к другому, определить значение этого потенциал в суммарном давлении через прирост давления от изменения вязкости  $p_\eta$ . Тогда формула примет вид:

$$p_{cp} = p_{сж} + p_U + p_L + p_\eta, \quad (10)$$

$p_{сж}$  – сопротивление статическому сжатию;  $p_U$  – сопротивление деформации от действия скорости деформации;  $p_L$  – дополнительное сопротивление деформации при скольжении металла по поверхности валка;  $p_\eta$  – дополнительное сопротивление деформации от изменения вязкости.

Рассчитано на ЭВМ:

1. Вязкость для каждого участка дуги контакта.
2. Дифференциал вязкости при переходе из одного участка дуги контакта к другому.
3. Дополнительный прирост величины давления металла на валки, от прироста вязкости для каждой из троих компонент формулы 10, и просуммировав их.
4. Соотношение каждой составляющей давления металла на валки к среднему давлению (табл. 4).

Получили следующее результаты процентного соотношения давления от изменения вязкости  $p_\eta$  к общему давлению  $p_{cp}$  для шести участков дуги контакта.

Таблица 4

Процентное соотношение давления от изменения вязкости  $P_\eta$  к общему давлению  $P_{ср}$  для шести участков дуги контакта

N прохода	Участок дуги контакта					
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$
I	0	44,9	72,9	48,8	60,2	0
II	0	56,9	89,9	50	97,8	0
III	0	91,4	97,3	49,5	64,7	0
IV	0	55,3	84,4	50	96,4	0
V	0	54,2	82,3	50	96,2	0
VI	0	53,7	84,1	50	97,2	0
VII	0	43,1	86,5	49,9	95,6	0
VIII	0	77,1	97,3	49,9	95,1	0
IX	0	56,9	90,5	50	95,1	0
X	0	53,6	86,2	50	96,5	0
XI	0	53,9	85,2	49,9	82,6	0
XII	0	53,5	88,3	50	97,1	0
XIII	0	53,8	89,7	49,8	47,6	0

### ВЫВОДЫ

Выполненный комплекс исследований позволил установить, что участки дуги контакта имеют разный потенциал прироста давления металла на валки. Так на участке прилипания (рис. 1 зона 3) потенциал прироста давления металла на валки равен нулю, а на участке скольжения после нейтрального сечения (рис. 1 зона 1) потенциал прироста давления принимает отрицательную величину.

Исследование вязкости и ее зависимости от силы трения показывает, что прирост давления от изменения вязкости (на участках дуги контакта II, III, IV, V) колеблется от 43,1 до 97,8 % и достигает максимума на пятом участке дуги контакта, где он находится в пределах от 47,6 до 97,8 %, а на участке I, VI прирост давления от изменения вязкости равен нулю.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кириенко А. А. Распределение энергии при прокатке / А. А. Кириенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : збірник наукових праць. Тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – № 42. – 152 с.
2. Чумаков В. П. Совершенствование процесса прокатки в дуо реверсивной клетки / В. П. Чумаков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : збірник наукових праць. Тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – № 42. – 152 с.
3. Дидык Р. П. Резонансно-вибропластический эффект в обработке металлов давлением / Р. П. Дидык, Е. В. Кузнецов, В. Ф. Балакин // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ : НМетАУ, 2002 р. Том 5. – С. 152–158.
4. Мазур И. П. Математическое моделирование процессов холодной прокатки на непрерывных широкополосных станах / И. П. Мазур, А. П. Долматов, С. С. Борисов // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – 2009. – № 1 (20). – С. 67–103.
5. Сопротивление деформации и пластичность металлов (при обработке давлением) / В. С. Смирнов, А. К. Григорьев, В. П. Пакудин, Б. В. Садовников. – М. : Металлургия, 1975. – 260 с.
6. Меерович И. М. Измерение усилий при прокатке / И. М. Меерович, А. С. Филатов. – Государственное научно-техническое издательство литературы по черной металлургии : Москва, 1963. – 150 с.
7. Прокатка на блюминге / И. Я. Тарновский, Е. В. Пальмов, В. А. Тягунов, С. В. Макаев, В. П. Котельников, Л. В. Андреюк. – Государственное Научно-Техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии : Москва, 1963. – 220 с.
8. Теория прокатки и крупных слитков / А. П. Чекмарев, В. Л. Павлов, В. И. Мелешко, В. А. Токарев. – М. : Металлургия, 1968. – 186 с.
9. Королев А. А. Механическое оборудование прокатных цехов / А. А. Королев. – [Изд. 2, доп. и перераб.]. – М. : Металлургия, 1965. – 216 с.

Кириенко А. А. – аспирант КТУ.

КТУ – Криворожский технический университет, г. Кривой Рог.

E-mail: kir32010@rambler.ru